

Les différentes voies de valorisation ou d'élimination des refus de dégrillage des stations d'épuration

R. Le Hyaric, J.P. Canler, B. Barillon, P. Naquin, R. Gourdon

► **To cite this version:**

R. Le Hyaric, J.P. Canler, B. Barillon, P. Naquin, R. Gourdon. Les différentes voies de valorisation ou d'élimination des refus de dégrillage des stations d'épuration. 19ème Journées Information Eaux, Sep 2010, Poitiers, France. 1, 15 p., 2010. <hal-00553470>

HAL Id: hal-00553470

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00553470>

Submitted on 7 Jan 2011

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.

Les différentes voies de valorisation ou d'élimination des refus de dégrillage des stations d'épuration

Ronan Le Hyaric¹, Jean-Pierre Canler², Bruno Barillon³, Pascale Naquin⁴ et Rémy Gourdon¹

¹INSA de Lyon, Université de Lyon, laboratoire LGCIE, 20 av. A. Einstein, F-69621 Villeurbanne cedex

²CEMAGREF de Lyon

³CIRSEE – Suez Environnement

⁴Polden INSAVALOR

Résumé

Les opérations de prétraitement des eaux usées génèrent des déchets solides tels que les sables, les graisses et les refus de dégrillage. Des quantités croissantes de refus de dégrillage sont attendues, compte-tenu des évolutions technologiques qui requièrent un dégrillage (voire tamisage) de plus en plus poussé, et les voies d'élimination actuelles de ces déchets solides (enfouissement et incinération) semblent à terme mal adaptées à cause notamment de leur forte teneur en matière organique et de leur faible siccité.

L'objectif de la présente étude est d'identifier et d'évaluer la faisabilité de la (ou des) filière(s) de traitement alternatives pour une gestion optimale des refus de dégrillage.

Au cours de ce programme, plusieurs stations d'épuration ont été sélectionnées en fonction de la maille des différentes étapes de dégrillage puis une caractérisation quantitative et qualitative poussée a été réalisée afin de définir des filières de traitement potentiellement adaptées. Chaque traitement retenu a fait ensuite l'objet d'une étude à l'échelle « pilote » afin de déterminer leur performance technique. Les principaux résultats de ces travaux, détaillés dans cet article, ont notamment souligné la possibilité de traiter les refus de dégrillage par voie biologique, avec ou sans prétraitement, offrant des solutions innovantes pour une gestion adaptée de ces déchets « sur site » et « hors site ».

I. INTRODUCTION

Les refus de dégrillage sont générés à l'étape des prétraitements des eaux usées domestiques. Compte-tenu du faible tonnage qu'ils représentent au regard de la production des boues au sein d'une station d'épuration (STEP), ces résidus ont été peu étudiés jusqu'à présent. Cependant, des productions croissantes sont attendues avec la nécessité d'un traitement des eaux usées de plus en plus performant et l'arrivée de nouveaux procédés de traitement, à l'instar des bioréacteurs à membranes qui sont utilisées depuis le milieu des années 90 en Europe pour l'épuration des eaux usées domestiques (Frechen et al., 2006) et qui requièrent la présence d'un dégrillage fin (voire d'un tamisage) en entrée des STEP pour protéger les différents organes situés en aval (pompes, insufflateurs,...) ou pour éviter le colmatage des membranes. La diminution des mailles de dégrillage a pour conséquence directe l'augmentation du volume des refus de dégrillage générés, pour lesquels la mise en œuvre d'une gestion techniquement adaptée et répondant aux exigences réglementaires s'avère nécessaire.

Les refus de dégrillage sont des déchets non dangereux, classés dans la catégorie « 19.08.01 – Déchets de dégrillage » de la liste européenne des déchets. A ce titre, deux voies d'élimination sont actuellement utilisées pour leur gestion (Clay et al., 1996 ; ORDIF, 1999), en l'absence de filières alternatives : le stockage en ISDND (Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux) et l'incinération (co-incinération avec les ordures ménagères principalement). Si le choix de ces deux filières s'opère généralement selon des critères géographiques et économiques, elles apparaissent à terme mal adaptées, compte-tenu des caractéristiques défavorables des refus vis-à-vis de ces

traitements (faible siccité et forte teneur en matière organique) et des évolutions de la réglementation européenne en matière de gestion des déchets.

Dans le but de définir des filières de traitement alternatives potentielles, une caractérisation quantitative et qualitative des refus de dégrillage a été préalablement réalisée à partir d'un panel de 3 stations d'épuration sélectionnées selon un « profil type » (STEP de moyenne à grande capacité de traitement, traitant majoritairement des effluents domestiques et étant équipées de dégrilleurs fins ou de tamiseurs à l'étape des prétraitements). Puis des études à l'échelle pilote ont été réalisées pour estimer la faisabilité technique et l'efficacité de 3 traitements jugés potentiellement adaptés au regard des caractéristiques des déchets déterminées précédemment.

II. CARACTERISATION DES REFUS DE DEGRILLAGE DES STATIONS D'EPURATION

Afin de mettre en place des stratégies optimales pour la gestion des refus de dégrillage, la première phase de l'étude a été de déterminer la production moyenne et la composition des refus de dégrillage collectés dans 3 stations d'épuration de la région Rhône-Alpes, dont les principales caractéristiques sont présentées dans le Tableau I.

Tableau I : Caractéristiques des STEP sélectionnées

STEP	Charge polluante traitée (EH)	% d'effluent domestique	Type du réseau d'assainissement	Maille des dégrilleurs (mm)
Annemasse	70 000	> 90 %	Pseudo-séparatif (40 % séparatif)	60 – 15 – 3
Bourg-en-Bresse	90 000	65 %	Pseudo-séparatif (72,7 % séparatif)	15 – 3
Givors	65 000	> 90 %	Unitaire	60 – 25 – 6

II.1. Masses et volumes produits

Au total, 6 campagnes de prélèvements ont été réalisées entre mai 2007 et novembre 2008, chacune ayant une durée comprise entre 3 et 7 jours, en suivant les principales recommandations de la norme européenne NF EN 14899:2005 (« Caractérisation des déchets - Prélèvement des déchets - Procédure-cadre pour l'élaboration et la mise en œuvre d'un plan d'échantillonnage »).

Le Tableau II présente la production estimée de refus de dégrillage non compactés, à partir des masses moyennes générées en fonction des périodes de « temps secs » et de « temps de pluie ». La production moyenne est de 0,30 kgMS.EH⁻¹.an⁻¹ pour une maille de dégrillage de 3 mm. Ceci équivaut à une production brute de 2,0 kg.EH⁻¹.an⁻¹ pour un volume moyen de 2,9 l.EH⁻¹.an⁻¹ selon la siccité moyenne des refus non compactés (15 %) et de leur masse volumique (0,7 kg/l) déterminées lors des différentes campagnes de prélèvements (Le Hyaric, 2009).

