



HAL
open science

Valorisation énergétique de la biomasse et des déchets humides

Didier Lecomte, Patricia Arlabosse

► **To cite this version:**

Didier Lecomte, Patricia Arlabosse. Valorisation énergétique de la biomasse et des déchets humides. Sud sciences et Technologies, 2010, 18, p.22-28. hal-01843955

HAL Id: hal-01843955

<https://hal.science/hal-01843955>

Submitted on 8 Nov 2019

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

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

Valorisation énergétique de la biomasse et des déchets humides

Energy recovery from wet biomass and waste

Lecomte D.^{1,2} ;
Arlabosse P.¹

¹ Université de Toulouse, MINES
ALBI, RAPSODEE UMR CNRS
2392, ALBI, France, F 81013

² Institut International de l'Eau et de
l'Environnement, BP594, 01
Ouagadougou, Burkina Faso.
didier.lecomte@2ie-edu.org
Tél. : (+226) 50 49 28 78
Fax : (+226) 50 49 28 01

Résumé

Certaines catégories de déchets organiques comme les boues, certains déchets agricoles ou des industries agro-alimentaires sont généralement considérés comme peu compatibles avec une utilisation en tant que combustibles solides en raison de leur forte teneur en eau. Cet article examine les concepts étudiés au cours de la dernière décennie, pour améliorer le bilan énergétique d'une filière basée sur la production de combustibles solides à vocation industrielle. Il démontre l'importance de l'efficacité énergétique de la déshydratation et du séchage pour assurer une réelle substitution des combustibles fossiles.

Mots clés : déchets organiques, combustibles solides, efficacité énergétique, déshydratation, séchage.

Abstract

Some categories of biological waste such as sludge or some agricultural and food waste are generally considered as inappropriate for valorization into solid biofuels because of their high moisture content. This paper reviews the technological concepts developed during the past ten years to improve the energy balance of a biowaste-to-industrial biosolid valorization pathway. It shows the influence of the dewatering and drying stages on the overall energy efficiency and thus the actual fossil fuel substitution by using these biofuels.

Keywords: organic waste, solid fuels, energy efficiency, dewatering, drying.

1. Introduction

Les perspectives de réduction des approvisionnements en pétrole et l'augmentation de la demande des nouvelles puissances industrielles incitent les acteurs économiques à valoriser les sources d'énergie renouvelable comme la biomasse et les déchets. La mise en place des permis d'émission de CO₂ complète le dispositif juridique et économique mis en place par les états à la suite du protocole de Kyoto. Certaines industries fortement consommatrices d'énergie ont développé une politique de substitution de combustibles fossiles. C'est le cas de l'industrie papetière (valorisation des résidus d'exploitation forestière) et cimentière (valorisation des déchets à hauteur de près de 40% de la consommation énergétique totale: résidus de broyage automobiles, semences, combustibles issus de boues,...).

Les déchets organiques humides comme les boues, déchets agricoles, déchets des industries agro-alimentaires sont généralement considérés comme peu compatibles avec une utilisation en tant que combustibles solides. La voie de valorisation la plus courante est une voie mixte énergie-matière avec production de gaz combustible par voie humide (fermentation anaérobie) et valorisation du résidu solide comme amendement organique. Il est considéré – souvent à juste titre – que la présence d'eau dans un déchet est fortement handicapante pour une valorisation purement énergétique. Cet article examine la possibilité d'améliorer le bilan énergétique d'une filière basée sur la production de combustibles solides pour une utilisation industrielle.

