



**Recherche d'une filière
complémentaire au recyclage
des boues en agriculture :
Expérimentation en zones boisées
Franche-Comté (25 / 39 / 70)**

Rapport Final



25 : Mairies d'Arc-et-Senans, Mercey-le-Grand, Villers-sous-Chalamont,
39 : Mairies de Parcey, St Lupicin, Communauté de Communes du Plateau du Lizon,
70 : Mairie de Melisey et SIA de Melisey - St barthélémy



Recherche d'une filière complémentaire au recyclage des boues en agriculture : Expérimentation en zones boisées

Franche-Comté (25 / 39 / 70)

Réalisation

Christian BARNEOUD - GRAPE (25)

Mohammed BENBRAHIM - RITTMO (68)

Avec le soutien financier



Collectivités locales

25 : Mairies d'Arc-et-Senans, Mercey-le-Grand, Villers-sous-Chalamont

39 : Mairies de Parcey, St Lupicin, Communauté de Communes du Plateau du Lizon

70 : Mairie de Melisey et SIA de Melisey - St barthélémy

Enseignement agricole

25 : Lycée Granvelle - Dannemarie sur Crête, CFPPA - Châteaufarine - Besançon

Avec la collaboration du Comité Technique

Chambres d'Agriculture

Jean-Paul JACQUINOT - CRA

Isabelle FORGUE - CA 25

Samir BOUHALBA - CA 25

Alexandre MOZER - CA 39

Thierry BEUCHET - CA 70

Collectivités territoriales

Alain BOUVERET - Conseil Général 25

Hervé CALTRAN - Conseil Général 39

Organismes technique

Dominique ABT - ONF Franche-Comté

Vincent PEREIRA - ONF Franche-Comté

Collectivités locales

Didier AUBRY - Mairie Mercey-le-Grand (25)

Claude COURVOISIER - Mairie de Villers
Sous Chalamont (25)

Frédéric PERCHAT - Mairie de Parcey (39)

Daniel PONTA - Mairie de Saint-Lupicin (39)

Enseignement

Didier AUBRY - Lycée Granvelle Dannemarie

Michel CARMINATI - CFPPA Châteaufarine

Et le soutien de l'INRA Centre Bordeaux Aquitaine dans le cadre du réseau ERESFOR

"Votre projet qui s'appuiera sur six dispositifs expérimentaux pour la région de Franche-Comté, est de nature à contribuer par la diversité des conditions pédo-climatiques et des situations forestières concernées, à l'élargissement des références scientifiques pour la préparation de futurs recommandations nationales !

Jean-Michel CARNUS
Directeur UAR Forêt-Bois
INRA Centre Bordeaux Aquitaine

Résumé

En France, **les boues de STEP** sont souvent **valorisées par épandage en milieu agricole** afin d'améliorer la fertilité des sols et apporter les éléments nutritifs, azote et phosphore aux cultures. Cependant, **cette filière est fragilisée** dans de nombreuses régions et la mise en place d'une **filière alternative et complémentaire** à la valorisation agricole est recherchée par de nombreux acteurs de la filière.

Dans cet objectif, **une expérimentation de la valorisation des boues de STEP par épandage en zones boisées**, a été conduite en **Franche-Comté**. Cette étude a porté sur des **boues liquides ou pâteuses de petites communes rurales**.

Six sites expérimentaux répartis sur **trois départements** (Doubs, Jura et Haute-Saône) ont été mis en place. Les sites expérimentaux ont été choisis pour couvrir une **grande diversité des situations pédologiques et sylvicoles** représentative de la région. Dans le département du Doubs, 3 sites expérimentaux ont été mis en place dans les forêts communales d'Arc et Senans, Villers-Sous-Chalamont et Mercey-Le-Grand. Dans le Jura, deux sites expérimentaux ont été mis en place dans les communes de Parcey et Saint-Lupicin. En Haute-Saône, un site expérimental a été mis en place dans la commune de Melisey.

Les sites expérimentaux ont ensuite fait l'objet d'un **suivi régulier** pour **évaluer l'impact** de l'apport des boues sur : (i) la croissance, la nutrition et la santé des peuplements ; (ii) la qualité des sols ; (iii) la biodiversité de la strate herbacée et (iv) la bioaccumulation des éléments traces métalliques par les champignons comestibles.

Les épandages de boues ont été réalisés **une seule fois** au début de l'expérimentation. Les **doses d'apports** ont été calculées **par rapport aux besoins** en azote du peuplement afin d'éviter tout risque de lixiviation. Ces doses d'apports ont varié de 0,35 T MS/ha à 2,4 T MS/ha (soit de 11,3 à 62,3 m³/ha de produits bruts) selon le site.

Les **principaux éléments minéraux** apportés par ces boues sont **l'azote** dont les apports variaient de 25 kg/ha à 137 kg/ha selon les sites et le **phosphore** dont les apports variaient de 8 à 85 kg de P₂O₅ /ha selon les sites.

Pour les éléments traces métalliques, les apports par les boues étaient extrêmement faibles et ne dépassaient pas les 1 % du stock initial contenu dans le sol sauf pour le cuivre et le zinc. Pour ces deux ETM, les apports ont augmenté les stocks initiaux des sols de 0,67 à 4 % selon le site.

Au niveau des peuplements forestiers, l'apport des boues a **augmenté la croissance des arbres** des parcelles amendées avec les boues par rapport aux parcelles non fertilisées dans deux sites correspondant à un taillis de chênes âgé de 18 ans (Arc et Senans) et un taillis à courte rotation de frêne (Saint-Lupicin). Dans les autres sites, *aucun effet bénéfique n'a été observé sur la croissance des très jeunes arbres*. Pour les chênes, l'augmentation de la croissance est associée à une amélioration de la nutrition azotée et surtout phosphatée des arbres. A l'opposé, les teneurs en N et P semblent être suffisantes pour assurer une croissance optimale des jeunes peuplements en fonction des conditions situationnelles.

Concernant la strate herbacée, l'apport des boues modifie légèrement sa biodiversité l'année qui suit l'épandage avec principalement l'apparition de pieds de tomate. Par la suite, les résultats ont montré que *les parcelles amendées avec des boues présentent un état de biodiversité semblable aux parcelles témoins au bout d'une ou de deux ans*. Ceci est certainement en relation avec les faibles doses des boues épandues. Par contre, **la biomasse de la strate herbacée a augmenté** systématiquement dans tous les sites après l'épandage des boues. L'augmentation de la biomasse est observée pendant les deux ou trois années qui suivent l'épandage. Cette augmentation de la biomasse permet d'accumuler les éléments minéraux et surtout l'eau ce qui peut expliquer l'absence d'effet positif sur la croissance des jeunes peuplements.

Enfin, le suivi de l'accumulation des ETM par les champignons n'a pas permis de déterminer l'effet direct de l'apport des boues vue la diversité des espèces et de leur répartition entre les parcelles amendées avec les boues et les parcelles témoins.

Ainsi, **l'apport des boues en parcelles boisées ne semble pas présenter de risques pour l'environnement** même si les effets sur l'accumulation des ETM par les champignons restent à étudier. Les **doses d'apports** doivent cependant être **déterminées selon les besoins des peuplements** et **calculées au cas par cas** par des spécialistes forestiers. Au niveau technique, l'épandage des boues en parcelles boisées nécessite une **préparation adéquate de la parcelle** et doit être **anticipé** au moins une année avant sa réalisation.

Mots clés : Boues, Parcelles boisées, ETM, Croissance, biodiversité, Champignons.

Abstract

In France, the sewage sludge are often valued by spreading on farms to improve soil fertility and provide nutrients, nitrogen and phosphorus to crops. However, the sector has been weakened in many areas and the establishment of a pathway alternative and complementary to agricultural use is sought by many industry players.

To this end, an experiment recovery of sewage sludge by land application in forested areas, was conducted in Franche Comte. This study focused on the slurry or paste of small rural communities.

Six experimental sites across three departments (Doubs, Jura, Haute Saone) were established. The experimental sites were chosen to cover a wide variety of situations representative soil and forestry in the region. In the department of Doubs, 3 experimental sites were established in the community forests of Arc and Senans, Villers-Sous-Chalamont and Mercey-le-Grand. In the Jura, two experimental sites were established in the communes of Saint-Parcey and Lupicin. Haute Saone, an experimental site was set up in the town of Melisey

The experimental sites were then subject to regular monitoring to assess the impact of the contribution of sludge on: (i) growth, nutrition and health of populations, (ii) soil quality; (iii) the biodiversity of the herbaceous layer and (iv) bioaccumulation of trace metals in edible mushrooms.

The sludge applications were made once at the beginning of the experiment. The dose contributions were calculated in relation to nitrogen requirements of the settlement to avoid any risk of leaching. These doses of intake ranged from 0.35 t DM / ha to 2.4 t DM / ha (from 11.3 to 62.3 m³ ha gross) depending on the site.

The main mineral elements brought by the sludge are nitrogen whose contributions ranged from 25 kg / ha to 137 kg / ha depending on the sites and the phosphorus intake ranged from 8 to 85 kg P₂O₅ / ha depending on the site. For trace metals, the contributions by the sludge was extremely low and did not exceed 1% of the initial stock in the soil except for copper and zinc. For both ETM, contributions have increased the initial stocks of soil from 0.67 to 4% depending on the site.

Level of forest stands, the contribution of sludge increased tree growth plots amended with sludge compared to unfertilized plots at two sites corresponding to a copse of oaks older than 18 years (and Senans Arc) and coppice short rotation Ash (St. Lupicin).

In other sites, no beneficial effect was observed on the growth of young trees. For the oaks, the increase in growth is associated with improved nitrogen nutrition of trees and especially phosphate. In contrast, levels of N and P appear

to be adequate for optimal growth of young stands depending on situational conditions.

On the herbaceous layer, the contribution of sludge slightly alters the biodiversity of the undergrowth the year following the spreading mainly with the appearance of tomato plants. Subsequently, the results showed that the plots amended with sludge present state of biodiversity similar to control plots after one or two years. This is probably linked with low doses of sludge applied. For cons, the biomass of the underbrush has grown consistently at all sites after application of sludge. The increase in biomass is observed during the two or three years after application. This increase in biomass can accumulate minerals and especially water which may explain the absence of positive effect on growth of young stands.

Finally, monitoring the accumulation of ETM by fungi did not determine the direct effect of the contribution of sludge to the diversity of species and their distribution among the plots amended with sludge and control plots.

Thus, the contribution of sludge in woodlots do not seem to present risks to the environment even if the effects on the accumulation of ETM by fungi remain to be studied. The doses of inputs, however, must be determined according to the needs of populations and calculated on a case by case basis by forest specialists. At the technical level, the spreading of sludge in woodlots requires adequate preparation of the plot and must be anticipated at least one year prior to its implementation.

