

# Effets environnementaux des épandages de boues de stations d'épuration en plantation de pin maritime

**Mohammed Benbrahim<sup>a</sup>, Laurence Denaix<sup>b</sup>, Jean-Michel Carnus<sup>a</sup>, Jean Timbal<sup>a</sup>, Jean-Claude Chossat<sup>c</sup>, Renault Scheifler<sup>d</sup>, Anne Gomot de Vaufleury<sup>d</sup>, Pierre-Marie Badot<sup>d</sup>, Anne Tricot<sup>e</sup>, Jacques Lolive<sup>e</sup>**

<sup>a</sup> INRA, unité de Recherches forestières, domaine de l'Hermitage, route d'Arcachon, 33610 Gazinet-Cestas  
[benbrahim@pierroton.inra.fr](mailto:benbrahim@pierroton.inra.fr)

<sup>b</sup> UMR INRA-ENITA TCEM, BP 81, 33883 Villenave-d'Ornon cedex

<sup>c</sup> CEMAGREF, URE, 50 av. de Verdun, Gazinet, 33612 Cestas cedex

<sup>d</sup> Université de Franche-Comté, ISTE, place Leclerc, 25030 Besançon cedex

<sup>e</sup> UMR CNRS-UPP SET, campus universitaire, av. du Doyen-Poplawski, 64000 Pau

Les boues de station d'épuration sont constituées de sédiments résiduaux issus des traitements des eaux usées. En France, chaque habitant génère environ 50 g de matières sèches de boues par jour et ces résidus représentent environ 850 000 t de matières sèches par an. Actuellement, 60% des boues de station d'épuration produites en France sont épandues en agriculture alors que 20 à 25% sont mises en décharges et 15 à 20% sont incinérées. L'impact de la politique européenne en matière de traitement des eaux usées se traduit par une augmentation de la production des boues qui dépasserait, en France, un million de tonnes de matières sèches en 2005. Dans ce contexte général d'augmentation des quantités de boues, d'une part, et devant l'abandon progressif de la mise en décharge des déchets non ultimes, d'autre part, on voit difficilement comment la part de l'épandage pourrait diminuer. Cependant, la controverse qui s'est développée au cours des dernières années autour de l'épandage agricole des boues et la qualité des produits alimentaires (Borraz, 2000) font surgir une nouvelle demande sociétale pour mettre en œuvre des épandages de boues de station d'épuration sur des cultures non agroalimentaires. L'utilisation de terrains boisés pour recycler une partie des boues municipales peut alors constituer une alternative aux épandages agricoles tout en préservant les ressources et en augmentant la production du bois (Bastian, 2000).

## Une alternative sylvicole à l'épandage agricole...

L'alternative sylvicole aux épandages agricoles des boues de stations d'épuration a été bien explorée dans certaines situations forestières. Une synthèse générale des travaux scientifiques réalisés dans ce domaine a été réalisée par Cole *et al.*, 1986. Ces différents essais expérimentaux ont montré que les boues de stations d'épurations peuvent être utilisées comme amendements ou fertilisants pour augmenter la production de bois tout en préservant l'écosystème forestier. L'ensemble de ces travaux a permis d'établir des recommandations techniques et des guides de bonne conduite propres à chaque pays.

## Les recherches menées dans le site atelier d'Ychoux

Le « site atelier d'Ychoux » est le premier site (niveau 2) de ce réseau national. Les objectifs principaux des travaux menés dans ce site sont a) d'évaluer les risques pour le milieu - on s'intéresse principalement au suivi de la qualité du sol et à l'évolution des ETM et leur mobilité vers les horizons inférieurs du sol et vers la nappe phréatique - et b) de déterminer les effets des épandages des boues sur la croissance et la nutrition des arbres, la biodiversité du sous-bois et l'accumulation des ETM chez les animaux (escargots). Une étude sociologique a aussi été réalisée pour évaluer l'acceptabilité sociale de l'épandage des boues en forêt cultivée.

Ces expérimentations sont menées dans un peuplement de pin maritime âgé de 8 ans en 2000, au lieu dit « les Serres », dans la forêt communale d'Ychoux (Landes) à environ 60 km au sud-ouest de Bordeaux. C'est une lande mésophile à tendance humide caractérisée par une nappe phréatique qui varie entre 0,5 m et 1,5 m, par une végétation herbacée dominée par la molinie et différentes bruyères et par un climat doux et humide de type océanique. Les précipitations annuelles sont abondantes (850 à 1 000 mm) et la température annuelle moyenne est de 12°C. Le sol varie entre des podzols humo-duriques (O/A/BP) et des podzols meubles (O/A/E/BP) avec un pH assez acide (4 à 4,5 selon la profondeur). Le peuplement est issu d'un semis en lignes espacées de 4 m et de 1,6 m sur la ligne. Le peuplement est assez homogène sur un terrain plat. Avant plantation, le sol a été labouré en bande sur une profondeur de 40 cm et une fertilisation phosphatée ( $P_2O_5$  à 60 kg/ha) a été appliquée avant le semis. En automne 1998, un élagage des arbres et un passage du rouleau landais ont été réalisés pour faciliter les épandages.