Tableau II : Production estimée de refus de dégrillage non compactés

STEP	Type de refus	Masse sèche (en kgMS.EH ⁻¹ .an ⁻¹)			Masse brute estimée (en kg.EH ⁻¹ .an ⁻¹)	Volume estimé (en l.EH ⁻¹ .an ⁻¹)
		Tps sec	Tps de pluie	Moyenne ^(*)		
Annemasse	> 3 mm	0,32	0,50	0,37	2,5	3,5
Bourg-en-Bresse	> 3 mm	0,16	0,40	0,23	1,5	2,2
Givors	> 6 mm	0,07	0,55	0,21	1,4	2,0

(*) Moyenne calculée à partir d'un ratio de 5 jours « temps sec » pour 2 jours « temps de pluie ».

II.2. Caractérisation par catégories de matériaux

La composition des refus de dégrillage, déterminée selon la norme AFNOR XP X30-466:2004 « Déchets ménagers et assimilés – Méthode de caractérisation – Analyse sur produit sec » est relativement similaire pour chacune des stations étudiées ainsi qu'au cours des différentes campagnes réalisées (Le Hyaric et al., 2009). Les refus de dégrillage sont principalement composés « en temps sec » de deux fractions majoritaires, à savoir les textiles sanitaires (entre 54,7 % et 72,9 % de la masse sèche totale) et les fines (entre 17,1 % et 21,8 % de la masse sèche totale) (Tableau III).

Tableau III : Composition des refus de dégrillage en « temps sec »

Catégorie	Annemasse		Bourg-en-Bresse		Givors	
	kgMS.EH ⁻¹ .an ⁻¹	% de la MS	kgMS.EH ⁻¹ .an ⁻¹	% de la MS	kgMS.EH ⁻¹ .an ⁻¹	% de la MS
Textiles sanitaires	0,175	54,7	0,093	58,3	0,051	72,9
Fines < 20 mm	0,070	21,8	0,031	19,6	0,012	17,1
Plastiques	0,004	1,1	0,006	3,9	0,002	2,9
Végétaux	0,016	5,0	0,005	3,2	0,003	4,2
Papiers	0,045	14,1	0,010	6,4	0,001	1,4
Autres	0,011	3,3	0,014	8,6	0,001	1,5
Total	0,32	100,0	0,16	100,0	0,07	100,0

II.3. Teneur en matière organique totale et biodégradabilité

La matière volatile (ou matière organique totale) et le potentiel bio-méthanogène (PBM) ont été déterminés pour les refus de dégrillage provenant de chacune des STEP étudiées. Ces analyses ont souligné une teneur élevée en matière organique totale des refus, qui s'est révélée être fortement biodégradable (Tableau IV). En effet, les potentiels bio-méthanogènes des refus de dégrillage (de 242 à 331 Nml CH₄/gMV) sont du même ordre de grandeur que les potentiels bio-méthanogènes de déchets actuellement traités par digestion à échelle industrielle : selon Owens et Chynoweth (1993) et Jokela et al. (2005), le potentiel bio-méthanogène des déchets municipaux est compris entre 180 et 220 Nml CH₄/gMV tandis que le PBM des boues de STEP est d'environ 300-400 Nml CH₄/gMV (Davidsson et al., 2008 ; Sosnowski et al., 2008).

Tableau IV : Caractéristiques globales des refus de dégrillage

Paramètre	Unité	Annemasse	Bourg-en-Bresse	Givors
Masses générées	kgMS.EH ⁻¹ .an ⁻¹	0,32	0,16	0,07
Siccité	%MH	14,4	14,9	26,7 ^b
Masse volumique	kg/l	0,76	0,80	0,51
Matière volatile	%MS	84,3	86,4	77,0
PBM ^a	Nm ³ CH ₄ /kgMV	331 (±6)	242 (±3)	258 (±9)

^a Potentiel bio-méthanogène ; ^b Refus compactés.

II.4. Identification de filières de traitement potentiellement adaptées sur la base des résultats de caractérisation

La caractérisation des refus de dégrillage permet de mettre en évidence les caractéristiques du déchet (faible siccité et forte teneur en matière organique en particulier) qui ne répondent pas aux conditions requises par les filières d'élimination actuelles et d'orienter nos choix vers de nouvelles filières de traitement ou des prétraitements avant leur élimination.

Une faible siccité des refus de dégrillage constitue un frein pour l'élimination de ces déchets en incinération et interdit leur envoi en ISDND au regard des conditions requises pour leur acceptation

en centre de stockage. Tout traitement qui permet d'augmenter la siccité des refus de dégrillage favorise l'acceptation de ce déchet vers les filières « classiques » d'élimination des déchets non dangereux.

La forte teneur en matière organique des refus de dégrillage et leur forte biodégradabilité ne permettent pas de considérer les refus comme des « déchets ultimes ». Des opérations de traitement doivent être envisagées pour permettre, dans des conditions économiquement acceptables, de réduire et/ou d'extraire la fraction valorisable de ces déchets. Tout traitement permettant d'abaisser la teneur en matière organique de refus de dégrillage présentera donc un intérêt.

Au regard de ces constatations, différentes filières de traitement ont été envisagées pour le traitement ou la valorisation des refus de dégrillage : (i) le traitement par chaulage avant élimination vers les filières « classiques », (ii) le renvoi dans la filière de traitement des eaux usées d'une partie des refus après broyage et (iii) le traitement par co-digestion des refus en mélange avec les ordures ménagères ou avec les boues.

Afin d'évaluer la pertinence de ces filières (en termes de faisabilité technique et d'efficacité de traitement), des études à l'échelle « pilote » de chaulage, de broyage et de méthanisation des refus de dégrillage ont été réalisées.

III. ETUDE DE FAISABILITE DU CHAULAGE DES REFUS DE DEGRILLAGE

Le traitement à la chaux des refus de dégrillage peut être considéré comme un possible prétraitement avant élimination des refus chaulés vers les filières « classiques ». Ce procédé, qui est déjà mis en œuvre pour le traitement des boues, présente potentiellement de nombreux avantages :

- La stabilisation (au moins temporaire) du déchet par élévation du pH au-delà de 12 qui détruit ou inhibe la biomasse responsable de la dégradation, réduisant ainsi notamment les nuisances olfactives;
- L'hygiénisation par augmentation du pH et élévation momentanée de la température qui inhibe ou détruit les agents pathogènes présents dans les déchets, réduisant les risques sanitaires de manutention du déchet ;
- L'augmentation de la siccité du déchet par les effets cumulés :
 - du mélange du déchet avec un produit sec (la chaux) ;
 - de la réaction de la chaux vive (CaO) avec l'eau libre du déchet pour former de la chaux éteinte (Ca(OH)₂) ;
 - de l'évaporation d'eau engendrée par l'élévation de la température due à la réaction exothermique d'extinction de la chaux.
- L'amélioration de la tenue du déchet qui facilite notamment les opérations de stockage, de manutention et de transport du déchet.

Des essais de chaulage de refus de dégrillage ont ainsi été menés dans une installation industrielle de chaulage afin d'évaluer la faisabilité et la pertinence de ce traitement.