Keywords: Sludge, wood lots, ETM, growth, biodiversity, Mushrooms

SOMMAIRE

SOMMAIRE	5
1 Introduction	7
2 Matériel et méthode.....	8
2.1 Protocoles expérimentaux	9
2.2 Caractérisation des produits résiduaire et des apports.....	9
2.3 Suivi des sols	10
2.4 Suivi des peuplements forestiers.....	10
2.4.1 Suivis dendrométriques.....	10
2.4.2 Etat nutritionnel-diagnostic foliaire	11
2.5 Suivi de la végétation accompagnatrice.....	12
2.6 Suivi fongique	13
3 Résultats:	14
3.1 Caractérisation des produits épandus.....	14
3.1.1 Quantités et surfaces épandues	14
3.1.2 Eléments apportés par les boues	15
3.1.3 Eléments majeurs	16
3.1.4 Eléments traces métalliques (ETM).....	17
3.2 Effet des apports sur le sol.....	18
3.2.1 Effets sur les éléments majeurs	18
3.2.2 Effets sur les ETM	19
3.3 Effets des apports sur les peuplements forestiers	21
3.3.1 Effets sur la croissance.....	21
3.3.2 Effets sur l'état nutritionnel.....	23
3.4 Effets des apports sur la strate accompagnatrice.....	25
3.4.1 Effets sur la biomasse sèche.....	25
3.4.2 Effets sur les teneurs en éléments minéraux de la strate herbacée	27
3.4.3 Effets sur la biodiversité	29
3.5 Effets des apports sur la strate fongique	32
Conclusion et perspectives	36
Annexe 1 : Résultats détaillés des sites du Doubs	38
Annexe 2 : Résultats détaillés des sites du Jura	38
Annexe 3 : Résultats détaillés des sites de Haute Saône.....	38
Annexe 4: Réglementation.....	38

Liste des figures :

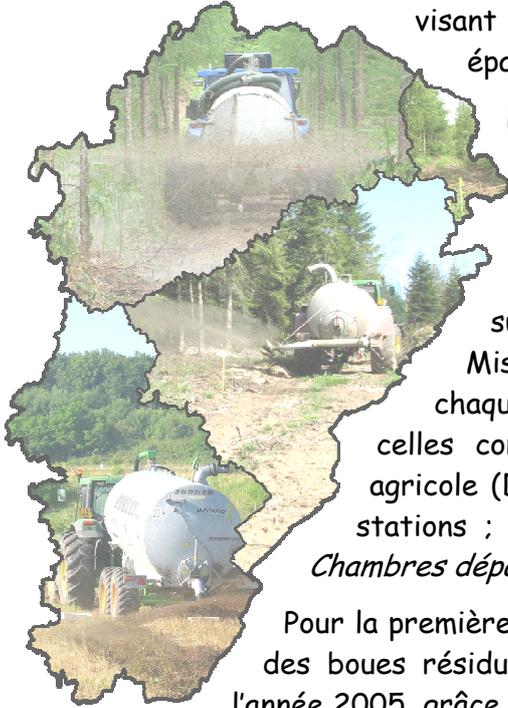
Figure 1 : Accroissement des arbres fertilisés avec des boues exprimé en pourcentage de l'accroissement des témoins.....	21
Figure 2 : Effet de l'apport des boues sur la hauteur des chênes sur le site d'Arc et Senans.	22
Figure 3 : Effet de l'apport des boues sur la croissance en hauteur à Parcey.....	23
Figure 4 : Effet de l'apport des boues sur la biomasse de la strate herbacée.....	26
Figure 5 : Effet de l'apport des boues sur la richesse spécifique (nombre d'espèce).	30
Figure 6 : Effet de l'apport des boues sur la richesse spécifique à Mercey Le Grand.	31
Figure 7: Evolution de l'indice de similarité après l'épandage des boues.....	31

Liste des tableaux :

Tableau 1 : Caractéristiques des six sites expérimentaux	8
Tableau 2 : Apports des éléments minéraux par les boues	15
Tableau 3 : Teneurs en ETM des boues épandues	16
Tableau 4 : Apports des éléments minéraux par les déjections animales	16
Tableau 5 : apports des ETM par les boues comparativement aux stocks initiaux.....	17
Tableau 6 : Teneurs en éléments minéraux dans les arbres à Arc et Senans.....	24
Tableau 7 : Teneurs en éléments minéraux dans les arbres à Saint-Lupicin.....	24
Tableau 8 : Teneurs en éléments minéraux dans les arbres à Mercey.....	24
Tableau 9 : Teneurs en éléments minéraux dans les arbres à Villers.....	24
Tableau 10 : Teneurs en éléments minéraux dans les arbres à Melisey.....	25
Tableau 11 : Effets de l'épandage des boues sur les teneurs en éléments nutritifs de la strate herbacée dans le site d'Arc et Senans.	27
Tableau 12 : Effets de l'épandage des boues sur les teneurs en éléments nutritifs de la strate herbacée à Mercey Le Grand.....	28
Tableau 13 : Effets de l'épandage des boues sur les teneurs en ETM de la strate herbacée.....	28
Tableau 14 : Effets de l'épandage des boues sur les teneurs en ETM de la strate herbacée.....	29
Tableau 15 : Tableau : Typologie des champignons récoltés à Arc et Senans l'année de l'épandage.....	33
Tableau 16: Typologie des champignons récoltés à Arc et Senans l'année 3	33
Tableau 17 : Teneurs en ETM dans les champignons.....	34
Tableau 18: Teneurs en ETM dans les champignons à Arc Et Senans, Mercey Le Grand et Melisey.	35

1 Introduction

Comme dans de nombreuses régions, la Franche-Comté n'échappe pas à une certaine fragilisation de sa filière de recyclage des boues de station d'épuration en agriculture : elle rencontre depuis quelques temps un problème d'adéquation avec une activité agricole qui s'investit dans un contexte socio-économique avec des cahiers des charges visant à fortement réduire pour ne pas dire déconseiller les épandages de boues (AOC Comté, conversion bio, etc...).



Pour les zones de plaines et de plateaux franc-comtois, cette préoccupation est bien sûr présente chez les Maires des petites communes rurales qui ont à gérer le recyclage des boues de leurs stations en constatant effectivement la fragilité de la filière agricole : en effet sur l'ensemble des stations d'épurations suivies par les Missions de Valorisation Agricole des Déchets (MVAD) de chaque département franc-comtois, on estime à près de **25 %** celles confrontées à une fragilisation manifeste de leur filière agricole (Doubs : 13 stations ; Jura : 15 stations ; Haute-Saône : 4 stations ; Territoire de Belfort : 4 stations - *Source MVAD des Chambres départementales d'agriculture de Franche-Comté*).

Pour la première fois en France, une réflexion sur la faisabilité d'épandage des boues résiduaires a ainsi pu être menée à l'échelle régionale, durant l'année 2005, grâce à l'appui financier du Conseil régional de Franche-Comté et de l'ADEME. Cette démarche a eu pour objectif de proposer un cahier des charges inspiré **des recommandations technico-scientifiques pour la mise en place d'expérimentations sur les épandages des boues en parcelles forestières**, éditées par un comité technique scientifique (INRA, ONF, CEMAGREF, IDF, ADEME) à la demande des ministères de l'agriculture et de l'environnement. *A l'échelle du territoire national, on dénombre ainsi une vingtaine de sites expérimentaux localisés principalement dans la moitié ouest de la France : ils sont actuellement organisés dans un réseau national animé par l'INRA de Bordeaux : réseau ERESFOR (Epandage de produits RESiduaires sur parcelles FORestières).*

Le cahier des charges franc-comtois, visant à cadrer la fertilisation d'espèces boisées par l'apport de boues résiduaires, a ainsi pu être adapté au contexte rural en s'inspirant également de l'actuelle filière agricole d'élimination des boues de station d'épuration ; il a été élaboré au sein d'un comité technique regroupant les chambres d'agriculture, des maires concernés par la fragilité de leur filière et un collège d'experts régionaux sur le plan forestier, agronomique et pédologique (ONF, CFPPA Châteaufarine, Lycée agricole de Dannemarie, GRAPE) et national (RITTMO). A l'issue de cette démarche, il a été souhaité que soit menée une phase expérimentale représentative du contexte local (boues-sol-peuplement) : cette « **Recherche d'une filière complémentaire au recyclage des boues en agriculture : expérimentation en zone boisée** » a été menée sur 3 ans, à

partir de 2006, avec 6 sites prévus (surface totale d'épandage sur les 3 départements : environ 3 hectares).

Le présent rapport a donc pour objectif de présenter l'expérimentation franc-comtoise et les résultats obtenus.

2 Matériel et méthode

Le réseau expérimental de Franche-Comté comprend 6 sites, répartis sur 3 départements : les caractéristiques de chaque site sont présentées dans le tableau ci-dessous. La description détaillée des sites est donnée en annexes.

Tableau 1 : Caractéristiques des six sites expérimentaux

Dpt	Commune d'épandage	Boues	Peuplement	Sol	Surface retenue (ha)
25	ARC-ET-SENANS	Liquide	Régénération chênes, hêtres,	LUVISOL REDOXISOL	1
	MERCEY LE GRAND	Lagune	Régénération	NEOLUVISOL mésosaturé	1.10
	VILLERS SOUS CHALAMONT	Liquide	Plantation épicéas + feuillus	BRUNISOL mésosaturé	0.42
39	PARCEY	Liquide	Plantation en mélange d'essences : feuillus et pin noir	CALCOSOL fluviatique anthropisé	1
	ST LUPICIN	Liquide	Taillis Courte Rotation de frênes communs	BRUNISOL mésosaturé pachique	0.6
70	MELISEY	Liquide	Plantation mélèzes	ALOCRISOL TYPIQUE ocreux	1

Le suivi a porté sur les produits épandus et sur les compartiments du milieu récepteur : sol, peuplement forestier, strate herbacée et strate fongique.

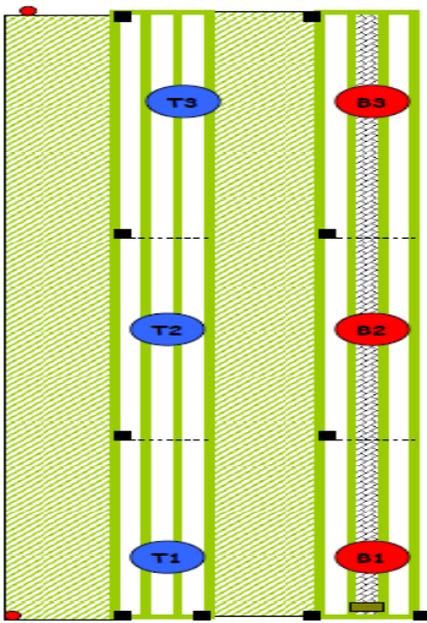
Dans la suite du présent rapport, les sites seront parfois présentés par leurs initiales comme suit :

Arc-et-Senans : AS ; Mercey-le-Grand : MG ; Villers-sous-Chalamont : VC

Parcey : Par ; St Lupicin : SL ; Melisey : Mel

2.1 Protocoles expérimentaux

Dans chaque site, le protocole expérimental correspond à un dispositif en bloc complet avec trois répétitions pour chaque modalité. Le dispositif expérimental est matérialisé de manière pérenne et les placettes unitaires sont identifiées par des bornes : un plan détaillé de chaque site expérimental a été ensuite installé dans chaque site, comme le prévoyait l'arrêté préfectoral d'autorisation de l'expérimentation.



