



Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers

**Effet de l'essence forestière sur le fonctionnement
biogéochimique et biologique
d'un écosystème forestier**

**Présentation du site expérimental
de la forêt de Breuil-Chenu**

Responsable scientifique : Jacques RANGER
Responsable technique : Dominique GELHAYE
INRA Centre de Nancy
Unité Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers
54280 Champenoux
tel : 03 83 39 40 68
fax 03 83 39 40 69
ranger@nancy.inra.fr
dgelhaye@nancy.inra.fr

Avril 2006

I- Avant propos

L'introduction massive de résineux plus productifs, et à développement plus rapide que la forêt native, soutenue financièrement par le Fonds Forestier National (FFN) et destinée à résorber le déficit de la filière bois après la seconde guerre mondiale, a conduit à une transformation importante des paysages, en particulier en basse et moyenne montagne. Le boisement des terres libérées par l'agriculture, associé à une sylviculture prônant des peuplements équiennes, mono-spécifiques et denses se traduit par une modification notable du paysage et parfois par un caractère inhospitalier de ces espaces boisés, qui sont relativement impénétrables dans leur phase initiale de développement.

Les observations ponctuelles trop vite généralisées sur l'évolution des sols, de la diversité biologique ou de la qualité des eaux de surface, ont conduit à des polémiques importantes sur l'opportunité des boisements résineux, traduisant en fait une prise de conscience écologique de notre Société dès les années 70.

Des études détaillées du rôle des boisements résineux sur les sols, les écosystèmes et les eaux de surface, ont alors été entreprises en France sous l'égide de la DGRST (Bonneau et al., 1977), puis du CNRS (PIREN) (Bonneau et al., 1982, 1983, 1984).

La méthode employée était naturellement celle qui pouvait donner rapidement des informations : la méthode dite des 'couples' de peuplement fut utilisée pour comparer les sols sous des peuplements existants, pour lesquels il avait été vérifié que seul le type de peuplement différait. Elle fut utilisée pour étudier l'évolution des sols (Nys, 1981, 1988), pour étudier le fonctionnement comparé des écosystèmes feuillus et résineux par approche analytique (Ranger J. et al., 1983, Ranger D. et al., 1983, Nys et al., 1983, Nys, 1988), pour étudier le fonctionnement comparé des écosystèmes feuillus et résineux par approche expérimentale *in situ* utilisant l'évolution de sondes minérales, les minéraux tests (Ranger et al., 1985, 1986, 1990 ; Augusto, 1999 ; Augusto et al., 2000, 2001, 2002).

Les limites de la méthode des couples, qui ne permet souvent pas de contrôler strictement tous les facteurs de variation, a conduit à la création d'un dispositif spécifique ou des plantations de diverses essences feuillues et résineuses ont été substituées à la forêt native. C'est l'origine du dispositif de Breuil installé en 1976 par la Station de Recherche sur les Sols et la Fertilisation, sous la Direction de Maurice Bonneau (Bonneau et al., 1977), et utilisé dans les projets actuels 25 ans après sa mise en place.

II- Objectifs généraux du site atelier

Les recherches menées sur le site atelier de Breuil appartenant au réseau des sites Observatoires de Recherche sur l'Environnement (OREF-OreT, coordonné par le GIP Ecofor) se situent sur le moyen et sur le long terme.

L'objectif général est d'étudier l'effet de la substitution d'essence sur le fonctionnement biogéochimique et biologique des écosystèmes. Les observations viseront à mettre en évidence les changements au niveau des sols (phase solide, solutions, phase minérale et phase organique). Les mécanismes sous-jacents seront identifiés, et les causes, physiques (pédoclimat induit), chimiques ou biochimiques (modifications de la qualité et de la quantité des matières organiques produites), biologiques (prélèvement de la végétation, diversité et fonctionnalité des populations microbiennes et fongiques associées) seront analysées à l'échelle du sol entier et de sites fonctionnels particuliers (humus, horizons organo-minéraux, rhizosphère), et à celle de l'écosystème.

Ces données permettront d'améliorer les connaissances théoriques sur les substitutions d'essences, et permettront d'étayer les recommandations pour les aménagements des écosystèmes forestiers. La substitution d'essence est en effet très fréquente dans les aménagements forestiers, et il est par conséquent important d'en identifier au plus juste les effets (Augusto et al., 2001).

Les mots-clés de ce projet sont les suivants ; écologie fonctionnelle, écologie quantitative, biogéochimie, biologie, cycles biogéochimiques, processus du fonctionnement des sols, approche systémique, modélisation

III- Matériels et Méthodes

III-1 Le site expérimental

- La situation géographique : le site expérimental est situé dans les parcelles 7 et 8 de la forêt domaniale de Breuil-Chenu (Nièvre-Morvan) (**figure 1**). Il constitue une série Recherche dans l'aménagement du massif. L'altitude est de 650 m et la situation morphologique locale du terrain est un plateau légèrement incliné vers le Sud.
- Le climat général : la pluviométrie moyenne annuelle trentenaire à Château-Chinon est de 1280 mm (dominante hivernale, et minimums relatifs en avril et juillet), la température moyenne annuelle de 9°C

(5,4°C de moyenne des minimas mensuels, et 12,5°C de moyenne des maximas mensuels) et l'ETP de 640 mm.

- La géologie : le substrat géologique est constitué par le granite leucocrate à gros grains et deux micas de la Pierre-qui-Vire, dont les compositions minéralogique et chimique sont les suivantes (Seddoh, 1973) : 23,5 % de quartz, 44 % de feldspath K, 28,5 % de plagioclase, 1,6 % de biotite chloritisée et 1,6 % de muscovite, conduisant à des teneurs de 0,5 % de MgO, 0,6 % de CaO, et 4,4 % de K₂O. Ce granite est recouvert par une couche variable mais peu épaisse de limon éolien ; l'ensemble ayant subi une cryoturbation de surface variable mais généralisée au cours du quaternaire (Aurousseau, 1976).
- Les sols : Il s'agit de sols acides (pH compris entre 4 et 4,5) et désaturés (taux de saturation compris entre 5 et 15 % en fonction des horizons) de type Alocrisols. La texture du sol est sablo-limoneuse (60 % de sables et moins de 20 % d'argiles), plus argileuse dans l'arène en profondeur. Les blocs de granité altéré sont répartis de manière erratique sur le plateau, avec une augmentation de fréquence en rupture de pente. L'humus de la forêt native est dégradé (dysmoder épais) et une crypto-podzolisation apparaît en surface, morphologiquement marquée par un horizon brun chocolat discontinu. L'enracinement est profond.
- les peuplements : la forêt native, un taillis-sous-futaie vielli à réserves de hêtre (dominant) (*Fagus sylvatica* L) et de chêne (*Quercus sessiliflora* Smith) et taillis de diverses essences (*Quercus sessiliflora* Smith, *Betula verrucosa* Ehrh., *Corylus avellana* L.) a été coupée à blanc et remplacée par des plantations de diverses essences feuillues et résineuses : le chêne (*Quercus sessiliflora* Smith), le Hêtre (*Fagus sylvatica* L.), l'épicéa commun (*Picea abies* Karst.), le Douglas (*Pseudotsuga menziesii* Franco), le sapin de Nordmann (*Abies nordmanniana* Spach.), le pin laricio de Corse (*Pinus nigra* Am. ssp *laricio* Poiret var *corsicana*).
- le dispositif expérimental : il s'agit d'un dispositif en deux 'faux' blocs comprenant chacun les traitements suivants :
 - une parcelle représentant la forêt initiale qui n'est pas un témoin expérimental puisqu'elle n'a pas subi la préparation par andainage (bloc I) ou brûlage (bloc II) des rémanents d'exploitation.
 - les 5 parcelles plantées en hêtre, chêne, épicéa, Douglas, sapin et pin.
 - 4 parcelles d'épicéa commun, de Douglas de pin Laricio et de sapin de Nordmann, fertilisées et amendées dès la plantation pour tester a priori l'effet de la remédiation à l'acidification du sol lié à l'introduction des essences résineuses.

Le dispositif a été installé en 1976 dans le cadre d'un contrat DGRST « Modification de la fertilité des sols sous boisements artificiels de résineux purs » coordonné par Maurice Bonneau, Directeur de la Station de Recherches sur les Sols et la Fertilisation de l'INRA de Champenoux. : Maurice Bonneau (Directeur de Recherches), Claude Nys (Assistant de Recherche cartographie – sols), Michel Adrian (TR terrain), Dominique Gelhaye (Adjoint terrain), Jitka Lhomme (analyste chimiste).

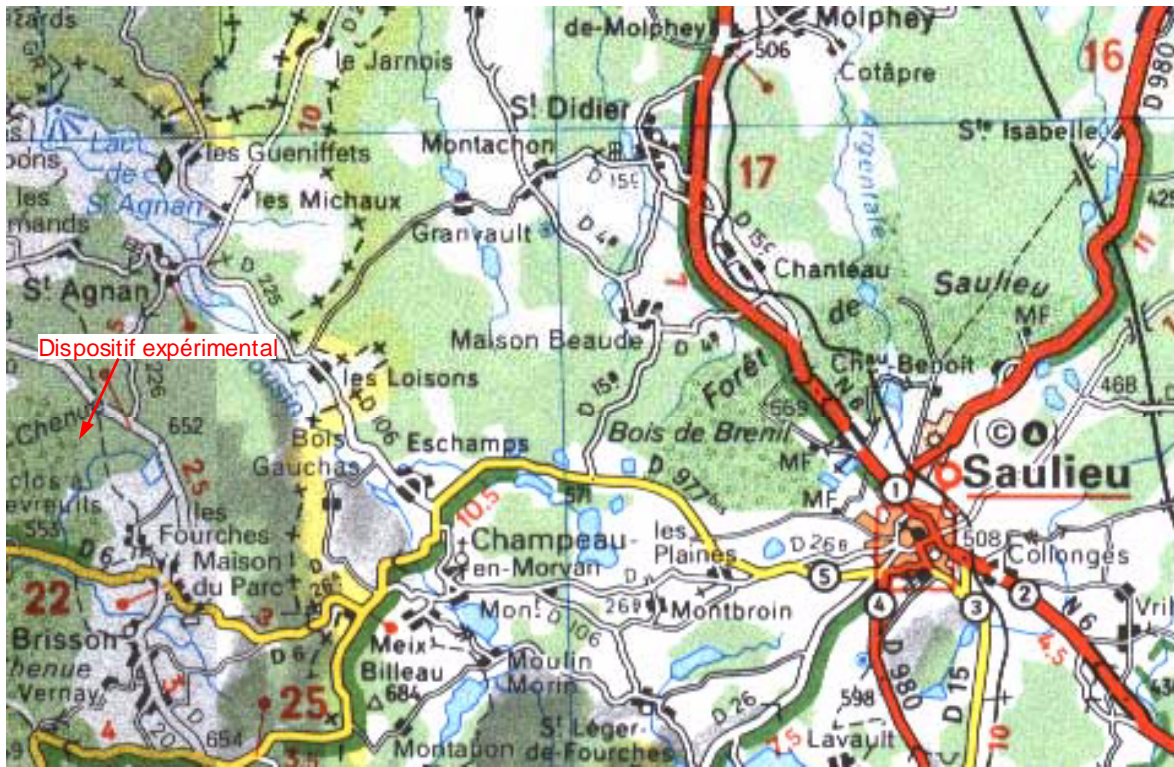
Chaque parcelle fait environ 10 ares. Les apports d'amendements et fertilisation sont les suivants : en 1979 (37 g de P₂O₅, 15 g de K₂O, 3,4 g de N appliqués par plant sous forme de superphosphate triple à 45 %, sulfate de potasse et ammonitrate) et en 1983 épandage en plein de 160 kg de P₂O₅ et 1120 kg de CaO sous forme de Récalcit compacté (calcaire broyé phosphaté). La densité de plantation pour les peuplements feuillus est de 15000 plants/ha et de 1600 plants/ha pour les peuplements résineux.

Le plan de l'expérience est présenté à la **figure 2**.

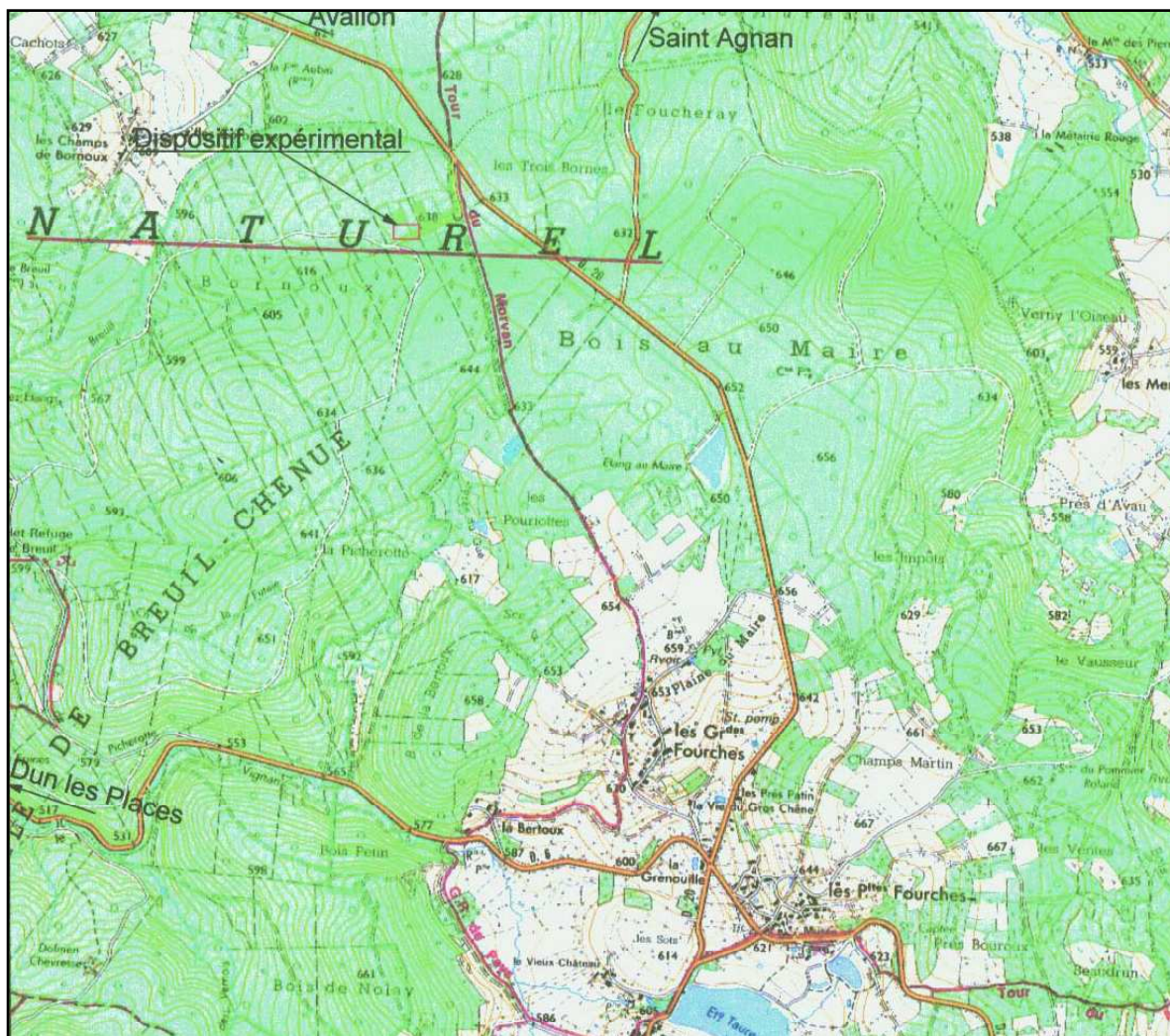
III-2 – Le climat local et le pédoclimat

Une station météorologique a été mise en place en 2005. Elle est positionnée sur une tour de 12m où sont mesurés les paramètres suivants : température de l'air, intensité lumineuse globale, vitesse du vent, humidité relative de l'air, pluviométrie. Ces données permettent de calculer l'ETP locale sur un pas de temps semi-horaire. De plus, la pluie fait l'objet d'un prélèvement journalier grâce à un partiteur automatique ; les échantillons seront analysés pour quantifier les dépôts humides.

Le microclimat du peuplement et le pédoclimat sont observés depuis 2001 dans deux couples de peuplements feuillus et résineux : hêtre-Douglas et chêne-épicéa. La température et l'humidité relative de l'air sont mesurées à 1,30 m au pas de temps horaire. La température du sol est mesurée sous la litière (4 répétitions), à 15 cm (4 répétitions), et à 30 et 60 cm de profondeur (2 répétitions). L'humidité du sol est mesurée sur 5 profils au pas de temps de deux heures, par peuplement, à 15, 30 et 60 cm de profondeur, par des sondes enterrées (TDR Système Trase BE Soil Moisture).



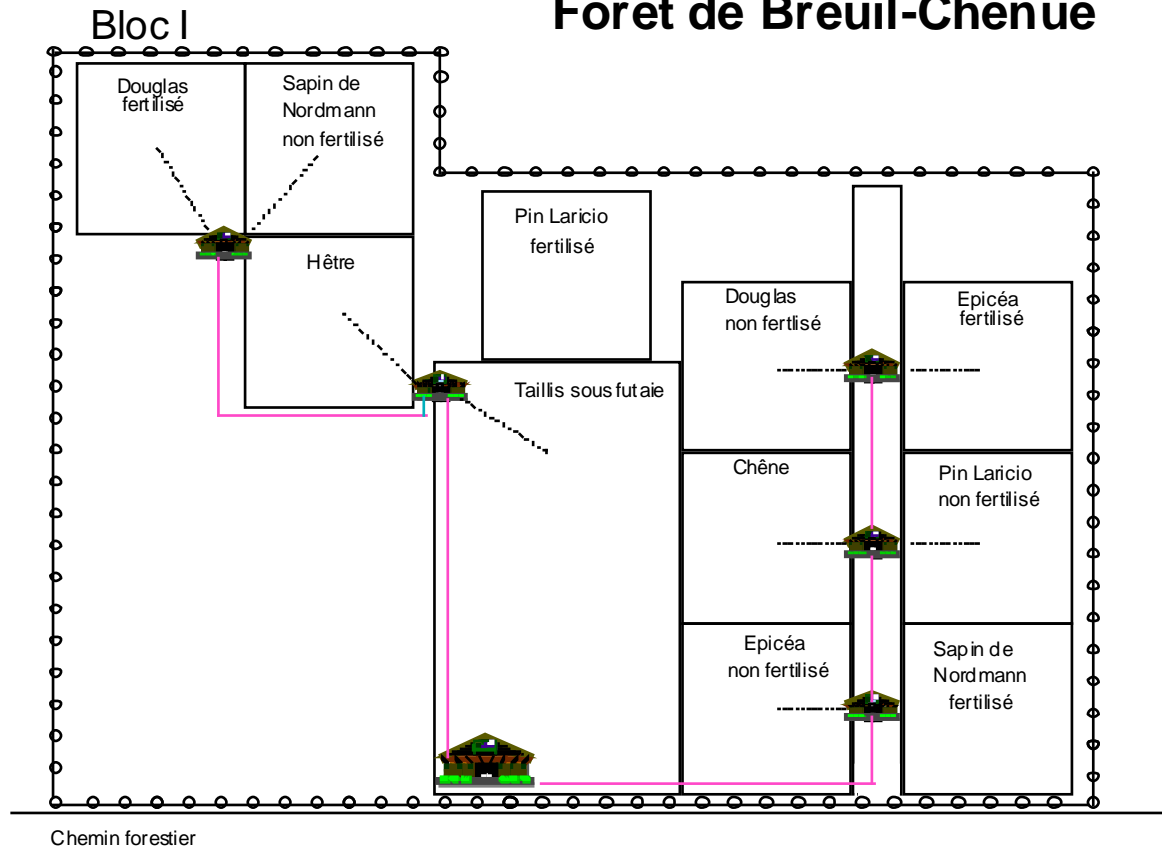
extrait de la carte Michelin 243 1:200000



extrait de la carte ign 1:25000 monsauche-les settons 2823 0

Figure 1

Forêt de Breuil-Chenué



Bloc II

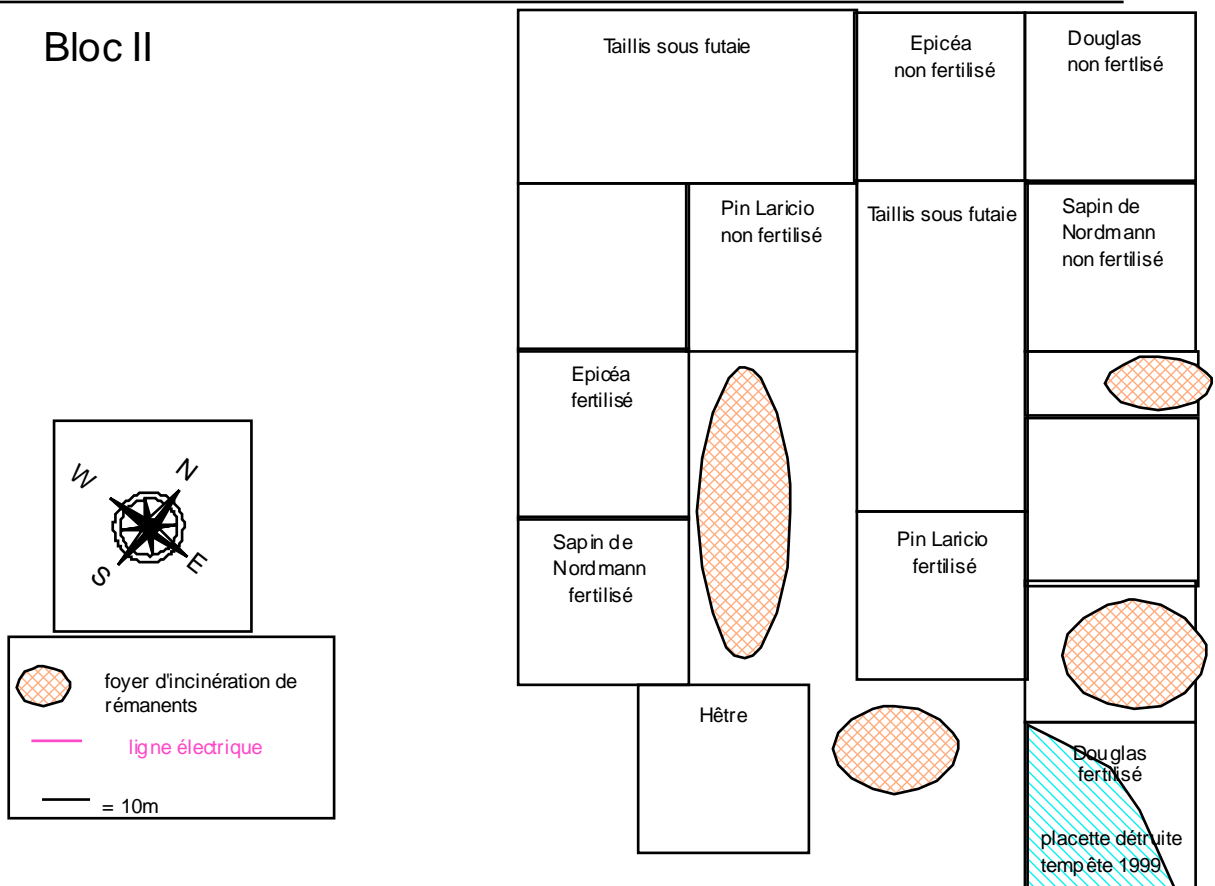


figure 2

III-3 Mesure des stocks d'éléments dans les compartiments

Le **tableau 1** décrit les mesures réalisées ou en cours de réalisation, sur les peuplements et les sols pour entre autres quantifier les stocks des différents éléments, et les réserves en eau et éléments nutritifs disponibles pour la végétation.