III.1. Matériel et méthode

III.1.1. Caractérisation des refus de dégrillage utilisés pour les essais de chaulage

Les refus de dégrillage utilisés pour l'étude du traitement à la chaux ont été prélevés à la station d'épuration de Cholet (Suez Environnement, Maine et Loire). Ils sont composés d'un mélange de refus provenant d'un dégrilleur moyen (15 mm) et d'un dégrilleur fin (3 mm), et ont été collectés

après compactage. Ces refus ont fait l'objet d'une caractérisation globale dont les résultats sont présentés dans le Tableau V.

Tableau V : Caractérisation des refus utilisés pour la mise en œuvre des essais de chaulage

Paramètre	Unité	Refus échantillonnés
Masse brute	kg	630
Masse volumique	kg/l	0,54
Siccité	% MH	22,3
Matière volatile	% MS	89,6

III.1.2. Protocole opératoire

La campagne de chaulage des refus de dégrillage s'est déroulée à Lezay (Deux-Sèvres), dans l'installation de chaulage d'ordures ménagères et de boues d'épuration de la société OXALOR.

Les refus de dégrillage bruts ont été introduits dans un malaxeur-peseur puis mélangés à de la chaux vive (130 kg de chaux pour 630 kg de déchets, soit une masse en chaux vive équivalent à environ 20 % de la masse du déchet à traiter) pendant une durée de 20 minutes. Les déchets chaulés ont été ensuite stockés dans un thermo-absorbeur pendant une durée de deux heures environ pour permettre le développement de la réaction de la chaux qui conduit à la stabilisation et l'hygiénisation des déchets. A la sortie du thermo-absorbeur, les déchets sont passés au travers d'un trommel à mailles carrées de 12 mm qui a séparé les éléments fins (< 12 mm) des éléments grossiers (> 12 mm).

La totalité des refus chaulés ont été collectée puis pesée sur site permettant d'établir un bilan massique des essais réalisés. Des échantillons représentatifs des deux fractions obtenues ont été ensuite constitués pour leur caractérisation en laboratoire (siccité et pH notamment).

III.2. Résultats expérimentaux

III.2.1. Bilan massique sur les masses brutes

Lors de l'essai de chaulage des refus de dégrillage, 630 kg de refus de dégrillage ont été introduits (la précision d'une pesée effectuée sur le site d'expérimentation est de ± 10 kg). Les masses brutes des différentes fractions solides entrantes et sortantes sont présentées dans le Tableau VI. Le bilan massique est bouclé à 10 % près. La perte de masse (80 kg) est imputable à deux principaux facteurs, à savoir (i) les fractions solides piégées dans l'installation et (ii) les émissions gazeuses (évaporation de l'eau notamment).

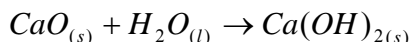
Tableau VI : Bilan massique de l'essai de chaulage sur les masses brutes

	Masse brute (en kg)	% de la masse totale des entrants
Entrants		
Refus de dégrillage	630 (± 10)	83
Chaux vive	130 (± 10)	17
Total entrants	760 (± 20)	100
Sortants		
Fraction grossière (> 12 mm)	180 (± 20)	24
Fraction fine (< 12 mm)	500 (± 20)	66
Total sortants	680 (± 40)	90
Pertes	- 80 (± 60)	10

III.2.2. Bilan massique sur les masses sèches et sur l'eau

Les masses sèches des différentes fractions entrantes et sortantes sont présentées dans le Tableau VII. Le bilan massique sur sec montre un écart important entre la masse sèche des fractions sortantes et la masse sèche initiale (+ 60,6 kgMS). Cet écart s'explique en partie par la réaction

d'extinction de la chaux vive, qui réagit avec l'eau pour former de l'hydroxyde de calcium (ou chaux éteinte), selon la réaction suivante :



En tenant compte de la stœchiométrie de la réaction, des caractéristiques de la chaux vive utilisée (130 kg à 95 % CaO) et avec l'hypothèse que la totalité de la chaux vive a réagi, on peut estimer que 39,7 kg d'eau réagissent lors de la réaction d'extinction pour former 169,7 kg de chaux éteinte. On devrait donc enregistrer une augmentation de masse sèche de 39,7 kg (= 169,7 - 130), contre 60,6 kg expérimentalement (Tableau VII).

Le bilan massique sur sec conduit donc à un excès de 20,9 kg en sortie (= 60,6 - 39,7), ce qui correspond à une erreur de 7,7 % de la masse initiale, entrant dans la plage d'incertitude estimée. Le bilan massique sur sec est donc validé.

En revanche, même en tenant compte de la quantité d'eau qui a réagi (39,7 kg), le bilan en eau conserve un déficit de 100,9 kg (= 140,6 - 39,7), ce qui correspond à plus de 20 % de la masse d'eau initiale (apportée par les déchets). Nous imputons cet écart relativement important à la quantité d'eau évaporée lors de la montée en température. Cette valeur est en effet du même ordre de grandeur que la perte estimée à partir du bilan massique sur les masses brutes (80 kg). Avec cette hypothèse qui paraît raisonnable, on peut considérer que le bilan massique en eau boucle correctement.

Tableau VII : Bilan massique sur sec et en eau de l'essai de chaulage

	Siccité (% MH)	Masse sèche (kg)	Eau (kg)
Entrants			
Refus de dégrillage	22,3	140,5 (± 2,5)	489,5 (± 7,5)
Chaux vive	100	130 (± 10)	0,0
Total entrants	35,6	270,5 (± 12,5)	489,5 (± 7,5)
Sortants			
Fraction grossière (> 12 mm)	48,4	87,1 (± 10)	92,9 (± 10)
Fraction fine (< 12 mm)	48,8	244,0 (± 10)	256,0 (± 10)
Total sortants	48,7	331,1 (± 20)	348,9 (± 20)
Bilan massique (sortants – entrants)		+ 60,6 (± 32,5)	- 140,6 (± 27,5)

III.2.3. Caractérisation physico-chimique des fractions solides

Le Tableau VIII présente la siccité et le pH des refus de dégrillage, avant et après traitement. Les deux fractions obtenues après le chaulage des refus ont une siccité de 48,7 %, nettement supérieure à la siccité minimale réglementaire pour leur admission en décharge. Cette siccité réglementaire était d'ailleurs atteinte par le simple ajout de la chaux vive, sans même tenir compte de la réaction d'extinction (Tableau VII). Une optimisation de la quantité de chaux à utiliser en fonction de la siccité initiale du déchet est donc possible.

Nous notons par ailleurs que les valeurs de pH de 12 assurent aux refus chaulés une stabilisation et une hygiénisation (i) par inactivation/élimination des germes et (ii) par déplacement de l'équilibre physico-chimique des molécules soufrées malodorantes (en pH basique, le dégagement de ces composés est défavorisé) (Noble, 1997).

Tableau VIII : Siccité et pH des refus avant et après chaulage

Paramètre	Unité	Refus bruts	Fraction chaulée < 12 mm	Fraction chaulée > 12 mm
Siccité	% MH	22,3	48,8	48,4
pH	unité pH	6,0	12,0	12,0

III.3. Conclusions

L'essai de traitement par chaulage a permis de confirmer l'intérêt de ce traitement, notamment en termes de stabilisation/hygiénisation et d'augmentation de la siccité du déchet.