Tous les dispositifs expérimentaux comprennent six placettes unitaires correspondant à 3 placettes témoins (sans apport de boue) et 3 placettes épandues avec des boues de STEP, sauf le site de Mercey-le-Grand dont le dispositif expérimental comprend 9 placettes unitaires. En effet dans ce site, deux types de boues sont expérimentées : des boues liquides et des boues solides.

2.2 Caractérisation des produits résiduels et des apports

De manière générale, la qualification des produits est primordiale et doit être réalisée au moment de chaque épandage sur le site expérimental. Le type de boue épandue, leur origine, les caractéristiques agronomiques des boues ont donc été déterminées sur un échantillon de boues le jour de l'épandage.

Les analyses ont porté sur la valeur agronomique, les éléments traces métalliques. Celles concernant les lagunes ont porté sur les phases solides et liquides. Les épandages ont été réalisés sous le contrôle de la MVAD du département avec l'appui technique de la FDCUMA. Avant chaque épandage, un essai préliminaire a été réalisé afin d'ajuster le matériel d'épandage pour s'assurer de l'homogénéité de celui-ci. De même, les quantités épandues ont été mesurées par pesées pour déterminer les quantifiés de boues exactement épandues.

2.3 Suivi des sols

Ces suivis ont été réalisés pour tous les dispositifs expérimentaux : il est en effet essentiel de pouvoir évaluer l'effet des apports de boues sur les caractéristiques physico-chimiques des sols afin d'évaluer les effets des boues sur le peuplement. Ils ont permis de contrôler l'évolution du milieu récepteur en comparant l'état initial (Témoins sans boues T1 à T3) avec les zones de traitements (B1 à B3).

Les analyses suivantes ont été faites pour chaque profondeur :

- Fertilité chimique : Ca, Mg, K, Na, P2O5
- CEC Metson et au pH du sol, pHeau
- MO, C, N, (C/N)
- 7 ETM : Chrome, Cuivre, Nickel, Plomb, Mercure, Cadmium, Zinc

2.4 Suivi des peuplements forestiers

Cette phase correspond aux mesures réalisées dans le peuplement forestier. Le suivi a porté sur les mesures dendrométriques des arbres, l'état nutritionnel et l'état sanitaire des arbres.

2.4.1 Suivis dendrométriques

Les mesures dendrométriques ont été réalisées conjointement par l'ONF et RITMO sur l'ensemble des arbres des placettes unitaires. Elles ont été réalisées pendant la première et la troisième année. Il s'agit des mesures de diamètre à 1.30 m et de la hauteur des arbres.

Le suivi de l'état sanitaire des arbres a été réalisé par l'ONF. Des observations ont été réalisées annuellement lors des différents travaux prévus sur les sites. Les arbres présentant des signes de dépérissement ont été notés et leur état sanitaire particulièrement suivi.

L'analyse de l'évolution des conditions de croissance des peuplements est basée sur les protocoles de suivi dendrométrique mis en œuvre pour les arbres forestiers avec des mesures réalisées en période hivernale.

- Mesures de circonférence et de la hauteur totale

La circonférence est mesurée sur tous les individus de la placette de mesure quel que soit leur état. Elle est réalisée au ruban d'acier à un niveau permanent (1,30 m) repéré par trait de peinture. Pour des hauteurs inférieures à 1,30 m, seule la hauteur est mesurée. Cependant, dans le site de TCR de Saint Lupicin, le

suivi dendrométrique est réalisé sur un sous échantillon de chaque parcelle unitaire.

La hauteur totale est mesurée à la perche jusqu'au stade 10 m. Elle est réalisée conjointement à celle de la circonférence.

Les mesures de la circonférence et de la hauteur totale sont réalisées les années 1 et 3.

- Etat sanitaire des arbres

A chaque mesure en circonférence et lors du suivi de la strate herbacée ou fongique, les arbres sont observés afin de repérer les individus présentant une anomalie particulière. Dans ce cas, l'état sanitaire de ces individus est suivi attentivement.

2.4.2 Etat nutritionnel-diagnostic foliaire

Le suivi de l'état nutritionnel a été effectué à partir d'analyses foliaires selon la méthodologie décrite dans BONNEAU (1988, 1995). L'échantillonnage est basé sur la récolte de feuilles sur au moins 10 arbres pris aléatoirement dans chaque placette unitaire. Le prélèvement est réalisé dans le tiers supérieur de la cime. La période de récolte a été choisie selon les recommandations de l'INRA (Carnus et al., 2002). Ainsi les prélèvements ont été réalisés en fin août début septembre. Les analyses portent sur les éléments minéraux majeurs, N, P, K, Mg et Ca.

Les échantillons prélevés ont été séchés dans une étuve à 40 °C pendant 72 h. Un échantillon composite par placette unitaire a été ensuite constitué à partir des échantillons prélevés dans la placette concernée. Les échantillons composites ont été ensuite acheminés vers le laboratoire d'analyse. Les analyses porteront sur la teneur en matière sèche, sur les éléments majeurs (N-P-K-Ca-Mg) et les ETM.

Les analyses de l'état nutritionnel des arbres ont été réalisées une fois tous les 3 ans selon les recommandations de l'INRA concernant les épandages de boues en parcelles boisées. Elles ont été réalisées l'année 2.

2.5 Suivi de la végétation accompagnatrice

L'objectif de ce suivi étant de déterminer les modifications qualitatives de la flore, l'augmentation de la production de matière sèche de la végétation accompagnatrice et l'importance de l'accumulation d'ETM dans la végétation consommée par la faune. Ce suivi a été réalisé annuellement selon les recommandations du comité ERSFOR sauf pour les teneurs en éléments traces métalliques.

- Suivi de la biomasse

Pour la biomasse, trois échantillons aléatoires seront mesurés en fin d'été dans chaque placette unitaire. En effet, dans chaque placette unitaire, 4 prélèvements sont réalisés aléatoirement sur 4 carrés de 50 cm de côté. La totalité de la strate herbacée de chaque prélèvement est coupée au ras du sol à l'aide d'un sécateur. Ensuite, les végétaux de chaque placette unitaire sont mélangés, séchés puis pesés pour quantifier la biomasse de cette strate par unité de surface du sol. Les prélèvements ainsi réalisés servent aussi à déterminer les teneurs en éléments minéraux de la strate herbacée.

- Teneurs en ETM

Un échantillon moyen est constitué sur chaque parcelle unitaire par 50 prélèvements élémentaires de feuilles uniformément répartis sur la parcelle de mesure et dans les différents étages de la structure de végétation (herbacés, arbrisseaux, arbustes). Le mélange des espèces prélevées se fera au prorata des espèces végétales présentes (indice d'abondance dominance relevé précédemment). Chaque échantillon moyen devra avoir un poids minimum de 10 g de matière sèche pour être analysé pour les éléments majeurs et les ETM et oligo-éléments.

- Suivi de la biodiversité

Pour la biodiversité, un relevé floristique a été réalisé dans chaque placette unitaire. Ce suivi est réalisé en deux périodes de l'année selon les recommandations du comité national. Il a été réalisé sur la base des techniques phytosociologiques décrites dans les ouvrages de référence (GUINOCHET, 1973), en faisant deux relevés annuels dans chaque placette élémentaire.

A chaque relevé floristique, nous avons noté toutes les espèces présentes sur les parcelles.

Les relevés floristiques ont ensuite permis de déterminer deux indices de biodiversité :

- 1- La Richesse spécifique correspond au nombre total des espèces présentes dans une parcelle unitaire.
- 2- L'Indice de similarité est ensuite calculé. Cet indice permet de quantifier le degré de similitude entre les parcelles (Legendre et Legendre, 1984), ayant reçu des boues et les parcelles témoins. C'est un coefficient binaire qui varie de 0 % (aucune espèce en commun) à 100 % (toutes les espèces en commun sont présentes sur les deux parcelles). Il est déterminé par le rapport entre le nombre d'espèces présentes à la fois sur les deux modalités et le nombre total des espèces observées dans les deux modalités.

2.6 Suivi fongique

Les champignons supérieurs sont connus pour leur capacité à concentrer les différents éléments toxiques. L'objectif de ce suivi est donc de quantifier les accumulations d'éléments, après l'apport des boues. Le suivi des teneurs en ETM dans les champignons comestibles sera réalisé les années 1 et 3.

Un échantillon des champignons supérieurs a été prélevé dans chaque placette unitaire. L'ensemble des champignons supérieurs rencontrés dans chaque placette unitaire est récolté. Les prélèvements ont été réalisés en deux périodes en automne afin d'avoir les quantités nécessaires pour les analyses. Les prélèvements de ces deux périodes ont ensuite été mélangés pour constituer un échantillon composite qui a été analysé. Les analyses ont porté sur les éléments traces métalliques (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn) après séchage des échantillons à 40 °C.

3 Résultats:

3.1 Caractérisation des produits épandus

3.1.1 Quantités et surfaces épandues



Rappelons qu'un **seul épandage par site** a été réalisé la 1^{ère} année de l'expérimentation, en période de végétation (entre avril et juin selon les sites) ; la surface moyenne épandue se situe autour de 25 ares, avec près d'un demi-hectare pour Melisey et une quinzaine d'ares pour Parcey. Les quantités de boues liquides épandues se situent autour de **12 m³** pour 3 sites, et **6 m³** pour les 2 autres. **Les variations obtenues sont dues pour partie aux préconisations de fertilisation et surtout à la mise en œuvre** qui n'a pas toujours permis d'épandre les quantités attendues. Le tableau ci-dessous présente pour chaque site les quantités, surfaces et doses/ha épandues.

	AS	MG, BL	MG, BP	VC	Par	SL	Mel
Matière brute en t/ha	62,43	37,46	11,33	29,37	40,59	45,9	27,8
Matière Sèche en %	1,81	0,91	28,9	1,72	5,32	3,72	1,39
Quantité épandue en m³	11,8	11,79	3,57	6,14	6,27	11	12,9
Surface épandue en ha	0,189	0,315	0,315	0,209	0,1547	0,239	0,465

(25) AS : Arc et Senans, MG : Mercey le grand (Boues Liquide et Pâteuse) ; VC : Villers-sous-Chalamont ;

(39) Par :Parcey ; SL : St Lupicin ;(70) Mel : Melisey

Observations

En plus des données chiffrées, de l'adéquation besoins des arbres et apports théoriques par les boues de STEP, **l'épandage en zones boisées nécessite**, beaucoup plus qu'en agriculture, **une réelle anticipation et donc une préparation des cloisonnements** pour permettre un épandage correct et au plus près des préconisations. Pour les besoins de l'expérimentation, chaque site a ainsi bénéficié d'un aménagement particulier généralement conduit conjointement par les communes et l'ONF (girobroyage, élagage, éclatement des souches, préparation de tournières, chemin d'accès ...).