Le dispositif implique un suivi diachronique car l'effet de peuplements ne présentant pas la même vitesse de développement doit être appréhendé au cours des différents stades de leur développement.

| Compartiment | Mesure des stocks |
|----------------------------------|--|
| Biomasse et minéralomasse | <ul style="list-style-type: none"> - Inventaire annuel de tous les peuplements - Prélèvement destructif d'arbres répartis sur toutes les classes de circonférence dans le bloc I (résineux : 10 arbres ; feuillus : 15 arbres) - Mesures in situ des paramètres dendrométriques et des poids des différents compartiments (tronc à différentes coupes ; branches) - Echantillonnage par compartiment pour mesurer le degré de sécheresse et réaliser les analyses chimiques totales (C, N, P, K, Ca, Mg) - Etablissement de tarifs de biomasse et minéralomasse - Quantification des biomasse et minéralomasse compartimentées |
| Sols | <ul style="list-style-type: none"> - Description d'une fosse pédologique dans chaque peuplement - Prélèvement des échantillons pour une caractérisation globale des sols - Prélèvement systématique en 16 points (plantations) ou 20 points (forêt native) répartis sur une grille géoréférencée pour tester l'existence d'une structure géographique liée la variabilité spatiale naturelle ou induite par l'andainage. - 'horizons' prélevés [0-5], [5-10], [10-15], [15-25], [25-40], [40-55], [55-70] - Mesures physiques : granulométrie (4 profils complets dans chaque peuplement + horizons profonds de la fosse centrale) ; densité apparente (tous les prélèvements) ; densité réelle, stabilité structurale, infiltrométrie, courbes rétention en eau (sur des sous-échantillons) - Mesures physico-chimiques et chimiques : <ul style="list-style-type: none"> - éléments totaux : <ul style="list-style-type: none"> • horizons hologaniques : C, N, P, K, Ca, Mg sur 1/2 profils • horizons organo-minéraux et minéraux : tous éléments sur 2 profils par peuplement - éléments libres : Fe, Al, Si (voire autres éléments de type Mg) sur 8 profils par peuplement de 0 à 15 cm et 4 profils sur tout le profil ; méthodes Mehra et Jackson (1962), Tamura (1958), Tamm (1922), McKeague et Schuppli (1982) - éléments échangeables : analyse systématique sur tous les échantillons (Rouiller et al, 1981) - pHeau, pH KCl, tous les échantillons - Corg, Norg, [0-5], [5-10], [10-15], [15-25], [25-40] - Passi. sur tous les échantillons (Duchaufour et Bonneau, 1959) - Minéralogie : séparations granulométriques et détermination qualitative des minéraux par RX et analyses chimiques ; étude des argiles y compris les phases très fines (<0,1µ) (4 profils par peuplement en surface et 2 en profondeur) |

III-4- Mesure des flux entre les compartiments de l'écosystème

Le **tableau 2** résume les flux mesurés dans cette expérience et les méthodologies utilisées.

| Flux mesuré | Méthode |
|---|---|
| Chutes de litière | - 5 collecteurs de 0,5 m ² dans les plantations et de 10 collecteurs dans le TsF - Récolte tous les 3 mois (matière sèche, tri par compartiments, contenu minéral) |
| Prélèvement de nutriments par les arbres | - Quantification à partir de l'immobilisation moyenne annuelle et des restitutions par les litières et la récréation (Ranger et Bonneau, 1984). |
| Minéralisation de la matière organique | - Minéralisation potentielle de C et N (nette et brute) effectuées sur des échantillons frais de sols et mis à incuber en conditions contrôlées (Kunde, 2001 ; Colin-Belgrand et al., 2002, Pasteur, 2005, Zeller, ; 2005) - Mesures de biodégradation <i>in situ</i> : substrats modèles cellulose & lignine, litières (Moukoui et al., 2006). - Etude des populations responsables de la biodégradation (Kulhankova et al., 2006) - Mise en place de litière de hêtre marquée par ¹⁵ N pour suivre la dynamique de décomposition dans les hêtraies (native et plantation) (Zeller et al., 2001) |
| Pluies incidentes | - Pluviomètre avec récolte journalière d'échantillon |
| Pluiolessivats | - 4 gouttières de 2m par peuplement (remplacées par 4 bacs en hiver) - 10 collecteurs de ruissellement de troncs (2 fonctionnels en hiver) |
| Solutions du sol | - Litières : 2 répétitions de 5 gouttières de 50 x 4 cm par peuplement - Horizons organo-minéraux : 5 répétitions de bougies poreuses à -15 cm ; - 30 cm ; - 60 cm dans tous les peuplements + 4 répétitions à -100 cm dans le peuplement témoin de la forêt native. - Mini-horizons de surface 4 fois 8 répétitions à -5 et -10 cm dans TsF, épicéa et chêne - Les solutions fortement liées seront prélevées par centri fugation d'échantillons frais (bloc II) (Jaffrain et al., 2006) |

La **planche photo** de la dernière page de couverture présente ces matériels installés dans le cadre du site de Breuil.

Détails méthodologiques concernant les solutions (pluies, pluiolessivats, solutions du sol):

- Prélèvements : systématiques toutes les 4 semaines depuis Octobre 2001
- Conditionnement : filtration sur filtre inerte à 0,45µ ; stockage en chambre froide en attendant leur analyse réalisée en général sous huitaine
- Analyse chimique minérale:
 - Analyses totales : par spectrophotométrie d'émission atomique à plasma induit (ICP Ultrase Jobin Yvon) pour les éléments Si, Al, Fe, Ca, Mg, Mn, Na, K, S et P ; pour C et N l'analyse de COD et NOD sont effectuée sur analyseur Shimatzu ; pour N minéral, analyse sur Traacs 2000 par spectrométrie moléculaire micro flux.
 - Analyses spécifiques : les spéciations chimiques sont réalisées pour
 - . N (Ntot, Norg (Shimatzu), NO₃⁻ et NH₄⁺) : spectromètre moléculaire micro flux, chromatographie ionique et analyseur N organique.
 - . S (Stot, SO₄²⁻) : ICP + Chromatographie ionique
 - . Al (Al monomérique, Al polymérique, Al lié à MO, SO₄²⁻, F, P, Si etc...) : extraction et modélisation à partir d'analyse en ICP et en Chromatographie ionique (au Limos par JP Boudot protocole publié, Boudot et al., 2000)
- Analyse chimique organique :

Le carbone organique dissous (COD) est caractérisé par spectrométrie UV et décomposition des spectres (Simonsson et al., 2003 ; Jaffrain, 2006) pour l'encombrement moléculaire et les groupes fonctionnels. Un protocole spécifique est en cours de mise au point pour l'étude du caractère complexant de la COD (Titeux, travail en cours).

III-5 Minéralisation de la matière organique

La biodégradation de la matière organique est étudiée pour la matière organique fraîche (MOF) et pour la matière organique humifiée (MOH).

La biodégradation des MOF est suivie par l'intermédiaire de substrats modèles ou de litières mis à décomposer *in situ*. Des sachets micro-poreux contenant de la cellulose, de la lignine ou des litières de feuilles sont placés dans les 5 premiers cm des horizons superficiels de 4 peuplements (TsF, hêtre chêne Douglas et épicéa). Des tests ont été réalisés sur des mélanges feuillus-résineux pour le suivi de la perte de masse et d'indicateurs biochimiques divers.

La biodégradation des MOH a été observée en conditions contrôlées sur des échantillons prélevés dans les horizons de surface (0-5 cm en général) des sols sous tous les peuplements (forêt native et plantations) à différentes dates, dans les deux blocs. Les paramètres mesurés sont : la minéralisation du carbone par le dosage du CO₂ dégagé, la minéralisation de l'azote par le dosage de NH₄⁺ et NO₃⁻, les composés organiques, les éléments minéraux hydrosolubles et les éléments minéraux échangeables et biodisponibles. Une approche spécifique a été réalisée sur la minéralisation de fractions granulométriques correspondant à des liaisons carbone-matière minérale de plus en plus forte allant des fractions grossières aux fractions fines. L'objectif est de discriminer les MOH récentes issues des peuplements actuels de celles relictuelles du peuplement primitif

III-6- Etude de la rhizosphère

La rhizosphère est définie comme la zone étroite du sol qui est influencée par le fonctionnement de la racine notamment par les exsudations et le prélèvement. Des mesures semblables à celles pratiquées dans les horizons entiers sont réalisées (**tableau 3**) après adaptation des méthodes (protocoles échantillonnage, capteurs, protocoles analytiques,...). Ces mesures sont réalisées sur les différents compartiments de la rhizosphère (sol, solution, microbiologie).

| Compartiments | Mesures |
|-------------------------|---|
| Sols | <ul style="list-style-type: none"> - Prélèvement systématique en 18 fosses calibrées (35*80 cm) par plantation à trois niveaux [0-3], [3-10], [10-23] - Séparation du sol rhizosphérique (accolé aux racines fines) et du sol global. - Mesures physico-chimiques et chimiques sur tous les échantillons tamisés à 200µm: éléments échangeables (Rouiller et al, 1981) ; pHeau, pH KCl ; Corg, Norg - Minéralogie sur des échantillons moyens: séparations granulométriques et détermination qualitative des minéraux par RX et analyses chimiques ; étude des argiles y compris les phases très fines (<0,1µ) ; analyses des éléments libres. |
| Solutions du sol | <ul style="list-style-type: none"> - Par peuplement, 12 répétitions de solution rhizosphérique et solution globale - Solutions récoltées à l'aide de micro-capteurs (Göttlein, 1990) à travers une fenêtre racinaire (prélèvement toutes les 4 semaines et mêmes analyses que celles pratiquées sur les solutions des horizons entiers). Mise au point méthodologique pour les mesures sur faibles volumes. |
| Microbiologie | <ul style="list-style-type: none"> - Prélèvement de sol dans le peuplement de chêne, dans et hors mycorrhizosphère de scléroderme à trois niveaux de profondeur - Collection de bactéries et de champignon pour tous les échantillons - Bio-tests pour définir l'agressivité de ces souches envers les minéraux du sol |

De plus, certains flux potentiels (minéralisation et altération des minéraux) sont également déterminés à l'échelle de la rhizosphère (**tableau 4**).

| Flux | Méthodes |
|---|---|
| Minéralisation de la matière organique | <ul style="list-style-type: none"> - Sur les échantillons de sol de surface de 5 fosses par peuplement (sol rhizosphérique et global) prélevés - Mesures de minéralisation potentielle (brute) effectuées sur des échantillons frais de sols et mis à incuber en conditions contrôlées (Colin-Belgrand et al., 2002) |
| Altération biologique des minéraux | <ul style="list-style-type: none"> - Pour chaque peuplement du bloc 2, et pour 2 horizons - Approche expérimentale utilisant des minéraux-test (apatite, plagioclase et phlogopite) placés dans des sacs à mailles variables (minéraux accessibles ou non aux racines) mis à incuber <i>in situ</i>. |

Parallèlement à l'approche *in situ* des travaux en conditions contrôlées visent à déterminer les mécanismes mis en jeu dans l'altération des minéraux et la biodégradation des matières organiques.

III-7 Etude concernant les micro-horizons diagnostics de surface

Le sol 'climax' se caractérise par le développement d'une crypto-podzolisation de surface assez bien marquée morphologiquement. Il est donc important d'identifier ce mécanisme et d'en qualifier les traits (matière organique, minéralogie, solutions) et l'origine (acido-complexolyse et, et/ou dégradation hydromorphe?). Le bouleversement voire le léger décapage superficiel du sol lors de la préparation du site pour la plantation font que cet horizon est peu net et relictuel dans les plantations. Il sera intéressant de voir quelle essence favorise le développement le plus rapide de ce mécanisme et d'en analyser les causes

Les test suivants seront réalisés (**tableau 5**):

| | |
|-------------------------------|---|
| Phase solide organique | Caractérisation globale (C, N) et fractionnement granulométrique |
| Phase solide minérale | <ul style="list-style-type: none"> - Minéralogie totale et minéralogie des fractions argileuses en particulier des fines qui devraient concentrer les smectites de dégradation - Approche expérimentale utilisant des vermiculites calées (Al) au laboratoire et mises à incuber in situ. |
| Solutions du sol | <ul style="list-style-type: none"> - Installation de collecteurs de solution de faible dimension (rhizons) pour récolter les solutions dans les micro-horizons de surface - Spéciation chimique (organique et minérale) |

III- 8 Observation des acteurs biologiques et identification de leur activité

III-81 La macroflore fongique

Les observations portent sur les communautés des champignons ectomycorhiziens et les communautés de champignons saprophytes. Ces deux communautés essentielles pour la nutrition minérale des arbres et la décomposition de la matière organique, sont décrites par plusieurs campagnes de terrain (printemps et automne). Leur fonctionnalité sera décrite à partir des connaissances acquises et des indicateurs isotopiques de type $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{13}\text{C}$ traçant l'origine du carbone utilisé. De plus, les techniques de biologie moléculaire permettront de comparer les profils locaux aux bases de données existantes ; une étude spécifique sera conduite sur *Laccaria* sous feuillus natifs et Douglas introduits pour comparer cette population.

III-82 La microflore du sol

Les observations portent sur l'abondance, la diversité des micro-organismes du sol et abordent le domaine de l'activité. Ces déterminations portent sur 4 traitements : épicéa, Douglas, chêne, hêtre de plantation et taillis sous futaie natif

L'abondance est estimée à travers la mesure de biomasse microbienne, en utilisant la méthode de fumigation-extraction. Avec cette méthode, on détermine la quantité globale de matière organique « vivante », que l'on exprime d'une part en valeur absolue, d'autre part en pourcentage du carbone organique total du sol.

La diversité microbienne est appréciée par différentes approches. La microflore globale par la méthode dite des empreintes génétiques, identifiée à partir de l'ADN microbien directement extrait du sol. Les profils de bandes obtenus sont indicateurs de la complexité et de la structure populationnelle des communautés bactériennes et fongiques. Les populations fongiques et bactériennes colonisant les matériaux en incubation *in* et/ou *ex situ* sont analysées par diverses techniques de biologie moléculaire. L'analyse statistique permet de discriminer les peuplements.

L'activité est abordée par diverses méthodes : utilisation des traceurs isotopiques, utilisation de marqueurs spécifiques d'activité, activité potentielle via les banques de données, approche moléculaire par l'étude de l'ARN.

III-9 Modélisation biogéochimique

Elle consistera à utiliser un modèle mécaniste (WHAM) pour étudier la distribution des espèces chimiques dans les solutions (c.a.d. la spéciation aqueuse), en plaçant une attention toute particulière sur la complexation des éléments métalliques (en particulier Al, mais pas exclusivement), aux principaux composés du carbone organique dissous (COD). Cet outil devrait aider à appréhender un éventuel effet essence sur la spéciation des solutions et indirectement sur certaines réactions hétérogènes, en particulier celles de dissolution et de précipitation des minéraux.

La modélisation couplée biogéochimie-transferts sera ensuite progressivement utilisée pour le calcul de bilan des éléments nutritifs au sein des différents écosystèmes, notamment à travers le calcul du drainage profond et du flux d'altération (utilisation du modèle MIN3P). Une des étapes préliminaires sera de simuler le bilan hydrique et de valider rigoureusement cette modélisation par rapport aux mesures d'humidité du sol par sondes TDR.

III-10 Base de données

Actuellement, l'ensemble des données concernant le climat (mésos et pédo-climat), le sol (solide et solutions) et la végétation, a été mis en base de données structurée de type ACCESS par Dominique Gelhaye et Pascal Bonnaud (AI – BEF Nancy), avec l'assistance de Damien Maurice (IE GIP Ecofor).

Ces données sont accessibles aux acteurs des projets menés sur Breuil, moyennant le respect des critères habituels pour leur utilisation.

Présentation des résultats actuels par thème

Le méso-climat et le pédo-climat

La **pluviométrie** trentenaire de Château-Chinon est relativement équi-répartie sur l'année. La variabilité des précipitations mesurées à Breuil depuis 2001 indique que la pluviométrie est peut-être plus faible à Breuil où la variabilité inter-annuelle atteint 15 % autour de la moyenne.

| | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D | cumul |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| Pluie mensuelle trentenaire à Château-Chinon | 120 | 110 | 100 | 80 | 100 | 110 | 80 | 120 | 110 | 100 | 110 | 140 | 1280 |
| Breuil-Chenue 2002 | 106 | 125 | 53 | 17 | 98 | 115 | 66 | 46 | 60 | 112 | 99 | 136 | 1093 |
| Breuil-Chenue 2003 | 116 | 69 | 24 | 32 | 118 | 81 | 21 | 104 | 70 | 128 | 169 | 190 | 1121 |
| Breuil-Chenue 2004 | 200 | 47 | 40 | 57 | 93 | 50 | 74 | 110 | 56 | 146 | 93 | 47 | 1012 |
| Breuil-Chenue 2005 | 118 | 85 | 53 | 121 | 48 | 58 | 61 | 58 | 67 | 41 | 72 | 114 | 896 |

Tableau 6 : Pluviométrie annuelle et répartition mensuelle (mm)

Les **essences** modifient assez largement le climat général de par leurs caractéristiques physiques (pérennité du couvert) et leur demande biologique (transpiration en particulier). Elles peuvent même modifier sensiblement les propriétés du sol, rétention et transfert en eau par les changements directs ou indirects de l'agrégation du sol.

L'**interception** de la pluie par les peuplements est un paramètre important du bilan hydrique. L'effet des essences est très net et discrimine bien les feuillus pour lesquels l'interception hivernale est faible des résineux qui interceptent toute l'année. Le pin à couvert peu dense intercepte comme les feuillus.

| | interception moyenne % | automne | été | hiver | printemps |
|-----------------------|------------------------|---------|-----|-------|-----------|
| épicéa non fertilisé | 46 | 45 | 42 | 39 | 60 |
| épicéa fertilisé | 35 | 34 | 30 | 22 | 51 |
| Douglas non fertilisé | 45 | 48 | 39 | 38 | 53 |
| Douglas fertilisé | 44 | 50 | 36 | 40 | 51 |
| pin Laricio | 27 | 31 | 20 | 17 | 38 |
| sapin de Nordmann | 30 | 44 | 23 | 17 | 38 |
| hêtre | 29 | 30 | 31 | 17 | 37 |
| chêne | 29 | 28 | 19 | 30 | 38 |
| Forêt native | 32 | 34 | 30 | 21 | 41 |

Tableau 7 : Variation saisonnière de l'interception des peuplements en fonction de l'essence.

La **température** de l'air est en moyenne plus fraîche sous les feuillus de 0,2 à 0,3 °C. Aucune différence n'apparaît sur les maximums. Les observations saisonnières montrent des différences uniquement en été et en automne avec des moyennes légèrement plus fortes en été et en automne sous les résineux.

La température du sol à 15 cm de profondeur, les températures moyennes annuelles sont plus élevées sous les feuillus mais varie avec le couple considéré ($\Delta\text{Ch-épi} = 2,5^\circ\text{C}$ et $\Delta\text{hê-Do} = 1,1^\circ\text{C}$). Les différences portent sur les minimums et les maximums. Ces différences sont observables à toutes les saisons. Ces données se retrouvent plus ou moins aux autres niveaux du sol.

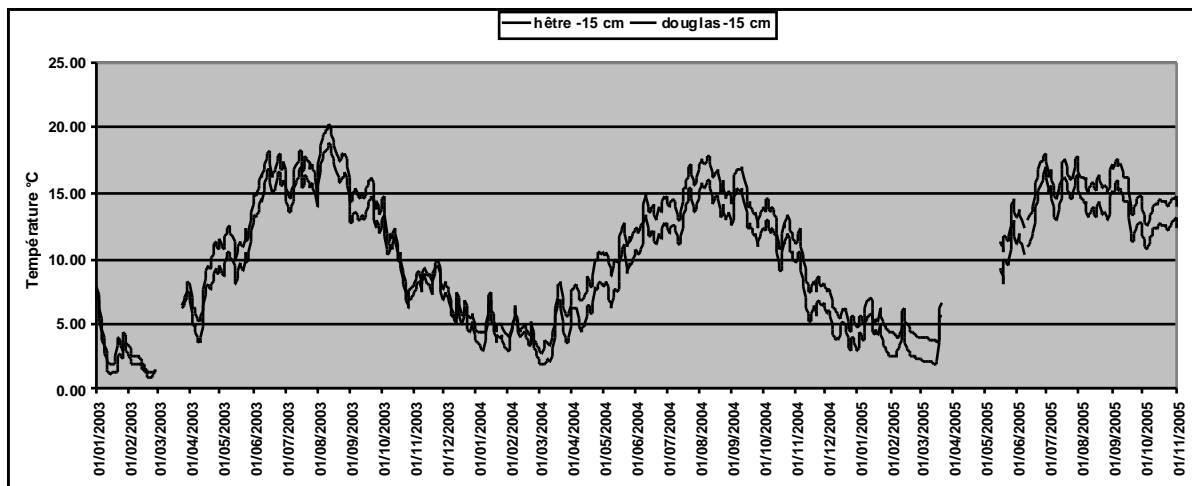


Figure 2 : Variation de la température du sol à 15 cm de profondeur dans le sol en comparant hêtre et Douglas.

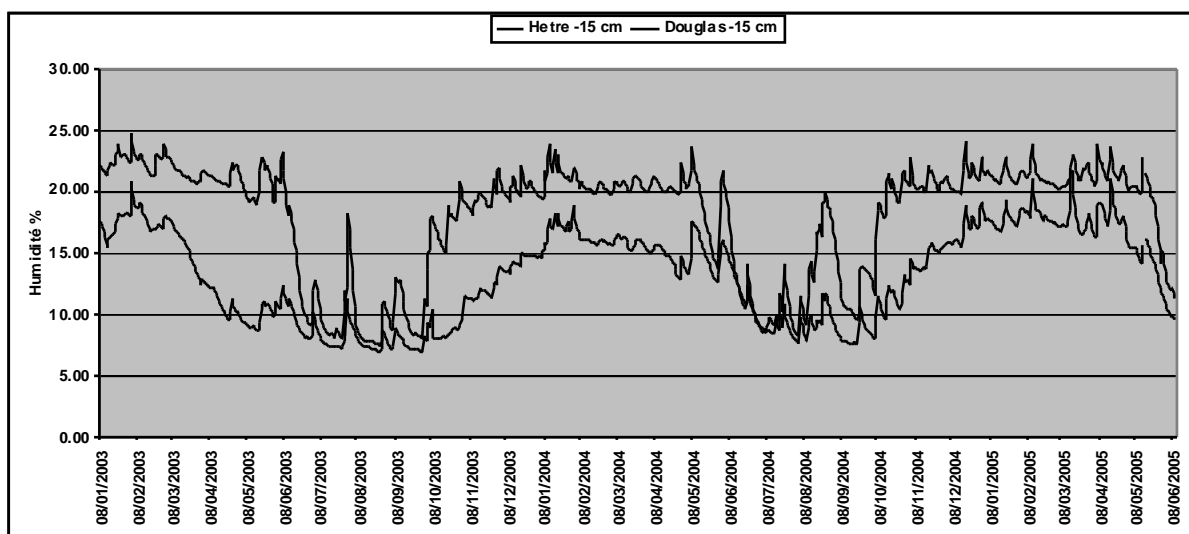
L'humidité du sol, mesurée par des sondes TDR enterrées, est suivie depuis 2003. L'effet des essences est très net et significatif sur tout le profil de sol.

| | -15 cm | -30 cm | -60 cm |
|---------|--------|--------|--------|
| Douglas | 13 a | 16,7 a | 16 a |
| Hêtre | 18 b | 19,3 b | 17,5 b |
| Epicéa | 20,8 c | 23,4 c | 22,7 c |
| Chêne | 22 d | 24,9 d | 23,5 d |

Tableau 8 : Comparaison de l'humidité du sol en fonction des essences et profondeurs de sol (humidité volumique en p100)

A titre d'illustration, les courbes d'humidité du sol sont présentées ci-dessous. L'effet du couvert pérenne apparaît très clairement.

Figure 3 : Evolution temporelle de l'humidité volumique du sol sous le couple Douglas-hêtre à 15 cm de profondeur dans le sol.



Les peuplements forestiers : biomasse, minéralomasse, prélèvement au sol et restitution d'éléments minéraux au sol par les litières

Les observations ont été réalisées sur les seules plantations, y compris sur les traitements fertilisés, dans le bloc I. Les mesures sont en cours dans le bloc II.

La démarche consiste à faire des mesures sur des arbres échantillons (10 pour les résineux et 15 pour les feuillus) distribués sur tout le spectre des classes de circonférence du peuplement. Ces arbres sont abattus et débités en compartiments (tronc, branches) ; une sous-compartimentation est opérée sur les échantillons, pour quantifier le bois et l'écorce du tronc, et les aiguilles et les rameaux des branches (les feuillus ont été observés après la chute des feuilles). Les compartiments sont pesés frais sur le terrain et des échantillons sont prélevés pour déterminer la masse sèche à 65°C et leur composition chimique. A partir de cet échantillonnage des lois sont établies, reliant des paramètres dendrométriques facilement mesurables (par exemple la circonférence du tronc à 1,30 m) et la biomasse et minéralomasse de chaque compartiment. Le passage au peuplement se fait par les inventaires.

Biomasses (tableau 10) : à âge égal, la biomasse des conifères à croissance rapide (épicéa et Douglas) est supérieure à celle des feuillus en raison de leur développement plus rapide.

Parmi les résineux à croissance rapide, le Douglas est plus productif que l'épicéa : + 28% pour la biomasse totale et +50% pour la biomasse ligneuse et + 53% pour le bois de tronc.

L'effet fertilisation est très intéressant avec + 3% pour l'épicéa arbre total contre + 40 % pour le Douglas, +21 % pour tronc total pour l'épicéa contre +48% pour le Douglas. Le résultat est une accentuation assez spectaculaire de la production du Douglas par rapport à l'épicéa : +74% pour la biomasse totale et 90 % pour le tronc.

Le nombre de tiges par ha peut compenser la faible croissance initiale pour le hêtre (6500 tiges à 27 ans) dont la biomasse par ha est voisine de celle du Pin laricio qui ne compte que 950 tiges par ha.

Le sapin de Nordmann a une biomasse sur pied très limitée, de même que le chêne qui associe faible croissance initiale et forte mortalité juvénile (2700 tiges à 27 ans contre 16000 plantées).

Minéralomasses (tableau 10) : les différences entre épicéa et Douglas résultent bien des deux paramètres biomasse et concentration. Le Douglas qui a une biomasse totale ligneuse de + 28% par rapport à l'épicéa ne contient que 22 % de plus de N, et 27 % de plus de P mais contient 13 % de moins de Ca et 6 % de moins de Mg. De même pour fabriquer 56% de plus de biomasse de tronc, il ne consomme que 10 % de plus N et 16 % de plus de P mais entre 35 et 40 % de moins de Ca, K et Mg.

L'effet de la fertilisation va dans le même sens avec par exemple plus 85 % de biomasse produite pour le bois de tronc par le Douglas fertilisé par rapport à l'épicéa fertilisé et seulement de l'ordre de +10% de consommation de N, P et K mais environ -30% de Ca et Mg.

L'**efficacité** des essences dans l'utilisation des éléments pour produire la biomasse est un paramètre qui permet de comparer directement les essences. Il quantifie le tonnage de biomasse produite par kg d'élément consommé.

| | Douglas NF | Douglas F | Epicéa NF | Epicéa F | Pin Laricio | Sapin de Nord. | Chêne | Hêtre |
|-----------|------------|-----------|-----------|----------|-------------|----------------|-------|-------|
| N | 0.89 | 1.07 | 0.71 | 0.86 | 0.68 | 0.35 | 0.34 | 0.49 |
| P | 6.84 | 8.05 | 5.58 | 5.71 | 7.53 | 3.62 | 5.19 | 6.17 |
| K | 1.03 | 1.24 | 0.78 | 0.98 | 1.03 | 0.44 | 0.67 | 0.84 |
| Ca | 1.48 | 1.29 | 0.86 | 0.60 | 1.64 | 0.80 | 0.69 | 1.06 |
| Mg | 6.64 | 7.85 | 4.14 | 4.66 | 4.57 | 4.75 | 4.50 | 3.82 |

Tableau 10 : Effets de l'essence et de la fertilité sur l'efficacité d'utilisation des éléments nutritifs pour produire la biomasse.