La stabilisation et l'hygiénisation du déchet chaulé, sous les actions combinées (i) de l'agressivité chimique de la chaux vive, (ii) de la montée en température lors de la réaction d'extinction de la chaux et (iii) de l'élévation du pH, se caractérise par l'absence d'odeurs nauséabondes après traitement. Un pH élevé permet par ailleurs de bloquer toute activité biologique et détruit les germes pathogènes. Il faut également souligner l'amélioration de l'aspect visuel des refus de dégrillage après traitement à la chaux, ce qui modifie considérablement la perception que nous pouvons avoir du déchet.

Le traitement de refus à la chaux permet d'atteindre, si le mélange « chaux vive + refus » est effectué dans des proportions adaptées, la siccité réglementaire pour l'envoi en ISDND. Les opérations de manutention et de transport sont également facilitées par la siccité élevée du déchet traité. Par ailleurs, le traitement à la chaux n'augmente pas significativement la masse finale et le volume du déchet à éliminer (augmentation inférieure à 10 % en termes de masse brute et de volume), ce qui suppose que les coûts d'élimination en décharge seraient sensiblement équivalents.

Enfin, des analyses complémentaires ont été réalisées pour évaluer une potentielle valorisation agronomique des refus chaulés (en tant qu'amendement calcique) ou pour une valorisation en tant que combustible solide de récupération (CSR) mais ces filières de valorisation sont compromises à cause de la présence de plastiques et d'un PCI_{hum} relativement faible des refus chaulés respectivement (Le Hyaric, 2009).

IV. ETUDE DE FAISABILITE DU TRAITEMENT MECANIQUE DES REFUS DE DEGRILLAGE

Les essais de traitement mécanique (broyage) des refus de dégrillage visent à estimer la part qui pourrait être réintroduite et traitée dans la « filière eau » des stations d'épuration.

Les essais réalisés ont pour objectifs de déterminer si, d'une part, la nature des refus de dégrillage (avec notamment les lingettes et les serviettes hygiéniques qui forment des « cordes » de fibres textiles entrelacées assez résistantes susceptibles de former par exemple des torons dans le broyeur) n'interdit pas leur broyage et, d'autre part, d'estimer la quantité de matière pouvant être renvoyée vers la « filière eau » après broyage (fraction granulométrique inférieure à 3 mm, correspondant à la maille minimale des dégrilleurs des STEP étudiées).

IV.1. Matériel et méthode

IV.1.1. Caractérisation des refus de dégrillage utilisés lors des essais de broyage

Les essais de broyage se sont déroulés à la STEP de Fontaines-sur-Saône (Rhône-Alpes), exploitée par le Grand Lyon. Il s'agit d'une station de type « filtres biologiques » traitant les eaux usées issues d'un réseau unitaire et dont la charge polluante est estimée à 20 000 EH. L'étape des prétraitements des eaux usées dispose de deux dégrilleurs : un dégrilleur moyen de 25 mm et un dégrilleur fin de 10 mm, situé après déshuilage et dessablage.

L'ensemble des refus générés lors de la campagne de prélèvements d'une durée de trois jours a fait l'objet d'une caractérisation globale, dont les principaux résultats sont présentés dans le Tableau IX. Après chaque journée de prélèvement, des échantillons représentatifs d'environ 10 kg sont élaborés par quartage pour la réalisation des essais de broyage.

Tableau IX : Caractérisation des refus utilisés pour les essais de broyage

Paramètre	Unité	Jour 1	Jour 2	Jour 3
Masse générées	kgMS.EH ⁻¹ .an ⁻¹	0,88	1,05	0,08
Siccité	% MH	13,2	16,0	12,9
Matière volatile	% MS	88,4	77,1	91,6

IV.1.2. Description de l'installation pour la réalisation des essais de broyage

Pour évaluer le comportement au broyage des refus de dégrillage, un broyeur-dilacérateur à doubles arbres parallèles de marque Börger a été loué. Ce broyeur (HPL 200) possède une capacité de traitement de 50 m³.h⁻¹ et est composé de 18 couteaux de 8 mm, entraînés par un moteur d'une puissance de 3kW à 97 tr.min⁻¹ (Figure 1, à gauche).

Conçu pour le broyage et la dilacération de matériaux solides contenus dans les fluides de types boues et graisses, il fragmente les matières comme les fibres, les matières plastiques, les textiles et autres matériaux semblables.

En fonctionnement normal, ce broyeur est installé « en ligne ». Dans le cadre de nos essais, quelques adaptations ont été nécessaires pour faciliter l'introduction des refus. Un tuyau d'alimentation a été confectionné pour augmenter la quantité de déchet introduite et permettre leur passage dans le broyeur à l'aide d'une barre jouant le rôle de piston. Le broyeur a été légèrement incliné pour faciliter son alimentation manuelle. En sortie, un bac de récupération a été positionné afin de récupérer l'ensemble des refus broyés (Figure 1, à droite).

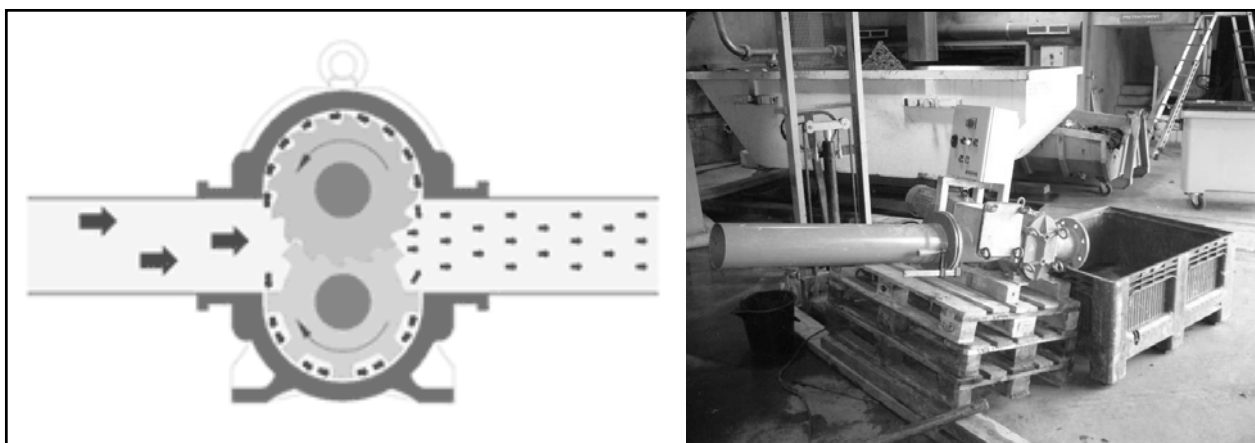


Figure 1 : Principe de fonctionnement (à gauche) et installation (à droite) du broyeur HPL 200

IV.1.3. Protocole expérimental des essais de broyage

Des essais préliminaires de broyage ont été effectués sur les refus grossiers (fraction > 25 mm) pour une prise en main optimale du broyeur-dilacérateur et pour observer le comportement du broyeur face à la fraction qui présente le plus d'éléments solides hétérogènes pouvant nuire à son bon fonctionnement (canettes en aluminium, bouts de bois ou de plastique dur).

