



**GREEN
CROSS**
*France &
Territoires*

Green Cross France et Territoires

33 rue Chaptal

92 300 Levallois Perret

+33 1 84 16 07 89

<http://www.gcft.fr>

contact@gcft.fr

Pyrobio Energy + Finaxo Environnement

Note d'étonnement - Green Cross France et Territoires

(Nicolas Imbert et Henri Robert)

Version 1.0 février 2016

Table des matières

1	Contexte de la gestion des boues et des déchets en France.....	4
1.1	Les déchets des activités industrielles, un premier gisement potentiel pour la technologie Pyrobio	5
1.2	Filières de traitement des déchets des ordures ménagères, un second gisement d'exploitation potentielle de la technologie pyrobio	6
1.3	Focus sur la technologie Pyrobio.....	8
2	Forces, Faiblesses, Menaces, Opportunités de la technologie Pyrobio	11
3	Perspectives et opportunités.....	14
3.1	Traitement des boues industrielles, l'exemple de Fismes	14

Table des figures

Figure 1: la production de déchets en France en 2012 (chiffres clés, déchets édition 2015, ADEME).....	4
Figure 2 : Répartition des déchets non dangereux non minéraux de l'industrie manufacturière en 2012 en France (Insee).....	5
Figure 3 : production de déchets par les IAA (source : AGRESTE, GraphAgri 2014).....	6
Figure 4 : mode de traitement des boues et des déchets banals des IAA en 2012 (source AGRESTE, GraphAgri 2014).....	6
Figure 5 :Bilan des tonnages entrant dans les installations de traitement des ordures ménagères en 2012 (source ADEME, chiffres clés déchets édition 2015).....	7
Figure 6 : synoptique de la technologie Pyrobio (A3i)	9
Figure 7 : émissions de fumées site de Fismes (laboratoire LECES) et réglementation européenne	15
Figure 8 : Flux d'énergie sur le site de Fismes (A3i)	15

1 Contexte de la gestion des boues et des déchets en France

En France, les évolutions réglementaires récentes liées à la loi de transition énergétique pour la croissance verte, et la feuille de route représentée par la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC), donnent à mener une réflexion nouvelle sur les solutions techniques à apporter au traitement des déchets qui sont, en 2016 encore, souvent enfouis ou incinérés.

Le gisement de déchets en France est caractérisé comme suit :

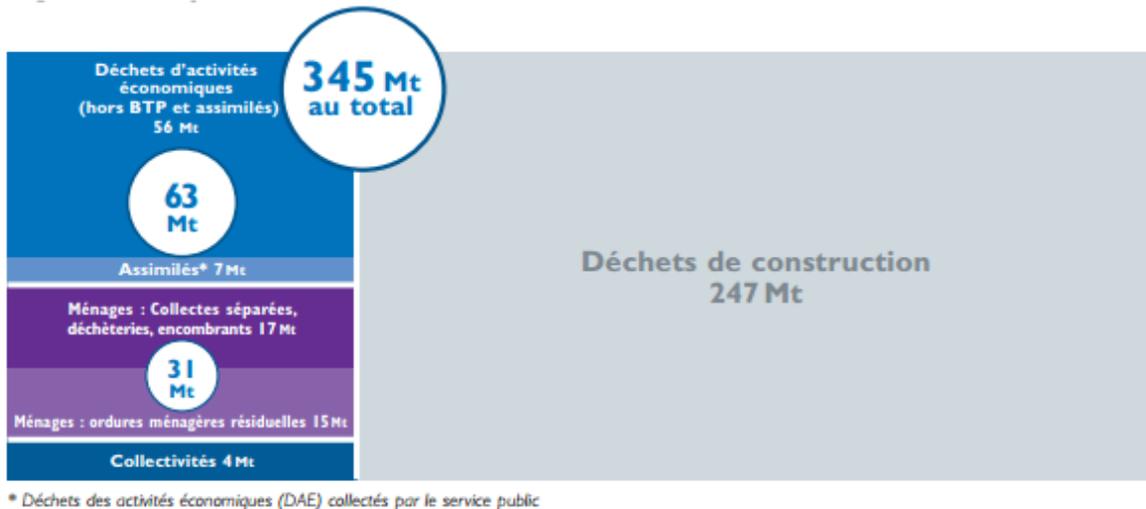


Figure 1: la production de déchets en France en 2012 (chiffres clés, déchets édition 2015, ADEME)

La SNBC définit des objectifs sectoriels de réduction des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2024-2028.