Les feuillus sont en moyenne beaucoup moins efficaces que les résineux pour produire la biomasse (sauf le sapin de Nordmann). Le hêtre a tendance à être plus efficace que le chêne.

Le Douglas est plus efficace que l'épicéa et voisin du pin Laricio. La fertilisation ne change pas l'efficacité du Douglas et de l'épicéa.

| | Total branches | | Total Tronc | | Total Arbre ligneux | récréation | Litière | Prélèvement | Nb tiges /ha | Surface terr. | Circ moy |
|-----------------------|----------------|------|-------------|--------|---------------------|------------|---------|-------------|--------------|---------------|----------|
| | Bois | Aig. | Bois | écorce | | | | | | | |
| Douglas NF | | | | | | | | | | | |
| MS | 36 | 18 | 159 | 25 | 219 | | | | 776 | 48 | 808 |
| C | 18 | 10 | 80 | 13 | 110 | | | | | | |
| N | 104 | 340 | 32 | 110 | 247 | N | 64.7 | 75.0 | | | |
| P | 12 | 15 | 7 | 14 | 32 | P | 0.3 | 1.6 | | | |
| K | 88 | 89 | 49 | 90 | 212 | K | 22.5 | 7.5 | 38.8 | | |
| Ca | 83 | 60 | 34 | 38 | 148 | Ca | | 26.7 | 32.9 | | |
| Mg | 15 | 15 | 9 | 11 | 33 | Mg | | 3.3 | 4.7 | | |
| Douglas F | | | | | | | | | | | |
| MS | 41 | 21 | 232 | 29 | 306 | | | | 988 | 58 | 824 |
| C | 20 | 11 | 116 | 15 | 153 | | | | | | |
| N | 119 | 387 | 38 | 128 | 287 | N | 44.3 | 56.3 | | | |
| P | 13 | 17 | 8 | 18 | 38 | P | 0.4 | 2.0 | | | |
| K | 82 | 103 | 57 | 100 | 246 | K | 23.4 | 7.8 | 41.5 | | |
| Ca | 96 | 100 | 59 | 75 | 238 | Ca | | 37 | 46.9 | | |
| Mg | 17 | 17 | 10 | 13 | 39 | Mg | | 2.7 | 4.3 | | |
| Epicéa NF | | | | | | | | | | | |
| MS | 33 | 31 | 104 | 12 | 145 | | | | 1069 | 35 | 623 |
| C | 17 | 16 | 52 | 6 | 73 | | | | | | |
| N | 110 | 425 | 29 | 65 | 203 | N | 48.3 | 56.8 | | | |
| P | 12 | 23 | 6 | 8 | 26 | P | 0.3 | 1.4 | | | |
| K | 62 | 160 | 76 | 46 | 187 | K | 31.5 | 10.5 | 49.8 | | |
| Ca | 71 | 66 | 54 | 59 | 169 | Ca | | 12.9 | 19.9 | | |
| Mg | 13 | 12 | 15 | 10 | 35 | Mg | | 2.3 | 3.8 | | |
| Epicéa F | | | | | | | | | | | |
| MS | 36 | 28 | 126 | 14 | 177 | | | | 1306 | 45 | 685 |
| C | 19 | 14 | 63 | 7 | 89 | | | | | | |
| N | 109 | 342 | 35 | 77 | 207 | N | 40.6 | 49.2 | | | |
| P | 14 | 29 | 8 | 10 | 31 | P | 0.3 | 1.6 | | | |
| K | 78 | 145 | 54 | 51 | 181 | K | 33.9 | 11.3 | 52.7 | | |
| Ca | 88 | 141 | 87 | 107 | 295 | Ca | | 53.1 | 65.4 | | |
| Mg | 13 | 15 | 14 | 10 | 38 | Mg | | 2.1 | 3.7 | | |
| Pin Laricio | | | | | | | | | | | |
| MS | 19 | 7 | 95 | 14 | 128 | | | | 947 | 47 | 773 |
| C | 10 | 4 | 50 | 8 | 68 | | | | | | |
| N | 60 | 107 | 62 | 65 | 188 | N | 57.8 | 65.6 | | | |
| P | 6 | 8 | 6 | 6 | 17 | P | 0.4 | 1.1 | | | |
| K | 41 | 49 | 45 | 35 | 124 | K | 34.8 | 11.6 | 51.6 | | |
| Ca | 24 | 7 | 39 | 15 | 78 | Ca | | 7.5 | 10.8 | | |
| Mg | 7 | 4 | 15 | 6 | 28 | Mg | | 1.8 | 3.0 | | |
| Sapin de Nord. | | | | | | | | | | | |
| MS | 24 | 24 | 51 | 10 | 86 | | | | 1110 | 31 | 461 |
| C | 13 | 13 | 26 | 5 | 44 | | | | | | |
| N | 117 | 322 | 73 | 52 | 242 | N | 36.1 | 46.2 | | | |
| P | 13 | 25 | 7 | 5 | 24 | P | 0.1 | 1.1 | | | |
| K | 103 | 142 | 48 | 43 | 195 | K | 13.5 | 4.5 | 26.1 | | |
| Ca | 56 | 57 | 20 | 31 | 107 | Ca | | 6 | 10.5 | | |
| Mg | 10 | 12 | 5 | 4 | 18 | Mg | | 1.3 | 2.1 | | |
| Chêne | | | | | | | | | | | |
| MS | 24 | | 59 | 10 | 95 | | | | 2694 | 20 | 288 |
| C | 12 | | 30 | 5 | 47 | | | | | | |
| N | 101 | | 111 | 68 | 280 | N | 68.4 | 80.1 | | | |
| P | 8 | | 6 | 4 | 18 | P | 2.9 | 3.7 | | | |
| K | 40 | | 72 | 28 | 140 | K | 26.4 | 8.8 | 41.1 | | |
| Ca | 30 | | 22 | 86 | 138 | Ca | | 21.2 | 26.9 | | |
| Mg | 7 | | 7 | 7 | | Mg | | 4.6 | 4.6 | | |
| Hêtre | | | | | | | | | | | |
| MS | 36 | | 101 | 8 | 147 | | | | 6751 | 34 | 229 |
| C | 18 | | 51 | 4 | 73 | | | | | | |
| N | 139 | | 90 | 70 | 298 | N | 58 | 70.4 | | | |
| P | 11 | | 9 | 4 | 24 | P | 2.7 | 3.7 | | | |
| K | 59 | | 98 | 19 | 176 | K | 32.4 | 10.8 | 50.5 | | |
| Ca | 36 | | 63 | 40 | 139 | Ca | | 12.7 | 18.5 | | |
| Mg | 7 | | 13 | 19 | 39 | Mg | | 2 | 3.6 | | |

Tableau 9 : Biomasses (MS et C en t.ha⁻¹), minéralomasses des peuplements (en kg.ha⁻¹) et prélèvement d'éléments au sol (en kg.ha⁻¹).

Les restitutions par les litières :

Ces résultats ne concernent que deux années de mesure et doivent être considérés avec réserve, compte tenu de la variabilité interannuelle.

- Une différence assez nette de masse de litière apparaît entre chêne et hêtre malgré le plus faible nombre de tiges pour le chêne. Le TsF natif est en position intermédiaire.
- Parmi les conifères, le Sapin de Nordmann présente les plus faibles restitutions.
- La fertilisation n'a pas un effet spectaculaire sur les masses restituées, mais conduit à des apports au sol inférieurs en azote et supérieurs en calcium.

| | chêne | Douglas F | Douglas NF | épicéa F | épicéa NF | hêtre | pin Laricio | Sapin de Nordmann | Forêt native |
|----|-------|-----------|------------|----------|-----------|-------|-------------|-------------------|--------------|
| MS | 5573 | 4098 | 4045 | 4721 | 4406 | 3880 | 4844 | 2989 | 4882 |
| C | 2937 | 2186 | 2162 | 2455 | 2337 | 2073 | 2606 | 1638 | 2571 |
| N | 68,4 | 44,3 | 64,7 | 40,6 | 48,3 | 58,0 | 57,8 | 36,1 | 50,4 |
| P | 2,9 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 2,7 | 0,4 | 0,1 | 2,8 |
| K | 8,8 | 7,8 | 7,5 | 11,3 | 10,5 | 10,8 | 11,6 | 4,5 | 12,7 |
| Ca | 21,2 | 37,0 | 26,7 | 53,1 | 12,9 | 12,7 | 7,5 | 6,0 | 16,1 |
| Mg | 4,6 | 2,7 | 3,3 | 2,1 | 2,3 | 2,0 | 1,8 | 1,3 | 3,8 |

F = fertilisé à la plantation ; NF = non fertilisé à la plantation ; MS = Matière sèche à 65°C

Tableau 11 : Retombées moyennes annuelles de litière pour la période automne 2001 à automne 2003 (données en kg.ha⁻¹.an⁻¹).

Prélèvement au sol par les peuplements

Le prélèvement au sol constitue une donnée essentielle pour identifier les besoins nutritifs réels d'un peuplement forestier et en déduire la disponibilité nécessaire des éléments dans le sol. Il a été calculé à partir des données actuelles, selon la formule :

Prélèvement = Immobilisation + restitutions (litière + récréation)

L'immobilisation moyenne annuelle dans la biomasse ligneuse a été mesurée. La récréation de K a été estimée à partir de la littérature. Ces résultats devront être affinés à partir de la mesure d'immobilisation courante et de récréation réelle.

Les prélèvements sont plus fortement liés à la production de feuilles que de matière ligneuse. Ils sont en général en absolu plus forts pour N et P pour les feuillus que pour les résineux. Pour Ca, le Douglas et les peuplements fertilisés présentent les prélèvements les plus forts.

En conclusion, l'effet essence est très discriminant pour la consommation, l'immobilisation et les restitutions d'éléments nutritifs. Il faut toutefois être parfaitement conscient que les essences sont à des stades de développement différents, et que ces paramètres évolueront avec le temps, imposant un suivi diachronique de cette expérimentation. Plus le développement est rapide, moins cette remarque est pertinente. Ainsi, les résultats actuels pour le Douglas et l'épicéa peuvent être considérés comme relativement définitifs, ce qui n'est pas le cas des feuillus ou sapin de Nordmann.

Les **éléments apportés par fertilisation** montrent deux types de comportement :

- Ca est absorbé passivement et massivement : il a tendance à se stocker dans les organes ligneux d'où il sera peu recyclé, mais également à être fortement restitué par les litières, garantissant un pool de cet élément pour la partie superficielle de ce sol acide.
- P est absorbé mais fortement recyclé par voie interne, ne s'accumulant que modérément dans les tissus ligneux.
- N apporté en très faible dose ne s'accumule que peu dans la masse ligneuse et montre un bon taux de recyclage. L'épicéa semble relativement plus économe en azote que le Douglas après fertilisation, mais ce serait l'inverse pour les peuplements témoins.

Les sols solides

Un échantillonnage très dense a été réalisé sur le site de façon à tester l'effet des essences sur le sol, en raison a priori d'un effet tenu de l'effet des essences sur le sol et d'une variabilité spatiale importante.

Les paramètres suivants ont été observés

| Paramètre déterminé | Echantillonnage |
|---|---|
| Echantillons prélevés | Plantations 16 points ; TsF 20 points litière + 7 profondeurs [0-5], [5-10], [10-15], [15-25], [25-40], [40-55], [55-70] + 1 fosse centrale jusqu'à la roche mère altérée |
| Analyses physiques (1) - densité apparente - taux de cailloux - granulométrie | Tous les échantillons Tous les échantillons 4 profils par placette (3, 7, 11, 15) + prof |
| - pHeau et pH KCl (1) | Tous les échantillons |
| P extractible méthode Duchau four & Bonneau '1959) (2) | Tous les échantillons |
| Eléments échangeables (1) - CEC effective (KCl + NH ₄ Cl) - Eléments échangeables | Tous les échantillons Tous les échantillons |
| Eléments libres (1) - CBD - Tamm (oxalate) - Tamura (tricitrate) - Pyrophosphate | 8 profils (2, 3, 6, 7, 10, 11, 14, 15) [0-15 cm] 4 profils (3, 7, 11, 15) [15-70 cm] horizons profonds >70 cm sur les ech de le fosse centrale |
| Eléments totaux C, N, P, K Ca, Mg (2) C, N, P, K Ca, Mg + Si, Al, Na, Fe, Mn (2) Corg et Norg (2) 54 éléments (3) | Litières (50% des échantillons) Litières (échantillons Moyens) Tous les échantillons [0-40cm] + fosse centrale pour [>40 cm] Sol 'minéral' 2 profils (7, 11) + horizon prof fosse centrale |
| Minéralogie des sols sur les fractions argiles, limons et sables | 4 fosses de 0 à 15 cm puis une seule fosse |

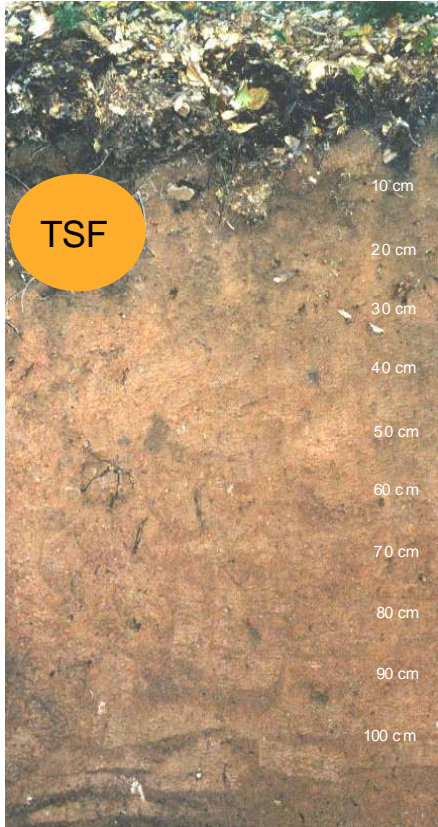
(1)INRA BEF ; (2) INRA Arras ; (3) CRPG Nancy - (2) les résultats concernent actuellement le seul bloc I

Tableau 12 : Détail des travaux réalisés sur les sols

Les sols sont des **Alocrisols** très acides (pH = 3,8 à 5 cm de profondeur dans le TsF) présentant une légère dégradation podzolique en surface, développés sur l'altérite de la granulite acide de la Pierre qui Vire, vraisemblablement recouverte d'une fine couche de limon ; l'ensemble ayant subi une cryoturbation au quaternaire. La dégradation cryptopodzolique est attestée morphologiquement par des micro-horizons de surface caractéristiques et, chimiquement, par des accumulations de Fe libre à 15 cm de profondeur et d'Al libre vers 20 cm.

Les sols sont moyennement épais (au moins un mètre), non compactés, de texture limono-sableuse en moyenne très homogène sur le profil de sol. Le taux d'argile n'atteint pas 20 % en surface. Des blocs apparaissant de manière irrégulière sur le plateau, deviennent plus abondants aux ruptures de pente. Les éléments grossiers (refus au tamisage à 2 mm) atteignent 50 % de la masse du sol. Ces éléments ne sont pas pris en compte dans le calcul des stocks d'éléments.

L'enracinement domine en surface ; il est observé jusqu'à la base du sol, mais devient très faible en deçà de 70 cm de profondeur.



+10 cm - 0 cm - Humus de type dysmoder avec une couche Oh supérieure à 2 cm d'épaisseur

0 - 5 cm : A1/E - horizon noir 7,5 YR 2,5/2, organique, texture Ls, structure particulière, quartz décolorés, meuble, poreux, riche en racines fines et moyennes.

5 - 8 cm : A1 A 1/Bp' - Horizon brun chocolat 7,5 YR 2,5/3, texture L, structure massive, porosité forte, meuble, riche en racines, limite diffuse.

8 - 18 cm : Sal 1 - Horizon marron 7,5 YR 4/4, texture LS, structure polyédrique sub-angulaire fine, homogène, meuble, poreux, très colonisés par les racines moyennes et fines, limite diffuse.

18 - 35 cm : Sal 2 - Horizon brun, 7,5 YR 5/6, texture Lsa, structure polyédrique sub-angulaire fine instable, homogène, meuble, poreux, très colonisés par les racines moyennes et fines, piérrrosité aléatoire, limite diffuse.

35 - 55 cm : Sal 3 - Horizon brun, 7,5 YR 4/6, texture Lsa, structure polyédrique sub-angulaire fine bien exprimée, homogène, moins meuble que Bw 2, poreux, colonisés par les racines, piérrrosité aléatoire, limite assez nette.

55 - 75 cm : II Sal 4 - Horizon brun, 7,5 YR 4/6, texture LAS, structure polyédrique sub-angulaire à angulaire bien exprimée et stable, homogène, consistance assez rigide, poreux, racines de toutes tailles, piérrrosité aléatoire, limite diffuse.

75 - 95 cm : II B/C - Horizon brun, 7,5 YR 4/6, texture AIS, structure polyédrique sub-angulaire à angulaire bien exprimée et stable, homogène, consistance rigide, porosité moyenne, peu de racines, piérrrosité aléatoire, limite nette

95 - 110 cm : II C - Horizon brun rougeâtre, 7,5 YR 4/6 hétérogène (arène bariolée), texture S, structure polyédrique sub-angulaire à angulaire bien exprimée et stable, homogène, consistance rigide, porosité moyenne, peu de racines, présence de blocs de granite altérés, limite progressive.

| niveau | K | Mn | Mg | Ca | H | Al | Acidité | S | T | S/T |
|---------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------|
| (cm) | meq % q | meq % q | meq % q | meq % q | meq % q | meq % q | meq % q | meq % q | meq % q | |
| 0-4 | 0.40 | 0.05 | 0.38 | 0.15 | 1.76 | 6.83 | 8.59 | 1.38 | 9.97 | 0.14 |
| 4-10 | 0.19 | 0.01 | 0.11 | 0.02 | 0.79 | 6.80 | 7.59 | 0.74 | 8.33 | 0.09 |
| 10-20 | 0.10 | 0.03 | 0.05 | 0.02 | 0.07 | 4.52 | 4.59 | 0.24 | 4.83 | 0.05 |
| 20-35 | 0.07 | 0.03 | 0.03 | 0.01 | 0.14 | 3.55 | 3.69 | 0.19 | 3.88 | 0.05 |
| 35-55 | 0.06 | 0.05 | 0.02 | 0.01 | 0.06 | 3.44 | 3.51 | 0.15 | 3.66 | 0.04 |
| 55-75 | 0.06 | 0.04 | 0.02 | 0.00 | 0.02 | 4.20 | 4.22 | 0.15 | 4.37 | 0.03 |
| 75-100 | 0.07 | 0.04 | 0.01 | 0.00 | 0.04 | 3.72 | 3.76 | 0.15 | 3.91 | 0.04 |
| 100-140 | 0.10 | 0.02 | 0.08 | 0.01 | 0.15 | 5.03 | 5.18 | 0.25 | 5.43 | 0.05 |
| | | | | | | | | | | |
| | | pH | | | | Granulo | | | | |
| niveau | densité | C | N | P2O5 | Arg | g/kg | g/kg | g/kg | Sables | |
| (cm) | | H2O | g/kg | g/kg | g/kg | g/kg | g/kg | g/kg | g/kg | |
| 0-4 | 0.66 | 4.11 | 104.870 | 3.775 | 0.150 | 189 | 204 | 608 | | |
| 4-10 | | 4.33 | 50.168 | 2.311 | 0.113 | 165 | 200 | 635 | | |
| 10-20 | 0.86 | 4.78 | 27.674 | 1.424 | 0.099 | 148 | 218 | 634 | | |
| 20-35 | 1.10 | 4.83 | 17.331 | 0.936 | 0.109 | 161 | 232 | 608 | | |
| 35-55 | 1.10 | 4.70 | 14.200 | 0.793 | 0.116 | 164 | 235 | 602 | | |
| 55-75 | 1.28 | 4.67 | - | - | 0.163 | 167 | 229 | 604 | | |
| 75-100 | 1.13 | 4.70 | - | - | - | 249 | 289 | 462 | | |
| 100-140 | 1.34 | 5.00 | - | - | - | 174 | 214 | 612 | | |

Sol de la forêt native

Figure 4 : Description du sol de la forêt native

La **variabilité spatiale** des sols dans le bloc I se traduit par un gradient positif EW de limon et de cailloux dans la direction inverse ; seul le taux de cailloux varie significativement. Il y aurait donc une variabilité à prendre en compte entre les parcelles situées à l'Est du dispositif (épicéa fertilisé ou non, Douglas, chêne, pin et TsF) et les autres.

L'andainage ne crée pas de structure spatiale particulière dans la zone où le géo-référencement des points autorisait les calculs à partir d'un nombre suffisant de situations (zone Est du bloc I).

L'**effet des essences** se traduit sur de très nombreux indicateurs, mais de manière non univoque. L'analyse en composantes principales (ACP) permet de classer les essences dans un plan multivariable. Les résultats utilisant l'ensemble des variables Corg, Norg pH, CEC et éléments échangeables, sont finalement assez simples à expliquer à partir du plan issu d'un axe I (significatif, expliquant 66% de la variance) opposant le pH à la saturation alcaline et alcalino-terreuse du complexe absorbant et le carbone du sol, et un axe II (non significatif expliquant 19% de la variance) opposant plutôt le taux de saturation, l'azote et Mn à l'acidité d'échange et au C/N.

Dans le plan des deux axes ainsi définis, le comportement des 'horizons' sous les différentes essences sont très semblables, avec quelques interactions apparaissant par exemple pour le sapin et l'épicéa. Le graphe des barycentres indique que les feuillus de plantation sont opposés aux résineux sur l'axe I, les plantations (sauf le sapin) s'opposent à la forêt native sur l'axe II, avec des nuances, le hêtre s'opposant fortement au sapin, épicéa et chêne, Douglas et Pin se retrouvant en position intermédiaire.

Cette approche intégratrice montre des discriminations fortes opposant globalement les feuillus et les résineux d'un côté et les plantations de la forêt native de l'autre.

Approche synthétique par ACP

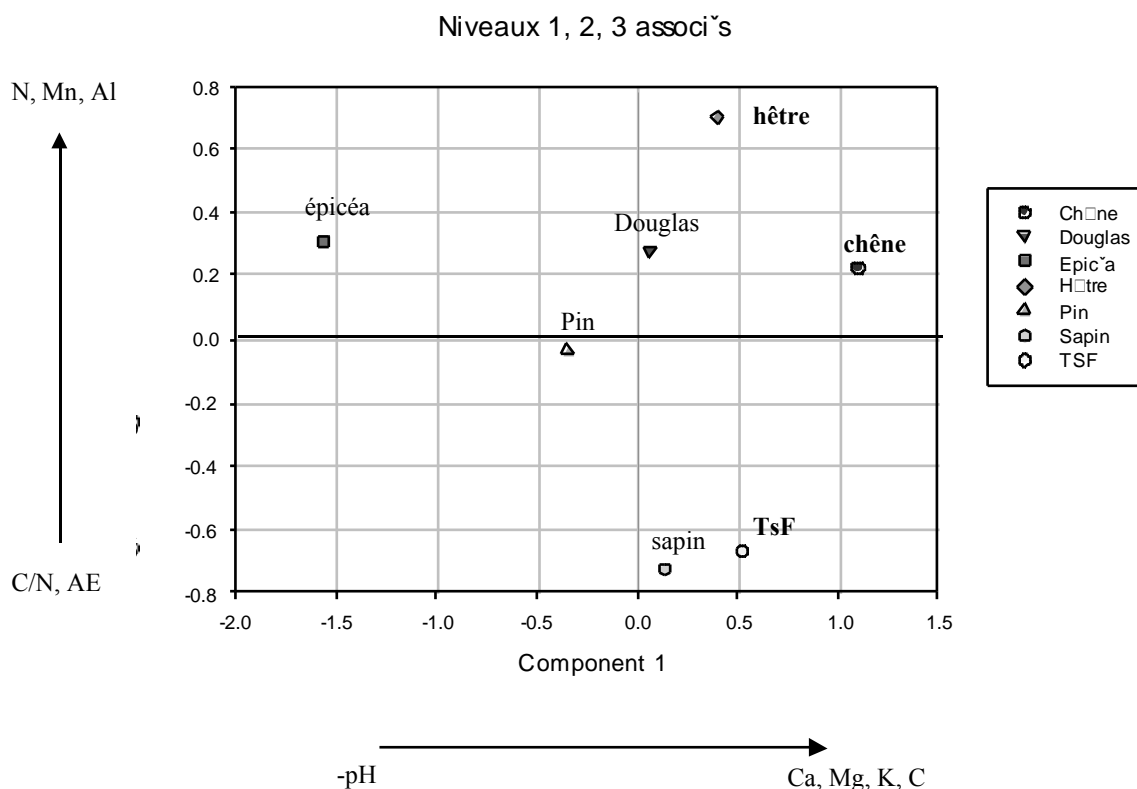


Figure 5 : Discrimination des sols sous l'effet des essences par analyse factorielle Discriminante.

Les relations entre éléments (Corg, pH, et ions échangeables) permettent de préciser le fonctionnement des sols en fonction des essences. Cet effet essence se traduit par une stratification dans les relations générales. Deux cas apparaissent, celui où la relation par essence suit la relation générale mais avec une amplitude variable (on peut délimiter un faisceau de relations grossièrement parallèles par ex pour les relations C – pH, Mg-pH, Al-pH en surface) ou celui où la relation globale est composée à la fois des relations significatives pour certaines essences et non significatives pour d'autres (ex Ca –pH).

Les **réserves** d'éléments dans les sols :

- le stockage de carbone sur 40 cm de sol est compris entre 81 et 97 t par ha, mais la variabilité spatiale ne conduit cependant pas à des différences significatives entre peuplements. Les stocks de Norg varient de 4200 à 5300 kg par ha : les stocks sont significativement plus faibles sous la forêt native et sous le sapin, et les plus élevés pour le chêne et le pin (hêtre, Douglas et épicéa ont des réserves intermédiaires). Les réserves de P conduisent à deux groupes bien identifiés, avec des réserves plus faibles pour la forêt native, le sapin et le hêtre et des réserves plus fortes (une cinquantaine de kg par ha) pour le chêne, le Douglas, l'épicéa et le pin.