Dans ce site, on s'est intéressé aux effets d'apports faibles et réguliers (3 t/ha/an de matière sèche) de différents types de boues sur l'écosystème forestier landais. Deux dispositifs expérimentaux ont été installés pour répondre aux deux objectifs de cette étude. Le premier a été installé en 1999 pour étudier les effets des épandages des boues sur la croissance et la nutrition des arbres ainsi que la biodiversité du sous-bois. Le second a été installé en 2000, dans le cadre d'AGREDE, pour étudier le devenir et la mobilité des éléments minéraux apportés par les boues.

Dans le premier dispositif expérimental, quatre types de boues ont été étudiés (boues liquides, boues pâteuses, boues pâteuses chaulées et boues compostées). L'épandage des boues liquides est réalisé à l'aide d'une tonne à lisier munie d'une rampe de répartition alors que

### L'expertise française en matière d'épandage sylvicole des boues

En France, l'expertise reste limitée à quelques rares essais en Lorraine (Le Tacon *et al.*, 1988) et en région méditerranéenne (Cadillon, 1995). D'autres expérimentations ont été réalisées dans les années 1990 par l'Office national des forêts (Le Gouguec, 1997).

Ces différents auteurs se sont principalement intéressés aux effets des épandages de boues sur la croissance des arbres. Néanmoins, le nombre très limité de ces essais et leur disparité (situation sylvicole, type et dose des boues, âge de plantation....) font apparaître la nécessité de mettre en place un certain nombre d'expérimentations afin d'établir des bilans environnementaux et de tenter de répondre aux questions des sylviculteurs, des producteurs de boues et des législateurs. Ces essais devront prendre en compte une large gamme de boues et être représentatifs des différents scénarios sylvicoles (essences forestières, conditions pédo-climatiques) rencontrés en France.

Dans cet objectif, les ministères de l'Agriculture et de l'Environnement ont chargé, en 1999, un groupe de travail de définir leurs recommandations d'experts. Ce comité technique de pilotage comprend, outre ces deux ministères, les organismes scientifiques et techniques concernés (INRA, CEMAGREF, ONF, AFOCEL, IDF, ADEME). Ce comité a publié, en 2002, un document regroupant les recommandations pour la conception et le suivi d'essais expérimentaux d'épandage de boues en parcelles boisées (Carnus *et al.*, 2002).

Un réseau coordonné, au plan national, de sites expérimentaux sur les épandages de boues en ligniculture se met progressivement en place avec la participation de différents organismes cités ci-dessus. Ce réseau s'appuie sur deux types de sites expérimentaux : d'une part, des sites de niveau 1, à vocation régionale de démonstration, pour lesquels les protocoles de suivis préconisés sont allégés et particulièrement le suivi des solutions de sol ; d'autre part, des sites de niveau 2, à vocation de recherches en environnement, dans lesquels un suivi intensif et multidisciplinaire de l'écosystème forestier est préconisé afin d'établir des bilans environnementaux sur le long terme.

l'épandage des boues pâteuses et des boues compostées est réalisé par un épandeur à fumier à fond mouvant. L'épandage des boues est réalisé une fois tous les deux ans sauf pour les boues liquides qui sont épandues deux fois par an. Le premier épandage a eu lieu en janvier 1999. Dans ce dispositif, les effets de l'apport des boues sur la croissance et la nutrition des arbres ainsi que sur la biodiversité du sous-bois ont été analysés. La croissance des arbres (hauteur totale et diamètre à 1,3 m) est mesurée annuellement. Les accroissements annuels en hauteur et en circonférence ont été calculés à partir des mesures réalisées en 2000 et 2001. La production annuelle du bois (volume du tronc en m<sup>3</sup>/ha/an) a été calculée pour l'année 2001 selon un modèle de croissance de pin maritime établi par Porté *et al.* (2002). Un échantillonnage des aiguilles de pin est réalisé annuellement pour le suivi de la nutrition des arbres. Le suivi de la biodiversité du sous-bois est réalisé annuellement par la méthode de Braun-Blanquet et les indices de biodiversité sont déterminés (Ulrich *et al.*, 1997). Il s'agit de l'indice de richesse spécifique (nombre d'espèces, N) de l'indice de Sorensen (degré de similitude entre deux paysages floristiques).