2. Problématique

Le flux total de déchets produits en Europe était estimé à 1900 Mt/an (Nikolaou, 2003). Une part importante de ce flux est composée de biomasse : déchets et sous-produits de l'exploitation et de la transformation du bois, déchets de l'agriculture, déchets et sous-produits de l'industrie agro-alimentaire, boues de stations d'épuration urbaines et industrielles. La quantité de déchets de l'agriculture et de l'industrie agro-alimentaire représente la plus grande partie de ces déchets avec un flux annuel estimé de 1386 Mt/an (Nikolaou, 2003). Le potentiel de valorisation énergétique est

très élevé, mais limité par les contraintes techniques et réglementaires d'ordre environnemental, les obstacles sociétaux, les difficultés d'adéquation entre offre et demande. Les combustibles solides issus de déchets présentent l'avantage d'être stockables et transportables sur de longues distances et trouvent un débouché naturel dans les industries fortement consommatrices d'énergie. Peu de biomasses humides peuvent cependant prétendre au qualificatif de combustibles en raison de leur teneur en eau élevée et du statut pénalisant de "déchet" qui implique de sévères contrôles à tous les stades des procédés de transformation. La requalification de déchets en combustibles nécessite donc de :

- disposer de technologies de déshydratation ou de séchage faiblement consommatrices d'énergie (pour des raisons de coût énergétique et de bilan carbone).
- contrôler les émissions de substances polluantes à tous les stades de la préparation du combustible (formulation, mise en forme, transport).
- contrôler les émissions lors de la valorisation énergétique des combustibles ainsi obtenus (fumées, cendres).

La figure 1 représente schématiquement l'association d'un sécheur et d'une unité de combustion. La biomasse subit une déshydratation mécanique préalable (Leclerc, 1982) dans des limites liées à la nature du déchet (boue, résidu d'élevage, ...) et à la technologie employée (filtre-pressé, centrifugation, filtre à bande, ...).

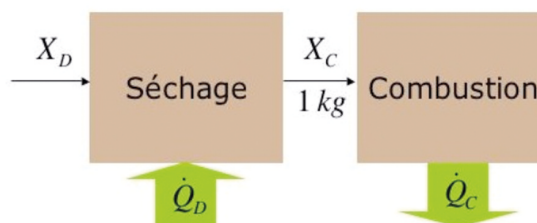


Figure 1 : Association d'un sécheur et d'une unité de combustion

La chaleur produite par la combustion décroît avec la quantité d'eau présente dans celle-ci. Les unités de combustion sur grille ou à lit fluidisé utilisées pour l'incinération des déchets nécessitent un

minimum de pouvoir calorifique (entre 6 et 10 GJ/T) pour compenser les pertes et les phénomènes de combustion incomplète.

Les performances énergétiques de la filière sont principalement liées :

- au pouvoir calorifique PCI_0 de la biomasse sèche, lié à la fraction organique qu'elle contient,
- à la teneur en eau atteinte en entrée du sécheur X_D ,
- à l'efficacité énergétique du sécheur caractérisé par le R_D (le rapport entre l'énergie nécessaire au séchage et la chaleur latente de vaporisation) variant entre 1,25 et 2,50 pour les sécheurs industriels courants

(Schlunder, 1998; Arlabosse, 1999).

Trois types de biomasses (biomasse ligno-cellulosique sèche, boues, et ordures ménagères) sont comparées du point de vue de leur comportement dans cette filière. Les détails des hypothèses et des calculs sont donnés par Lecomte (2006). Les valeurs indicatives du PCI_0 et de la teneur en eau après déshydratation X_D sont données dans la Table 1. Ces valeurs ne sont que des moyennes car les conditions de production sont variables (saisonnalité, lieu, type d'industrie, prétraitement).

Table 1 : Valeur indicatives de PCI et de teneur en eau (base sèche) pour quelques biomasses et déchets.

