

SYNTHESE / EXTENDED ABSTRACT
FRANÇAIS / ENGLISH

**VALORISATION DES CENDRES ISSUES
DE LA COMBUSTION DE BIOMASSE
REVUE DES GISEMENTS ET DES PROCÉDES ASSOCIÉS**

**MANAGEMENT METHODS ASH
FROM COMBUSTION OF BIOMASS
REVIEW OF PRODUCTIONS AND ASSOCIATED METHODS**

février 2016

D. BOULDAY – CEDEN

F. MARCOVECCHIO – LDAR



Créée en 1989 à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD – REseau COopératif de Recherche sur les Déchets et l'Environnement – est le fruit d'une triple coopération entre industriels, pouvoirs publics et chercheurs. L'objectif principal de RECORD est le financement et la réalisation d'études et de recherches dans le domaine des déchets et des pollutions industrielles.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et organismes publics) définissent collégalement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

Avertissement :

Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :
RECORD, Valorisation des cendres issues de la combustion de biomasse. Revue des gisements et des procédés associés, 2016, 91 p, n°14-0913/1A
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)
www.ademe.fr

© RECORD, 2016

RESUME

L'étude traite de la gestion des cendres de biomasse issues d'installations industrielles et collectives (bois bûche exclus) et dresse un état de l'art, en France et en Europe, des flux, des modes de valorisation et de post-traitement, des caractéristiques physico-chimiques et des programmes en matière de nouveaux débouchés.

Actuellement, les flux de cendres de biomasse sont évalués à 200 kt en France et 1 500 kt-4 000 kt en Europe et devraient s'élever respectivement à 300 kt-600 kt et 2 800 kt-5 500 kt à l'horizon 2020.

La composition physique et chimique des cendres de biomasse est influencée par de très nombreux facteurs : combustible, prétraitement, post-traitement, additifs, cendres sous foyer ou volantes, puissance de l'installation, type d'équipement de combustion, mode d'extraction... Toutefois, ces cendres présentent certaines caractéristiques généralisables et admises : pouvoir chaulant/neutralisant, fertilisant, comportement pouzzolanique généralement quasi nul.

En France et en Europe, une distinction est faite entre les cendres volantes et les cendres sous foyer, en général moins polluées. De nombreux facteurs limitant, différents selon les débouchés, ont été identifiés. Des solutions plus ou moins avancées visent à réduire les effets de ces facteurs préjudiciables (extinction de la chaux vive, criblage, broyage...). Actuellement, l'exutoire principal des cendres est l'enfouissement, suivi par le retour au sol (agriculture puis forêt). D'autres débouchés sont recensés dans certains pays mais concernent des flux marginaux : briqueterie, techniques routières...

Le développement de la biomasse énergie, conjugué à une réduction des possibilités d'enfouissement, a fait émerger de nombreux programmes de recherche concernant la valorisation des cendres de biomasse et notamment en France, avec certains résultats prometteurs.

Il ressort de l'étude la nécessité de consolider la filière de retour au sol, seule voie de valorisation actuellement éprouvée à grande échelle, soutenir le développement d'alternatives suffisamment crédibles, mieux caractériser les cendres et mieux les identifier, notamment en dressant une typologie plus fine des cendres pour mieux exploiter les données qualitatives et quantitatives et enfin faire évoluer le cadre réglementaire et tendre vers plus d'harmonisation en Europe pour rassurer les producteurs.

MOTS CLES

Cendres, biomasse, bois énergie, biomasse agricole, bois, produits connexes de la transformation du bois, cendres sous foyer, cendres volantes, cendres multi-cycloniques, four à grille, four à lit fluidisé, chaufferies collectives, chaufferies industrielles, chaudières, pouvoir neutralisant, retour au sol, construction, travaux publics.

SUMMARY

The study deals with the management of biomass ashes from industrial and collective facilities (wood log excluded) and provides a state of the art, in France and in Europe, flows, methods of recovery and post-treatment, physico-chemical characteristics and programs for new opportunities.

Currently, flows of biomass ash are estimated at 110 kt-330 kt in France and 1 500 kt – 4 500 kt in Europe and should amount respectively 330 kt-1000 kt and 3100 kt-8000 kt in 2020.

The physical and chemical composition of biomass ash is influenced by many factors : fuel, pretreatment, post-treatment, additives, fly and bottom ash, power installation, type of combustion equipment, extraction mode... However, these ashes have characteristics which are commonly accepted : liming / neutralizing power, fertilizer, pozzolanic behavior generally almost zero.

In France and Europe, a distinction is made between fly and bottom ashes, usually less polluted. However, this separation does not always make sense according to the valuation mode, the type of equipment (including fluidized bed or grid) or mixtures of ash made in the plant (e.g. mix of bottom and coarse ash).

Currently, the main outlet is ash landfill, followed by agricultural and forestry recycling. The other identified opportunities concern a few countries and marginal flows : brickworks, road engineering...

The development of biomass energy, coupled with a reduction in landfill options, has given rise to many research and demonstration programs in recent years, particularly in France, with some promising solutions... Many limiting factors, which can be different according to opportunities, have been identified. More or less advanced solutions aimed at reducing the harmful effects of these factors (slaking lime, sorting, grinding...). However to date, the most robust and massive solution for ash recycling material remains undoubtedly the agricultural recycling.

According to the study, it's necessary to consolidate the agricultural recycling, only way to massively recycle ashes, but which remains fragile, facilitate the development of certain cre The increase of ash flows, combined with a reduction of landfill opportunities (economic constraints, national and European objectives for landfill disposal reduction), pushing European countries to legislate to build a framework more suited to their valuation (for example in France through the decrees of August 26, 2013 for the agricultural recycling).

In France and Europe, biomass ashes are mainly concerned by the following two processing pathways: dible valorization methods but not enough proven, to better characterize the ash and better identify them, especially by drawing a typology for a better use of qualitative and quantitative data, and finally to develop a suitable regulatory framework and move towards more harmonization in Europe to reassure producers.

KEYWORDS

Ash, biomass, wood energy, agricultural biomass, wood related products from wood processing, bottom ash, fly ash, coarse ash, grate furnace, fluidized bed furnace, collective boiler, industrial furnaces, boilers, neutralizing power, agricultural recycling, construction, public works.

1 Portée de l'étude

L'étude consiste en un état de l'art de la gestion des cendres de biomasse en Europe avec un focus sur la France.

Les cendres prises en compte dans le champ de l'étude sont des cendres de biomasse issues d'installations de combustion collectives et industrielles.

Elles se distinguent principalement par l'origine des combustibles, qui sont majoritairement des plaquettes forestières ou bocagères, des connexes de la transformation du bois, des broyats issus des élagages urbains, des bois en fin de vie propres (palettes), des granulés.

Dans certaines grandes installations, en particulier industrielles, les combustibles cités ci-dessus sont parfois complétés avec des bois en fin de vie adjuvés (faiblement), des sous-produits issus du process de l'industrie qui porte l'installation (liqueurs noires, boues de désencrage, résidus plastiques...). Dans ce cas, les cendres sont issues d'un mix parfois délicat à qualifier.

Les cendres se distinguent également par leur mode d'obtention. Les cendres sous foyers sont le cœur de cible de l'étude. Toutefois, les cendres issues des équipements de traitement des fumées (cendres fines) sont également prises en compte.

L'étude couvre également les cendres issues d'installations industrielles ou collectives aux granulés issues d'installations soumises à la réglementation ICPE.

2 Analyse du contexte réglementaire et des modes de gestion actuels en Europe

Introduction

L'augmentation des flux de cendres, conjuguée à une réduction des possibilités d'enfouissement (contraintes économiques, objectifs nationaux et européens de réduction de l'enfouissement), pousse les états européens à légiférer pour bâtir un cadre plus adapté à leur valorisation, à travers par exemple les arrêtés du 26 août 2013 en France encadrant le retour au sol.

En France et en Europe, les cendres de biomasse suivent les deux principales voies de traitement suivantes :

- Majoritairement le stockage en installation de stockage de déchets non dangereux et en stockage de déchets dangereux,
- Le retour au sol en agriculture, et de manière plus marginale comme produit chaulant en forêt dans 3 ou 4 pays.

Les alternatives à ces exutoires sont marginales et principalement au stade de la recherche et développement. Quelques cendres volantes sont utilisées comme matière première dans l'industrie de la brique et du ciment dans quelques pays. Certaines cendres sont utilisées en techniques routières (notamment en France où certaines cendres de papeteries bénéficient d'une APV) et en tant que matériaux de substitution dans les bétons, ou en tant que matériau dans l'aménagement des installations de stockage.

Les statistiques font défaut sur les quantités de cendres actuellement éliminées en enfouissement et les valorisations dans les différentes filières potentielles, essentiellement béton, génie civil, céramique et épandage (agriculture dont compostage, forêt).

Classification déchets

Les cendres doivent être classées selon le catalogue européen des déchets. Les cendres issues des installations de combustion de biomasse sont classées :

- 10 01 01 Mâchefers, scories et cendres sous chaudière
- 10 01 03 Cendres volantes de tourbe et de bois non traité

Les cendres de biomasse ne sont pas considérées comme des déchets dangereux au sens de cette classification, comme les cendres volantes de charbon classées sous le code 10 01 02.

1 Scope of the study

This state of the art study deals with managing biomass ash in Europe with a focus on France.

The ashes included in the scope of the study are biomass ash from collective and industrial combustion plants.

They differ principally in the source of fuels that are mainly wood chips from forests or hedgerows, sawing byproducts, shredded urban wood, shredded waste wood (pallets) and granules.

In some large installations, in particular industrial, fuels mentioned above are sometimes supplemented with (weakly), adjuvanted wood waste by-products from the process of the installation (black liquor, de-inking sludge, waste plastics etc). In this case, the ashes are a mix that is sometimes difficult to qualify.

Ashes are also distinguished by their method of production. The bottom ash is the main target of the study. However, the ashes from flue gas treatment equipment (fly ash) are also taken into account.

The study also covers the ashes from pellets from industrial or collective plants.

2 Analysis of the current regulatory framework and management practices in Europe

Introduction

The increase in ash flows, combined with a reduction of landfill opportunities (economic constraints and national and European objectives for reducing landfill), pushing European countries to legislate to create a more appropriate framework for their recycling (eg in France through the decrees of August 26, 2013 for agricultural recycling). In France and in Europe, ash from biomass is mainly concerned with the two following processing channels:

- *Mainly landfill disposal in plants for non-hazardous waste and hazardous waste,*
- *Agricultural recycling, and in a more marginal way, recycling in forests in 3 or 4 countries.*

The alternatives to these applications are marginal and mainly at the stage of research and development. Some fly ashes are used as raw material in the industry of brick or cement in some countries. Some ashes are used in road engineering (especially in France where some paper mills benefit from authorization) and as substitute materials in concrete, or as material in the laying out of landfill.

The statistics are lacking in the quantities of ash that are stored in landfills, or recycled in the different potential pathways of valorization, mainly concrete and cement, civil engineering, ceramics and agronomic recycling (agriculture including co-composting and forest).