Concernant la gestion des déchets, l'objectif est une diminution de 33% des émissions de gaz à effet de serre.

Parmi les moyens évoqués par la SNBC : « Réduire les émissions diffuses de méthane des décharges et des stations d'épuration » ou encore « Supprimer à terme l'incinération sans valorisation énergétique ».

La loi de transition énergétique pour la croissance verte notifie notamment les éléments suivants :

- « Réduire de 30 % les quantités de déchets non dangereux non inertes admis en installation de stockage en 2020 par rapport à 2010, et de 50 % en 2025 ;
- Réduire de 50 % les quantités de produits manufacturés non recyclables mis sur le marché avant 2020 ;
- **Assurer la valorisation énergétique des déchets qui ne peuvent être recyclés en l'état des techniques disponibles** et qui résultent **d'une collecte séparée ou d'une opération de tri réalisée dans une installation prévue à cet effet**. Dans ce cadre, la préparation et la valorisation de combustibles solides de récupération font l'objet d'un cadre réglementaire adapté. Afin de ne pas se faire au détriment de la prévention ou de la valorisation sous forme de matière, la valorisation énergétique réalisée à partir de combustibles solides de récupération doit être pratiquée soit dans des installations de production de chaleur ou d'électricité intégrées dans un procédé industriel de fabrication, soit dans des installations ayant pour finalité la production de chaleur ou d'électricité, présentant des capacités de production de chaleur ou d'électricité dimensionnées au regard d'un besoin local et étant

conçues de manière à être facilement adaptables pour brûler de la biomasse ou, à terme, d'autres combustibles afin de ne pas être dépendantes d'une alimentation en déchets. L'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie remet tous les trois ans un rapport au Gouvernement sur la composition des combustibles solides de récupération et sur les pistes de substitution et d'évolution des techniques de tri et de recyclage.

Dans ce contexte, la pyrogazéification est une alternative à l'incinération et au stockage de déchets. Différents gisements semblent opportuns à traiter par cette technologie, dans le chapitre suivant seront détaillés des opportunités de marchés pouvant être intéressés par cette voie de valorisation.

1.1 Les déchets des activités industrielles, un premier gisement potentiel pour la technologie Pyrobio

Le secteur industriel intéresse la technologie Pyrobio, c'est par exemple dans le cadre d'une valorisation à même des sites industriels qu'ont été menées les premières expérimentations de Pyrobio ; valorisation des boues de station d'épuration à Fismes et des boues d'une usine d'agroalimentaire à Bergame en Italie. Dans le tableau ci-après sont présentées les différentes typologies de déchets produits par les secteurs industriels pouvant être ciblés prioritairement par la technologie Pyrobio en France.

Figure 2 - Répartition des déchets non dangereux non minéraux de l'industrie manufacturière par type en 2012

	Industries agroalimentaires (IAA)		Industries manufacturières hors IAA		Ensemble	
	Quantité (en tonnes)	en %	Quantité (en tonnes)	en %	Quantité (en tonnes)	en %
Déchets banals	882 299	12	9 829 402	79	10 711 701	54
Boues	2 959 931	41	2 549 895	20	5 509 827	28
Déchets organiques	3 381 680	47	164 951	1	3 546 630	18
Déchets ponctuels	2 290	0	23 474	0	25 764	0
Total	7 226 200	100	12 567 722	100	19 793 922	100

Source : Insee, enquête Production de déchets non dangereux dans l'industrie 2012.