Une fois les essais préliminaires effectués, chaque échantillon représentatif a été broyé une première fois, avec ajout d'une quantité suffisante d'eau pour faciliter le passage du déchet solide dans le broyeur. Une partie du broyat a été conservée pour les analyses, l'autre a été réintroduite dans le broyeur pour un deuxième passage et le nouveau broyat a été conservé pour les analyses.

Les masses de déchets en entrée et en sortie, ainsi que la quantité d'eau ajoutée pour faciliter le broyage, ont été pesées pour pouvoir effectuer les bilans massiques des différents essais de broyage réalisés.

Chaque broyat a été caractérisé au laboratoire par sa granulométrie déterminée par tamisage sous flux d'eau (10 mm, 6 mm et 3 mm), et chaque fraction issue du tri granulométrique a été caractérisée (répartition massique entre chaque fraction granulométrique et teneur en matière volatile).

IV.2. Résultats expérimentaux

IV.2.1. Fonctionnement du broyeur

Lors des essais préliminaires, aucun élément solide n'est venu perturber le fonctionnement du broyeur (plastiques durs, canettes en aluminium, bois). Le broyat obtenu est d'une consistance homogène et pâteuse. Aucune catégorie de matériaux n'est identifiable après broyage, hormis quelques morceaux de plastiques.

Ces essais préliminaires permettent seulement d'estimer la robustesse du broyeur de façon ponctuelle. Celle-ci nécessiterait d'être évaluée sur du plus long terme afin d'évaluer notamment les phénomènes d'usure des couteaux et la fréquence des pannes du broyeur.

IV.2.2. Bilan massique des essais de broyage

Pour chaque essai, environ 10 kg de refus bruts non compactés ont été introduits dans le broyeur, avec un ajout d'eau variant entre 17,0 et 36,2 % de la masse de déchet brut introduit. Les masses des différentes fractions entrantes et sortantes du broyeur sont présentées dans le Tableau X.

Les pertes lors des différents essais de broyage représentent au maximum 10 % de la masse des fractions introduites (déchets bruts et eau). Elles sont principalement dues au fait que la chambre de broyage, où se situent les couteaux, piège une partie des déchets broyés.

Le ratio « eau ajoutée / déchets bruts » diminue d'un essai à un autre pour des raisons expérimentales. Initialement, nous pensions que le broyage serait possible uniquement en ajoutant une quantité d'eau relativement importante. En réalité, nous avons constaté au cours des essais que l'ajout d'une petite quantité d'eau suffisait pour faciliter le broyage.

Tableau X : Bilan massique des essais de broyage des refus de dégrillage

	Unité	Essai 1	Essai 2	Essai 3
Masse déchets introduits	kg	11,05 (± 0,02)	8,15 (± 0,02)	10,60 (± 0,02)
Masse eau ajoutée	kg	4,00 (± 0,02)	2,65 (± 0,02)	1,80 (± 0,02)
Ratio « eau ajoutée / déchets bruts »	%	36,2	32,5	17,0
Masse déchets broyés	kg	14,35 (± 0,02)	9,70 (± 0,02)	11,70 (± 0,02)
Pertes	kg	0,70 (± 0,06)	1,10 (± 0,06)	0,70 (± 0,06)
	%	4,7	10,2	5,6

IV.2.3. Distribution granulométrique des refus de dégrillage après broyage

Le tri granulométrique des refus de dégrillage après broyage permet de déterminer la quantité de matière qui pourrait être réintroduite dans la filière de traitement des eaux usées. Pour chaque essai, les différentes fractions ont été pesées afin de déterminer la répartition granulométrique des refus broyés, exprimée en matière sèche.

Le Tableau XI présente les résultats moyens issus du tri granulométrique des refus après broyage. Nous notons que plus de 70 % de la masse sèche des refus après broyage présente une granulométrie inférieure à 3 mm et pourrait donc être réintroduite dans la « filière eau ». Cette fraction granulométrique a une teneur élevée en matière volatile (Tableau XII) qui peut potentiellement être traitée lors des différents traitements de la « filière eau » d'une station

d'épuration. Un deuxième passage dans le broyeur n'a pas eu d'effets significatifs sur la répartition granulométrique des refus broyés.

Tableau XI : Distribution granulométrique moyenne (3 essais) des refus de dégrillage après un ou deux broyages

Fraction	Déchets (gMH)	Siccité (% MH)	Déchets (gMS)	Répartition (%)
Répartition après un broyage				
Masse totale	2041,3	10,8	220,9	100,0
> 10 mm	87,8	10,2	9,0	4,1
6 – 10 mm	167,1	10,2	17,1	7,7
3 – 6 mm	380,9	9,2	35,0	15,8
< 3 mm			159,9	72,4
Répartition après deux broyages				
Masse totale	1505,2	10,7	161,1	100,0
> 10 mm	53,4	9,8	5,3	3,3
6 – 10 mm	62,0	9,0	5,6	3,5
3 – 6 mm	323,3	9,0	29,2	18,1
< 3 mm			121,1	75,1

Tableau XIII : Teneur en matière volatile des refus de dégrillage broyés en fonction des fractions granulométriques

Fraction	Teneur en MV (%MS)		
	Essai 1	Essai 2	Essai 3
Déchets brut	88,4	77,1	91,6
> 10 mm	96,4	92,0	96,7
6 – 10 mm	95,3	90,8	97,8
3 – 6 mm	93,7	84,3	94,0
< 3 mm	85,5	74,2	90,0

IV.3. Conclusions

Le fonctionnement du broyeur ne semble pas avoir été affecté par les éléments constitutifs des refus de dégrillage. Le traitement par broyage de ces déchets est donc, d'un point de vue technique, envisageable sans problème particulier.

Le broyeur a montré des performances élevées. Le broyage des refus de dégrillage a permis de réduire plus de 70 % de la masse sèche du déchet à une granulométrie inférieure à 3 mm. Deux filières d'élimination du broyat sont alors envisagées :

- si la STEP possède un digesteur de boues, les refus broyés pourraient être traités par méthanisation en mélange avec les boues compte tenu de leur fort potentiel bio-méthanogène, confirmé par les essais de méthanisation présentés ci-après ;
- la fraction inférieure à 3 mm pourrait être renvoyée dans la « filière eau » des STEP pour être traitée. La fraction supérieure à 3 mm peut, quant à elle, subir les traitements actuels (compactage et élimination en décharge ou incinérateur).

L'appréhension suscitée, chez les gestionnaires de STEP, par la réintroduction des refus de dégrillage dans la « filière eau » ou dans les digesteurs de boues, même après broyage, constitue cependant un frein majeur à la mise en place de ces traitements. Une étude de démonstration dans une station d'épuration « pilote » où les refus broyés seraient renvoyés dans la « filière eau » ou

dans les digesteurs de boues permettrait de valider (ou non) ces approches. Le broyeur serait également mis à l'épreuve sur le long terme pour évaluer sa robustesse.