- Concernant K, Mg et Ca échangeables : dans la partie supérieure du profil [0-25 cm], les réserves en K sont limitées, mais le sol est nettement mieux pourvu qu'en Mg et Ca, éléments dont les réserves sont très faibles. Les réserves en K sont significativement les plus faibles sous épicéa et les plus fortes sous chêne ; celles en Mg varient peu en absolu et celles en Ca sont les plus faibles sous le sapin et les plus fortes sous le Douglas.

- La fertilisation initiale ne se traduit que dans la partie superficielle du sol et le plus nettement pour Ca sous Douglas.

| | 0-25 cm | | | 25-70 cm | | |
|-----------------------|---------|-------|--------|----------|------|-------|
| | K | Mg | Ca | K | Mg | Ca |
| non fertilisés | | | | | | |
| Chêne | 171 c | 23 b | 56 c | 236 b | 8 a | 9 ab |
| Hêtre | 116 ab | 19 ab | 45 bc | 146 a | 13 a | 15 ab |
| Douglas | 126 ab | 24 b | 57 c | 155 a | 14 a | 6 ab |
| Epicéa | 107 a | 19 ab | 32 abc | 223 b | 14 a | 27 b |
| Pin | 113 ab | 20 ab | 38 bc | 135 a | 12 a | 18 ab |
| Sapin | 117 ab | 16 a | 14 a | 121 a | 9 a | 3 a |
| TsF | 130 b | 24 b | 23 ab | 145 a | 15 a | 10 ab |
| fertilisés | | | | | | |
| Douglas | 110 a | 28 b | 270 d | 126 a | 9 a | 11 ab |
| Epicéa | 100 a | 22 a | 52 c | 115 a | 17 a | 21 b |

XXX = valeur moyenne différente à 5% si lettre différente

Tableau 13 : Stocks de K, Mg et Ca échangeables en fonction des essences (données en kg.ha⁻¹.an⁻¹).

Minéralogie des roches et des sols - altération des minéraux du sol

(Marie-Pierre Turpault, Louis Mareschal, Christophe Calvaruso, Pascal Bonnaud, Gilles Nourrisson, Jacques Ranger, INRA BEF –Nancy)

Minéralogie de la roche mère

Le substrat géologique est constitué par le granite leucocrate à 2 micas de la Pierre qui Vire. Deux faciès différenciés par leur texture sont identifiés sur le site : un faciès à gros grains avec des cristaux atteignant le centimètre, et un faciès à grains moyens avec des cristaux ne dépassant pas le demi centimètre. Leur répartition sur le site a été étudiée à partir des cailloux du sol aux différents points de prélèvement. Il en ressort que les 2 faciès sont présents sous tous les peuplements, en proportion plus ou moins forte, conséquence probable de la cryoturbation généralisée au cours du quaternaire (Aurousseau, 1976). Le faciès le plus fin est plus abondant à l'est du dispositif expérimental. Le cortège minéralogique (quartz 43%, feldspath potassique 27%, albite 23%, muscovite 4,5%, biotite chloritisée 2,3%), la composition chimique moyenne et l'assemblage des grains sont identiques entre faciès.

Ce sont des roches acides contenant plus de 75% de silice. Elles représentent une faible source potentielle de cations alcalino-terreux (de l'ordre de 0,17 % de MgO essentiellement contenu dans la biotite chloritisée et environ 0,3-0,4 % de CaO essentiellement contenu dans l'albite) et de phosphore (0,1%). Les cations alcalins sont quant à eux nettement plus abondants (Na_2O 3,4% et K_2O 4,5%).

Minéralogie des sols.

les sables et limons

Ces fractions contiennent essentiellement des minéraux primaires issus de l'arénisation du granite. La division des fractions les plus grossières alimente les fractions les plus fines. La kaolinite se forme dès la base du profil aux dépens de l'albite et de la biotite. En surface des profils, une réduction des teneurs en minéraux les moins stables (chlorite, biotite, albite) est mise en évidence au sein de chaque fraction.

les argiles

Un important cortège de minéraux a été mis en évidence dans la fraction argileuse comprenant notamment la kaolinite, la smectite intergrade, l'avermiculite intergrade, la chlorite, des micas, la gibbsite, le feldspath potassique, le quartz et différents minéraux interstratifiés. La distribution verticale des minéraux primaires contenus dans la fraction argile est fonction de leur domaine de stabilité respectif dans les différents horizons. Les principales évolutions verticales sont résumées dans la figure ci-dessous (minéralogie non quantitative).

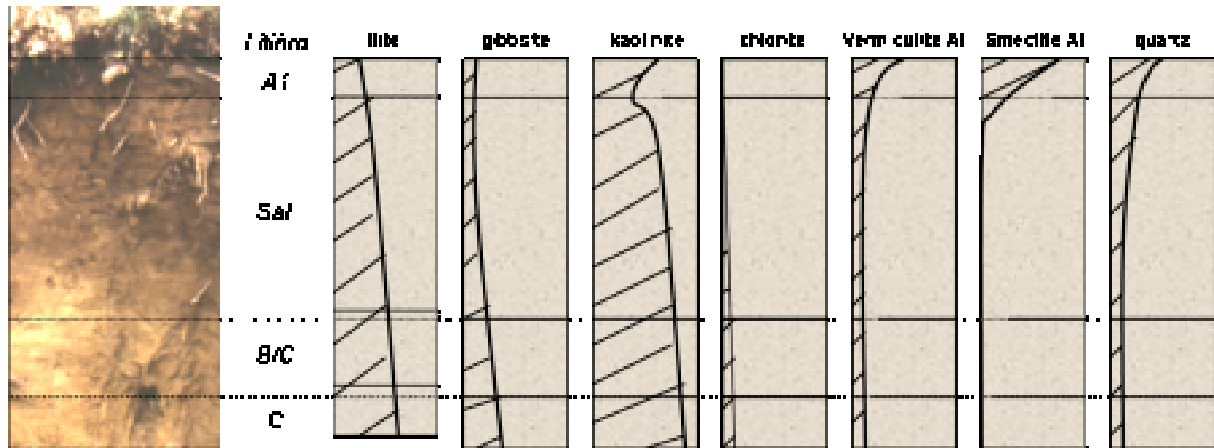


Figure 6 : Evolution verticale des principaux minéraux de la fraction argile

Les extractions sélectives du fer et de l'aluminium ont révélé une quantité importante de minéraux amorphes dont la distribution témoigne d'une dynamique podzolique.

Effet des essences sur l'altération des minéraux

La fraction argile du sol

A ce stade de l'étude, les résultats semblent montrer une évolution divergente des minéraux argileux sous deux essences, le pin laricio et le Douglas, comparativement à la référence TSF. Les critères d'évolution sont les suivants: déstabilisation supérieure des hydroxydes interfoliaires des minéraux expansibles, augmentation de la CEC, diminution de l'Al et du Fe extractible, augmentation de la silice extractible. Ces résultats sont en adéquation avec la chimie des solutions. Comparativement aux autres essences, la production importante de nitrates non prélevés sous Douglas et pin laricio génère une forte acidité qui contribue à l'altération des minéraux du sol. Ces résultats restent à valider, car ne nous disposons pour l'instant que de données partielles, réparties sur l'ensemble des 2 blocs.

Les minéraux tests

Différents minéraux ont été introduits dans les sols durant 4 ans pour étudier deux voies principales d'altération :

- 1- La dissolution avec des plagioclases et de l'apatite qui est quantifiée à partir de la perte de masse.
- 2- La transformation de vermiculites aluminisées et non aluminisées, saturées Na.

L'objectif est d'une part de confirmer que la dynamique de cryptopodzolisation (migration de fer et d'aluminium) est actuelle et d'évaluer l'effet des essences sur la dynamique de 'décalage' de l'espace interfoliaire et d'autre part, d'évaluer l'évolution de la gamiture cationique et la fixation éventuelle de fer et d'aluminium hydroxylé dans l'espace interfoliaire.

Les résultats permettront de confirmer les évolutions mises en évidence sur les minéraux du sol.

L'ensemble de ces données sont issues du travail en cours dans le cadre de la thèse de Louis Mareschal et ne sont pas publiées.

La rhizosphère

(Marie-Pierre Turpault, Louis Mareschal, Christophe Calvaruso, Gilles Nourrisson, INRA BEF –Nancy)

La rhizosphère définie comme étant la zone du sol sous l'influence de la racine est un sous-système du sol particulièrement intéressant à étudier car son fonctionnement peut être différent du sol total. Il pourrait contribuer à certains flux notamment aux flux d'éléments issus de l'altération des minéraux du sol. Le but de cette étude est de déterminer :

- 1- en quoi la rhizosphère est différente du sol global (caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques) et quelle est l'influence de l'essence forestière
- 2- quelle est la contribution potentielle de cette zone dans différentes fonctions (minéralisation de la matière organique et altération des minéraux). Cette contribution est-elle dépendante de l'essence ?

Caractéristiques physico-chimiques en fonction des essences

Sept peuplements ont été étudiés, la forêt native (TSF) et les plantations de hêtre, chêne, épicéa témoin et fertilisé, Douglas témoin et fertilisé, à partir de 18 à 20 échantillons de sol prélevés à trois profondeurs (0-3, 3-10 et 10-23 cm) où ont été séparés le sol rhizosphérique (sol accolé aux racines) et le sol global (sol restant).

Cette étude a montré que quelle que soit l'essence (sauf DF en surface) la rhizosphère est plus **riche** en C, N, CEC, S/CEC, K/CEC, Mg/CEC, Ca/CEC et présente moins d'acidité échangeable. En général, la rhizosphère a un pH supérieur ou égal au sol global et une charge d'aluminium plus faible (complexation).

Plusieurs effets rhizosphériques sont spécifiques à certaines essences. C'est le cas pour le pH du sol rhizosphérique sous l'épicéa qui est inférieur au pH du sol global. La charge de l'aluminium échangeable dans la rhizosphère du TSF est plus élevée que dans le sol global et elle est supérieure ou égale dans EF.

Caractéristiques minéralogiques (chêne et épicéa)

Le but des expérimentations est de déterminer les propriétés minéralogiques du sol dans la rhizosphère et hors rhizosphère sous chêne et sous épicéa.

Les résultats montrent un effet de la rhizosphère avec une dissolution des phases extractibles par les traitements au tricitrate de Na (complexant) et citrate-bicarbonate-dithionite (complexant et réducteur) plus importante. La différence entre argiles rhizosphériques et globales est plus marquée sous épicéa que sous chêne. Les analyses totales, quant à elles, reflètent un enrichissement ou un appauvrissement selon le compartiment du sol et l'élément considéré : plus de Si totale dans la rhizosphère quelle que soit l'essence et la profondeur, moins de Mg total, d'Al total, et de Fe total. (ces données proviennent d'un échantillon moyen issu de 20 échantillons individuels pour chaque compartiment de sol)

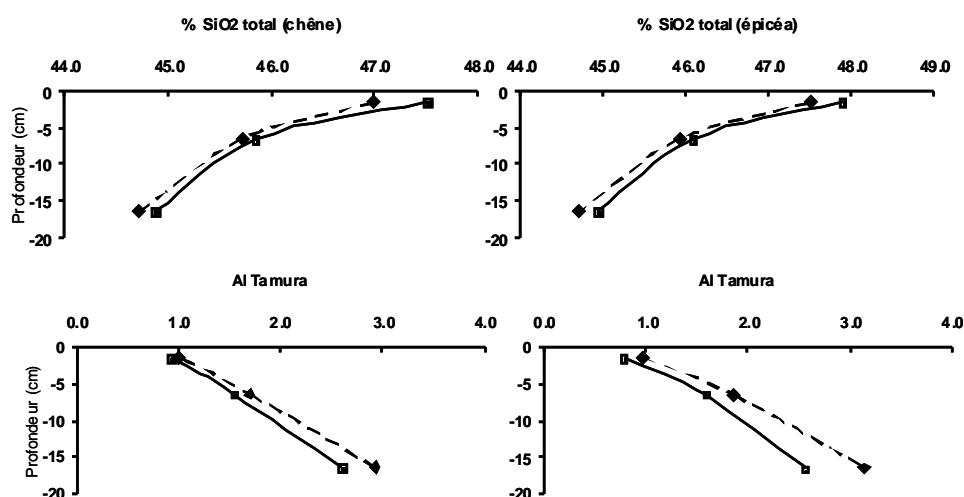


Figure 7 : Pourcentage de silice totale et d'Al extrait par le tricitrate de Na dans les sols rhizosphériques et globaux sous chêne et sous épicéa. En pointillés, le sol global et en trait continu, le sol rhizosphérique.

Les minéraux gonflants sont quant à eux plus expansibles dans la rhizosphère de l'épicéa en surface, ce qui confirme les analyses obtenues par extractions : les quantités plus faibles d'hydroxydes d'aluminium et de fer dans l'espace interfoliaire ne bloquent pas l'expansion des feuillets gonflants soumis à la solvataion par l'éthylène-glycol.

Ce 'décalage' des espaces interfoliaires est la conséquence d'une production d'agents altérants (proton/ acides organiques complexants) produits par les racines et les microorganismes.

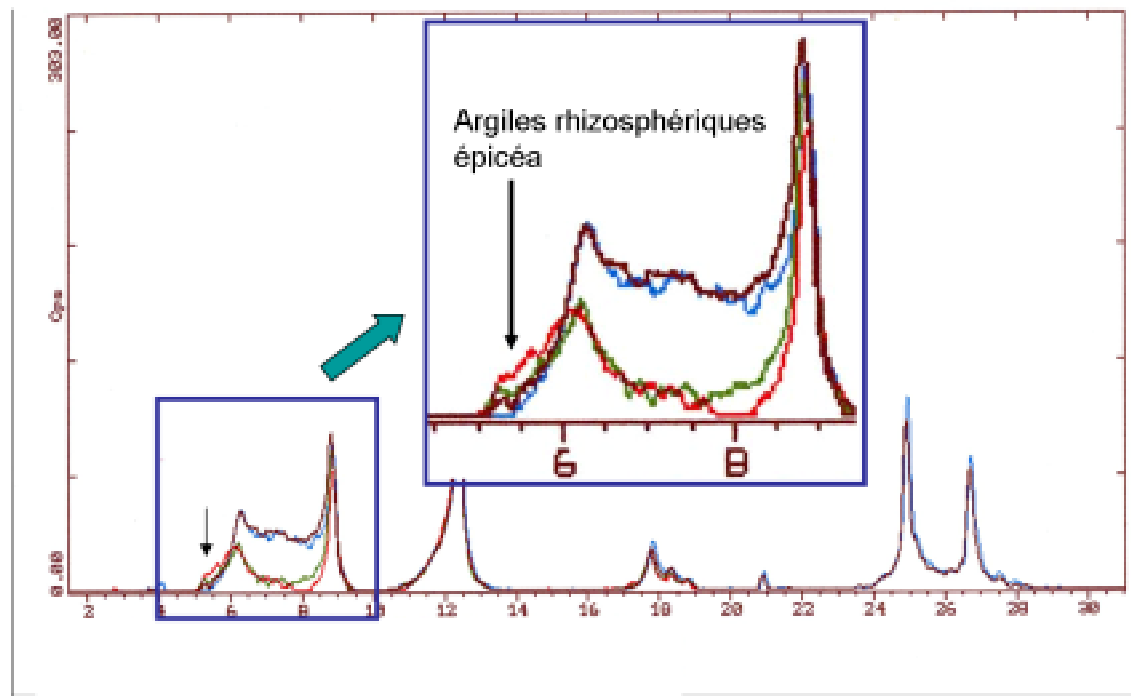


Figure 8 : Diffractogramme de rayons X des argiles (saturées en calcium et glycolées) prélevées en surface (-1.5 cm) dans le sol global et rhizosphérique sous épicéa et chêne.

En conclusion, la rhizosphère est connue pour être une zone présentant des caractéristiques physico-chimiques et biologiques différentes de celles observées dans le sol global. Par ces analyses, nous mettons également en évidence un effet de la rhizosphère sur la minéralogie des sols et notamment une altération plus marquée des minéraux liée à l'activité des racines des arbres forestiers et des microorganismes associés à ces racines. La potentialité de minéralisation de la matière organique est plus importante dans la rhizosphère et cette augmentation se traduit par une production supplémentaire d'ammonium pour les différentes essences testées (Colin-Belgrand *et al.*, 2003).

La production d'azote minéral étant pratiquement exclusivement sous forme ammonium dans le peuplement d'épicéa, le prélèvement racinaire azoté est principalement sous forme ammonium. Afin de conserver son électroneutralité, la racine doit émettre des protons ce qui explique la diminution du pH du sol rhizosphérique de ce peuplement. Les protons produits par la racine peuvent altérer les minéraux et rendre localement les nutriments plus disponibles.

Les solutions du sol

(Jérôme Jaffrain, Frédéric Gérard, Dominique Gelhaye, Pascal Bonnaud, Benoît Pollier,
Louisette Gelhaye, Séverine Bienaimé, Jacques Ranger, INRA BEF Nancy)

Les solutions du sol sont de très bons indicateurs du fonctionnement actuel des sols et sont particulièrement pertinentes pour tester l'effet des essences. Elles permettent de plus de caractériser et de modéliser le milieu géochimique en équilibre avec la phase solide du sol et par la même de préciser la nature de la solution nutritive des arbres et enfin, elles servent à quantifier les pertes par drainage en les associant à un bilan hydrique.

Le bloc I du site de Breuil a été instrumenté en 2001 et fait l'objet des observations suivantes :

| | sites | Profondeurs/répétitions | analyses |
|---|---|--|---|
| Solutions libres | Forêt native : TsF Plantations : Ch, H, Ep, Do, P la., S Nord. Plantations Fertil. : Ep, Do | A la base des litières : 2 x 9 mini-lysimètres sans tension (5 cm x 50 cm) | pH Analyses totales minérales : COD ; Si, Al, Fe, K, Ca, Mg, Mn, P, S Analyses spécifiques : NO ₃ , NH ₄ , H ₂ PO ₄ , SO ₄ , spéciation Al (1) |
| Solutions libres (plaques lysimétriques sans tension) (2) | Forêt native : TsF | -15 cm, -30 cm, -60 cm | Id. (depuis octobre 2003) |
| Solutions liées (bougies poreuses) | Forêt native : TsF Plantations : Ch, H, Ep, Do, P la., S Nord. Plantations Fertil. : Ep, Do | -15 cm, -30 cm, -60 cm, -100 cm -15 cm, -30 cm, -60 cm | Id. Id. |
| Solutions liées (centrifugation) | Forêt native : TsF Plantations : H, Do | -15 cm, -30 cm -15 cm, -30 cm | Id. Id. 7 campagnes sur les peuplements T, Do He |
| Solutions liées (2) (micro bougies rhizons) | Forêt native : TsF Plantations : Ch, Ep. | -2, -5, -10 cm (4 répétitions de 8 rhizons) | Id. Mesures débutées en octobre 2003 |

(1) Prévu 2003 ; (2) Travail de JP Boudot Limos

Tableau 14 : Détail des travaux réalisés sur les solutions du sol à Breuil.

Les solutions collectées par les bougies poreuses suivies sur plusieurs cycles, permettent d'étudier la géochimie des solutions du sol de la forêt de référence et les modifications induites par la substitution d'essence et la fertilisation initiale des résineux.

La composition moyenne des solutions de la forêt native collectées de Novembre 2001 à Novembre 2004 est la suivante :

| | pH | DOC | K ⁺ | Ca ⁺⁺ | Mg ⁺⁺ | Al ⁺⁺⁺ | H ₄ SiO ₄ | N-NO ₃ ⁻ |
|---------|------|------|----------------|------------------|------------------|-------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| litière | 4,13 | 45,1 | 2,6 | 0,9 | 0,5 | 0,6 | 1,6 | 2,0 |
| -15 cm | 5,12 | 11,5 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,5 | 2,5 | 0,1 |
| -30 cm | 5,25 | 4,9 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 2,1 | 0,05 |
| -60 cm | 5,16 | 3,1 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 1 | 0,1 |

Tableau 15 : composition moyenne des solutions de la forêt native collectées de Novembre 2001 à Novembre 2004 (données en mg.L⁻¹).

Les solutions sont acides et diluées. L'aluminium y est majoritairement sous forme complexée à la matière organique.

L'effet des essences est très significatif comme le montrent les données suivantes :

1- Les concentrations des **nitrate**s (ppm)

| Profondeur (cm) | Chêne | Douglas fertilisé | Douglas | Epicéa fertilisé | Epicéa | Hêtre | Pin Laricio | Sapin Nordmann | Forêt native |
|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|------------------|-------------------|
| 0 | 7.3 ^{bc} | 18.0 ^a | 10.3 ^b | 10.0 ^b | 7.5 ^{bc} | 7.4 ^{bc} | 12.9 ^{ab} | 3.0 ^c | 2.0 ^c |
| 15 | 17.5 ^b | 9.3 ^c | 28.2 ^a | 0.4 ^d | 2.7 ^d | 1.6 ^d | 25.7 ^a | 0.5 ^d | 0.1 ^d |
| 30 | 14.9 ^b | 7.3 ^c | 34.2 ^a | 0.3 ^d | 1.9 ^d | 0.9 ^d | 18.2 ^b | 0.9 ^d | 0.05 ^d |
| 60 | 10.0 ^c | 4.5 ^d | 31.1 ^a | 0.2 ^d | 2.6 ^d | 0.5 ^d | 19.5 ^b | 2.4 ^d | 0.1 ^d |

2- Les concentrations en **calcium**, (ppm)

| Profondeur (cm) | Chêne | Douglas fertilisé | Douglas | Epicéa fertilisé | Epicéa | Hêtre | Pin Laricio | Sapin Nordmann | Forêt native |
|-----------------|------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|
| 0 | 2.7 ^c | 6.2 ^a | 2.1 ^{cd} | 4.7 ^b | 1.7 ^{de} | 1.4 ^{ef} | 2.3 ^{cd} | 1.1 ^f | 0.9 ^f |
| 15 | 0.9 ^b | 0.8 ^b | 1.2 ^a | 0.3 ^c | 0.5 ^c | 0.4 ^c | 0.9 ^b | 0.3 ^c | 0.2 ^d |
| 30 | 0.8 ^b | 0.7 ^{bc} | 0.9 ^a | 0.3 ^d | 0.3 ^d | 0.2 ^{de} | 0.6 ^c | 0.1 ^e | 0.1 ^e |
| 60 | 0.5 ^b | 0.6 ^a | 0.4 ^b | 0.6 ^a | 0.4 ^b | 0.3 ^c | 0.6 ^a | 0.2 ^c | 0.1 ^d |

3- Les concentrations en **aluminium** (ppm)

| Profondeur (cm) | Chêne | Douglas fertilisé | Douglas | Epicéa fertilisé | Epicéa | Hêtre | Pin Laricio | Sapin Nordmann | Forêt native |
|-----------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| 0 | 1.0 ^b | 0.6 ^c | 0.5 ^{cd} | 0.5 ^{cd} | 0.4 ^d | 0.4 ^d | 1.2 ^a | 0.5 ^{cd} | 0.6 ^c |
| 15 | 2.1 ^b | 1.4 ^c | 2.2 ^b | 0.5 ^{de} | 1.0 ^{cd} | 0.3 ^e | 3.0 ^a | 0.8 ^{de} | 0.5 ^{de} |
| 30 | 1.3 ^c | 1.4 ^{bc} | 2.1 ^a | 0.4 ^d | 0.3 ^d | 0.4 ^d | 1.6 ^b | 0.3 ^d | 0.2 ^d |
| 60 | 1.2 ^c | 1.0 ^c | 2.7 ^a | 0.3 ^d | 0.4 ^d | 0.2 ^d | 1.9 ^b | 0.3 ^d | 0.2 ^d |

Tableau 15 : Effet de essences sur la composition des solutions pour quelques éléments (données en mg.L⁻¹)

Les relations entre nitrates et aluminium sont très significatives et traduisent le processus d'acidification des sols par le processus de nitrification quand la production de nitrates est excédentaire par rapport à leur consommation. Le bilan de protons est alors positif et conduit à la désaturation du sol. C'est le cation dominant qui est échangé contre le proton, ici Al.

La spéciation chimique de l'aluminium indique que la dynamique actuelle du fonctionnement biogéochimique des sols est contrôlée par des mécanismes différents en fonction des essences. La nitrification, excédentaire par rapport au prélèvement biologique, se traduit par une forte acidification des sols sous Douglas, pin Laricio et chêne. Sous épicéa, sapin de Nordmann et hêtre, les nitrates résiduels sont beaucoup plus limités et le processus de complexation organique prend de l'importance relative. Sous la forêt native, la nitrification est nulle, la mobilisation et le transfert d'aluminium ont nécessairement une autre origine, probablement plus en relation avec l'acidité et les ligands organiques.

Les essences impriment donc déjà une évolution sensible du fonctionnement biogéochimique du sol avec un pôle où l'acidolyse se développe fortement (Douglas, pin laricio) et un pôle où cette acidolyse est très limitée (forêt native).