Dans le deuxième dispositif, adjacent au premier, un dispositif lysimétrique (lysimètres sans tension placés à 20 cm, pluviomètres et piézomètres) a été installé pour le suivi des solutions de sol, de l'eau de la nappe et des pluviolessivats. Seules les boues liquides et les boues compostées sont étudiées dans ce dispositif. Les épandages des boues et du compost sont réalisés manuellement à la dose de 3 t/ha/an de matière sèche. L'échantillonnage des eaux a été réalisé mensuellement pour les solutions de sol et trimestriellement pour l'eau de la nappe depuis mars 2001. Les échantillons sont ensuite analysés pour le pH et les teneurs en azote (N), carbone (C) total, phosphore (P), potassium (K), magnésium (Mg), calcium (Ca), nitrate (NO<sub>3</sub>), ammonium (NH<sub>4</sub>), fer (Fe), cuivre (Cu), zinc (Zn), manganèse (Mn), chrome (Cr), plomb (Pb), cadmium (Cd), nickel (Ni), mercure (Hg) et arsenic (As). La détermination des flux d'éléments vers la nappe nécessite le calcul des volumes de l'eau de drainage. Nous avons utilisé un modèle de bilan hydrique du pin maritime (Loustau et Cochard, 1991 ; Loustau *et al.*, 1992) couplé à un modèle de transfert hydrique dans le sol à 2 couches (Marques *et al.*, 1996). Le flux de transfert mensuel de chaque élément est calculé en multipliant la concentration mesurée par le volume théorique de l'eau drainée. En avril-mai 2001, une expérience a été réalisée dans ce dispositif pour estimer le transfert de certains ETM depuis le sol amendé avec des boues vers des escargots (Petit Gris, *Helix aspersa*). Les escargots (élevés en laboratoire) ont été exposés aux boues liquides et aux boues compostées respectivement pendant 5 et 7 semaines puis leurs poids et les teneurs en Zn, Cu, Cd, Pb et Ni ont été déterminés (Scheifler *et al.*, 2003).

## Apport des éléments minéraux par les épandages de boues

L'épandage de 3 t/ha de matières sèches correspond à un apport d'environ 200, 200, et 45 unités de, respectivement, N, P et K. Le compost apporte légèrement plus de potassium et de phosphore que les boues liquides. Cet épandage apporte aussi l'équivalent de 50 et 380 kg/ha de calcium et 19 et 28 kg/ha de magnésium respectivement pour les boues liquides et le compost. Les quantités de calcium apportées par le compost sont loin d'être négligeables puisqu'elles dépassent le stock initial du sol sur une profondeur de 20 cm. Cet apport massif de calcium par le compost est dû principalement au chaulage des boues avant le compostage.

Mis à part le cuivre et le zinc, les quantités des autres éléments traces métalliques apportées par les boues et le compost sont généralement faibles et ne dépassent pas les 10% du stock initial du sol sur la profondeur de 20 cm.

## Effets des apports de boues sur les caractéristiques physico-chimiques du sol

Les épandages de boues liquides et des boues compostées modifient les caractéristiques physico-chimiques du sol. Les mesures des densités apparentes, réalisés un an après le premier épandage, montrent des valeurs très faibles dans la zone superficielle pour le témoin, puis elles augmentent avec la profondeur. Pour les boues liquides, l'apport de particules tant organiques que minérales semble se concentrer en surface, en faisant croître la densité apparente qui reste stable en profondeur. On observe l'inverse pour les épandages de boues compostées où le bas de l'horizon supérieur voit sa densité apparente augmenter.

Les mesures du pH du sol en surface montrent que l'apport de compost a significativement augmenté le  $pH_{\text{eau}}$  du sol. En effet, le pH du sol dans les placettes amendées avec du compost a augmenté pour atteindre 5,7 contre 4,5 pour le témoin. Les boues liquides ne semblent pas modifier le pH du sol. L'augmentation du pH après épandage de compost est certainement due à l'apport massif du calcium contenu dans le compost. Les mesures de pH et de la densité du sol n'ont pas été réalisées dans les parcelles amendées avec les autres types de boues.

## Lixiviation des éléments minéraux

Les mesures mensuelles des concentrations en éléments dans les eaux drainées vers la nappe et l'utilisation du modèle du bilan hydrique ont permis d'établir un bilan apparent des éléments minéraux dans le dispositif lysimétrique du site d'Ychoux. Les résultats présentés dans ce document concernent la période de mars 2001 à mai 2002. Pendant cette période, un épandage de compost a été réalisé en mars 2001 et trois épandages de boues liquides ont été réalisés, respectivement, en avril 2001, novembre 2001 et avril 2002. La dose d'épandage était la même pour les deux types de boues, à savoir une moyenne de 3 t/ha/an de matière sèche. Les concentrations en Cd, Cr, Hg, As et P sont souvent inférieures aux seuils de quantification des méthodes que nous avons utilisées. En conséquence, pour ces éléments, la détermination des quantités lessivées vers la nappe phréatique ne peut être déterminée avec précision dans cette étude.

*Les nitrates* : les apports d'azote total par l'épandage des boues liquides et des boues compostées (de mars 2001 à juin 2002) sont respectivement de 301 et de 360 kg/ha. En considérant les 20 premiers centimètres du sol, ces apports représentent environ 30% du stock initial en azote total. Les moyennes annuelles du lessivage d'azote nitrique mesuré pendant 14 mois sont de 53,5 et de 21,3 kg/ha/an pour, respectivement, les boues liquides et les boues compostées. La plus grande partie de ce lessivage est observée dans les trois mois qui suivent l'épandage. Néanmoins, les conditions climatiques (pluviométrie et températures) semblent aussi influencer ce lessivage.

*Le potassium et le magnésium* : les épandages des boues liquides et des boues compostées n'apportent que très peu de potassium relativement au stock initial dans le sol (1 à 2 %). Le lessivage mesuré à 20 cm de profondeur est de 8,7 kg/ha/an et 16,8 kg/ha/an respectivement pour les boues liquides et pour les boues compostées, valeurs à comparer aux 4,8 kg/ha/an des témoins. Pour le magnésium, les lessivages mesurés dans les parcelles traitées avec des boues liquides et le compost sont respectivement de 6,9 et de 9,8 kg/ha/an. Dans la parcelle témoin, ce lessivage est de 2,9 kg/ha/an.