V. ETUDE DE FAISABILITE DE LA METHANISATION DES REFUS DE DEGRILLAGE

Une étude de la méthanisation des refus de dégrillage dans un réacteur à l'échelle « pilote » a été menée (Le Hyaric et al., 2010) pour confirmer les potentiels méthanogènes révélés lors de la caractérisation en laboratoire des refus de dégrillage mais qui ne reflètent pas rigoureusement le comportement du déchet en conditions réelles. La mise en place d'un essai de digestion à l'échelle « pilote » permet en effet :

- de travailler dans des conditions dynamiques (alimentation périodique du digesteur) permettant de révéler d'éventuels effets d'inhibition ou de carence ;
- de reproduire plus fidèlement les conditions opératoires des réacteurs à échelle « industrielle », notamment l'humidité, le temps de séjour... ;
- de traiter des quantités de déchets plus élevées avec la possibilité de prélèvements réguliers et représentatifs du contenu du réacteur.

Un réacteur d'un volume utile d'environ 50 litres a été conçu et construit pour étudier la méthanisation des refus de dégrillage en conditions mésophiles (35 ± 1 °C) et par voie sèche (teneur en matière sèche supérieure à 25 %). Les caractéristiques de fonctionnement du réacteur (pH, concentration en AGV, production et composition du biogaz,...) ont été étudiées en semi-continu avec des refus de dégrillage comme substrats afin d'évaluer la performance du traitement.

V.1. Matériel et méthode

V.1.1. Caractérisation des refus de dégrillage utilisés pour les essais de méthanisation

Une masse totale de 300 kg de refus de dégrillage ont été prélevés à la station d'épuration de Bourgen-Bresse (Rhône-Alpes). Ils sont composés d'un mélange de refus provenant d'un dégrilleur (15 mm) et d'un tamiseur (3 mm), et ont été collectés en sortie de la vis de compactage.

La totalité des refus collectés a été transportée au laboratoire, où vingt échantillons représentatifs de 8 kg chacun ont été élaborés par quartage puis congelés. Les caractéristiques de ces échantillons sont présentées dans le Tableau XIV.

Tableau XIV : Caractérisation des refus de dégrillage utilisés pour les essais de méthanisation

Paramètre	Unité	Refus échantillonnés
Siccité	% MH	25,3 (\pm 0,9)
Matière volatile	% MS	92,9 (\pm 0,1)
PBM	mlCH ₄ /gMV	282
Ratio(*) CH ₄ /CO ₂	-	57,6 / 42,4

PBM : Potentiel bio-méthanogène

(*) : Ratio sur la production totale en biogaz

V.1.2. Description du réacteur de méthanisation

Un digesteur cylindrique en acier inoxydable a été utilisé pour la réalisation des essais de digestion des refus de dégrillage (Figure 2). D'un volume total d'environ 90 litres, son volume utile est de 50 litres approximativement. L'agitation du déchet au sein du réacteur s'effectue à l'aide d'un axe muni de pâles et entraîné par un moteur électrique (0,25 kW ; 10,5 tr/min). Le système d'agitation est activé automatiquement pendant 15 minutes toutes les 4 heures.

Le réacteur est équipé d'une sonde qui permet de connaître la température au sein du digesteur. La surface externe du réacteur est enveloppée d'une résistance électrique qui permet de maintenir une température constante de 35 ± 1 °C au sein du digesteur au cours des essais.

Une fenêtre étanche (50 × 25 cm) permet l'introduction ou le prélèvement de déchets. Après chaque ouverture/fermeture du réacteur, celui-ci est purgé à l'azote pour éliminer toute trace d'oxygène.

La production de biogaz est mesurée en continu à l'aide d'un compteur à gaz dont la plage de sensibilité varie de 0,1 l/h à 30,0 l/h. Il est équipé d'un générateur de pulsation qui permet l'acquisition des données sur ordinateur. Le biogaz est régulièrement échantillonné au travers d'un septum pour analyser sa composition.

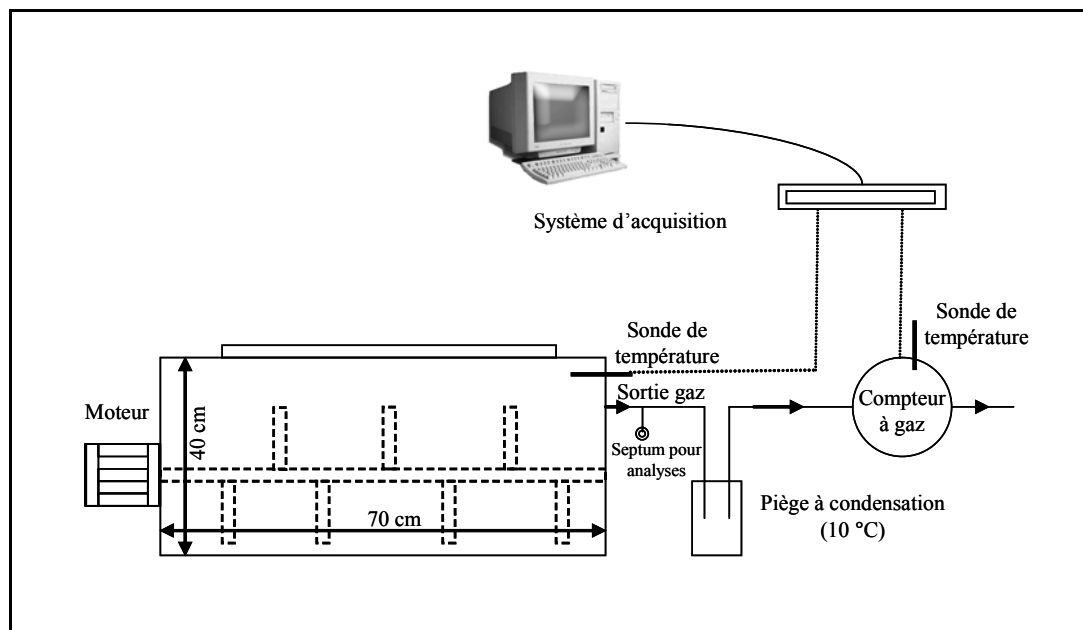


Figure 2 : Schéma du pilote de laboratoire – Coupe longitudinale

V.1.3. Méthodes analytiques

Des échantillons de déchet ont été prélevés hebdomadairement du digesteur et analysés selon leur teneur en matière sèche (séchage à 105 °C jusqu'à masse constante) et leur teneur en matière volatile (calcination à 550 °C pendant 4 heures).

Des extractions à l'eau ont été réalisées en triplicats en mélangeant à l'éluteur pendant 2 heures dans 100 ml d'eau déminéralisée une quantité donnée de déchet brut, correspondant à 100 g de matière sèche (ratio L/S de 10). La suspension a été alors filtrée et analysée selon son pH et sa concentration en acides gras volatils (AGV).