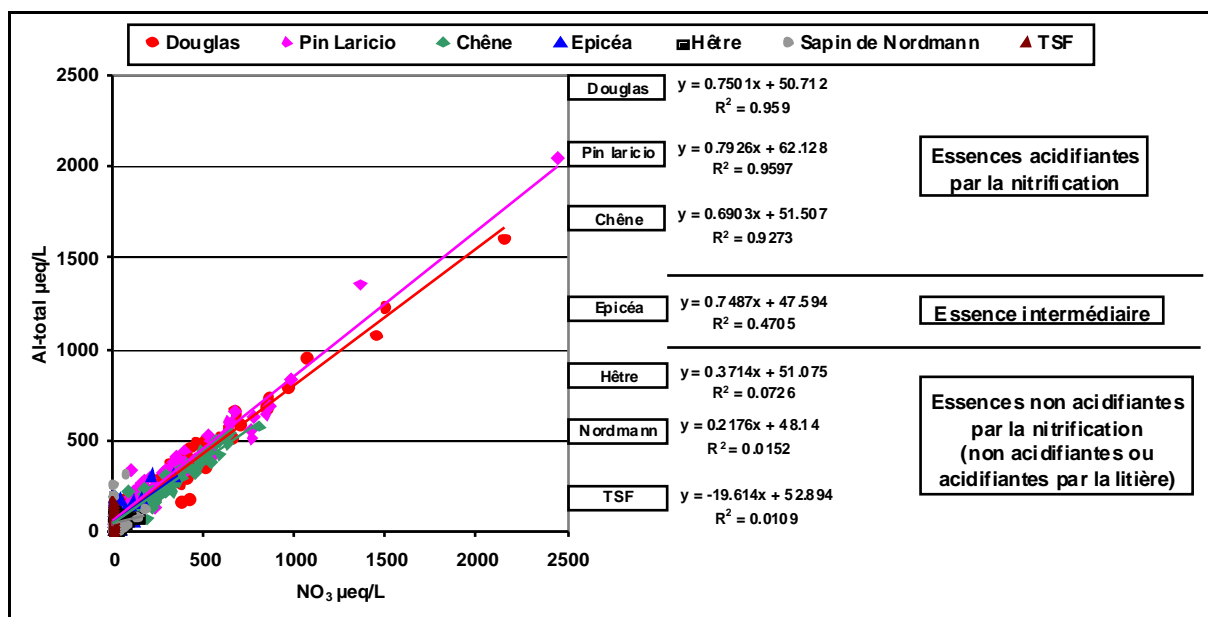


Figure 9 : Relations entre les concentrations en Al et nitrate dans les solutions du sol de -15 à -60 cm, sous les différents peuplements.

La dynamique de la composition chimique des solutions montre un effet saisonnier assez net, en relation avec l'activité biologique, d'une part avec la production de nitrates par la minéralisation de la matière organique et d'autre part avec la consommation de ces nitrates par les organismes (micro-organismes et arbres).

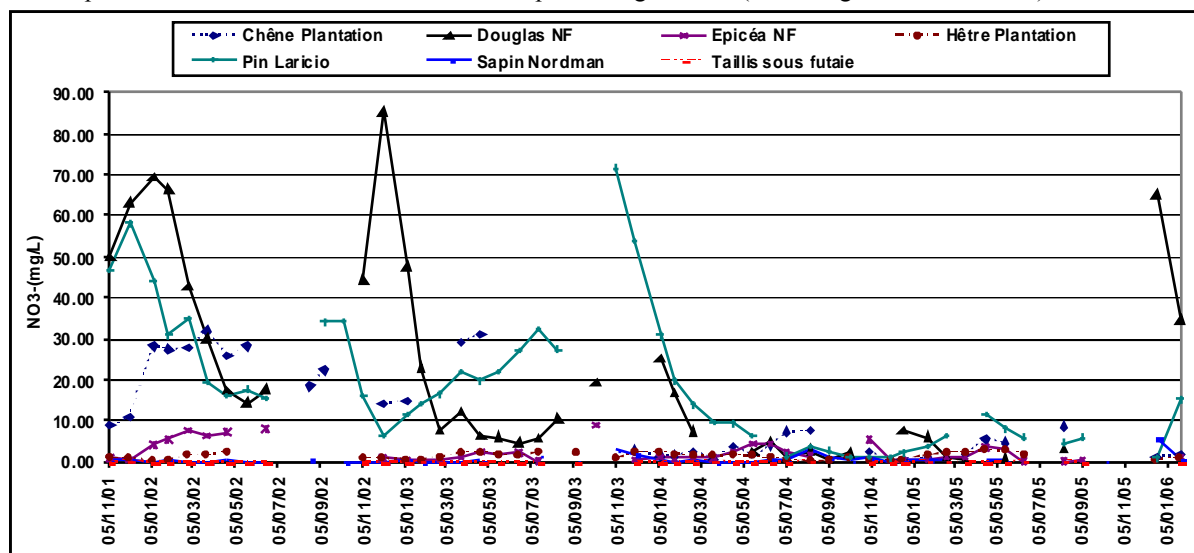


Figure 10 : Evolution de la concentration en nitrates dans les solutions de bougies poreuses à -15 cm en fonction des essences.

La période cruciale pour la qualité des sols est celle où les nitrates sont produits et non consommés. C'est ce qui se passe en Automne avec à cette saison un risque important de drainage vers le sous-sol de nitrates et d'aluminium. Le nitrate représente une perte d'azote pour l'écosystème et un gain potentiel pour les eaux de surface s'il n'est pas dégradé dans le sous-sol. Le transfert d'Al toxique représente un risque environnemental potentiel.

La fertilisation modifie assez nettement la qualité des solutions du sol par plusieurs mécanismes :

- la recharge directe des solutions par les produits apportés, exclue ici
- le recyclage des éléments par les litières : les apports de litière au sol varient qualitativement et quantitativement avec les essences
- la modification des apports atmosphériques : les sempervirents capturent potentiellement plus de dépôts secs que les feuillus
- la modification des processus de minéralisation de la matière organique, due à la qualité des apports mais également à la nature et à l'activité des organismes décomposeurs.
- la production accrue de biomasse par fertilisation se traduit par un prélèvement plus fort d'éléments dans la solution du sol

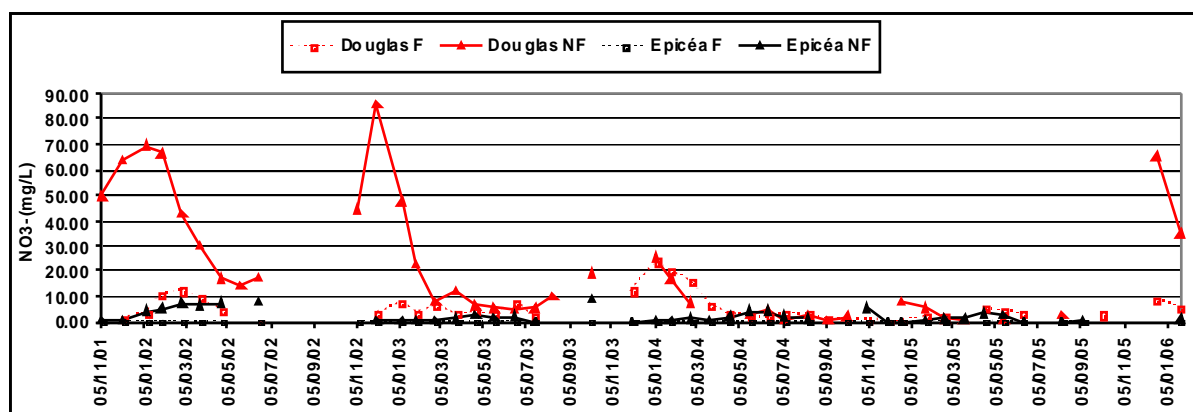


Figure 11 : Effet de la fertilisation initiale sur la teneur en nitrates et la dynamique des solutions à 15 cm de profondeur.

La figure montre la variation temporelle de la concentration en nitrates à 15 cm de profondeur sous les peuplements témoins et fertilisés. Le comportement est assez différent entre les essences : le Douglas stimule les organismes nitrifiants contrairement à l'épicéa. Dans les deux cas, les solutions du peuplement fertilisé sont plus pauvres en nitrates (seul effet de la consommation ?). La variabilité interannuelle est forte et nécessite un suivi à moyen terme.

La quantification des pertes par drainage n'a pas encore été réalisée. Elle nécessite le développement d'un modèle hydrique prenant en compte les paramètres suivants : apports par la pluie, interception et évaporation des couverts, évaporation directe au sol, transpiration des arbres.

Biodégradation des matières organiques du sol

(Judicaël Moukoui, Jacques Berthelin, Colette Munier-Lamy, Nadim Malaoui Limos Nancy, Francis Andreux, UMR Géosol Microbiologie Dijon, Bernd Zeller, Morgan Kunze, Manon Pasteur, Jacques Ranger, INRA BEF Nancy)

La décomposition des matières organiques du sol est triplement affectée par les essences : par la nature des restitutions, par le microclimat que les essences induisent et par la structuration des populations de décomposeurs in fonction des essences.

Les travaux menés à Breuil portent sur ce compartiment organique étudié par différentes approches :

- la dynamique globale de la biodégradation des litières au sol
- la décomposition des litières abordée par approche expérimentale *in* ou *ex situ*
- les communautés bactériennes ou fongiques impliquées dans la biodégradation des litières et leur activité (cf chapitre Biologie)
- la biodégradation de la matière organique du sol organo-minéral (travail en cours non présenté)
- la minéralisation brute ou nette de l'azote minéral du sol

La dynamique globale de la biodégradation des litières au sol

Elle est estimée par un index global qui n'est autre que le ratio des apports cumulés sur une période donnée à la quantité réelle de matière restant à la fin de la période. Plus cette durée est courte plus le résultat a d'intérêt. Cet index discrimine fortement les essences, mais devra être amélioré pour prendre en compte des processus courants et non d'une intégration depuis la mise en place des peuplements.

| | Temps de résidence de C dans la litière (années) |
|--------------------|--|
| Forêt native (TsF) | 9,8 |
| Plantations | |
| Chêne | 3,1 |
| Hêtre | 3,8 |
| Douglas | 7,6 |
| Douglas fertilisé | 5,3 |
| Epicéa | 9,2 |
| Epicéa fertilisé | 7,1 |
| Pin Laricio | 4,5 |
| Sapin de Nordmann | 8,9 |

Tableau 16 : Index de décomposition du carbone organique du sol (données issues des litières au sol (chapitre III tab III.7 et des restitutions par les litières chapitre II tab II.6)

La décomposition des litières abordée par approche expérimentale *in situ* (Judicaël Moukoui Limos-BEF, Colette Munier-Lamy Jacques Berthelin CNRS-UHP Limos ; Jacques Ranger BEF)

La décomposition *in situ* des litières a été suivie sur une période de 30 mois par la technique des sachets de litières laissés à incuber *in situ*.

Les caractéristiques initiales des litières des différents peuplements étudiés hêtre, chêne, épicéa, Douglas et forêt native sont assez différentes et seront utilisées pour expliquer la décomposition.

| | C (%) | N (%) | C/N | constituants majeurs des litières | | | | |
|--------------|---------------|--------------|---------------|-----------------------------------|----------------|------------------|---------------|--------------|
| | | | | solubles | hémicellulose | cellulose (%) | lignine | cendres |
| hêtre | 48,88 (0,19)c | 1,61 (0,11)b | 30,43 (1,91)d | 37,07 (0,56)c | 16,50 (1,63)a | 19,35 (1,24)b | 23,62 (0,72)b | 3,45 (0,13)d |
| chêne | 49,34 (0,20)b | 2,06 (0,03)a | 23,91 (0,39)e | 44,16 (0,72)b | 17,57 (0,36)a | 17,95 (0,31)b | 16,16 (0,73)c | 4,14 (0,09)c |
| épicéa | 48,73 (0,30)c | 1,33 (0,04)c | 36,72 (1,19)c | 30,22 (2,08)d | 13,31 (2,22)b | 22,08 (1,23)a | 29,91 (1,32)a | 4,49 (0,21)b |
| Douglas | 50,57 (0,24)a | 0,78 (0,03)e | 64,68 (2,80)a | 48,18 (1,15)a | 9,17 (2,46)c | 12,94 (1,92)c | 24,40 (3,35)b | 5,30 (0,07)a |
| forêt native | 48,34 (0,13)d | 1,02 (0,04)d | 47,21 (1,75)b | 32,24 (1,01)d | 16,66 (0,74)ab | 23,46 (0,85)a | 24,10 (0,25)b | 3,53 (0,04)d |

Tableau 17 : Caractérisation des litières des différents peuplements.

La courbe de perte de poids de type exponentielle décroissante, indique que la vitesse de décomposition des litières varie fortement avec le temps et qu'elle est plus importante sous feuillus que sous résineux. Après 4 mois de séjour *in situ*, on observe une perte de poids significativement plus importante pour les litières de chêne et de Douglas par rapport à l'épicéa et au hêtre. A l'issue de la première année, les litières de chêne et de hêtre ont largement dépassé les 50 % de perte de poids et il faut attendre quasiment 2 ans pour que celles de Douglas et d'épicéa dépassent à leur tour ce seuil. Au terme des 30 mois, l'ordre de décomposition est le suivant : chêne>hêtre>Douglas>épicéa.

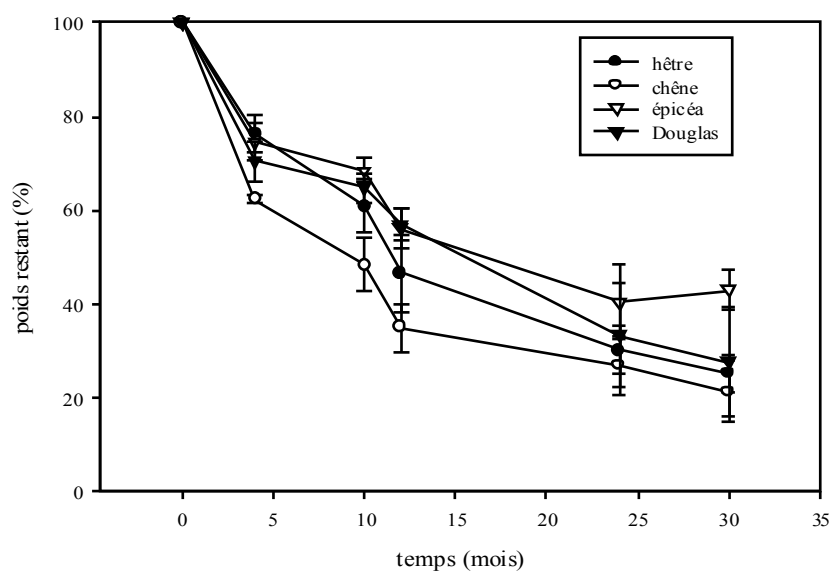


Figure 12 : Cinétique de perte de poids des échantillons de litière sous les couverts respectifs

La perte de carbone suit la perte de poids ; la différence de teneur en C des différents composés minéralisés et résiduels étant limitée. La dynamique de l'azote indique que le contenu des litières en incubation ne change pas beaucoup jusqu'à 10 mois puis décroît systématiquement au cours du temps laissant penser qu'une compensation des pertes du substrat s'opère par de l'azote allochtone, apporté par les décomposeurs. Au total, la dynamique du rapport C/N des échantillons de litières discrimine assez bien les différentes essences et les feuillus des résineux.

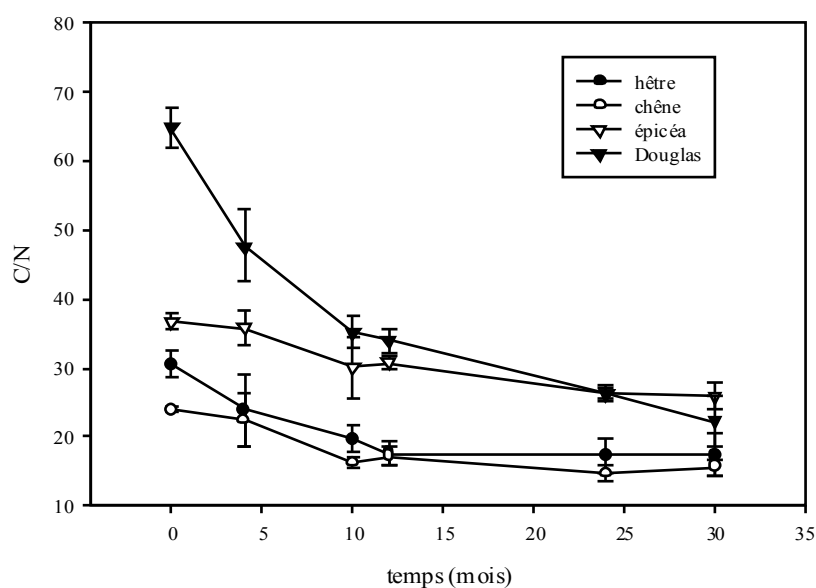


Figure 13 : Dynamique du C/N au cours de la décomposition des litières

Des **mélanges** de litières ont également été mis à incuber *in situ* aux interfaces entre les peuplements pour apporter des informations sur ce traitement sylvicole prôné depuis longtemps pour éviter la dégradation des sols sous les monocultures résineuses. Les premiers résultats montrent que les constantes de décomposition des litières mixtes feuillus-résineux ont des valeurs qui dépendent des types de mélanges et de l'intensité du mélange. Le mélange hêtre-épicéa n'est synergique que si la proportion de hêtre atteint 75% ; le mélange chêne Douglas en proportion 75/25 retarde la décomposition globale. Il faut donc attendre les prochains prélèvements pour éclaircir les conclusions.

| Peuplements | Type de litière | demi-vie | | |
|---------------|-----------------|----------|---------|---------|
| | | 12 mois | 24 mois | 30 mois |
| | <i>simple</i> | | | |
| hêtre | | 15,5 c | 18,9 | 22,2 ab |
| chêne | | 11,6 c | 21,2 | 17,7 a |
| épicéa | | 20,9 ab | 17,4 | 25,4 ab |
| Douglas | | 20, ab | 19,3 | 26,4 ab |
| | <i>mélange</i> | | | |
| hêtre/épicéa | 50% | 18,8 abc | 19,4 | 23,1 ab |
| hêtre/épicéa | 75% / 25% | 26,6 a | 17,7 | 18,3 ab |
| chêne/Douglas | 50% | 12,8 c | 17,0 | 18,1 ab |
| chêne/Douglas | 75% / 25% | 16,3 c | 21,0 | 28,0 ab |

Tableau 18 : Comparaison de la décomposition des litières monospécifiques à celle des litières mixtes

La décomposition des litières abordée par approche expérimentale *ex situ* (Florence Tum, Hugues Titeux, Bruno Delvaux, Unité de Sciences du sol, Université Catholique de Louvain la Neuve -Belgique).

L'objectif de ce travail est de caractériser les propriétés des litières sous l'angle des transformations du carbone et de l'azote. Une attention particulière sera portée sur la production de carbone organique dissous, de nitrate et d'ammonium qui jouent un rôle majeur dans les processus d'altération des minéraux et/ou de nutrition végétale. Les litières récoltées dans les parcelles de forêt native, de hêtre, de chêne, d'épicéa, de Douglas (témoin et fertilisé) sont subdivisées en sous-horizons (Oln, Olv, Ofl, O2, O3). Des incubations en conditions contrôlées permettent de suivre en continu le dégagement de CO₂, les formes minérales et organiques de l'azote et le carbone organique dissous.

Ces expériences sur les horizons séparés ont mis en évidence une libération préférentielle du CO₂ dans les niveaux superficiels, tandis que COD est libéré principalement dans les horizons intermédiaires. Dans la litière de chêne, les horizons supérieurs libèrent également des quantités importantes de COD. Les contributions respectives des différentes formes d'azote évoluent également selon l'horizon : on passe généralement d'une dominance de l'azote organique en Oi à une dominance du nitrate en Ah, en passant par une dominance de l'ammonium en Of. Pour l'épicéa, on observe cependant que l'ammonium reste la forme dominante d'azote dissous jusqu'à l'horizon Ah.

Cette étude démontre que les différentes plantations ont fortement modifié le fonctionnement des litières, et en particulier la dynamique de l'azote. Ces modifications sont susceptibles d'affecter l'évolution du sol, en particulier l'altération des minéraux.

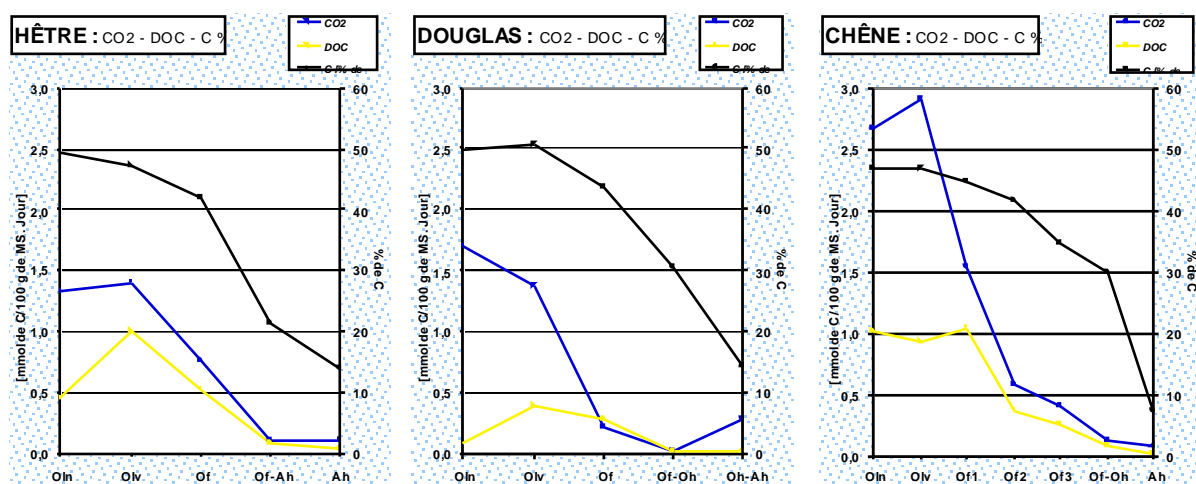


Figure 14 : Evolution des paramètres CO₂, DOC, Corg (% de MS) sur les sous-horizons individualisés dans les litières (mesures issues d'incubations à 4°).

La minéralisation brute ou nette de l'azote minéral du sol (Bernd Zeller, Morgan Kunze, Manon Pasteur INRA BEF, Catherine Henault UMR Microbiologie-Géosol Dijon)

Effet traitements de rémanents, (Pasteur 2005)

Le dispositif expérimental mis en place dans la forêt de Breuil (Morvan) combine les effets dus aux essences forestières et au mode de gestion des rémanents. En avril 2005, une incubation a été réalisée sur un prélèvement de sol des couches organiques, 0-5 cm, 5-10 cm et 10-20 cm sur 8 points de la grille systématique dans chaque parcelle du bloc I.

La comparaison des teneurs en azote minéral montre que le fait d'andainer ou de brûler les rémanents ne modifie pas ces teneurs. En revanche, elle montre que les espèces forestières modifient les teneurs et les formes d'azote minéral. Ainsi, les teneurs en azote minéral et le taux de nitrate sont plus élevés sous le pin laricio, le Douglas, le chêne et le hêtre. Ces teneurs sont les plus faibles sous le sapin de Nordmann. Sous le TsF et l'épicéa, les teneurs sont intermédiaires.

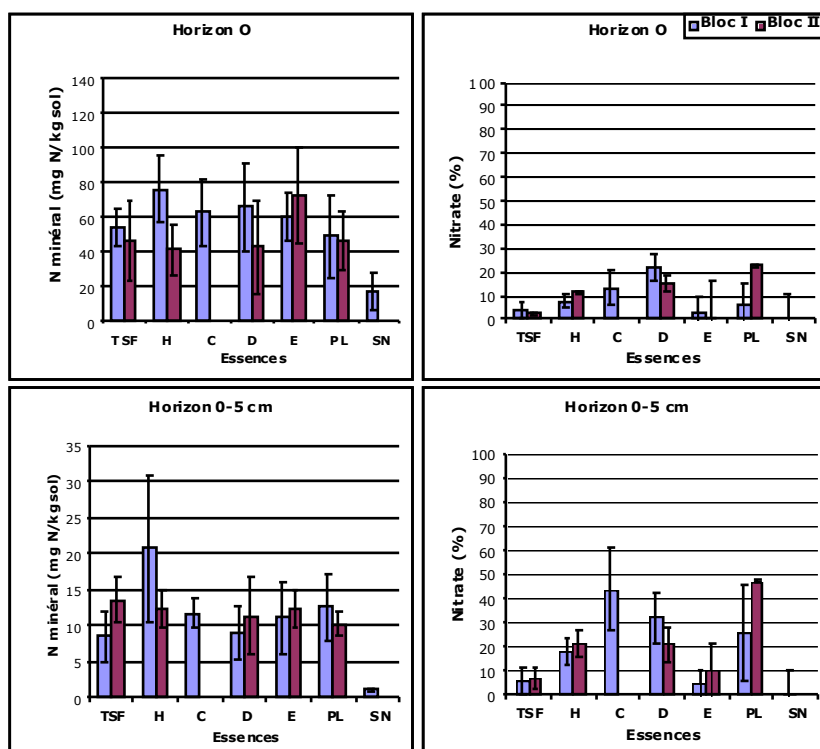


Figure 15 : Concentration en N minéral et % de nitrate dans l'horizon O et 0-5 cm sous TsF, Hêtre (H), Chêne (C), Douglas (D), Epicéa, Pin laricio (PL) et Sapin Nordmann (SN). Valeurs moyennes (n = 8) et écart-type.

La minéralisation de l'azote organique du sol (Bernd Zeller, Morgan Kunze, INRA BEF, Judicaël Moukoui, Colette Munier-Lamy CNRS-UHP Limos ; Catherine Henault UMR Microbiologie-Géosol Dijon)

Dans la plupart de ces études les incubations du sol n'incluent pas tous les peuplements ni plusieurs horizons d'un même profil du sol. Les résultats des incubations ne sont donc pas exhaustifs, néanmoins ils nous donnent une assez bonne description du fonctionnement d'un sol issu d'une des placettes expérimentales.

Pôle chêne vs hêtre dans le TsF des blocs I et II, Pasteur 2005

L'incubation des sols montre une augmentation régulière des teneurs en azote minéral au cours du temps. La durée d'incubation ainsi que la fréquence des extractions ne nous ont pas permis de mettre en évidence une phase de latence (au début de l'incubation) ni un ralentissement de la minéralisation.

