

# Etude de la Phytoremédiation d'une décharge pour l'industrie du bois

excitinasolutions  
excitingscience

Avril - Septembre 2003

Par Benoît CHANCEREL  
ESIGEC Génie de l'Environnement  
Promotion 2003

Sous la direction du Dr Brett ROBINSON  
(HortResearch, Palmerston North, **Nouvelle Zélande**)

Et du Pr Gérard BLAKE  
(ESIGEC, Chambéry, **France**)

# Etude de la Phytoremédiation d'une décharge pour l'industrie du bois

Auteur : Benoît Chancerel

HortResearch

Palmerston North

Nouvelle Zélande

Superviseur: Dr Brett Robinson

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier particulièrement Mr Brett Robinson pour son impeccable supervision, et ce dans la bonne humeur tout au long de ce stage ; mais également pour m'avoir enseigné l'anglais « pratique et utile » ! Merci de m'avoir permis et encouragé à découvrir ce pays magnifique.

Mes remerciements vont également à l'ensemble de la sympathique équipe « Environment et Risk Management » du centre HortResearch de Palmerston North. Dont Brent Clothier, le manager, pour son accueil au sein de son team. Carlo van den Dijssel pour avoir pris soin de mes expériences pendant mon absence et également pour ces bons moments lors des stages de terrains, dont nos discussions en allemands avec Brett ! Steve Green pour ses conseils et les données des lysimètres.

Siva Sivakumaran pour ses cartes qui m'ont évité de me perdre au fin fond de l'île du sud. Mais je n'oublie pas également tous les autres membres de l'équipe qui ont rendu ce séjour agréable.

Je remercie les acteurs français qui m'ont rendu ce stage possible, notamment la région Rhône-Alpes pour son financement et l'ESIGEC dont Mr Gérard Blake en tant que parrain de ce stage.

Mais surtout mes pensées vont à mes parents et à ma sœur pour leur soutien : ainsi qu'à la promotion GE 2003, d'autres amis de l'ESIGEC et à Aurélie, Aurore, Cyprien, Corentin, Nicolas pour leurs nouvelles régulières. Merci également pour les bons moments passés à « chatter » avec Sandrine, Christelle, Céline, Astrid, Camille, Anne, Julien et Thibault.

Merci également aux personnes que j'ai rencontré ici en Nouvelle Zélande dont les stagiaires français : Christophe, Doris, Julien, Gwladys, Sylvain, Françoise ainsi que les autres Vincent, Mike, Pokémon, Dion... et mes « flatmates » : Brent, Amanda, Emmaleen ; qui ont rendu cette expérience d'autant plus inoubliable.

Encore merci Brett pour cet encadrement sans failles à la néo-zélandaise, sachant allier travail et loisirs !

## ABSTRACT

Plants pump large amount of water, solutes, and organic matter as part of their normal physiological processes. This pumping action can be exploited to improve degraded environments by stabilising, removing or breaking-down contaminants.

These technologies, described as phytoremediation, offer the possibility of a low-cost cleanup and a long-term solution.

A sawdust pile at Kopu (North Island, New Zealand), where sawdust and yard-scrappings have been dumped for 30 years, is contaminated by heavy metals. As the pile was leaching unacceptable amount of boron into local waterways, the local forestry company responsible for the site, was ordered by the regional council to remediate it. HortResearch was contracted to implement phytoremediation on the Kopu sawdust pile in order to mitigate boron leaching.

In July 2000, the Environment and Risk Management group at HortResearch initiated the site phytoremediation by planting 3 ha of the pile with 3000 poplar, willow and eucalyptus trees, with the aim on reducing the negative environmental impact caused by leaching. In July 2001 and 2002, after a selection of the best performing varieties. A further 8000 trees were planted over the remainder of the pile.

Parallel scientific experiments were carried out at HortResearch, Palmerston North. Eight lysimeters were filled with sawdust from Kopu and a tree planted in each one to elucidate the mechanisms of water and contaminant movement. These experiments demonstrated that poplars accumulate high concentrations of boron while limiting leaching. In this case, the boron level in the leachate fell below both the New Zealand Drinking Water Standard (NZDWS) and the appropriate Australia-New Zealand Environment and Conservation Council's (ANZECC) level.

After only 3 years of growth, the trees at Kopu had a significant impact on leaching. In particular, they will provide a good leaching control at low flow times when leaching could increase boron levels in streams to above the NZDWS. Also at present, the trees at Kopu are limiting the level of boron entering local waterways.

The re-release of boron from leaves and its impact on the leachability of boron have also been investigated. The re-release of boron by the leaves dropped in autumn do not release boron during the winter months. Alternatively coppicing the trees would remove the boron from the site. Therefore, a coppicing strategy has been developed that optimises the removal of mobile boron from the site while still limiting leaching.

Phytoremediation has captured a high level of public and scientific interest, as they potentially offer a « green » and environmentally friendly alternative to the traditional decontamination and management of polluted land.

Moreover, the results of these experiments allow us to predict, with confidence, the effectiveness of phytoremediation on Kopu and a variety of other contaminated sites.

Key words: phytoremediation, heavy metals, lysimeters, phytoextraction, phytostabilisation, boron, leachate, modelling, hyper accumulator.

# SOMMAIRE

<b>TABLE DES MATIERES.....</b>	<b>7</b>
<b>TABLE DES ILLUSTRATIONS.....</b>	<b>8</b>
<b>TABLE DES ANNEXES.....</b>	<b>13</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>68</b>



# TABLE DES MATIERES

<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>14</b>
<b>I. GENERALITES.....</b>	<b>15</b>
I.1. PHYTOREMEDIATION .....	15
I.1.a. Principe.....	15
I.1.b. Différents types de phytoremédiation .....	15
I.1.c. Avantages et inconvénients .....	17
I.2. LES CONTAMINANTS .....	19
I.2.a. Le Bore.....	20
I.2.b. Absorption des métaux lourds par les plantes .....	23
<b>II. ETUDE DE CAS .....</b>	<b>26</b>
II.1. PROBLEMATIQUE .....	26
II.1.a. Site de Kopu .....	26
II.1.b. Le problème .....	28
II.2. METHODOLOGIE .....	29
II.2.a. Etude sur Kopu .....	29
II.2.b. Lysimètres .....	31
II.2.c. Expériences complémentaires.....	32
II.2.d. Echantillonnage et préparation des échantillons .....	34
<b>III. RESULTATS ET DISCUSSIONS.....</b>	<b>37</b>
III.1. RESULTATS .....	37
III.1.a. Evolutions constatées à Kopu .....	37
III.1.b. Lysimètres .....	40
III.1.c. Colonnes sciures .....	50
III.1.d. Colonnes feuilles.....	55
III.2. BILAN ET PERSPECTIVES .....	59
III.2.a. Mise en relation des différentes expérimentations.....	59
III.2.b. Gestion .....	61
III.2.c. Revalorisation du végétal .....	64
<b>CONCLUSION .....</b>	<b>67</b>

# TABLE DES ILLUSTRATIONS

## Illustrations et Graphiques:

<b>FIGURE 1</b> .....	<b>21</b>
DE HAUT EN BAS, USINE DE TRAITEMENT DU BOIS, ENTASSEMENT DU BOIS ET DE CES DECHETS, DECHARGE OU SONT ACCUMULES LES DECHETS DU BOIS.....	21
<b>FIGURE 2</b> .....	<b>25</b>
COMPORTEMENTS THEORIQUES DES PLANTES DANS LES SOLS RICHE EN ELEMENTS NON- ESSENTIELS (BAKER, 1981) MODIFIE.....	25
<b>FIGURE 3</b> .....	<b>27</b>
SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA DECHARGE POUR L'INDUSTRIE DU BOIS DE KOPU. ....	27
<b>FIGURE 4</b> .....	<b>28</b>
EAUX DE LESSIVAGE ISSUS DE LA DECHARGE (GAUCHE) ET SUBSTRAT COMPLETEMENT SATURE EN EAU (DROITE).....	28
<b>FIGURE 5</b> .....	<b>30</b>
PLAN D'ORGANISATION DU SITE DE KOPU.....	30
<b>FIGURE 6</b> .....	<b>32</b>
LES LYSIMETRES DANS LES SERRES DE HORTRESEARCH.....	32
<b>FIGURE 7</b> .....	<b>33</b>
COLONNES REMPLIES DE SCIURES POUR LE TEST DE LESSIVAGE DU BORE. ....	33
<b>FIGURE 8</b> .....	<b>34</b>
COLONNES DE FEUILLES POUR L'EXPERIENCE DU RELARGAGE DU BORE. ....	34
<b>FIGURE 9</b> .....	<b>36</b>
PREPARATION DES ECHANTILLONS DE SOL (GAUCHE), ET MINERALISATION DES ECHANTILLONS (DROITE).....	36
<b>FIGURE 10</b> .....	<b>37</b>
EVOLUTION DE LA COUVERTURE VEGETALE A KOPU. ....	37

<b>FIGURE 11</b> .....	<b>38</b>
EVOLUTION DE LA BIOMASSE DE TROIS PEUPLIERS SELECTIONNES POUR LA PHYTOREMEDIATION DU SITE DE KOPU. ....	38
<b>FIGURE 12</b> .....	<b>39</b>
COUCHE D'HUMUS (DROITE) ET SES VERS DE TERRE (GAUCHE).....	39
<b>FIGURE 13</b> .....	<b>40</b>
EVOLUTION DE LA CROISSANCE DES PEUPLIERS DES LYSIMETRES. ....	40
<b>FIGURE 14</b> .....	<b>41</b>
EVOLUTION DE LA SURFACE FOLIAIRE DE L'ARBRE LE PLUS DEVELOPPE DES LYSIMETRES AU COURS DES 3 ANNEES D'EXPERIMENTATIONS. ....	41
<b>FIGURE 15</b> .....	<b>42</b>
APPORT ET CONSOMMATION MOYENNE EN EAU AU COURS DES 3 ANNEES D'EXPERIMENTATION. ....	42
<b>FIGURE 16</b> .....	<b>42</b>
EVOLUTION DU CUMUL DE LA CONSOMMATION EN EAU DES ARBRES SELON LEUR DOSE DE FERTILISANTS.....	42
<b>FIGURE 17</b> .....	<b>43</b>
RELATION ENTRE LA SURFACE FOLIAIRE DEVELOPPEE PAR L'ARBRE ET SA CONSOMMATION EN EAU. ....	43
<b>FIGURE 18</b> .....	<b>44</b>
CONCENTRATION MOYENNE EN BORE DANS LES FEUILLES AU COURS DES 3 ANNEES D'EXPERIMENTATIONS EN LYSIMETRES. ....	44
<b>FIGURE 19</b> .....	<b>45</b>
MASSE TOTALE DE BORE LESSIVE PROVENANT DES LYSIMETRES SUIVANT LE REGIME DE FERTILISATION. ....	45
<b>FIGURE 20</b> .....	<b>46</b>
MASSE TOTALE DE BORE LESSIVE EN FONCTION DU NOMBRE DE VOLUME MORT LESSIVE SUIVANT LES DIFFERENTS TYPES DE FERTILISATION. ....	46
<b>FIGURE 21</b> .....	<b>46</b>
CONCENTRATION MOYENNE EN BORE DANS LES LIXIVIATS RECUPERES A PARTIR DES LYSIMETRES. ....	46

<b>FIGURE 22</b> .....	<b>48</b>
EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN BORE DANS LE PROFIL DE SUBSTRAT DES DIFFERENTS TYPES DE LYSIMETRES. ....	
	48
<b>FIGURE 23</b> .....	<b>51</b>
EVOLUTION DE LA COLORATION DES LIXIVIATS ISSUS DES COLONNES A SCIURES. EN HAUT : COLONNE 2, EN BAS : COLONNE 1 (EDTA).....	
	51
<b>FIGURE 24</b> .....	<b>52</b>
INTEGRATION DE L'ABSORBANCE ENTRE 400 ET 700 NM (ACTIVITE PHOTOSYNTHETIQUE). EVOLUTION AU COURS DU TEMPS.....	
	52
<b>FIGURE 25</b> .....	<b>52</b>
QUANTITE DE BORE DANS LES EAUX DE LESSIVAGE DES COLONNES.....	
	52
<b>FIGURE 26</b> .....	<b>53</b>
QUANTITE DE BORE DANS LES EAUX DE LESSIVAGE DES COLONNES EN FONCTION DU NOMBRE DE VOLUME MORT LESSIVE.....	
	53
<b>FIGURE 27</b> .....	<b>54</b>
EVOLUTION DE LA CONCENTRATION EN BORE DANS LES DIFFERENTES STRATES DES COLONNES.....	
	54
<b>FIGURE 28</b> .....	<b>55</b>
EVOLUTION DE L'ASPECT VISUEL DES FEUILLES DE SURFACE LORS DE LEUR DECOMPOSITION. .....	
	55
<b>FIGURE 29</b> .....	<b>56</b>
COMPACTION DES FEUILLES AU FUR ET A MESURE DE LEUR DEGRADATION. ....	
	56
<b>FIGURE 30</b> .....	<b>56</b>
EVOLUTION DE LA COLORATION DES LIXIVIATS AU COURS DE LA DECOMPOSITION DES FEUILLES. ....	
	56
<b>FIGURE 31</b> .....	<b>57</b>
COMPOSITION DE LA COUCHE DE FEUILLES APRES 14 SEMAINES D'EXPERIMENTATION.....	
	57
<b>FIGURE 32</b> .....	<b>57</b>
CONCENTRATION MOYENNE EN BORE CONTENU DANS LES LIXIVIATS AU COURS DE LA DECOMPOSITION DES FEUILLES. ....	
	57

<b>FIGURE 33</b> .....	<b>59</b>
COMPARAISON DE LA QUANTITE DE BORE LESSIVE EN FONCTION DU NOMBRE DE VOLUME MORT LESSIVE ENTRE LA MOYENNE DES COLONNES A SCIURES ET LES DIFFERENTS TYPES DE LYSIMETRES. ....	
	59
<b>FIGURE 34</b> .....	<b>62</b>
EVOLUTION DE LA QUANTITE D’EAUX DE LESSIVAGE RECUPEREE SELON DIFFERENTS TYPES DE GESTION. ....	
	62
<b>FIGURE 35</b> .....	<b>63</b>
HISTOGRAMME DE LA QUANTITE DE BORE RETIREE DU SITE EN FONCTION DES DIFFERENTES GESTIONS ENVISAGEES. ....	
	63
<b>FIGURE 36</b> .....	<b>63</b>
HISTOGRAMME DE LA QUANTITE DE BORE RETIREE DU SITE EN FONCTION DES DIFFERENTES GESTIONS ENVISAGEES, EN TENANT COMPTE DE L’IRRIGATION DES EAUX DE LESSIVAGES CONTENANT DU BORE.....	
	63
<b>FIGURE 37</b> .....	<b>66</b>
APTITUDES DES CLONES VIS A VIS DE L’ACCUMULATION DU BORE.....	
	66

## Tableaux :

<b>TABLE 1</b> .....	<b>19</b>
RESULTATS PRELIMINAIRES CONCERNANT LA CONCENTRATION EN ELEMENTS DANS LE SUBSTRAT POLLUE ET DANS SES LIXIVIATS.....	19
<b>TABLE 2</b> .....	<b>20</b>
QUELQUES CARACTERISTIQUES DU BORE.....	20
<b>TABLE 3</b> .....	<b>47</b>
COLORATION DES LIXIVIATS ENTRE LE DEBUT ET LA FIN DE L'EXPERIMENTATION DES LYSIMETRES. ....	47
<b>TABLE 4</b> .....	<b>50</b>
BILAN EN BORE EN POURCENTAGE DES DIFFERENTS TYPES DE LYSIMETRES.....	50
<b>TABLE 5</b> .....	<b>54</b>
BILAN EN BORE EN POURCENTAGE ET EN MASSE DES DIFFERENTS COLONNES A SCIURES. ....	54
<b>TABLE 6</b> .....	<b>58</b>
BILAN EN BORE EN POURCENTAGE ET EN MASSE DES DIFFERENTES COLONNES A FEUILLES. .	58
<b>TABLE 7</b> .....	<b>65</b>
DENOMINATION DES DIFFERENTES ESPECES ANALYSEES DURANT CETTE EXPERIENCE.....	65

## TABLE DES ANNEXES

<b>ANNEXE 1.....</b>	<b>75</b>
LE PEUPLIER.....	75
<b>ANNEXE 2.....</b>	<b>77</b>
COMPOSITION CHIMIQUE DU FERTILISANT: HOAGLAND. ....	77
<b>ANNEXE 3.....</b>	<b>79</b>
TECHNIQUES ANALYTIQUES .....	79
<b>ANNEXE 4.....</b>	<b>80</b>
TRAITEMENT DES DONNEES .....	80

## INTRODUCTION

La phytoremédiation est basée sur la capacité de certaines plantes soit à dégrader, soit à stabiliser, soit à extraire les polluants contenus dans les sols ou dans l'eau. Cette technologie émergente est de plus en plus utilisée pour la décontamination des sols selon un procédé in-situ.

Contrairement aux coûteux traitements ex-situ rendant le substrat stérile, ce type de décontamination in-situ, conserve les particularités du sol et ce à un faible coût.

Fletcher Challenge Forests (FCF) est une société multinationale d'exploitation forestière détenue par des néo-zélandais. Sur son site de Kopu elle a accumulé et compacté des sciures de bois pendant près de 30 ans. Seulement, ces sciures sont issues de bois traités par des biocides contenant des éléments indésirables retrouvés dans les eaux de lessivages de cette décharge. Ces lixiviats sont à l'origine de la contamination des voies d'eaux locales.

Afin d'empêcher l'écoulement des lixiviats issus des pluies s'infiltrant sur ce substrat chargé en polluants, FCF a fait appel aux connaissances de HortResearch, forte de quelques années d'expérience dans le domaine de la phytoremédiation. Pour HortResearch c'est l'occasion d'aiguiser ses connaissances dans le domaine.

L'étude de la remédiation du site de Kopu par la phytoremédiation a débutée en 2000. C'est une étude de 3 ans qui a été planifiée. Elle a fait appel à de nombreux intervenants et a mobilisé beaucoup de personnels. C'est donc un travail de longue haleine auquel a notamment pu participer quelques stagiaires dont Raphaël Laplane (ingénieur environnement, ESIGEC, promotion 2002)

Pour ma part, j'interviens dans la dernière année du projet. Ma tâche consiste donc à continuer les expériences en cours, en réaliser de nouvelles et ainsi finaliser le projet pour en retirer des résultats globaux.

# I. GENERALITES

## I.1. Phytoremédiation

La phytoremédiation est l'utilisation des plantes afin d'améliorer les environnements dégradés. Ce moyen est utilisé depuis quelques centaines d'années afin de traiter les déchets, réduire l'érosion et protéger la qualité de l'eau.

Les recherches axées proprement dites sur la phytoremédiation se sont accrues réellement au cours de ces 25 dernières années. En particulier, depuis les premiers travaux du professeur Robert Brooks (Brooks *et al.* 1977 ; Brooks, 1998) et l'émergence de la notion d'hyperaccumulation par les plantes. Depuis, une multitude d'études ont été menées de part le monde aussi bien pour la phytoremédiation des métaux lourds que des contaminants organiques.

### *I.1.a. Principe*

Pour la phytoremédiation, les plantes sont considérées comme des bio-pompes. Sous l'action de l'énergie solaire, la plante absorbe l'eau et les contaminants du sol pour les amener jusqu'à ces parties aériennes alors qu'une partie des produits issus de la photosynthèse retourne au système racinaire.

Sous l'effet de la transpiration, les polluants sont prélevés du sol, et suivent le courant durant lequel ils peuvent être métabolisés, volatilisés ou même stockés.

D'autre part, le réseau racinaire assèche le substrat aux alentours, le transformant en milieu aérobique. Celui-ci est propice au développement microbologique et permet de limiter la migration des polluants.

De plus, les plantes stimulent cette activité microbienne en leur apportant une source carbonée issue de leur activité photosynthétique. Ces microorganismes vont par la suite consommer certains des polluants organiques durant leur métabolisme (Gudin et Syrratt 1975 ; Reilley *et al.* 1996).

En absorbant l'eau du substrat, les plantes permettent de réduire l'érosion, les écoulements et le lessivage. En conséquence, leur présence limite la migration des contaminants.

### *I.1.b. Différents types de phytoremédiation*

Il est possible de différencier plusieurs types de phytoremédiation, basés sur différents principes ou variantes.

- **La phytostabilisation** : Le but est de limiter la migration des polluants. L'action combinée de la transpiration asséchant le milieu et du système racinaire, va permettre l'immobilisation de ces composés. En effet, l'apport de matière organique au substrat immobilise les polluants, et le milieu aérobique formé autour du réseau racinaire va permettre à la population bactérienne de croître et ainsi de transformer ces composés en espèces moins mobiles. Les exsudats racinaires peuvent également jouer un rôle dans la phytostabilisation. Rugh *et al.* (1996) ont montré que *Arabidopsis thaliana* génétiquement modifié peut réduire les ions toxiques du mercure en mercure métallique relativement inerte. Le site contaminé est donc planté par des essences appropriées, caractérisées par une grande consommation d'eau, une croissance rapide. Les arbres phréatophitiques tel que le peuplier ou le saule conviennent particulièrement (Ferro *et al.* 1997). Le site est planté sur le long terme afin de stabiliser ces polluants.
  
- **La phytoextraction** est basée sur le principe de l'hyperaccumulation (Brooks *et al.* 1977). En d'autres termes, il s'agit de plantes qui durant leur métabolisme, intègrent des quantités anormalement élevées de certains composés qu'elles peuvent stocker dans leurs parties aériennes. En outre, la phytoextraction fait appel à l'utilisation de ce type de plante pour retirer les métaux et d'autres polluants du sol. Dans tous les cas, il s'agit de plantes sélectionnées pour leurs aptitudes à absorber et à accumuler un ou des polluant(s) précis. Cependant, des plantes non-hyperaccumulatrices peuvent être utilisées pour extraire des métaux tel que le plomb, ou même l'or, moyennant l'addition d'agents solubilisants au substrat (Huang and Cunningham 1996 ; Blaylock *et al.* 1997 ; Anderson *et al.* 1998). Cela implique une récolte régulière des plantes et ce jusqu'à ce que la concentration en polluant dans le sol atteigne le niveau acceptable désiré. Cette biomasse ainsi récoltée peut soit être réduite sous forme de cendres stockées dans des centres d'enfouissement adaptés, soit être revalorisée pour apporter le composé stocké dans des endroits où celui-ci est en déficit.
  
- **Le phytomining** est une technologie qui utilise la phytoextraction à des fins commerciales.  
Les produits accumulés pouvant être revalorisés sont extraits et revendus (Nicks and Chambers, 1994). Certaines entreprises en font leur affaire tel que Viridian Resources LLC; une firme américaine célèbre pour son extraction du nickel à partir d'*Alyssum bertolonii* (<http://www.clu-in.org/studio/2003phyto/prez/41.pdf>).
  
- **La phytovolatilisation** est en fait une forme de phytoextraction. Au lieu d'être stockés dans les tissus végétaux, les polluants sont transformés en composés volatils. Il semblerait que cette technique ait fait ses preuves pour le sélénium (Brooks, 1998 ; Terry et Zayed, 1994 ; Zayed *et al.* 2000).

- **La phytodégradation, la phytostimulation, la phytodétoxification et la rhizodégradation** sont les termes décrivant la dégradation des contaminants dans la zone racinaire. Elles résultent de l'action combinée de la plante et de la faune et flore microbiologique tellurique.

Le but est de transformer les produits organiques en sous-produits moins nocifs.

3 voies de dégradation peuvent être empruntées :

- *Absorption et métabolisation.*
  - *Action directe des exudats racinaires, notamment sur l'augmentation de la microflore bactérienne.*
  - *Accroissement de l'activité microbiologique dans la zone racinaire par l'intermédiaire de l'aération.*
- **La rhizofiltration** fait appel à la même notion d'hyperaccumulation. Dans ce cas, il s'agit d'utiliser les plantes pour extraire des polluants d'un milieu aqueux (Dushenkov et al. 1995). Le système racinaire des plantes placées dans l'eau souillée absorbent les composés indésirables et les stockent dans leurs racines. Ces dernières peuvent être ainsi facilement récoltées dans ce milieu hydroponique.