	X_D (kg/kg mat. sec.)	PCI_0 (MJ/kg mat. sec.)
ligno-cellulosiques	0,5	18
boues	4	9
OM	0,5	12

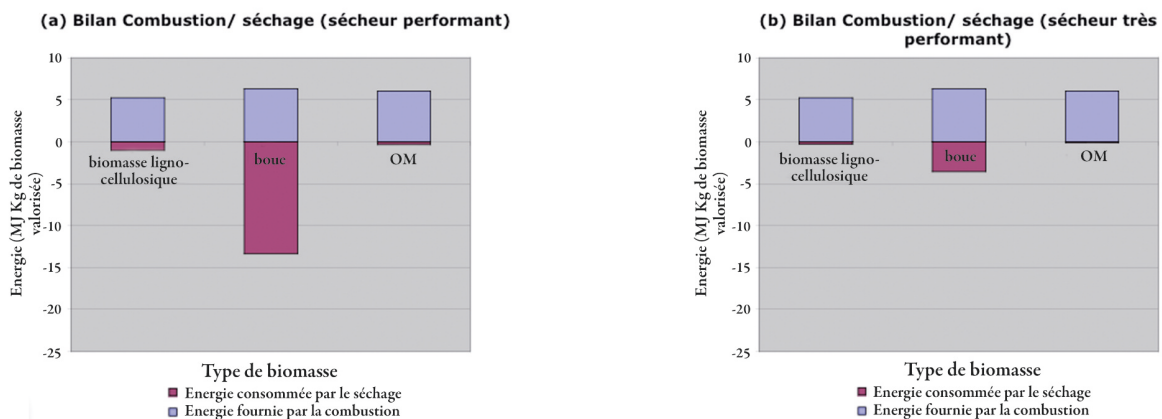


Figure 2 : Bilan énergétique d'une filière "séchage+combustion" en fonction de la technologie de séchoir pour un kg de combustible de $PCI= 8MJ/kg$, (a) $R_D=1,25$; (b) $R_D=0,4$

On observe sur la Figure 2a que même avec un sécheur réputé performant, le bilan d'énergie net d'une filière séchage + combustion de combustibles très humides (boues) est négatif. Si l'on dispose de technologies permettant de sécher avec un ratio $R_D=0,4$, la production d'énergie à partir de

biomasses même très humides deviendrait viable (Figure 2b). On notera que le PCI de 8MJ/kg utilisé pour ce calcul est identique pour tous les combustibles, ce qui implique différents teneurs en eau à l'entrée de la chaudière de référence.

3. Perspectives de recherche

Pour des flux de biomasse dilués et peu humides (déchets et sous-produits de foresterie, certains types de déchets agricoles) un séchage décentralisé à faible capacité utilisant l'énergie solaire est envisageable. Quand le taux d'humidité est élevé (lisiers et déchets d'élevage, petites stations d'épuration), une fermentation anaérobie contrôlée permet la production directe de méthane avec une valorisation énergétique sur site, sans que d'importants besoins énergétiques soient mis en œuvre. Pour des flux de matière élevés (stations d'épuration de grande capacité, industries de transformation de la biomasse : papeterie, bois, agro-alimentaire), le séchage constitue une opération intermédiaire permettant un stockage et un transport sur de longues distances d'un combustible à fort pouvoir calorifique. Or, on a vu que la plupart des systèmes industriels de séchage ne sont pas adaptés au séchage de biomasses très humides car ces systèmes consomment plus d'énergie - la plupart du temps d'origine fossile - que ne peut fournir le combustible. C'est le cas de la plupart des unités de séchage de boues actuellement en opération. Si l'industrie disposait de procédés de déshydratation ou de séchage à faible consommation d'énergie, d'énormes quantités de biomasse pourraient être requalifiées en combustibles avec un bilan environnemental positif.

Pour produire en quantité importante des combustibles solides ayant un bilan énergétique favorable, trois voies sont à privilégier :

- améliorer les technologies de déshydratation mécanique en termes de teneur en eau finale des produits traités (augmenter X_D)
- améliorer le rendement des sécheurs (diminuer R_D) en faisant appel à des cycles thermodynamiques pour la récupération d'une fraction de la chaleur latente (pompe à chaleur, compression mécanique de vapeur)
- utiliser des énergies gratuites ou bon marché et de préférence à faible impact environnemental : séchage solaire, fermentation aérobie maîtrisée couplée au séchage, récupération de l'énergie thermique contenu dans des effluents.