3.1.2 Eléments apportés par les boues

Le tableau ci-après présente pour chaque site les quantités d'éléments effectivement apportés (ETM et éléments majeurs), dont on peut constater la forte variation des teneurs en éléments apportés :

- Pour les éléments majeurs, la dispersion se situe entre 70 et 80 % de la valeur moyenne.

- Pour les ETM la dispersion se situe autour de 105 % sauf pour le cuivre où les valeurs sont un peu moins dispersées (+/-58 % de la valeur moyenne).

Tableau 2 : Apports des éléments minéraux par les boues

Elts apportés par les boues												
Site	kg / ha					g/ha						
	Ntot	P2O5	K2O	MgO	CaO	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
AS	137,35	44,95	7,49	7,49	99,3	1,42	30,74	285,9	1,71	21,02	54,2	1140,4
MG.BL	26,22	7,49	2,62	1,50	15,4	0,36	12,27	714,5	0,29	406,0	18,7	234,5
MG.BP	37,39	46,68	13,48	17,33	162,0	3,37	168,63	1319,6	1,69	455,1	173,2	1450,2
VC	38,18	22,61	5,87	2,64	22,6	0,33	8,59	274,8	0,10	6,01	8,74	80,4
P	89,30	84,43	4,06	4,87	134,8	2,92	48,15	833,5	2,62	52,3	74,9	2816,1
St L	123,93	72,98	13,31	11,93	173,0	2,01	42,00	903,3	3,43	33,3	104,5	1446,6
Mel	25,30	16,96	3,89	3,06	68,1	0,37	5,68	354,8	0,25	4,3	11,0	181,5

*Le tableau ci-après permet de rappeler que le protocole expérimental (prélèvements de boues lors de l'épandage, en plus de ceux effectués préalablement), a mis en évidence la **non conformité de la boue liquide de Mercey-le-Grand pour le Cuivre et le Nickel** ... dont les quantités apportés restent toutefois inférieures, à celle de la boue pâteuse conforme de Mercey! Le protocole expérimental visait une comparaison des 2 types de boues, mais en épandage classique, il n'y a pas de séparation, la boue à épandre est prélevée dans un seul bassin.*

Tableau 3 : Teneurs en ETM des boues épandues

Site	g / t de MS							
	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	Cr+Cu+Ni+Zn
AS	1,26	27,2	253	1,2	18,6	48	801	1100
MG.BL	1,07	36	2096	0,8	1191	55	643	3967
MG.BP	1,03	51,5	403	0,5	139	52,9	430	1025
Mel	0,96	14,69	918,11	0,68	11,17	28,56	489,22	1433
P	1,35	22,3	386	0,9	24,2	34,7	966	1399
VC	0,66	17	544	0,3	11,9	17,3	241	814
St L	1,18	24,6	529	1,7	19,5	61,2	718	1292
valeurs limites	10	1000	1000	10	200	800	3000	4000

3.1.3 Eléments majeurs

Le phosphore, la chaux et l'azote correspondent aux principaux éléments fertilisants apportés avec des quantités généralement inférieures à celles habituellement appliquées en agriculture pour la fertilisation de prairie.

Il est par ailleurs intéressant de comparer les quantités d'éléments apportés par les boues de celles obtenues par les pratiques d'épandages d'effluents d'élevage ... : Le tableau ci-dessous présente des valeurs habituellement rencontrées dans 3 types d'effluents d'élevage ; On peut noter que les apports de boues et d'effluents d'élevage sont approchants vis-à-vis de du phosphore (4 situations sur 7), du calcium (5 situations sur 7) et dans une moindre mesure de l'azote (2 situation sur 7) : *c'est en effet essentiellement pour l'apport de phosphore et pour les sols acides, de chaux, que la fertilisation d'espèces boisées présente un certain intérêt !*

Tableau 4 : Apports des éléments minéraux par les déjections animales

	Matière brute t/ha	Kg apportés / ha				
		Ntot	P2O5	K2O	MgO	CaO
Fumier VL stabulation libre	30	165	105	240	60	150
Fumier VL étable entravée	30	141	93	132	0	0
Lisier	25	125	62,5	62,5	150	150

Ces 2 éléments **Phosphore et CaO**, pourraient légitimement avoir un impact positif sur le sol et /ou la croissance des arbres, attendu l'extrême pauvreté des sols en ces 2 éléments. On sera donc particulièrement vigilant quant à l'impact de l'apport de phosphore pour les sites d'Arc-et-Senans, Villers-sous-Chalamont, Parcey et St Lupicin ; et de la même manière, sur celui en CaO pour les sites d'Arc-et-Senans et dans une moindre mesure Melisey, (dont les boues ont été légèrement chaulées).

On notera par ailleurs que les quantités d'azote apportées sont importantes pour deux sites (AS et SL), même si cet apport contribue principalement au développement de la biomasse herbacée plutôt que celui de la strate arbustive.

3.1.4 Eléments traces métalliques (ETM)

Les quantités en éléments métalliques apportées par les boues sont, par comparaison aux éléments majeurs, beaucoup plus dispersées : si elles sont légitimement inférieures au seuil réglementaire, les quantités apportées par hectare se distribuent entre 0.1 gr pour du mercure à 2.8 kg pour le zinc à Parcey.

Le tableau ci-dessous offre une représentativité des éléments métalliques exogènes par rapport aux ETM du sol.

Tableau 5 : apports des ETM par les boues comparativement aux stocks initiaux

Site	Elts boues / Elts sols*						
	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
AS	0,65%	0,02%	1,46%	0,89%	0,07%	0,08%	1,27%
MG-BL	0,05%	0,004%	2,04%	0,12%	0,34%	0,02%	0,08%
MG-BP	0,49%	0,05%	3,76%	0,71%	0,38%	0,15%	0,51%
VC	0,01%	0,004%	0,69%	0,02%	0,004%	0,01%	0,02%
Par	0,54%	0,07%	4,06%	2,28%	0,16%	0,19%	2,64%
SL	0,11%	0,01%	2,06%	1,81%	0,02%	0,05%	0,29%
Mel	0,23%	0,01%	1,37%	0,19%	0,01%	0,02%	0,22%

*ETM des sols = moyenne des valeurs sur la surface d'échantillonnage sans apport de boues (profondeur 0/30 cm)

Les quantités d'ETM apportées apparaissent très faibles, voire infinitésimales au regard des quantités mesurées dans les sols : elles sont comprises entre 0,04 % (pour le Chrome à Villers-sous-Chalamont) et 4,06 % (pour le Cuivre à Parcey).

Si le zinc est l'élément métallique apporté en quantité la plus importante (de 80 gr pour Villers sous Chalamont à 2.8 kg/ha pour Parcey), c'est le cuivre qui représente la plus forte concentration au regard des quantités présentes dans les sols, puisqu'il représente 0.69 % à Villers-sous-Chalamont à 4.06% Parcey.

Les prélèvements et analyses de sols effectués sur la surface d'échantillonnage entre les blocs témoins et les blocs avec apports de boues ont donc permis de vérifier si un impact a été constaté.

3.2 Effet des apports sur le sol

3.2.1 Effets sur les éléments majeurs

Sur 234 possibilités de variation des teneurs entre blocs témoins de l'année 1 et 3 et blocs ayant reçu des boues l'année 1 et 3 (comparaisons intra-parcelle), on constate que pour les 6 sites d'expérimentation où 9 éléments majeurs ont été analysés sur 2 profondeurs (C, N, C/N, pH, CEC, P₂O₅, Ca, Mg, K) **95.3 % ne présentent aucune différence significative.**

Les différences qui apparaissent au niveau de la profondeur 0-30 cm, concernent 3 sites :

- **Mercey-le-Grand** caractérisé par une augmentation du carbone, plus facilement explicable par l'échantillonnage à travers la variabilité spatiale de la profondeur de l'horizon A.
- **Melisey** où a été enregistrée une forte augmentation de la magnésie (+30 kg/ha) sur les blocs ayant reçu des apports équivalent à 3 kg.
- **St Lupicin** montre une perte d'azote (-7.8 kg/ha) sur les zones non traitées entre année 1 et 3 et une diminution du phosphore sur zone traitée ... mais cette variation appartient au seuil d'incertitude du labo !

On retrouve des variations significatives également pour la **profondeur 30-50 cm**, elles concernent le site d'Arc-et-Senans avec une augmentation de pH qui peut trouver une interprétation logique, avec à la variabilité de profondeur de l'horizon Eg, et des diminutions de potasse et magnésie (de 8 à 137 kg/ha), difficilement explicable avec des apports de l'ordre 7.5 kg. La situation est équivalente à Melisey où l'apport de 3 kg de MgO ne peut expliquer une augmentation significative de 39 kg !

Sur 252 possibilités de variation des teneurs entre blocs témoins de l'année 1 avec blocs ayant reçu des boues ou blocs témoins de l'année 3 avec blocs ayant reçu des boues (comparaisons dites inter-parcelle), on constate que pour les 6 sites d'expérimentation avec les 9 éléments analysés sur 2 profondeurs, **96.1 % ne présentent aucune différence significative.**

Les différences qui apparaissent au niveau de la **profondeur 0-30 cm**, concernent 3 sites :

- **Arc-et-Senans** présente des différences significatives pour le **pHeau** (- 6,67 %) et l'**azote** (- 4,1 %). **La variation de pH peut être imputable à l'apport de boues**, si on admet que celui-ci peut être responsable d'une augmentation de l'activité microbienne minéralisatrice dans un milieu où celle-ci est considérée comme moyenne (litières de type DYSMULL). L'autre variation concerne une diminution d'Azote de -6,7 % soit l'équivalent d'une consommation (perte) de 220 kg/ha alors que dans le même temps ont été apportés 137 kg/ha

soit un déficit mesuré de 357 kg/ha : si la minéralisation activée par un apport de MO labile peut contribuer à une consommation d'azote, **il est délicat d'imputer cette variation au seul épandage.**

- **St Lupicin** est caractérisé par des augmentations significatives en phosphore, magnésie et azote, mais seule celle attribuée au phosphore (+14 kg/ha) peut être imputable à l'apport de boue qui se situe autour de 70 kg/ha. Celles correspondant à l'azote (+13 t/ha) et la magnésie (+731 kg/ha) sont difficilement imputables au traitement attendu les quantités apportées, respectivement +124 kg et +12 kg/ha !

- **Melisey** présente une situation similaire à St Lupicin avec une augmentation significative de la magnésie entre témoins et blocs traités (+30 kg/ha) pour un apport de seulement 3 kg/ha !

On retrouve des variations significatives également pour la profondeur 30-50 cm : elles concernent le site **d'Arc-et-Senans** avec une forte diminution en potasse équivalente à 110 kg/ha difficilement justifiée par un traitement équivalent à un apport de 7,5 kg de potasse, et le site de **Villers-sous-Chalamont** qui porte sur une diminution des valeurs de pHeau (entre T3 et B3) difficilement imputable au traitement mais plus à la variabilité de l'échantillonnage liée à l'hétérogénéité pédologique constatée dans certaines placettes. Si par ailleurs on applique l'incertitude laboratoire de 4 % les différences n'apparaissent plus significatives.