Waste classification

The ash from biomass combustion plants are classified in the European Waste Catalogue:

- *10 01 01 Bottom ash, slag and boiler dust*
- *10 01 03 fly ash from peat and untreated wood*

Biomass ashes are not considered hazardous waste according to this classification.

Landfill disposal

Regulatory framework

The landfill is possible under the rules laid down in Decision No 2003/33 / EC of 19/12/02 establishing the criteria and the procedures for the acceptance of waste at landfills pursuant to Article 16 and the Annex II to Directive 1999/31 / EC.

Enfouissement

Cadre réglementaire

La mise en décharge est possible selon les règles prévues par la décision n° 2003/33/CE du 19/12/02 établissant des critères et des procédures d'admission des déchets dans les décharges, conformément à l'article 16 et à l'annexe II de la directive 1999/31/CE.

En France, l'enfouissement des déchets est régi par :

- l'arrêté du 09/09/97 relatif aux installations de stockage de déchets non dangereux
- l'arrêté du 30/12/02 relatif au stockage de déchets dangereux
- l'arrêté du 28/10/2010 relatif aux installations de stockage de déchets inertes

L'enfouissement de cendres de biomasse en ISDI est interdit au regard de la liste qui fixe les déchets acceptés dans ces installations. Par ailleurs, les cendres, sous foyer ou volantes, ne respectent pas les seuils de comportement à lixiviation précisés dans l'arrêté du 28/10/2010 relatif aux déchets inertes..

Les cendres de biomasse, sous foyer ou volantes, peuvent être stockées dans une installation de stockage de déchets non dangereux compte tenu de leur classification (déchets non dangereux).

Pratiques en France et en Europe

Dans de nombreux pays, la plupart des cendres sont encore évacuées en installations de stockage compte tenu des contraintes qui pèsent sur les autres modes de valorisation. Les coûts de la décharge sont encore dans de nombreux pays plutôt bas (80 €/t y compris les taxes) et peu incitatifs pour développer de nouvelles voies de valorisation.

Les cendres doivent être enfouies dans des installations agréées. Dans la plupart des états européens, une taxe s'applique pour l'enfouissement des déchets (TGAP en France).

Compte tenu de leurs caractéristiques, au regard notamment des tests de lixiviation, les cendres sous foyer sont plutôt évacuées en ISDND et les cendres volantes en ISDD, même si ces dernières ne sont pas des déchets dangereux au sens de la nomenclature sur les déchets. Dès lors, elles doivent respecter les seuils de lixiviation imposés aux déchets dangereux (arrêté du 30/12/2002). Dans le cas contraire, elles doivent subir une stabilisation préalable, qui renchérit le coût de traitement.

Pour les installations de stockage de déchets non dangereux, une analyse du comportement à la lixiviation est nécessaire avant l'enfouissement mais il n'y a pas de seuil associé dans la réglementation française ou européenne : la décision européenne 2003/33/CE n'a pas fait l'objet d'une retranscription dans la réglementation française en ce qui concerne ces valeurs limites d'admission pour les ISDND.

Retour au sol

Cadre réglementaire

Les possibilités d'incorporation dans les composts concernent, quand c'est autorisé, des flux modestes (exemple 2 % en masse en Autriche). Par ailleurs, dans la très grande majorité des cas, les cendres de biomasse (bois) ne respectent aucune norme, en vigueur.

La législation sur l'utilisation des cendres de biomasse est encore lacunaire, en particulier pour un usage en Forêt. Par ailleurs, les cendres de biomasse ont un statut différent selon les pays.

Le cadre réglementaire est adapté surtout au retour au sol dans le cadre d'un plan d'épandage (cas de la France). Sinon, en Europe en général, le cadre normatif ou l'autorisation de mise sur le marché est peu adapté aux cendres, ce qui limite leur valorisation en agriculture. Toutefois, le cadre réglementaire et normatif est en train d'évoluer en Europe, notamment pour

In France, the landfill is regulated by:

- Order of 09/09/97 on non-hazardous waste storage facilities
- Order of 12/30/02 on the storage of hazardous waste
- Order of 28/10/2010 relating to inert waste storage facilities.

The disposal of biomass ashes in inert waste storage facilities is prohibited under the list that fixes the accepted waste in these facilities. Moreover, the bottom and fly ash do not respect the leaching behavior thresholds specified in the Decree of 28/10/2010 concerning inert waste. Bottom or fly ash from biomass can be eliminated in a non-hazardous waste storage facility due to their classification (non-hazardous waste).

Practices in France and Europe

In many countries, most of the ashes are still evacuated into storage facilities in view of the constraints that weigh on the other valorization methods. The landfill costs are still relatively low in many countries (80 -100 €/t including taxes) and do not encourage the development of new recycling methods.

The ashes should be eliminated in approved facilities. In most European countries, a fee is applied for the landfill (TGAP in France).

Given its characteristics, particularly the leaching tests, the bottom ash tends to be evacuated in storage facilities for non dangerous wastes and the fly ash in ones for hazardous wastes, even if they are not hazardous waste as defined in the nomenclature on waste. In this case, they must respect the leaching thresholds imposed for hazardous waste (Decree of 30/12/2002 in France). Otherwise, they must undergo a pre-stabilization, which in consequence increases the cost of treatment.

In France, for storage facilities for non-hazardous waste, an analysis of the leaching behavior is necessary before disposal but there is no threshold associated in the French or European regulations: the European decision 2003/33 / EC has not been the subject of a transcript in French regulations regarding the admission limits for landfills for non dangerous wastes.

Return to the soil

Regulatory Framework

The possibilities of incorporation into composts, when it is allowed, concern modest flows (eg 2% mass in Austria). Moreover, in the vast majority of cases, biomass ashes do not respect any standard in force given that their agronomical value is often under the thresholds imposed for nutrients.

The legislation on the use of biomass ash is still incomplete, particularly for use in Forest. Moreover, ashes from biomass have a different status according to the country.

The regulatory framework is especially suitable for return the soil as part of a spreading plan (as in France). Otherwise, in Europe in general, the regulatory framework or the marketing authorization is not adapted to the ashes, which limits their application in agriculture. However, the regulatory and normative framework is evolving in Europe, especially to better take into account the biomass ashes. In Germany and Finland, for example, regulatory requirements are strict and limit the agricultural recycling to only part of the ashes.

The uncertainties often encourage farmers to favor the landfill which is more expensive than spreading, but less restrictive. This should however evolve in light of expected developments in the European regulation 2003-2003 on fertilizers.

mieux prendre en compte les cendres de biomasse. En Allemagne et en Finlande par exemple, les exigences de la réglementation sont strictes et limitent le retour au sol à une partie seulement des cendres de biomasse.

Les incertitudes incitent très souvent les exploitants à privilégier l'enfouissement, plus onéreux que l'épandage, mais moins contraignant. Cette situation a vocation toutefois à évoluer au regard des évolutions attendues du règlement 2003-2003 sur les engrais.

Pratiques en France et en Europe

Les cendres, principalement sous foyer, sont épandues en agriculture seules, après un traitement plus ou moins poussé (criblage, broyage). L'épandage des cendres de biomasse sur sols agricoles est autorisé dans presque toute l'Europe (exceptions identifiées en Belgique, Pays-Bas), avec des contraintes plus ou moins importantes selon les pays.

Les cendres sont également incorporées dans des composts, notamment en Autriche. En France, jusqu'en 2010, l'incorporation des cendres aux composts de déchets verts sans remettre en cause le statut de produit normalisé, était tolérée et était une pratique très courante : désormais, la norme NF U 44 051 n'autorise plus l'incorporation de cendres végétales. Depuis 2010 donc, le retour au sol des cendres implique la réalisation d'un plan d'épandage.

Les cendres volantes sont souvent interdites à l'épandage. En France, les cendres volantes issues des installations de combustion soumises à déclaration et autorisation sont interdites à l'épandage.

Il n'existe pas de chiffres précis sur les flux de cendres épandues en agriculture en France mais on peut les estimer sur la base d'informations fournies par les exploitants et le CIBE à 70-80 % des flux de cendres sous foyer. En Europe en revanche, l'enfouissement semble majoritaire, devant le retour au sol.

En général, l'épandage des cendres en mélange ; les cendres sous grilles et multi-cycloniques sont autorisées mais il existe des exceptions ; par exemple, en Allemagne ou en Suisse., le retour en forêt concerne les cendres sous grilles seules.

Retour en forêt

En France cette solution est depuis quelques années à l'étude et autorisée depuis 2013 pour les cendres de biomasse d'installations de combustion d'une puissance inférieure à 20 MW. Les épandages en forêt en France en 2015 ne concernent que des chantiers de démonstration et aucun plan d'épandage d'est donc encore mise en œuvre.

En Suède, en Finlande, une partie des cendres de biomasse sont épandues en forêt. La Suède et la Finlande disposent de guides spécifiques pour les épandages de cendres en forêt à l'usage des utilisateurs. En suède, environ 36 000 tonnes de cendres étaient épandues en forêt en 2012. En Finlande, au moins 15 000 tonnes de cendres sont épandues en forêt.

Depuis les années 1980, l'Allemagne soutient des opérations d'épandage calco-magnésien pour restaurer des sols acidifiés ou en prévention de l'acidification des sols. Les épandages en forêt restent toutefois marginaux en Allemagne et plutôt au stade de chantiers de démonstration, comme dans la région de Haute-Souabe.

Depuis 2011, l'Autriche a mis en place un guide signé par le Ministre de l'Agriculture, des Forêts, de l'Environnement et de l'Eau pour l'utilisation raisonnée des cendres de biomasse en agriculture et en forêt (Holzner, et Obernberger, 2011). Bien qu'autorisé, ce mode de valorisation est peu développé en Autriche.

Matériaux pour la construction et les travaux publics

Cadre réglementaire

Ces applications concernent principalement la cimenterie (cendres en tant que constituant du ciment ou en tant qu'additif

Practices in France and Europe

The ashes, mainly the bottom ash, are applied in agricultural plots, after a more or less extensive treatment (screening, grinding). The spreading of ashes on agricultural soils is allowed in most European countries (with a few exceptions identified in Belgium and the Netherlands), with varying levels of constraint in different countries.

Ashes are also incorporated in composts, in particular in Austria or France. In France until 2010, the incorporation of ashes in green waste composts was possible without compromising the status of product (standard), and it was a common practice: henceforth, the compost standard 44-051 does not authorize the incorporation of plant ash. Since 2010, therefore, the return to soil of ashes requires a spreading plan.

The land spreading of fly ash is generally prohibited. In France especially, the land spreading of fly ash from combustion plants subject to reporting administrative requirements and authorization, is prohibited.

There are no precise figures on the flows of ashes applied to land in agriculture in France but the valorized part can be estimated, on the basis of information provided by the operators, at 70-80% of bottom ash flow. In Europe however, it appears that the majority of ash is eliminated in landfill, before going back to the soil.

In general, the land spreading of ashes mixtures (ashes under grids and coarse ash) is allowed, but there are exceptions (for example, Germany or Switzerland for recycling in forest).