4. Intensification de la déshydratation mécanique

L'intensification des procédés de déshydratation mécanique peut prendre diverses formes :

- application d'ultrasons (Smythe and Wakeman, 2000) ;
- apport d'énergie thermique (Mahmoud et al., 1998; Peuker and Stahl, 2001; Couturier et al., 2003; Clayton et al., 2006; Mahmoud et al., 2008).

Ce dernier mode d'intensification permet d'accélérer la cinétique de déshydratation pour tous les matériaux traités et, pour certains d'entre eux, d'augmenter significativement la teneur en matière sèche finale. Mahmoud et al. (2008) ont montré que le traitement de boues de bentonite sodique, à une température de paroi du filtre de 90°C et une pression appliquée de 300 kPa, permet de réduire de 2.33 à 0.228 kg/kg la teneur en eau du matériau, par rapport à une déshydratation conventionnelle à température ambiante. A l'échelle du laboratoire, le ratio de consommation énergétique R_D de ce procédé est de 0.16. Le même procédé appliqué à la biomasse humide permet de réduire la teneur en eau de 3 à 1.22 kg/kg avec une consommation énergétique R_D inférieur à 0.25. En outre, le procédé permet de séparer un jus vert, riche en azote et pigments, qui peuvent être valorisés dans l'industrie de la pharmacie, de la cosmétique, ... Le lignite est un combustible fossile intermédiaire entre le charbon et la biomasse dont les propriétés sont similaires aux biomasses humides : $PCI_0=14MJ/kg$, X_D compris entre 1 et 2.4. La teneur en eau est réduite de 1.5 à 0.4 pour un ratio de consommation énergétique R_D de l'ordre de 0.1-0.25 (Clayton, 2006). Un ratio $R_D=0.05-0.3$ est mentionné par Bergins (1999b). Une unité de 25 t/h a été construite en Allemagne (premier producteur mondial de lignite) et une unité pilote of 15 t/h est à l'étude en Australie (Victoria State).

- application simultanée d'un champ électrique (Lee et al., 2007; Curvers et al., 2007), qui peut éventuellement être pulsé (Grimi et al., 2007; Gachovska et al., 2006). Pour améliorer la filtration, les boues sont conditionnées au moyen de polymères (polyélectrolytes) chargés positivement.

Malgré ce conditionnement, l'eau reste fortement liée à son substrat. Pour améliorer la déshydratation mécanique, on applique un courant alternatif ou continu compris entre 10V et 200V entre deux électrodes. Cette technique met en œuvre le phénomène d'électrosmose (Saveyn, 2005), transport d'eau liquide dans un milieu poreux contenant un électrolyte sous l'action d'un champ électrique. La consommation d'énergie de l'électrosmose est faible tant que l'intensité reste faible (on minimise l'effet Joule). Un ordre de grandeur est donné par la valeur de $R_D=0.20-0.43$ (Saveyn, 2005) avec $X_D=3$. D'autres auteurs mentionnent des énergies plus importantes: $R_D=1.45$ pour $X_D=0.4$ (Yuang, 2003). Des expérimentations sur pilote industriel ont été réalisées à l'aide de filtres à bandes spécialement adaptés (Smullen, 1994).

Pour les deux techniques de déshydratation mécanique mentionnées, il existe peu de données énergétiques à l'échelle pilote ou industrielle.

5. Séchage

L'eau contenue dans les déchets et sous-produits forestiers (ligno-cellulose sèche) doit être éliminée dès que possible pour diminuer le poids pendant le transport et le traitement. Gigler (2004) a étudié le séchage naturel (à l'air libre) d'une pile de branches de saule et a montré que ce type de déchets pouvaient être séchés de $X_D=1$ à $X_C=0.15$ en 5 mois dans les conditions estivales des Pays-Bas. La perte de masse liée à l'activité biologique était inférieure à 5 %.