### ***I.1.c. Avantages et inconvénients***

#### ➤ ***Intérêt***

La phytoremédiation présente des avantages certains par rapport aux autres voies de décontamination des sols. En outre, le caractère attractif de cette méthode vis à vis des industriels est bien entendu son faible coût. En effet, comparée à d'autres technologies comme l'excavation du sol, le traitement ex-situ ou le recouvrement de ces terres par capping ; qui peuvent coûter aux alentours de 1 M d'Euros par hectare ; la phytoremédiation coûte seulement entre 60 000 et 100 000 Euros par hectare (Salt et al., 1995a). C'est à dire plus de 10 fois moins cher. D'une manière plus générale, le coût global du traitement par phytoremédiation représente 20 % de celui d'une technique alternative.

Sans oublier que l'usage de la phytoremédiation peut générer des produits secondaires dont la revente peut compenser une partie du coût de l'opération ou même produire de léger profit.

- *La phytoremédiation peut être combinée à la sylviculture classique tant que les contaminants n'interfèrent pas sur la croissance des arbres (Huang et al. 1991 ; Pulford et al. 1995).*
- *La végétation peut être incinérée et ainsi produire de l'énergie. Et s'il s'agit de plantes accumulatrices de métaux et que ceux-ci sont accumulés en quantité suffisante, ils peuvent être extraits des cendres et revendus (Hinchman et al. 1996).*

- *Une autre alternative consiste à utiliser les éléments traces essentiels accumulés par la plante (le zinc, le cobalt ou le bore) comme suppléments minéraux organiques pour les cultures, le bétail et pourquoi pas les humains.*

De plus, contrairement aux technologies suscitées, la phytoremédiation laisse la terre fertile. Ceci peut être un avantage considérable dans les régions où la terre est généralement de mauvaise qualité. Par exemple, le tiers monde pourra disposer de ce type de traitement afin de revaloriser ces terres souillées et pourquoi pas plus tard, utiliser l'humus formé pour la culture.

D'autre part cette technique innovante jouit d'une bonne image auprès du public. En effet c'est une technologie dite verte, donc considérée comme respectueuse de l'environnement.

### ➤ *Limites*

Néanmoins, il ne faut pas oublier que la phytoremédiation reste une technique biologique comprenant tous ces aléas. Elle est avant tout régie par les besoins physiologiques de la plante. Et, il est bien entendu, que seules les parcelles contaminées mais permettant l'implantation et le développement de ces plantes peuvent bénéficier de cette technique. Ce traitement est donc long, et la végétation est laissée en place pendant de nombreuses années.

Ce type de procédé n'est donc pas approprié pour un nettoyage rapide du substrat.

De plus, chaque site est différent, il est donc indispensable d'adapter la phytoremédiation à chacun d'entre eux. Dans le cas contraire, cela ne peut mener qu'à un échec.

Par ailleurs, il faut être très méfiant vis à vis des croisements possibles. En effet ils peuvent survenir lors de la pollinisation croisée des espèces génétiquement modifiées avec les autres espèces. En l'occurrence, des essences génétiquement modifiées sont utilisées afin d'accroître les performances de la phytoremédiation. Ceci peut mettre en danger la santé humaine si le croisement a lieu avec des espèces cultivées. Les polluants entreraient alors dans la chaîne alimentaire si elles sont consommées (Tibazarwa et al. 2001).

Afin d'éviter de tels scénarios il est possible d'ajouter des carburants qui auront le rôle d'inhiber ces phénomènes de croisements (Watanabe, 2001).

***La phytoremédiation peut donc permettre d'éliminer des métaux lourds d'un sol pollué et ce à un moindre coût tout en nécessitant du long terme.***

## I.2. Les contaminants

Les principaux éléments concernés par ce type de méthodes sont les métaux lourds, les métalloïdes, les polychlorophénols (PCPs). De part leurs effets néfastes sur la santé ces composés sont indésirables, donc il est intéressant d'utiliser des plantes pouvant les absorber et ainsi les soustraire du sol.

Beaucoup de métaux lourds ont déjà fait l'objet d'études. Entre autre, des plantes accumulatrices de cuivre, de zinc, et de nickel ont déjà été répertoriées.

Cependant, dans l'étude de cas de ce rapport, la phytoremédiation concernera plus particulièrement le bore qui constitue le problème majeur du site de Kopu. En effet, une étude préliminaire a permis de mettre en évidence quels étaient les éléments qui posaient problèmes (*cf. table 1*).

Elément	Sciures (mg.kg <sup>-1</sup> de matière sèche)	Lixiviats (mg.L <sup>-1</sup> )	Normes NZDWS (mg.L <sup>-1</sup> )
Bore	35	<b>3,0</b>	<b>1,4</b>
Cuivre	13,5	0,13	2,0
Chrome	19,4	0,03	0,05
Arsenic	7,4	-	0,01
Cadmium	0,5	<0,01	0,003
Plomb	6,0	0,03	0,01
Zinc	13,9	0,61	0,8

**Table 1**

***Résultats préliminaires concernant la concentration en éléments dans le substrat pollué et dans ses lixiviats.***

Il s'est avéré que malgré une forte concentration en différents métaux lourds tel que le cuivre, le chrome, l'arsenic, le zinc et le bore dans le substrat, celui qui se retrouvait en quantité critique dans ces lixiviats était le bore. En effet, il s'agit de l'élément le plus mobile, c'est donc lui qui a attiré le plus d'attention. Toutefois, les autres éléments ont été également investigués.

### *I.2.a. Le Bore*

C'est un élément assez abondant dans la croûte terrestre (38<sup>ème</sup> rang) et représente 0,01 % de celle-ci en masse. Le bore est présent à hauteur de 10 mg.kg<sup>-1</sup> dans l'écorce terrestre et de 4,5 mg.L<sup>-1</sup> dans les océans. (Mason *et al.* 1982)

- **Caractéristiques**

Bore	B
Numéro atomique	5
Masse atomique (g.mol <sup>-1</sup> )	10,8
Masse volumique (kg.m <sup>-3</sup> )	2340
Point de fusion (°K)	2352
Point d'ébullition (°K)	4273

***Table 2***

*Quelques caractéristiques du bore.*

Le Bore, qui est en fait un métalloïde, se présente sous la forme d'un solide cristallin ou amorphe. Le bore cristallin est le cristal le plus dur après le diamant. Mais ce corps pur n'existe pas dans la nature, le bore se trouvant toujours sous forme de composés. Il est présent dans le borax ou tincal (Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>.10H<sub>2</sub>O), minéral exploité aux États-Unis et dans la colémanite (Ca<sub>2</sub>B<sub>6</sub>O<sub>11</sub>.5H<sub>2</sub>O), exploitée en Turquie.

- **Provenance du Bore sur le site de Kopu**

Le bore et ainsi que la plupart des métaux lourds présents au sein de la décharge proviennent du bois lui-même, ou plus exactement des traitements qu'il a pu subir. Après l'interdiction de l'usage des PCPs pour le traitement du bois dans les années 80 ; celui-ci a été remplacé par un mélange de métaux lourds appelés communément CCA (Cuivre, Chrome, Arsenic). Ce dernier est constitué de différents métaux lourds et métalloïdes dont notamment du bore. Son utilisation massive en tant que traitement fongicide sur le bois, fait que tous ces constituants se retrouvent également dans les déchets issus de l'industrie du bois, dont les sciures. Cela contribue donc à justifier la contamination du site de Kopu où ces déchets ont été accumulés (*cf. figure 1*).



**Figure 1**

***De haut en bas, usine de traitement du bois, entassement du bois et de ces déchets, décharge où sont accumulés les déchets du bois.***

- **Le Bore et les organismes**

C'est un oligo-éléments nécessaire à la croissance des plantes et un composé nutritionnel important pour les vertébrés car il contribue à la formation de l'os.

- *Le bore et les plantes*

Le bore est essentiel pour la croissance des plantes, mais toxique en trop grande quantité. Il entre dans la composition des parois cellulaires et des esters d'hydrates de carbone. Il règle l'action des hormones de croissance et agit négativement sur le gonflement des colloïdes.

Les symptômes généraux d'une carence en bore pour toutes les plantes sont la décoloration des feuilles (feuillage bleu-vert), le développement anormal des points de croissance (ramification anormale des tiges, formation d'une rosette) et un retard de croissance (McMurtrey, 1938 ; Grundon, 1987).

- *Le bore et les humains*

Bien qu'il est connu que les plantes aient besoin de bore pour croître et se développer normalement, il n'a pas encore été prouvé qu'il en allait de même pour les humains. En fait peu de choses de cet oligo-élément et du rôle qu'il joue dans la physiologie humaine est connu. Pour cette raison, il n'est pas considéré comme un nutriment essentiel.

Dans ce cas, il n'est pas possible de parler de carence en ce qui le concerne. Des études épidémiologiques montrent cependant, que, dans les endroits où l'apport en bore est de 1 mg ou moins par jour, la fréquence des problèmes arthritiques est nettement plus importante que dans les régions où l'apport quotidien se situe entre 3 mg et 10 mg par jour. Il a été également remarqué que les personnes arthritiques présentaient systématiquement des taux de bore inférieurs à ceux des personnes ne souffrant pas de cette affection.

Le bore ne présente aucune toxicité jusqu'à concurrence de 10 mg par jour. Des doses massives (plus de 1 g par jour) pourraient perturber le système digestif, occasionner des irritations cutanées et provoquer une perte de cheveux ([www.reseauproteus.net/1001solutions/b/bore.htm](http://www.reseauproteus.net/1001solutions/b/bore.htm)).

- **Sources et disponibilités dans le sol**

Les colloïdes humiques sont la principale source de bore dans la plupart des sols agricoles (Russell, 1973). Le bore est minéralisé lors de la décomposition de la matière organique. Il se retrouve aussi associé à la fraction argileuse du sol sous forme de borosilicates. Dans ce cas, il n'est libéré que lentement. En solution dans le sol, le bore est présent sous forme d'ions négatifs comme les nitrates. Cela en fait le plus mobile des oligo-éléments.

Les facteurs affectant la disponibilité du bore sont :

- *Activité biologique: La disponibilité du bore dépend directement de l'activité biologique du sol. Toute condition qui défavorise l'activité biologique (ex.: sécheresse, inondation) peut provoquer des carences passagères.*
- *Température: L'absorption du bore par la plante dépend de la température, qui, elle, affecte l'activité biologique.*
- *pH: La disponibilité du bore dépend du pH. Le bore est solubilisé plus rapidement en sol acide (pH=5,5), si bien qu'il est plus facilement adsorbé par la plante dans ces conditions (Gu et Lowe, 1990).*
- *Matière organique: La matière organique influence la mobilité et la disponibilité du bore, surtout en sol acide. Dans les sols sableux et pauvre en matière organique, le bore est plus vite utilisé et lessivé.*

- **Normes**

- *Normes néo-zélandaise*

La norme concernant l'eau potable est de 1,4 mg.L<sup>-1</sup> fixé par la New Zealand Drinking Water Standard (NZDWS).

D'autre part, une directive commune à l'Australie et à la Nouvelle Zélande conseille un taux inférieur à 0,370 mg.L<sup>-1</sup> en bore dans les eaux douces pour un niveau de protection des espèces de 95 %. Celle-ci est donnée par l'Australia – New Zealand Environment and Conservation Council's (ANZECC).

- *Normes européennes et françaises*

A titre de comparaison, la directive européenne 98/83/CE du 3 novembre 1998 fixe à 1 mg.L<sup>-1</sup> la concentration maximale en bore admissible dans les eaux destinées à la consommation humaine.

La transposition en droit français, à travers le décret 2001-1220 du 20 décembre 2001, fixe le même taux.

***Le bore est donc facilement lessivé et peut entraîner des troubles pathologiques aussi bien pour le végétal que pour l'homme. C'est pourquoi, il faut limiter son impact.***

D'ailleurs, les ruisseaux ceinturant la décharge se jette dans un estuaire où les Maoris viennent communément chercher des fruits de mers. Et, il semblerait que ces coquillages restent fermés dû à la présence du bore. Leur consommation pourrait entraîner des troubles pathologiques.

L'étude ne s'est pas limitée au bore. En parallèle ont été suivis, le cadmium, le cuivre, le cobalt, le fer, le manganèse et le zinc dans le but d'appréhender la phytoremédiation d'une manière plus générale.

### ***1.2.b. Absorption des métaux lourds par les plantes***

Les végétaux absorbent les éléments solubilisés au niveau de la rhizosphère. Cependant peu d'espèces sont capables d'en prélever certains en grande quantité, du moins plus que ce que leur métabolisme requiert. C'est de cette constatation qu'est né le terme d'hyperaccumulateur.

Initialement, ce terme d'hyperaccumulation a été proposé afin de caractériser une espèce végétale présentant une concentration extraordinaire d'un ou de plusieurs métaux lourds dans leurs parties aériennes (Brooks et al., 1977). Il est entendu par le terme extraordinaire, le fait qu'une plante dite hyperaccumulatrice concentre les éléments phytotoxiques à raison de 10 à 100 fois plus qu'une plante non hyperaccumulatrice (Salt et al. 1998 ; Chaney et al., 1997 ; Raskin et Ensley, 2000).

De plus, ce phénomène est défini comme une accumulation d'un élément dans un organisme à des taux supérieurs à celui dans lequel il se retrouve dans le sol. Cette quantité de métal absorbé doit être bien supérieure aux besoins métaboliques de la plante (Baker et al., 2000).

Il a été suggéré que l'accumulation de ses métaux ait pour rôle de fournir une protection contre les attaques d'insectes et contre les champignons (Chaney et al., 1997). Mais d'autres hypothèses ont été formulées par Boyd et Martens (1992) afin d'expliquer ce phénomène :

- *Tolérance ou débarras de l'élément par la plante ;*
- *Stratégie de résistance en cas de sécheresse ;*
- *Un moyen d'éviter la compétition avec les plantes moins tolérantes vis à vis de ces métaux ;*
- *Prélèvement de ces métaux par inadvertance ;*
- *Défense contre les herbivores et les pathogènes.*

Les plantes en présence d'un sol riche en éléments non essentiels peuvent adopter des comportements différents.

C'est ce qui a été mis en évidence par Baker et al. (1981), complété par les travaux de Robinson et al. (1997) puis McGrath et al. (2000).

Ainsi 3 comportements théoriques différents peuvent être dissociés (*cf. figure 2*):

- *1. Prélèvement faible des métaux.*

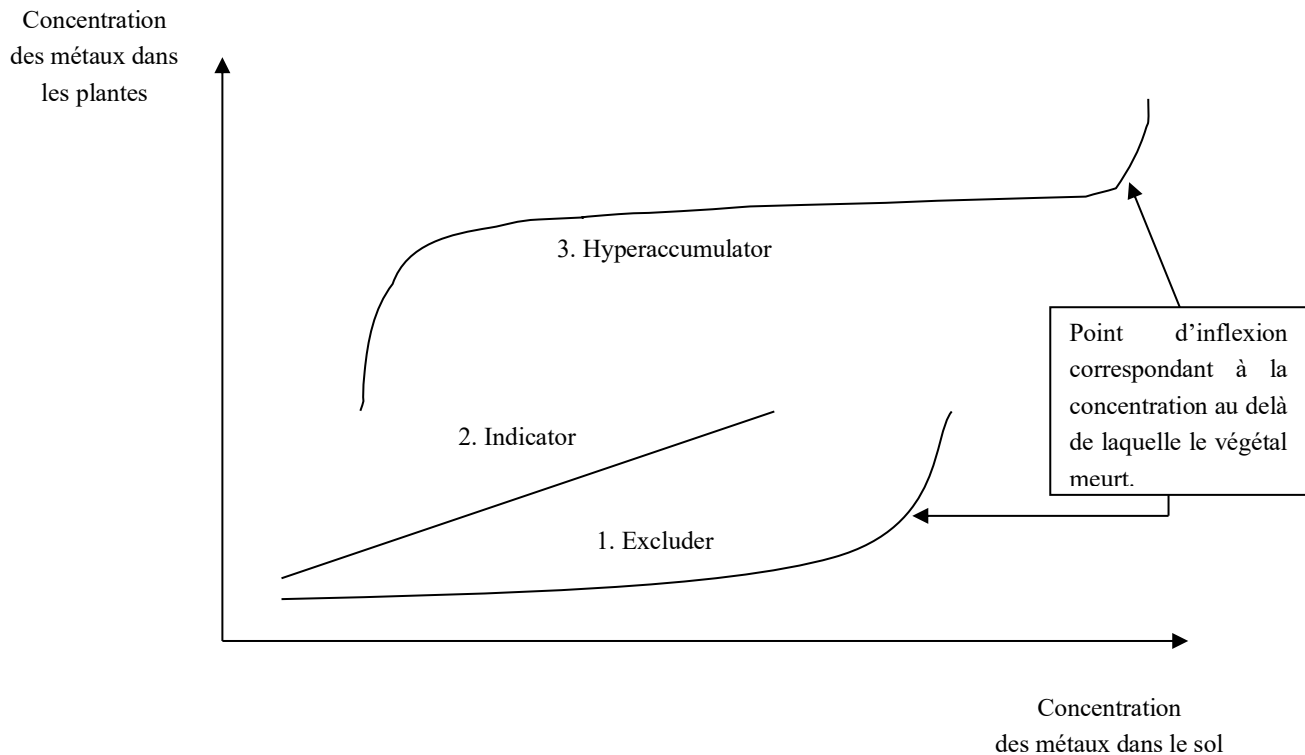
Cette stratégie caractérise une plante qui contrôlera la non absorption des métaux lourds au niveau de ces racines. Au-delà d'une valeur maximale de tolérance, le végétal meurt.

- *2. Prélèvement proportionnel à la quantité de métaux dans le sol.*

C'est ce qui définit une plante indicatrice. En effet la concentration dans la plante reflète celle présente dans le sol.

- *3. Prélèvement élevé des métaux et accumulation.*

La plante hyperaccumule ces métaux dans ces parties aériennes. Cependant, au-delà d'une certaine concentration, la plante périt.



**Figure 2**

*Comportements théoriques des plantes dans les sols riche en éléments non-essentiels  
(Baker, 1981) modifié.*

*Des plantes dites hyperaccumulatrices sont donc capables d'absorber et de concentrer de forts taux en certains éléments dans leurs parties aériennes. Cette particularité présente un intérêt indéniable pour la phytoremédiation.*

## II. ETUDE DE CAS

### II.1. Problématique

Fletcher Challenge Forests a entassé des sciures de bois sur le site de Kopu pendant près de 30 années. Ces sciures sont issues de bois qui avaient été traités, pour les plus anciens, aux PCPs (pentachlorophénols) et après son interdiction en 1980 par le CCA (Cuivre Chrome Arsenic). Il n'est donc pas étonnant que les lixiviats issus de la décharge présentent de fortes concentrations en éléments toxiques tel que des PCPs, le Bore, des métaux lourds et des tannins. Les voies d'eaux environnantes sont donc contaminées.

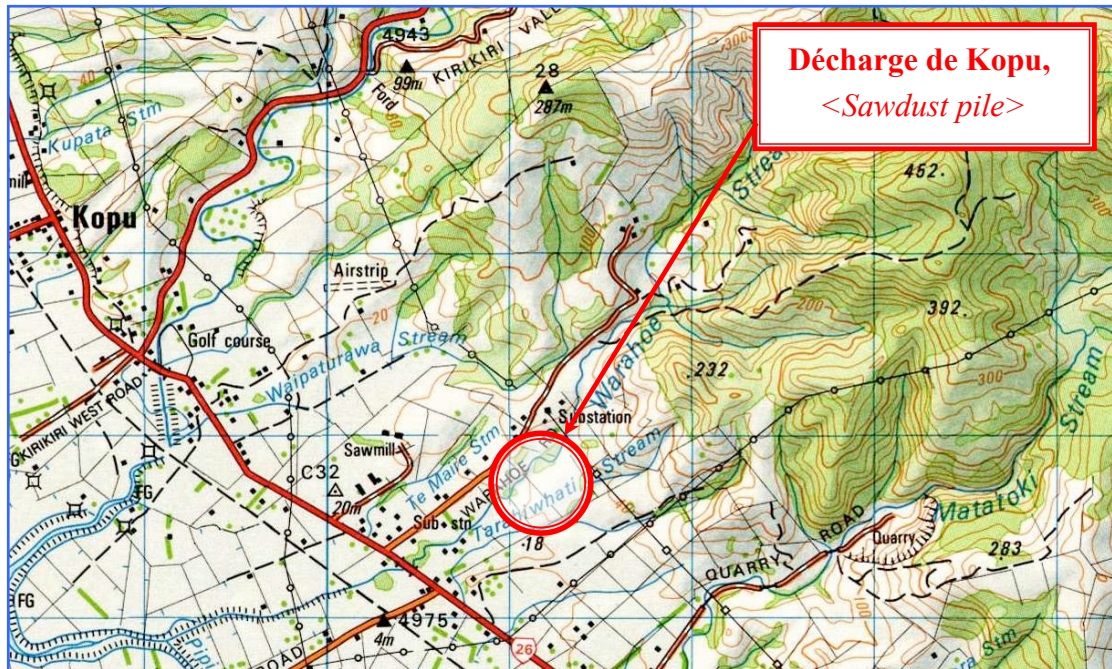
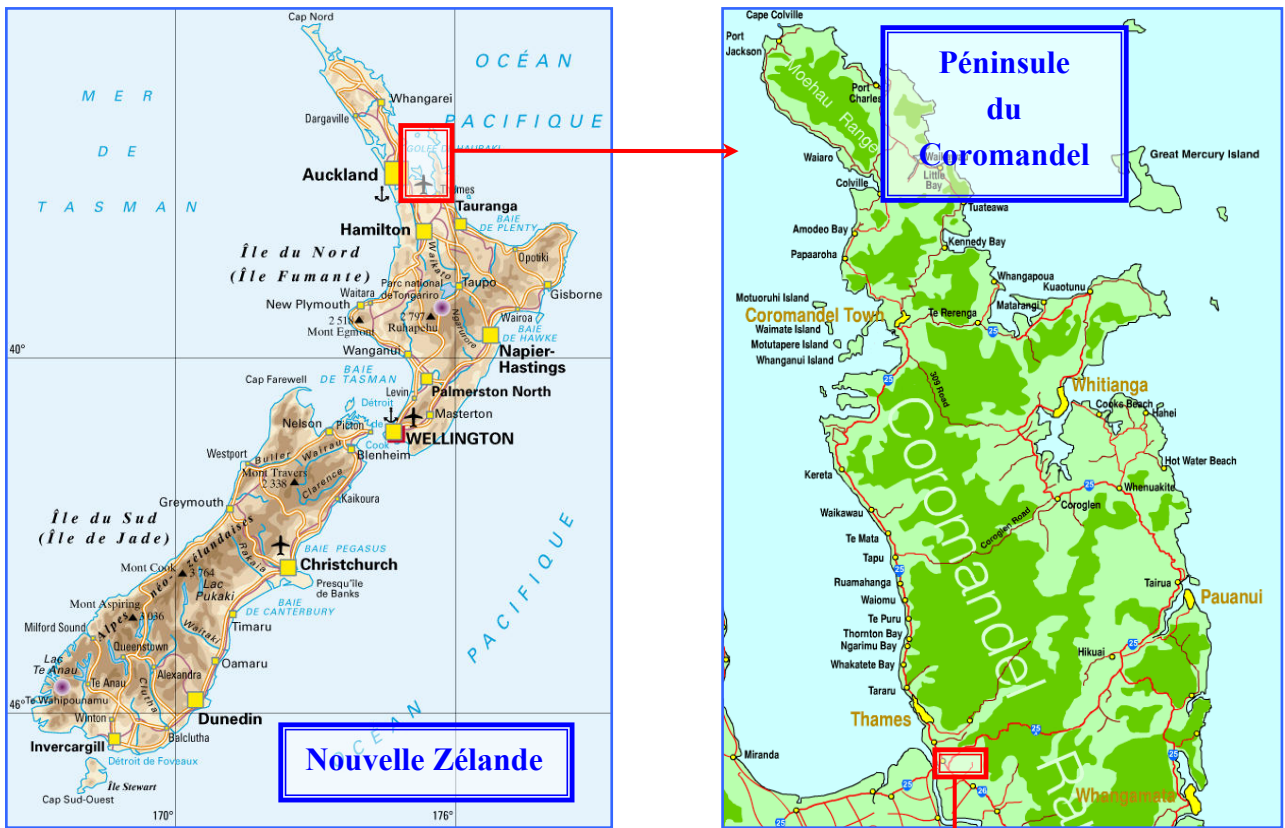
Afin de faire respecter les normes environnementales communes à l'Australie et à la Nouvelle Zélande, la direction de l'environnement « Environment Waikato » (Nouvelle Zélande, île du Nord) a demandé à Fletcher Challenge Forests de décontaminer son site de Kopu.