Les AGV ont été analysés à l'aide d'un chromatographe en phase gazeuse Agilent™ équipé d'un détecteur à ionisation de flamme (CPG – FID) et d'une colonne HP-FFAP (30 m × 0,25 mm).

Le biogaz a été analysé à l'aide d'un chromatographe en phase gazeuse Agilent™ équipé d'un détecteur à conductivité thermique (CPG – TCD), d'une colonne Poraplot U (8 m × 0,320 mm ID) pour l'analyse du CO₂ et du H₂S et d'une colonne Molsieve 5 Å (10 m × PPU 3 m) pour l'analyse du O₂, N₂, et du CH₄.

V.1.4. Protocole expérimental

L'étude s'est déroulée pendant une durée totale de 18 semaines. L'expérimentation peut être divisée en quatre phases distinctes, comme décrit par Le Hyaric (2009) et Le Hyaric et al. (2010). Cependant, dans cet article, seule la phase correspondant à la mise en charge progressive du réacteur est présentée.

Au cours de cette phase expérimentale, le réacteur a été alimenté pendant deux semaines par une charge organique en augmentation progressive jusqu'à atteindre à partir de la 3^{ème} semaine une charge constante (2 kg la première semaine, 4 kg la seconde puis 6 kg par semaine pendant 6 semaines). A chaque alimentation, une quantité donnée de digestat a été prélevée pour maintenir la masse de matière sèche constante au sein du réacteur, correspondant à un temps de séjour (en matière sèche) de 5 semaines au cours du régime constant.

Les digestats prélevés ont été analysés immédiatement après chaque prélèvement. La production de biogaz et la température au sein du réacteur ont été suivies en continu. La composition du biogaz a été déterminée avant chaque alimentation du réacteur.

V.2. Résultats expérimentaux

La quantité de déchets bruts introduits dans le réacteur augmente progressivement de 2 kg à 6 kg. La Figure 3 souligne que la production de biogaz augmente plus la charge organique introduite est importante, pour se stabiliser entre 513 et 653 NI/kgMV par semaine pendant les semaines 3 à 8, lorsque l'alimentation du réacteur est constante.

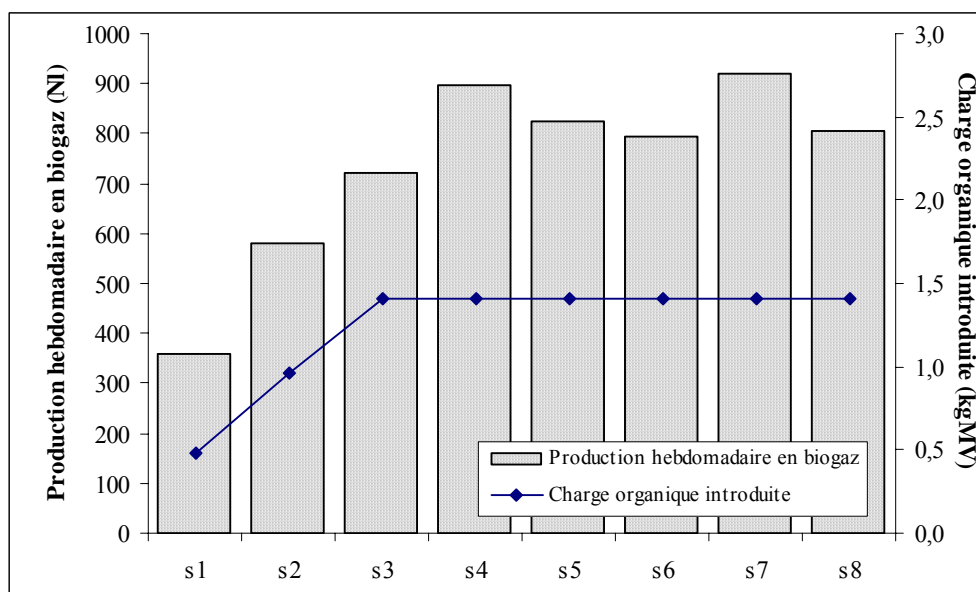


Figure 3 : Production hebdomadaire en biogaz en fonction de la charge organique introduite

Le Tableau XV montre que le pH au sein du digesteur est relativement stable tout au long de l'expérience (valeurs comprises entre 8,0 et 8,4), correspondant aux valeurs proches des conditions opératoires optimales (Comino et al., 2009; Macias-Corral et al., 2008). La concentration en AGV décroît régulièrement de 30,7 à 1,5 g/kgMS ce qui indique que les acides présents au sein du réacteur au début de l'alimentation et produits au cours de l'acidogenèse sont consommés par les bactéries acétogènes et méthanogènes pour la production de biogaz.

La composition du biogaz est également relativement stable tout au long des 8 semaines de l'expérience. Le ratio CH₄/CO₂ varie entre 59/41 et 63/37, ce qui confirme à nouveau que le processus de digestion anaérobie se déroule dans de bonnes conditions opératoires.

Tableau XV : Analyses des digestats prélevés et composition du biogaz

Paramètre	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
pH	8,0	8,1	8,4	8,3	8,1	8,0	8,0	8,0
Teneur totale en AGV (g/kgMS)	30,7	15,2	12,4	13,7	1,1	2,5	1,3	1,5
Composition du biogaz								
% CH ₄	58,6	61,3	59,2	62,8	61,5	60,5	61,2	61,0
% CO ₂	41,4	38,7	40,8	37,2	38,5	39,5	38,8	39,0

V.3. Conclusions

L'essai présenté, qui correspond à un mode de fonctionnement en semi-continu du réacteur de laboratoire avec une montée progressive de la charge organique introduite jusqu'à atteindre un régime constant (6 kg de refus introduits chaque semaine), a permis de vérifier la faisabilité de la méthanisation des refus de dégrillage.

L'étude de la méthanisation des refus de dégrillage à l'échelle « pilote » met donc en évidence la possibilité d'intégrer ces déchets dans les digesteurs industriels de type « voie sèche » pour leur traitement. Cette voie d'élimination présente le double avantage de réduire la quantité de déchets à éliminer et de produire un biogaz valorisable énergétiquement.

Si la mise en place d'un digesteur dédié au traitement des refus de dégrillage n'est pas envisageable compte tenu du faible gisement qu'ils représentent, leur intégration dans des unités déjà existantes est à étudier. Deux possibilités se présentent alors :

- Le traitement « sur site » pour les STEP équipées d'un digesteur (avec un broyage préalable des refus). En effet, même si les conditions de notre étude (pilote voie sèche) ne reproduisent pas celles de la méthanisation des boues, nous pouvons supposer que les résultats seraient similaires.
- Le traitement « hors-site » dans des unités de méthanisation de déchets solides en procédés de type « voie sèche » pour lesquels notre étude démontre le très bon comportement des refus de dégrillage.

La mise en place du traitement anaérobie des refus de dégrillage fait cependant l'objet de réserves auxquelles notre étude n'apporte pas de réponses. D'une part, la perturbation du fonctionnement du digesteur engendrée par l'apport de ces déchets n'est pas connue et, d'autre part, l'éventuelle modification des caractéristiques ou du statut du digestat n'a pas été évaluée.