L'énergie solaire est de plus en plus utilisée pour le séchage des boues sous serre. L'apport solaire est généralement très faible à cause de la mauvaise efficacité du système de captation mais la convection peut également être utilisée en complément (Perez, 2006) ainsi que le retournement de la boue (Luboschik, 2008). Le séchage solaire peut être assisté par pompe à chaleur (Gresle, 2006). La source froide de la thermopompe est l'eau traitée issue de la station d'épuration.

La combinaison "biodégradation aérobie séchage" (biodrying) utilise l'activité métabolique exothermique pour fournir la chaleur nécessaire au séchage. Un milieu poreux est nécessaire pour

permettre la circulation de l'air dans la matière humide. Pour un mélange de boue et de déchets de bois, une température de 65°C a été obtenue, avec une diminution de X_D de 2.3 à 1.4 (Frei, 2004). Une perte de matière organique d'environ 20 % est observée, mais le bilan énergétique d'un tel processus n'est pas aisément accessible puisque la masse sèche n'est pas conservée dans le processus de séchage. Le processus a été aussi utilisé avec des ordures ménagères (Adani, 2002).

La chaleur résiduelle de centrales électriques à biomasse (50°-90°C) peut être utilisée pour préchauffer l'air séchant. Le soutirage de vapeur ou la contrepression permettent de monter la température de l'air au delà de 100°C. L'air extrait du sécheur - chargé de composés organiques volatiles - peut être utilisé comme l'air de combustion (Holmberg, 2004). Plusieurs articles à contenu technico-économique montrent que le séchage devrait être intégré à l'unité de valorisation énergétique pour augmenter le rendement global de la conversion d'énergie (Raiko, 2003 - Cocco, 2006).

Parmi les différentes biomasses humides, les boues de station d'épuration sont probablement les produits les plus difficiles à sécher. Les sécheurs de boues présentent de mauvaises caractéristiques de transfert thermique, consomment des combustibles fossiles et leur exploitation comme leur régulation sont délicates. La plupart de ces sécheurs sont des techniques adaptées de procédés standard (industrie minière), confrontés à des problèmes inhabituels de viscosité, d'odeurs désagréables et au risque de l'explosion liés à la présence de particules fines dans l'air. Ce sont des équipements encombrants représentant un investissement très lourd (Arlabosse, 1999). Peu de sécheurs présentent les caractéristiques thermodynamiques requises (sécheurs en vapeur surchauffée, sécheurs couplés à une pompe à chaleur), mais leur utilisation pour les résidus et la biomasse humide reste limitée (Permuy, 2008).

Pour rompre avec ce type de technologie, il a été imaginé de mettre en contact des boues avec un milieu immiscible, de l'huile portée à haute température. Ce processus, qui s'apparente à une friture, permet de valoriser également des déchets

huileux ou gras. Les puissances spécifiques sont élevées et les temps de séchage courts. Le procédé ne présente pas les inconvénients soulevés plus haut et l'absorption d'huile par la boue permet de formuler un biocarburant. Peregrina (2006) a étudié au laboratoire le séchage par friture de boues urbaines dans de l'huile alimentaire recyclée. Pour identifier le transfert de chaleur et de matière, la masse et le profil de température ont été mesurés. On a proposé une série de mécanismes comprenant quatre étapes: le chauffage initial et de début de l'ébullition, le régime de vaporisation en film, un régime de transition de type ébullition nucléée et le transfert de l'eau liée). Le processus permet de fortes puissances et les températures atteintes permettent d'hygiéniser la boue (Romdhana, 2009a et 2009b). L'énergie contenue dans les vapeurs formées dans le réacteur peut être valorisée en utilisant une thermopompe ou un dispositif de compression mécanique de vapeur (Peregrina, 2008). Un sécheur pilote d'une capacité de 20L/h d'eau évaporée est en cours de construction.