Land-spreading in forest

In France this solution has been studied for several years and has been authorized since 2013 for biomass ashes from combustion installations with a capacity below 20 MW. The applications in forests in France in 2015 are for demonstration and no spreading plan has yet been implemented.

In Sweden and Finland, part of the biomass ash is spread in forests. Sweden and Finland have specific guides for users. In Sweden, about 36,000 tons of ashes were valorized in forest plots in 2012. In Finland, at least 15,000 tons of ashes are spread in the forest.

Since the 1980s, Germany supports operations to restore acidified soils or to prevent soil acidification, by spreading ashes (calc-magnesian spreading). This way of valorization however remains marginal in Germany and mostly at the stage of demonstration sites.

Since 2011, Austria has introduced a guide signed by the Minister of Agriculture, Forestry, Environment and Water for the rational use of biomass ash in agriculture and forest (Holzner, and Obernberger, 2011). Although authorized, this method of valorization is poorly developed in Austria.

Materials for the construction and public works

Regulatory Framework

These applications are mainly the cement plant (ash as a constituent of cement or as an additive for concrete) and road techniques, but also the works of laying out / backfilling or the production of bricks. Recycling is possible and is surrounded by some more or less favorable and binding regulations in different countries.

The production of cement / concrete, needs to follow the normative framework and in particular the standards of EN 197-1 (April 2012) and EN 450-1 (October 2012) and EN 13055. Regarding public works / road techniques, the following standards are concerned: Standards NF P15-108 December 2000 (hydraulic binders), EN 14-227 (materials floor), EN 459-1 March 2012 (building lime).

des bétons) et les techniques routières, mais également les travaux d'aménagement/remblaiement ou la production de briques. Le recyclage est possible et est encadré par des réglementations plus ou moins favorables et contraignantes selon les pays.

Pour la cimenterie/production de bétons, il faut se reporter principalement au cadre normatif et en particulier aux normes NF EN 197-1 d'avril 2012 et EN 450-1 d'octobre 2012 et EN 13055. Pour ce qui concerne les travaux publics/techniques routières, les normes suivantes sont concernées : Normes NF P15-108 Décembre 2000. Liants hydrauliques, NF EN 14-227 Matériaux de chaussée, NF EN 459-1 Mars 2012 (chaux de construction).

En France et plus généralement en Europe, seules les cendres volantes de charbon, les mâchefers d'incinération ou la chaux (pour citer les sous-produits et produits les plus comparables) sont pris en compte dans les normes européennes concernant le génie civil et les techniques routières ou les textes réglementaires (ex : arrêté du 18 novembre 2011 fixe les conditions du recyclage en technique routière des mâchefers d'incinération de déchets non dangereux). Seule la Suisse dispose d'un cadre permettant l'utilisation de cendres de biomasse.

Pratiques en France et en Europe

Les cendres volantes sont utilisées comme matière première dans l'industrie de la brique et du ciment dans quelques pays européens. Dans certains pays, les cendres sont utilisées pour l'étanchéité de mines ou utilisées comme filler et charge dans les bitumes ou les bétons, mais ces valorisations sont encore marginales.

En Suède notamment, des cendres sont utilisées comme matériau pour les sites d'enfouissement.

En France, un papetier (qui produit 70 000 tonnes de cendres) valorise ses cendres volantes en traitement de sol pour techniques routières, ses cendres sous foyer pour la modélisation de décharges en Allemagne et ses cendres grossières (issues du dépolluage) en techniques routières (remblais, couche de forme, couche de fondation et couche de base). Les cendres volantes du papetier ont fait l'objet d'études qui ont démontré un intérêt géotechnique et ont reçu une autorisation provisoire pour l'utilisation en stabilisation des sols destinés aux techniques routières.

Du point de vue de leur qualité au regard des seuils d'acceptabilité en techniques routière pour les mâchefers ou les cendres volantes de charbon, les cendres de biomasse sous foyer respectent globalement les seuils de niveau 2 du guide SETRA. Les cendres volantes sont globalement au-delà des seuils de la réglementation mâchefer ou des guides SETRA.

Autres applications

D'autres applications, principalement industrielles (plasturgie, industrie de la céramique, traitement de déchets...) sont également confrontées à des réglementations lacunaires ou peu adaptées aux cendres de biomasse. Certaines cendres volantes sont utilisées pour la stabilisation des déchets industriels (ex : NORKE SNOG).

Freins techniques et réglementaires au recyclage

La valorisation des cendres leur confère une valeur ajoutée, qui rejaillit sur la filière biomasse énergie dans son ensemble. Le développement du bois énergie, qui participe à l'atteinte des objectifs européens en matière de production d'énergie renouvelable, passe par la structuration de l'approvisionnement mais doit aussi prendre en compte la gestion des cendres afin de consolider la filière, mise à mal aujourd'hui par le faible coût des énergies fossiles.

La multiplication et la diversité des applications possibles participe du développement de l'économie circulaire, en rapprochant les exutoires des lieux de production et en permettant de retenir les solutions les plus vertueuses (ex : le

In France and in Europe in general, only the coal fly ash, bottom ash of municipal wastes and the lime (to quote by-products and the products the most comparable at ashes) are taken into account in the European standards for civil engineering and road engineering or in regulations (eg the decree of 18 November 2011 establishes the conditions of recycling in road construction of bottom ash of non-hazardous waste). Only Switzerland has a framework for the use of biomass ash.

Practices in France and in Europe

Quelques cendres volantes sont utilisées comme matière première dans l'industrie du ciment et de briques dans certains pays européens. Dans certains pays, les cendres sont utilisées pour l'étanchéité des mines ou utilisés comme charge dans asphalte ou le béton, mais ces marchés sont encore marginales.

En Suède, en particulier, la cendre est utilisé comme matériau pour les décharges.

In France, an industrial plant for paper (which produces 70,000 tons of ash) values a part of the fly ash for treatment of soil for road engineering, bottom ash for modeling of landfill in Germany, and the coarse ash in embankments, subgrade, subbase and base layer. Some studies regarding the fly ashes of the paper mill have shown a geotechnical interest and have received a provisional authorization for use in soil stabilization intended for road engineering.

From the point of view of quality of ashes with regard to the thresholds of acceptability for bottom ash of municipal wastes or for fly ash from coal in road techniques, the bottom ash from biomass generally are within the limits of level 2 of the SETRA guide. Fly ash is generally beyond the thresholds of regulations regarding clinker, or SETRA guides.

Other applications

Other applications, mainly industrial (plastics, ceramics industry, waste treatment, etc) are also penalized by incomplete or ill-suited regulations. Some fly ash are used for stabilization of industrial wastes (eg company NORKE SNOG in France).

Technical and regulatory brakes recycling

The valorization of ash gives it an added value, which impacts positively on the biomass energy sector as a whole. The development of wood energy, which contributes to achieving the EU targets for renewable energy, needs to have its supply structured, but must also take into account the ash management in order to consolidate this sector, weakened today by the low cost of fossil fuels.

The diversity of possible applications promotes the development of a circular economy (cradle to cradle), by bringing the outlets and the production closer and by retaining the most virtuous solutions (eg the waste of one industry is a recycled raw material of another industry).

We find that the different valorization methods, outside the return to soil, have limitations that hinder their development. The main obstacles are principally :

- *Le caractère diffus du dépôt (hors grandes installations (moulins à papier) et les centrales de cogénération en France).*
- *La forte variabilité des cendres.*
- *Limiting factors depending on the application (quicklime, chloride, total organic carbon (unburned), metals, particle size, moisture content, dustiness, concretions.*
- *A greater difficulty to value the fly ashes that contain heavy metals.*
- *Poorly adapted rules for the biomass ash.*
- *Discharge costs in some countries (including France where the cost of land filling is on average 80-120 €/ t)*

déchet d'une industrie est recyclé en matière première d'une autre industrie).

On constate aujourd'hui que les différents modes de valorisation des cendres, en dehors du retour au sol, présentent des limites qui freinent leur développement. Les principaux freins concernent en particulier :

- Le caractère diffus du gisement (hors gros industriels (papeteries) et installations de cogénération dans le cadre des appels à projet biomasse en France).
- La forte variabilité des cendres.
- Des facteurs limitant selon les applications (chaux vive, chlorures carbone organique total (imbrûlés), métaux, granulométrie, taux d'humidité/pulvérisation, concrétions (« mâchefers »)
- Une difficulté plus grande pour valoriser les cendres volantes, plus chargées en métaux lourds.
- Une réglementation peu adaptée aux cendres de biomasse.
- Des coûts de décharge dans certains pays (France notamment, le coût de l'enfouissement est en moyenne de 80-100 €/t) qui n'incitent pas à développer d'autres modes de valorisation.
- Un retour d'expérience insuffisamment partagé en Europe.
- Une production de cendres exponentielle ces dernières années avec le développement de la biomasse énergie, et des producteurs « pris de court » pour trouver des solutions adaptées et économiques.

Evaluation des gisements

Les flux de cendres actuels sont évalués sur la base du parc d'installations en service ou en construction et de leur puissance bois. Les flux 2020 sont basés sur les objectifs européens et français en matière de production d'énergie à partir de biomasse. En France, la filière bois énergie table sur un fléchissement du développement (prix de l'énergie fossile, évolution vers des projets de taille plus modeste compte tenu des opérations déjà réalisées, coup d'arrêt sur les très gros projets (type CRE) pour laisser le temps à la filière amont de s'organiser pour garantir l'approvisionnement en combustibles). Les flux de cendres intègrent les cendres issues des installations aux granulés qui consomment 17 millions de tonnes en 2015 avec des prévisions à 35-50 millions à l'horizon 2015.

Table 1 : Estimate of flow of ash (bottom ash and fly ash) in France and Europe in 2015 and 2020

		France		EU	
		2015	2020	2014	2020
Fuels (biomass)	Mt/an	10	Objective 33	145	Objective 270
Ashes	t/an	200 000	Objective 600 000 Expected : 300 000	2 800 000	5 500 000

Il ressort de l'état des lieux qu'une majorité de cendres est enfouie en décharge en Europe. Toutefois, ce constat est différent en France, qui se distingue en général de ses voisins en matière de politique de retour au sol des sous-produits (exemples des boues de d'épuration ou des composts issus d'ordures ménagères), où l'on estime qu'entre 70 et 80 % des cendres sous foyer sont valorisées en agriculture. Ainsi, en France en 2015 sur cette base, on considère que plus de 130 000 tonnes de cendres sont aujourd'hui épandues en agriculture.

3 Caractéristiques des cendres

Facteurs influençant la qualité des cendres de biomasse

Les cendres sont issues de la combustion de biomasse végétale (paille, bois...), de biomasse animale (carcasses), de déjections (fientes) et boues d'épuration, et de déchets (bois en fin de vie, liqueurs noires, déchets plastiques). Ainsi, le **facteur**

which do not incite the development of other methods of recovery.