Figure 2 : Répartition des déchets non dangereux non minéraux de l'industrie manufacturière en 2012 en France (Insee)

La production de déchets par les industries agroalimentaires a été identifiée par Finaxo Environnement comme étant une source de développement de l'usage de la technologie Pyrobio, c'est par exemple le cas dans l'usine Italcanditi-Vitalfood à Bergame.

Une installation Pyrobio est installée et utilise principalement les effluents du process industriel (fabrication de marron glacés) pour produire de l'électricité revendue au réseau électrique italien.

En France le mode de traitement des boues et effluents des usines d'agroalimentaire en 2012 était effectué majoritairement en épandage-compostage (58%) puis en station d'épuration (38%). La méthanisation, en développement ne représentait alors que 3% des tonnages de boue et effluents produits, quant à l'incinération elle est marginale (1%).

Production de déchets par les IAA en 2012

Industries agroalimentaires par secteur (Naf rév.2)	Boues et effluents	Déchets organiq. d'origine végétale	Autres déchets organiques	Déchets banals ⁽¹⁾
	<i>millier de tonnes⁽²⁾</i>			
Viandes	440	36	898	113
Poisson	49	0	110	36
Fruits et légumes transf.	181	849	3	76
Huiles et graisses	3	16	21	9
Produits laitiers	260	2	895	129
Grains ; amylicés	659	36	6	31
Boulang.-pâtis. & pâtes	11	111	104	133
Autres prod. aliment. (y compris sucreries)	1 169	90	81	191

Figure 3 : production de déchets par les IAA (source : AGRESTE, GraphAgri 2014)

Mode de traitement des boues et des déchets banals en 2012

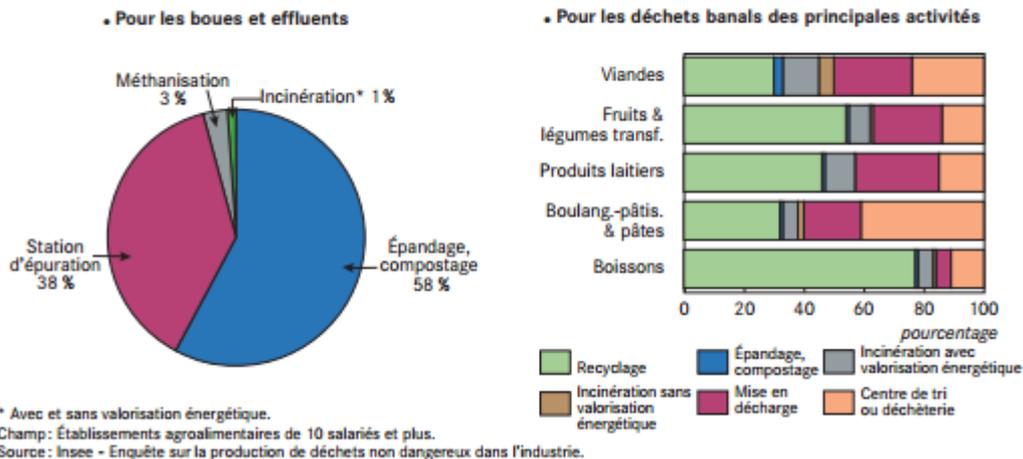
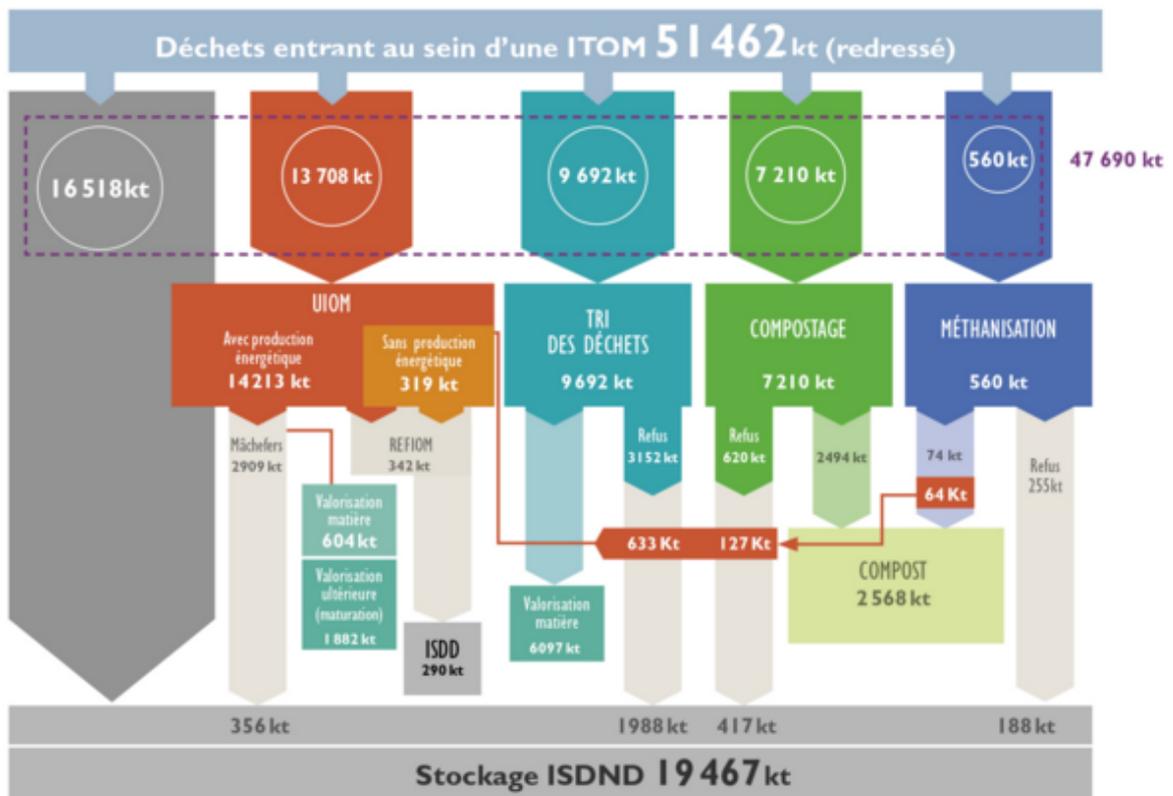