6. Conclusion

En France, la production d'énergie à partir de biomasse était de 10 MTEp en 2005. Les objectifs sont 45-50 MTOE pour la période 2030-2050 (Roy, 2005). Les technologies de combustion sont matures, mais la production de biocombustibles solides à partir de déchets ou de sous produits humides n'est envisageable que si la déshydratation mécanique et le séchage présentent des bilans énergétiques favorables. L'objectif de $R_D=0.4$ est réalisable industriellement en développant des technologies hybrides, en utilisant des sources d'énergies alternatives et des dispositifs de récupération d'énergie ■

Bibliographie

[1] Adani F., Baido D., Calcaterra E. and Genevini P.L. (2002), *The influence of biomass temperature on biostabilization-biodrying of municipal solid waste*. *Biores. Technol.*, 83 173-179.

[2] Arlabosse P., *Etude des procédés de séchage des boues urbaines et industrielles*, (1999), RECORD 02171A.

[3] Bergins C.; Berger S., Strauss K., (1999a), *Dewatering of fossil fuels and suspensions of ultrafine particles by mechanical / thermal dewatering*, *Chemical Engineering Technology*, 22, 11, pp. 923-927.

[4] Bergins C., Berger S., Strauss K., (1999b), *Mechanical Thermal dewatering – a perspective on an efficient solid / liquid separation*, *DKG*, 76, 3, 8-12.

[5] Clayton S.A, Scholes O.N., Hoadley A.F.A., Wheeler R.A., McIntosh M.J., Huynh D.Q., (2006), *Dewatering of biomaterials by mechanical thermal expression*. *Drying Technology*, 24, 819-834.

[6] Cocco D., Deiana P., Cau G., *Performance evaluation of small size externally fired gas turbine (EFGT) plants integrated with direct biomass dryers*, (2006), *Energy*, 31, 1459-1471.

[7] Couturier, S., Valat, M., Vaxelaire, J. and Puiggali, J. R., (2003) *Liquid pressure measurement in filtration-compression cell*. *Separation Science and Technology*, 38(5): 1051-1068

[8] Curvers, D., Maes, K. C., Saveyn, H., De Baets, B., Miller, S. and Van der Meeren, P., (2007), *Modelling the electro-osmotically enhanced pressure dewatering of activated sludge*. *Chemical Engineering Science*, 62(8): 2267-2276

[9] Frei K.M., Cameron D., Stuart P.R., (2004) *Novel drying process using forced aeration through a porous biomass matrix*, *Drying Technology*, 22, 5, pp 1191-1215.

[10] Gachovska, T., Ngadi, M. O. and Raghavan, G. S. V., (2006) *Pulsed electric field assisted juice extraction from alfalfa*. *Canadian Biosystems Engineering*, 48(3): 33-37.

[11] Gigler J.K., van Loon, W.K.P, Sonneveld K., (2004) *Experiment and modelling of parameters influencing natural wind drying of willow chunks*, *Biomass and Bioenergy*, 26, pp 507-514.

[12] Gresle A., *Séparation liquide solide des boues, le procédé Helioplus* (2006), *Technical presentation*. Saur Company.

[13] Grimi, N., Praporscic, I., Lebovka, N. and Vorobiev, E. (2007), *Selective extraction from carrot slices by pressing and washing enhanced by pulsed electric fields*. *Separation and Purification Technology*, 58(2): 267-273.

[14] Holmberg H., Abtila P. (2004), *Comparison of drying costs in biofuel drying between multi-stage and single-stage drying*, *Biomass and Bioenergy*, 26, pp515-530.