#### *II.1.a. Site de Kopu*

Kopu est une petite ville de l'île du Nord de la Nouvelle Zélande. Elle se situe plus précisément au pied de la péninsule du Coromandel (*cf. figure 3*). Le site d'entassement des sciures (Coordonnées Géographiques :37,2° S, 175,6° E) s'étale sur une surface de 4,3 hectares et sur une profondeur moyenne de 15 m.

Les terres ceinturant la pile ont été isolées afin de rendre la décharge étanche. Ainsi, ni la nappe phréatique ni les eaux de surface ne peuvent entrer en contact avec les éléments accumulés. De plus, tous les lixiviats engendrés par les eaux météoritiques sont alors collectés dans un bassin situé au pied du site.

La couche de matériaux stockés est totalement saturée (*cf. figure 4*). A tel point qu'une ancienne tentative de végétalisation en vue d'assécher la surface du substrat avait échoué.



**Figure 3**  
*Situation géographique de la décharge pour l'industrie du bois de Kopu.*

### *II.1.b. Le problème*

Les forts épisodes de lessivages issus des fortes précipitations annuelles (1135 mm/an mesuré à la proche station météorologique de Thames), ont pour effet de faire régulièrement déborder le bassin de rétention et par la même occasion d'atteindre le proche cours d'eau (cf. figure 4). Ce débordement participe notamment à l'élévation de la concentration en bore dans le ruisseau. Celle-ci pouvant largement dépasser la recommandation de 1,4 mg.L<sup>-1</sup> fixée par la New Zealand Drinking Water Standard (NZDWS), et ce, particulièrement durant la période d'été estival.

En réponse à ces infractions, les autorités locales s'occupant de l'environnement ont donné l'ordre à la compagnie forestière responsable du site de résoudre ce problème.



***Figure 4***

***Eaux de lessivage issus de la décharge (gauche) et substrat complètement saturé en eau (droite).***

***Fletcher Challenge Forests s'est donc tournée vers la phytoremédiation pour décontaminer son site.***

Elle a donc fait appel aux spécialistes du secteur environnement d'HortResearch, leader dans le domaine en Nouvelle Zélande.

## II.2. Méthodologie

### II.2.a. Etude sur Kopu

#### ➤ Première année (Marijn van der Velde)

Au mois de juillet 2000, une parcelle d'un hectare parmi les 4,3 hectares du site de Kopu a été mise à l'essai en y plantant 3000 arbres. Dans un premier temps, le but était de réduire le lessivage par l'assèchement du substrat induit par la consommation en eau de ces végétaux. Et, dans un deuxième temps, de déterminer les espèces les plus adaptées aux conditions environnementales offertes par le site.

Pour cela, cette partie de la décharge a été plantée avec 7 clones de peupliers, 3 clones de saules ainsi que 2 espèces d'eucalyptus. Ces espèces ont été sélectionnées vis à vis de leur probable aptitude à s'adapter au site et pour leur grande consommation en eau.

Ainsi 2 clones hybrides de peupliers, *Kawa* et *Yeogi* (cf. annexe 1) ont été choisis comme les meilleurs candidats pour la phytoremédiation. Cette constatation est basée sur leur résistance, leur production de biomasse et leur prélèvement en bore.

L'année suivante, le reste de la décharge a été planté avec ces 2 clones à raison de 5000 arbres.

#### ➤ Deuxième année (Raphaël Laplane)

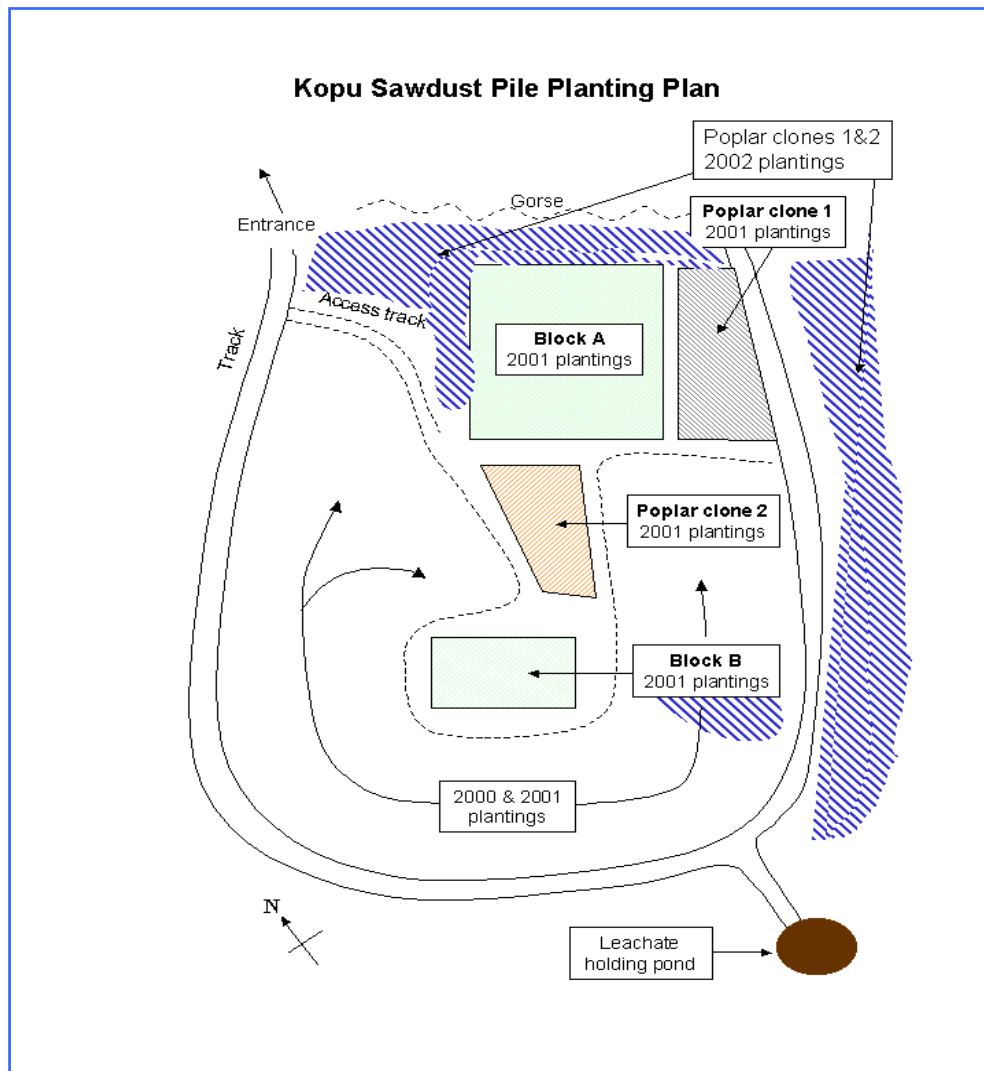
Une investigation sur le terrain a permis de ramener des données concernant les arbres et leur évolution.

Près de 3000 arbres supplémentaires ont été plantés à l'issue de cette 2<sup>ème</sup> année (cf. figure 5).

Durant ces 2 premières années a également été testé l'effet de l'inoculation de champignons blancs, acteurs de la putréfaction. Ils se trouvent dans les forêts et sont à l'origine de la putréfaction du bois. Ces champignons sont capables d'agir sur les PCPs. L'idée est donc de les introduire pour dégrader les PCPs. La question était de savoir si leur présence n'allait pas interférer sur la croissance des arbres et s'ils allaient s'adapter à ces nouvelles conditions. Il s'est avéré qu'ils étaient capables de survivre sans altérer la croissance des arbres. L'inoculation totale de la décharge pourrait ainsi contribuer à abaisser le taux de PCPs et dégrader la sciure en humus plus rapidement.

Au cours de la deuxième année a émergé l'idée de tapisser la surface du substrat par une couverture de trèfles. Celle-ci permettra de transpirer une quantité minimale d'eau en particulier pendant l'hiver ; mais surtout, son atout réside dans sa capacité à fixer l'azote. En effet, le rapport carbone sur azote est primordial pour le développement des plantes et il doit se situer aux alentours de 20 ; alors qu'il se trouve à près de 400 dans la sciure. Certes,

l'ajout de fertilisant permet de rétablir ce rapport de manière plus favorable. Mais c'est sans compter sur la consommation des bactéries et le lessivage, qui font disparaître une grande partie de l'azote nécessaire. L'implantation de trèfles permettra donc de fixer une partie de l'azote tout en apportant un agrément végétal.



**Figure 5**  
*Plan d'organisation du site de Kopu.*

➤ **Troisième année (Benoît Chancerel)**

Au cours de cette année, de nouveaux arbres ont été plantés, et une fertilisation apportée. D'autre part, des arbres ont été prélevés afin d'apporter de nouvelles données concernant la situation des arbres sur le site.

Une stratégie de gestion du site a également été développée.

Ainsi le suivi de ces 3 années ont permis de donner une idée de l'état d'avancement de la phytoremédiation sur Kopu.

## II.2.b. Lysimètres

### ➤ *Première année (Marijn van der Velde)*

Une expérience parallèle a été conduite à HortResearch Palmerston North, où 8 lysimètres ont été remplis par 730 litres de substrat provenant du site de Kopu (cf. figure 6). Ces sciures ont été au préalable homogénéisées car il s'est avéré que la composition du substrat était très hétérogène (La concentration en bore varie entre 15 et 50 mg.kg<sup>-1</sup>, moyenne de 30 mg.kg<sup>-1</sup>). Dans chacun de ces lysimètres a été placé un clone de peuplier dit « *Toa* » (cf. annexe 1). Cette espèce a été sélectionnée car elle a été jugée apte à s'adapter aux types de conditions offertes par le site et le substrat. L'effet de ces arbres sur l'assèchement et la détoxification ont été suivis de près.

De plus, les effets de l'addition de fertilisants ont été investigués. Pour cela, les lysimètres ont été différemment fertilisés par une solution d'Hoaglands (cf. annexe 2) :

- 2 lysimètres fertilisés à faible dose,
- 3 lysimètres fertilisés à dose moyenne,
- 3 lysimètres fertilisés à forte dose.

Afin de suivre ces évolutions, il a été procédé à un échantillonnage régulier des lixiviats et une prise de données régulières concernant les plantes.

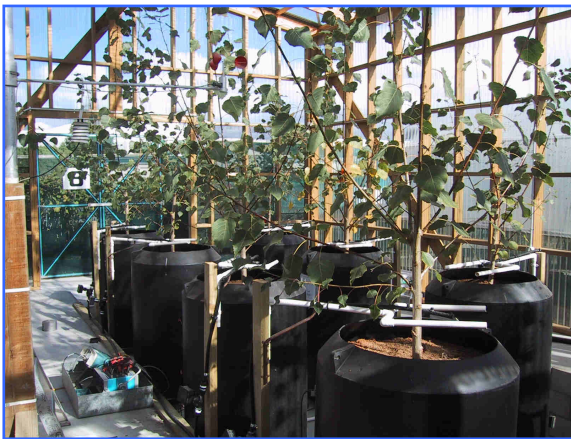
***Le but de cette expérimentation est d'élaborer un modèle capable de prédire le comportement des plantes, leur extraction de métaux lourds ainsi que le lessivage de ces métaux sur le site de Kopu.***

### ➤ *Deuxième année (Raphaël Laplane)*

Outre de nouvelles données récoltées, une modélisation de l'efficacité de la phytoremédiation a été effectuée et a ainsi permis de déterminer la quantité optimale de fertilisants à apporter.

### ➤ *Troisième année (Benoît Chancerel)*

A la fin de cette dernière année d'expérimentation les arbres ont été retirés de leur lysimètre. Ainsi, mis à part les résultats concernant le développement des arbres, une observation de leur développement racinaire a pu être menée. De plus, le substrat a été divisé en 5 couches où des échantillons ont pu être prélevés afin de suivre la répartition du bore dans le substrat. Tous les résultats récoltés sont venus compléter ceux des deux années précédentes.



**Figure 6**

*Les lysimètres dans les serres de HortResearch.*

### ***II.2.c. Expériences complémentaires***

Au cours de cette 3<sup>ème</sup> année deux nouvelles expériences sont venues compléter les précédentes. Leur but est d'apporter des données supplémentaires en vue d'une gestion appropriée du site planté.

#### **➤ *Lessivage du bore***

Le but de cette expérience est de déterminer la quantité de bore à être lessivé par le substrat non-planté. Ainsi, il sera possible de mieux appréhender l'effet des plantes en comparant les résultats de cette étude avec les données obtenues à partir des lysimètres.



**Figure 7**

***Colonnes remplies de sciures pour le test de lessivage du bore.***

Pour cela, 3 colonnes ont été remplies de la même manière que les lysimètres (*cf. figure 7*), c'est à dire par du substrat homogénéisé provenant de Kopu. Afin d'effectuer le lessivage, les colonnes ont été arrosées de 2 litres d'eau chaque jour de la semaine.

Au bout de 7 semaines, une injection d'EDTA (Acide Ethylènediaminetétraacétique) à raison de 2 g par kilogramme de sciures sèches a été effectuée dans l'une des colonnes afin de connaître son effet sur la solubilité du bore. Le but est de déterminer si l'ajout d'EDTA pourrai accroître les performances de la phytoextraction en rendant le bore plus biodisponible. En effet, Huang et Cunningham avaient constaté en 1996 que cet agent chélateur aurai pour effet de solubiliser le plomb et d'autres métaux lourds.

14 semaines après le début de l'expérimentation, chaque colonne de sciures a été découpée en 6 couches et 3 échantillons prélevés à partir de chacune de ces couches, en vue de leur analyse.

#### ➤ ***Décomposition des feuilles***

Cette expérience a été menée afin de connaître la part de bore relarguée par les feuilles mortes lors de leur décomposition. Une simulation de cette décomposition a été effectuée dans 3 colonnes où ont été placées une couche de feuilles provenant des arbres des lysimètres ayant accumulés du bore (*cf. figure 8*).



**Figure 8**

***Colonnes de feuilles pour l'expérience du relargage du bore.***

Afin de faciliter cette dégradation, les feuilles ont été humidifiées par 100 mL d'eau tous les matins. Ainsi, en recueillant l'eau ayant percolé à travers la couche de feuilles, il est possible de suivre et de comprendre comment se fait le relargage.

Bien sûr, il ne s'agit pas là d'une réelle décomposition des feuilles tombées sur le substrat contenant déjà une microflore et une microfaune capable d'accélérer leur dégradation en humus. Le but est juste de pouvoir appréhender le relargage du bore par ces feuilles d'une manière simple et réalisable en laboratoire.

Au bout de 14 semaines la couche de feuilles a été retirée et observée.

### ***II.2.d. Echantillonnage et préparation des échantillons***

#### ***➤ Concernant les lixiviats :***

Les eaux de lessivages provenant des expériences ont été collectées, pesées et stockées, chaque semaine pour les lysimètres et les colonnes à feuilles, journalièrement pour les colonnes à sciures.

Ces échantillons sont alors moyennés par le volume de lixiviats récupérés mensuellement pour les lysimètres et hebdomadairement pour les colonnes à feuilles et à sciures. Le but est de ne former plus qu'un échantillon moyen, représentatif de la période considérée.

#### ***➤ Concernant les feuilles :***

Elles proviennent soit :

- *Des lysimètres où 10 % des feuilles de chaque arbre ont été récoltées tous les quinze jours.*

- *De la coupe finale où la totalité des feuilles ont été séparées des branches. Ainsi l'aire totale de la canopée et la biomasse des feuilles peuvent être estimées en déterminant le poids et la surface de la fraction récoltée.*
- *Du site de Kopu où des arbres sont prélevés et coupés à différents endroits stratégiques. Les feuilles sont séparées des branches et de la même manière que précédemment, la surface totale et leur biomasse estimées.*

Ensuite, après avoir été récoltées et leur surface estimée grâce à un appareil, ces feuilles sont séchées dans une étuve à 70°C. Ayant pris soin de mesurer auparavant le poids frais et connaissant après séchage le poids sec de chaque échantillons ; il est possible de déterminer le pourcentage de matière sèche de ces feuilles. Ainsi, l'aire totale de la canopée et la biomasse des feuilles peuvent être estimées à partir du poids et de la surface de la fraction récoltée, précédemment déterminés.

Par la suite, ces feuilles ont été réduites en poudre en vue de leur minéralisation. 0,150 g de ces feuilles broyées sont pesé et disposé dans des erlenmeyers de 50 mL. 10 mL d'acide nitrique à 69 % sont ajoutés à ces échantillons. Les erlenmeyers sont ensuite placés sur une plaque chauffante réglée à 350°C (*cf. figure 9*). Après évaporation jusqu'à 3 mL de la solution, les minéralisations sont retirées de la plaque et mises à refroidir. Une fois à température ambiante, le résidu de la digestion est récupéré dans un tube jaugé et complété jusqu'au 10 mL par de l'eau distillée. Les échantillons sont prêts pour l'analyse.

➤ **Concernant les sols :**

De la même manière, ils sont pesés à l'état frais et après avoir été séchés à l'étuve à 100°C. Il est alors possible de connaître l'humidité de l'endroit où l'échantillon a été prélevé. Ensuite, la terre séchée est tamisée et 0,5 g de chaque échantillon est minéralisé suivant le même protocole que précédemment (*cf. figure 9*).

Il ne faut pas oublier de faire un tube témoin sans feuille ou ni sol et subissant les mêmes traitements à chaque séquence de minéralisation.

Il ne faut pas omettre, non plus, de tenir compte de la dilution et du poids exact pesé pour chaque échantillon ; afin de rétablir la réelle concentration de l'élément dosé présent dans la matière sèche.



**Figure 9**

*Préparation des échantillons de sol (Gauche), et minéralisation des échantillons (Droite).*

➤ **Méthodes d'analyse**

Pour doser les différents éléments, deux méthodes sont utilisées suivant les concentrations qu'il est probable de retrouver dans les échantillons.

Ainsi pour le cuivre, le manganèse, le fer, le zinc, le cobalt et le cadmium, la spectrométrie d'absorption atomique (*cf. annexe 3*) a été utilisée. Ces analyses ont été effectuées au sein du laboratoire des sciences du sol de Massey University (Palmerston North, Nouvelle Zélande, Ile du Nord) sur un spectrophotomètre GBC 909 AA.

Concernant le bore, les échantillons ont été envoyés au laboratoire privé E-lab Limited d'Hamilton (Nouvelle Zélande, Ile du Nord). Les résultats sont donc directement reçus du laboratoire après qu'ils aient analysé les échantillons par spectrométrie d'émission plasma à couplage inductif (*cf. annexe 3*).

➤ **Coloration des lixiviats**

Afin d'appréhender l'impact de la coloration des lixiviats sur la flore du cours d'eau. Une intégration de l'absorbance donnée dans le visible, entre 400 et 700 nm (longueurs d'ondes régissant l'activité photosynthétique) a été faite pour chaque échantillon.

Cette expérimentation a été faite dans les laboratoires des sciences du sol de Massey University (Palmerston North, Nouvelle Zélande) sur un spectromètre UV-Visible GBC Cintra 20.

Ainsi, leur comparaison permet de savoir, juste à titre indicatif, s'il y a une décoloration des lixiviats et ainsi de savoir si leur impact négatif sur la flore et la faune s'estompe.

## III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

### III.1. Résultats

#### III.1.a. Evolutions constatées à Kopu

➤ *Couverture végétale*

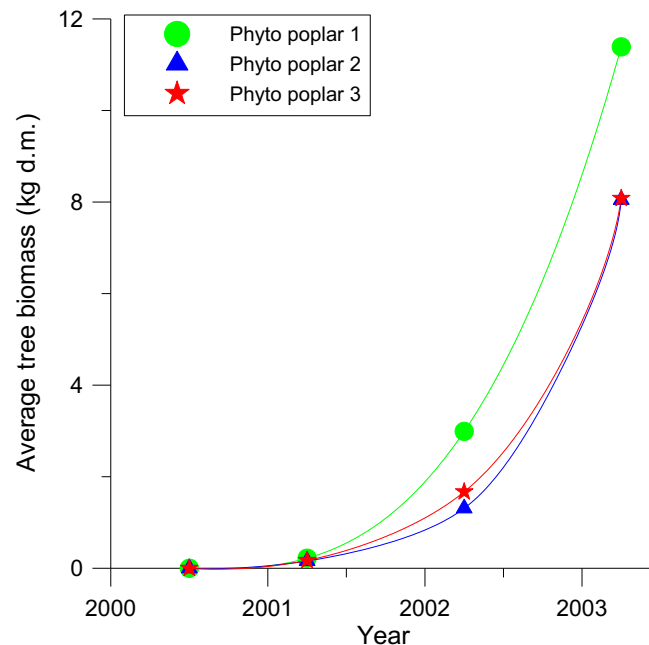
Tous les peupliers sélectionnés lors de la phase d'essai ont démontré une croissance impressionnante, le plus grand atteignant 7 m (cf. figure 10).



**Figure 10**

*Evolution de la couverture végétale à Kopu.*

Ces peupliers plantés en 2000, recouvrant à peu près un quart de la décharge ont maintenant développé une canopée conséquente. La moyenne de l'indice de surface foliaire (surface foliaire développée par mètre carré au sol) se situe vers 6,4. Quant la canopée va se refermer, fermeture estimée pour un indice de surface foliaire de 8, les arbres seront à même de consommer un maximum d'eau.



***Figure 11***

***Evolution de la biomasse de trois peupliers sélectionnés pour la phytoremédiation du site de Kopu.***

Les arbres apportés aux sites les années précédentes suivent également le même régime de croissance rapide. Il s'agit d'une croissance exponentielle typique des jeunes arbres (*cf. figure 11*). Il est attendu une croissance similaire pour l'été 2003-2004, ce qui permettra de fermer la canopée et ainsi de bénéficier de performances maximums.

### ➤ ***Humification***

Après 3 ans, les sciures de la couche de surface ont été décomposées, formant ainsi un horizon humique de 60 cm de profondeur (*cf. figure 12*). Ainsi le substrat se tasse et permettra avec le temps d'accéder aux couches inférieures que la zone racinaire n'arrivent pas à atteindre.

De plus, cet humus abrite une faune et une flore active qui permettent d'accélérer la décomposition. L'apparition d'organismes du sol tel que des vers de terre a notamment pu être constatée dans la couche d'humus (*cf. figure 12*).



**Figure 12**

*Couche d'humus (droite) et ses vers de terre (gauche).*

Par ailleurs, le substrat se décomposant et devenant aérobie, la mobilité des métaux lourds comme le cuivre, le chrome et l'arsenic devient plus limitée. En effet, ceux-ci se lient aux acides humiques et fulviques ainsi formés.