Les apports en phosphore et en chaux, seuls éléments présents en quantité suffisante dans les boues pour pouvoir « espérer » un impact au moins dans l'horizon de surface, n'ont finalement montré qu'une très faible augmentation pour le phosphore sur le site de St Lupicin ! Les autres variations sont difficilement explicables par le seul apport de boues.

3.2.2 Effets sur les ETM

Sur 182 possibilités de variation des teneurs entre blocs témoins de l'année 1 et 3 et blocs ayant reçu des boues l'année 1 et 3 (comparaisons dite intra-parcelle), on constate que pour les 6 sites d'expérimentation où 7 ETM sur 2 profondeurs ont été analysés, **91.7 % ne présentent aucune différence significative.**

Les différences constatées apparaissent au niveau de la profondeur 0-30 cm dans les sites d'Arc-et-Senans (Cr, Ni, Pb), St Lupicin (Ni), et Melisey (Hg), et également au niveau de la profondeur 30-50 cm pour les sites d'Arc-et-Senans (Cd, Hg, Pb,Cu), St Lupicin (Hg, Pb, Zn) et également Melisey (Hg, Zn) : il ressort que **100 % des variations significatives constatées appartiennent aux intervalles de confiance du laboratoire.** On peut illustrer cette constatation, en prenant l'exemple du Nickel sur le site de St Lupicin :

Sur l'épaisseur 0/30 cm on observe une différence significative uniquement pour le Nickel entre les placettes témoins des années 1 et 3, correspondant à une diminution de 7,6 %.

Pour 1 apport de 33,3 g/ha, on enregistre une diminution de 7,6 % entre T1 et T3 soit -11,6 kg/ha.

T1= 54,97 mg/kg +/- 3,61 % avec un niveau d'incertitude laboratoire de 13 %.

T3= 50,7 mg/kg +/- 1,04 % avec un niveau d'incertitude laboratoire de 13 %.

L'augmentation enregistrée appartient à l'intervalle d'incertitude du laboratoire (44,11 mg à 57,29 mg), on ne peut donc considérer comme significatives, les variations obtenues.

Il faut par ailleurs noter qu'un seul site est concerné par un dépassement des valeurs seuil pour 2 éléments (Nickel > 50 mg/kg et en Chrome > 150 mg/kg): **ces teneurs correspondent au fond géochimique.**

Sur 189 possibilités de variation des teneurs entre blocs témoins de l'année 1 avec blocs ayant reçu des boues ou blocs témoins de l'année 3 avec blocs ayant reçu des boues (comparaisons dites inter-parcelle), on constate que pour les 6 sites d'expérimentation où 7 ETM sur 2 profondeurs ont été analysés, **96.9 % ne présentent aucune différence significative.**

Les différences constatées apparaissent pour l'essentiel au niveau de la profondeur 0-30 cm pour le site d'Arc-et-Senans (Cr, Ni, Pb), ainsi :

Pour la première année de traitement, avec un apport de 30,7 g/ha de chrome, 21 g/ha de nickel et 54,2 g/ha de plomb, on observe respectivement une diminution de 12,43 % en chrome (soit -17,7 kg/ha), de 10 % en nickel (soit -3.3 kg/ha) et de 4.16 % en plomb (soit -2.8k g/ha)

Les diminutions enregistrées appartenant toutes aux intervalles d'incertitude du laboratoire (respectivement de 28 %, 25 % et 21 %) on ne peut donc considérer comme significatives, les variations obtenues.

La même situation est observée sur le site de Mercey-le-Grand mais uniquement pour le cuivre ; Des différences significatives apparaissent également sur la profondeur 30-50 cm pour les sites de St Lupicin (Hg) et Villers-sous-Chalamont (Cu) : il ressort que **100 % des variations significatives constatées appartiennent aux intervalles de confiance du laboratoire.**

**Détails des résultats par site en annexe*

Les résultats obtenus permettent de conclure que les apports de boues effectués selon le cahier des charges franc-comtois et calé sur celui de la filière agricole n'ont pas modifié les teneurs du sol en ETM, puisqu'aucune variation significative n'a été mesurée entre blocs témoins et blocs ayant reçu des boues.

3.3 Effets des apports sur les peuplements forestiers

3.3.1 Effets sur la croissance

La figure 1 montre les résultats de l'accroissement en hauteur obtenus dans l'ensemble des sites. Les accroissements sont exprimés en pourcentage des témoins.

Les résultats montrent que l'épandage des boues a eu un effet bénéfique sur les sites d'Arc et Senans ainsi que Saint Lupicin. Aucun effet (ni positif ni négatif) n'a été observé sur les sites de Villers, de Mercey le Grand et de Melisey.

A l'opposé, sur le site de Parcey, les résultats montrent que les accroissements des arbres ayant reçu des boues étaient légèrement inférieurs à ceux des témoins.

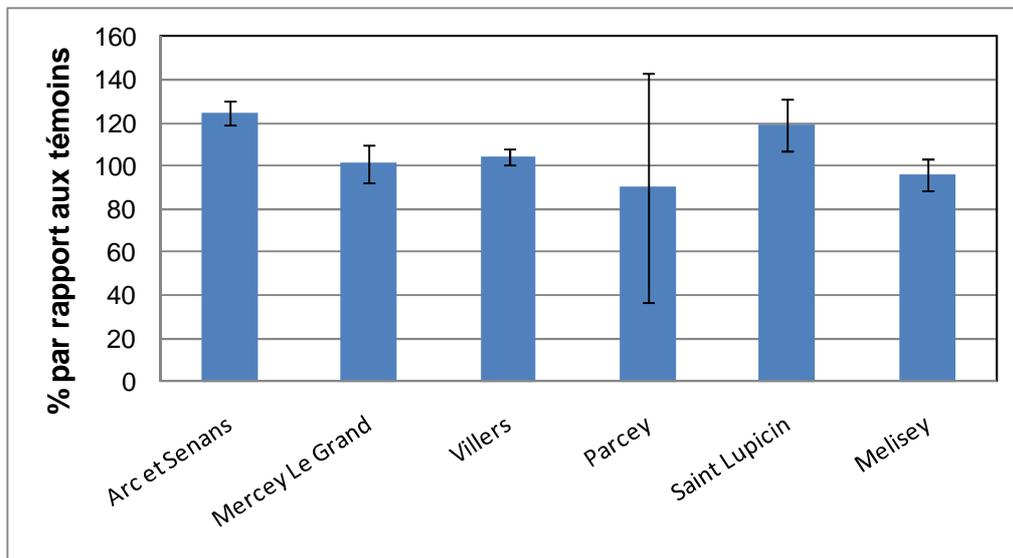


Figure 1 : Accroissement des arbres fertilisés avec des boues exprimé en pourcentage de l'accroissement des témoins.

Dans le site de Mercey-Le-Grand, nous présentons uniquement les résultats obtenus avec les boues liquides sachant qu'il n'y a pas de différence significative entre les modalités boues liquides et boues solides.

Les différences observées entre les sites peuvent être expliquées soit par le fait que certaines stations forestières, comme celle de Mercey-Le-Grand ont des sols riches et profonds. Dans le cas de Villers, il s'agit d'une très jeune plantation plantée juste avant les épandages. Nous pouvons supposer que les besoins en éléments minéraux de cette plantation ont été fournis par le sol et que l'apport des boues n'a pas affecté les jeunes plants.

Enfin, les quantités des boues apportées ont été déterminées pour apporter les besoins en azote des plants afin de minimiser les risques de lixiviation des nitrates dans la nappe. Ce choix a été motivé par l'absence du suivi de la qualité des eaux de percolation. L'absence de réponse peut alors, notamment dans le site de Melisey avec une plantation de mélèze de 10 ans, être due aux faibles quantités d'éléments apportées. L'épandage de doses plus importantes pourra apporter un éclaircissement sur ce sujet. Cette hypothèse est d'ailleurs actuellement en vérification dans le cadre de la thèse réalisée sur le site de Melisey par l'université de Franche-Comté.

La figure 2 montre que les boues, même avec des quantités relativement faibles ont eu un effet bénéfique sur les chênes à Arc et Senans. En effet, l'accroissement en hauteur des arbres fertilisés avec les boues était en moyenne de 1,4 m alors qu'il était de 1,1 m seulement dans les parcelles témoins.

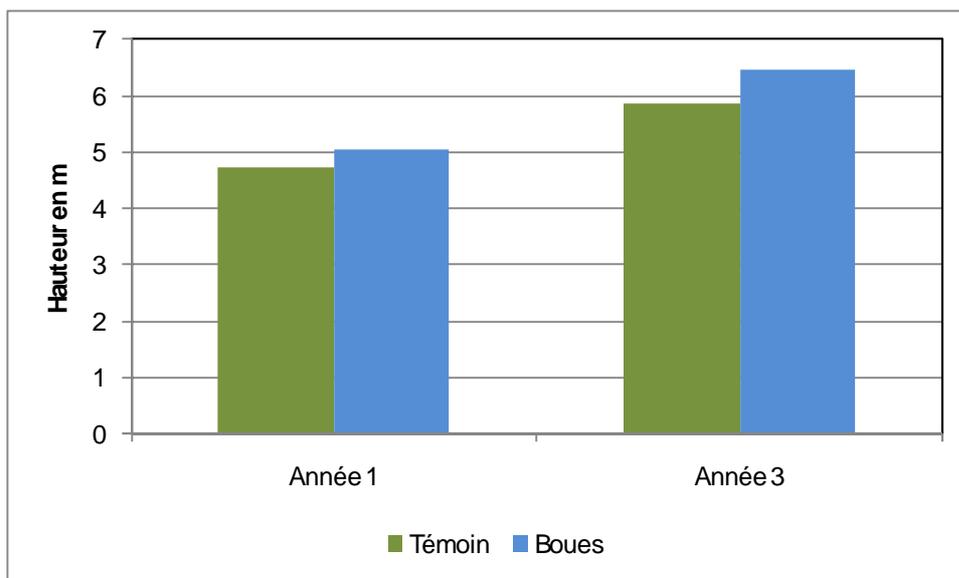


Figure 2 : Effet de l'apport des boues sur la hauteur des chênes sur le site d'Arc et Senans.

Dans le cas de Parcey, la plantation comprend plusieurs espèces réparties de manière aléatoire dans le dispositif. L'effet de l'apport des boues semble dépendre des espèces forestières avec un effet positif sur les érables, effet nul sur le pin noir et un effet négatif sur les noyers. Cependant, dans ce site, toutes les espèces ne sont pas présentées avec le même nombre d'individus dans chaque placette unitaire ce qui introduit un risque d'erreur.