*Le calcium* : l'épandage du compost riche en calcium apporte environ 760 kg/ha de calcium, soit le double du stock initial dans le sol (0 à 20 cm de profondeur). Cette grande quantité de calcium est essentiellement due à la nature chaulée des boues compostées. Les boues liquides apportent uniquement 74 kg de calcium. Malgré cet apport massif relativement au stock initial, le lessivage du

calcium dans la parcelle amendée avec du compost ne dépasse pas les 23,5 kg/ha/an comparé à 5 kg/ha/an dans la parcelle témoin. Dans la parcelle amendée avec des boues liquides, le lessivage du calcium est de 14,6 kg/ha/an.

*Le cuivre et le zinc* : l'apport de ces deux éléments par l'épandage du compost a doublé les stocks initiaux dans la couche 0 à 20 cm. Cependant, le lessivage du cuivre ne semble pas affecté par l'épandage des boues. En effet, pour les boues liquides et les boues compostées, nous avons mesuré un lessivage du cuivre de 63,7 et de 84 g/ha/an respectivement alors que le lessivage dans la parcelle témoin est de 88,6 g/ha/an. Pour le zinc, le lessivage mesuré dans les parcelles traitées avec des boues (214 g/ha/an pour le compost et 207 g/ha/an pour les boues liquides) est même inférieur à celui observé dans la parcelle témoin (368 g/ha/an). On peut supposer que la matière organique des boues retient le zinc en surface du sol. Des mesures complémentaires (matière colloïdale, mobilité du zinc selon le pH, matière organique...) peuvent apporter quelques éléments pour mieux comprendre ce transfert.

*Le manganèse, le nickel et le plomb* : pour le manganèse, les apports par les boues compostées et les boues liquides sont respectivement de 0,8% et 7,9% du stock initial (couche de 0 à 20 cm de profondeur). Le lessivage du manganèse dans la parcelle amendée avec le compost est en moyenne de 93 g/ha/an contre 36 g/ha/an dans la parcelle témoin et 60,4 g/ha/an dans la parcelle traitée avec des boues liquides. Le lessivage du nickel montre des résultats analogues avec ceux du cuivre et du zinc. En effet, le lessivage annuel du nickel dans les deux parcelles amendées avec des boues est identique à celui de la parcelle témoin (environ 5 g/ha/an). Les apports de plomb par les boues compostées et les boues liquides représentent respectivement 8,3 et 1,8 % du stock initial dans le sol (couche de 0 à 20 cm). Les lessivages mesurés dans la parcelle témoin, la parcelle amendée avec des boues liquides et celle amendée avec le compost sont respectivement de 7,5 g/ha/an, 7,4 g/ha/an et 13,6 g/ha/an.

Le tableau I (ci-dessous) donne un résumé des bilans apparents mesurés de mars 2001 à mai 2002.

Tableau I. Bilans apparents des éléments minéraux mesurés pendant 14 mois (mars 2001 à mai 2002) dans le dispositif lysimétrique

	Stock <sup>1</sup>	Apports			Lessivage <sup>2</sup>		
		Atmosphériques	Boues liquides <sup>3</sup>	Compost	Témoins	Boues liquides	Compost
----- kg/ha -----							
N	1 085	10,8	301	360	7,5	62,4	24,8
P	5 443	3,2	55,4	106,9	5,6	10,1	19,6
Mg	324	3,8	27,8	55,6	3,5	8,0	11,5
Ca	324	6,5	73,8	765	5,9	17,1	27,5
----- g/ha -----							
Cu	3 240	21,8	1 021	2 951	88,5	74,4	80,0
Zn	7 060	265	3 168	6 624	429,6	242	250
Mn	58 090	95	459	4 566	43	70,5	108,4
Ni	3 240	5,6	85	592	6,4	4,7	5,2
Pb	9 330	12,9	169	777	8,7	8,7	15,9

<sup>1</sup> Stock mesuré dans la couche supérieure du sol (0-20 cm de profondeur).

<sup>2</sup> Lessivage mesuré à 20 cm de profondeur de mars 2001 à mai 2002. Le lessivage d'azote est exprimé en kg de nitrate (NO<sub>3</sub>) par hectare.

<sup>3</sup> Apports calculés pour les 3 épandages réalisés.

## Effets des épandages des boues sur l'eau de la nappe

Les teneurs en éléments minéraux dans l'eau de la nappe ont été déterminées trimestriellement de mars 2001 à mars 2002. Les résultats n'ont montré aucune différence significative entre la parcelle témoin et les parcelles amendées avec des boues liquides ou du compost. Cependant, pour les nitrates, une grande hétérogénéité a été observée dans la parcelle amendée avec du compost. De ce fait, nous ne pouvons pas conclure avec précision sur la contamination de l'eau de la nappe par les nitrates après épandage de compost. Les analyses prévues en 2003 permettront de mieux évaluer cet impact.