Figure 4 : mode de traitement des boues et des déchets banals des IAA en 2012 (source AGRESTE, GraphAgri 2014)

1.2 Filières de traitement des déchets des ordures ménagères, un second gisement d'exploitation potentielle de la technologie Pyrobio

En France sur les 345 millions de tonnes (MT) de déchets produites en 2012, 51 MT ont été traitées par les installations de traitement des ordures ménagères. Environ 63% des déchets sont directement envoyés en centre de stockage ou incinérés. Environ 20% passent par un centre de tri, 15% vont dans un centre de compostage et moins de 2% en méthanisation selon les chiffres clés de la gestion des déchets publiés par l'ADEME en 2015.

Bilan des tonnages entrant dans les installations de traitement des ordures ménagères en 2012



Source : ADEME – Enquête ITOM 2012

Figure 5 : Bilan des tonnages entrant dans les installations de traitement des ordures ménagères en 2012 (source ADEME, chiffres clés déchets édition 2015)

Le gisement identifié de déchets pouvant être à court terme potentiellement utilisé par la technologie Pyrobio est constitué des refus de tri qui des centres de tris repartent majoritairement à l'enfouissement ou en centre d'incinération.

Ces refus de tris représentent **près d'un tiers des déchets transitant par les centres de tri**, 3152kt, soit environ **6% des tonnages entrant dans les installations de traitement des ordures ménagères** en France.

A plus long terme, un report notable des déchets directement envoyés vers les centres de stockages des déchets non dangereux devrait être observé vers les centres de tri et **accroître significativement le tonnage de déchets** traités par ces derniers, augmentant de fait les quantités de rebus de tri pouvant être traités par pyrogazéification.

1.3 Focus sur la technologie Pyrobio

La technologie de pyrogazéification est une alternative peu explorée face à l'incinération des déchets et à l'enfouissement qui représentent encore une part majoritaire des modes de traitement des déchets industriels comme ceux des ménages.