*La croissance des arbres sur Kopu est impressionnante et permet d'ores et déjà de désaturer la décharge en eau, et de décomposer les sciures en humus.*

➤ *Expériences complémentaires*

▪ **Bambous (*Bambusa spp.*)**

Une étude supplémentaire sur le site a été menée par le professeur Yuming Yang ; expert en bambou venu de Chine. Le but étant d'utiliser ce végétal à croissance extrêmement rapide en complément des espèces déjà en place sur le site. Dans cet optique, différentes variétés de bambous sélectionnées par le professeur ont été testées. Il s'agit de variétés qui produisent très peu de stolons ; le but étant de limiter leur expansion afin qu'elles ne deviennent pas de mauvaises herbes. Comme supposé, la première année de croissance fut rapide, mais les bambous ont souffert d'une déficience en azote, cela malgré leur fertilisation. Si jamais leur implantation s'avérait possible, ils pourraient compléter l'action des peupliers, en poussant dans une strate inférieure à celle occupée par ces grands arbres. En effet, les bambous tolèrent l'ombre. Par ailleurs, ils limiteraient l'infiltration des pluies pendant l'hiver. La surface végétale permettrait de ralentir la pluie et d'en évaporer une fraction.

▪ **Trèfles (*Trifolium repens*)**

Du trèfle a été semé sur toute la surface du sol à remédier. A la fin de l'été, le taux de couverture s'approchait des 60 %, là où il n'a pas été en compétition avec l'herbes ou le

manuka (*Leptospermum scoparium* : arbuste natif de Nouvelle Zélande). L'azote fixé par le trèfle pendant les mois d'hiver retourne dans le sol pendant l'été où le végétal meurt sous la canopée des peupliers. Par ce fait, il jouera le rôle d'engrais naturel.

### III.1.b. Lysimètres

#### ➤ Croissance des arbres

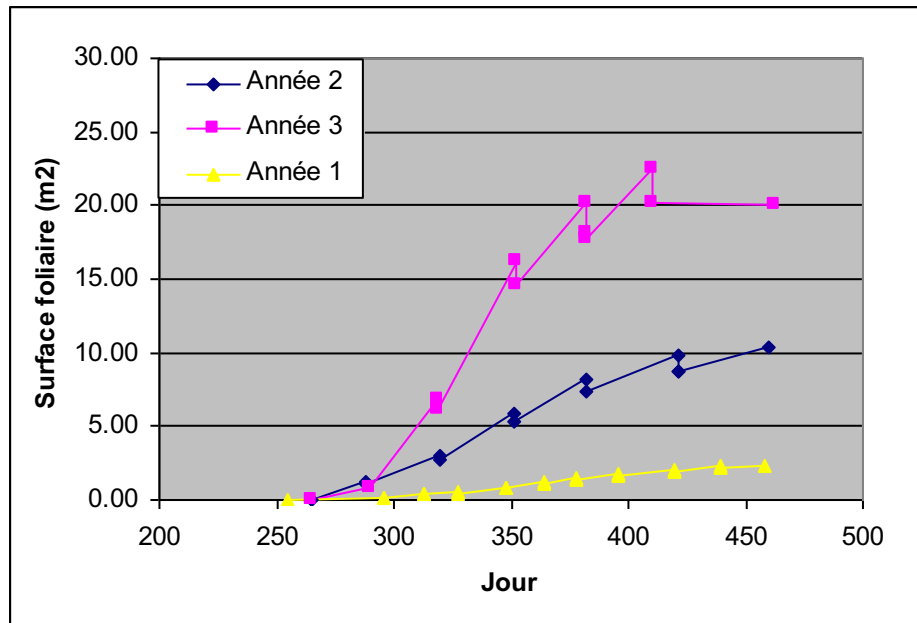
La production de biomasse a été importante et a suivi une croissance exponentielle d'année en année (cf. figure 13).



**Figure 13**

*Evolution de la croissance des peupliers des lysimètres.*

Cependant des différences notables ont pu être constatées entre les différents arbres, et ce en adéquation avec la dose de fertilisants à laquelle ils ont été soumis. A savoir que les arbres les plus imposants sont ceux qui ont reçu le plus fort amendement.



***Figure 14***

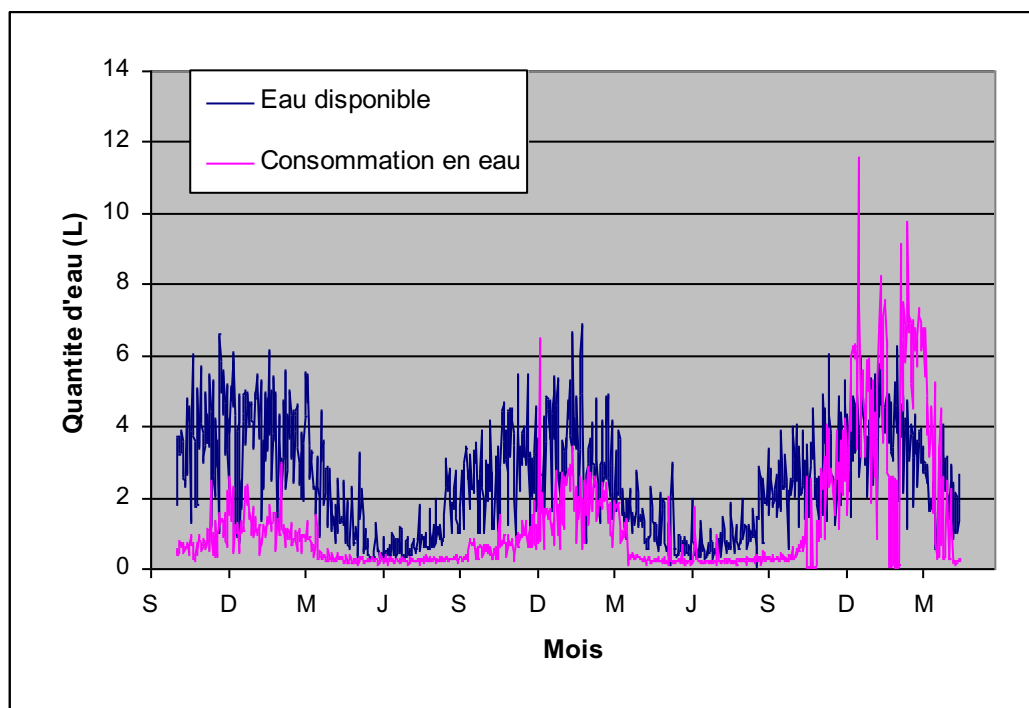
***Evolution de la surface foliaire de l'arbre le plus développé des lysimètres au cours des 3 années d'expérimentations.***

Au cours des 3 dernières années, la surface foliaire développée par les peupliers a considérablement augmentée (cf. figure 14). Certains des arbres placés dans les meilleures conditions (forte dose de fertilisant, beaucoup d'eau) ont même dépassé les 20 m<sup>2</sup> de surface. Les décrochements sur la courbe sont dus aux prélèvements de 10 % des feuilles qui permettent d'estimer la surface foliaire.

Lors du démantèlement des lysimètres, le même type de constatation a pu être notée. En effet, les différences entre les réseaux racinaires se sont avérées considérables. Celui des arbres les plus fertilisés est très dense et largement ramifié alors que celui des arbres peu fertilisés ne présente qu'une ou deux racines principales d'où partent quelques radicelles.

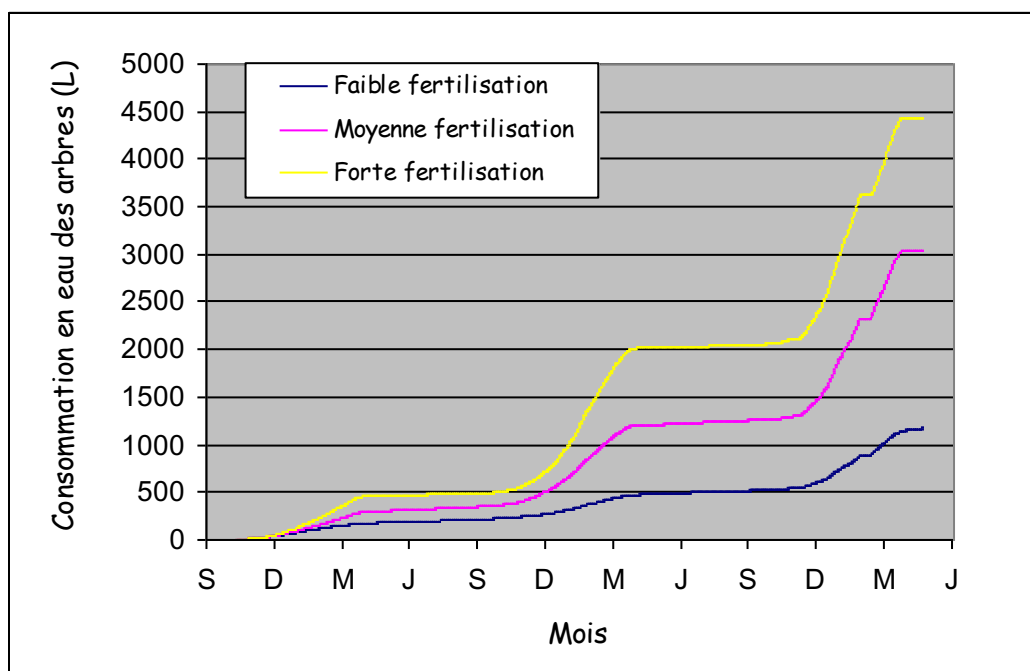
Comme supposé, la dose de fertilisant a un impact conséquent sur la croissance des arbres et cela influence leur consommation en eau.

➤ *Consommation en eau*



**Figure 15**

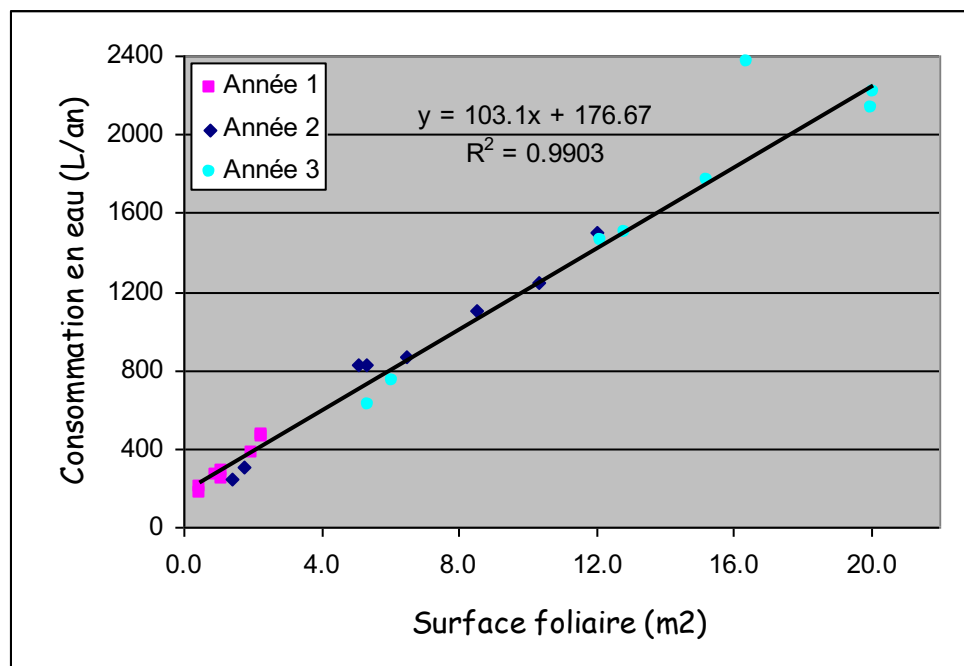
*Apport et consommation moyenne en eau au cours des 3 années d'expérimentation.*



**Figure 16**

*Evolution du cumul de la consommation en eau des arbres selon leur dose de fertilisants.*

Plusieurs constatations peuvent être faites à partir de ces *figures 15 et 16*. Tout d'abord, que la consommation en eau augmente avec la croissance des arbres. Par conséquent, celle-ci est plus importante d'année en année. D'autre part, les séquences hiver-été (hémisphère sud : hiver de Juillet à Septembre, été de Janvier à mars) sont bien marquées et bien évidemment l'évapotranspiration ne s'effectue que durant la période où l'arbre revêt des feuilles. Par ailleurs, plus la plante reçoit de fertilisants, plus elle consomme d'eau, ceci est à mettre en relation avec sa plus forte croissance, et le développement d'une plus grande surface foliaire permettant l'évapotranspiration. La *figure 17* indique cette proportionnalité.



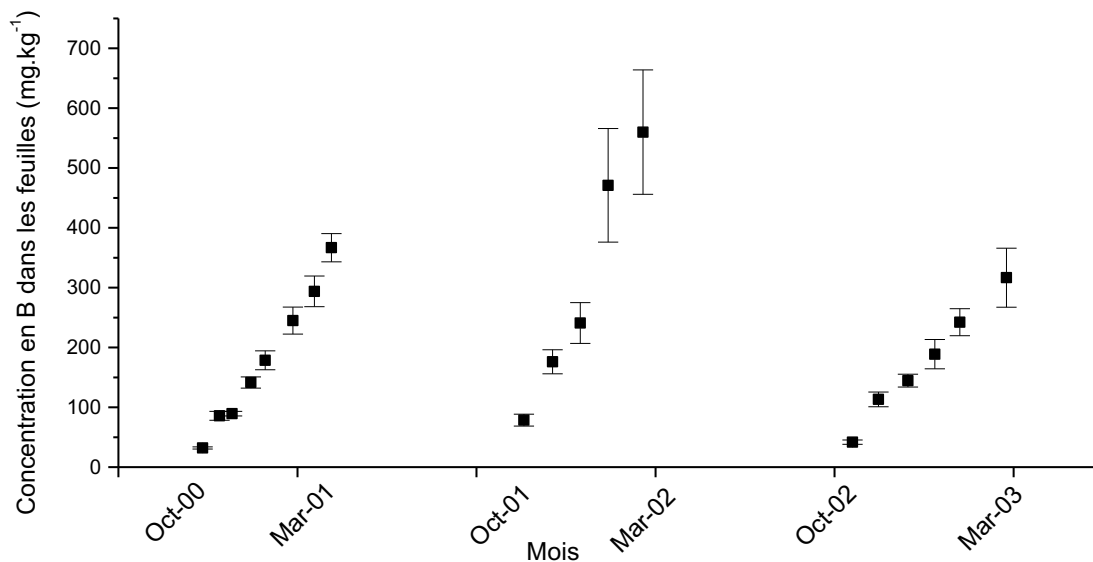
**Figure 17**

*Relation entre la surface foliaire développée par l'arbre et sa consommation en eau.*

Si la consommation en eau est élevée, alors l'absorption en élément s'en trouve accrue. Ce phénomène pourrait donc améliorer les performances de la phytoremédiation.

### ➤ *Bore dans les feuilles*

Une étude préliminaire avait permis de prouver que le bore était principalement accumulé dans les feuilles, et que sa concentration augmentait au fur et à mesure de la saison.



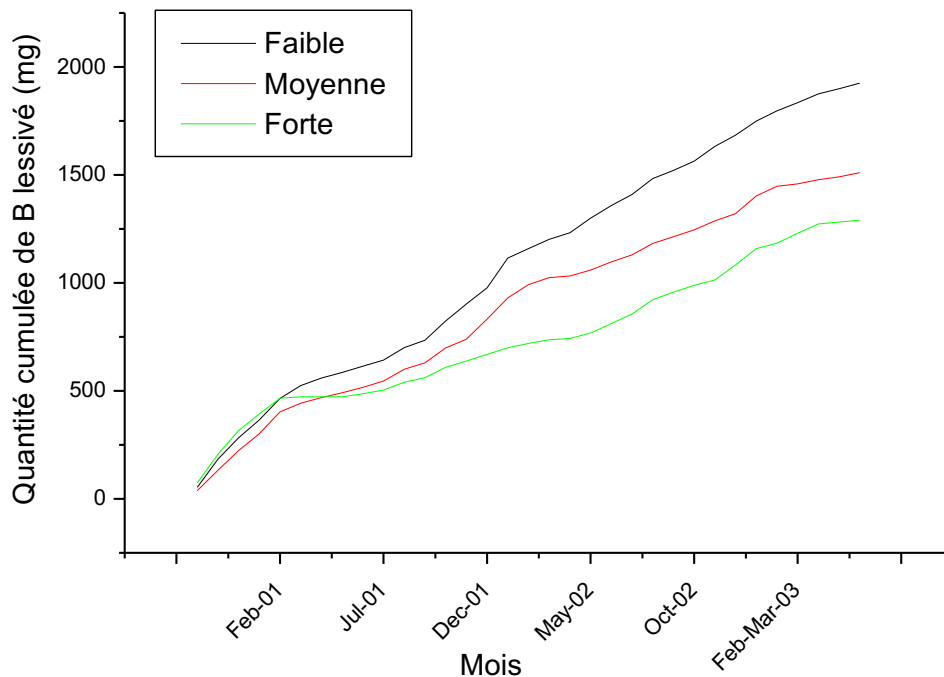
***Figure 18***

***Concentration moyenne en bore dans les feuilles au cours des 3 années d'expérimentations en lysimètres.***

La *figure 18* ajoute à cette constatation que les peupliers sont capables d'accumuler de fortes doses de bore. La concentration maximum en bore accumulé dans les feuilles ( $550 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) a été obtenue durant la saison 2001-2002. La concentration initiale en bore dans les sciures est admise aux alentours de 15 à 50 en moyenne ; cela veut dire que ces clones de peupliers sont capables d'absorber et de stocker 10 à 30 fois plus de bore que la concentration présente dans le substrat. Il est alors possible de parler d'une hyperaccumulation. Par ailleurs, l'année suivante, cette concentration a nettement diminué. Cela peut s'expliquer par le fait que le bore présent dans la zone racinaire, a déjà été retiré. Ces résultats indiquent que, si le but est de retirer le plus de bore possible du site, il faudra envisager une taille des arbres et ce à la fin de la saison, juste avant la chute des feuilles. En effet, c'est à ce moment que la concentration du bore dans les feuilles est à son maximum.

Mais le but est donc de savoir si ce prélèvement en bore se ressent sur la concentration en bore dans les lixiviats.

➤ *Bore dans les lixiviats*



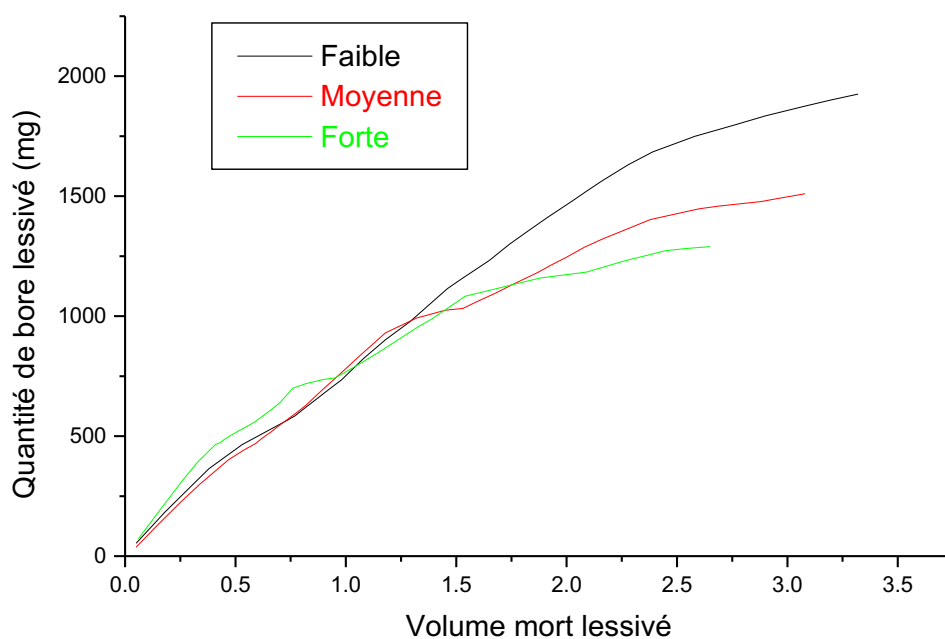
**Figure 19**

*Masse totale de bore lessivé provenant des lysimètres suivant le régime de fertilisation.*

La *figure 19* montre que le type de fertilisation a un impact direct sur la concentration en bore dans les lixiviats. Cela s'explique par le fait qu'une plante qui reçoit plus de fertilisants a une croissance plus rapide. Elle développe donc plus de biomasse et de feuilles susceptibles d'accumuler le bore. A côté de cela, l'évapotranspiration qu'elle engendre est plus conséquente, ce qui signifie une plus grande consommation d'eau et donc plus de prélèvement de bore. Et, si la consommation en eau est plus importante, alors la quantité de lixiviats s'en trouve réduite. C'est cette combinaison, de quantité de lixiviats amoindris, de prélèvements en bore plus élevés et de plus grande biomasse dans laquelle elle peut accumuler le polluant, qui fait la différence avec les autres plantes soumises à des quantités inférieures de fertilisants.

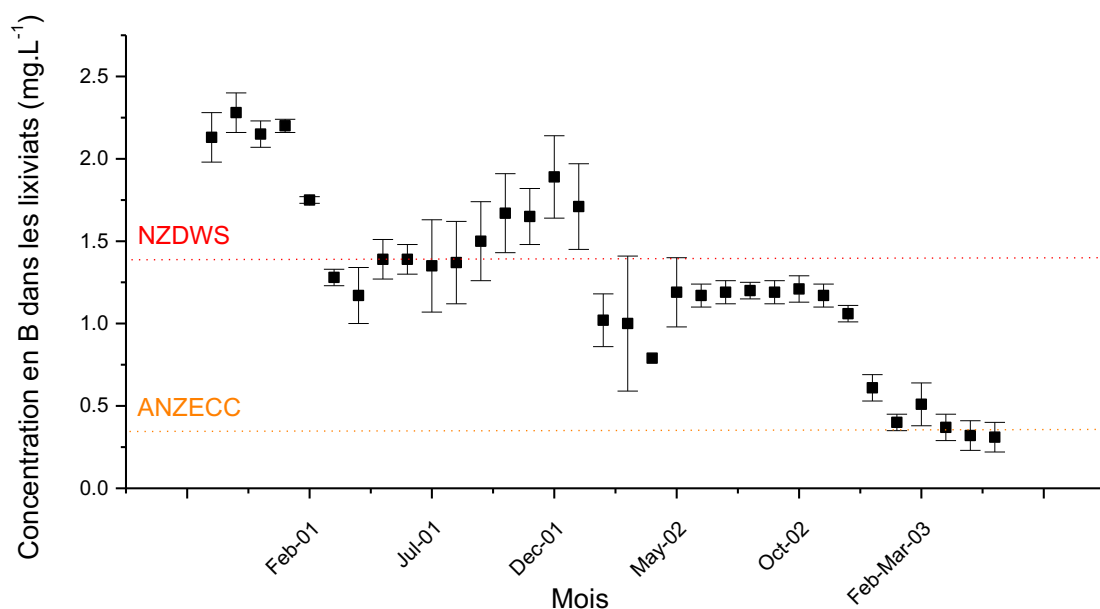
D'après ce graphe une forte fertilisation permet une diminution de 32 % de la quantité de bore lessivé par rapport à une faible fertilisation.

La *figure 20* souligne cette importance en donnant la quantité de bore lessivé en fonction du volume mort des lysimètres lessivés. Cela permet de bénéficier d'une meilleure comparaison.



**Figure 20**

*Masse totale de bore lessivé en fonction du nombre de volume mort lessivé suivant les différents types de fertilisation.*



**Figure 21**

*Concentration moyenne en bore dans les lixiviats récupérés à partir des lysimètres.*

La *figure 21* prouve que la concentration en bore dans les eaux de lessivages a diminué d'année en année. Cette concentration passant même en dessous de la barre des 1,4 mg.L<sup>-1</sup> fixé par la New Zealand Drinking Water Standard (NZDWS) et ce dès la deuxième année. Au cours de la troisième année, cette concentration en bore dans les lixiviats descend jusqu'aux alentours de 0,4 voire 0,3 mg.L<sup>-1</sup>, avoisinant ainsi la recommandation de 0,37 mg.L<sup>-1</sup> donnée par l'Australie - New Zealand Environment and Conservation Council's (ANZECC).