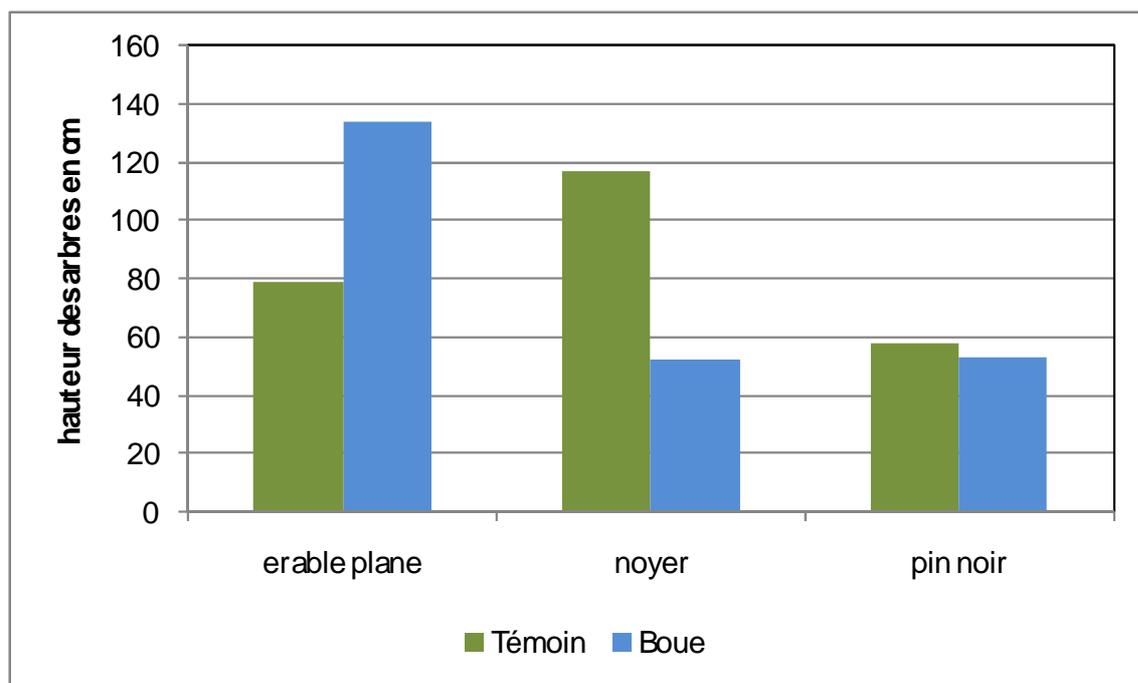


Figure 3 : Effet de l'apport des boues sur la croissance en hauteur à Parcey

3.3.2 Effets sur l'état nutritionnel

L'effet de l'apport des boues sur l'état nutritionnel des arbres a été analysé sur tous les sites sauf celui de Parcey. En effet, dans ce site le nombre élevé des espèces présentes ne permettait pas de réaliser un échantillonnage optimal. De même, l'analyse des feuilles de toutes les espèces ne pouvait apporter d'indications précises selon la configuration du site.

Les données analytiques montrent que l'apport des boues était bénéfique uniquement pour les chênes âgés du site d'Arc et Senans. Dans ce cas, les boues ont significativement augmenté les teneurs en azote et surtout en phosphore des chênes. Cette amélioration de l'état nutritionnel peut expliquer l'effet bénéfique observé sur la croissance dans ce site.

Tableau 6 : Teneurs en éléments minéraux dans les arbres à Arc et Senans

<i>Traitement</i>	<i>N</i>	<i>P</i>	<i>K</i>	<i>Mg</i>	<i>Ca</i>
	%	%	%	%	%
<i>Témoins</i>	<i>1,97</i>	<i>0,09</i>	<i>0,82</i>	<i>0,15</i>	<i>0,74</i>
<i>Boues Liquides</i>	<i>2,37</i>	<i>0,13</i>	<i>0,68</i>	<i>0,13</i>	<i>0,87</i>

Tableau 7 : Teneurs en éléments minéraux dans les arbres à Saint-Lupicin

Traitement	N	P	K	Mg	Ca
	%	%	%	%	%
Témoins	1,83	0,28	1,20	0,30	1,42
Boues Liquide	1,84	0,23	1,36	0,33	1,46

Tableau 8 : Teneurs en éléments minéraux dans les arbres à Mercey

	N %	P %	K %	Mg %	Ca %
Témoins	1,3	0,17	1,44	0,18	0,56
Boues liquides	1,23	0,18	1,26	0,2	0,61
Boues solides	1,36	0,2	1,56	0,21	0,82

Tableau 9 : Teneurs en éléments minéraux dans les arbres à Villers

Epicéa	N %	P %	K %	Mg %	Ca %
Témoins	1,66	0,13	1,49	0,17	1,04
Boues liquides	1,72	0,14	1,81	0,17	1,09

Tableau 10 : Teneurs en éléments minéraux dans les arbres à Melisey

<i>Traitement</i>	<i>N</i>	<i>P</i>	<i>K</i>	<i>Mg</i>	<i>Ca</i>
	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>
<i>Témoins</i>	<i>2,12</i>	<i>0,11</i>	<i>0,64</i>	<i>0,11</i>	<i>0,22</i>
<i>Boues Liquides</i>	<i>1,97</i>	<i>0,13</i>	<i>0,70</i>	<i>0,12</i>	<i>0,27</i>

Dans tous les sites caractérisés par un jeune peuplement, les teneurs en éléments minéraux (N et P) suggèrent un état nutritionnel moyen sans carence apparente. De ce fait, il est possible que les boues n'aient pas eu d'effet bénéfique sur la nutrition et par conséquent sur la croissance des plantes.

A noter cependant, que nous avons observé un effet bénéfique de l'apport des boues sur la croissance en hauteur du taillis à courte rotation de frêne sans pour autant avoir un effet bénéfique sur la nutrition minérale.

3.4 Effets des apports sur la strate accompagnatrice

3.4.1 Effets sur la biomasse sèche

Le suivi de la biomasse de la strate herbacée a été réalisé annuellement sur tous les sites. En effet, plusieurs références bibliographiques ont montré que l'apport des éléments minéraux en forêt (sous forme d'engrais ou de produits résiduaux) profite généralement bien à cette strate dont le développement peut être concurrentiel pour les arbres et peut aussi induire des risques d'incendies en périodes de fortes sécheresses.

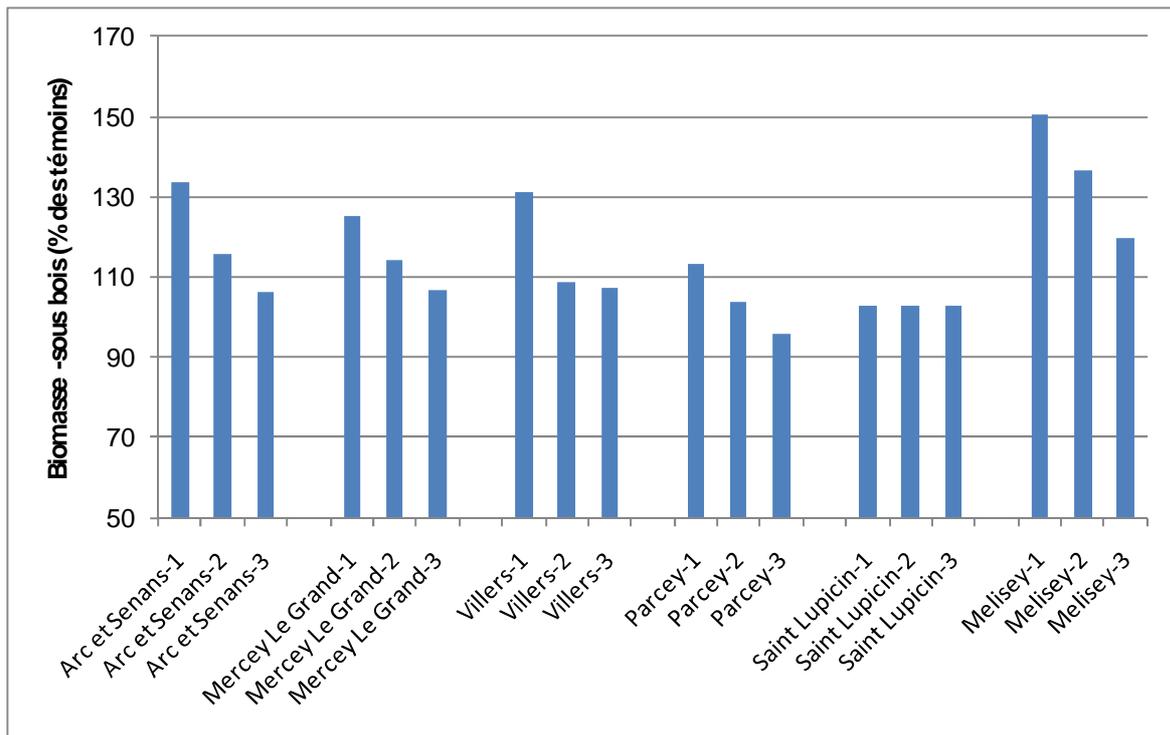


Figure 4 : Effet de l'apport des boues sur la biomasse de la strate herbacée

La figure montre l'effet de l'apport des boues sur la biomasse du tapis herbacée dans les différents sites étudiés. Dans la majorité des cas, l'apport des boues augmente significativement la biomasse de cette strate l'année qui suit l'épandage. Cette augmentation atteint 150 % de la biomasse du tapis herbacée des parcelles non fertilisées dans le site de Melisey. Par la suite, la biomasse de la strate herbacée des parcelles fertilisées diminue annuellement pour atteindre une biomasse équivalente à celle des parcelles non fertilisées. Dans le cas de Melisey, la biomasse de la strate herbacée des parcelles fertilisées est encore supérieure à celle des témoins.

A noter que cette augmentation de la biomasse de la strate herbacée a été beaucoup moins importante dans les sites de Parcey et de Saint Lupicin. Dans ce dernier site, il s'agit d'un taillis à très courte rotation avec une forte densité ce qui peut expliquer la faible biomasse de la strate herbacée.

Par ailleurs, le développement de la strate herbacée suite aux apports des boues peut entraîner une forte concurrence pour les arbres à la fois pour l'eau et les éléments minéraux. Ceci est particulièrement important pour les jeunes plantations dont les racines sont encore superficielles et n'atteignent pas les profondeurs non prospectées par la strate herbacée. Cependant, à moyen terme, toute la biomasse de la strate herbacée est transformée en matière organique qui retourne au sol et dont la minéralisation permettra de libérer

progressivement de l'azote et du phosphore qui peuvent alors être bénéfiques pour les arbres. Les essais de fertilisation en forêt montrent souvent des effets bénéfiques sur la croissance plusieurs années après la fertilisation. Dans ce cas, le développement de la strate herbacée agit comme un engrais vert dans le système agricole.