La pyrogazéification est une technique de valorisation des déchets industriels organiques qui, en absence de dioxygène, à haute température 600-900°C a produit les phases suivantes, sur le site de Fismes traitant des boues de station d'épuration, deux phases :

- une **phase solide** (cendres) (16% massiques A3I).
- Une **phase gazeuse** (Syngaz, CO, H₂, CH₄) (84% massiques A3I).

La technologie Pyrobio permet d'effectuer une pyrolyse rapide favorisant la production de CO et H₂ en minimisant la formation de goudrons et de cendres.

La pyrogazéification effectuée par la technologie Pyrobio est applicable à des déchets secs organiques : (source Finaxo)

- Déchets de l'industrie pétrolière et gazière,
- Co produits d'abattoirs et farines animales,
- Lisiers, fientes, plumes,
- Boues de station d'épuration, urbaines et industrielles,
- Bois et matières végétales, matières viticoles,
- Pneus,
- Déchets hospitaliers,
- Les matières de l'industrie et des ménages contenant en tout ou partie des matières Organiques.
- Plastiques, résidus de broyages automobiles

Ci-après le schéma décrit le principe de fonctionnement de Pyrobio :

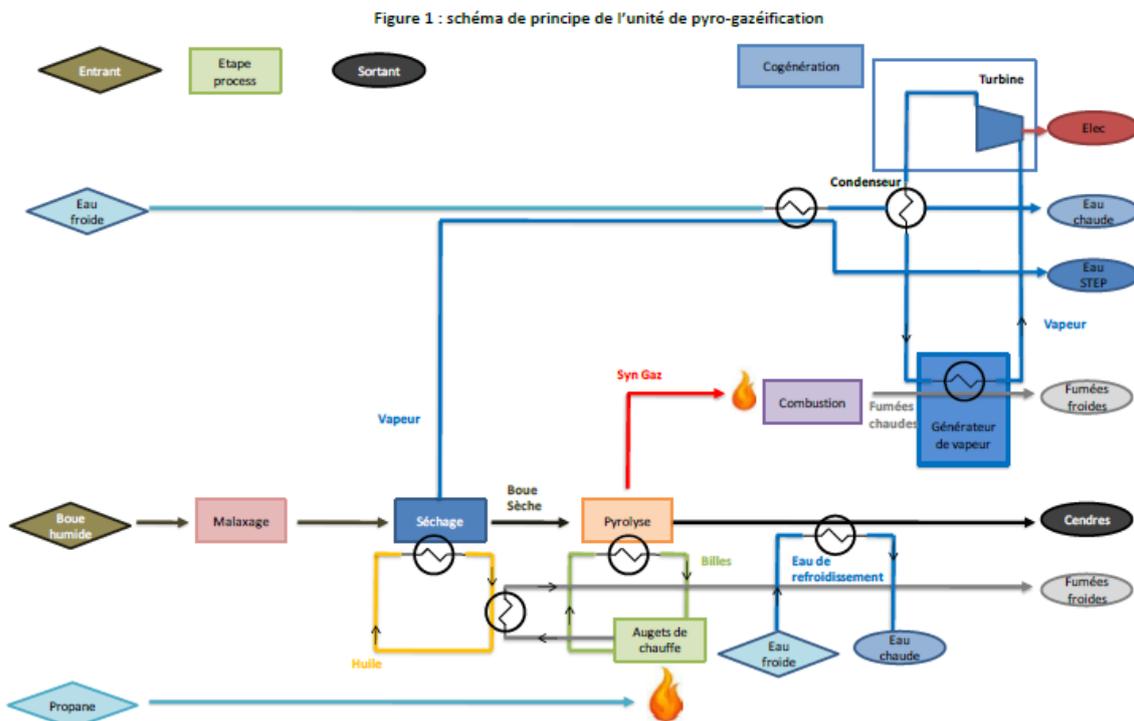


Figure 6 : synoptique de la technologie Pyrobio (A3i)

Le procédé, tel que décrit dans l'étude A3i, comprend quatre étapes majeures, malaxage de la boue, séchage de la boue, pyrolyse de la boue sèche puis combustion du syngaz produit lors de la pyrolyse.