Cependant, il ne faut pas omettre de mentionner qu'à la différence du site de Kopu, les feuilles des arbres maintenus dans les lysimètres, ont été retirées chaque année. Ainsi, tous risque de relargage du bore lors de la décomposition de ces feuilles est écarté.

### ➤ *Coloration des lixiviats*

Le but est de savoir si les arbres ont un effet sur la décoloration des eaux de lessivages. En effet, il serait souhaitable que ces eaux tendent à s'éclaircir afin de permettre une meilleure photosynthèse des plantes aquatiques. Par conséquent, une meilleure oxygénation des eaux avec tout ce que cela implique sur l'environnement aquatique.

Cette coloration est due à un mélange de différents composants contenus dans ces lixiviats dont des tannins et des métaux lourds.

#### Coloration des lixiviats (Intégration de l'absorbance entre 400 et 700 nm)

	Lysimètre 1	Lysimètre 2	Lysimètre 3	Lysimètre 4	Lysimètre 5	Lysimètre 6	Lysimètre 7	Lysimètre 8
Initiale (Oct 2000)	80.29	85.56	87.18	93.23	101.96	100.21	98.85	86.24
Finale (Août 2003)	90.64	75.02	60.25	99.15	93.69	69.14	94.80	92.47
Diminution (%)	-13	12	31	-6	8	31	4	-7

**Table 3**

*Coloration des lixiviats entre le début et la fin de l'expérimentation des lysimètres.*

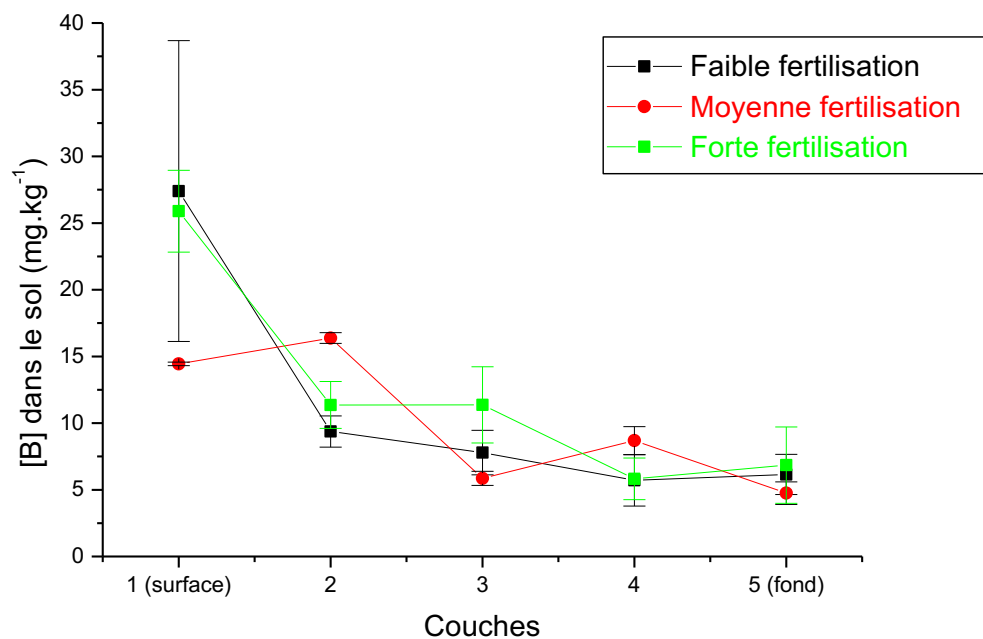
Les résultats contenus dans la *table 3* ne sont pas assez consistant pour prouver quoi que ce soit sinon l'inefficacité des arbres sur la décoloration de ces eaux de lessivages.

Il est probable que le peu de changement constaté entre le début et la fin de l'expérimentation soit dû à la décomposition des sciures. En effet, lors de leur dégradation, les tannins et d'autres composés sont libérés. De plus, cette dégradation est loin d'être terminée, ces composés sont donc continuellement libérés. Un autre point, et qu'il a été noté une coloration plus foncée des lixiviats après l'ajout d'amendements.

### ➤ *Etat du substrat*

Lors du retrait des arbres des lysimètres, les transformations qu'ont pu subir le sol ont pu être remarquées. Ainsi, l'horizon de surface ne ressemble plus du tout à de la sciure mais plutôt à une sorte d'humus de couleur foncée. Dans les couches médianes, il s'agit de sciures en cours ou en fin de dégradation, donc il est possible de parler d'humification partielle. Tandis que dans les basses couches, il s'agit de sciures compactées ou tous juste en début de décomposition, et de couleur plutôt orangée. De plus, lors de la progression vers le fond du lysimètre, l'humidité augmente.

Il faut également mentionner une fois de plus les différences notables entre les arbres ayant reçu des différentes quantités d'amendements. A savoir que pour ceux ayant bénéficié de fortes doses de fertilisants, la couche de transition s'étend presque jusqu'au fond du lysimètre et la couche d'humus de surface est d'autant plus conséquente. Bien évidemment, pour ceux ayant reçu qu'un faible taux d'amendement, la couche d'humus est vraiment superficielle et il est possible de retrouver les sciures quasiment inaltérées assez rapidement lors de la progression vers le fond du lysimètre. D'autre part, ces derniers lysimètres ont présenté une strate anaérobique vers le fond. Ces arbres n'étant pas suffisamment développés, n'ont pas réussi à consommer toute l'eau qui leur a été apportée.



**Figure 22**

*Evolution de la concentration en bore dans le profil de substrat des différents types de lysimètres.*

D'après la *figure 22*, la concentration en bore contrairement aux prévisions attendues décroît au fur et à mesure de la progression dans le profil. Afin d'expliquer ce phénomène plusieurs hypothèses peuvent être émises.

Il est connu qu'en milieu anaérobique, le lessivage du bore se fait plus facilement et qu'en milieu aérobique, il se lie aux composés humiques. En outre, la forte consommation en eau de la part des peupliers agit sur l'assèchement des couches superficielles et les rendent aérobiques, fixant ainsi le bore, qui ne migre plus. Tandis que le fond du lysimètre est anaérobique, facilitant ainsi le lessivage du bore.

Par ailleurs, la grosse partie des racines se trouvant dans le fond du lysimètre sera à l'origine de la majeure partie de la disparition du bore. Alors que le peu de racines superficielles ont un impact moindre sur la quantité de bore qui reste fixé dans la couche humifère.

Ces hypothèses combinées pourront expliquer cette constatation.

### ➤ **Bilan**

Afin de connaître les conditions d'avancement de la phytoextraction au bout de ces 3 ans, il est indispensable de faire un bilan sur le bore. Par ce biais, il est possible de déterminer l'effet des différents arbres et de leur traitement sur la part de bore lessivé, celle extraite par les arbres et celle toujours présente dans les lysimètres. Cependant, il ne s'agit là que d'une idée de la réalité. En effet, d'une part, la quantité de bore dans les racines et le bois n'est pas connue. D'autre part, la concentration initiale en bore dans le substrat n'est qu'une moyenne de quelques échantillons, et il est connu que cette concentration est très hétérogène dans les sciures de Kopu ; même l'homogénéisation de ces sciures n'a pas rétablie cette variabilité. Dans ce cas, cette concentration a été déterminée afin d'équilibrer les bilans au mieux tout en restant dans la gamme où se situe cette concentration initiale (entre 15 et 50 mg.Kg<sup>-1</sup> dans la matière sèche). Le but étant plus de comparer ce qui a été lessivé à ce qui a été extrait.

La *table 4* donne une expression du bilan en bore retranscrit en pourcentage. Cela permet d'avoir une meilleure approche et rend mieux compte de la part extraite par la biomasse vis à vis de celle du bore lessivé par rapport à la quantité initiale.

Les résultats mettent une fois de plus en évidence le rôle des amendements. La part accumulée dans la biomasse des arbres faiblement fertilisés est très inférieure à celle lessivée (2,37 fois inférieure). Pour ceux de tailles moyennes, la part stockée dans la biomasse est légèrement inférieure (26 %) à celle lessivée. Et finalement, la tendance s'inverse pour ceux hautement fertilisés où 46 % du bore initial a été accumulé dans la biomasse alors que seulement 32 % ont été lessivés. Ces derniers sont donc les plus efficaces.

La moyenne des lysimètres ayant bénéficié d'une fertilisation correcte, moyen et fort amendements ; proche de ce qui a été appliqué au site de Kopu ; présente une balance équilibrée entre la part extraite (37 %) et la part lessivée (35 %).

<b>Bilan en bore en %</b>
---------------------------

	Faible (Lys 3, 6)		Moyenne (Lys 4, 7)		Forte (Lys 2, 8)	
	Moyenne	Stdev	Moyenne	Stdev	Moyenne	Stdev
<b>INITIAL</b>						
MS Sciures (Kg)	148	0.01	142	0.26	142	7.31
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>0.00</b>	<b>100</b>	<b>0.00</b>	<b>100</b>	<b>0.00</b>
<b>FINAL</b>						
Feuilles	19	0.95	28	4.72	46	0.22
Sciures	27	6.77	26	1.74	31	1.82
Lixiviats	45	11.33	38	2.48	32	7.19
<b>Total</b>	<b>92</b>	<b>17.15</b>	<b>91</b>	<b>29.77</b>	<b>108</b>	<b>9.23</b>
<b>INITIAL-FINAL</b>	<b>8</b>	<b>17.15</b>	<b>9</b>	<b>0.50</b>	<b>-8</b>	<b>9.23</b>

**Table 4**

***Bilan en bore en pourcentage des différents types de lysimètres.***

Le bilan est que même si il reste une quantité non négligeable de bore toujours contenue dans le substrat (de l'ordre de 30 % de la masse initiale), la plus grande partie a été extraite (37 %) et accumulée dans les parties aériennes des arbres correctement fertilisés, limitant ainsi la part lessivé (35 %).

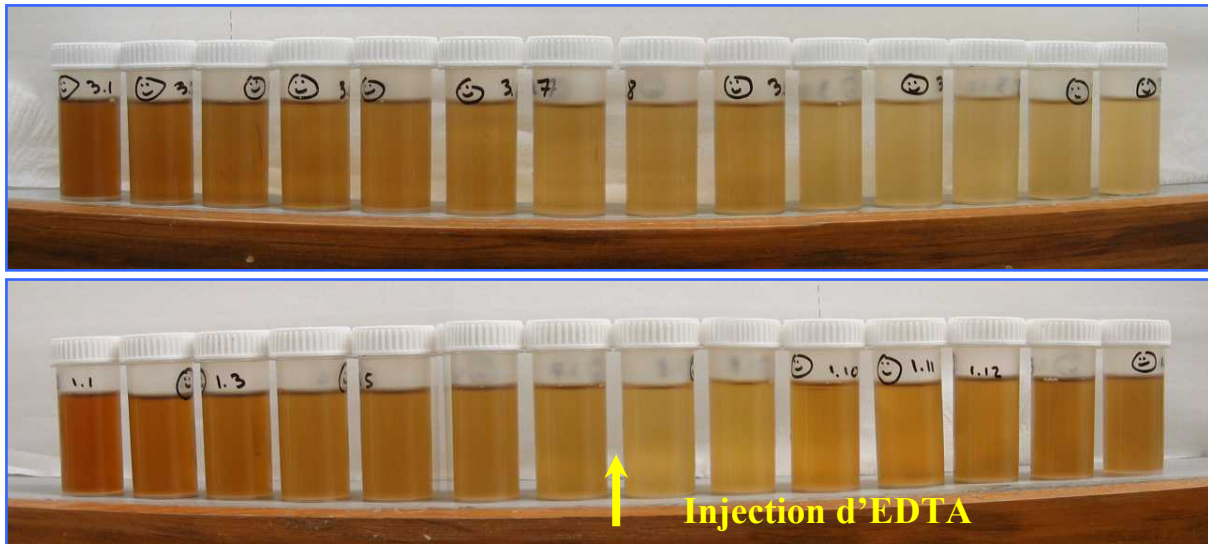
Cependant, même si celle-ci est toujours conséquente, il faut rappeler qu'elle est recueillie dans un bassin de rétention qui redistribue ce bore aux arbres durant leur période d'activité estivale.

***Toutes ces observations convergent à surligner l'importance d'une gestion appropriée en vue d'optimiser le développement végétal et par conséquent leurs effets sur l'assèchement et la détoxification du site.***

### ***III.1.c. Colonnes sciures***

➤ ***Constatations visuelles***

Le tassement du substrat s'est avéré limité, ceci peut s'expliquer par le fait que la sciures avait déjà été tassée lors de sa disposition dans la colonne. Et ce, dans le but de reproduire les conditions présentes à Kopu, mais également pour limiter la formation de chemins préférentiels. En effet, ce phénomène aurai pu court-circuiter la percolation homogène de l'eau et ainsi engendrer de fausses mesures.

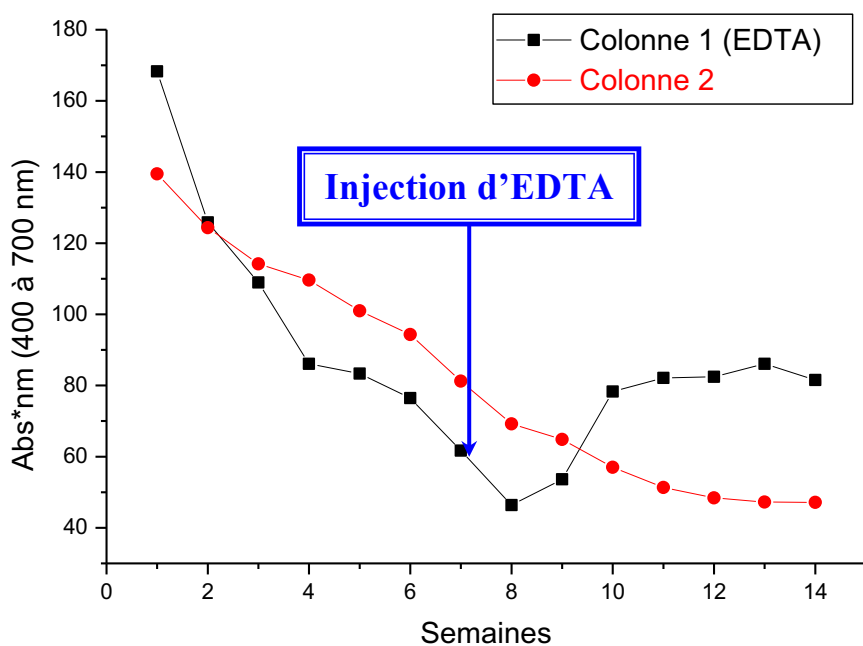


**Figure 23**

***Evolution de la coloration des lixiviats issus des colonnes à sciures. En haut : colonne 2, en bas : colonne 1 (EDTA).***

Comme en témoigne la *figure 23*, les lixiviats deviennent de plus en plus clair au fur et à mesure du lessivage du substrat. Cette teinte brunâtre est sans aucun doute due à la présence d'acides humiques et de métaux tel que le chrome, le cuivre et le fer. Cela pourrait montrer qu'une partie de ces composés se libèrent facilement lors des premiers lessivages, puis subsistent une proportion plus liée au substrat qui se relargue plus difficilement. Cependant, cette teinte brune réapparaît après l'injection d'EDTA (Acide Ethylènediaminetétraacétique). L'EDTA permettrait donc un meilleur lessivage en cassant les liaisons qui maintiennent ces composés au substrat.

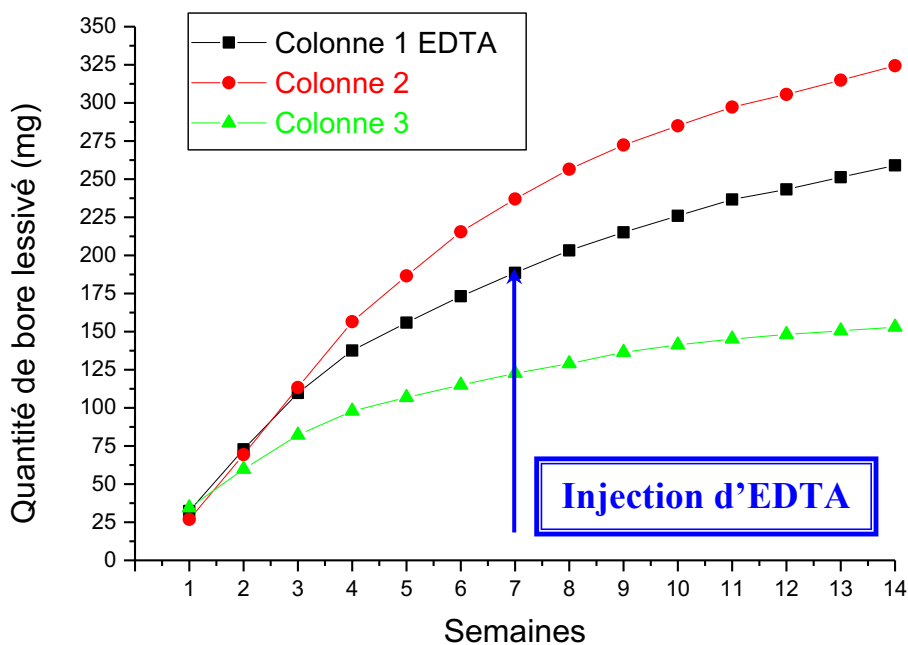
La *figure 24* appuie cette hypothèse et montre bien l'effet de l'EDTA qui se manifeste au bout de deux semaines après l'injection, avec une coloration de lixiviats plus prononcée, qui, au fur et à mesure des lessivages tendra à disparaître. Cela permet de dire que l'activité photosynthétique de la flore vivant dans les eaux teintées par ces lixiviats se rétablirait au fur et à mesure des lessivages. Cependant, l'ajout d'EDTA risque d'obscurcir à nouveau le cours d'eau et limiter la photosynthèse.



**Figure 24**

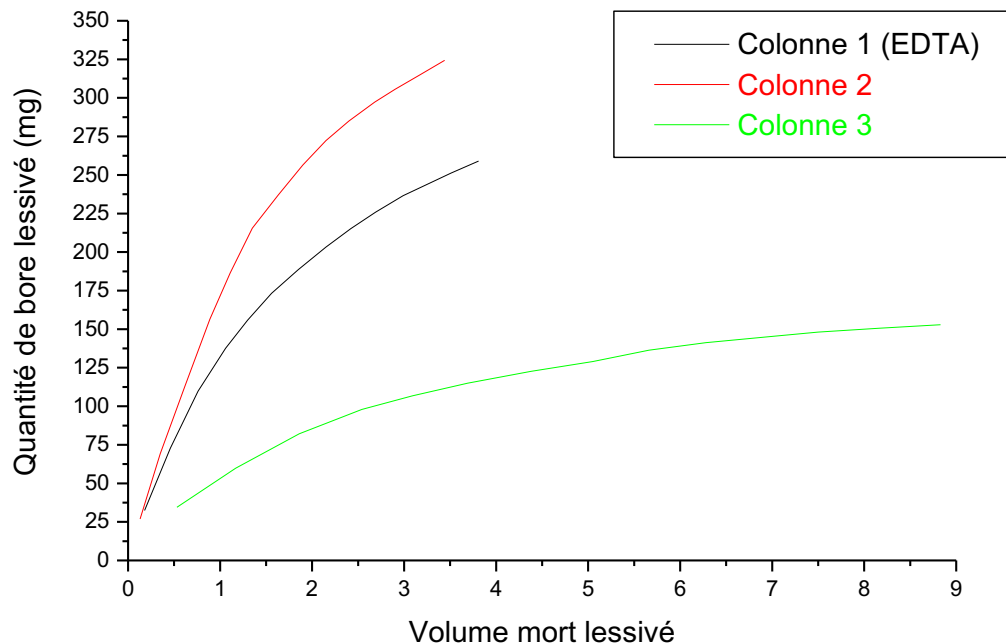
*Intégration de l'absorbance entre 400 et 700 nm (activité photosynthétique). Evolution au cours du temps.*

➤ *Lessivage du bore*



**Figure 25**

*Quantité de bore dans les eaux de lessivage des colonnes.*



***Figure 26***

***Quantité de bore dans les eaux de lessivage des colonnes en fonction du nombre de volume mort lessivé.***

La *figure 25* montre que le lessivage du bore suit une tendance exponentielle. Ceci est surtout constaté avec la colonne 3 (2 fois plus petite que les 2 autres) dont le nombre de volume mort lessivé est bien plus élevé (*cf. figure 26*). Comme présumé, le bore est très mobile et est donc facilement lessivé.

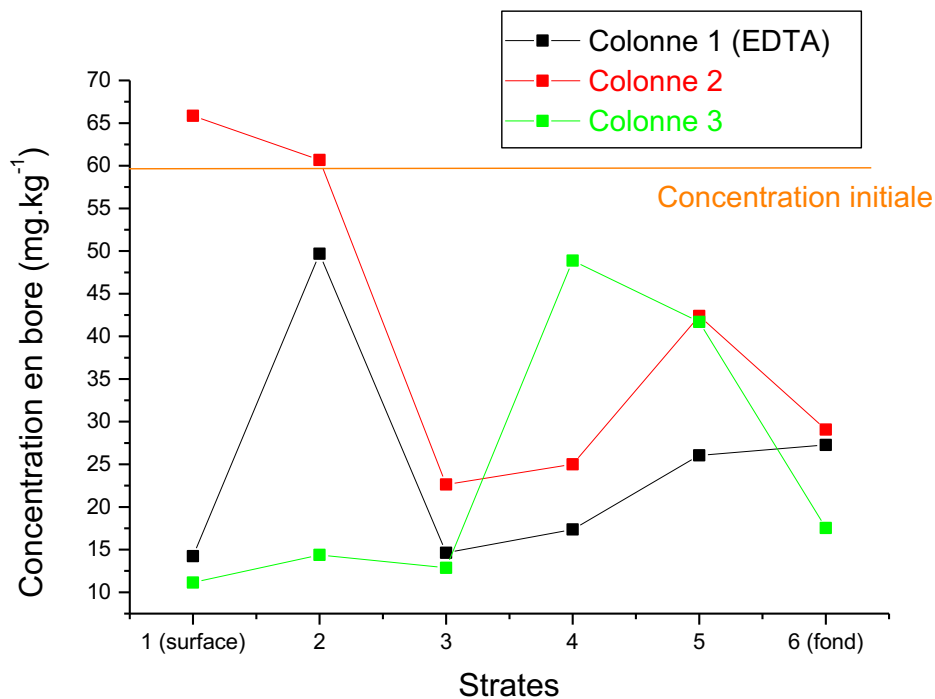
Cependant il en subsiste toujours au sein de la colonne.

➤ ***Organisation du bore dans les différentes strates du substrat***

Vu les résultats de cette expérience (*cf. figure 27*), il est possible de dire que ceux-ci sont peu probables. Ces résultats absurdes viennent sans doute du fait de la faible masse de sciures analysés (0,5 g) et qu'il est fort possible que certaines de ces sciures soit très contaminées et d'autres non.

Ainsi, pour limiter cette erreur il faudrait moudre ces sciures et les mélanger dans le but de prélever 0,5 g plus représentatif, afin de former l'échantillon destiné à l'analyse.

Dans tous les cas, il est impossible d'affirmer quoi que ce soit à partir de ces résultats.



**Figure 27**

*Evolution de la concentration en bore dans les différentes strates des colonnes.*

➤ **Bilan**

	Bilan en bore (mg)			Bilan en bore (%)		
	COL 1	COL 2	COL 3	COL 1	COL 2	COL 3
INITIAL	1076	1041	452	100	100	100
FINAL						
Lessivé	259	324	153	24	31	34
Substrat	454	722	187	42	69	41
Total	713	1047	340	66	101	75
INIT-FINAL	364	-6	112	34	-1	25

**Table 5**

*Bilan en bore en pourcentage et en masse des différents colonnes à sciures.*

Les résultats contenus dans cette *table 5* souligne la forte mobilité du bore. En 14 semaines près d'un tiers de la masse initiale a été lessivée.