- Pour les deux premiers horizons, le nitrate est toujours la forme minoritaire de l'azote minéral des sols. En effet, les pourcentages en nitrate sont inférieurs à 10 % pour l'horizon O et à 35 % pour l'horizon 0-5 cm.
- Pour les deux derniers horizons, le nitrate devient la forme majoritaire de l'azote minéral des sols (sauf pour l'horizon 5-10 cm des sols du bloc I). Dans ce cas, les pourcentages en azote peuvent atteindre près de 70 %.

| Horizons | | O | 0-5 cm | 5-10 cm | 10-20 cm |
|----------------|---------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Nitrification | Chêne | 0,129 (0,139) | 0,166 (0,147) | 0,225 (0,132) | 0,163 (0,125) |
| | Hêtre | 0,466 (0,414) | 0,215 (0,277) | 0,256 (0,241) | 0,206 (0,141) |
| | Bloc I | 0,196 (0,327) | 0,095 (0,038) | 0,157 (0,126) | 0,115 (0,099) |
| | Bloc II | 0,365 (0,346) | 0,287 (0,278) | 0,325 (0,210) | 0,225 (0,101) |
| Minéralisation | Chêne | 5,019 (1,546) | 0,840 (0,324) | 0,349 (0,119) | 0,182 (0,031) |
| | Hêtre | 7,213 (1,689) | 1,250 (0,659) | 0,500 (0,238) | 0,286 (0,197) |
| | Bloc I | 5,472 (1,299) | 1,117 (0,714) | 0,374 (0,139) | 0,165 (0,089) |
| | Bloc II | 6,542 (2,312) | 0,973 (0,337) | 0,475 (0,242) | 0,303 (0,181) |

Les nombres en gras représentent les taux moyens (n=4) et les nombres en italique les écarts types.

Tableau 19 : Taux de nitrification et de minéralisation ($\text{mg N.kg}^{-1} \text{sol j}^{-1}$) au cours de l'incubation (4 semaines, 20°C, humidité constante) des sols de Breuil (TsF I et II: pôle Hêtre et pôle Chêne).

Que ce soit pour la nitrification ou pour la minéralisation, les taux mesurés dans le pôle chêne sont inférieurs à ceux du pôle hêtre. De même, les taux mesurés dans le bloc I sont inférieurs à ceux du bloc II sauf pour les taux de minéralisation de l'horizon 0-5 cm. En général, chêne I est le peuplement qui nitrifie le moins bien et hêtre II celui qui nitrifie le plus. Concernant la minéralisation totale, c'est le chêne I qui présente le taux le plus faible. Le hêtre II est, quant à lui, le peuplement qui minéralise le plus l'azote présent dans le milieu ; la variabilité spatiale est forte.

Effet essence (horizon 0-5 cm) (Kunze 2001, Moukoui 2002)

Les prélèvements ont été effectués en janvier 2001 dans les six peuplements étudiés : TsF, jeune Hêtre JH, jeune Chêne JC, Douglas D, Epicéa E et Pin laricio). Ces prélèvements se font dans l'horizon A1 (0-5 cm) sans tenir compte de la litière ni de l'horizon B_{ph}.

En incubation au laboratoire à 15°C, le sol du TsF se distingue des autres peuplements par une production nette d'azote minéral plus faible. La minéralisation d'azote pour les autres peuplements varie peu. Elle est la plus importante sous hêtre et assez faible sous chêne. La production nette d'azote minéral pour les résineux (Douglas, épicea et pin laricio) est intermédiaire. Le taux de nitrification diffère significativement entre les peuplements. Le sol du TsF ne produit pratiquement pas de nitrates, tandis que les sols sous les deux feuillus nitrifient 100 % de l'azote minéralisé. Sous épicea et Douglas les taux de nitrification sont de 19 % et 28 % de l'azote minéralisé. Le sol sous pin se rapproche des feuillus avec environ 94 % de l'azote minéralisé qui est nitrifié.

| Peuplements | Nitrification | Minéralisation |
|-------------|---------------|----------------|
| TsF | 0.02 (0.004) | 0.34 (0.017) |
| Hêtre | 1.27 (0.036) | 1.22 (0.027) |
| Chêne | 0.65 (0.002) | 0.56 (0.007) |
| Douglas | 0.24 (0.004) | 0.85 (0.015) |
| Pin | 0.99 (0.032) | 1.07 (0.034) |
| Epicéa | 0.18 (0.009) | 0.93 (0.031) |

Tableau 20 : Taux de nitrification et de minéralisation ($\text{mg N.kg}^{-1} \text{ sol j}^{-1}$) au cours de l'incubation (6 semaines, 15°C, humidité constante) des sols de Breuil (TsF, Hêtre, Chêne, Douglas Pin et Epicéa) (données en $\text{mg N.kg sol}^{-1} \text{ j}^{-1}$).

Minéralisation brute (Kunze 2001, Zeller, 2005)

Le flux de minéralisation nette d'azote a été mesuré au cours d'une incubation de quatre semaines et les flux bruts d'azote au cours d'une incubation de deux jours dans 6 peuplements. Les horizons A1 du TsF et de cinq plantations adjacentes de *Fagus sylvatica*, *Picea abies*, *Quercus petraea*, *Pinus laricio* et *Pseudotsuga menziesii* ont été échantillonnés. Les flux bruts de la minéralisation d'azote ont été mesurés 48 heures après l'addition de $^{15}\text{NH}_4$ et $^{15}\text{NO}_3$. La minéralisation brute a été calculée à partir de la dilution de $^{15}\text{NH}_4$ et la nitrification brute à partir de la dilution de $^{15}\text{NO}_3$ mais aussi de la production de $^{15}\text{NO}_3$ à partir de l'apport de $^{15}\text{NH}_4$. La minéralisation brute et nette est la plus basse dans le TsF. La nitrification nette et brute mesurée par enrichissement en $^{15}\text{NO}_3$ y est très faible. La nitrification brute est cependant sensiblement plus élevée lorsqu'on l'évalue par dilution isotopique du $^{15}\text{NO}_3$. Dans les plantations, la minéralisation et la nitrification brute et nette sont les plus faibles sous épicea et les plus élevées sous hêtre et pin Laricio.

Les conclusions sont que (1) La faible minéralisation d'azote dans le taillis sous futaie est directement liée à une faible minéralisation brute et non à l'expression d'une immobilisation microbienne de l'azote minéral formé; (2) l'absence de nitrates dans le TsF n'est pas liée à l'absence de nitrifiants mais plutôt à l'inhibition de leur activité sous le moder, (3) la coupe rase du TsF et sa plantation entraînent une levée partielle ou totale de cette inhibition, et (4) l'activité de nitrifiants hétérotrophes court-circuitant l'étape de libération de NH_4 dans les sols est possible dans ces sols acides. Des études plus approfondies devraient permettre de vérifier ce point et d'identifier ces populations.

| Peuplement | m | n | N |
|-------------|--------------|--------------|--------------|
| TsF | 1.33 (±0.28) | 0.06 (±0.01) | 0.40 (±0.09) |
| Chêne | 7.94 (±0.98) | 0.87 (±0.21) | 2.32 (±0.95) |
| Hêtre | 2.05 (±0.52) | 2.10 (±0.18) | 1.57 (±0.88) |
| Épicéa | 6.43 (±1.36) | 0.11 (±0.04) | 2.17 (±0.40) |
| Douglas | 8.50 (±0.64) | 0.31 (±0.11) | 4.77 (±0.60) |
| Pin laricio | 4.19 (±0.14) | 0.56 (±0.17) | 5.83 (±0.53) |

Tableau 21 : Minéralisation brute de l'azote dans les sols sous TsF, chêne, hêtre, épicéa, Douglas et pin laricio. Les flux bruts ont été calculés selon Barraclough 1991. (m = minéralisation, n = nitrification, N = nitrification calculée après addition du $^{15}\text{NO}_3$). Valeurs moyennes et écart-type (n = 5) (données en $\text{mg N kg}^{-1} \text{sol j}^{-1}$)

Nitrification hétérotrophe vs autotrophe (Hénault 2005)

Afin de mettre en évidence la nitrification hétérotrophe, il faut inhiber la nitrification autotrophe (ici par l'acétylène). Une première approche en combinant la méthode de la dilution isotopique, qui permet de mesurer les flux bruts de minéralisation et nitrification, et la méthode d'inhibition des bactéries nitrifiantes autotrophes par l'usage d'acétylène, a été testée pour l'horizon 5-10 cm sous TsF et Douglas.

La nitrification brute (autotrophe et hétérotrophe) sous TSF est ainsi estimée à $0.16 \text{ mg N kg}^{-1} \text{sol j}^{-1}$, équivalente à la nitrification nette, sous atmosphère ambiante et à 0.06 en présence d'acétylène, soit une contribution d'environ 1/3 de la nitrification hétérotrophe à la nitrification totale. Sous Douglas, la dilution isotopique du pool nitrate par nitrification n'a pas été suffisante pour que l'on puisse conclure.

En **résumé**, les teneurs en N minéral sont similaires pour la même essence dans le bloc I et II. Cependant, la variabilité spatiale des teneurs dans une placette donnée reste importante. L'essence forestière a un effet sur les teneurs et la forme prépondérante de l'azote minéral dans le sol organique et minéral. Sous Douglas, hêtre, chêne et pin laricio on observe une nitrification plus importante que sur TsF, épicéa, et sapin de Nordmann. Les flux bruts de nitrification sont également plus importants sous Douglas, hêtre, chêne et Pin laricio. La nitrification hétérotrophe ne serait pas négligeable dans les sols de la forêt native.

Plusieurs questions restent en suspens : Existe-il un effet saisonnier sur les processus ? Quels sont les acteurs de la minéralisation de l'azote ? Le couplage des flux bruts de l'azote et de l'analyse des communautés bactériennes est en cours. Malgré de très nombreux travaux montrant des modifications du cycle de l'azote sous différentes espèces forestières, on ne sait toujours pas précisément quels sont les déterminants de ce contrôle, ni leur interaction avec d'autres facteurs du milieu. Une manipulation des facteurs contrôlant le cycle de l'azote sur le site de Breuil est en cours pour tester s'il s'agit d'un effet litière ou rhizosphère.

La biologie du sol

Les acteurs biologiques sont assez largement étudiés à Breuil compte tenu de l'effet direct remarquable des essences sur les cycles du carbone et de l'azote et par conséquent des autres nutriments par la nutrition minérale (rôle des symbiotes mycorhiziens).

Les champignons (François Le Tacon, Marc Buée UMR IaM, Claude Bréchet UMR EEF, Bernd Zeller, UR BEF INRA, Jean-Paul Maurice, Groupe Vosgien de Mycologie – 88300 Neufchâteau)

La substitution d'essence modifie le fonctionnement du sol en partie par des effets directs ou induits sur l'activité des organismes du sol. Des fonctions importantes comme la décomposition de la matière organique où l'altération sont très inféodées à l'activité biologique.

Le site de Breuil supporte plusieurs projets qui étudient les populations d'organismes du sol et leur activité potentielle ou réelle.

Les champignons saprophytes et les symbiotes mycorhiziens jouent un rôle important dans le fonctionnement des écosystèmes acides. Les observations ont montré que les mycorhiziens représentaient 52 % du total et les saprophytes 48 %. Les niches écologiques ont été identifiées.

Les essences modifient notablement cette communauté : 104 espèces ont été inventoriées dans le taillis-sous-futaie originel, 76 sous épicéa, 69 sous le sapin de Nordmann, 48 sous le Douglas, 26 sous la plantation de chêne, 26 sous la plantation de hêtre et 25 sous le pin laricio de Corse

L'approche isotopique permet d'approcher l'activité des champignons à partir de l'analyse du $\delta^{13}\text{C}$ et du $\delta^{15}\text{N}$ en se basant sur le substrat utilisé et sur le mécanisme de fractionnement isotopique éventuel au cours des réactions.

Les champignons **saprophytes** ont un mode d'acquisition de l'azote (protéolyse essentiellement) puis de synthèse des protéines qui ne modifient donc pas la composition isotopique en azote de leurs tissus constitutifs. Par contre les processus de cellulolyse et de ligninolyse semblent fortement favoriser l'utilisation du ^{13}C . A l'intérieur des saprophytes, les terricoles (genre *Leotia*) qui utilisent de la matière organique humifiée se distinguent par un $\delta^{13}\text{C}$ de - 26 ‰. De même, l'acicole (NSF) *Microncephale perforans*, se caractérise par un $\delta^{13}\text{C}$ assez négatif. Les autres saprophytes forment un ensemble assez homogène à l'intérieur duquel il n'est guère possible de distinguer des sous-groupes en fonction des niches écologiques.

L'essence n'a pas réellement d'influence encore que les saprophytes se développant sous épicéa semblent avoir un $\delta^{15}\text{N}$ légèrement inférieur à celui de ceux qui se développent sous feuillu.

Les champignons **ectomycorhiziens** présentent une plus large gamme de variations que les saprophytes aussi bien pour le $\delta^{13}\text{C}$ que le $\delta^{15}\text{N}$

Il est possible de distinguer plusieurs pôles dans ce groupe :

- Un pôle de tendance saprophytique uniquement pour l'azote (genre *Laccaria* et à un degré moindre *Russula*).
- Un pôle plutôt saprophytique pour le carbone et semi symbiotique pour l'azote (genre *Lactarius*)
- Un pôle strictement symbiotique pour l'azote et le carbone (genre *Cortinarius* et *Tricholoma*).

Les Bolétacées (genres *Xerocomus* et *Boletus*) forment un ensemble assez homogène, symbiotique pour le carbone et semi-symbiotique pour l'azote.

Au total, on observe une perte considérable de biodiversité dans les plantations qu'elles soient feuillues ou résineuses. Cette perte de biodiversité résulte de la mono-spécificité de l'essence hôte mais elle est due aussi à l'uniformité du peuplement et à la perte de l'hétérogénéité spatiale avec en particulier une uniformisation des microclimats.

Le taillis-sous-futaie originel est très riche en espèces fongiques aussi bien ectomycorhiziennes que saprophytes. Il est en effet plurispécifique en essences forestières (Hêtre, Chêne et Bouleau). De plus sa structure est irrégulière et possède de ce fait une grande variété de niches écologiques. Il est aussi constitué en partie d'arbres âgés qui fournissent des quantités importantes de bois mort.

Les plantations de Chêne, de Hêtre, de Douglas et de Pin laricio sont très pauvres en espèces fongiques. Ce sont en effet des peuplements monospécifiques qui de plus présentent une forte couverture du sol et une forte consommation d'eau, ce qui a pour conséquence un régime hydrique défavorable à la fructification des champignons et au développement des mycorhizes. Les arbres sont également jeunes et ne produisent que peu de bois mort.

A l'opposé, le Sapin de Nordmann est relativement riche en espèces. Cette richesse pourrait s'expliquer par

l'irrégularité du peuplement et un régime hydrique plus favorable à la fructification des champignons. Les espèces fongiques sont aussi relativement riches sous épicéa, ce qui semble un caractère propre à cette essence. Aucun effet de la fertilisation n'a pu être mis en évidence.

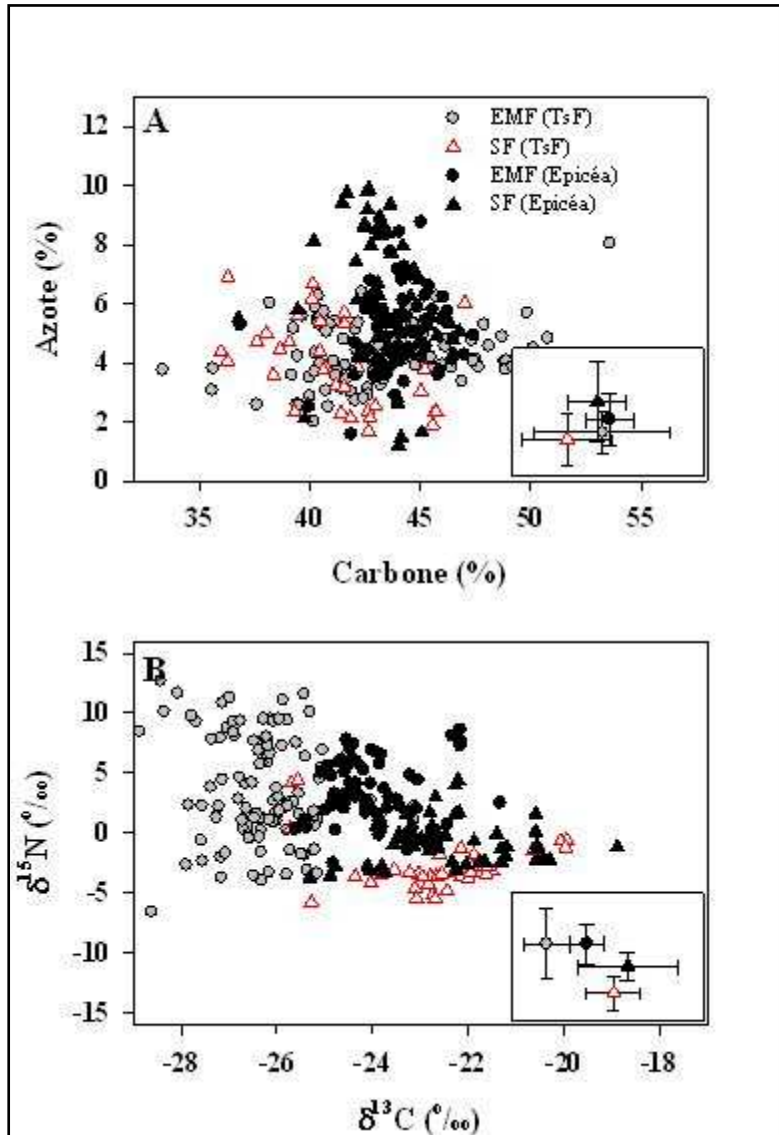


Figure 16 : Discrimination entre les sporophores des champignons ectomychorziens (EMF) et saprophytes (SF) en fonction de A- le carbone et l'azote organique total et B- leur valeur en $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$.

Les micro-organismes du sol (David Lejon, Rémi Chaussod et Lionel Ranjard UMR Microbiologie et Géochimie des Sols - INRA -Université de Bourgogne CMSE Dijon)

Les communautés microbiennes ont été étudiées par une approche de biologie moléculaire : nommée ARISA (ou *Ribosomal Intergenic Spacer Analysis*). Elle consiste après extraction *in situ* de l'ADN des communautés microbiennes telluriques, à l'amplification par une réaction de polymérisation en chaînes avec des amorces consensus marquées, de la région ribosomique comprise entre le gène 16S et le gène 23S chez les bactéries et la région comprise entre le 18S et le 28S chez les champignons (ces régions sont communément appelées IGS chez les bactéries et ITS chez les champignons). La particularité de ces gènes est un polymorphisme de taille important

existant entre les organismes. C'est pourquoi, les produits PCR marqués sont de tailles variables et sont séparés électrophorétiquement sur un séquenceur à gel de type LiCOR. Les profils sont analysés de façon statistique par une analyse en composante principale qui permet d'obtenir le *fingerprint* moléculaire de la structure génétique de la communauté microbienne. En d'autres termes, le principe de cette technique repose sur l'analyse de la structure populationnelle des communautés établie sur la base du polymorphisme de taille de l'IGS ou ITS des organismes constituant cette communauté.

Ne sont représentés ici que les résultats à 0-5cm montrant une discrimination robuste des communautés bactériennes et fongiques associées aux différentes essences, suggérant que ces essences structurent les populations microbiennes. Ces observations pourraient être expliquées par la sélection de populations particulières possédant des aptitudes métaboliques pour dégrader des litières de qualité biochimique différents. Par exemple, l'analyse PCA montre que les structures génétiques des communautés microbiennes associées au chêne et au Douglas sont plus proches entre elles que par rapport aux autres essences révélant un "impact" similaire de ces essences sur les communautés microbiennes.

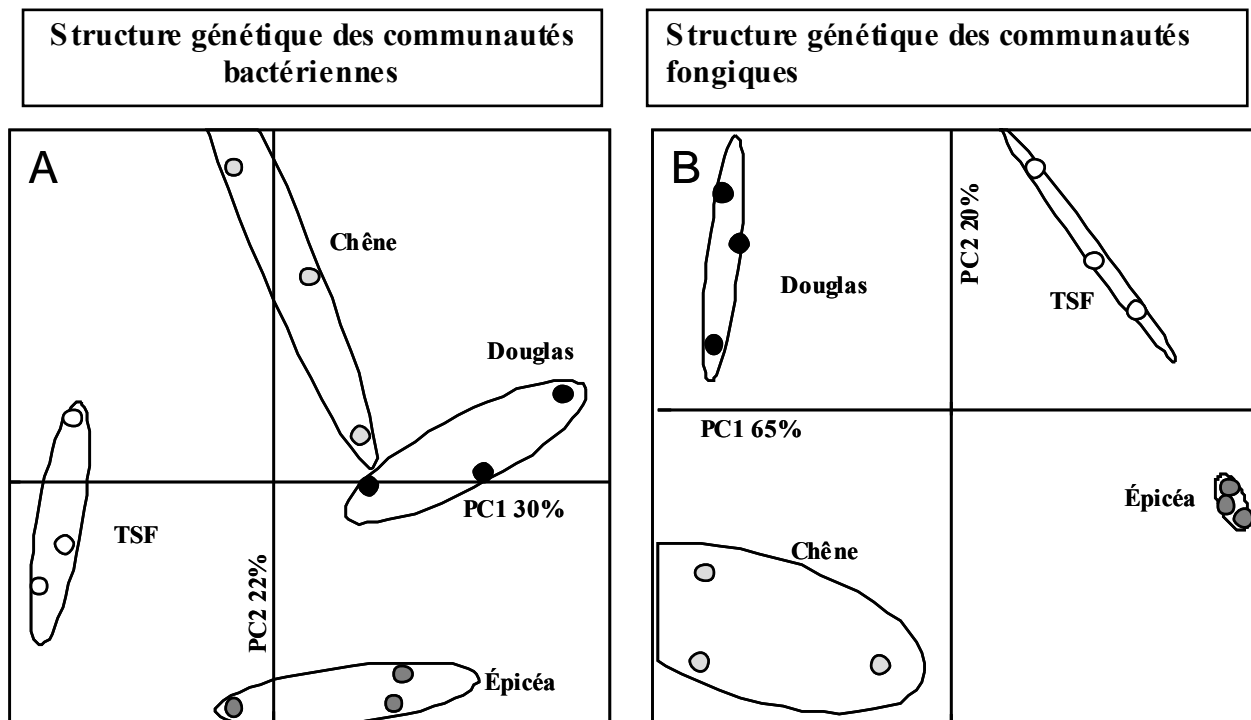


Tableau 22 : A - Plan factoriel de L'ACP nous renseignant sur la Structure génétique des communautés bactériennes telluriques à la profondeur de 0-5cm pour les différentes essences. ; B - Plan factoriel de L'ACP nous renseignant sur la Structure génétique des communautés fongiques telluriques à la profondeur de 0-5cm pour les différentes essences. Les ellipses sont obtenues avec une confiance de 90%.

Les résultats complets mettent en évidence l'influence significative des essences forestières sur la structuration des populations bactériennes et de champignons. De telles modifications peuvent être dues aux variations physico-chimiques du sol entre les essences (teneurs en éléments minéraux dues aux prélèvements et aux restitutions des arbres) et/ou à des différences dans la qualité biochimique et la "dégradabilité" des litières fournissant des sources trophiques différentes. Ces différences peuvent mener à la sélection de populations particulières dont la signature métabolique sera fonction du type de substrat. Le chêne et le Douglas semblent stimuler des populations microbiennes similaires, ce qui suggère qu'ils induisent au niveau du sol des conditions physico-chimiques et trophiques semblables pour les microorganismes. Par ailleurs, l'influence des essences forestières sur les communautés de champignons ne dépasse pas les dix premiers centimètres, alors que pour les communautés bactériennes l'influence persiste jusqu'à vingt centimètres. Dans les écosystèmes forestiers, il est généralement reconnu que les bactéries ne sont pas aussi efficaces que les champignons pour dégrader (au moins dans les premières étapes) la litière des végétaux ligneux. Ceci peut être d'autant plus marqué dans le sol étudié, car les champignons sont généralement mieux adaptés que les bactéries aux pH acides. Par conséquent, la libération de sous produits carbonés rendus disponibles pour les bactéries par l'activité de décomposeur primaire des champignons pourrait être un des mécanismes structurant les communautés bactériennes et expliquerait

l'influence similaire des essences sur ces deux groupes de microorganismes. Les résultats vont dans le sens de ce postulat, confirmant le rôle clé des champignons dans la dégradation de la litière à la surface du sol et que les communautés bactériennes seraient sous la dépendance des champignons à travers la disponibilité des sources trophiques. Ces données pourraient illustrer une interaction de type commensal entre les communautés bactériennes et fongiques dans les écosystèmes forestiers. Ces résultats sont novateurs, mais ne constituent qu'une étude préliminaire dans l'étude des communautés microbiennes au sein des écosystèmes forestiers.

Les communautés bactériennes ou fongiques impliquées dans la biodégradation des litières et leur activité (Ariana Kulhankova, UMR Limos-BEF INRA, Thierry Béguiristain, Jacques Berthelin, UMR Limos- Bernd Zeller, Jacques Ranger UR INRA-BEF Nancy)

Les objectifs sont de mettre en relation la biodégradation des matières organiques et les organismes responsables, en termes de présence et abondance puis de fonctions. Le matériel utilisé pour cette étude est celui mis en place par Judicaël Moukoui qui travaille lui sur les déterminants biochimiques et environnementaux de la décomposition.

Les matériaux utilisés sont :

- La cellulose : placée en sachets sous hêtre, épicéa et forêt native en février 2004 et suivie mensuellement pendant 12 mois. La diversité a été analysée pour les champignons et les bactéries.
- La lignine : bûchettes de bois de hêtre placées dans les litières de chêne, hêtre, épicéa, Douglas et TsF. Le suivi a été réalisé après 3, 9, 12, 24 et 30 mois d'incubation. La diversité a été étudiée pour les champignons dans tous les prélèvements et également pour les bactéries dans les deux derniers.
- Les litières naturelles. (hêtre, chêne, Douglas, épicéa, mélange chêne, Douglas et épicéa-hêtre). Echantillonnage réalisé après 4 et 24 mois d'incubation. La diversité a été analysée pour les champignons et les bactéries.