- *A feedback insufficiently shared in Europe.*
- *An exponential production of ash in recent years with the development of biomass energy, and producers 'caught short' to find suitable and economical solutions.*

Assessment of amounts of ash in France and Europe

The ash amounts are valued on the basis of installations in service or under construction and depending upon their thermic power. The flows in 2020 are estimated from European and French objectives for energy production from biomass. In France, the energy wood sector expects a weaker development (the price of fossil fuels, a evolution towards smaller projects for allow time to the upstream sector for organizing procurement in biomass for the big operations already realized). The ash flows incorporate ashes from facilities that use granules (17 millions of tons of granules in 2015), with forecasts up to 35-50 million by 2020.

It appears from the inventory that the majority of ash is eliminated in landfills in Europe. However, this situation is different in France, which differs in general from its neighbors on policy concerning the return to the soil of byproducts (eg sewage sludge or compost from garbage), where it is estimated that between 70 and 80% of bottom ash is used in agriculture. Thus, in France in 2015, on this basis, more than 130 000 tons of ashes are considered to be land-applied on agricultural plots today.

3 Characteristics of ash

Factors influencing the quality of biomass ashes

The ashes come from the burning of plant biomass (straw, wood ...), animal biomass (carcasses) of animal manure, sewage sludge, and waste (end of life wood, black liquor, waste plastics). Thus, the main factor influencing the quality of ashes is the type of biomass from which they originate.

principal influençant la qualité des cendres est **le type de biomasse** dont elles sont issues.

Toutefois, on dénombre de nombreux facteurs qui influent sur la qualité des cendres :

- Le type d'intrants ou de mélange d'intrants (pour le bois : essence, part d'écorce, le type de biomasse, de déchets...)
- Le type de conditionnement appliqué à ces intrants : broyage, criblage, déferrailage, ajout d'adjuvants dans le cas des biomasses agricoles (CaO pour limiter la production de mâchefers, carbonate de soude pour éviter la production d'acide chlorhydrique ou d'acide sulfurique...).
- Le type de traitement thermique (combustion, pyrolyse...)
- Le type d'équipement de combustion : lit fluidisé, four à grille...
- La taille de l'installation, la température de combustion
- Le mode de traitement des fumées : cyclone, électro-filtre...
- Les modalités de récupération des cendres : mélange ou non des cendres sous foyer et cendres cycloniques ou multi-cyclonique/cendres humides/sèches
- La conduite de l'installation
- Les techniques de post-traitement (mélanges, broyage, extraction chimique...)

Caractéristiques générales

Il faut d'abord distinguer les principales sources de cendres dans une chaufferie : les cendres sous foyer sont récupérées sous la grille de combustion alors que les cendres volantes sont les résidus captés au niveau du traitement des fumées. Il est admis que les cendres volantes issues des équipements de traitement des fumées (électro filtres, filtres à manches) sont plus concentrées en métaux que les cendres sous foyer et présentent une fraction soluble plus élevée.

- Cendres sous foyer

La teneur en cendres (matières minérales non volatilisées lors de la combustion ainsi que des imbrûlés organiques) varie entre 0,5 à 15 % de la matière brute. Les agro combustibles ou les écorces présentent une teneur élevée en cendres, contrairement à des plaquettes forestières calibrées.

Globalement, les cendres de biomasse sont principalement composées de chaux (10 à 30 %) et de silice (5 à 60 %).

De manière indicative, on peut donner des caractéristiques communes à toutes les cendres de bois. Elles ont un pH toujours nettement basique (autour de 12) et ont une valeur neutralisante d'environ 50 %, c'est-à-dire qu'une tonne de cendre à la même pouvoir neutralisant qu'une tonne de carbonates chaux (CaCO₃) ou 500 kg de Chaux (CaO) et contiennent des éléments fertilisants, nécessaires aux cultures. Par ailleurs, les cendres ont des teneurs en azote quasi nulles (l'azote est volatilisé durant la combustion).

Dans une perspective de retour au sol, une cendre apporte aux cultures, à raison d'une dose d'épandage de 6 t/ha, 1 tonne de chaux, 200 unités de potasse, environ 100 unités de magnésie et 80 unités de phosphore. Ces éléments recyclés se substituent aux amendements et engrais du commerce.

La combustion n'étant pas complète, en particulier sur les petites installations, il reste des « imbrûlés » correspondant au carbone organique total (COT), en général dans des proportions inférieures à 5-10 % de la MS, mais avec une grande variabilité (entre 0 et 30 %).

Les cendres contiennent également des éléments traces métalliques ou "métaux lourds" potentiellement polluants : arsenic, bore, cadmium, cuivre, chrome, argent, molybdène, mercure, nickel, et zinc; certains devant être considérés comme des oligo-éléments d'intérêt tels que le bore, le cuivre, le zinc : Ces ETM sont présents à l'état naturel dans la biomasse des végétaux. La combustion de la biomasse tend à concentrer certains ETM dans les cendres.

However, there are many other factors that impact the quality of the ashes:

- *The type or mixture of inputs (for wood: tree species, proportion of bark, type of biomass, waste ...)*
- *The treatment type applied to these inputs: crushing, screening, déferrailage, addition of adjuvants in the case of agricultural biomass (CaO for limiting the production of clinker, soda to prevent the production of hydrochloric acid or sulfuric...).*
- *The type of heat treatment (combustion, pyrolysis ...).*
- *The type of combustion equipment: fluidized bed, grate furnace, spreader stoker...*
- *The size of the installation, the combustion temperature.*
- *The gas treatment mode : cyclone, electro filter, bag filter ...*
- *The ash collection methods: ash mixture or not / wet/dry ash.*
- *The conduct of the installation.*
- *The post-processing techniques (mixtures, grinding, chemical extraction, etc*

Main features

We must first distinguish the main sources of ash in a boiler: bottom ash is recovered in the combustion grate while the fly ash is collected in the gas treatment equipment. It is recognized that as fly ash from flue gas treatment equipment (electro filters and bag filters) are, in the case of the metals, more concentrated than bottom ashes and have a higher soluble fraction.

- Bottom ash

The ash content (mineral matter not volatilized during combustion and unburnt organic matter) varies between 0.5 to 15% from the raw material. The agro fuels or the bark have a high ash content, unlike calibrated wood chips.

Overall, biomass ashes consist mainly of lime (10 to 30%) and silica (5 to 60%).

Indicatively, we can give some common characteristics to all wood ashes. They have a pH significantly basic (around 12) and have a neutralizing value of about 50%, that means that a ton of ash has the same neutralizing power as a ton of lime carbonate (CaCO₃) or 500 kg of lime (CaO) and contains the nutrients necessary for crops. Moreover, ashes have virtually no nitrogen content (nitrogen is volatilized during combustion).

With the objective of a returning to the ground, ashes bring to crops, at a rate of 6 t/ha, 1 ton of lime, 200 units of potash, about 100 units of magnesia and 80 units of phosphorus. These recycled elements are substituted at commercial fertilizers and at amendments.

The combustion is not complete, especially on smaller installations, there are still unburned matter corresponding to the total organic carbon (TOC), usually in proportions of less than 5-10% of the MS, but with great variability (between 0 and 30%).

The ash also contain "heavy metal" potentially pollutants: arsenic, boron, cadmium, copper, chromium, silver, molybdenum, mercury, nickel and zinc; among them, certain are considered as trace elements of interest such as boron, copper, zinc: These ETM are present naturally in the biomass of plants. The combustion of the biomass tends to concentrate elements in the ash.

Table 2 : Metallic trace elements in bottom ash from collective boiler (France data)

Paramètres	Average of analyses (CEDEN)			Decree of the 26/08/2013 (land-spreading plan) - France	Compost standard NF U 44 051 France	European project commission for fertilizer (2017)	European regulations (Germany, Austria, Sweden, Denmark, Finland)
	Period 2003-2014	Period 2003-2010	Period 2010-2014				
	Biomass fuel : wood chips, by-products from sawmill, mixtures including clean wood waste						
	150 analyzes						
	Mg/kgMS						
Cr	136	154	134	1 000	120		100-300
Ni	42	49	37	200	60	120	60-200
Cu	395	368	438	1 000	300		200-700
Zn	836	1 151	666	3 000	600		1 200-7 000
Cd	3	6	4	10	3	3	1,5-30
Pb	282	457	178	800	180	150	100-300
Hg	-	-	-	10	2	2	0,8-3
As	14	17	12		18	60	20-45
Se	2	2	2		12		

Compte tenu du mode d'obtention par combustion, les teneurs en composés traces organiques sont en général faibles dans les cendres.

- Cendres volantes

Les cendres volantes sont plus concentrées en métaux lourds et en chlorures. Ce constat est massivement admis par l'ensemble des acteurs de la filière. Pour cette raison, les cendres volantes sont plus difficilement valorisables que les cendres sous foyer. Toutefois, une nuance doit être apportée : les cendres volantes issues de lit fluidisé, majoritaires dans ces équipements, sont en général beaucoup moins concentrées en éléments polluants, ces derniers étant « mieux » répartis entre les cendres sous foyer et les cendres volantes et compte tenu d'une température de combustion plus faible.

La composition des cendres volantes est globalement assez proche de celle des cendres sous foyer sur le plan des éléments fertilisants ou neutralisants : phosphore, magnésie, potasse, chaux.

Les cendres volantes de chaufferies équipées d'un four à grille sont beaucoup plus concentrées en éléments traces que les cendres sous foyer. Ce constat explique que dans la plupart des pays européens, les cendres volantes issues de ces installations sont exclues du retour au sol.

Principaux effets recherchés des cendres de biomasse selon les applications

On peut résumer les principaux effets recherchés des cendres de biomasse suivants :

Given the method of production by combustion, the ash generally has low contents of trace organic compounds.

- Fly ash

Fly ash has a higher content of heavy metals and chlorides.

These findings are overwhelmingly accepted by all sector players. For this reason, it's more difficult to recycle fly ash compared to the bottom ash. However, a nuance should not be overlooked : the fly ash from fluidized beds are generally much less concentrated in pollutants, the latter being "better" distributed among the bottom ashes and fly ash and considering a lower combustion temperature.

The composition of fly ash is generally close to that of the bottom ashes concerning fertilizers or neutralizing elements : phosphorus, magnesium, potash and lime.

Fly ash from boilers equipped with a grate furnace has a higher heavy metal content than bottom ashes. This finding explains that in most European countries, the fly ash from these facilities is excluded from the agricultural recycling.

Principal intended effects of biomass ashes according to applications

We can summarize the main intended effects of biomass ash in the following table :

Table 3 : Expected effects and corresponding applications

Expected effects	Applications
Fertilizer interest (P, K, MgO...)	Return to the soil (agriculture and forest)
Neutralizing and stabilizing interest	Return to the soil (agriculture and forest) Waste treatment Soil treatment
Silica (rigidity of the plants)	Return to the soil (agriculture)
Pozzolanic character	Incorporation in cement, concrete
Filling / charge (porosity, grain size, density) (filler)	Granulométric correction for concrete and mortar Ceramics, plastics... Filling / landscaping of mines, quarries and landfill
Contributions of alkaline, coloring	Ceramics

4 Revue des différents procédés de post-traitement et des démarches R&D en cours ou récents

Des travaux sur le recyclage des cendres de biomasse ont été menés ces 10 dernières années en Europe (en particulier en Autriche et en Scandinavie) puis plus récemment dans le cadre de programmes transfrontaliers et en France. Les travaux de recherche et développement et les chantiers de démonstration identifiés concernent les possibilités de recyclage dans l'agriculture, l'industrie, le BTP (génie civil, techniques routières), et les différents aspects : technique, économie, impact environnemental.