[15] Leclerc D., Rebouillat S. (1982), *Déshydratation des sus-*

- pensions solide-liquide par filtration séchage*, in *Energétique Industrielle*, tome 3, Pierre Le Goff coordinateur, Technique et Documentation, Paris.
- [16] Lecomte D. (2006), *1er séminaire maghrébin sur les sciences et technologies de séchage*, Tozeur, 17-19 décembre.
- [17] Lee, J. E., Lee, J. K. and Choi, H. K. (2007), *Filter press for electrodeewatering of waterworks sludge*. *Drying Technology*, 25(10): 1649-1657.
- [18] Luboschik U. (2008), *Solar drying of sewage sludge, Wendewolf system*, ECSM'08 - European Conference on Sludge ement, Belgium, 1-2 September.
- [19] Mahmood, T., Zawadzki, M. and Banerjee, S. (1998), *Pilot study of impulse drying industrial sludge*. *Environmental Science & Technology*, 32(12): 1813-1816.
- [20] Mahmoud, A., Fernandez, A., Chituchi, T. M. and Arlabosse, P. (2008), *Thermally assisted mechanical dewatering (TAMD) of suspensions of fine particles: Analysis of the influence of the operating conditions using the response surface methodology*. *Chemosphere*, 72(11): 1765-1773.
- [21] Nikolaou A., Remrova M., Jeliakov I. (2003), *Biomass availability in Europe*, EU report, 80p, .
- [22] Perez P., Mousques P., Arlabosse P., Rodier E. (2006), *Modelling of greenhouse solar dryers application to sewage sludge treatment*, 15th International Drying Symposium (IDS 2006), Budapest, Hungary, 20-23 August.
- [23] Peregrina C., Arlabosse P., Lecomte D., Rudolph V. (2006), *Heat and mass transfer during fry-drying of sewage sludge*, *Drying Technology*, 24, 797-818.
- [24] Peregrina, C., Rudolph, V., Lecomte, D., Arlabosse, P. (2008), *A new application of immersion frying for the thermal drying of sewage sludge: An economic assessment*. *Journal of Environmental Management*, , Vol. 86, n°1, pp.246-261.
- [25] Permuy D., Araúzo I., Permuy J., Prats N. (2008), *Low temperature thermal drying : an opportunity for residual energies*, ECSM'08 - European Conference on Sludge Management, Belgium, 1-2 September.
- [26] Peuker, U. A. and Stahl, W. (2001), *Steam pressure filtration: Mechanical-thermal dewatering process*. *Drying Technology*, 19(5): 807-848.
- [27] Raiko M.O., Gronfors T.H.A., Haukka P. (2003), *Development and optimization of power plant concepts for local wet fuels*, *Biomass and bioenergy*, 24, pp27-3.
- [28] Romdhana M.H., Hamasaiid A., Ladevie B., Lecomte D. (2009a) *Energy valorization of industrial biomass: using a batch frying process for sewage sludge*, *Bioresource Technology*, 100, pp. 3740-3744.
- [29] Romdhana M.H., Lecomte D., Ladevie B., Sablayrolles C. (2009b), *Monitoring of pathogenic microorganisms contamination during heat drying process of sewage sludge*, *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 87, 6, pp. 377-386.
- [30] Roy C. (2005), *Coordination de la valorisation de la biomasse. Note stratégique*.
- [31] Saveyn H., Pauwels G., Timmerman R., Van der Meeren P. (2005), *Effect of polyelectrolyte conditioning on the enhanced dewatering of activated sludge by application of an electric field during the expression phase*, *Water Research* 39,3012-3020.
- [32] Schlünder E.U. (1998), *Handbook of heat-exchangers, Section 3.13: Dryers*.
- [33] Smullen M., Kafaar A. (1994), *Electro-osmotically enhanced sludge dewatering-pilot-plant study*. *Water Science and Technology* 30 (8), 159-168.
- [34] Smythe, M. C. and Wakeman, R. J. (2000), *The use of acoustic fields as a filtration and dewatering aid*. *Ultrasonics*, 38(1-8): 657-661.
- [35] Sugin M., Calcaterra E., Adani F., (2005), *Biostabilization-Biodrying of municipal solid waste by inverting air-flow*, *Bioresource Technology*, 96, 1331-1337.
- [36] Yuan C., Weng C.H. (2003), *Sludge dewatering by electrokinetic technique: effect of processing time and potential gradient*, *Advances in Environmental Research* 7, 727-732.