L'ADN total a été extrait pour tous les échantillons et amplifié par PCR puis traité par TGGE et séparé sur gel acrylamide. Les amorces spécifiques ITS1F et CGITS2 pour les champignons et 1401r et CG968f pour les bactéries ont été utilisées. La distribution des espèces, et les indices de Shannon-Wiener ont été utilisés dans le traitement statistique. Les bandes spécifiques ont été amplifiées et séquencées. Les identifications des champignons sont faites en comparant les résultats à la banque de données GenBank

Les résultats présentés concernent la lignine. Le nombre total d'espèces fongiques varie de 36 pour le premier prélèvement à 45 après deux ans d'incubation, toutes essences confondues. L'allure générale de la dynamique de colonisation est la même en fonction des essences. On note une baisse du nombre d'espèces à 9 mois qui correspond aux conditions extrêmes de l'été 2003.

L'effet essence n'est pas significatif sur le nombre total d'espèces ni sur l'indice de diversité de Shannon. Cependant la forêt native montre le nombre moyen d'espèces le plus fort (13.5 espèces par prélèvement en moyenne, SW=0.993) et l'épicéa le plus faible (11 et un indice SW=0.904). Des valeurs intermédiaires ont été observées pour le chêne, le hêtre et le Douglas (respectivement 12.6 et 0.937; 12.3 et 0.920; 12.2 et 0.934).

La composition de la communauté est significativement affectée par le temps et l'essence qui expliquent environ 16.3% de la variance totale. L'espèce explique légèrement plus (8.8%) que la variation temporelle (7.5 %). L'analyse indépendante des prélèvements montre un effet significatif de l'essence pour les prélèvements correspondant à 4 et 12 mois d'incubation. Le test de l'effet durée d'incubation sur la diversité a été réalisé pour chaque peuplement, montrant un effet significatif sauf pour le hêtre où la même tendance est cependant observée (p=0.076). L'analyse statistique en composantes principales permet de situer relativement les essences et la dynamique temporelle.

Les effets de la température et de l'humidité du sol ont été testés en se basant sur les valeurs moyennes du mois avant l'échantillonnage des sachets en incubation. La forêt native n'a pu être incluse, faute de mesures climatiques dans ce peuplement. Les deux effets sont significatifs sur la diversité expliquant respectivement 5.7 et 5.8% de la variabilité totale.

Concernant les bactéries, la richesse la plus forte a été détectée sous le chêne et le TsF (24 espèces), suivie du hêtre (23), du Douglas (22) et de l'épicéa (20). La forêt native montre également le plus grand nombre d'espèces par prélèvement (14); la plus faible valeur moyenne a été observée sous hêtre (11.3). Le plus fort indice de diversité a également été observé sous TsF (SW=0.998), suivi des résineux et du chêne (0.95); le hêtre présentant la plus faible valeur (0.745). L'effet essence n'est cependant pas significatif.

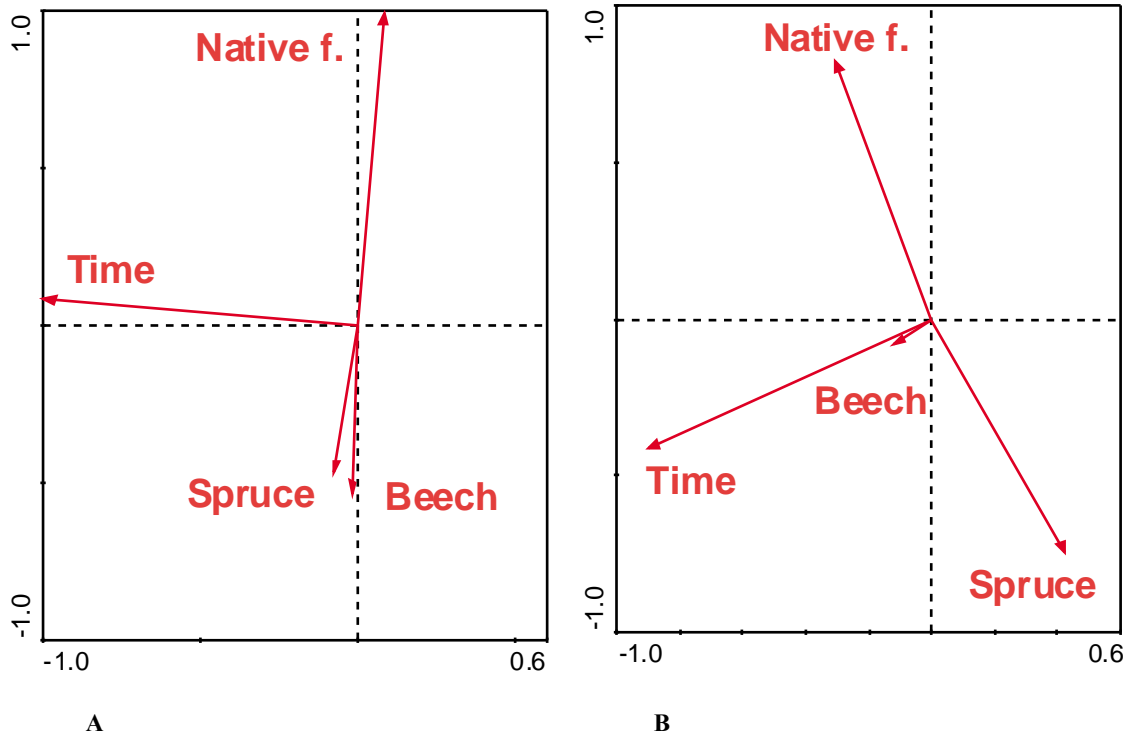


Figure 17 : Analyse en composantes principales mettant en évidence la structuration des champignons (A) et des bactéries (B) en fonction des peuplements toutes dates confondues.

L'activité potentielle des organismes observés est en cours d'étude pour quelques fonctions.

Le rôle des microorganismes dans l'altération des minéraux (Marie-Pierre Turpault, Christophe Calvaruso, BEF Nancy, Stéphane Uroz, IaM-BEF Nancy, Christian Mustin, Limos Nancy)

Structuration fonctionnelle des communautés bactériennes dans un sol forestier

Un effet structurant de la myco-rhizosphère du chêne sur la diversité fonctionnelle des bactéries du sol a été mis en évidence par l'intermédiaire d'un test en microplaques réalisé par Christian Mustin au Limos. La symbiose ectomycorhizienne pourrait sélectionner des souches à fort potentiel de mobilisation d'éléments et donc favorables à la nutrition des arbres.

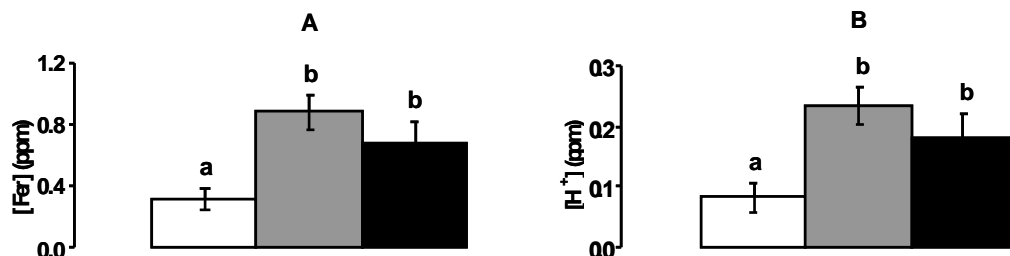


Figure 18 : Concentrations en fer (A) issu de l'altération de la biotite et en protons (B) engendrées par l'activité bactérienne en fonction du compartiment d'origine des souches bactériennes sous chêne I. Les barres représentent l'erreur standard. Les traitements associés à des lettres différentes sont significativement différents (ANOVA 1 facteur compartiment d'origine, $P < 0.05$). En blanc, les souches bactériennes isolées dans *le*

compartiment sol nu, en gris, celles isolées dans le compartiment interface mycorhize-sol et en noir, celles isolées dans le manchon symbiotique.

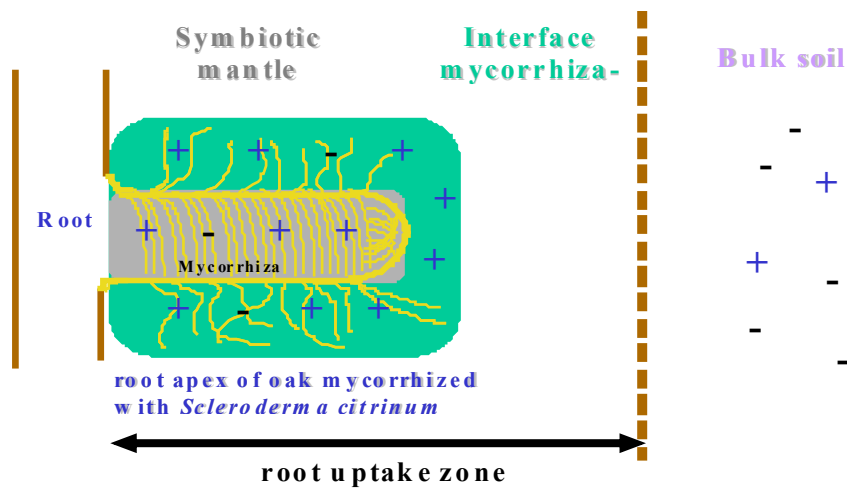


Figure 19 : Représentation de l'effet structurant de la mycorhizosphère du chêne sur la diversité fonctionnelle des bactéries du sol (0-3 cm et 5-10 cm).

Effet des essences forestières sur la structuration des communautés bactériennes du sol, en relation avec la biodisponibilité en nutriments.

Une plus grande potentialité des souches bactériennes ectomycorhizosphériques pour altérer la phase minérale est observée sous chêne et sous hêtre. Ces résultats montrent donc l'existence d'un effet structurant de la symbiose ecto-mycorhizienne du chêne et du hêtre sur les communautés bactériennes. La présence de ces souches dans la zone de prélèvement des racines pourrait donc contribuer à la nutrition des arbres forestiers notamment sur sol pauvre en éléments minéraux.

En revanche, cette structuration fonctionnelle des souches n'est pas observée sous épicéa. Cela pourrait s'expliquer par l'existence d'une rhizosphère déjà très acide, liée à une forte production de protons pour compenser l'absorption d'ammonium, qui ne serait donc pas propice au développement d'une microflore acidi fiante et altérante.

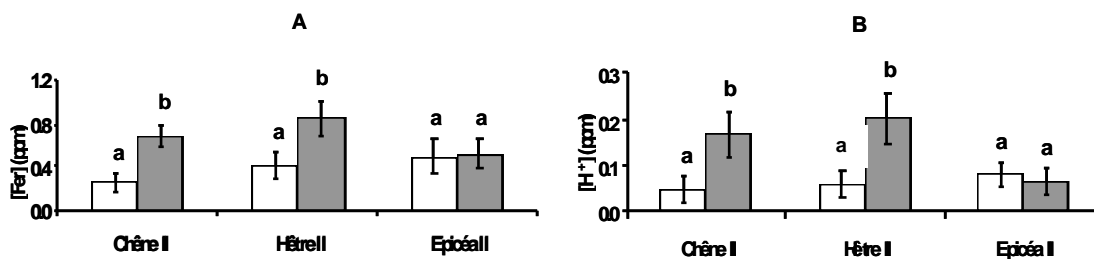


Figure 20 : Concentrations en fer (A) issu de l'altération de la biotite et en protons (B) engendrées par l'activité bactérienne en fonction du compartiment d'origine des souches bactériennes sous chêne II, hêtre II et épicéa II. Les barres représentent l'erreur standard. Les traitements associés à des lettres différentes pour une même essence sont significativement différents (ANOVA 1 facteur compartiment d'origine, P<0.05). En blanc, les souches bactériennes isolées dans le compartiment sol nu et en gris, celles isolées dans le compartiment interface mycorhize-sol.

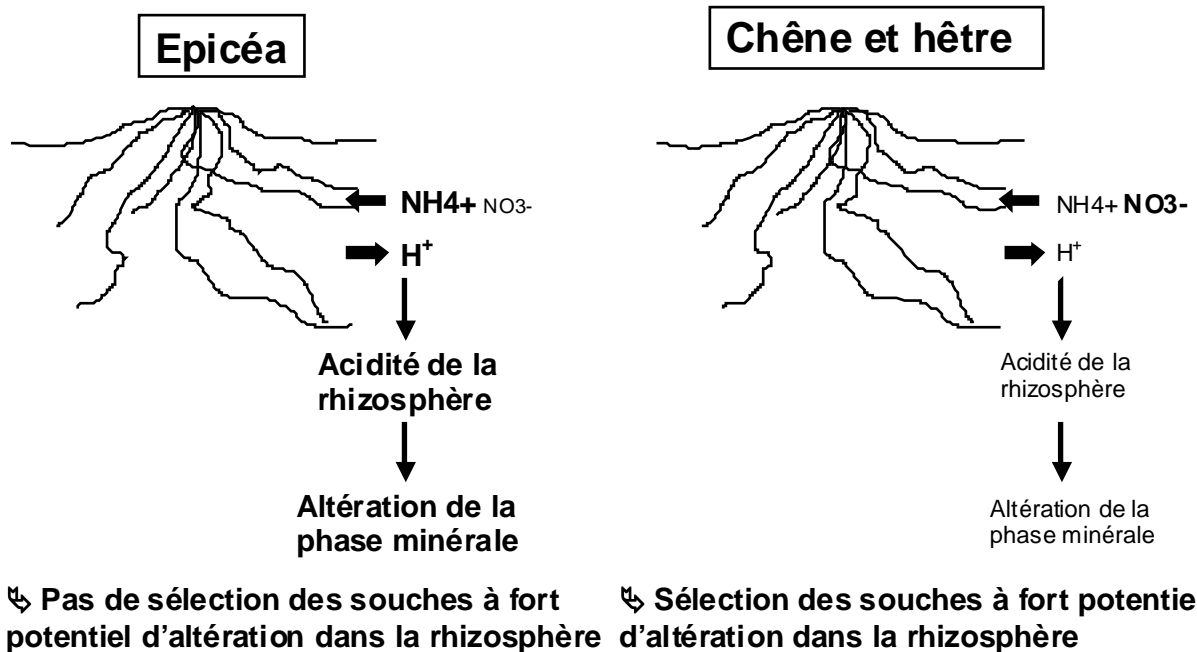


Figure 21 : Schéma de synthèse résumant la relation possible entre le cycle de l'azote et la structuration des communautés bactériennes dans le sol sous des essences à comportements contrastés.

Etude de la diversité des bactéries impliquées dans l'altération des minéraux: approche taxonomique et fonctionnelle

Etude de la relation taxonomie-fonction. Les travaux entrepris au laboratoire ont permis de mettre en évidence une structuration fonctionnelle des bactéries selon leur compartiment d'origine: le sol ou l'ectomycorhizosphère. Les souches bactériennes issues des collections réalisées sur le site de Breuil sous différentes essences d'arbres sont ensuite typées d'un point de vue taxonomique sur la base de la petite sous unité ribosomique procaryotique (le gène *rrs* ou 16S) et d'un point de vue métabolique en utilisant des galerie BIOLOG®.

Cette approche sur souche bactérienne cultivable est nécessaire lors de l'étude d'une fonction dont on ne connaît rien, et permettra de caractériser les microorganismes selon leurs potentialités métaboliques et leur appartenance phylogénétique afin de mieux appréhender leur potentialité d'altération des minéraux. Cette approche a déjà permis de mettre en évidence que des souches appartenant au genre *Burkholderia* sp. sont particulièrement efficaces pour altérer la biotite (en utilisant le test de Christian Mustin décrit plus haut).

Recherche des déterminants génétiques impliqués dans l'altération. Les informations obtenues sont importantes car elles permettent de choisir des souches modèles sur lesquelles des travaux de génétique peuvent être entrepris afin d'identifier des gènes par des approches de type construction de banques de cosmides ou de mutants d'insertion.

Parallèlement des travaux sur l'ADN génomique global (ou métagénome) des bactéries associées aux minéraux sont entrepris. Cette approche est nécessaire pour avoir une image de la réelle diversité ; l'essentiel des bactéries du sol étant non cultivables.

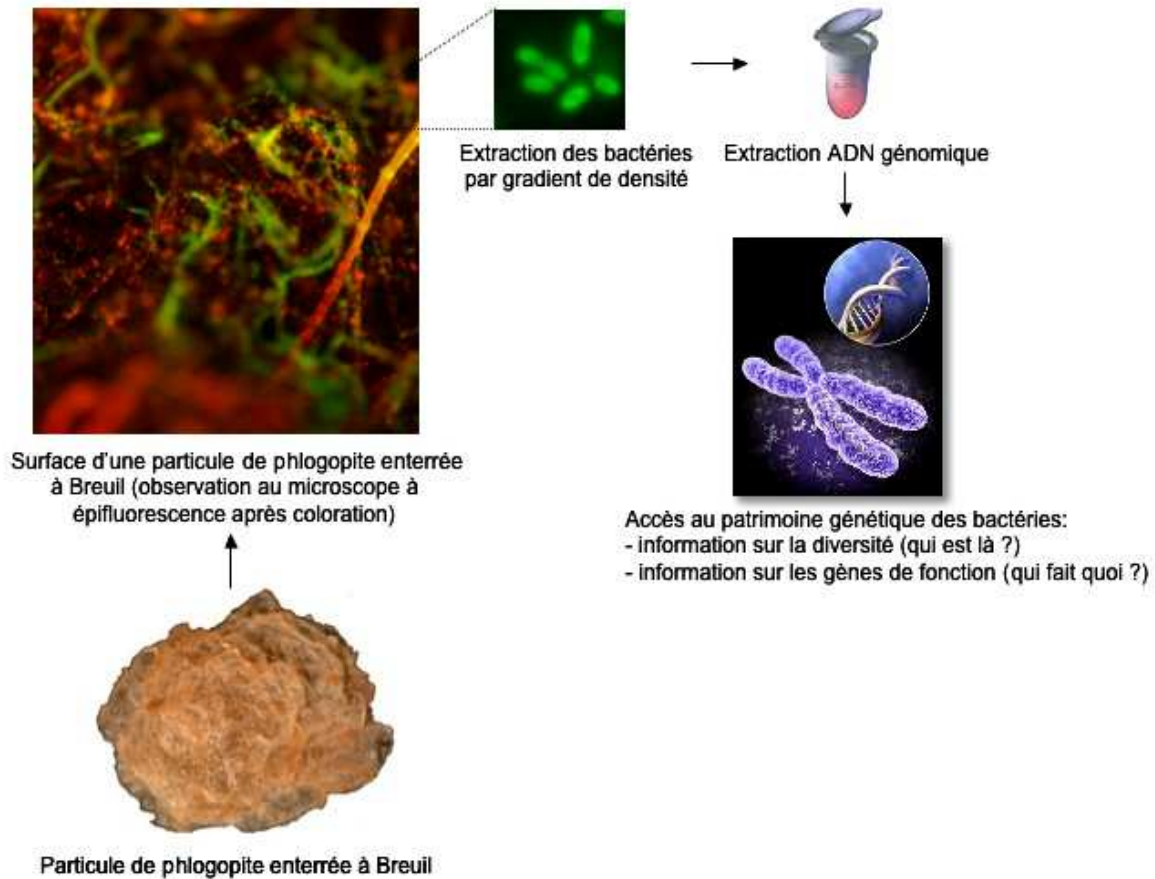


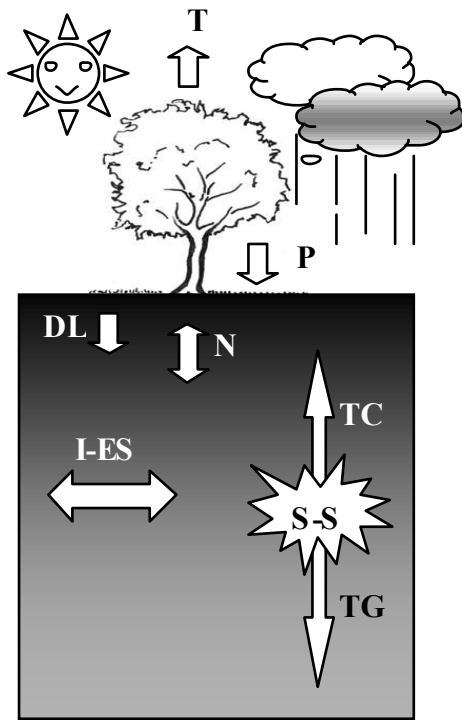
Figure 22 : Organigramme des travaux en cours sur la recherche des déterminants génétiques impliqués dans l'altération (Stéphane Uroz, IaM Nancy)

Modélisation des cycles biogéochimiques

(F. Gérard BEF Nancy)

Cette modélisation repose sur le modèle MIN3P (Mayer et al., 2002 ; Gérard et al., 2004), permettant de tenir compte des principaux processus/mécanismes biogéochimiques et de ceux contrôlant les transferts de l'eau et des éléments dissous dans le sol (Fig 23).

Ce travail est nettement pluridisciplinaire. Il fait appel à des disciplines variées telles que la géochimie, la biologie, l'écophysiologie, la physique du sol, et les mathématiques appliqués (modèle numérique).



Légende : T = transpiration ; P = précipitations ; DL = dégradation de la litière ; N = nutrition des végétaux (prélèvement en eau, solutés, respiration et exsudation) ; I-ES = interactions eau-solides (altération-trans formations des minéraux, échanges et adsorption des solutés) ; S-S = solution du sol et sa spéciation ; TC = transferts capillaires de l'eau et des solutés ; TG = transferts par gravité

Figure 23 : Représentation conceptuelle des flux impliqués dans la modélisation des cycles biogéochimiques avec le modèle MIN3P.

Les résultats concernent trois domaines, la modélisation des teneurs en eau, celle des concentrations des solutés, et celle des flux. Le cas de la silice est présenté

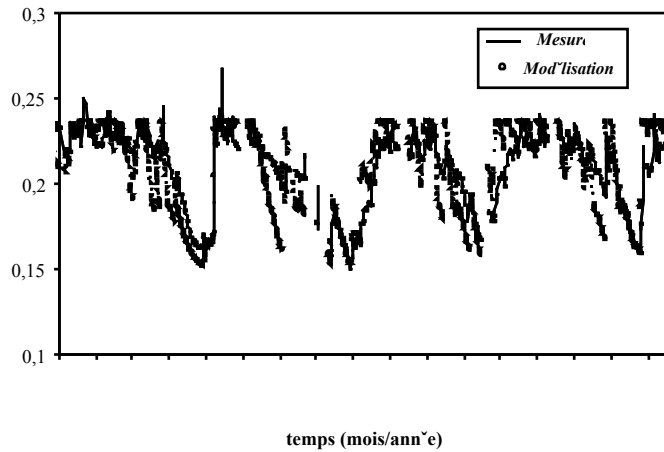


Figure 24 : Comparaison entre valeurs mesurées et modélisées de la teneur en eau du sol (site de Vauxrenard, Rhône)

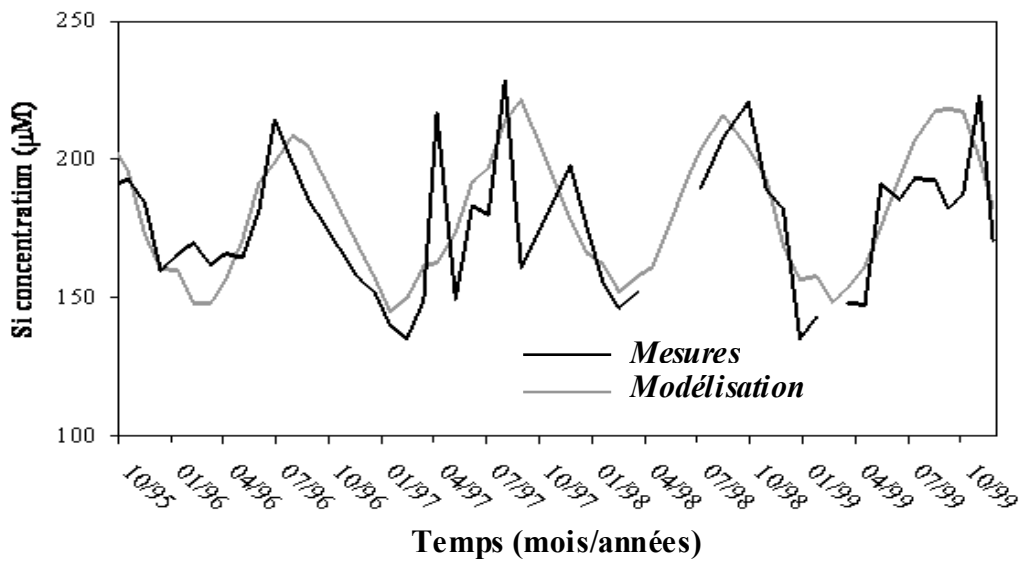


Figure 25 : Comparaison mesures vs. modélisation de la concentration en silice dans les solutions du sol (site de Vauxrenard, Rhône)

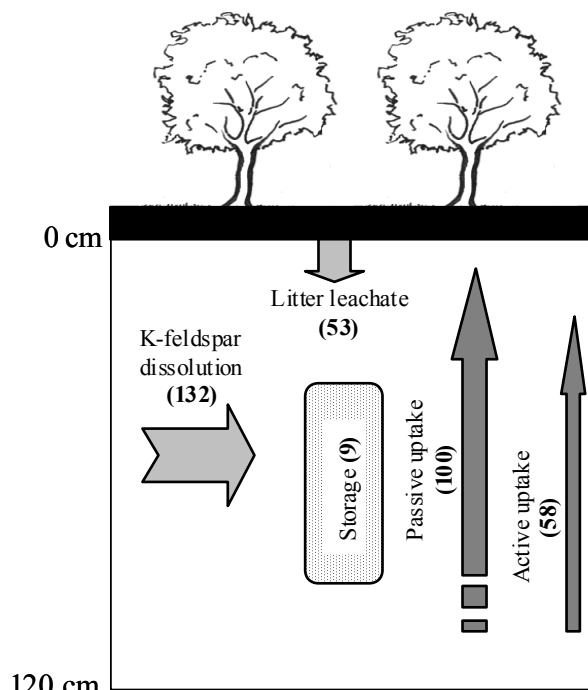


Figure 26 : Exemple de modélisation du bilan de silice, identifiant les parties biogénique et géochimique (site de Vauxrenard, Rhône)

Conclusion générale

Le site de Breuil est un support important des travaux actuels sur les cycles biogéochimiques et la biodiversité fonctionnelle en milieu forestier. Il appartient au réseau ORE- F-ORE-T coordonné par le GIP-Ecofor. Ce type de site doit être considéré comme un Laboratoire d'écologie forestière.