## Effets des épandages de boues sur le peuplement forestier

Deux ans après le premier épandage, aucune différence significative n'a été observée dans les placettes amendées avec des boues comparées aux parcelles témoins. Cependant, les mesures réalisées pendant la troisième année ont montré un effet bénéfique de l'épandage des boues liquides à la fois sur la hauteur totale des arbres et sur la circonférence à 1,3 m. En effet, les arbres amendés avec des boues liquides sont 16% plus hauts et 22% plus gros de tronc que les arbres des parcelles témoins. Cette augmentation se traduit par une production annuelle de bois d'environ 9,5 m<sup>3</sup>/ha/an dans les parcelles amendées par des boues liquides contre 8,6 m<sup>3</sup>/ha/an chez les témoins. Les autres types de boue n'ont pas affecté la croissance des arbres ni en diamètre ni en hauteur. Il est invraisemblable que l'effet bénéfique des boues liquides soit dû à la quantité d'eau apportée par ce type de boues. En effet, l'épandage annuel de 3 tonnes de boues liquides à 2,7% de matière sèche se traduit par un apport d'environ 11 mm d'eau soit environ 1,2% de la pluviométrie annuelle. Cependant, les différences des teneurs et de la biodisponibilité en éléments nutritifs entre les différents types de boue pourraient expliquer les différences observées.

L'augmentation de la croissance des pins maritimes observée après épandage des boues liquides est sûrement due à une amélioration de la nutrition minérale des arbres. Les épandages de boues (particulièrement les boues liquides) ont augmenté les teneurs en azote et en phosphore des aiguilles significativement et d'une façon identique à celle observée après une fertilisation N-P-K.

## Effets de l'épandage des boues sur le sous-bois

La biomasse du sous-bois dans les parcelles témoins ne dépasse pas 1 t/ha de matière sèche alors qu'elle avoisine les 3 t/ha de matière sèche dans les parcelles ayant reçu des boues liquides. La biomasse du sous-bois dans les parcelles épandues avec du compost est d'environ 1,5 t/ha de matière sèche. Nous n'avons pas mesuré la biomasse du sous-bois dans les parcelles traitées avec des boues déshydratées (chaulées et non chaulées). Néanmoins, on peut dire, suite aux observations réalisées lors de l'étude sur la biodiversité, que dans ces traitements l'expansion du sous-bois est analogue à celle observée pour les boues liquides.

Le sous-bois est caractérisé par une flore des landes mésophylles à tendance humide. Les espèces les plus représentées sont la molinie bleue (*Molinia caerulea*), l'ajonc d'Europe (*Ulex europaeus*), *Agrostis curtisii* et les bruyères (*Erica cinerea*, *Erica scoparia*). Les observations réalisées en 2000 n'ont pas montré de différences significatives entre le nombre d'espèces présentes dans les parcelles témoins et les autres parcelles malgré une légère augmentation de cette richesse spécifique pour le compost et les boues chaulées. Cette tendance s'est accentuée en 2001, où on a observé une dizaine de nouvelles espèces dans les parcelles ayant reçu des boues chaulées ou des boues compostées.

Ces différences peuvent être expliquées par le pH basique des boues chaulées et la présence de semences de certaines espèces dans le compost. Cette modification de la flore du sous-bois peut induire à long terme des changements de pH du sol (augmentation) avec, en conséquence, une amélioration de la fertilité du sol.

L'indice de similitude de Sorensen qui permet de comparer le paysage floristique entre deux parcelles, est calculé par le rapport entre le nombre d'espèces communes et la somme des espèces spécifiques à chaque parcelle. Exprimé en pourcentage, il permet d'évaluer les changements dans le paysage floristique à long terme. En 2000, on constate que, globalement, la flore des parcelles traitées possède un indice moyen de similitude voisin de 80% avec celle du témoin. Cette valeur est de l'ordre de 65% en 2001. On assiste donc à un début de changement dans la richesse floristique dû principalement à l'apparition de nouvelles espèces dans les parcelles traitées par les boues comme *Chenopodium album*, *Conyza canadensis*, *Phytollaca americana*. Néanmoins, ces nouvelles espèces sont généralement présentes avec des faibles recouvrements ne dépassant pas les 2%.

### **Effet des épandages de boues sur l'accumulation des éléments traces métalliques dans les champignons**

Les teneurs en éléments traces métalliques dans les champignons comestibles ont été déterminées dans le dispositif factoriel en bloc complet. Les champignons ont été récoltés en novembre 2001. Les résultats montrent que les teneurs en cuivre, zinc, cadmium, mercure et sélénium ne sont pas affectés par les épandages de boues. Cependant, les teneurs en plomb dans les champignons récoltés dans la parcelle amendée avec des boues liquides sont significativement supérieures aux autres traitements. On observe aussi une augmentation de l'hétérogénéité dans ce traitement. Cette augmentation spécifique aux boues liquides peut être due à la nature et aux quantités des matières organiques apportées par ces boues. Néanmoins, ces teneurs en plomb dans les champignons récoltés dans les parcelles amendées avec des boues liquides sont dans la gamme des teneurs en Pb mesurées dans des champignons récoltés, à l'état naturel, dans d'autres forêts de pin maritime dans les Landes de Gascogne.

