

## **Valorisation des biomasses végétales issues des phytotechnologies : projet Européen GREENLAND**

Valérie Bert, Florence del Gratta, Serge Collet, Arnaud Papin, Jannis Dimitriou, Jolien Janssen, Silke Neu, Markus Puschenreiter, Rodolphe Gaucher

► **To cite this version:**

Valérie Bert, Florence del Gratta, Serge Collet, Arnaud Papin, Jannis Dimitriou, et al.. Valorisation des biomasses végétales issues des phytotechnologies : projet Européen GREENLAND. 3. Rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués, Nov 2014, Paris, France. ineris-01862482

**HAL Id: ineris-01862482**

**<https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-01862482>**

Submitted on 27 Aug 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Valorisation des biomasses végétales issues des phytotechnologies : projet Européen GREENLAND

**Valérie BERT<sup>1</sup>, Florence DEL GRATTA<sup>2</sup>, Serge COLLET<sup>2</sup>, Arnaud PAPIN<sup>3</sup>, Jannis DIMITRIOU<sup>4</sup>,  
Jolien JANSSEN<sup>5</sup>, Silke NEU<sup>6</sup>, Markus PUSCHENREITER<sup>7</sup>, Rodolphe GAUCHER<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> : Unité Technologies et Procédés Propres et Durables, INERIS, Parc Technologique Alata, BP2, 60550 Verneuil en Halatte, [valerie.bert@ineris.fr](mailto:valerie.bert@ineris.fr); [rodolphe.gaucher@ineris.fr](mailto:rodolphe.gaucher@ineris.fr)

<sup>2</sup> : Unité Sources et Emissions, INERIS, Parc Technologique Alata, BP2, 60550 Verneuil en Halatte, [Florence.DEL-GRATTA@ineris.fr](mailto:Florence.DEL-GRATTA@ineris.fr); [serge.collet@ineris.fr](mailto:serge.collet@ineris.fr)

<sup>3</sup> : Unité Ressources Analytiques, DRC/CARA, INERIS, Parc Technologique Alata, BP2, 60550 Verneuil en Halatte, [arnaud.papin@ineris.fr](mailto:arnaud.papin@ineris.fr)

<sup>4</sup> : Department of Crop Production Ecology, Swedish University of Agriculture Sciences, SE-750 07 Uppsala, Sweden, [Jannis.Dimitriou@slu.se](mailto:Jannis.Dimitriou@slu.se)

<sup>5</sup> : Hasselt University, Centre for Environmental Sciences, Agoralaan building D 3590 Diepenbeek, Belgium, [jolien.janssen@uhasselt.be](mailto:jolien.janssen@uhasselt.be)

<sup>6</sup> : Saxon state office for environment, Agriculture and Géologie, Referat 42, Boden, Altlasten, Department 42, Soil, Contaminated Sites, Halsbrücker Straße 31a, 09599 Freiberg, Germany, [Silke.Neu@smul.sachsen.de](mailto:Silke.Neu@smul.sachsen.de)

<sup>7</sup> University of Natural Resources and Life Sciences, Department of Forest and Soil Sciences, Konrad Lorenz Strasse 24, 3430 Tulln, Austria, [markus.puschenreiter@boku.ac.at](mailto:markus.puschenreiter@boku.ac.at)

## Résumé

L'un des objectifs du groupe de travail « Valorisation des biomasses végétales issues des phytotechnologies (WP2) » du projet Européen GREENLAND est d'identifier les éventuelles contraintes et les avantages liés à l'utilisation de plantes cultivées sur sols pollués dans des filières de valorisation existantes et en émergence via des essais expérimentaux sur des pilotes. Dans une chaudière à biomasse de 40 kW, 4 types de ligneux provenant de la famille des Salicaceae (saules et peupliers) et cultivés dans un objectif de phytoextraction du Zn et du Cd ont été brûlés afin d'étudier le comportement de ces métaux dans les émissions issues de leur combustion. Les expériences de combustion montrent que le Zn et le Cd se concentrent majoritairement dans les cendres volantes, plutôt que dans les cendres sous-foyer. L'utilisation, en chaudière industrielle ou collective, de bois issus d'opération de phytoextraction et donc enrichis en métaux, semble possible à condition que ces installations soient équipées de filtres efficaces pour éviter tout transfert de polluant à l'atmosphère.