Il faut spécifier que la balance est faussé par les résultats des analyses des sciures à la fin de l'expérimentation, dont les résultats sont improbables.

*Ce qu'il faut retirer de cette expérience c'est que le bore est facilement lessivable et que l'EDTA n'a absolument aucun effet sur la bio-disponibilité du bore.*

Cependant cet agent chélateur à un effet sur la coloration des lixiviats en les assombrissant, sans doute dû à la libération de tannins et d'autres composés comme certains métaux lourds.

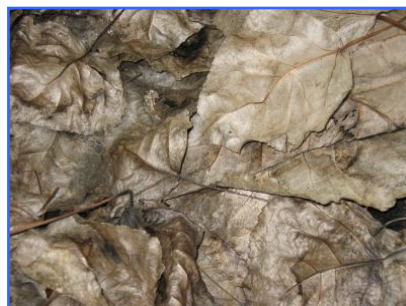
### **III.1.d. Colonnes feuilles**

#### ➤ *Evolution de la dégradation des feuilles*

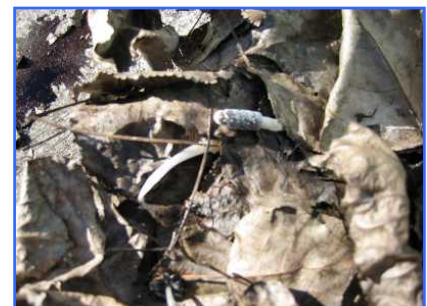
Visuellement, il a été noté que les feuilles après un stade où elles brunissent rapidement, deviennent de plus en plus noires (cf. figure 28). Ce changement de coloration est accompagné de l'apparition de moisissures blanches et cotonneuses à l'intérieur et à la base de la couche de feuilles. Au bout de quelques semaines, apparaît également des insectes, notamment des moucheron et des moustiques qui pullulent à la surface de ces feuilles en décomposition.



**Avril 2003**



**Juin 2003**

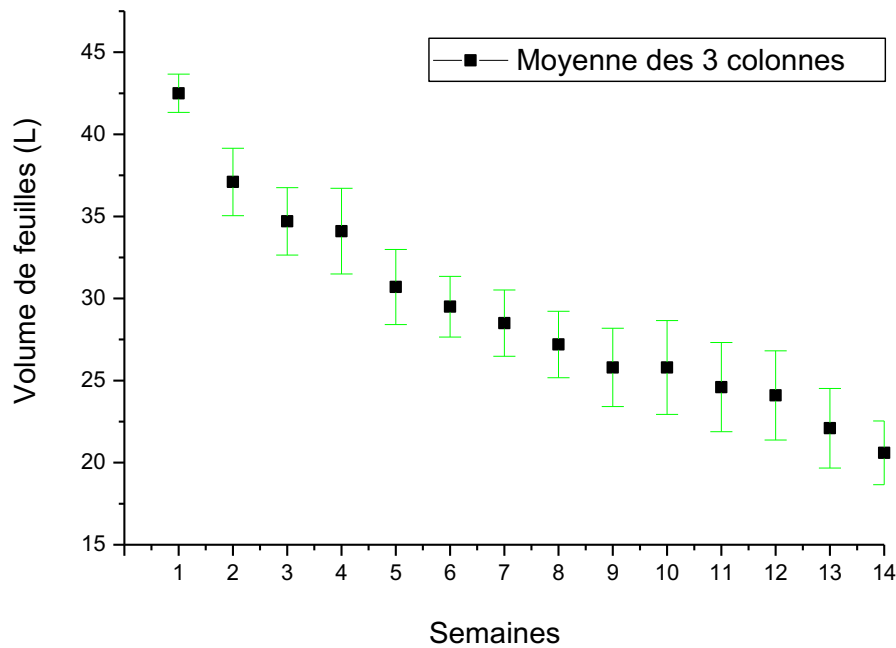


**Août 2003**

**Figure 28**

***Evolution de l'aspect visuel des feuilles de surface lors de leur décomposition.***

Tout au long de ces transformations, les feuilles se tassent et donc la couche de feuilles s'amincie (cf. figure 29). Cette compaction est en moyenne de l'ordre de 50 % du volume initial en feuille au bout de 14 semaines. Cette diminution s'explique en partie par la perte de matière organique lors de la décomposition. Celle-ci a été de l'ordre de 44,6 % de la biomasse initiale.



***Figure 29***

***Compaction des feuilles au fur et à mesure de leur dégradation.***

Il a également été constaté que les lixiviats recueillis passaient d'un état visqueux et brun clair à une coloration de plus en plus foncée jusqu'à devenir rapidement complètement noire (cf. figure 30).



***Figure 30***

***Evolution de la coloration des lixiviats au cours de la décomposition des feuilles.***

Au bout de 14 semaines d'expérimentation les colonnes ont été démantelées et la couche de feuilles inspectée afin d'observer le déroulement de la dégradation (cf. figure 31). Les constatations sont qu'au fur et à mesure de la progression dans la couche, l'humidité augmente jusqu'à rendre les strates du fond complètement saturées et anaérobiques. Dans toute la couche de feuilles il est possible de déceler des moisissures ainsi que des

champignons et quelques vers. Les feuilles ne sont pas totalement décomposées et la majeure partie d'entre elles ont conservées leur forme.

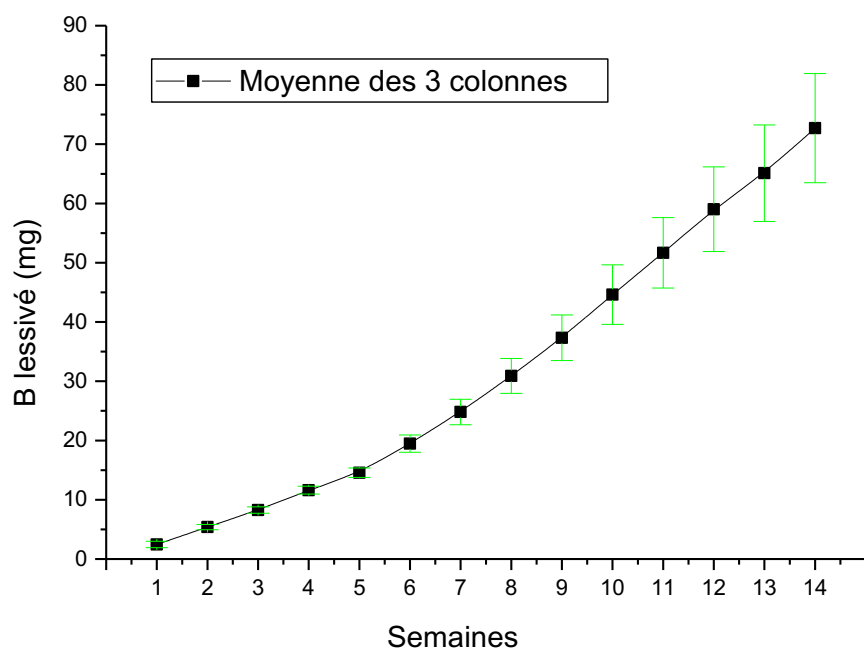


**Figure 31**

*Composition de la couche de feuilles après 14 semaines d'expérimentation.*

➤ **Bore dans les lixiviats**

La perte de biomasse contenant le bore devrait affecter la concentration en cet élément dans les lixiviats (*cf. figure 32*).



**Figure 32**

*Concentration moyenne en bore contenu dans les lixiviats au cours de la décomposition des feuilles.*

A partir de ce graphe, il est possible de déceler un point d'inflexion au bout de la 5<sup>ème</sup> semaine. Avant celle-ci, le relargage se fait faiblement, ceci correspond à l'initiation de la décomposition. Au-delà de cette 5<sup>ème</sup> semaine, le bore est relargué en plus grande quantité et d'une manière plus ou moins linéaire. Cependant la quantité de bore restituée reste assez faible au bout de ces 14 semaines, entre 70 et 80 mg, comparé au 560 mg initial contenu dans les feuilles.

➤ **Bilan**

**Bilan en bore (%)**

	Moyenne	Stdev
INIT	100.00	0.00
FINAL		
Feuilles	86.66	1.72
Lixiviats	14.55	0.87
Total	101.21	2.59
INIT-FINAL	-1.21	2.59

**Bilan en bore (mg)**

	Moyenne	Stdev
INIT	560	0
FINAL		
Feuilles	485	10
Lixiviats	81	5
Total	567	15
INIT-FINAL	-7	15

**Table 6**

***Bilan en bore en pourcentage et en masse des différentes colonnes à feuilles.***

La *table 6* confirme que la part de bore relarguée au bout de 14 semaines est faible, de l'ordre de 15 % de la masse initiale contenue dans les feuilles.

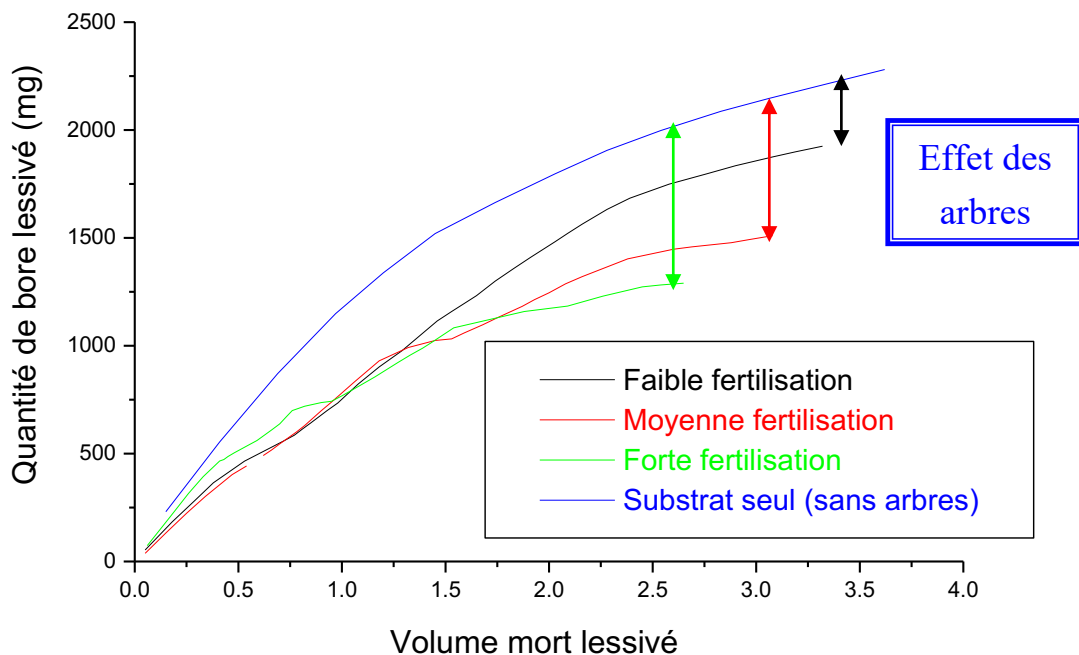
***Ce qu'il faut retenir de cette étude est que le bore n'est restitué que lentement, du moins au début de la décomposition des feuilles.***

Bien sûr, il ne s'agissait pas là d'une réelle dégradation des feuilles avec tous ces acteurs de la faune et de la flore. De plus, elle ne s'est déroulée que pendant 14 semaines et l'eau versée correspond à des précipitations annuelles de l'ordre de 225 mm/an, soit 5 à 6 fois moins que sur Kopu (plus de 1150 mm/an). Mais un arrosage plus prononcé n'aurait que faussé d'avantage les résultats en rendant les colonnes anaérobiques.

## III.2. Bilan et Perspectives

### III.2.a. Mise en relation des différentes expérimentations

#### ➤ Relations Colonnes sciures et lysimètres



**Figure 33**

*Comparaison de la quantité de bore lessivé en fonction du nombre de volume mort lessivé entre la moyenne des colonnes à sciures et les différents types de lysimètres.*

Cette *figure 33* est très intéressante dans le sens où elle permet de mettre en évidence l'action des arbres sur le lessivage du bore.

La comparaison entre les données du lysimètres et celles des colonnes avec le substrat nue, indique l'effet des arbres sur la quantité de bore lessivé. Ainsi, la comparaison des deux extrêmes : substrat nu et substrat planté hautement fertilisé, montre que pour le même nombre de volume mort ; l'effet des arbres sur la diminution de la quantité de bore dans les eaux de lessivage s'élève à 26 %. Sans parler, que ce résultat ne tient pas compte de l'impact des arbres sur la diminution du volume de lixiviats.

L'effet des arbres sur le lessivage est donc important et est considérablement amélioré par l'addition d'amendements en quantité suffisante.

D'autre part, l'ajout d'agent chélateur ne semble avoir aucun effet sur la solubilité du bore, mais agit certainement sur d'autres composés à l'origine de la coloration des lixiviats. Il ne semble donc pas utile, bien au contraire, d'utiliser l'EDTA pour améliorer la phytoextraction.

#### ➤ *Relations lysimètres - Kopu*

Les constatations tirées de l'expérience des lysimètres permettent d'optimiser la phytoremédiation du site de Kopu.

Les lysimètres ont notamment permis de déterminer l'effet de l'apport de fertilisant aux arbres. Ainsi, la concentration à apporter a été déterminée et appliquée aux arbres de Kopu afin d'améliorer leur croissance et par conséquent leur efficacité. L'effet des arbres sur l'assèchement du substrat et la minimisation de la quantité de lixiviats produits ont ainsi pu être optimisés, tout comme l'absorption des métaux lourds.

D'ailleurs, le suivi des arbres des lysimètres a permis de constater les forts prélèvements de bore et leur accumulation dans les feuilles. Ce qui a abouti à l'élaboration d'un modèle permettant de prévoir la concentration du bore dans les feuilles au cours du temps. Les prévisions données par ce modèle ont pu être confrontées aux valeurs constatées sur le site, et une forte corrélation entre ces deux parties a permis de vérifier le modèle.

Cela permet également de savoir comment s'effectuent les différents mouvements du bore, et à terme prévoir quand la concentration en bore descendra en dessous des normes en vigueur.

Pour l'instant, l'utilité réside surtout à constater la diminution des épisodes de lixiviation durant les périodes pluvieuses estivales.

Les lysimètres permettent ainsi de prévoir ce qu'il se passe sur le site et permet d'émettre des prévisions sur ce qu'il adviendra de Kopu.

#### ➤ *Relations colonnes feuilles - Kopu*

Le bilan est que le relargage du bore par les feuilles se fait lentement. Par conséquent, quand celle-ci se fera l'hiver, elle ne présentera pas un danger pour les cours d'eau avoisinant. En effet, la majeure partie du bore ne sera relargué que durant l'été, au moment où les arbres sont effectifs et seront à même de réabsorber ce bore. Donc, même si une stratégie d'extraction du bore n'est pas envisagée, ce n'est pas très grave puisque le risque de contamination du cours d'eau est moindre.

Dans ce cas, il s'agira d'une phytostabilisation. Cette solution reste donc possible et envisageable.

L'alternative est de récolter la biomasse et de l'éloigner du site, dans le but de retirer le bore. Ainsi, à terme, il sera possible de réutiliser ces terres pour un autre usage.

***Le but de toutes ces expériences a bien entendu été de prévoir ce qu'il se passait et se passera lors de la phytoremédiation du site, et à optimiser ce processus.***

*Tous ces résultats outre avoir été appliqués à Kopu peuvent être généralisés et être utilisés en vue de la phytoremédiation d'autres sites contaminés.*

### **III.2.b. Gestion**

Afin d'appréhender le type de gestion à appliquer au site, un logiciel de simulation, Phyto.DecisionSupportSystem (Robinson et al. 2003), est utilisé afin de tester plusieurs configurations.

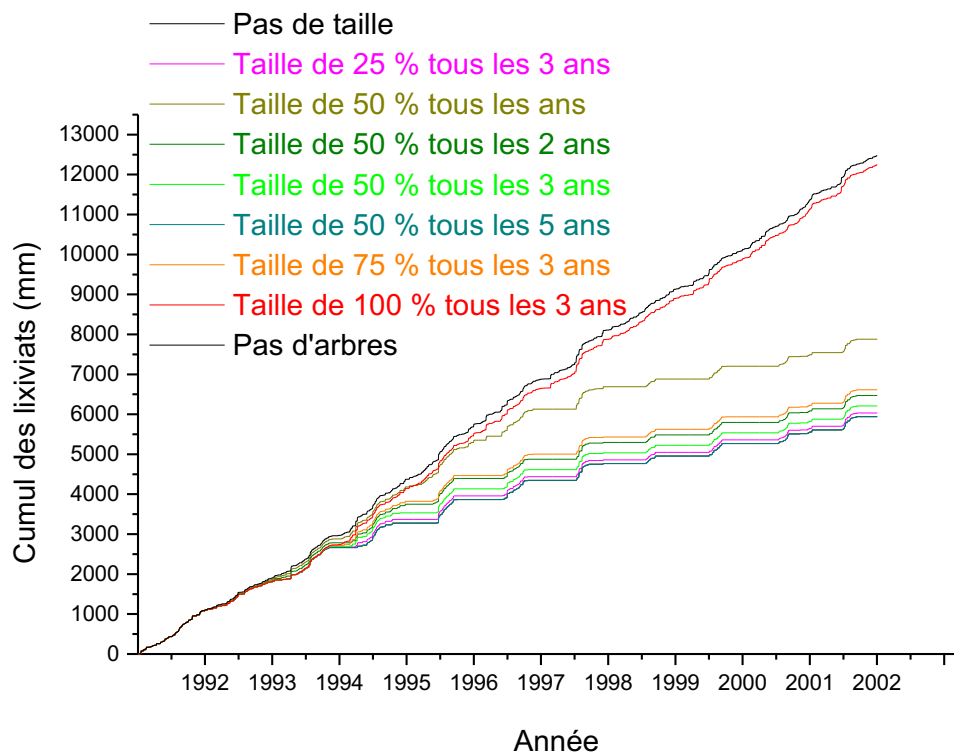
Après avoir entré tous les paramètres concernant le site ; climat (précipitations,...), caractéristiques du substrat et des contaminants, croissance des arbres ; il est alors possible de configurer le type de gestion choisi. La gestion du site consiste à tailler un certain pourcentage de la biomasse végétale et ce à des intervals de temps déterminés. Ainsi, en agissant sur ces deux paramètres, le programme prévoit ce qu'il adviendra du site, en matière de lessivage, d'évolution de la biomasse végétale et de la disparition du bore.

Outre les différents graphiques qu'il donne au sujet de ce qu'il se passe pour la configuration testée, il est possible de récupérer les données et de les recouper avec celles d'autres configurations afin de les comparer. Ainsi il est possible de déterminer les stratégies qui aboutissent aux meilleurs résultats.

A savoir, que la gestion attendue doit répondre à un compromis entre la plus grande quantité de bore extraite du site, et la production de moins d'eaux de lessivage possible. La quantité de bore extraite du site correspond à la biomasse comprenant le bore qui est retirée, en l'occurrence par les tailles. Donc plus la quantité de biomasse coupée venant d'un arbre ayant accumulé beaucoup de bore est importante, plus la quantité de bore retirée du site sera élevée. D'autre part, la quantité de lixiviats est liée à l'avancement de la phase de croissance de l'arbre. Bien évidemment, plus sa biomasse est élevée et surtout sa surface foliaire, plus l'évapotranspiration sera grande et par conséquent il y aura moins de lessivage.

Mais, il faut garder à l'esprit que ces lixiviats sont récupérés dans un bassin de rétention qui a pour but de redistribuer ce liquide pendant la période estivale, au moment où le végétal peut les consommer. D'ailleurs un autre rôle de cette irrigation est d'apporter du bore dans la couche superficielle où la concentration en bore s'amenuise au fur et à mesure des prélèvements par les plantes. Il s'agit là de rendre accessible du bore indisponible au système racinaire. D'autre part, le tassement de la couche superficielle rend les strates inférieures du sol accessible à la plante. Ainsi, par ces deux mécanismes, la majorité du bore du site pourra être extraite ou au pire stabilisée.

C'est donc un équilibre à trouver.



**Figure 34**

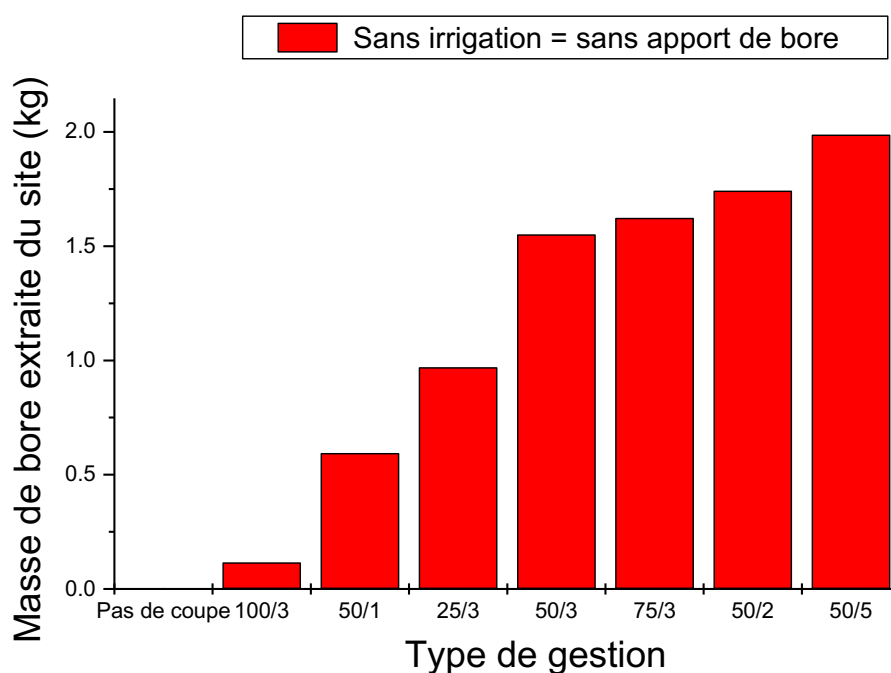
*Evolution de la quantité d'eaux de lessivage récupérée selon différents types de gestion. Prévisions basées sur les données météorologiques de Thames recueillies au cours des 10 dernières années.*

La figure 34 permet de constater qu'une taille trop radicale ou/et trop fréquente engendre beaucoup de lixiviats. Ceci peut s'expliquer par le fait que la biomasse n'a pas le temps de croître suffisamment afin de consommer la solution. Dans l'objectif de limiter ces lixiviats, il faut donc envisager une coupe de l'ordre de 25 à 75 % tous les 2 à 5 ans. Maintenant, il faut trouver une gestion parmi celles-ci qui permet d'extraire un maximum de bore.

Sur les figures suivantes, 35 et 36, le premier chiffre des coordonnées d'abscisse représente le pourcentage de taille et le second, la fréquence de coupe. Ainsi 100/3 signifie, 100 % de la biomasse retirée tous les 3 ans.

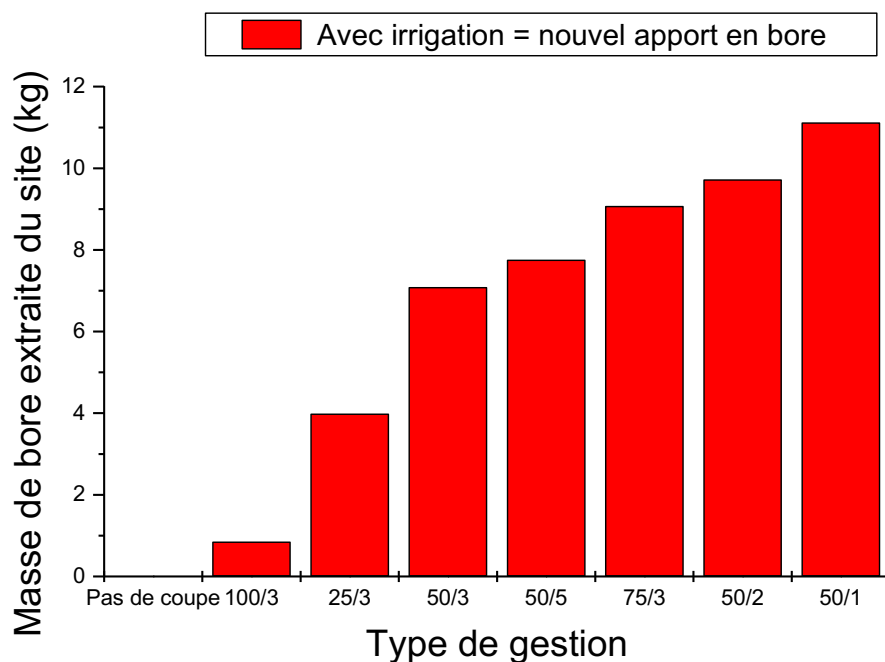
D'une manière générale, la figure 35 indique que d'une part, plus la fréquence de coupe est courte, moins la quantité de bore soustraite du site est importante.