- Les boues sont tout d'abord malaxées pour assurer leur homogénéité en entrée du procédé.
- Les augets de chauffe alimentés par la combustion de propane permettent de chauffer des billes d'acier qui servent de vecteur énergétique pour la pyrolyse.
- La chauffe des godets permet via un échangeur de chauffer l'huile qui sert de vecteur énergétique à l'étape préalable de séchage des boues leur permettant de passer de 25% (en entrée) à 80% de siccité (en sortie) dans l'optique d'améliorer le rendement de la réaction de pyrolyse.
- Les boues séchées subissent une pyrolyse dit « flash », en effet elles sont portées à très haute température par les billes d'acier.
- A l'issue de la pyrolyse, la combustion directe du syngaz produit permet une cogénération produisant chaleur et électricité, des fumées sont émises et des cendres produites, les cendres sont destinées à un centre d'enfouissement de classe 1.

Développement de la technologie à Bergame, sur le site de production d'Italcanditi-Vitalfood

Sur un site industriel de production de marrons glacés de Bergame, les intrants de Pyrobio sont :

- Des palettes en bois issus des livraisons de l'usine ;
- Des boues, des coproduits du process de production.

Après malaxage, un mélange homogène est introduit pour réaliser la réaction de pyrolyse. Il a une densité égale à 1.

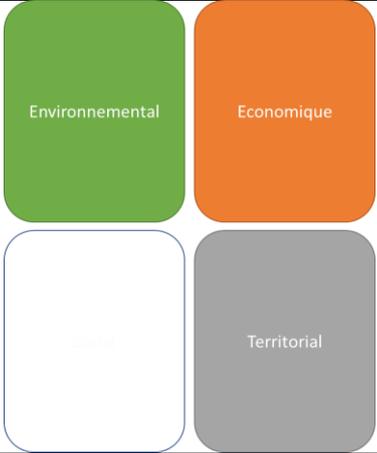
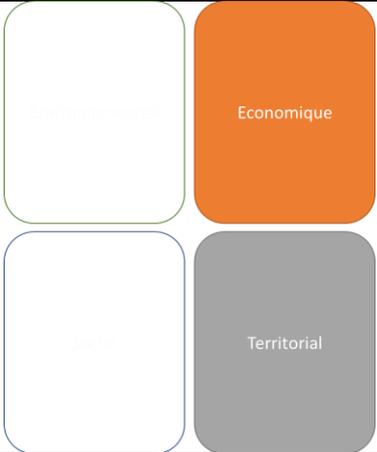
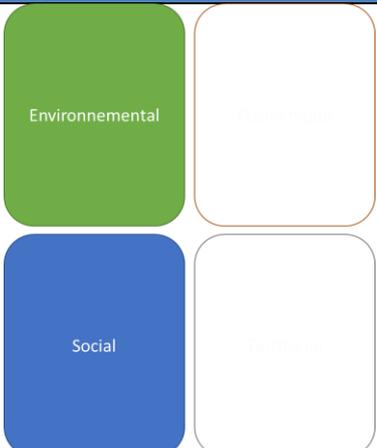
Cette densité est obtenue par le mélange de palettes de bois broyées provenant de la logistique du site de production ($d= 0,3$) et des boues séchées issues du process industriel ($d=2$).