VI. CONCLUSIONS GENERALES

La gestion de l'ensemble des sous-produits du traitement des eaux usées, dont les refus de dégrillage, fait partie intégrante de l'activité des exploitants des stations d'épuration. Si la problématique des boues a été largement traitée jusqu'à maintenant, aucune étude scientifique d'ampleur ne s'était focalisée sur les filières envisageables pour le traitement et/ou la valorisation des refus de dégrillage, ce qui n'offrait aucune alternative aux voies d'élimination « classiques » malgré un contexte réglementaire qui leur est de plus en plus défavorable. Dans ces conditions, il apparaissait nécessaire de recenser et d'étudier des traitements alternatifs appropriés pour leur valorisation et/ou leur élimination afin d'aboutir à la proposition d'une filière jugée optimale pour la gestion pérenne des refus de dégrillage.

Notre étude a souligné le faible gisement que représentent actuellement les refus de dégrillage tout en confirmant que les caractéristiques du déchet ne sont pas adaptées aux filières d'élimination actuellement disponibles. La teneur en eau du déchet reste très élevée, malgré la présence systématique de compacteurs qui sont le seul traitement mis en place dans les STEP étudiées pour le traitement des refus. L'étude de la biodégradabilité a témoigné de la forte teneur en matière organique biodégradable, et donc potentiellement valorisable par méthanisation.

Chaque traitement retenu a fait l'objet d'une étude expérimentale à « l'échelle pilote » ou « semi-industrielle ». Des résultats plus ou moins concluants ont été obtenus en fonction des différents paramètres visés, et notamment la réduction des quantités de déchets à traiter, l'augmentation de la siccité du déchet et/ou l'abattement de la teneur en matière organique (avec ou sans valorisation potentielle). Cependant, l'intégration industrielle de ces traitements n'est pas envisageable sans une étude de validation technologique dans une station d'épuration « pilote » pour valider les résultats expérimentaux et pour confirmer la faisabilité technique de ces traitements, aussi bien dans leur mise en œuvre que dans les performances de traitement sur site.

Afin d'estimer la pertinence des filières étudiées et de les comparer d'une part entre elles et, d'autre part, avec les filières d'élimination actuelles, une étude technico-économique des filières envisagées a été réalisée (Le Hyaric, 2009). Cette étude, qui estime le coût global de la gestion des refus de dégrillage (traitement, transport et élimination) entre 14000 €/an et 25000 €/an environ, pour une station d'épuration de 100 000 EH, a mis en avant la possibilité de diminuer ces coûts jusqu'à 30 % par rapport aux filières actuelles (sans même tenir compte de la valorisation énergétique potentielle du biogaz). Ce constat souligne qu'un traitement adapté aux refus de dégrillage, sous réserve de validation, pourrait se traduire par des avancées en termes d'efficacité de traitement et de bénéfices économiques.

Enfin, la filière de traitement par voie biologique des refus de dégrillage, qui est susceptible d'offrir les meilleurs résultats, justifie la poursuite des recherches, avec en particulier :

- l'étude en laboratoire de la co-digestion des boues avec les refus de dégrillage (et avec d'éventuels autres co-substrats comme les graisses par exemple). Il s'agira également d'étudier l'influence de la proportion entre les différents substrats ;
- la validation à l'échelle « pilote » puis « industrielle » de la co-digestion des boues avec les refus de dégrillage (et autres co-substrats) ;
- l'étude de l'incidence de l'ajout de nouveaux substrats sur les caractéristiques des boues digérées et sur leur filière de valorisation ou d'élimination.

Remerciements

Les auteurs remercient le pôle de compétitivité Chimie et Environnement de Lyon Rhône-Alpes (Axelera) pour la mise en œuvre de ce programme de recherche. Ils présentent également leurs remerciements à la région Rhône-Alpes pour son soutien financier. Cette étude a été possible grâce à la société OXALOR qui nous a mis à disposition ses installations de chaulage et au CEREP (INSA de Lyon) qui a réalisé le pilote de méthanisation.

Références

Clay C., Hodgkinson A., Upton J. & Green, M. (1996). Developing acceptable sewage screening practices. *Water Science and Technology*, Vol. 33, n° 12, pp. 229-234.

- Comino, E., Rosso, M. & Riggio, V. (2009). Development of a pilot scale anaerobic digester for biogas production from cow manure and whey mix. *Bioresource Technology* 100, 5072-5078.
- Davidsson, Å., Lövestedt, C., la Cour Jansen, J., Gruvberger, C., Aspergen, H. (2008). Codigestion of grease trap sludge and sewage sludge. *Waste Management* 28, 986-992.
- Frechen, F.-B., Schier, W. & Wett, M. (2006). Pre-treatment of municipal MBR applications in Germany – Current status and treatment efficiency. *Water Practice & Technology*, Vol. 1, n° 3, 8 p.
- Jokela, J. P. Y., Vavilin, V. A., Rintala, J. A. (2005). Hydrolysis rates, methane production and nitrogen solubilisation of grey waste components during anaerobic degradation. *Bioresource Technology* 96, 501-508.
- Le Hyaric, R. (2009). Caractérisation, traitabilité et valorisation des refus de dégrillage des stations d'épuration, Thèse de doctorat, Lyon : INSA de Lyon, 190 p.
- Le Hyaric, R., Canler, J-P., Barillon, B., Naquin, P. et Gourdon, R. (2009). Characterization of screenings from three municipal wastewater treatment plants in the Region Rhône-Alpes, *Water Science & Technology*, Vol. 60, Issue 2, pp. 525-531.
- Le Hyaric, R., Canler, J-P., Barillon, B., Naquin, P. et Gourdon, R. (2010). Pilot-scale anaerobic digestion of screenings from wastewater treatment plant, *Bioresource Technology*, soumis le 15 avril 2010.
- Noble, C. (1997). Traiter et valoriser les boues. Saint-Maurice : OTV, 457 p. (Collection OTV, n°2).
- Macias-Corral, M., Samani, Z., Hanson, A., Smith, G., Funk, P., Yu, H., Longworth, J. (2008). Anaerobic digestion of municipal solid waste and agricultural waste and effect of co-digestion with dairy cow manure. *Bioresource Technology* 99, 8288–8293.
- ORDIF - Observatoire Régional des Déchets d'Ile-de-France - (1999). Les sous-produits du traitement de l'eau en Ile-de-France: constat, diagnostic des filières de traitement, propositions d'actions, Paris : IAURIF 1999, France.
- Owens, J. M., Chynoweth, D. P. (1993). Biochemical methane potential of municipal solid waste (MSW) components. *Water Science and Technology* 27(2), 1-14.
- Sosnowski, P., Klepacz-Smolka, A., Kaczorek, K., Ledakowicz, S. (2008). Kinetic investigations of methane co-fermentation of sewage sludge and organic fraction of municipal solid wastes. *Bioresource Technology* 99, 5731–5737.