## Introduction

Le projet européen GREENLAND (2011-2014 ; <http://www.greenland-project.eu/>), « gentle remediation of trace element contaminated land » vise à mettre en pratique de nouvelles solutions de gestion des sols contaminés en éléments traces potentiellement toxiques (métaux et métalloïdes, rassemblés communément sous le terme 'métaux lourds') basées sur l'utilisation des plantes et des microorganismes associés (phytotechnologies). Toutes les phytotechnologies produisent des végétaux herbacés ou ligneux qui sont récoltés régulièrement ou non pour des besoins d'entretien, d'efficacité de la phytotechnologie mise en place ou à la fin de vie de la culture. En fonction de la phytotechnologie et du type de végétal utilisés, les parties récoltées sont susceptibles de contenir des quantités d'éléments polluants plus ou moins importantes en comparaison de celles rencontrées dans les parties récoltables de végétaux cultivés sur sols non pollués (en particulier, les éléments traces métaux et non métaux). En fonction de leur nature, ces végétaux pourront potentiellement intégrer une filière de valorisation à condition que les éléments polluants ne perturbent pas le fonctionnement

et la performance des procédés mis en œuvre et que les dispositions environnementales, sanitaires et réglementaires encadrant ces filières soient respectées. Dans le projet GREENLAND, le groupe de travail « Valorisation des biomasses végétales issues des phytotechnologies (WP2) » a pour objectif de lister les filières de valorisation existantes et en émergence ainsi que les biomasses végétales utilisées et pertinentes pour ces filières, de résumer les études et résultats déjà obtenus concernant la nature et les caractéristiques des biomasses végétales issues des phytotechnologies, de tester différentes plantes issues des sites de démonstration des partenaires du projet dans différentes filières via les pilotes d'essais des partenaires et de définir les avantages et les contraintes de ces pratiques au regard des aspects techniques, réglementaires, sociétaux et économiques. Le travail présenté ci-après concerne les essais de combustion.

## Matériel et méthodes

Des espèces ligneuses de la famille des Salicaceae (saule, peuplier) ayant poussé sur des sols et sédiments pollués par les éléments traces métalliques (Zn, Cd) ont été utilisées pour des essais de combustion. Ces espèces ont été toutes cultivées dans un objectif de phytoextraction du Cd et du Zn par les partenaires du projet GREENLAND sur leurs sites de démonstration. Il s'agit (a) de saules (*Salix viminalis* 'Tora') cultivés en taillis à courte rotation (TCR) provenant d'un site agricole où sont épanchées des eaux usées non traitées (Högbytorp, Suède), (b) de saules (*Salix viminalis* 'Tora') cultivés en TCR sur un ancien terrain de dépôt de sédiments pollués par les éléments traces (Deûlémont, France), (c) du cultivar de peupliers 'Max 3' cultivé en TCR sur un site agricole pollué par les éléments traces (Freiberg, Allemagne) et (d) d'un mélange de peupliers et de saules (*S. alba*, *Populus Trichocarpa*) cultivé sur un site agricole pollué par les éléments traces (Lommel, Belgique). Pendant la période hivernale, environ 250 kg de bois de chaque site sélectionné ont été collectés et broyés sur place à l'aide d'engins agricoles. Les bois réduits en plaquettes ont ensuite été acheminés à l'INERIS pour les essais de combustion. Les essais ont été conduits sur une chaudière à biomasse de 40 kW qui permet l'extrapolation des résultats à l'échelle des chaudières industrielles et collectives. En parallèle de ces essais sur les bois enrichis en métaux, des essais similaires ont été conduits sur des bois identiques de référence achetés chez des pépiniéristes ou du bois témoin n'ayant pas été en contact avec la pollution. Avant combustion, les concentrations en éléments traces, la teneur en humidité ainsi que les pouvoirs calorifiques des bois ont été mesurés. Après chaque essai, les cendres sous foyers ont été pesées et analysées pour, notamment, quantifier les éléments traces. Pour chaque essai, les fumées ont été piégées sur des filtres et dans des barboteurs. Les fractions gazeuses et particulaires ainsi prélevées, ont été analysées pour, notamment, quantifier les éléments traces.

## Résultats et discussion

Les résultats des concentrations dans les bois qui ont servis aux essais de combustion sont reportés dans le Tableau 1. Comme attendu, les concentrations des bois cultivés sur sol pollué sont supérieures à celles des bois témoins, à l'exception des saules suédois, pour lesquels les concentrations en Cd sont proches.