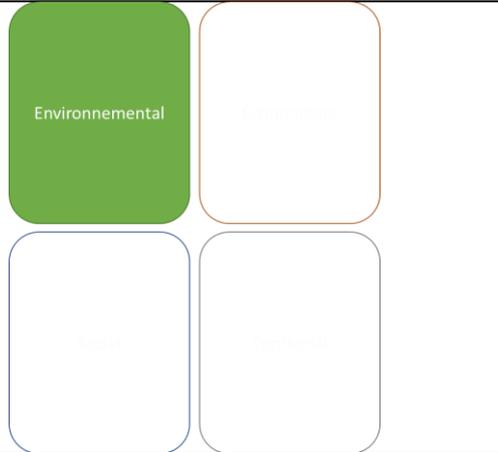
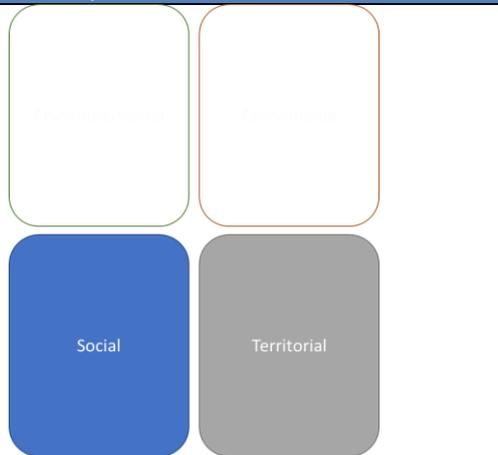
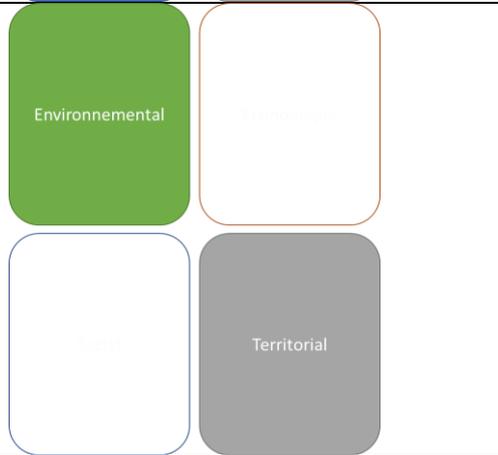
D'après Finaxo Environnement, l'autoconsommation (énergie utilisée pour le chauffage des billes) représente sur ce site 15% de l'énergie produite.

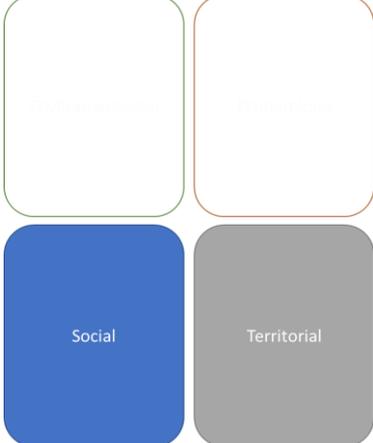
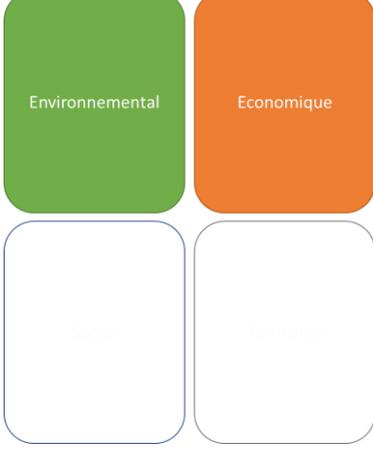
La vapeur générée permet de produire de l'électricité, la puissance de l'installation est de 1MW, l'électricité produite, 0,3MW est rachetée au prix de 0,28€/kWh

Il n'y a pas de cogénération sur le site.

2 Forces, Faiblesses, Menaces, Opportunités de la technologie Pyrobio

Forces	Impacts
<p>Réduction des quantités des matières toxiques à transporter et à enfouir, permet une valorisation <i>in situ</i> des déchets organiques secs produits par un site industriel (par exemple une entreprise d'agroalimentaire) dans une logique d'économie circulaire.</p>	
<p>Installation compact pouvant s'insérer sur un site industriel existant ne disposant pas de réserve foncière importante.</p>	
Faiblesses	Impacts
<p>Gestion du Syngaz requiert une attention particulière puisqu'il est inflammable, étanchéité du réacteur requise (risque de formation d'atmosphère explosive si la teneur en O2 dépasse 6% dans le réacteur)</p>	