### **Effet des épandages de boues sur l'accumulation des éléments traces métalliques dans les escargots**

Les escargots ont été utilisés pour évaluer le transfert de Cd, Cu, Ni, Pb et Zn du sol vers l'animal (Scheifleir *et al.*, 2003). Les résultats ont montré une augmentation significative des teneurs en Zn après, respectivement, 5 semaines d'exposition aux boues liquides et 7 semaines d'exposition au compost. Cette tendance est moins évidente pour les autres types d'éléments traces métalliques. Les teneurs en Zn et en Cd observées chez les escargots exposés aux boues ou au compost ne semblent pas présenter des risques pour l'Homme. D'autres études sont nécessaires pour évaluer l'accumulation des ETM chez d'autres espèces animales vivant en forêt.

### **Acceptabilité sociale de l'épandage des boues en plantation de pin maritime**

La controverse nationale sur l'épandage de boues d'épuration s'est poursuivie localement, dans un climat de méfiance généralisée. L'enjeu de l'expérimentation est de rompre avec cette méfiance, en

définissant et maîtrisant les risques possibles et en proposant des modalités d'utilisation des épandages de boues en forêt. Dans le cadre de l'étude, nous sommes particulièrement intéressés à la production de la confiance en univers controversé et, afin de rendre compte des questions posées au cours de la démarche, nous avons utilisé les notions de forum : le premier forum rassemble les acteurs officiels (administratifs, scientifiques, techniciens, élus), le second les acteurs officieux (associations, propriétaires forestiers). Nous retrouvons, par exemple, les acteurs officiels dans le cadre du comité de pilotage assurant le suivi de l'expérimentation. Ce comité de pilotage est pris en charge par les services de la Direction départementale de l'agriculture et de la forêt (DDAF) des Landes au sein d'une mission interservice de l'eau (MISE). Les terrains expérimentaux font l'objet de visites commentées auprès des propriétaires forestiers par l'intermédiaire d'organismes associatifs tels que le Centre technique des études forestières (CETEF) (compléments de l'expérimentation, ils servent à la démonstration également). Par ailleurs, ces différentes actions font l'objet de discussions externes, suscitant la circulation de documents, notes diverses : en d'autres termes ces actions font l'objet d'une attention, de questionnements de la part d'acteurs non prévus initialement dans la démarche, ce sont les acteurs officieux.

Ainsi, deux forums semblent se constituer autour de l'expérimentation : un forum officiel et un forum officieux. Le forum officiel définit les problèmes, les enjeux et les solutions en cercle fermé (les scientifiques représentants de l'INRA, CEMAGREF, ONF et les administratifs réunis autour de la MISE). Le forum officieux est constitué des acteurs tenus jusqu'ici à distance du processus. Le forum officieux est le contrepoint du forum officiel, il est un espace de discussion des acteurs non prévus dans le dispositif expérimental. Entre ces deux espaces, existent d'autres espaces, forums intermédiaires, qui peuvent jouer le rôle de passeurs ou de traducteurs entre ces deux polarités.

Pour le forum officiel, un consensus semble se dégager en faveur d'une solution pour les communes rurales forestières : l'épandage de boues liquides. Les boues compostées pourraient présenter une alternative pour les grosses communes. Les boues déshydratées telles qu'elles se présentent actuellement ne semblent pas convenir à un épandage en forêt. Cependant, des questions se posent encore en terme de faisabilité technique (matériel adapté pour la forêt, disparité des boues...). Le format local (d'acceptation des boues) a une composante relationnelle, la proximité étant anthropologique. La confiance s'établit au cours de la démarche. Elle n'est pas située en aval du processus : elle n'est pas séquentielle, la confiance se fabrique en même temps que la recherche, l'exploration des risques. Le format local des boues comporte également une dimension géographique, territoriale qu'on ne peut détacher de la dimension sociale ou anthropologique. D'une part, les boues liquides épandues proviennent de la station d'épuration d'Ychoux, l'acceptation de la commune d'Ychoux pourrait être limitée à l'épandage de ses propres boues sur ses propres terrains forestiers (solution locale). D'autre part, la surface est faible par rapport à la superficie de la forêt communale (2 000 ha). La taille modeste du projet expérimental a concouru à l'acceptation initiale de la démarche ; de plus, si l'épandage devait se généraliser aux communes parties prenantes, la surface dont elles disposent permettrait une utilisation assez peu contraignante de l'épandage. Enfin, les dosages de boues épandues pour les besoins de l'expérimentation sont calés sur les besoins agronomiques des arbres.