3.4.2 Effets sur les teneurs en éléments minéraux de la strate herbacée

- Effet sur les teneurs en éléments majeurs

De manière générale, l'apport des boues n'a pas eu d'effet sur les teneurs en éléments majeurs de la strate herbacée. Cependant, ce résultat doit être analysé au regard de l'augmentation de la biomasse de cette strate observée dans tous les sites. En effet, cette augmentation de la biomasse de la strate herbacée a entraîné une dilution des éléments minéraux réellement absorbés. Ainsi, la minéralomasse de la strate herbacée est systématiquement plus élevée dans les parcelles amendées avec des boues. A moyen et long terme, la minéralisation de cette matière organique conduira à la libération de plus d'éléments minéraux dans les parcelles amendées avec les boues.

Tableau 11 : Effets de l'épandage des boues sur les teneurs en éléments nutritifs de la strate herbacée dans le site d'Arc et Senans.

Traitement	N	P	K	Mg	Ca
	%	%	%	%	%
Témoins	1,70	0,11	1,35	0,23	0,55
Boues Liquides	1,62	0,10	1,21	0,19	0,64

Tableau 12 : Effets de l'épandage des boues sur les teneurs en éléments nutritifs de la strate herbacée à Mercey Le Grand

Traitement	N	P	K	Mg	Ca
	%	%	%	%	%
Témoins	1,38	0,08	0,85	0,15	0,49
<i>Boues</i>					
Liquides	1,54	0,09	0,97	0,19	0,46
<i>Boues</i>					
Solides	1,43	0,09	0,64	0,17	0,55

- Effets sur les teneurs en ETM

Pour les ETM, là encore il n'y a pas d'effet de l'apport des boues sur l'accumulation des ETM dans la strate herbacée. Ce résultat indique que les boues apportées à des doses faibles ne présentent pas de risque de contamination de la chaîne alimentaire pour la faune via les teneurs en ETM dans la strate herbacée.

Tableau 13 : Effets de l'épandage des boues sur les teneurs en ETM de la strate herbacée

Traitement	Cu	Zn	Mn	B	Fe
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Témoins	6,81	41,40	962,33	19,17	149,67
<i>Boues</i>					
Liquides	7,08	40,13	794,33	16,87	186,67

Tableau 14 : Effets de l'épandage des boues sur les teneurs en ETM de la strate herbacée

<i>Traitement</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>	<i>Mn</i>	<i>B</i>	<i>Fe</i>
	<i>mg/kg</i>	<i>mg/kg</i>	<i>mg/kg</i>	<i>mg/kg</i>	<i>mg/kg</i>
<i>Témoins</i>	<i>3,32</i>	<i>33,10</i>	<i>896,67</i>	<i>8,58</i>	<i>102,20</i>
<i>Boues</i>					
<i>Liquides</i>	<i>5,33</i>	<i>36,73</i>	<i>954,67</i>	<i>14,00</i>	<i>114,00</i>
<i>Boues</i>					
<i>Solides</i>	<i>3,66</i>	<i>29,07</i>	<i>749,33</i>	<i>14,80</i>	<i>122,00</i>

3.4.3 Effets sur la biodiversité

Au niveau biodiversité, l'apport des boues se caractérise principalement par la présence dans la strate herbacée d'espèces "exotiques" pour un écosystème forestier. En effet, la présence des pieds de tomate était très importante dans tous les sites expérimentaux, l'année qui a suivi les épandages. La présence des pieds de tomate était particulièrement impressionnante sur le site de Melisey.

De manière générale, les changements de la biodiversité sont extrêmement minimes au regard de la variabilité naturelle de ces écosystèmes. La figure montre le nombre d'espèces recensées en fin d'expérimentation dans les parcelles témoins et les parcelles fertilisées avec les boues dans les différents sites.

Les analyses ne montrent aucun effet significatif pour les boues liquides. Par contre, pour les boues solides, une légère diminution du nombre d'espèces est observée dans le site de Mercey-Le-Grand après l'épandage des boues solides.

A noter enfin que le nombre d'espèces est relativement faible sauf dans le cas du site de Villers.

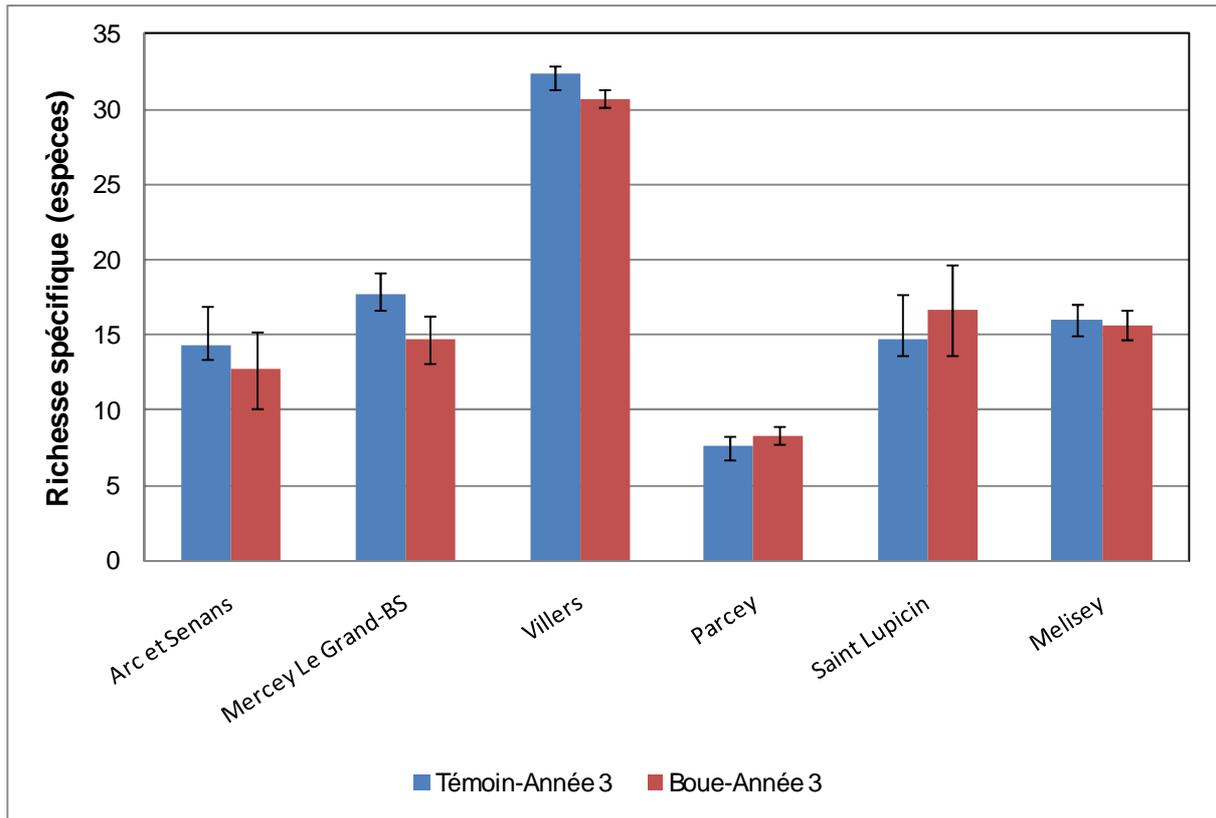


Figure 5: Effet de l'apport des boues sur la richesse spécifique (nombre d'espèce).

Pour le site de Mercey-Le-grand, les données présentées dans ce graphique correspondent à ceux des parcelles témoins et des parcelles fertilisées avec des boues solides.

La figure 6 montre l'effet de l'apport des boues (liquides et solide) sur la richesse spécifique dans le site de Mercey-Le-Grand. La diminution de la richesse spécifique des parcelles fertilisées avec des boues solides n'est pas significative.

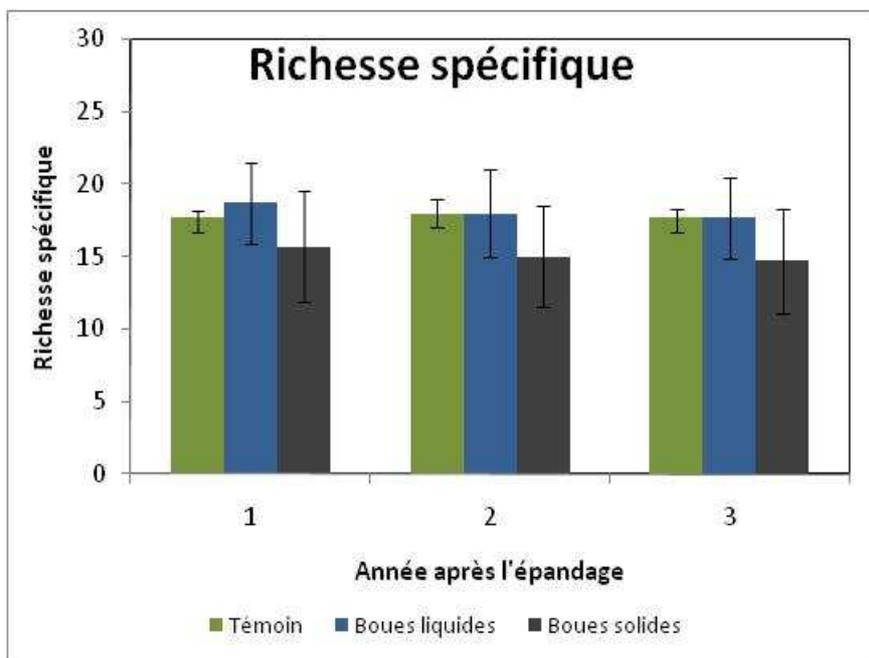


Figure 6 : Effet de l'apport des boues sur la richesse spécifique à Mercey Le Grand.

L'effet de l'apport des boues sur la biodiversité a aussi été analysé par un autre indice phyto-sociologique : l'Indice de similarité.