**Tableau 1. Concentrations moyenne (mg kg<sup>-1</sup> poids sec) en Zn et en Cd dans les bois de saules et de peupliers ayant servis aux essais. L'écart-type est indiqué entre parenthèses sauf pour T<sub>saule</sub> où n=1.**

|           | France             |            | Suède              |            | Allemagne             |            | Belgique           |                       |            |
|-----------|--------------------|------------|--------------------|------------|-----------------------|------------|--------------------|-----------------------|------------|
|           | T <sub>saule</sub> | Phytoextr. | T <sub>saule</sub> | Phytoextr. | T <sub>peuplier</sub> | Phytoextr. | T <sub>saule</sub> | T <sub>peuplier</sub> | Phytoextr. |
| <b>Zn</b> | 38                 | 285 (94)   | 53 (8)             | 91 (18)    | 91 (2)                | 102 (0,8)  | 20 (3)             | 103 (7)               | 929 (236)  |
| <b>Cd</b> | 1,4                | 7,3 (4,2)  | 1,9 (0,2)          | 2 (0,4)    | 2,2 (0,0)             | 3,9 (0,1)  | 0,2 (0,0)          | 2,1 (0,1)             | 39 (9)     |

Les expériences de combustion avaient deux objectifs. Le premier était de comprendre le comportement du Zn et du Cd lors de la combustion de biomasse enrichie en ces métaux. Le

deuxième était de comparer les résultats de ces tests avec des bois commerciaux. La répartition du Zn et du Cd dans les différents compartiments composant les émissions (cendres sous foyer, cendres volantes et gaz de combustion) durant les neuf combustions étudiées montre la même tendance. Elle dépend principalement de la répartition des températures dans le foyer de combustion. Comme le montre le tableau 2, la majorité du Cd et du Zn est mesurée dans la fraction particulaire des fumées, aussi appelée cendres volantes, ce qui s'explique par la volatilisation du Zn et du Cd à la température du foyer de la chaudière et une condensation de ces métaux sur des particules de faible diamètre. Les facteurs d'émission en Cd et en Zn, dans chaque compartiments, calculés par rapport à la masse de bois brûlée confirment que le Zn et le Cd sont majoritairement émis dans les fumées (tableau 3).

**Tableau 2. Concentrations en Cd et en Zn dans les cendres sous-foyers et les fumées (fractions particulaires et gazeuses) du bois de saule témoin (« Control » *S. viminalis* 'Tora') et du saule utilisé en phytoextraction (« phytoextraction » *S. viminalis* 'Tora'). [1]**

|                   | Cd                                     |                                |                   | Zn                                     |                                |                   |
|-------------------|----------------------------------------|--------------------------------|-------------------|----------------------------------------|--------------------------------|-------------------|
|                   | Bottom ash<br>(mg kg <sup>-1</sup> DW) | Flue gas (mg m <sup>-3</sup> ) |                   | Bottom ash<br>(mg kg <sup>-1</sup> DW) | Flue gas (mg m <sup>-3</sup> ) |                   |
|                   |                                        | Gaseous fraction               | Particle fraction |                                        | Gaseous fraction               | Particle fraction |
| "Control"         | 1.7 ± 0.1                              | <0.0004*                       | 0.1164            | 164 ± 16                               | 0.0679                         | 6.1               |
| "Phytoextraction" | 4.4 ± 0.1                              | <0.0005*                       | 0.9541            | 1160 ± 22                              | 0.0583                         | 53.9              |

All data were presented as mean of five replicates (n = 5) ± standard deviation except for control stem concentrations where n = 1. \* values correspond to QL.  
Results in the flue gas are expressed in mg m<sup>-3</sup> in standardized conditions, i.e. 273.15 K and 1013 hPa.

**Tableau 3. Concentrations et pourcentage en masse en Cd et Zn dans les cendres sous-foyer et les fumées du bois de saule témoin (« Control » *S. viminalis* 'Tora') et du saule utilisé en phytoextraction (« phytoextraction » *S. viminalis* 'Tora'). [1]**

|    |            | "Control"                                 |     | "Phytoextraction"                         |     |
|----|------------|-------------------------------------------|-----|-------------------------------------------|-----|
|    |            | Concentration<br>(mg kg <sup>-1</sup> DW) | %   | Concentration<br>(mg kg <sup>-1</sup> DW) | %   |
| Cd | Stems      | 1.4                                       | 100 | 7.3 ± 4.2                                 | 100 |
|    | Bottom ash | 0.02                                      | 1.4 | 0.06                                      | 0.8 |
|    | Flue gas   | 1                                         | 71  | 6.3                                       | 86  |
| Zn | Stems      | 38                                        | 100 | 285 ± 94                                  | 100 |
|    | Bottom ash | 1.5                                       | 3.9 | 15                                        | 5.3 |
|    | Flue gas   | 50                                        | 131 | 358                                       | 126 |

Results for bottom ash and flue gas were expressed in emission factor (mg kg<sup>-1</sup> of stems burnt).  
Percentages are estimated recovered amounts relative to metal input through wood.