D'autre part, plus le pourcentage de coupe est élevé, plus la masse de bore extraite sera conséquente. Une fois encore, une coupe trop exagérée, ne donne aucun résultat, le végétal ayant des difficultés à se rétablir. Toutefois, cette quantité de bore ne varie pas proportionnellement à la biomasse retirée. Il ne faut pas oublier qu'au fur et à mesure des années la quantité de bore diminue.



**Figure 35**

*Histogramme de la quantité de bore retirée du site en fonction des différentes gestions envisagées.*



**Figure 36**

*Histogramme de la quantité de bore retirée du site en fonction des différentes gestions envisagées, en tenant compte de l'irrigation des eaux de lessivages contenant du bore.*

La *figure 36* tient compte de l'irrigation des eaux de lessivages issues du substrat qui a pour rôle de réapprovisionner la strate superficielle déficitaire, en bore provenant des basses couches de la décharge.

Dans ce cas, la masse de bore extraite est tout simplement proportionnel à la quantité de biomasse retirée ; du moins pendant un gros laps de temps, tant que les eaux de lessivage contiendront une forte teneur en bore. Il s'agit alors de trouver un compromis entre le maximum de végétal retiré, une fréquence assez courte, le tout permettant une croissance maximale de la plante entre ces coupes.

Ainsi, si les arbres sont taillés de 50 à 75 % et ce à raison comprise entre 1 et 3 ans ; il sera alors possible de récupérer un maximum de biomasse, donc de bore.

***En récapitulatif, dans le but de répondre à la minimisation du lessivage et de l'optimisation du bore retiré du site, une gestion du type coupe de 50 % de la biomasse tous les 3 ans pourrai convenir.***

***Cependant, une meilleure solution serai d'alterner les coupes, par exemple, une rangée sur 2 tous les 2 ans. Ainsi une moitié de la végétation restera complètement active et limitera le lessivage, tandis que l'autre moitié, permettra de retirer le bore et se rétablira.***

### ***III.2.c. Revalorisation du végétal***

La solution la plus radicale est d'incinérer cette biomasse retirée du site et produire de l'énergie. Cependant des alternatives pourraient être trouvées afin de revaloriser d'une part la biomasse mais aussi ce qu'elle contient.

Le feuillage des peupliers ou des saules est bien souvent utilisés comme fourrage dans l'agriculture néo-zélandaise. Il faut donc déterminer si les quantités stockées en métaux lourds ne sont pas trop importantes et qu'elles n'entraînent aucun risque de toxicité pour le bétail. Il est donc nécessaire d'évaluer ce risque et de déterminer le devenir de cette biomasse.

Les espèces n'ont pas toutes la même capacité à accumuler des éléments au sein de leurs tissus. Afin de déterminer les aptitudes et le devenir de quelques espèces pouvant être adaptées à la phytoremédiation, des tests ont été effectués.

Il est impossible d'avoir une bonne vision de la part quantitative accumulée par les plantes de Kopu, puisque la composition du substrat y est très hétérogène. C'est pourquoi, il faut tester ces variétés une fois mises dans les mêmes situations environnementales (composition du substrat, vent, luminosité, humidité) afin de déterminer les plus performantes, et les quantités accumulées.

L'application de ce type d'étude, outre la sélection des meilleurs individus pour la phytoremédiation ; est de connaître qu'elles sont les quantités en différents métaux lourds accumulés dans le végétal et ainsi savoir le type de revalorisation qu'il est possible d'en faire. Cette étude a eut lieu dans les nurseries de HortResearch où tous les clones testés ont été placés dans les mêmes conditions expérimentales, c'est à dire même sol, même arrosage. Les composés suivis durant cette étude ont été le bore (B), le cadmium (Cd), le cobalt (Co), le cuivre (Cu), le fer (Fe), le manganèse (Mn) et le zinc (Zn).

Ainsi 5 clones de 10 espèces ont été mises à l'épreuve (cf. table 8). Il s'agit :

- D'une graminée,
- 2 saules hybrides : *Kinuyanagi*, *Booth*
- 7 hybrides de peupliers : *Yeogi*, *Kawa*, *Veronese*, *Crows Nest*, *Shinsey*, *Toa*, *Yunnan*.

Nom Commun	Nom Latin
<i>Chinese poplar (Yunnan)</i>	<i>Populus yunnanensis</i>
<i>Shinsei</i>	<i>Populus nigra x manimowic</i>
<i>Kawa</i>	<i>Populus deltoides x yunnanensis</i>
<i>Veronese</i>	<i>Populus deltoides x nigra</i>
<i>Crows nest</i>	<i>Populus euramericana x nigra</i>
<i>Toa</i>	<i>Populus euramericana x yunnanensis</i>
<i>Yeogi</i>	<i>Populus alba x glandulosa</i>
<i>Kinuyanagi</i>	<i>Salix kinuyanagi</i>
<i>Booth</i>	<i>Salix purpurea</i>
<i>Pasture</i>	<i>Agrostis tenunis</i>

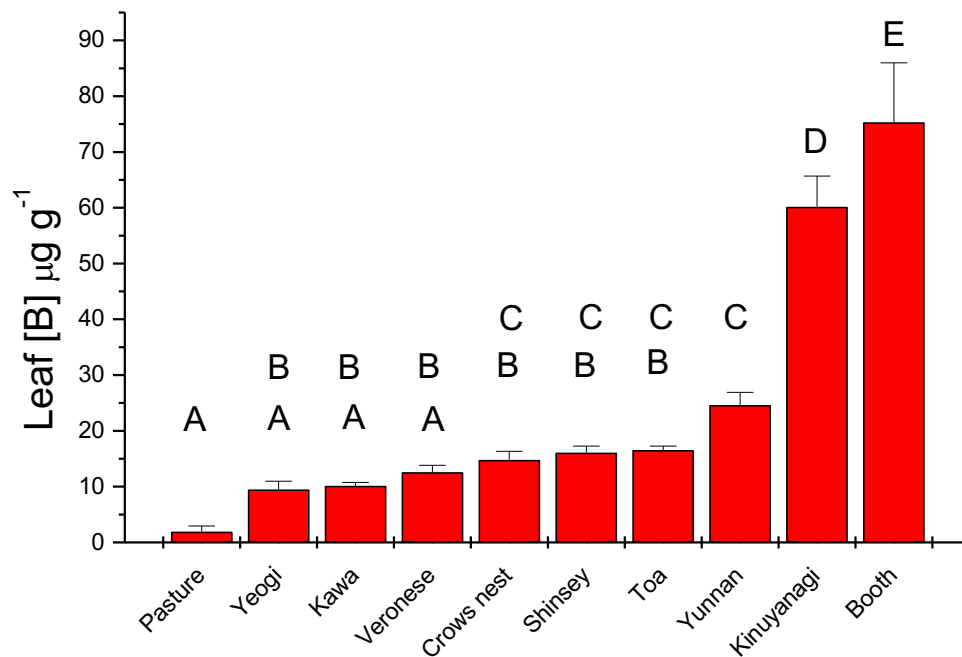
**Table 7**

***Dénomination des différentes espèces analysées durant cette expérience.***

Après avoir échantillonné les feuilles et le sol, ces échantillons sont analysés, le tout de la même manière que les expériences précédentes, et les données soumises aux statistiques (cf. annexe 4) afin d'en retirer des conclusions.

Après traitement des données, les constatations sont les suivantes :

- *L'herbe n'accumule presque rien et ce pour tous les éléments.*
- *Les concentrations accumulées en cadmium, en particulier pour les saules, sont trop élevées (entre 3,5 et 2 mg.kg<sup>-1</sup> de matière sèche) et présentent donc un risque pour le bétail et par conséquent pour ses consommateurs.*
- *Les micro-éléments testés dont le Co, Zn, Mn, B, Cu ne présentent pas de risque et pourrai être utilisés pour les parcelles déficientes en ces éléments.*



**Figure 37**

*Aptitudes des clones vis à vis de l'accumulation du bore.*

Par ailleurs, la *figure 37* montre que les hybrides *Kawa* et *Yeogi* sélectionnés sur *Kopu* accumulent peu de bore comparé aux autres clones. Cependant ils se sont adaptés aux conditions du site et ont présenté une croissance extraordinaire. Au contraire, la croissance des clones de saules, *Kinuyanagi* et *Booth*, a été très limitée. Ils n'ont pas réussi à s'adapter au site. Donc, même si ces derniers sont capables d'accumuler beaucoup de bore, ils ne présentent pas d'intérêt pour la phytoremédiation du site puisqu'ils ne produisent pas de biomasse, ce qui signifie peu de bore extrait. En l'occurrence, cette forte concentration en bore dans leur tissu doit être à l'origine de leur dépérissement.

La conclusion de cette étude est que la biomasse retirée ne contient pas que des micro-éléments qui peuvent être bénéfiques mais elle présente aussi du cadmium à des quantités non négligeables qui pourraient affecter ses consommateurs.

***Il ne faut donc pas utiliser la biomasse provenant de *Kopu* pour alimenter le bétail.***

***Cependant, une alternative consisterai à utiliser les micro-éléments accumulés en tant que complément pour les vergers par exemple, qui en sont bien souvent déficitaire.***

Dans cet optique, il faudra utiliser du végétal provenant des variétés de peupliers dites *Yeogi* et *Crows Nest* qui fournissent le plus de Zn, Cu, Co avec un prélèvement minimum de Cd.

## CONCLUSION

La phytoremédiation du site de Kopu est un succès. Mais ceci est passé par 3 années d'études qui auront permis de mettre en évidence une sorte de démarche afin d'aboutir à un traitement efficace. Pour cela les études en lysimètres, les différents tests de dégradation de feuilles ou de lessivage du bore auront été indispensables.

Ainsi, les rôles des peupliers sur la réduction du volume d'eaux de lessivage et de la détoxification du milieu ont pu être mis en évidence. L'importance d'une bonne gestion tant au niveau de la sélection des arbres vis à vis de leurs aptitudes, que de l'apport de fertilisant s'est avérée cruciale. En effet, les clones sélectionnés ont été capables d'accumuler de fortes concentrations en bore dans leurs feuilles et de consommer un maximum d'eau.

Même si la phytostabilisation pourra être tolérable, une phytoextraction est à envisager si le but est de réutiliser ces terres à d'autres fins.

Dans ce cas, il faudra soustraire la biomasse végétale ayant accumulée le bore du site. Il s'agira alors d'extraire la plus grande masse de polluant du site tout en limitant le volume d'eaux de lessivage.

Par la suite, cette biomasse peut soit être incinérée et produire de l'électricité, soit être utilisée en tant que compléments pour les vergers déficitaires en micro-éléments. Mais elle ne pourra en aucun cas constituer du fourrage pour le bétail, au risque de contaminer la chaîne alimentaire par la présence de cadmium en trop forte quantité.

Toutes ces études ont permis d'optimiser la phytoremédiation du site. Ainsi, l'impact de la décharge de Kopu sur le cours d'eau environnant est désormais plus limité et va sérieusement chuter d'ici quelques années.

Dans une dizaine d'années, le site pourra même être rendu à la végétation native.

D'autre part, ces connaissances acquises vont être utilisées pour initier le traitement d'autres sites similaires. Ainsi la décharge de l'industrie du bois de Putaruru, détenue par une grosse société forestière néo-zélandaise, Carter Colt Harvey Limited, devra débiter très prochainement par une phase de sélection des clones les plus adaptés à ce nouvel environnement.

Même si la phytoremédiation en est à ses balbutiements, elle est efficace et suscite donc un intérêt certain. Les industriels ne s'y trompent pas et sont en particulier séduit par le faible coût du traitement et par l'image de technologie verte qu'elle véhicule. Elle pourra également constituer une solution envisageable pour le tiers-monde qui ne dispose pas de moyen pour traiter ces terres pollués, et pourquoi pas à terme utiliser ces terres à des fins agricoles en profitant de la couche d'humus formé.

Le marché est considérable et laisse entrevoir un bel avenir pour la phytoremédiation.

## BIBLIOGRAPHIE

Anderson CWN, Brooks RR, Stewart RB, Simcock R (1998) Induced hyperaccumulation of gold in plants. *Nature* **395**, 553-554.

Andrews ED (1966) Cobalt concentrations in some New Zealand fodder plants grown in cobalt-sufficient and cobalt-deficient soils. *New Zealand Journal of Agricultural Research* **9**, 29-38.

Andrews ED, Stephenson BJ, Anderson J, Faithful WC (1958) The effect of length of pastures on cobalt deficiency disease in lambs. *New Zealand Journal of Agricultural Research* **31**, 125-139.

Baker AJM, McGrath SP, Sidoli CMD, Reeves RD (1994) The possibility of in situ metal decontamination of polluted soils using crops of metal-accumulating plants – a feasibility study. *Resource Conservation and Recycling* **11**, 41-49.

Bañuelos GS, Shannon MC, Ajwa H, Draper JH, Jordahl J, Licht L (1999) Phytoextraction and accumulation of B and selenium by poplar (*Populus*) hybrid clones. *International Journal of Phytoremediation* **1**(1), 81-96.

Blaylock MJ (2000) Field demonstrations of phytoremediation of Pb contaminated soils. *In: Phytoremediation of contaminated soil and water*, (Eds. N Terry, G Bañuelos) pp 1-12. (Lewis Publishers, Boca Raton, FL)

Blaylock MJ, Salt DE, Dushenkov S, Zakharova O, Gussman C, Kapulnik Y, Ensley BD, Raskin I (1997) Enhanced accumulation of Pb in Indian Mustard by soil-applied chelating agents. *Environmental Science and Technology* **31**, 860-865.

Bramley RGV (1990) Cadmium in New Zealand agriculture. *New Zealand Journal of Agricultural Research* **33**, 505-519.

Brooks RR (1998) Phytoremediation by volatilisation. *In: Plants that Hyperaccumulate Heavy Metals: their role in phytoremediation, microbiology, archaeology, mineral exploration and phytomining*, (Ed. RR Brooks) pp 289-312. (CAB International: Wallingford, UK)

Brooks RR, Lee J, Reeves RD, Jaffré T (1977) Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants. *Journal of Geochemical Exploration* **7**, 49-77.

Chaney RL, Malik KM, Li YM, Brown SL, Brewer EP, Angle JS, et al. (1997) Phytoremediation of soil metals. *Curr Opin Biotechnol* **8**, 279-284.

Dix ME, Klopfenstein NB, Zhang JW, Workman SW, Kim MS (1997) Potential use of *Populus* for phytoremediation of environmental pollution in riparian zones. USDA Forest Service General Technical Report. RM-GTR-297.

Douglas GB, Bulloch BT, Foote AG (1996) Cutting management of willows (*Salix spp.*) and leguminous shrubs for forage during summer. *New Zealand Journal of Agriculture Research* **39**, 175-184.

Dushenkov V, Kumar PBAN, Motto H, Raskin I (1995) Rhizofiltration: the use of plants to remove heavy metals from aqueous streams. *Environmental Science and Technology* **29**(5), 1239-1245.

Ferro AM, Rieder JP, Kennedy J, Kjelgren R (1997) Phytoremediation of groundwater using poplar trees. *In: Phytoremediation*, (Eds. CA Thibeault and LM Savage) pp 201-212. (International business communications inc.: Southborough)

Glass DJ (1999) U.S. and International Markets for Phytoremediation, 1999-2000. (D.Glass and Associates, Inc.: Needham, MA)

Greger M, Landberg T (1999) Use of willow clones with high Cd accumulating properties in phytoremediation of agricultural soils with elevated Cd levels. *In: Contaminated soils: 3<sup>rd</sup> International Conference on the Biogeochemistry of Trace elements*, (Ed. R Prost). Paris, France, 15-19 May, 1995. Institut National de la Recherche Agronomique (INRA); pp 505-511.

Greger M, Landberg T (1999) Use of willow in phytoextraction. *International journal of phytoremediation* **1**(2), 115-123.

Grundon NJ (1987) Hungry crops: A Guide to Nutrient Deficiencies in Field Crops. Queensland Department of Primary Industries, Brisbane, Australia.

Gu and Lowe LE (1990) Studies on the adsorption of boron on humics acids Can. *Soil science* **70**, 305-311.

Gudin C, Syrratt WJ (1975) Biological aspects of land rehabilitation following hydrocarbon contamination. *Environment Pollution* **8**, 107-112.

Hathaway RL (1986) Short-rotation coppiced willows for sheep fodder in New Zealand. *New Zealand Agriculture Science* **20(3)**, 140-142.

Heilman PE, Inckley TM, Roberts DA, Ceulemans R (1996) Production physiology, (Eds. RF Stettler et al.) *Biology of Populus and its implications for management and conservation*. (NRC research press: Ottawa)

Hinchman RR, Negri MC, Gatliff EG (1996) Phytoremediation: using green plants to clean up contaminated soil, groundwater and wastewater. Proc., International Topical Meeting on Nuclear and Hazardous Waste Management, Spectrum 96. Seattle WA.

Hu H, Brown PH (1997) Absorption of boron by plant roots. *Plant and Soil* **193**, 49-58.

Huang JW, Cunningham SD (1996) Lead phytoextraction: species variation in lead uptake and translocation. *New Phytologist* **134**, 75-84.

Huang JW, Juang D, Zhang C, Zhang Y, Lin Z (1991) Study on the control of cadmium-pollution in the soil by forestry engineering. *China Environmental Science* **2**, 36-45.

Iskandar IK, Kirkham MB (2001) Trace Elements in Soil: Bioavailability, Flux, and Transfer, (Eds. IK Iskandar and MB Kirkham). (Lewis publishers: Boca Raton, FL)

Lee J, Masters DG, White CL, Grace ND, Judson GJ (1999) Current issues in trace element nutrition of grazing livestock in Australia and New Zealand. *Australian Journal of Agricultural Research* **50(8)**, 1341-1364.

Lombi E, Zhao FJ, Dunham SJ, McGrath SP (2001) Phytoremediation of heavy-metal contaminated soils: Natural hyperaccumulation versus chemically enhanced phytoextraction. *Journal of Environmental Quality* **30(6)**, 1919-1926.

Mason BH, Moore CB (1982) The structure and composition of the earth. In: Principles of Geochemistry, (Eds. BH Mason and CB Moore) pp 28-64. (Wiley: New York)

McGrath SP, Dunham SJ, Corell RL (2000) Potential for phytoextraction of zinc and cadmium from soils using hyperaccumulator plants. In: Phytoremediation of contaminated soil and water, (Ed. N Terry) pp 109-128. (Lewis: New York)

McGrath SP (1998) Phytoextraction for soil remediation. *In: Plants that Hyperaccumulate Heavy Metals: their role in phytoremediation, microbiology, archaeology, mineral exploration and phytomining*, (Ed. RR Brooks) pp 289-312. (CAB International: Wallingford, UK)

McGrath SP, Sidoli CMD, Baker AJM, Reeves RD (1993) The potential for the use of metal-accumulating plants for the *in situ* decontamination of metal-polluted soils. *In: Integrated Soil and Sediment Research: A Basis for Proper Protection*. (Eds. HJP Eijsackers and T Hamers) pp 673-676. (Kluwer Academic Publishers: Dordrecht)

McMurtrey JE Jr. (1938). Distinctive plant symptoms caused by deficiency of any one of the chemical elements essential for normal development. *Botanical Review* **4**, 183-203.

Mills T, Robinson B, Green S, Clothier B, Fung L, Hurst (2000) Difference in Cd uptake and distribution within poplar and willow species. *Proceedings of the 42<sup>nd</sup> annual conference and expo of the New Zealand Water and Waste Association*, Rotorua, New Zealand.

Nicks L, chambers MF (1994) Nickel farm. *Discover* Sept., **19**.

Östman G (1994) Cd in *Salix*- a study of the capacity of *salix* to remove Cd from arable soils. *In: Willow vegetation filters for municipal wastewaters and sludges, A biological purification system*, (Eds. P Aronsson and K Pertu) pp.153-155. Proceedings of a study tour, conference and workshop in Sweden, 5-10 June 1994. Sweden: Sveriges Lantbruksuniversitet.

Power PP, Woods WG (1997) The chemistry of boron and its speciation in plants. *Plant and soil* **193**, 1-13.

Pulford ID, McGregor SD, Duncan HJ, Wheeler CT (1995) Uptake of heavy metals from contaminated soil by tree. *In: Proceedings/Abstracts of the Fourteenth Annual Symposium, Current Topics in Plant Biochemistry, Physiology, and molecular Biology – Will Plants Have a Role in Bioremediation?* (Ed. D Randall) pp.49-50. (Interdisciplinary Plant Group, University of Missouri: Columbia, MO)

Punshon T, Dickinson N (1999) Heavy metals Resistance and Accumulation Characteristics in willows. *International Journal of Phytoremediation* **1(4)**, 361-385.

Raskin I, Ensley BD (2000) Phytoremediation of toxic metals using plants to clean up the environment, (Eds. I Raskin and BD Ensley) pp 316. (Wiley: New York)

Reilley KA, Banks MK and Schwab AP (1996) Organic chemicals in the environment: Dissipation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the rhizosphere. *Journal of Environmental Quality* **25**, 212-219.

Roberts AHC, Longhurst RD, Brown MW (1994) Cadmium status of soils, plants and grazing animals in New Zealand. *New Zealand Journal of Agricultural research* **37**, 119-129.

Robinson BH, Fernández JE, Madejón P, Marañón T, Murillo JM, Green SR, Clothier BE (2003) Phytoextraction: an assessment of biogeochemical and economic viability. *Plant and soil* **249**(1), 117-125.

Robinson BH, Green SR, Clothier BE, van der Velde M, Fung L, Thayalakumaran T, Snow V, Fernández JE, Madejón P, Marañón T, Murillo JM (2002) Modelling plant-metal uptake from contaminated soils. *NZ Land Treatment Collective, Proceedings of the Technical Session No.23*.

Robinson BH, Mills TM, Petit D, Fung LE, Green SR, Clothier BE (2000) Natural and induced cadmium-accumulation in poplar and willow: Implications for phytoremediation. *Plant and Soil* **227**, 301-306.

Robinson BH (1997) Thesis: The phytoextraction of heavy metals from metalliferous soils. Massey University, Palmerston North, New Zealand.

Roygard JKF, Clothier BE, Green SR, Bolan NS (2001) Tree species for recovering nitrogen from dairy-farm effluent in New Zealand. *Journal of Environmental Quality* **30**(3), 1064-1070.

Rugh CL, Senecoff JF, Meagher RB, Merkle SA (1998) Development of transgenic yellow poplar for mercury phytoremediation. *Nature Biotechnologie* **16**(10), 925-928.

Rugh CL, Wilde HD, Stack NM, Thompson DM, Summers AO, Meagher RB (1996) Mercuric ion reduction and resistance in transgenic *Arabidopsis thaliana* plants expressing a modified bacterial *merA* gene. *Proceedings of the National Academy of Science USA* **93**, 3182-3187.

Salt DE, Blaylock M, Kumar NPBA, Dushenkov V, Ensley B, Chet I, Raskin I (1995) Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. *Bio/Technology* **13**, 468-474.

Salt DE, Smith RD, Raskin I. (1998) Phytoremediation. *Annu Rev Plant Physiol* **14**, 57-66.