Revue des applications possibles et des post-traitements

Le tableau suivant dresse la liste des principales applications et post-traitements mis en œuvre et envisageables pour les cendres de biomasse.

4 Overview of the various post-treatment processes and R & D actions in progress or recent

Work on the recycling of biomass ashes has been carried out over the last 10 years in Europe (especially in Austria and Scandinavia) and more recently in the context of cross-border programs and in France. The identified R&D and demonstration projects concern recycling opportunities in agriculture, industry, construction (civil engineering, road engineering), and on different aspects: technical, economics, environmental impact, etc.

Overview of possible applications and post treatments

The following table lists the major applications and post-processing implemented and feasible for biomass ashes.

Table 4 : Main applications and post treatments

	Application	Maturity of the application	Ash type
Elimination	Landfill disposal	****	All concerned ash but fly ash mainly
	Post treatment: stabilization need in case of excessive soluble fraction	80-120 €/t bottom ash 200-400 €/t fly ash	
Agronomical recycling	Agronomical recycling (fertilization and liming mainly) on agricultural soils (including France) and in forest (Austria, Germany, Sweden).	**** (agriculture) 35-50 €/t agriculture ** (forest) 50-100 €/t (forest)	Bottom ash and coarse ash or mixture of them (grate or fluidized bed) In some cases, only bottom ash
	Incorporation to the production of compost (Austria and Germany). In France this practice is permitted under certain conditions (normalized ash or spreading plan ...).	***	
	Mixing with by-products (digestate ...)	Sewage sludge : * Other : R&D	
	Post-treatments: grinding, screening, extraction of ferrous metals, granulation	**	
Building / Building materials	Cement (pozzolan power) Concrete (charge, additives) Bitumen (charge) Production of bricks (sand substitute)	R&D at *	Primarily fly ash from grate or fluidized bed
	Post-treatment: grinding, screening, ferrous metal extraction, slaking lime, chlorides treatment , unburned organic matter...	R&D at *	Bottom ash
Civil Engineering / Construction	Road technics : - Backfill - underlays - Binders for stabilization / soil stabilization	R&D at **	Wood fly ash from grate or fluidized bed. Bottom ash. Fly ash can be pushed aside
	Post-treatments : grinding, screening, ferrous metal extraction, mixtures	**	
	Landscaping landfill Embankment for quarries, filling mines Stabilization of dredged material Quarries	**	Primarily fly ash
Industry	Ceramic Plastics (mineral filler) Treatment of hazardous waste, effluents Extraction of metals or nutrients Geo-polymers, eco-binders	R&D at * R&D R&D at * ** / High cost R&D	Fly ash equipment grates or fluidized bed.

* to **** : not mature - very mature
R&D : stage of R&D
The costs concern France

Démarches de R&D et travaux recensés

A l'échelle européenne

- Programmes et travaux nationaux

En Europe, les travaux les plus structurants ont été conduits en Autriche et en Suède avec les programmes ASH Programme/RECACH en Suède et BIOENERGIESYSTEME en Autriche.

En Suède le Ash Programme, sur la période 2002-2011 (budget cumulé de 10 millions d'euros), a été piloté par l'institut technique de recherche Värmeforsk, et a associé une trentaine de grosses compagnies. Les travaux ont porté sur de très nombreuses applications : le comblement de mines par des cendres volantes, l'utilisation en tant que liant routier pour la stabilisation des sols, l'utilisation des cendres volantes en tant que granulats pour les techniques routières, le retour au sol, la cimenterie, la production de mortiers, les cendres volantes pour le traitement des déchets dangereux, l'incidence du lessivage pendant le stockage... Les résultats de ces travaux ont fait l'objet d'un colloque marquant en janvier 2012.

D'autres programmes en lien avec Ash Programme ont également concerné le recyclage des cendres : RecAsh (projet Life 2003-2006 ; budget de 1,7 millions d'euros) qui a produit des recommandations techniques spécifiques pour l'utilisation des cendres en forêt et favorisé des échanges entre acteurs et le programme "Efficient forest fuel supply systems" reconduit en 2011 pour 4 ans et qui intègre explicitement le retour des cendres en forêt dans le cadre d'une mobilisation accrue de la biomasse.

En Autriche, le programme BIOENERGIESYSTEME, animé par l'Université de Graz sur la période 2009-2013 avait pour objectif de développer des pratiques innovantes de valorisation des cendres de bois, dans le but de réduire les quantités éliminées par enfouissement. Les axes de recherche ont concerné principalement le retour au sol (compostage) et dans une moindre mesure le génie civil : construction de routes forestières, production de liants hydrauliques pour la stabilisation de sols... En Autriche toujours, le programme BIOTREAT-Wood ash (Université de Innsbruck) a conduit des travaux sur l'intérêt neutralisant des cendres pour le retour au sol en compostage.

Aux Pays-Bas, le centre de recherches pour l'énergie ECN a conduit des travaux sur les cendres issues d'installations de co-combustion, notamment avec charbon, dans le cadre du programme Biomass cofiring. Le rapport KEMA fait état de recherches concernant des applications mais il semble que les travaux ont principalement porté sur les caractéristiques des cendres issues de biomasse et de charbon.

En Suisse, le projet HARWA (Holzasche-Recycling im Wald), coordonné par le WSL (Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage) entre 1997 et 2001, a porté sur l'intérêt du recyclage de cendres de bois en forêt sur sols acides en compensation d'exportations accrues. Ces travaux concluent à l'intérêt du recyclage de cendres pour remédier à l'acidification des sols.

En Finlande, des programmes de R&D, adossés à l'usine de cogénération de Keljonlahti brûlant 50 000 tonnes de biomasse, ont été conduits entre 2009 et 2011 : ces travaux ont notamment porté sur l'utilisation des cendres pour la production de béton. Toujours en Finlande, un programme mis en place entre 2011 et 2012 a été conduit pour déterminer les conditions de production à grande échelle de granulés de cendres, dans un but notamment de valorisation en forêt.

D'autres programmes ou travaux de recherche ont également été conduits en Allemagne (Université de Munich), Espagne

Works and approaches R & D identified in Europe

European scale

- Programs and national works

In Europe, the most structured work has been conducted in Austria and Sweden with the ASH Program / RECACH in Sweden and BIOENERGIESYSTEME in Austria.

In Sweden the Ash Program for the period 2002-2011 (cumulative budget of € 10 million) was carried out by Värmeforsk technical research institute and associated with thirty major companies. Work focused on numerous applications: filling mines with fly ash, the use as a road binder for soil stabilization, the use of fly ash as an aggregate for road engineering, return to ground, cement, production of mortars, fly ash for treatment of hazardous waste, the impact of leaching during disposal... the results of this work were the subject of a landmark symposium in January 2012.

Other programs related with the Ash Program have also concerned the recycling of ashes :

- program RecAsh (2003-2006 - "Life" project - budget of EUR 1.7 million) : specific technical recommendations for the use in forest, promotion of exchanges between actors

- "Efficient forest fuel supply systems" : program renewed in 2011 for 4 years and which explicitly includes the return to forest through increased mobilization of biomass.

In Austria, the BIOENERGIESYSTEME program, hosted by the University of Graz over the period 2009-2013 aimed to develop innovative ways of recycling wood ash, to reduce the quantities disposed of by burial. Research topics mainly concerned the return to the soil (composting) and, to a lesser extent, civil engineering: construction of forest roads, production of hydraulic binders for soil stabilization, etc. In Austria also, the program BIOTREAT-Wood ash (University of Innsbruck) concerns the neutralizing interest for the return of the ashes of soil by composting.

In the Netherlands, the research center for energy (ECN) has led work on ash from co-combustion plants, especially with coal, as part of the program "Biomass cofiring". The KEMA research mentions operational applications but it seems that the work has above all focused on the characteristics of ash from biomass and coal.

In Switzerland, Harwa project (Holzasche im Wald-Recycling), coordinated by the WSL (Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape) between 1997 and 2001, focused on the interests of the recycling of wood ash in forest on acid soils in compensation of the increased exports. These studies conclude positively on the interest of ash recycling to address soil acidification.

In Finland, R & D programs related to the CHP plant burning 50,000 tons of biomass (Keljonlahti) were conducted between 2009 and 2011: this work has focused in particular on the use of ash for concrete production. Also in Finland, a program implemented between 2011 and 2012 was conducted to determine the conditions for large-scale production of ash granules, for purposes of enhancement in forests.

Other programs and research were also conducted in Germany (University of Munich), in Spain (University of Granada) and in Italy on different applications: forest, incorporation in concrete, etc

(université de Grenade), en Italie sur différentes applications : retour en forêt, incorporation à des bétons.

- Programmes collaboratifs

Ces dernières années, plusieurs programmes collaboratifs européens ont porté, parmi d'autres sujets en lien avec la biomasse, la combustion, le traitement des déchets, la valorisation agronomique des sous-produits, sur le recyclage des cendres.

BIOCOMBUST (2013-2015) est un projet de recherche interdisciplinaire impliquant des partenaires français, suisses et allemands en partenariat avec HOLCIM. Son but est d'étudier les émissions de particules et les cendres et les opportunités de valorisation des cendres. Le potentiel de valorisation des cendres de biomasse comme additif de ciment a été étudié. Les résultats de l'étude ont fait l'objet d'une présentation le 23 avril 2015 à Strasbourg. L'utilisation des cendres de biomasse n'est possible que pour certaines applications très spécifiques, donc concernant des gisements très faibles.

ECOBIOGAZ (2012-2015). Ce programme transfrontalier belge, allemand, luxembourgeois et français a concerné notamment la valorisation des cendres de bois, provenant des centrales de cogénération régionale, en agriculture (principalement sur prairies) et en forêt. Les résultats concernant les cendres ont été présentés le **21 avril 2015** à Gembloux dans le cadre des Midis de la Biomasse (thème : Pistes de valorisation des cendres issues de chaufferies bois¹). Les essais ont porté sur l'apport de cendres sur prairies, seules ou en mélange avec des lisiers et des digestats.

Les programmes collaboratifs BIOREFINE et EUROPEAN SUSTAINABLE PHOSPHORUS PLATFORM ESPP2, en lien direct avec le retour au sol, ont également traité la question des cendres de biomasse et notamment l'intérêt des mélanges avec d'autres sous-produits.

En France

En France, les initiatives sont plutôt récentes et se sont accélérées ces deux dernières années. On recense différentes démarches pour des applications diverses et alternatives au recyclage en agriculture. Plusieurs programmes ont été reconduits en 2015 pour préciser certains aspects.