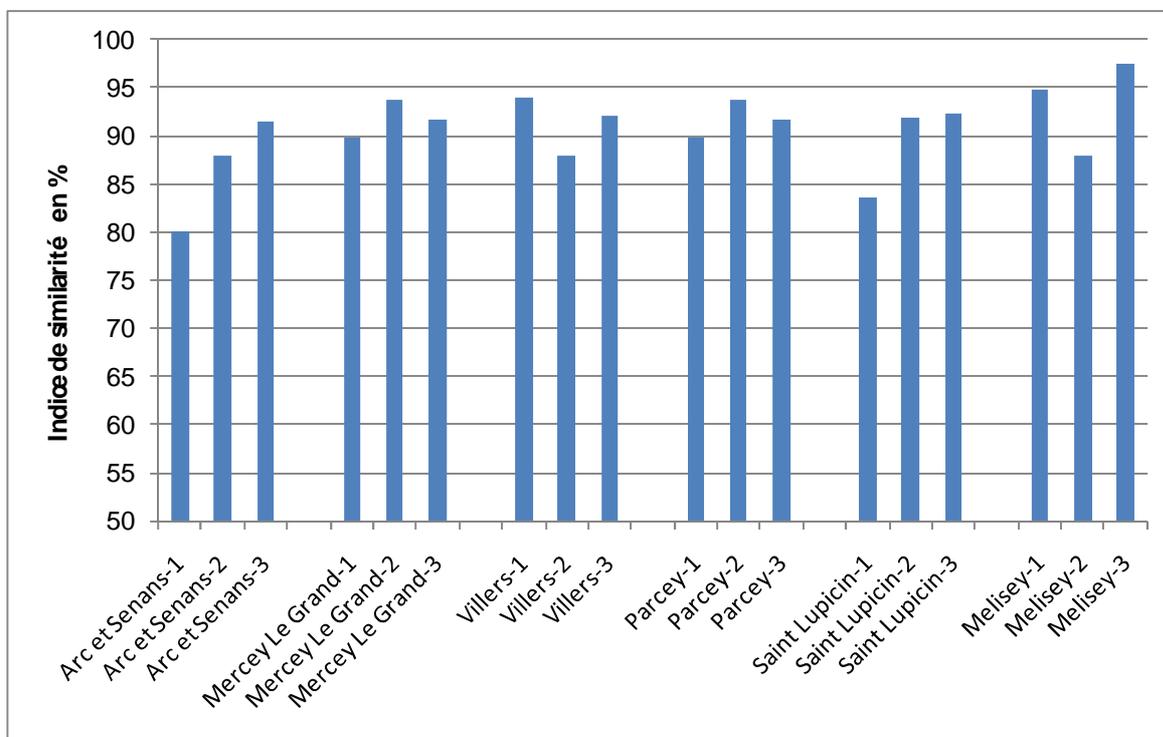


Figure 7 : Evolution de l'indice de similarité après l'épandage des boues

3.5 Effets des apports sur la strate fongique

Le suivi de l'accumulation des ETM par les champignons était prévu l'année 1 et l'année 3 dans tous les sites. Cependant, deux difficultés ont été rencontrées pour ce suivi :

- 1- Absence de quantité suffisante pour les analyses : Lors des deux périodes de prélèvement annuel, nous n'avons pas systématiquement pu récolter des champignons en quantités suffisantes pour les analyses. Dans certains cas, les champignons ont été rencontrés uniquement dans un nombre limité de placette ne permettant pas de faire une comparaison entre le traitement témoin et le traitement fertilisé avec les boues.
- 2- Forte hétérogénéité dans les placettes : La seconde difficulté est la forte hétérogénéité observée entre les placettes d'un même site. En effet, les espèces présentes dans une placette témoin ne sont pas présentes aussi dans les placettes fertilisées avec des boues. De même, dans une modalité, nous avons été confrontés à la même difficulté avec une grande disparité entre les parcelles d'une même modalité.

A titre d'exemple, les tableaux donnent les espèces et le nombre récolté la première et la troisième année dans le site d'Arc-et-Senans.

Tableau 15: Tableau : Typologie des champignons récoltés à Arc et Senans l'année de l'épandage

N° parcelle	4	5	6	1	2	3
Numérotation	As T1	As T2	As T3	As B1	As B2	As B3
	Témoin	Témoin	Témoin	Liquide	Liquide	Liquide
Espèces						
espèce 1 non identifiée de As T1(voir photo)	4					
espèce 2 non identifiée de As T1(voir photo)	2					
galère des mousses	1					
collybie	2	1	5	4	7	
faux-mousson	2					
meunier	3					
bolet		1	1	1	2	
mucidule		5				
lactaire		1				
mycène		28				
piéd bleu				1		
améthyste				1		
agaric				2		
flammules					6	
clitocybe						19
piéd de mouton						1
espèce non identifiée de As B3(voir photo)						4
leotie						2

Tableau 16: Typologie des champignons récoltés à Arc et Senans l'année 3

N° parcelle	4	5	6	1	2	3
Numérotation	As T1	As T2	As T3	As B1	As B2	As B3
	Témoin	Témoin	Témoin	Liquide	Liquide	Liquide
Espèces						
rousselle				1	3	3
bollet	1					
piéd bleu	1					
mycène violet						4
transparent brun					3	

Il en résulte que l'effet de l'épandage des boues sur l'accumulation des ETM par les champignons n'a pas pu être déterminé. Les différences observées entre les parcelles témoins et les parcelles fertilisées avec des boues ne peuvent pas en réalité être attribuées à l'apport des boues. Néanmoins, nous les présentons à titre indicatif. Par ailleurs, dans les sites de Parcey, Saint-Lupicin aucun champignon n'a été observé.

Tableau 17 : Teneurs en ETM dans les champignons

	Cadmium total mg/kg	Chrome total mg/kg	Cuivre total mg/kg	Mercure total mg/kg	Nickel total mg/kg	Plomb total mg/kg	Zinc total mg/kg
boue liquide							
Vsc T1	1,88	1,16	59,4	0,57	3,31	1,36	122
Vsc T2	3,35	1,47	11,2	0,23	2,98	1,19	101
Vsc T3	4,24	1,03	99,6	0,8	2,74	1,99	167
moyenne	3,80	1,22	56,73	0,53	3,01	1,51	130,00
EC	0,63	0,23	44,26	0,29	0,29	0,42	33,72
témoin							
Vsc BL1	1,37	0,7	20,4	0,37	1,84	1,05	117
Vsc BL2	1,58	0,64	13,9	0,38	2,23	0,68	106
Vsc BL3	1,9	0,84	18,1	0,1	1,2	0,55	45,3
moyenne	1,62	0,73	17,47	0,28	1,76	0,76	89,43
EC	0,27	0,10	3,30	0,16	0,52	0,26	38,61

Le tableau montre les teneurs en ETM des champignons récoltés sur le site de Villers, un an après l'épandage. Les différences observées entre les modalités ne peuvent être attribuées à l'effet de l'épandage des boues. Par ailleurs, nous observons aussi une forte hétérogénéité intra-traitement. A titre d'exemple, les teneurs en Cu dans les parcelles fertilisées avec les boues varient de 11,2 à 99,6 mg/kg.

Les tableaux montrent les teneurs en ETM dans les champignons dans les sites d'Arc et Senans, Mercey le Grand et Melisey. De la même manière que dans le site de Villers, les teneurs en ETM dans les champignons récoltés en parcelles fertilisées avec des boues sont supérieures à celles des champignons récoltés dans les parcelles témoins sans que cette augmentation ne soit pas directement liée à l'apport des boues.

Cependant, malgré l'hétérogénéité des espèces rencontrées entre les placettes témoins et les placettes fertilisées avec des boues ainsi que celle observée dans une même modalité, l'épandage des boues semble augmenter les teneurs en ETM dans les champignons. En effet, dans l'hypothèse d'une absence de l'effet des épandages des boues, les teneurs en ETM dans les champignons seraient variables et non systématiquement plus élevées dans les parcelles amendées avec des boues.

Tableau 18: Teneurs en ETM dans les champignons à Arc Et Senans, Mercey Le Grand et Melisey.

	Cadmium total mg/kg	Chrome total mg/kg	Cuivre total mg/kg	Mercure total mg/kg	Nickel total mg/kg	Plomb total mg/kg	Zinc total mg/kg
Arc et Senans							
témoin	0,31	1,39	13,88	0,30	0,72	2,12	118,37
boue liquide	1,23	0,65	25,05	0,53	0,44	2,90	123,65
Mercey le Grand							
témoin	0,22	1,08	19,15	0,37	0,61	1,87	150,30
boue liquide	0,19	0,88	20,23	0,42	0,62	1,99	176,15
boue solide	0,20	0,98	19,69	0,39	0,62	1,93	163,23

	Cd mg/kg	Cr mg/kg	Cu mg/kg	Hg mg/kg	Ni mg/kg	Pb mg/kg	Zn mg/kg
Melisey							
Témoins	2,81	20,70	178,50	1,10	9,37	1,89	44,03
Boues	2,62	14,50	148,00	0,93	9,31	6,92	108,10

Conclusion et perspectives

Les épandages de boues rurales en zones boisées, nécessitent avant toute chose, **une anticipation**, qui passe par une **réflexion sur la gestion des surfaces boisées communales**; cette anticipation nécessite, en plus des critères d'aptitudes des sols à l'épandage classiquement recherchés lors d'épandages de boues en surface agricole, **une adaptation des surfaces boisées potentiellement épandables** pour permettre la réalisation des épandages avec du matériel agricole, classiquement à disposition dans les communes.

Les résultats des différents essais expérimentaux ont montré que l'épandage des boues en parcelles forestières ne présentait aucun effet négatif sur les arbres : **aucun effet de dépérissement n'a été observé sur l'ensemble des sites**.

Pour les ETM, compte tenu des doses apportées, de leurs quantités quantifiables dans les sols, **on peut conclure en l'absence de différence significative entre les placettes témoins et celles ayant reçu un apport de boues**.

Les apports en phosphore et en chaux, seuls éléments, (en plus de l'azote pour 2 sites) présents en quantité suffisante dans les boues pour pouvoir « espérer » un impact au moins dans l'horizon de surface, n'ont finalement montré qu'une très faible augmentation pour le phosphore sur un seul site (St Lupicin). Les autres variations en éléments majeurs ne sont pas explicables par le seul apport de boues, certains (pH, C,N) peuvent trouver une explication par la variabilité morphologique des horizons de surface : **concernant les éléments majeurs, seul le phosphore apporté par les boues, a montré un impact sur les sols** par une augmentation significative ...mais sur un seul site !

Au niveau bénéfique, l'apport des boues a été associé à **une augmentation de la croissance** par rapport aux parcelles non fertilisées **uniquement chez les chênes âgés** à Arc et Senans **et dans le taillis à très courte rotation** de Saint-Lupicin. Dans les autres sites, **aucun effet bénéfique n'a été observé sur la croissance des très jeunes arbres**. Pour les chênes, cette augmentation de la croissance est associée à une amélioration de la nutrition azotée et surtout phosphatée des arbres. Dans les jeunes peuplements, les teneurs en N et P semblent être

suffisantes pour assurer une croissance optimale en fonction des conditions situationnelles.

Néanmoins, *l'apport des boues a augmenté la biomasse de la strate herbacée* au cours des deux années suivant l'épandage. Cette biomasse organique contient une quantité importante d'éléments minéraux qui seront libérés par minéralisation progressivement dans le temps pour soutenir la croissance du peuplement. *Il serait intéressant d'ailleurs de voir l'évolution des teneurs en éléments minéraux des feuilles des arbres quelques années après l'épandage.*

Concernant la strate herbacée, l'apport des boues modifie légèrement sa biodiversité par l'apparition des pieds de tomates dans l'écosystème forestier. Par la suite, les résultats ont montré que *les parcelles amendées avec des boues présentent un état de biodiversité semblable aux parcelles témoins au bout d'un ou de deux ans.* Ceci est certainement en relation avec les faibles doses des boues épandues.

Enfin, concernant *les champignons, les essais n'ont pas permis d'analyser l'effet direct de l'apport des boues sur l'accumulation des ETM* vu les différences des espèces présentes dans les parcelles amendées avec les boues et celles des témoins.

[Annexe 1 : Résultats détaillés des sites du Doubs](#)

[Annexe 2 : Résultats détaillés des sites du Jura](#)

[Annexe 3 : Résultats détaillés du site de Haute Saône](#)

[Annexe 4: Réglementation](#)