Schnabel WE, White DM (2001) The effect of mycorrhizal fungi on the fate of aldrin: phytoremediation potential. *International Journal of phytoremediation* **3**(2), 221-241.

Terry N, Zayed AM (1994) Selenium volatilization by plants. In: Selenium in the environment, (Eds. Frankenberger WT Jr et Benson S) pp 343-367. (Marcel Decker: New York)

Tibarzawa C, Corbisier P, Mench m, Bossus A, solda P, Mergeay M, Wyns L, van der Lelie D (2001) A microbial biosensor to predict bioavailable nickel in soil and its transfer to plants. *Environmental Pollution* **113**, 19-26.

Underwood E, Suttle NF (1999) The mineral nutrition of livestock. 3<sup>rd</sup> edition, pp 531-533. (CAB International: Wallingford, UK)

Watanabe ME (2001) Can bioremediation bounce back? *Nature Biotechnology* **19**, 1111-1115.

Whilting SN, Leake JR, McGrath SP, Baker AJM (2001) Rhizosphere bacteria mobilise Zn for hyperaccumulation by *Thlaspi caerulescens*. *Environmental Science and Technology* **35**(15), 3144-3150.

Wildners RA, Neales TF (1997) The absorption of Boron by disks of plant storage tissues. In: Boron in Soil and Plants, (Eds. B Dell *et al.*) pp 51. (Kluwer Academic Editions)

Wilkinson AG (2000) Introduced forest trees in New Zealand: Recognition, role, and seed source. The Poplars, *Populus* spp. *New Zealand Forest Research Institute, Bulletin No.17*.

Wilkinson AG, Zsuffa L, Verwijst T (1999) Poplars and willows for soil erosion control in New Zealand. *Biomass-and-Energy* **16**(4), 263-274.

Zayed A, Pilon-Smits E, deSouza m, Lin ZQ, Terry n (2000) Remediation of selenium-polluted soils and waters by phytovolatilisation. In: Phytoremediation of contaminated soil and water, (Eds. N Terry and G Bañuelos). pp1-12. (Lewis publishers: Boca Raton, FL)

## Sites Internet:

<http://www.gls.fr/pdf/Memotec2-EliminationBore.pdf>: Données sur le bore.

[www.reseauproteus.net/1001solutions/b/bore.htm](http://www.reseauproteus.net/1001solutions/b/bore.htm): Données sur le bore.

<http://www.mobot.org/jwcross/duckweed/media.htm>: Composition de l'Hoagland.

<http://www.phytomine.co.nz/>: Entreprise dans la phytoremédiation.

<http://www.clu-in.org/studio/2003phyto/prez/41.pdf>: commercialisation de la phytoremédiation et de la phytostabilisation des sols riches en métaux.

<http://www.clu-in.org/studio/2003phyto/prez/41.pdf>: Le pari de Viridian Resources.

[http://www.emesystems.com/licor\\_sensors\\_dat.htm](http://www.emesystems.com/licor_sensors_dat.htm): Capteurs. Approximation du potentiel de l'activité photosynthétique.

## ANNEXE 1

### Le peuplier

Il appartient au genre *Populus*, et fait parti de la même famille que le saule, à savoir la famille des Salicaceae.

Ces arbres à feuilles caduques sont dioïques. Ils ont également la capacité de se propager de façon végétative.

C'est une essence de lumière des régions froides et tempérées de l'hémisphère Nord. Cet arbre à croissance rapide présente souvent de grande dimension, 25 à 30 m. Sa longévité est assez réduite, de l'ordre de 70 à 80 ans maximum.

Il préfère des sols frais, profonds et bien drainés. Il pousse en terrain humide et se trouve généralement près des cours d'eau. Son bois blanc a un grain régulier et fin, de structure assez homogène.

Ce genre compte de nombreuses espèces, près de 80. De plus, sa capacité d'hybridation entraîne un potentiel de variabilité énorme. D'ailleurs, les équipes d'HortResearch procèdent à des hybridations dans leurs nurseries. Ainsi, quelques clones issus de ces croisements ont été massivement utilisés pour la phytoremédiation du site de Kopu. A savoir :

- **Kawa** : *P.deltoides x yunnanensis*



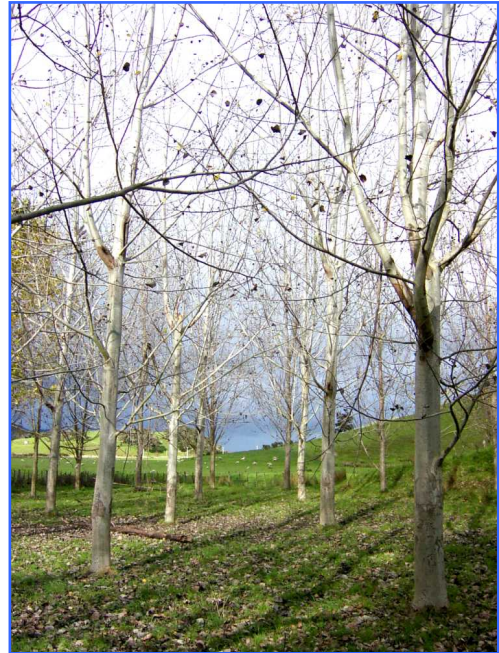
Cet hybride a été conçu et élevé par l'équipe d'HortResearch afin de répondre aux exigences requises pour la phytoremédiation. Il est le fruit d'un croisement entre les espèces *Populus deltoides* et *Populus yunnanensis*.

Cette variété au feuillage étroit est très résistante aux maladies et aux agressions extérieures comme les opossums (véritables fléaux en Nouvelle Zélande). C'est un excellent arbre de protection pouvant s'accommoder aux pentes humides à condition que l'emplacement ne soit pas trop sujet à des vents violents. Les premières feuilles font leur apparition vers la fin septembre. Il garde son feuillage tardivement jusqu'en hiver. Le fait que ce clone s'accommode facilement aux sols saturés en eau et que son feuillage persiste longtemps tout

en alliant une croissance assez rapide, fait de lui une bonne « bio-pompe ». De plus, le kawa est un des peupliers les plus denses avec une densité de  $360 \text{ kg.m}^{-3}$ . Il est donc approprié pour l'industrie du bois. Il est alors possible d'associer la sylviculture à la phytoremédiation. Ces feuilles peuvent également être revalorisées en les utilisant comme fourrage.

- **Yeogi** : *P.alba x glandulosa*

De la même manière, cet hybride provient des expérimentations de HortResearch. Ces arbres sont très résistants vis à vis des agressions extérieures couramment rencontrés en Nouvelle Zélande, tel que les opossums et la rouille des feuilles. Son feuillage perdure jusqu'à tard dans la saison. De plus, il produit beaucoup de rejets par ses racines et colonise vite le terrain. C'est donc un arbre propice à la phytoremédiation. En effet, il allie une croissance rapide et une reproduction végétative importante tout en gardant son feuillage une bonne partie de l'année. Il s'accommode bien aux sols saturés en eau et est utilisé pour la protection des sols. Son bois, de bonne qualité, est également valorisable.



- **Toa** : *P.(deltoides x nigra) x yunnanensis*



L'hybride Toa est plus large que le Kawa avec un tronc plus conséquent, il reste néanmoins un arbre à l'apparence assez étroite. C'est un excellent arbre de protection adapté aux terrains humides. Outre sa bonne résistance et son feuillage assez persistant ; ce qui le différencie des autres hybrides est son feuillage dense comprenant nettement plus de feuilles que les hybrides. Ce qui est encore plus avantageux en matière de phytoremédiation ; puisque la photosynthèse plus élevée entraîne une consommation d'eau plus conséquente.

## ANNEXE 2

## Composition chimique du fertilisant: Hoagland.

volume de chaque solution brute concentrée : 100 L  
 facteur de dilution (1:X) soit X: 150  
 volume total après dilution : 15300 L

## Composition de la préparation

engrais	Formule	M	composé	élément	quantité	élément	quantité
<b>Solution Brute A</b>			<b>g</b>		<b>mol</b>		<b>mol</b>
calcium nitrate	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O	236	14760	Ca	62.54	NO <sub>3</sub>	125.08
EDTA	[CH <sub>2</sub> N(CH <sub>2</sub> COO) <sub>2</sub> ] <sub>2</sub> FeNa	430	400	Fe	0.93	Na	0.93
<b>Solution Brute B</b>			<b>g</b>		<b>mol</b>		<b>mol</b>
nitrate de potassium	KNO <sub>3</sub>	101	6320	K	62.57	NO <sub>3</sub>	62.57
sulfate de magnésium	MgSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	246	6162	Mg	25.05	SO <sub>4</sub>	25.05
mono pot.phosphate	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	136	1700	K	12.5	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	12.5
<b>(micro-élément)</b>			<b>g</b>		<b>mmol</b>		<b>mmol</b>
chlorure de manganèse	MnCl <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O	198	22.6	Mn	114.14	Cl	228.28
sulfate de manganèse	MnSO <sub>4</sub> .H <sub>2</sub> O	169	0	Mn	0	SO <sub>4</sub>	0
acide borique	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	62	36	B	580.65		
sulfate de cuivre	CuSO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O	250	1	Cu	4	SO <sub>4</sub>	4
molybdate d'ammonium	(NH <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> .Mo <sub>7</sub> O <sub>24</sub> .4H <sub>2</sub> O	1236	0	Mo	0	NH <sub>4</sub>	0
molybdate de sodium	Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	242	0.335	Mo	1.38	Na	2.77
sulfate de zinc	ZnSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	288	2.75	Zn	9.55	SO <sub>4</sub>	9.55
chlorure de potassium	KCl	74.6	78	K	1045.58	Cl	1045.58
bromure de calcium	CaBr <sub>2</sub>	200	105	Ca	527	Br <sub>2</sub>	1045
<b>réservoir C, acides</b>			<b>g</b>				<b>mol</b>
acide nitrique	HNO <sub>3</sub>	63	400			NO <sub>3</sub>	6.35
acide phosphorique	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	98	100			H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	1.02

## Concentration en éléments dans la préparation finale

nutriment	masse moléculaire	quantité calculée	concentration calculée	concentration calculée	concentration
	<i>g/mol</i>	<i>mol</i>	<i>mmol/L</i>	<i>mg/L=ppm</i>	<i>meq/L</i>
K (+)	39.1	76.12	4.98	194.5	4.98
Ca (2+)	40.1	62.54	4.09	163.9	8.18
Mg (2+)	24.3	25.05	1.64	39.8	3.27
NO <sub>3</sub> (-)	62	194.01	12.68	786.2	12.68
SO <sub>4</sub> (2-)	96.1	25.05	1.64	157.3	3.27
H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> (-)	97	13.52	0.88	85.7	0.88
N	14	194.01	12.68	177.5	–
S	32.1	25.05	1.64	52.6	–
P	31	13.52	0.88	27.4	–
Na (+)	23	0.93	0.06	1.4	0.06
Br (-)	79.9	1.05	0.07	5.5	0.07
Cl (-)	35.5	1.27	0.08	3	0.08
		<i>mmol</i>	<i>umol/L</i>	<i>mg/L=ppm</i>	<i>meq/L</i>
Fe	55.9	930.23	60.8	3.399	–
Mn	54.9	114.14	7.46	0.41	–
B	10.8	580.65	37.95	0.41	–
Cu	63.6	4	0.26	0.017	–
Mo	95.9	1.38	0.09	0.009	–
Zn	65.4	9.55	0.62	0.041	–
<b>cations (+)</b>					<b>16.49</b>
<b>anions (-)</b>					<b>16.98</b>

## ANNEXE 3

### Techniques analytiques

#### ➤ *La spectrométrie d'absorption atomique*

Dans son principe, la spectrométrie AAS consiste à vaporiser l'échantillon liquide et à le chauffer à l'aide d'une flamme. En mode flamme, l'équipement peut être utilisé en spectrométrie d'absorption et d'émission. La flamme est dirigée vers une lumière émise par une lampe appropriée émettant les longueurs d'onde caractéristiques de l'élément recherché. En traversant la flamme, les ondes lumineuses, dont les longueurs d'onde correspondent à l'élément dosé, sont absorbées par les atomes excités présents dans la flamme. L'absorption est mesurée à l'aide d'un prisme dispersif et d'une cellule photoélectrique : elle est directement proportionnelle à la concentration de l'élément. Lorsque les atomes d'un élément ont été excités, leur retour à l'état fondamental s'accompagne de l'émission de lumière d'une fréquence  $F$  bien définie et propre à cet élément. Le même élément dispersé dans une flamme possède la propriété d'absorber tout rayonnement de même fréquence  $F$ . Il en résulte une absorption du rayonnement incident lié à la concentration de l'élément considéré.

En mode flamme, la limite de détection est de l'ordre du ppm. La sensibilité des dosages en mode flamme est limitée par des réactions secondaires (évaporation) et par le temps très court de passage dans la flamme. Pour accroître la sensibilité du dosage, il est nécessaire de réduire ou d'éliminer ces deux facteurs par atomisation. Celle-ci est réalisée dans un four graphite d'un volume réduit sous atmosphère inerte. La limite de détection est alors de l'ordre du ppb. L'utilisation du four graphite a été nécessaire pour l'analyse du cobalt et du cadmium.

#### ➤ *La spectrométrie d'émission plasma à couplage inductif*

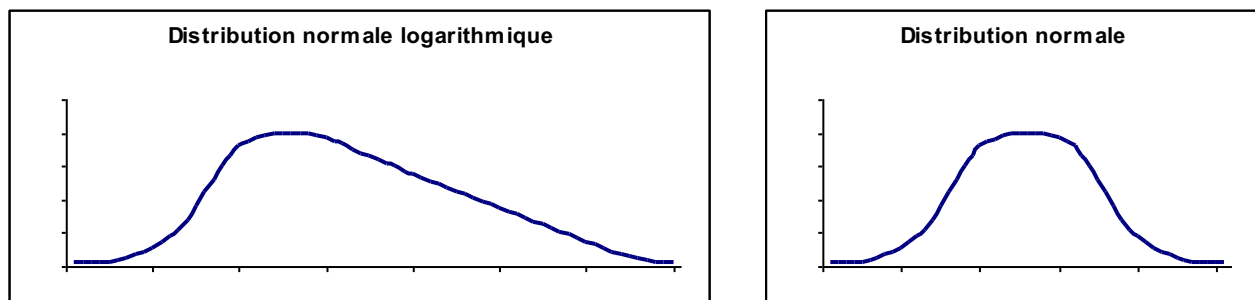
Le principe de la spectrométrie d'émission plasma à couplage inductif est basé sur la formation de plasma d'une température de 10.000 degrés Kelvin dans un flux de gaz rare. L'échantillon liquide est nébulisé puis transmis vers le plasma. Il subit différentes étapes de décomposition, d'atomisation et d'ionisation conduisant à une excitation des atomes et des ions. Après excitation, les atomes contenus dans l'échantillon émettent de la lumière dont la longueur d'onde leur est caractéristique. La lumière est transmise par l'intermédiaire du système optique (réseau + prisme) vers un détecteur CID (caméra vidéo), qui permet le dosage. Les limites de détection des éléments traces varient selon l'élément : elles sont de l'ordre du ppb ou de la dizaine de ppb. En l'occurrence, elle est de l'ordre du ppm pour le bore.

## ANNEXE 4

### Traitement des données

Après avoir été transposées sur Excel, les données ont été traitées à l'aide du logiciel Minitab 12.1 pour les statistiques et du logiciel Microcal Origin 5.0 pour l'élaboration des graphiques.

Tout d'abord il faut connaître le type de distribution des données à analyser. Elle est présumée appartenant à l'un de ces 2 types :



*Les différents types de distributions envisageables*

Pour cela, il faut calculer la médiane, la moyenne et la moyenne géométrique. Afin de distinguer s'il s'agit d'une distribution normale ou normale logarithmique les valeurs absolues données par « médiane - moyenne » et « médiane - moyenne géométrique » sont comparées.

Si la valeur absolue de médiane - moyenne est inférieure à celle de médiane - moyenne géométrique alors il s'agit d'une distribution normale. Dans le cas contraire, il s'agit d'une distribution du type normal logarithmique.

Dans le premier cas, les données peuvent être directement utilisées pour les statistiques, et dans le second seulement une fois après avoir été rectifiées en les transformant par le log afin de les soumettre aux statistiques.

En biologie, les distributions sont souvent de type logarithmique normal, seulement, il faut avoir un nombre minimum de données afin de pouvoir dire qu'elles appartiennent à l'une ou l'autre des distributions. Dans notre cas, il existe seulement 5 échantillons à comparer donc elle est estimée comme normale ce qui est confirmé par la procédure ci-dessus.

A partir de là, 2 tests sont effectués :

➤ **Technique de l'ANOVA (ANalysis Of Variance) :**

L'analyse de la variance à un critère de classification à pour but la comparaison des moyennes de plusieurs populations, à partir d'échantillons aléatoires et indépendants prélevés dans chacune d'elles.

Afin que ce test soit valable, le paramètre étudié doit suivre une distribution normale, les variances des populations doivent toutes être égales (homoscedasticité) et les échantillons prélevés aléatoirement et indépendamment dans les populations.

Ce test permet de déterminer s'il existe des différences significatives au sein de notre population. C'est une vision globale qui donne la probabilité à partir de laquelle il est possible d'affirmer qu'il existe des différences significatives. Lorsque cette probabilité est inférieure à 0,05 cela signifie qu'il n'y a seulement que 5 % de chance qu'elle soit similaire. Donc c'est seulement à partir de cette valeur de probabilité de 0,05 et en dessous qu'il est admis d'affirmer qu'il existe des différences significatives.

### One-way Analysis of Variance

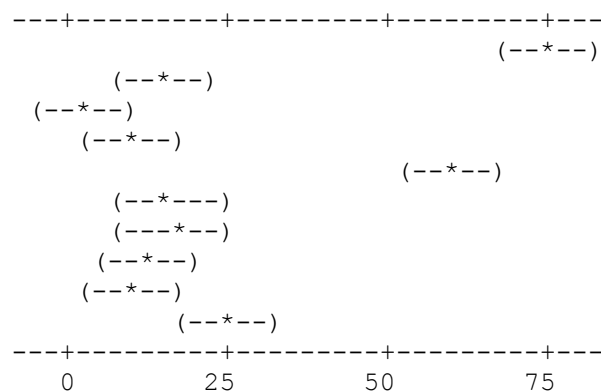
Analysis of Variance for B

Source	DF	SS	MS	F	P
Species	9	25814.9	2868.3	35.95	0.000
Error	40	3191.0	79.8		
Total	49	29005.9			

Level	N	Mean	StDev
Booth	5	75.304	23.900
Crows ne	5	14.784	3.499
Grass	5	1.936	2.252
Kawa	5	10.126	1.438
Kinu	5	60.158	12.355
Shinsey	5	16.100	2.613
Toa	5	16.562	1.567
Veronese	5	12.582	2.805
Yeogi	5	9.474	3.351
Yunnan	5	24.624	5.112

Pooled StDev = 8.932

Individual 95% CIs For Mean  
Based on Pooled StDev



Ici, la probabilité que tous les hybrides aient la même concentration en bore au sein de leur tissus est nulle. Il peut donc être affirmé que ces hybrides ont un comportement différents vis à vis du prélèvement du bore.

➤ **Le test de Fisher :**

Le test de Fisher (test des variances) a pour but de comparer deux distributions, suivant chacune une loi normale sur la base de leur variance.

Ce test de comparaison de deux variances a pour objectif de vérifier si les deux variances de deux populations sont égales ou non.

Ainsi, si les signes sont différents, il est supposé qu'il y ait de fortes ressemblances vis à vis du caractère testé. En effet, cela signifie qu'il y a une très forte probabilité que ces 2 individus testés appartiennent à la même population.

De cette manière, les différents types d'hybrides ont été testés 2 à 2 afin de prouver s'ils étaient significativement différents ou non par rapport au paramètre testé.

Fisher's pairwise comparisons


Family error rate = 0.590  
Individual error rate = 0.0500

Critical value = 2.021

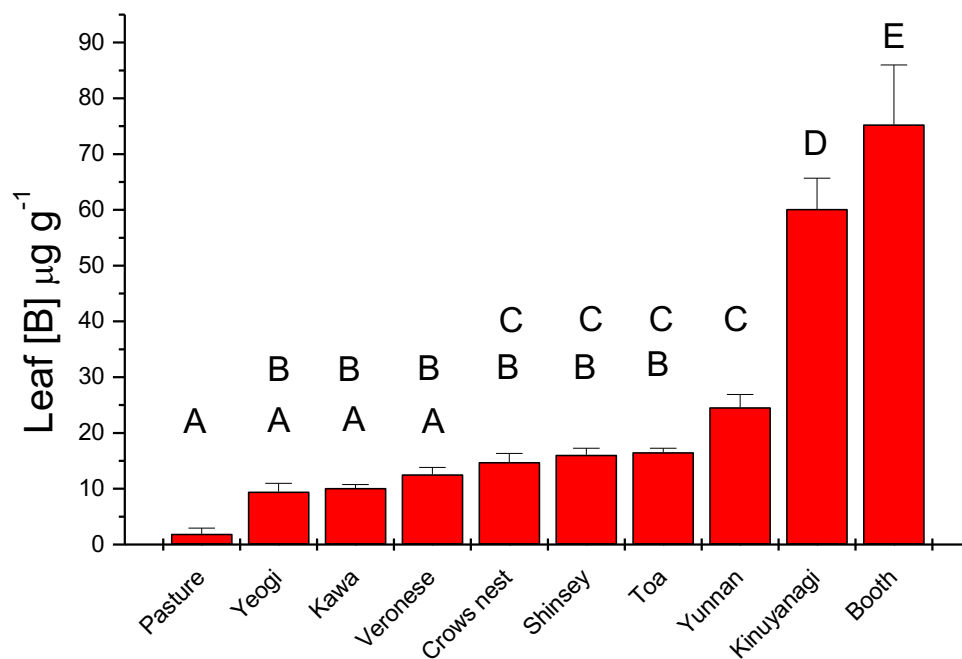
Intervals for (column level mean) - (row level mean)

	Booth	Crows ne	Grass	Kawa	Kinu	Shinsey
Crows ne	49.10 71.94					
Grass	61.95 84.78	1.43 24.26				
Kawa	53.76 76.59	-6.76 16.07	-19.61 3.23			
Kinu	3.73 26.56	-56.79 -33.96	-69.64 -46.81	-61.45 -38.62		
Shinsey	47.79 70.62	-12.73 10.10	-25.58 -2.75	-17.39 5.44	32.64 55.47	
Toa	47.33 70.16	-13.19 9.64	-26.04 -3.21	-17.85 4.98	32.18 55.01	-11.88 10.95
Veronese	51.31 74.14	-9.21 13.62	-22.06 0.77	-13.87 8.96	36.16 58.99	-7.90 14.93
Yeogi	54.41 77.25	-6.11 16.73	-18.95 3.88	-10.76 12.07	39.27 62.10	-4.79 18.04
Yunnan	39.26 62.10	-21.26 1.58	-34.10 -11.27	-25.91 -3.08	24.12 46.95	-19.94 2.89
	Toa	Veronese	Yeogi			
Veronese	-7.44 15.40					
Yeogi	-4.33 18.50	-8.31 14.52				
Yunnan	-19.48 3.35	-23.46 -0.63	-26.57 -3.73			

Ce test permet de comparer 2 à 2 les hybrides et ainsi percevoir si ils sont classables dans la même catégorie vis à vis de leur prélèvement en bore. Pour ce faire, lorsque les signes des 2

chiffres comparant les 2 hybrides sont différents(  ), il est possible d'affirmer qu'ils ont le même comportement. Dans le cas contraire, ils sont différents sur ce caractère testé.

➤ *Représentation graphique :*



Toutes ces constatations sont récapitulées sur ce type de graphique. Chaque catégorie est représentée par une lettre. De cette manière, il est plus aisé de percevoir à quelle catégorie appartient tel ou tel hybride et de distinguer les plus performantes en matière d'accumulation du métal.