Dans le domaine du retour au sol en Forêt, deux programmes marquants, **ICIF** – itinéraires de cultures intensifs en forêt - (ONF/INRA/FCBA) à partir de 2011 et **RESOBIO** en 2014 ont abouti à des conclusions favorables au retour en forêt. Dans la continuité de ces travaux, un projet **REACTIF/RESPIRE** a été lancé en 2015 pour une durée de 3 ans, sous l'égide de l'ONF et de l'UCFF, dans l'objectif de préciser les modalités techniques de l'épandage et d'évaluer l'incidence environnementale. Les signaux sont donc aujourd'hui au vert pour cette application et un projet de plan d'épandage a même été recensé en Basse-Normandie en octobre 2015.

Dans un tout autre domaine, le programme **CERACENDRE**, soutenu par l'ADEME et porté par la Société française de céramique (SFC) a débuté en 2011 et s'est terminé en décembre 2014. Il visait à étudier l'opportunité d'incorporer des cendres de biomasse dans des céramiques. Selon le responsable du programme³, les conclusions sont probantes et l'utilisation est possible sous réserve d'un certain nombre de traitements préalables (broyage, déferrailage, criblage). L'incorporation de cendres de biomasse est intéressante à plusieurs titres pour la filière céramique : substitution d'une matière première onéreuse (de 20 €/t pour les terres cuites à 70-80 €/t pour les autres céramiques et notamment le secteur sanitaire), coûts de transport réduits. Les gisements de cendres des chaufferies bois sont très diffus sur le territoire, à l'image

- Collaborative programs

In recent years, several European collaborative programs have focused on the recycling of ashes, among other topics related to biomass burning, waste treatment and agricultural use of by-products.

BIOCOMBUST (2013-2015) is an interdisciplinary research project involving Swiss, French, and German partners in partnership with Holcim. Its purpose is to study the particle emissions and ash recycling opportunities. The potential for exploitation of biomass ash as cement additive was investigated. The results of the study were the subject of a presentation on the 23rd of April 2015 in Strasbourg. The use of biomass ashes is only possible for some very specific applications (niche market), therefore for very low quantities.

ECOBIOGAZ (2012-2015). This cross-border program which involves Belgium, Germany, France and Luxembourg concerns above all the use of wood ash from regional CHP plants, in agriculture (mainly grassland) and in forest. The results regarding the ashes were presented in Gembloux on the 21st of April 2015 as part of the "midis de la biomasse" (theme: "Opportunities for reflection for recycling for ash from wood boilers"). The trial included the agronomical contribution of ash on grassland, alone or mixed with manure and digestate.

Collaborative programs BIOREFINE and "EUROPEAN SUSTAINABLE PLATFORM PHOSPHORUS EPSP," directly linked with the agronomical recycling, deal particularly with the issue of biomass ash and include the interest of mixtures with other byproducts.

In France

In France, initiatives are quite recent and have accelerated in the past two years. Different approaches for different applications and alternatives at agricultural recycling are identified. Several programs have been renewed in 2015 to clarify certain aspects.

In the area of the return to forest, two important programs (ICIF - intensive crops in forest itinerary - (ONF / INRA / FCBA) from 2011 and RESOBIO in 2014) resulted in favorable conclusions in the forest. In continuation of this work, a project "REACTIF / RESPIRE" was launched in 2015 for a period of 3 years, under the aegis of the NFB and UCFF, with the objective of specifying the technical arrangements for land-spreading and evaluating the environmental impact. Today, there is a green light for this application and a land-spreading project plan was even identified in Lower Normandy in October 2015.

In a different area, the CERACENDRE program supported by ADEME and supported by the French Society of ceramics (SFC) began in 2011 and ended in December 2014. It aimed to study the desirability of incorporating biomass ashes in ceramics. According to the program manager, the findings are conclusive and use is possible subject to a number of pre-treatments (grinding, screening, metal extraction). The incorporation of biomass ash is interesting for several reasons for the ceramic industry: substitution of expensive raw material (20 €/t for terracotta and 70-80 €/t for other ceramics), including the sanitary sector), reduction of transport costs. The ash stocks of wood boiler are very diffused in the French territory, like the ceramic industry. Further developments will be subject to a new program which is in continuation of the previous, in partnership principally with Cylergie and IDEX.

The project VALOCENDRE, with a 30 month duration, began in 2015. It is supported by a consortium led by

¹ <http://www.valbiom.be/evenements/les-midis-de-la-biomasse.htm>

² <http://www.phosphorusplatform.eu/>

³ Communication personnelle M. Filhol de SFC en mars 2015.

de filière céramique. Des développements complémentaires feront l'objet d'un nouveau programme dans le prolongement du précédent, en partenariat notamment avec CYLERGIE et IDEX.

Le projet VALOCENDRE⁴, d'une durée de 30 mois a débuté entre 2015. Il est porté par un consortium piloté par Norske Skog Golbey (papeterie à base de papier recyclé) dans le cadre d'un appel à projet BIP. Un utilisateur de bétons pour des applications spécifiques fait partie du consortium. Contrairement au programme CERACENDRE qui portait principalement sur des cendres sous foyer, seules les cendres volantes de l'industriel seront concernées (55 000 tonnes).

Le programme EVACEB (Eco-valorisation des cendres de biomasse) devrait débuter fin 2015-début 2016 et s'inscrit dans un dispositif CIFRe (conventions industrielles de formation par la recherche). Porté par un exploitant de chauffage associé à plusieurs partenaires dont deux laboratoires, les travaux visant à produire des éco-liants utilisés notamment en techniques routière s'étaleront sur une durée de 3 ans.

On identifie également quelques démarches portées par des industriels ces dernières années et dont les résultats sont moins connus/diffusés.

Le projet PLASTICENDRE est un projet français débuté en 2012 visant à mettre en place une nouvelle filière de valorisation pour les cendres volantes produites par une papeterie qui produit du papier à partir de papiers recyclés et des bois de trituration. Ce projet prévoyait l'utilisation des cendres volantes dans l'industrie de la plasturgie en tant que charge minérale. Globalement, le programme PLASTICENDRE a montré que la plupart des critères exigés par l'industrie de la plasturgie étaient respectés mais qu'un certain nombre d'analyses, exigées par l'industrie du plastique, étaient encore nécessaires.

Une démarche d'homologation pour le retour au sol et une autre sur l'utilisation des cendres volantes pour le traitement des déchets dangereux a également été portée ce papetier.

Enfin, SARP conduit notamment des travaux pour trouver des solutions de valorisation des cendres volantes, en particulier en tant que matériau de neutralisation des déchets spéciaux (REFIOM notamment).

Enseignements

Il ressort de ces travaux et recherches sur les alternatives au retour au sol, menés ces 10 dernières années, plusieurs enseignements principaux:

- L'intérêt agronomique des cendres est démontré et largement admis, principalement en agriculture. Pourtant, hormis en France, l'enfouissement semble prédominant en Europe.
- Aucune alternative - au retour au sol pour les cendres sous foyer et à la décharge pour les cendres volantes - structurée et pouvant disposer d'un potentiel de développement industriel, et généralisable n'est identifiée.
- Certaines pistes semblent sans avenir, excepté pour des gisements très spécifiques (bétons, cimenterie, plasturgie, briquetterie) alors que d'autres semblent plus prometteuses (céramique, techniques routières/TP, forêt).
- Les nombreux résultats issus des travaux sont insuffisamment partagés et/ou connus. En conséquence, il semble que certains programmes lancés récemment exploitent insuffisamment les retours d'expérience, au risque de refaire ce qui a déjà été fait.

Les nombreuses initiatives pour trouver des alternatives au retour au sol, pour tous types d'applications (GC, BTP, techniques routières, clément/aménagement, valorisation matière, industrie, traitement de déchets...) se sont soldées par des résultats insuffisamment convaincants, voire des échecs et

Norske Skog Golbey (paper mill) as part of a call for BIP project. A concrete user for specific applications is part of the consortium. Unlike the program CERACENDRE that focused on the bottom ash, the project deals only with the fly ash of the plant (55 000 tons/an).

The program EVACEB (Eco-valorization of biomass ash) should start early 2016 and is part of a CIFRE device (industrial agreements for training through research). Driven by a heating operator associated with multiple partners, including two laboratories, the work, which aims to produce eco-binders especially in road techniques, will be spread over 3 years.

Some initiatives are also identified, which have been carried out by the industry in recent years, though the results are less known / disseminated.

The project PLASTICENDRE is a French project that started in 2012 aimed at implementing a new recycling application for fly ash produced by a paper mill producing paper from recycled paper and pulpwood. This project involved the use of fly ash in the plastics industry as a mineral filler. Overall, the program PLASTICENDRE showed that most of the criteria required by the plastics industry were respected but that a number of analyses required by the plastics industry were still needed.

An approach regarding with marketing authorization for the return to soil and another one on the use of fly ash for treatment of hazardous waste was also led by this papermaker.

Finally, SARP leads studies especially to find recovery solutions for fly ash, particularly as special waste neutralizing material (Residue of gas treatment of incineration particular).

Lessons

We can draw several key-lessons from the work and research on alternatives to agricultural recycling led in the last 10 years.

- *The agronomic interest of ash is demonstrated and widely recognized, mainly in agriculture, though, with the exception of France, landfill disposal seems predominant in Europe.*
- *No structured, generalizable alternative (return to the soil for bottom ash and landfill disposal for fly ash) which may possess a potential for industrial development and, is today identified.*
- *Certain avenues seem without future (concrete, cement, plastics and brickworks), except for very specific ash, while others seem more promising (ceramics, road techniques, construction and forest).*
- *The many findings from the works and research are insufficiently shared and / or known. Consequently, it would appear that some recently launched programs insufficiently exploit the experience feedback, with the risk of duplicating what has already been done.*

The many initiatives to find alternatives to the agricultural recycling (civil engineering, construction, road techniques, landfill planning, material recovery, industry, waste treatment, etc) resulted in insufficiently convincing results, or failures, and without possible industrial developments, except for some niche markets or for specific ash deposits and / or produced by a particular facility. This finding is explained mainly by technical problems but also in some cases by an unfavorable or unsuitable regulatory or normative framework.

For fly ash, for which the return to the ground is generally proscribed, some alternatives to landfill disposal were tested, of which some are reasonably possible, especially

⁴ Communication personnelle Mme BORTOLOTTI Norske Skog en mars 2015.

n'ont pas ou très peu abouti à des développements industriels, excepté pour certains marchés de niches ou pour des gisements de cendres spécifiques et/ou produits par une installation. Ce constat s'explique par des freins techniques principalement mais également dans certains cas par un cadre réglementaire ou normatif peu favorable.

Concernant les cendres volantes, dont le retour au sol est très généralement proscrit, des applications alternatives à la décharge ont été testées, dont certaines raisonnablement envisageables, notamment dans le domaine du traitement des déchets ou du Génie Civil. Mais ces cendres pâtissent d'une image très négative, qui laisse à penser à leur producteur qu'aucune alternative à la décharge n'est possible, freinant ainsi les initiatives et le développement de solutions de valorisation.

5 Propositions pour favoriser le recyclage des cendres

A l'issue de l'état des lieux de la filière, quelques propositions et idées fortes émergent pour favoriser le recyclage des cendres et éviter leur élimination en décharge :

- conforter le retour au sol des cendres sous foyer, seule filière disposant d'un potentiel industriel ;
- soutenir les valorisations alternatives les plus prometteuses, y compris pour les cendres volantes ;
- structurer la filière.