La figure 1 montre la répartition du Zn lors des essais de combustion dans les différents compartiments, cendres sous-foyer, cendres volantes et fraction gazeuse des fumées. Pour tous les essais, le Zn se retrouve à plus de 50% dans les cendres volantes. Le deuxième compartiment est constitué par les cendres sous-foyer. La fraction gazeuse des fumées constitue un compartiment mineur pour les émissions de Zn. Cette répartition est indépendante du bois initial brûlé, témoin ou bois issu d'opération de phytoextraction. Ces résultats corroborent ceux reportés dans [1, 2].

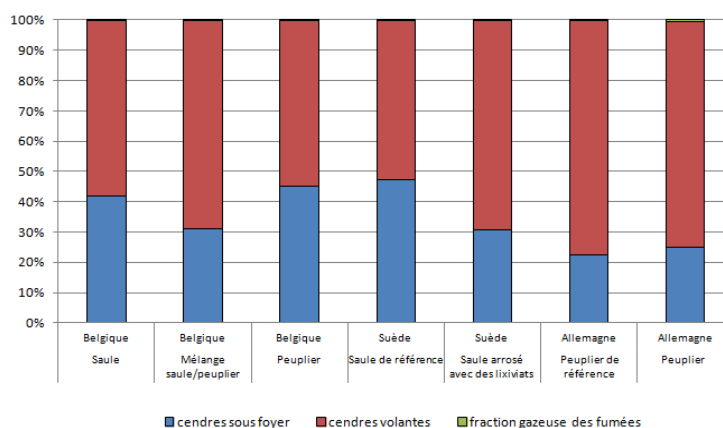


Figure 1. Répartition des émissions de Zn lors des essais de combustion.

## Conclusions et perspectives

La viabilité de la phytoextraction combinée avec la production de biocombustibles dépend de la durée de la dépollution, du rendement en biomasse et de la voie de valorisation choisie, de l'impact potentiel des polluants et de leur dispersion éventuelle dans l'environnement ainsi que des aspects réglementaires et économiques en vigueur.

Les expériences de combustion montrent que le Zn et le Cd se concentrent majoritairement dans les cendres volantes, plutôt que dans les cendres sous-foyer. L'utilisation, en chaudière industrielle ou collective, de bois issus d'opération de phytoextraction et donc enrichis en métaux, semble possible à condition que ces installations soient équipées de filtres efficaces pour éviter tout transfert de polluant à l'atmosphère.

Le statut de la biomasse produite sur sol pollué constitue une question essentielle pour décider de son mode de valorisation. En France, une clarification partielle a été introduite dans la réglementation relative à la combustion de la biomasse. Elle clarifie notamment les règles relatives au retour au sol par épandage des cendres sous couvert du respect des critères, en particulier, les teneurs en éléments traces métalliques.

Le programme de recherche GREENLAND vise à apporter des éléments de réponse, notamment en capitalisant les points de vue des parties prenantes en Europe via une enquête par questionnaire sur ces questions. Au-delà de la combustion, la question se pose pour chaque filière où la biomasse peut-être tantôt combustible, tantôt matière première (bioraffinerie). Les réponses à ces questions sont essentielles pour assurer le développement des phytotechnologies comme ressources de biomasse supplémentaire sur des sols impropres à l'alimentation.

## Références

- [1] Delplanque, M., Collet, S., Del Gratta, F., Schnuriger, B., Gaucher, R., Robinson, B., Bert, V. (2013). Combustion of Salix used for phytoextraction : the fate of metals and viability of the processes. *Biomass and Bioenergy*, 49, 160-170.
- [2] Chalot, M., Blaudez, D., Rogaume, Y., Provent, A., S., Pascual, Ch. (2012). Fate of trace elements during the combustion of phytoremediation wood. *Environmental Science and Technology*, 46(24), 13361-9.

## Remerciements

Ce travail est soutenu par des fonds Européens qui financent le projet GREENLAND (FP7, KBBE-2010-4, 26124).