Ce site mis en place pour tester l'effet des essences sur le sol, qui reste un thème d'actualité, s'avère avoir un potentiel beaucoup plus large, mettant clairement en évidence le contrôle des communautés biologiques du sol par les végétaux supérieurs. Un tel site est apte à poser des questions de recherche très pertinentes que ne permettent pas les expérimentations en conditions contrôlées. Il fournit de plus des données quantitatives intéressant la recherche et les aménagements.

Les nombreux projets en cours sur le site attestent de cette qualité, qui autorise une approche pluridisciplinaire efficace pour améliorer les connaissances en Ecologie forestière fonctionnelle et quantitative. Des travaux y sont menés à différentes échelles, depuis le mini-système fonctionnel (rhizosphère, horizons diagnostics, relation entre les différentes tailles de porosité du sol) jusqu'à l'écosystème complet. Un projet utilise de plus les acquis sur les solutions du sol pour étudier l'impact de la forêt sur les eaux de surface (échelle bassin-versant). L'association de la Science du sol, de la Biogéochimie, de l'Ecologie forestière à la Biologie, à la Microbiologie des sols est très importante et a déjà conduit à des avancées très intéressantes des connaissances.

Cet apport de connaissances est indispensable à la gestion raisonnée et durable des écosystèmes forestiers. Les gestionnaires ont parfaitement compris la relation indispensable entre Recherche et Développement, et soutiennent des projets finalisés dont l'objectif est de transférer les acquis vers la pratique.

A cet égard, un tel site est un support très intéressant pour le transfert et la diffusion des connaissances à différents niveaux :

- Les acteurs de la recherche nationale et internationale (tournée de terrain des colloques et congrès)
- La formation scolaire d'élèves et d'étudiants dans des cursus classiques
- La formation d'étudiants par alternance
- La formation professionnelle des forestiers
- L'éducation du public

La prise en compte de ce site de recherche dans le cadre de la Charte du Parc Régional du Morvan est très significative du rôle de la recherche comme acteur du développement durable.

Littérature scientifique relative au site-atelier de Breuil (Morvan)

Revues à Comité de lecture

- Colin-Belgrand, M., Dambrine, E., Bienaime, S., Nys, C. and Turpault, M.P.,** 2003. Influence of tree roots on nitrogen mineralization. *Scand. J. For. Res.*, 18, 3 : 260-268.
- Simonsson, M., Kaiser, K., Danielsson, R., Andreux, F. & Ranger, J.** (2005) : Estimating nitrate, dissolved organic carbon and DOC fractions in forest floor leachates using ultraviolet absorbance spectra and multivariate analysis. *Geoderma*, 124, 1 : 157-168.
- Calvaruso C., Turpault M.-P. Frey-Klett P.** (2006). The effect of plants and soil bacteria on mineral weathering. *AEM*. 1258-1266
- LeTacon, F., Bréchet C., Zeller B., Maurice J.-P.** Functional diversity of ectomycorrhizal and saprophytic fungi in a mixed forest stand of beech, oak and birch using ¹³C and ¹⁵N natural abundance. *Mycological Progress* (sous presse)
- Moukoui, J., Munier-Lamy, C., Bethelin, J., et Ranger, J.** Effect of tree species substitution on organic matter biodegradability and mineral nutrient availability in a temperate topsoil. *ASF* (sous presse)
- Lejon, D.P.H., Chaussod, R., Ranger, J. and Ranjard, L.** Impact of silvicultural practices on soil biology : influence of different tree species on the structure of microbial communities in an acid forest soil (Morvan, France) (2005) *Microbial Ecology*, 50, 614-625.
- Sicard C., Saint-Andre L, Gelhaye D. And Ranger J.** : Effect of initial fertilisation on biomass and nutrient content of Norway spruce and Douglas-fir plantations at the same site. *Trees Structure and Function* (sous presse).
- Kulhánková, A., Béguiristain, T., Moukoui, J., Berthelin, J., Ranger J.** ; Spatial and temporal diversity of wood decomposer communities in different forest stands, determined by ITS rDNA targeted TGGE. *ASF* (sous presse)
- Sangster, A.G., Lin, F. Gérard, et M.J. Hodson.** 2005. X-ray microanalysis of needles from Douglas fir growing in environments of contrasting acidity. *Water, Air and Soil Pollution* (sous presse)
- Zeller B, Recous S, Dambrine E., Kunze M., Mustin C., Moukoui J., Ranger J.** Influence de l'essence forestière sur la minéralisation brute et nette de l'azote (ASF soumis)
- Ranger, J., Nzila J.D, Zeller, B., Laclau, J.P., Jussy, J.H., Deleporte, Ph., Moukoui, J., Bouillet, J.P.** : Control of the nitrogen mineralising activity of micro-organisms by vegetation is a key-parameter for forest management. *AFS* (soumis)
- Levrel, G et Ranger J.** : Effet des substitutions d'essences forestières sur les propriétés physiques du sol. *EGS* (soumis)
- Jaffrain, J., F. Gérard, M. Meyer, et J. Ranger.** 2005. Ultraviolet absorption spectrophotometry to study dissolved organic matter quality in forest soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* (soumis).

Participation à des colloques

- Lejon, D.P.H., Ranjard, L., Nowak, V., Breuil, M.C., Ranger, J. and Chaussod, R.,** 2003. Impact of silvicultural practices on soil biology: Influence of different tree species on the structure of the microbial communities in a acid forest soil (*Morvan, France*) Poster : International Symposium on Structure and Function of Soil Microbiota" (18-20/09/03, Marburg, Allemagne)
- Zeller B., Le Tacon F., Bréchet C. et Maurice J.P.,** 2003. Diversité fonctionnelle des champignons ectomycorhiziens et saprophytes dans une chênaie-hêtraie du Morvan par la mesure de l'abondance naturelle du ¹³C et du ¹⁵N. Journées d'écologie fonctionnelle (JEF) Mars 2003, Nancy, présentation orale
- Ranger J. , Andreux F. , J. Berthelin, J.P. Boudot, J. Moukoui, C. Munier-Lamy, S. Bienaime, P. Bonnaud, F. Gerard, J. Jaffrain, D. Gelhaye, L. Gelhaye, G Nourrisson, Pollier B., Turpault M.P., Zeller B., Letacon F, Maurice J.-P., Elsass F., Delvaux B., Caner L., Righi D., Amiotte-Suchet P., Milloux M.-J., Simonsson M., Chaussod R., Lejon D. & Ranjard L.** (2003) Relations entre biodiversité et fonctionnement biogéochimique des écosystèmes forestiers : exemple de la substitution de diverses essences forestières à la forêt feuillue native sur le site expérimental de Breuil-Chenué - Morvan. V^{èmes} Journées d'Ecologie Fonctionnelle, Nancy, 12-14 mars 2003. [résumé, poster].
- Frey-Klett P., Calvaruso C., Satrani B., Ray P., Amellal N., Lapeyrie F., Garbaye J. & Turpault M.P.** (2003) Les bactéries du sol jouent-elles un rôle dans l'altération des minéraux ? V^{èmes} Journées d'Ecologie Fonctionnelle, Nancy, 12-14 mars 2003. [résumé, poster].
- Dietzel, M., Gérard, F., Jaffrain, J., Nestroy, O., Weber, H., Möller, A. and Hillebrecht, J.,** 2003. New Aspects on the Mechanisms of Silicate Weathering - Impact of Polysilicic Acids and Hydroxyaluminosilicate Colloids, MINPET 2003, Salzburg, Autriche.

- Moukoui, J., Munier-Lamy, C., Bethelin, J., et Ranger, J.**, 2003. Effet des essences forestières sur la minéralisation des matières organiques (C,N) et la dynamique des éléments nutritionnels (Ca,Mg,K...) (*Poster présenté aux journées de l'écologie fonctionnelle à Nancy en mars 2003*)
- Moukoui, J., Munier-Lamy, C., Mallouhi, N., Berthelin, J., et Ranger, J.** Effet of forest tree species on distribution and biodegradability of organic matter in soil aggregate fractions. (*Intern. symposium Forest soils under global and local changes: from research to practice. IUFRO IUSS Bordeaux 15-18 Septembre 2004*)
- Kulhankova, A., Béguiristain, T., Moukoui, J., Berthelin, J.**, 2004. Diversity of saprophytic fungi degrading model organic materials in different forest sites: PCR-TGGE approach (*Intern. symposium Forest soils under global and local changes: from research to practice. IUFRO IUSS Bordeaux 15-18 Septembre 2004*)
- Ranger, J., Nzila, J.D., Zeller, B., Laclau, J.P., Bouillet, J.P., Deleporte, P., Moukoui, J. Jussy, J.H., Marien. J.N.**, 2004. Control of the nitrogen mineralising activity of micro-organisms by vegetation is a key-parameter to be taken into account by managers whatever the ecosystem function considered. (*Intern. symposium Forest soils under global and local changes: from research to practice. IUFRO IUSS Bordeaux 15-18 Septembre 2004*)
- Jaffrain J., Gérard F., Ranger J., Meyer M.**, 2004. Using UV spectrometry to assess the effect of the tree species on the DOC properties. Congrès Eurosoils 2004 Freiburg, 6-12 Septembre.
- Moukoui Judicaël, Munier-Lamy Colette, Berthelin Jacques, and Ranger Jacques.** (2005) : Forest tree species substitution effects on topsoil organic matter biodegradability and mineral element availability. *Annals of Forest Sciences (soumis en Juillet 2005)*
- Thierry Beguiristain, Ariana Kulhankova, Judicael Moukoui, Jacques Ranger, Jacques Berthelin.** Piégeage et analyse des communautés de champignons impliquées dans la dégradation de la lignine et la cellulose dans différents écosystèmes forestiers : 2^{ème} colloque d'Ecologie Microbienne. Obernai, France, Mai 2005 [Poster]
- Turpault M.-P., Calvaruso C., Frey-Klett P., Mareschal L.** (2005) Rôle des plantes et des microorganismes sur l'altération des minéraux des sols forestiers. VIIèmes Journées d'Ecologie Fonctionnelle, 8-10 mars 2005, Clermont-Ferrand, France [résumé, poster]
- Mareschal L., Frantz H., Turpault M.-P., Ranger J.** (2005) Effet des essences forestières sur la minéralogie des argiles d'un aloccisol. VIIèmes Journées d'Ecologie Fonctionnelle, 8-10 mars 2005, Clermont-Ferrand, France [résumé, poster].
- Subramaniyam, P., Gérard F., Evans D.E., et M.J. Hodson.** 2005. Mineral analysis of needles from Douglas fir and Norway spruce growing in Breuil Forest, Morvan, France. Acid Rain Conf, June 2005, Prague (poster).
- Sangster, A.G., Ling, L., Gérard, F., et Hodson M.J.**, 2005. X-ray microanalysis of needles from Douglas fir growing in environments of contrasting acidity. Acid Rain 2005, 7th Conf. On Acid desposition, 12-17 June 2005, Prague (communication).
- Wonisch H., Dietzel M., Gérard F., Jaffrain J., Köhler S. J., Nestroy O. et Boudot, J.-P.**, 2005. Aluminium and Silica Speciation in Acidic Soil Solutions (France and Austria). Sixth Keele Meeting on Aluminium:"Aluminium : Lithosphere to Biosphere (and back)", 26th Feb.- 2nd March 2005, Buçaco (Portugal) (poster).
- Gérard F., Jaffrain J., Boudot J.-P. et Ranger J.**, 2005. Influence of SOM on aluminium mobility in a forested brown acidic soil : a view from soil solutions held at different matrix potential. 15th Goldschmidt Conf, 20-25th May 2005, Moscow, Idaho (USA) (communication).
- Gérard F., Jaffrain J., Boudot J.-P., Clément C. et Ranger J.**, 2005. Mechanisms controlling the mobility of aluminium in a brown acidic soil : influence of the planted tree species and matric potential. Sixth Keele Meeting on Aluminium:"Aluminium : Lithosphere to Biosphere (and back)", 26th Feb.- 2nd March 2005, Buçaco (Portugal) (poster + presentation).
- Moukoui J, Munier-Lamy C, Mallouhi N, Kulhankova A, Béguiristain T, Berthelin J, Ranger J.** (2006): Dynamique de dégradation de la cellulose et du bois sous différents couverts forestiers. Les Matières Organiques en France : Etat de l' Art et Prospective, Carqueiranne du 22-24 janvier 2006, séminaire organisé par le réseau Matières Organique et le Groupe Français de l' IHSS [Poster].
- Calvaruso C., Mareschal L., Turpault M.-P., Leclerc-Cessac E.** (2006) Root effect on physico-chemical and mineralogical properties of soils under two species (norway spruce and oak). Bridging Clays, 43rd Annual Meeting of Clay Minerals Society, 3-7 june [résumé, poster]. soumis
- Mareschal L., Turpault M.-P., Frantz H., Ranger J., Bonnaud P.** (2006) Effect of forest tree species on the mineralogy of acidic soil clay. Bridging Clays, 43rd Annual Meeting of Clay Minerals Society, 3-7 june [résumé, poster]. soumis
- Turpault M.-P., Calvaruso C., Mareschal L., Righi D.** (2006) Impact of biological activities on clay mineral weathering in forest ecosystems. Bridging Clays, 43rd Annual Meeting of Clay Minerals Society, 3-7 june

[résumé, oral].soumis.

Document à diffusion limitée

Ranger, J. et Gelhaye, D., 2002, 2003. Effets de l'essence forestière sur le fonctionnement biogéochimique et biologique d'un écosystème forestier. Présentation du site expérimental de la forêt de Breuil-Chenu, Morvan. Nancy : Institut de la Recherche Agronomique, Biogéochimie des Écosystèmes Forestiers :18 p + annexes. Versions juin et novembre 2002 et novembre 2003.

Mémoires de stage

- Kunze, M.**, 2001. Effet essence sur le cycle interne de l'azote dans les sols forestiers : Flux nets et flux bruts. Relations carbone-azote. Mémoire de D.E.A. National de Science du Sol 20 p (encadrement B.Zeller et M Colin, INRA BEF, C Munier, Limos).
- Lejon D.**, 2002. rapport de stage sur les populations microbiennes du site de Breuil : biomasse et structure (encadrement R Chaussod et L Ranjard, INRA Microbiologie Dijon)
- Moukoui, J.**, 2002. Effet des essences sur la minéralisation des matières organiques et la dynamique des éléments nutritifs. DEA Science du Sol (encadrement C Munier et J Berthelin, Limos et J Ranger INRA BEF)
- Ndira, V.**, 2001. Étude de l'impact des essences forestières sur les propriétés physico-chimiques des sols rhizosphérique et global en milieu acide. Mémoire de D.E.A. National de Science du Sol : 21 p (Encadrement MP Turpault INRA BEF)
- Calvaruso, C.**, 2003. Impact des plantes et des microorganismes du sol sur la vitesse d'altération des minéraux. Mémoire de D.E.A. National de Science du Sol, UHP-ENSAR, ENSAM, INAPG, ENSAIA : 21 p.
- Forêt, M.**, 2003. Effets des essences sur l'évolution des sols dans le site atelier de la forêt de Breuil Chenu (Morvan). Rapport 2^e année ENSA Rennes 50p. (encadrement, J Ranger)
- Lop Vip T.**, 2003. Impact du changement d'essences forestières sur la matière organique du sol (Site du Breuil, Morvan). Rapport de Maîtrise des Sciences de l'Environnement, Université de Bourgogne, 39 p (encadrement F Andreux)
- Hurel, C.**, 2004. Effet des essences sur la biodégradation des matières organiques des sols de Breuil (Morvan). DEA Sciences de la Terre Dijon (encadrement F Andreux)
- Renard, C.**, 2003. Étude de la variabilité spatiale du pH du sol en fonction des éclaircies sur le douglas (Étude du site de St Brisson, Bas Morvan). Rapport de Maîtrise des Sciences de l'Environnement, Université de Bourgogne, 30 pp (encadrement F Andreux)
- Mareschal, L.**, 2004. Effet des essences sur la minéralogie eds argiles des sols de Breuil. Mémoire de D.E.A. National de Science du Sol (Encadrement MP Turpault et J Ranger INRA BEF)
- Frantz, H.**, 2004. Effet des essences sur la minéralogie eds argiles des sols de Breuil. Mémoire de D.E.A. de Sciences de la Terre Strasbourg (Encadrement N. Liewig CGS Strasbourg et MP Turpault INRA BEF)
- Bâton, M.**, 2004. Effet des essences sur le pouvoir complexant des matières organiques des sols de Breuil (Morvan) . Mémoire de D.E.A. Sciences Agronomiques (Encadrement F Gérard INRA BEF)
- Sicard, C.**, 2004. Biomasse et minéralomasse des peuplements de Breuil. Mémoire 3^e année ISARA Lyon. (Encadrement J Ranger BEF Nancy)
- Levrel, G** (2005) : Effet des substitutions d'essences forestières sur les caractéristiques physiques du sol : la réserve utile et la stabilité structurale. Diplôme Supérieur de Science du Sol UHP-Nancy 79p.
- Bouchez, J**, 2005, Fractionnement isotopique du bore par les végétaux d'un écosystème forestier : implications pour le cycle biogéochimique du bore, stage M2-programme ECCO, J. Gaillardet (IPG Paris).
- Loyer, S** (2005) : Effet de la coupe rase d'une plantation de Douglas (*Pseudotsuga menziesii* F.) dans les Monts du Beaujolais, sur le fonctionnement de l'écosystème forestier et le bilan minéral. Rapport 3^e année ENITA Bordeaux. 41p + biblio + annexes
- Pasteur, M** (2005) : Effet de l'essence forestière sur le cycle de l'azote. Mémoire IUP GE Metz 36 p

Thèses en cours

- Jaffrain, J.** Effet des essences forestières sur le fonctionnement organo-minéral d'un sol forestier acide : observation et modélisation biogéochimique. (encadrement F Gérard et J Ranger, BEF Nancy)
- Moukoui, J.** Effet des essences sur la biodégradation des matières organiques des sols de Breuil (Morvan) (coencadrement J Berthelin, Limos Nancy et J Ranger BEF Nancy)
- Kulhankova, A.** Populations fongiques impliquées dans la biodégradation des matières organiques des litières de Breuil (Morvan) (coencadrement J Berthelin, Limos Nancy et J Ranger BEF Nancy)
- Calvaruso, C.** Altération biologique dans la rhizosphère (coencadrement MP Turpault BEF et P Frey-Klett IaM)
- Mareschal, L.** Evolution de la phase minérale du sol en fonction des espèces (coencadrement MP Turpault et J Ranger BEF)

Projets terminés ou en cours sur le site de Breuil depuis 2001

| Projets | Thème - Unités |
|---|--|
| INRA EFPA Resp. J RANGER INRA BEF Nancy | <i>Mise en place du site atelier</i> |
| GIP- Ecofor Ore F-ORE-T Resp. J RANGER INRA BEF Nancy | <i>Effets des essences sur le fonctionnement biogéochimique et la Biodiversité : Soutien annuel au site de l'Observatoire de recherche en environnement F-ORE-T</i> |
| GIP- Ecofor Biodiversité Resp. J RANGER INRA BEF Nancy | <i>Effets des essences sur le fonctionnement biogéochimique et la Biodiversité</i> - INRA Unité 1138 Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers 54280 Champenoux - INRA UMR 1139 Interaction Arbres Microorganismes 54 280 Champenoux - CNRS-UHP UMR 7137 LIMOS 54501 Vandoeuvre lès Nancy - INRA-Université de Dijon - UMR A111 Microbiologie du Sol-GéoSol 21000 Dijon - Université de Louvain-la-Neuve - Unité de Sciences du sol - Belgique |
| ACI Ecologie – Quantitative Resp. J RANGER INRA BEF Nancy | <i>Effets des essences sur le fonctionnement biogéochimique et la Biodiversité</i> - INRA Unité 1138 Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers 54280 Champenoux - INRA UMR 1139 Interaction Arbres Microorganismes 54 280 Champenoux - CNRS-UHP UMR 7137 LIMOS 54501 Vandoeuvre lès Nancy - INRA-Université de Dijon - UMR A111 Microbiologie du Sol-GéoSol 21000 Dijon - Université de Louvain-la-Neuve - Unité de Sciences du sol - Belgique |
| ACI Ecologie – Quantitative Resp. MP TURPAULT INRA BEF Nancy | <i>Substitution d'essences et altération biologique</i> - INRA Unité Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers 54280 Champenoux - INRA UMR 1139 Interaction Arbres Microorganismes 54 280 Champenoux - ENGREF-INRA UMR LERFOB Rue Girardet 54000 Nancy - CNRS-UHP UMR 7137 LIMOS 54501 Vandoeuvre lès Nancy - CNRS- UPR 2300 CRPG 54501 Vandoeuvre lès Nancy - CNRS-UHP UMR 7564 LCPME 54501 Vandoeuvre lès Nancy |
| Primequal- MEDD Resp. P CELLIER INRA Unité EGC Thiverval-Grignon | <i>Apports atmosphériques d'azote</i> - INRA –INAPG UMR EGC Thiverval Grignon - INRA Unité Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers 54280 Champenoux |
| Région Bourgogne Resp F ANDREUX UMR Géosol-Microbiologie Dijon | <i>Effet des substitutions d'essences sur le carbone dissous des solutions du sol</i> INRA-Université de Dijon - UMR A111 Microbiologie du Sol-GéoSol 21000 Dijon |
| IFB Resp. F. MARTIN INRA-UHP UMR IaM Nancy | <i>Effet de substitutions d'essence et de l'augmentation en CO2 de l'atmosphère sur les communautés microbiennes intervenant dans le fonctionnement d'un écosystème forestier</i> - INRA UMR 1139 Interaction Arbres Microorganismes 54 280 Champenoux - INRA Unité 1138 Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers 54280 Champenoux - CNRS-UHP UMR 7137 LIMOS 54501 Vandoeuvre lès Nancy - INRA-Université de Dijon - UMR A111 Microbiologie du Sol-GéoSol 21000 Dijon |
| ECOGER Resp. F. MARTIN INRA-UHP UMR IaM Nancy | <i>Etudes des pratiques de gestion et des modes d'aménagement agricoles et sylvicoles sur les communautés intervenant sur la qualité des sols</i> - INRA UMR 1139 Interaction Arbres Microorganismes 54 280 Champenoux - INRA Unité 1138 Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers 54280 Champenoux - CNRS-UHP UMR 7137 LIMOS 54501 Vandoeuvre lès Nancy - INRA-CNRS- Université de Lyon - UMR 5557 Ecologie Microbienne 69 622 Villeurbanne |

| | |
|--|--|
| GESSOL + ADD Resp. G RICHARD INRA Sciences du sol Orléans | <i>Effet du tassement des sols sur le fonctionnement hydro-géochimique (DST)</i> - INRA Unité de Sciences du Sol 45000 Orléans - INRA Unité Agronomie 02007 Laon - INRA-Université d'Avignon UMR Zoologie 84914 Avignon - INRA-Université d'Avignon UMR Climat Sol Environnement 84914 Avignon - INRA Unité 1138 Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers 54280 Champenoux - CNRS- Université de Jussieu UMR 7619 Sisyphe 75252 Paris - Université de La Rochelle – Unité de Géophysique 17042 La Rochelle - ONF DT 45000 Orléans |
| Région Bourgogne Resp. P AMIOTTE-SUCHET Université de Bourgogne | <i>Matières organiques dissoutes dans les eaux d'écoulement du Morvan granitique</i> - INRA-Université de Dijon - UMR A111 Microbiologie du Sol-GéoSol 21000 Dijon - ENESAD Unité Milieu Physique et Environnement 21079 Dijon - UMR CNRS-Université de Bourgogne Biogéosciences 21000 Dijon - INRA Unité 1138 Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers 54280 Champenoux - Parc Régional du Morvan 58230 Saint-Brisson - Conseil Supérieur de la Pêche, 21000 Dijon |
| Conseil Régional de Bourgogne Resp C Zakin PRM | <i>Intégration de la multifonctionnalité des forêts dans la gestion sylvicole sur le massif du Morvan</i> INRA Unité 1138 Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers 54280 Champenoux |
| ONF Resp. J RANGER INRA BEF Nancy | <i>Soutien au site-atelier de Breuil (Morvan)</i> INRA Unité 1138 Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers 54280 Champenoux |
| ECO-NET MAE Resp. J RANGER INRA BEF Nancy | <i>Effet des substitutions d'essence sur la biodégradation des matières organiques</i> - INRA Unité Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers 54280 Champenoux - INRA Unité Interaction Arbres Microorganismes 54 280 Champenoux - CNRS-UHP UMR 7137 LIMOS 54501 Vandoeuvre lès Nancy - Université de Ceske Budejovice – Unité d'Ecologie - République Tchèque - Université Eotvos Lorand – Unité de Microbiologie - Budapest Bulgarie |
| Région Lorraine Resp. J RANGER INRA BEF Nancy | <i>Effet des substitutions d'essences sur la qualité des humus forestiers indicateurs du fonctionnement biogéochimique et des contraintes appliquées au sol.</i> INRA Unité Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers 54280 Champenoux |
| Région Lorraine Resp. J RANGER INRA BEF Nancy | <i>Etude des populations responsables de la biodégradation des matières organiques fraîches des sols forestiers. Influence des essences sur la distribution et l'activité des micro-organismes.</i> - INRA Unité Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers 54280 Champenoux - CNRS-UHP UMR 7137 LIMOS 54501 Vandoeuvre lès Nancy |
| ACI jeune Chercheur Resp TT Nguyen Tu | <i>Dégradation en milieu contrôlé des feuilles de hêtre enrichies en 13C</i> UMR 1122 Biogéochimie et écologie des milieux continentaux BIOMEKO INRA-CNRS Univ. Paris V – 78850 Thiverval-Grignon |
| Union Européenne Rsp W. de Boer Netherlands Institute of Ecology | <i>Projet Eurodiversity – Fngiserve</i> <i>Nombreux participants dont UMR 1139 Unité Interaction Arbres Microorganismes 54 280 Champenoux</i> |