Conforter la filière agricole pour les cendres sous foyer

Cette filière de recyclage est actuellement la plus robuste et la plus applicable massivement aux cendres sous foyer : elle est structurée et dispose d'un véritable potentiel industriel. En l'absence de véritable concurrence actuellement et dans l'attente de nouveaux débouchés potentiels, cette filière doit être consolidée car, outre son intérêt agronomique et environnemental, elle participe à la réduction des coûts de la filière bois énergie dans son ensemble. Le retour au sol et en particulier la filière agricole est en France (voire en Europe) la seule voie éprouvée de recyclage des cendres sous foyer. On estime à 70-80 % les flux de cendres sous foyer épandues en agriculture en France, le reste de la production étant éliminée en décharge de classe 2 (installation de stockage de déchets non dangereux). Plusieurs suggestions sont proposées pour conforter la filière :

- **Optimiser la qualité des cendres**, en améliorant la qualité de l'approvisionnement et en améliorant la connaissance sur les post-traitements, et en travaillant davantage sur la complémentarité des sous-produits (digestats, boues...).
- **Préciser le cadre réglementaire et normatif**, notamment en France. La réglementation a favorablement évolué en 2013 (arrêtés du 26 août 2013) mais il reste encore quelques ambiguïtés à lever pour rassurer la filière. Le cadre normatif actuel, s'il autorise théoriquement la normalisation des cendres de biomasse (norme NF U 42 001), ne le permet pas ou quasiment pas dans les faits : une évolution s'impose pour apporter de la clarté. Enfin, la diversité des approches réglementaires en Europe et l'absence de lignes directrices aujourd'hui ne sécurisent pas opérateurs à l'échelon national, qui manquent de visibilité à moyen terme en raison de possibles évolutions, potentiellement plus contraignantes : à l'échelle européenne, il convient donc d'aller vers une harmonisation et de promouvoir les cendres de biomasse dans le règlement 2003-2003 en cours de refonte.
- **Favoriser les démarches d'AMM** (autorisation de mise sur le marché) en permettant des démarches collectives (sur le modèle proposé pour les digestats) ou mettre en place une certification qualité (ex : QUALICENDRE⁵) sur le modèle des composts d'ordures ménagères par exemple.

⁵ Proposition suggérée par CEDEN

in the field of waste treatment or Civil Engineering. But these ashes suffer from a very negative image, which slows the initiatives from their producers and the development of alternative solutions.

5 Proposals to encourage the recycling of ash

After the inventory of fixtures of the ash management, some proposals are emerging to facilitate the recycling of ash and so avoid landfill disposal:

- *strengthen the return to the soil of the bottom ash, the only recovery stream with an industrial potential;*
- *support the most promising valorization alternatives, including those for fly ash;*
- *structure the industry.*

Strengthen the agricultural sector for bottom ash

This recycling process is currently the most robust and most widespread for bottom ash: it is structured and has a real industrial potential. In the absence of real competition today and in awaiting new potential markets, this sector must be consolidated because, in addition to agricultural and environmental interest, it helps reduce the costs of the wood energy sector as a whole. The return to the soil and particularly the agricultural sector in France (or in Europe) is the only proven way of ash recycling. It's estimated 70-80% the ash is recycled on agricultural plots in France, the rest of the production being eliminated in Class 2 landfill (non-hazardous waste storage facility). Several suggestions are made to strengthen the sector :

- **Optimize ash quality**, improving the quality of fuel supply and improving knowledge on post-treatment, and working more on the possibilities of mixing by-products (digestate, sludge, etc).
- **Clarify the regulatory and legislative framework**, particularly in France. The regulations have evolved favorably in 2013 (Decrees of August 26, 2013) but there are still some ambiguities to be overcome to reassure the sector. The current regulatory framework theoretically allows the standardization of biomass ash (NF U 42001) but it's not possible or hardly in practice in view of the ash quality: a evolution is needed to bring clarity. Finally, the variety of regulatory approaches in Europe and the lack of guidelines today don't secure operators that lack visibility in the medium term due to possible changes which are potentially more restrictive: on a European scale, it is appropriate to move towards harmonization and to promote ash from biomass in the 2003-2003 regulations being revised.
- **Encourage marketing authorization procedures** by allowing collective actions (on the model proposed for digestates) or implement a quality certification on the model of municipal waste compost in France by example.
- **Assess forest potential**, with assistance from the NFB, the CRPF and IGN, **adjust the agricultural recycling regulations**, in order to promote this sector which operates within a logic of circular economy. In order to make the sector competitive, it is recommended to be pragmatic and to align as far as possible with the processing and application conditions prevailing in agriculture, to reduce costs to a minimum.

Support the most promising alternatives to the return to the soil

It appears necessary to have alternatives to the return to the soil to ensure maximum recycling, in case of temporary or permanent difficulty on agricultural sector and thus

- **Evaluer le potentiel en forêt**, avec le concours de l'ONF, du CRPF et de l'IGN, **ajuster la réglementation** actuellement adaptée au recyclage agricole afin de promouvoir cette filière qui s'inscrit dans une stratégie d'économie circulaire. Afin de rendre la filière compétitive, il est préconisé de faire preuve de **pragmatisme** et de s'aligner dans la mesure du possible sur les modalités de traitement et d'épandage qui prévalent en agriculture, afin de réduire les coûts au maximum pour rendre cette filière compétitive.

Soutenir les alternatives au retour au sol les plus prometteuses

Il apparaît nécessaire de disposer à terme d'alternatives au retour au sol pour assurer le maximum de recyclage, en cas de difficulté provisoire ou durable sur la filière agronomique, et donc de soutenir les démarches les plus prometteuses. Plusieurs pistes sont suggérées :

- **Faire des arbitrages / fixer des priorités pour gagner en efficacité.** Les pouvoirs publics, l'ADEME doivent recentrer les travaux sur des filières qui peuvent présenter un potentiel « industriel ». Outre le recyclage en forêt déjà évoqué, l'industrie de la céramique, les techniques routières semblent constituer des voies de valorisation possibles. La céramique pourrait concerner, sous réserve de travaux complémentaire, à terme les cendres volantes. D'autres applications concernant les cendres volantes (techniques routières, traitement de déchets comme les REF10M6 ou le REF10S7...) doivent être soutenues pour tenter de trouver des alternatives à l'enfouissement quasi systématique de ce type de cendres.
- **Travailler sur les post-traitements**, condition nécessaire pour répondre aux exigences des débouchés. Contrairement au retour au sol ou les traitements nécessaires avant épandage sont relativement simples et pour lesquels on a un peu de retour d'expérience (broyage, criblage et déferrailage principalement), les débouchés alternatifs sont pénalisés par des contraintes de préparation plus fortes et moins éprouvées. La meilleure connaissance de ces traitements est donc une condition sine qua non pour pouvoir développer les voies de recyclage alternatives. On peut citer : extinction de la chaux vive, élimination/valorisation de la matière organique « imbrûlée », extraction d'ETM (démarches couteuses et tentatives déjà réalisées dans les années 2000)...
- **Faire pression pour faire évoluer le cadre réglementaire favorablement.** Pour la plupart des autres applications (Génie civil, BTP, techniques routières, industrie...), les porteurs de projets s'appuient sur des réglementations « par défaut » ou peu adaptées: celles concernant les cendres de charbon ou les mâchefers par exemple. La problématique cendres de biomasse n'était pas assez prégnante jusqu'à maintenant pour susciter la mise en place d'un cadre réglementaire ad hoc.

Structurer la filière et améliorer la connaissance

La structuration de la filière doit permettre de mutualiser les efforts en vue de la valorisation des cendres et de promouvoir le développement de la filière. Elle pourrait passer par la création d'une plateforme collaborative, la communication (guides d'application), le partage et l'exploitation des données analytiques. Quelques pistes de réflexion sont suggérées :

- **Créer une plateforme collaborative** en France. Certains producteurs sont favorables à la mise en place d'une structure collaborative rassemblant producteurs et industriels et dédiée spécifiquement à la gestion des cendres de biomasse. L'objectif est de donner de la valeur ajoutée aux cendres et par conséquent à la filière bois énergie dans son ensemble. Cette structure pourrait, créer des groupes de

support the most promising approaches. Several avenues are suggested:

- **Make trade-offs / set priorities to be more efficient.** Public authorities must refocus the work on solutions that may present an industrial potential. Besides the forest recycling already mentioned, the industry of the ceramics and the road techniques appear to be credible recycling methods. The recycling in ceramics could be applied, subject to further complementary work, to fly ash. Some other applications on the fly ash (road engineering, waste treatment like REF10M or REF10S, etc) should be supported to try to find alternatives to landfill, which is almost systematic of this type of ash.
- **Improve the post-treatment.** This is a necessary condition to meet the requirements of markets. Unlike the return to the soil for which necessary treatments before the spreading are relatively simple and for which we have some feedback from experiments (crushing, screening, iron extraction), alternative outlets are penalized by stronger preparation constraints and less proven. Better knowledge of these treatments is therefore a sine qua non condition for developing alternative recycling routes. We can give an example: slaking lime, disposal / recovery of unburned organic matter, trace-metal extraction (expensive procedures and attempts were already made in the 2000s)
- **Do lobbying in order to evolve the regulatory framework favorably.** For most other applications (civil engineering, public works, road engineering, industry etc), project developers rely on "default" or unsuited regulations: those for coal ash or bottom ash of incineration plants, for example.

Structure the sector and improve knowledge

The structuring of the sector should make it possible to pool efforts for recovery of ash and promote the development of the sector. It could involve the creation of a collaborative platform, better communication (application guides), sharing and exploitation of analytical data. Some ideas are suggested:

- **Create a collaborative platform in France.** Some producers are in favor of establishing a collaborative structure, bringing together producers and industrial partners, and specifically dedicated to the management of biomass ash. The aim is to give value added to the ashes and therefore the sector of fuel wood as a whole. This structure could create specific working groups (logistics (eg: clustering platforms, treatments), standards, regulation 2003-2003, technical and regulatory watch on R & D programs or the feedback from experiments in France and the rest of Europe...).
- **Communicate more about the applications:** Production of specific guides. The proven applications, including for "niche markets" or regarding very specific ashes, should be promoted in order to improve the awareness of the value of ash from biomass for various applications. The confidentiality of certain programs supported by the industry or inter-profession ultimately limits the scope of the results and slows the development of certain markets. It is recommended, on the model of the coal ashes or sewage sludge writing, to create user manuals, according to the different applications.
- **Better characterize ashes and better identify them.** Despite the many programs and studies that have focused on the characterization of the ashes, it is clear that there are still insufficiently known parameters and

⁶ Résidu de fumée incinération d'ordures ménagères

⁷ Résidu de fumée d'incinération de déchets industriels spéciaux

travail spécifiques (aspects logistiques (ex : plateformes de regroupement, de conditionnement), normes, réglementation 2003-2003, veille techniques et réglementaires sur les programmes de R&D ou sur les retours d'expérience en France et en Europe...).