Le forum officieux est constitué de plusieurs instances : celles qui regroupent les forestiers (CETEF, Centre régional de la propriété forestière, CRPF) avec des différents degrés d'institutionnalisation dans ces instances et les associations environnementales telles France Nature Environnement (FNE) et, localement, la Fédération des sociétés pour l'étude, la protection et l'aménagement de la nature dans le Sud-Ouest. Loin de s'opposer à la première instance, elle est son complément nécessaire pour la détection de problèmes qui peuvent ensuite être identifiés. Le CETEF (association 1901, parrainée par la Compagnie forestière de Gascogne) s'intéresse de près à l'expérimentation. Durant les années 1970, le CETEF va préconiser l'épandage d'engrais en forêt afin d'améliorer la productivité. Le CETEF joue un rôle de vulgarisateur, de diffuseur des techniques expérimentales auprès des propriétaires forestiers



privés. Il a un rôle d'intermédiaire, de passeur entre administrations, organismes de recherche, propriétaires forestiers, entreprises forestières. Les réunions qu'il organise sur le site expérimental sont l'occasion de mobiliser son réseau, ses liens avec des administrations (DDAF, ONF) et les organismes de recherche. Néanmoins, plusieurs questions (craintes) se posent encore pour le CETEF (impact du changement de la flore, qualité du bois et notamment l'éventuelle présence des métaux lourds dans le bois destiné à l'emballage, l'écocertification...). Le CRPF est une association publique, indépendante et obligatoire, chargée du développement de la forêt privée. Il se présente comme l'équivalent d'une chambre d'agriculture pour la forêt. L'attitude du CRPF semble beaucoup plus réticente (que le CETEF plus attentiste) vis-à-vis de l'épandage en forêt. « Au niveau du CRPF, la consigne actuelle est de ne pas épandre ». Cette réticence s'exprime selon plusieurs modalités (locales et non locales) où l'on retrouve l'inversion de la flore, l'écocertification, la présence de champignons qui peuvent attaquer le pin à proximité de dépôts de carottes. Le problème posé ne serait pas davantage l'expérimentation que la généralisation de l'épandage en milieu forestier. Ce début d'alerte déterritorialisée est très marqué dans les positions prises par FNE opposant le PEFC (Programme européen des forêts certifiées) et l'épandage en forêt.

Le forum officieux pourrait s'organiser comme un forum de l'attention et de la vigilance qui produit un début d'alerte locale avec extension déterritorialisée. Le forum officiel semble davantage se configurer comme un forum de la preuve. Pour les besoins de l'étude, nous les avons séparés, opposés peut-être de manière idéale : cette limite pourrait en fait s'avérer beaucoup plus poreuse. Si l'on se réfère à la gouvernance actuelle des situations de risques (potentiels), il est fort à parier que ces deux forums se rapprochent dans l'avenir. Il faut alors repérer les questions posées de part et d'autre. L'analyse de l'acceptabilité sociale des épandages de boues en forêt ne peut que décrire des débuts de controverses, sans pour autant pouvoir tirer des conclusions définitives. En effet, dans le cas du site atelier d'Ychoux, les échelles spatiales et temporelles sont très particulières : l'expérimentation est menée sur une petite surface forestière et dans une durée très courte par rapport à la vie d'un peuplement forestier. De plus, cette analyse n'a pris en compte que les acteurs directement liés à la forêt. Il est donc indispensable de suivre l'évolution de cette controverse à l'échelle locale et d'analyser d'autres cas d'épandage de boues en parcelle boisée.

## En conclusion

L'objectif de cette étude est de déterminer l'impact, à moyen et long terme, des épandages réguliers et en faibles quantités de boues sur l'écosystème forestier dans un jeune peuplement de pin maritime. Cette étude, multidisciplinaire, est actuellement en cours et les résultats présentés dans cet article ne sont que préliminaires. L'ensemble des résultats obtenus dans cette étude sera publié dans des revues scientifiques.

Les premiers résultats montrent que les épandages de boues améliorent la nutrition minérale des arbres, notamment pour le phosphore. L'augmentation des teneurs en P foliaire avoisine les 60% suite aux épandages de boues liquides. La nutrition en azote est aussi améliorée mais cette réponse positive n'intervient que la troisième année qui suit l'épandage. Les autres types de boue affectent uniquement la nutrition phosphatée. Néanmoins, seules les boues liquides augmentent la croissance des arbres avec un effet à la fois sur la circonférence et la hauteur totale. La production annuelle du bois de tronc a augmenté de 10% après épandage de boues liquides. Cependant, ces résultats ne sont calculés que sur une année de production et le suivi régulier de cette expérimentation est nécessaire pour conclure sur un éventuel effet bénéfique pour la production.

L'effet le plus spectaculaire de ces épandages est certainement celui observé sur la biomasse du sous-bois avec une augmentation de 298% et de 150%, respectivement, après l'épandage des boues liquides

et de compost. En terme de biodiversité, les apports de boues augmentent la richesse spécifique, particulièrement dans le cas du compost et des boues chaulées. On assiste aussi à un début de changement du paysage floristique avec l'apparition de nouvelles espèces. Néanmoins, on peut dire que les espèces dominantes de la flore locale n'ont pas été qualitativement affectées.

Au niveau du sol, l'épandage de compost provoque une augmentation significative du pH de la surface du sol et une légère diminution de la perméabilité de surface. Ces deux paramètres ne sont pas affectés par les apports de boues liquides. Par contre, les deux types d'amendement diminuent la porosité du sol. Les épandages de boues apportent de grandes quantités d'éléments minéraux comparativement aux stocks initiaux dans le sol et aux apports atmosphériques. Les quantités de ces éléments qui ont traversé la couche de 0 à 20 cm sont très faibles et indiquent une accumulation dans cette couche voir même en surface. Dans cette expérimentation les teneurs en As, Cd, Hg, Mn et Cr sont inférieures aux seuils analytiques et leur « bilan » n'a pu être déterminé. Pour les autres éléments traces métalliques, le lessivage dépend à la fois des quantités apportées, du type de boue et de l'élément en question. Ce lessivage est observé principalement dans les deux mois qui suivent l'épandage de printemps. Une deuxième phase de lessivage est observée en automne avec les périodes pluvieuses qui suivent l'été.