- **Communiquer davantage sur les applications** : production de guides spécifiques. Les applications éprouvées, y compris pour des « marchés de niche » et pour des cendres très spécifiques doivent être promues pour améliorer la prise de conscience de la valeur des cendres issues de biomasse pour des applications diverses. La confidentialité de certains programmes soutenus par des industriels ou des interprofessions limite finalement la portée des résultats et ralentit le développement des filières. Il est préconisé comme c'est le cas pour les cendres de charbon ou les boues d'épuration la rédaction de guides d'utilisation en fonction des usages.
- **Mieux caractériser les cendres et mieux les identifier.** Malgré les nombreux programmes et études qui ont porté sur la caractérisation des cendres, force est de constater qu'il reste encore des paramètres et des aspects insuffisamment évalués. De plus, l'absence de typologie claire rend les données souvent peu ou pas exploitables.
 - Certains paramètres mériteraient d'être affinés : méthode d'extraction supplémentaire pour le Phosphore (P citrique, un acide organique plus représentatif que le phosphore soluble dans le citrate neutre), disponibilité des éléments pour les cultures, Incidence de l'extraction par voie humide sur la qualité des cendres (extinction de la chaux vive, carbonatation...), comportement à la lixiviation des cendres sous foyer (pour des applications en GC, BTP, industrie, valorisation matière), formes de la chaux : CaO, Ca(OH)₂, CaCO₃, carbone organique total/imbrûlés..
 - Il ressort de l'étude et des contacts une véritable difficulté pour qualifier les cendres entre elles : incertitudes très fréquentes sur le type de cendres : cendres sous foyers, cendres sous foyer et multi-cycloniques, cendres multi-cycloniques, cendres volantes, mélanges de toutes les cendres... Il pourrait être pertinent de dresser une typologie simple des cendres admise par tous, et indiquant un minimum d'informations, qui permettrait de pouvoir comparer des analyses.
 - Enfin, l'étude a permis de collecter un certain nombre d'analyses qui pourront être la base d'une base de données. D'autres initiatives sont identifiées de la part du CIBE ou du LDAR. La base de données n'est exploitable que si chaque analyse est accompagnée d'informations permettant de qualifier les cendres : intrants, cendres sous foyer, type d'équipement....

6 Conclusion

L'importance du gisement de cendres de biomasse en Europe et son augmentation attendue (plus de 3 million de tonnes) font émerger depuis 1 ou 2 ans de nouvelles démarches et initiatives pour trouver des alternatives au stockage des cendres en décharge, solution actuellement la plus répandue. Indépendamment des coûts de traitement, les capacités de stockage se réduisent en Europe et concernent de plus en plus des déchets dits « ultimes », non valorisables.

Contrairement à la filière charbon qui dispose d'un bon retour d'expérience et de filières de recyclage solidement implantées, la question de la valorisation des cendres de biomasse est plus récente et se pose avec acuité depuis seulement quelques années, avec le fort développement de la biomasse énergie.

En Europe, la voie de valorisation principale est le retour au sol sur parcelles agricoles (épandage direct, incorporation à des composts), mais d'autres modes de recyclage, moins ou peu développés, sont identifiés : retour au sol en forêt (Allemagne, Autriche), industrie du ciment et de la brique, matériaux de

aspects. Moreover, the lack of a clear typology makes the data often difficult or impossible exploit.

- Some parameters deserve to be refined: additional extraction method for Phosphorus (P citric acid, an organic acid more representative than the soluble P in neutral citrate), availability of nutrients for crops, Impact of the wet way on the quality of ashes (lime slaking, carbonation ...), the leaching behavior of the bottom ash (for applications in civil engineering, construction, industry, material recovery), forms of lime CaO, Ca(OH)₂, CaCO₃, total organic carbon / unburned...
- A real difficulty to qualify and distinguish the ashes appears from the study and contacts: there is very frequent uncertainty about the type of ashes concerned : bottom ash, coarse ash (multi-cyclone), fly ash, mixtures of all or of several ashes ... It might be appropriate to establish a simple typology accepted by all, and stating a minimum of information, which would allow to better compare analyses.
- Finally, the study has allowed to collect a number of analyses that can be the basis of a database. Some other initiatives are identified: CIBE or LDAR. The database is exploitable only if each analysis is accompanied by information to qualify the inputs (fuel), type of equipment, the type of ashes (under the grid, fly ash, etc).

6 Key findings

The amount of biomass ash in Europe and its expected increase (more than 3 million tons) have led to new approaches and initiatives over the last two years to find some alternatives to disposal in landfills, which is currently the widespread solution.

Regardless of the treatment costs, storage capacities are reducing in Europe, and; more and more, concern so-called "ultimate," non-recoverable waste.

Unlike the coal industry that has good experience feedback and some well established recycling industries, the question of the valorization of biomass ash is more recent and has been acute for only a few years, with the strong energy biomass development.

In Europe, the main recycling method is the back to ground on agricultural plots (direct application, incorporation in compost), but other methods of recycling, of varying levels of development, are identified: back to forest (Germany and Austria), the cement and brick industry, filling material for asphalt and concrete, construction and the laying out of landfills (Sweden).

Insufficiently anticipated, the problem related to the increase in biomass ash flows and their valorization is now largely integrated into many initiatives and programs in Europe.

This observation is illustrated by the launch 2 or 3 years ago of some programs relating directly to the biomass ash (CERACENDRE, demonstrations in forest in France under the aegis of the UEFF, VALOCENDRE) or more general programs including an ash component (BIOCOMBUST, ECOBIOGAZ, BIOREFINE, Platform Phosphorus, etc) or by testing "full-scale" conducted on large industrial facilities (eg paper industry).

Several major programs were launched a few years ago and mainly Bioenergiesysteme BIOS, biomasscofiring and Värmeforsk Ash. These different, more or less recent actions, unanimously confirmed the interest of the agronomical valorization, including in forest even though this solution has still not been implemented in France.

The work also shows some opportunities for alternative applications to agriculture: some credible developments are

remplissage pour les bitumes et bétons, aménagement de décharges (suède).

Insuffisamment anticipée dans un premier temps, la problématique liée à l'augmentation des flux de cendres de biomasse et à leur valorisation est désormais un sujet largement intégré dans de nombreuses initiatives et réflexions en Europe.

Ce constat est illustré par le lancement ces 2 ou 3 dernières années de programmes portant directement sur les cendres de biomasse (CERACENDRE, essais en forêt en France sous l'égide de l'UCFF, VALOCENDRE) ou de programmes plus généraux incluant un volet cendres (BIOCOMBUST, ECOBIOGAZ, BIOREFINE, Plateforme Phosphore...) ou par des essais « grandeur nature » réalisés sur de grosses installations industrielles (papetiers notamment). Plusieurs programmes d'envergure avaient été lancés quelques années auparavant et principalement BIOS Bioenergiesysteme, biomasscofiring et Värmeforsk Ash. Ces différentes démarches plus ou moins récentes confirment assez unanimement l'intérêt du retour au sol des cendres, y compris en forêt même si cette filière n'est toujours pas mise en œuvre en France.

Les démarches montrent par ailleurs quelques opportunités pour des applications alternatives au retour au sol : des développements crédibles sont envisagés en céramique, techniques routières, traitement de déchets... Toutefois, la plupart des résultats ne font pas émerger de solutions directement opérationnelles ni ne pouvant être développées de manière industrielle et massive en raison de contraintes techniques, réglementaires ou économiques à lever, ou au motif de préciser davantage l'incidence environnementale..

Les cendres volantes, généralement plus concentrées en polluants, pâtissent d'une image assez négative comparativement aux cendres sous foyer, et sont davantage enfouies en décharge.

Concernant le retour au sol, principale voie de valorisation actuellement mise en œuvre, le cadre réglementaire et normatif européen devrait à court terme davantage intégrer les cendres de biomasse, permettant d'envisager un recyclage plus massif des cendres et un recours à l'enfouissement moins généralisé. S'agissant des autres modes de valorisation, les différentes réglementations et cadres normatifs concernent avant tout les cendres de charbon dont les applications en construction et en techniques routières sont éprouvées.

Il ressort de l'étude plusieurs enseignements. Le recyclage agricole est aujourd'hui le seul débouché robuste et applicable massivement et qu'à ce titre il doit être conforté par des actions visant à préciser le cadre réglementaire et normatif, notamment en France, à améliorer la qualité des cendres et à favoriser les démarches « produit ». En matière de retour au sol, le recyclage en forêt apparaît comme une alternative crédible qui doit être soutenue : toutefois, cette filière doit être appréhendée avec pragmatisme pour espérer être compétitive avec la décharge, voire la filière agricole.

Certaines applications, pourtant explorées depuis des années pour certaines (ex : cimenterie), sans potentiel industriel démontré, excepté pour des gisements très spécifiques, ne doivent plus être soutenues aux dépens de pistes plus crédibles. Afin de surmonter les obstacles techniques, environnement et réglementaires qui freinent le développement des modes de valorisation alternatifs, des améliorations sont attendues et nécessaires dans la connaissance de la qualité des cendres et leur stabilité, les techniques de post traitement (extinction de la chaux vive, élimination des imbrûlés, élimination des mâchefers...), dans la prise en compte plus systématique de la spécificité des cendres de biomasse dans les réglementations et cadres normatifs et la nécessaire harmonisation de la législation et des lignes directrices au niveau européen, dans la nécessité d'un partenariat plus actif entre producteurs, utilisateurs et organismes de recherche (plateforme collaborative) et dans une meilleure communication des travaux et des usages (guides d'utilisation).

envisaged in the ceramic industry, road engineering, waste treatment etc.

However, most results do not lead directly to operational solutions or are not in a position to be developed in an industrial manner because of technical, regulatory or economic constraints, or on the grounds that further clarify the environmental impact.

Fly ash suffers from a rather negative image in comparison to bottom ash, because it generally concentrates the pollutants. It is therefore more often eliminated in landfill.

Concerning return to ground, which is the main recycling solution being implemented at the moment, the European regulatory and normative framework should further integrate biomass ash in the short-term, permitting a more massive ash recycling and less systematic use of disposal in landfill.

As regards the other applications, the various regulations and normative frameworks relate primarily to coal ash, in particular in construction and road engineering.

It appears from the study several lessons. The agricultural recycling is now the only outlet which is robust and applicable on a large scale: therefore it must be reinforced by actions to clarify the regulatory and legislative framework and improve the quality of ashes. For return to the ground, recycling in forest appears as a credible alternative that must be supported, however this sector must be approached pragmatically in order to be able to compete from an economic point of view, with the discharge or the agricultural sector.

Certain applications which have been explored for many years (eg cement) without proven industrial potential, except for some very specific fields, should no longer be supported at the expense of more credible solutions.

To overcome the technical, environmental and regulatory hindering of the development of alternative applications, some improvements are expected and necessary in knowledge of ash quality and its stability, post processing techniques (slaking lime, elimination of unburnt matter, removal of the concretions, etc), in the more systematic consideration of the specificity of biomass ash in the normative and regulatory framework and the necessary harmonization of legislation and guidelines at European level, the need for a more active partnership between producers, users and research organizations (collaborative platform) and a better communication on applications (user guides).