L'utilisation du Petit Gris comme bio-indicateur a montré qu'une accumulation de certains ETM (Zn) chez cet escargot peut être détectée après épandage de boues en forêt. La poursuite des études sur les animaux est donc importante dans un contexte forestier (gibier...). Les analyses des ETM dans les champignons ont montré une augmentation des teneurs en plomb dans les champignons récoltés dans les parcelles amendées avec des boues liquides, mais que ces teneurs restent dans la gamme de ceux observés dans d'autres forêts naturelles de pin maritime ■

Ce document présente les résultats préliminaires obtenus sur le site atelier d'Ychoux (Landes) après une année de fonctionnement. La première phase du programme de recherche initiée dans le cadre d'AGREDE en 2000 avec la participation financière d'ANJOU RECHERCHE VIVENDI WATER s'achèvera en juillet 2003 par la diffusion d'un rapport final.

## Références bibliographiques

- BASTIAN R.K., 2000. Seeing the future through the eyes of the past. In *The Forest Alternative for Treatment and Utilisation of Municipal and Industrial Wastes*. University of Washington Press, Seattle, WA, USA, 582 p.
- BORRAZ O., 2000. L'utilisation des boues d'épuration en agriculture : les ressorts d'une controverse. *Le Courrier de l'environnement de l'INRA*, 41, 25-32.
- CADILLON M., 1995. La valorisation de boues de stations d'épuration pour le reboisement en contexte méditerranéen : les principaux enseignements des expérimentations menées par la Société du Canal de Provence. *Les Boues de stations d'épuration urbaines*. ENGREF-CEMAGREF, Paris, 251-267.
- CARNUS J.M., RANGER J., CHAUSSOD R., TERCÉ M., BAILLY A., CHOSSAT J.C., CHARNET F., PILLARD-LANDEAU B., FEIX I., BONZOM J.M., 2002. *Épandages expérimentaux de boues sur parcelles boisées. Recommandations pour la conception et le suivi de dispositifs expérimentaux*. INRA, Bordeaux, 53 p.
- LE GOUGUEC P., 1997. Épandage des boues de stations d'épuration en forêt. *Épandage des boues résiduaires ; aspects sanitaires et environnementaux*. Journées techniques ADEME, 5-6 juin 1997, ADEME, Angers, 143-144.
- COLE, D.W., HENRY C.L., NUTTER W.L., 1986. *The Forest Alternative for Treatment and Utilisation of Municipal and Industrial Wastes*. University of Washington Press, Seattle, WA, USA, 582 p.
- LE TACON F., BOUCHARD D., GARBAYE J., 1988. Augmentation de la croissance initiale du Frêne (*Fraxinus excelsior L.*) par l'épandage de boues de station d'épuration urbaine et plantation intercalaire d'Aulne blanc (*Alnus Incana L.Moench*). *Revue Forestière Française*, XL(2), 117-125.
- LOUSTAU D., COCHARD H., 1991. Utilisation d'une chambre de transpiration portable pour l'estimation de l'évapotranspiration du sous-bois de pin maritime. *Annales des Sciences Forestières*, 48, 29-45.

- LOUSTAU D., BERBEGIER P., GRANIER A., 1992. Interception, throughfall and stemflow in a maritime pine stand. II. An application of the Gash's model. *Journal of Hydrology*, 138, 469-485.
- MARQUES R., RANGER J., VILLETTE S., GRANIER A., 1996. Nutrient dynamics in a chronosequence of douglas fir stands on the Beaujolais Mounts. 2 Quantitative approach. *Forest Ecology and Management*, 92(1-3), 167-197.
- PORTÉ A., TRICHET P., BERT D., LOUSTAU D., 2002. Allometric relationships for branch and tree woody biomass of maritime pine. *Forest Ecology and Management*, 158, 71-83.
- SCHEIFLER R., BENBRAHIM M., GOMOT de VAUFLEURY A., CARNUS J.M., BADOT P.M., 2003. A field method using microcosms to evaluate transfer of Cd, Cu, Ni, Pb and Zn from sewage sludge amended forest soils to *Helix aspera* snails. *Environmental Pollution*, 122(3), 343-350.
- ULRICH E., DOBREMEZ J.F., CAMARET S., BOURJOT L., BRETHERS A., COQUILLARD P., DUME G., DIPOUEY J.L., FORFERARD F., GAUBERVILLE C., GUEUGNOT J., PICARD J.F., SAVOIE J.M., SCHMITT A., TIMBAL J., TREMOLIERES M., 1997. RENECOFOR. *Inventaire et interprétation de la composition floristique de 101 peuplements du réseau*. Office national des forêts, département des recherches techniques, Fontainebleau, 513 p.