<p>A Fismes, brûleurs chauffe godets alimentés via du propane non renouvelable.</p>	
<p>Opportunités</p>	<p>Impacts</p>
<p>Ouvrir les installations au public pour démystifier la technologie et détailler les enjeux au public.</p>	
<p>Pyrobio contribue à valoriser énergétiquement et à réduire la quantité de déchets qui pourraient être enfouis.</p>	
<p>Menaces</p>	<p>Impacts</p>

<p>Requiert une maîtrise technique industrielle assez pointue.</p>	
<p>La conception du dispositif doit intégrer les difficultés induites par une atmosphère fortement corrosive à laquelle doivent résister les différents éléments mécaniques.</p>	

3 Perspectives et opportunités

3.1 Traitement des boues industrielles, l'exemple de Fismes

La technologie Pyrobio de Finaxo Environnement constitue une alternative à la gestion problématique des boues de station d'épuration, contenant des taux notables d'éléments traces métalliques (Pb, Cd, Fe...) et de résidus médicamenteux qui sont aujourd'hui traités selon plusieurs voies : Epandage (majoritaire), Compostage, Incinération (pour des gisements importants de grands centres urbains), Mise en centre d'enfouissement (pour les boues les plus contaminées)

Dans ce contexte, la pyrolyse permet d'obtenir un Syngaz utilisable localement en valorisation de chaleur et d'électricité.

Les Emissions de Nox nécessitent une vigilance particulière quant à l'impact environnemental local sur la qualité de l'air. En effet il est mentionné dans le rapport A3I en autocontrôle des rejets de **283,5mg/Nm³** de fumées (supérieur aux 200mg/Nm³ de la (directive 201075UE du 24 Novembre 2010). Ces fumées nécessitent un traitement par une colonne de lavage pour entrer en conformité avec la réglementation européenne selon les définitions suivantes susceptibles de s'appliquer à une installation de pyrogazéification :

- Installations de combustion utilisant du gaz de haut fourneau, du gaz de fours à coke ou des gaz à faible pouvoir calorifique, issus de la gazéification de résidus de raffineries, à l'exception des turbines à gaz et des moteurs à gaz ;
- Installations de combustion utilisant d'autres gaz, à l'exception des turbines à gaz et des moteurs à gaz ;
- Installations d'incinération des déchets existantes dont la capacité nominale est supérieure à six tonnes par heure ou pour les nouvelles installations d'incinération des déchets.

Ci-après sont détaillées les émissions mesurées dans les fumées du site de Fismes par le laboratoire LCES et mises au regard des normes réglementaires.

Compartiment	Acronyme	Mg/Nm ³ observé	Limite Directive 2010/75/UE (mg/Nm ³)
Nitrogen oxides	Nox	283,5	200 mg/Nm ³ (pour les nouvelles installations ou anciennes >6t/h)
Vanadium	V	0,004	Somme < 0,5
Nickel	Ni	0,010	
Manganese	Mn	0,131	
Copper	Cu	0,032	
Cobalt	Co	0,004	
Chromium	Cr	0,047	
Plomb	Pb	0,020	
Arsenic	As	0,002	
Antimoine	Sb	0,004	
	Somme	0,254	
Mercure	Hg	0,020	0,050
Thallium	Tl	0,004	Somme < 0,05

Cadmium	Cd	0,005	
	Somme	0,009	
Dioxines et furanes	PCDD et PCDF	0,000	0,1
	SO2	14,175	50
	CO	3,875	50
	HCL	1,675	10
PM 2,5	Poussières	1,003	10

Figure 7 : émissions de fumées site de Fismes (laboratoire LECES) et réglementation européenne

Contactée par nos soins sur les émissions de NOx, la société Finaxo précise qu'il serait désormais possible de mettre en place brûleur adapté bas NOx (ce qui n'était pas le cas sur le site de Fismes), et donc potentiellement et sous réserve de mesure conforme de s'affranchir ainsi de l'obligation de lavage de gaz.

Le diagramme ci-après représente les flux d'énergie sur le site de Fismes.

3.1 FLUX D'ÉNERGIE THERMIQUE

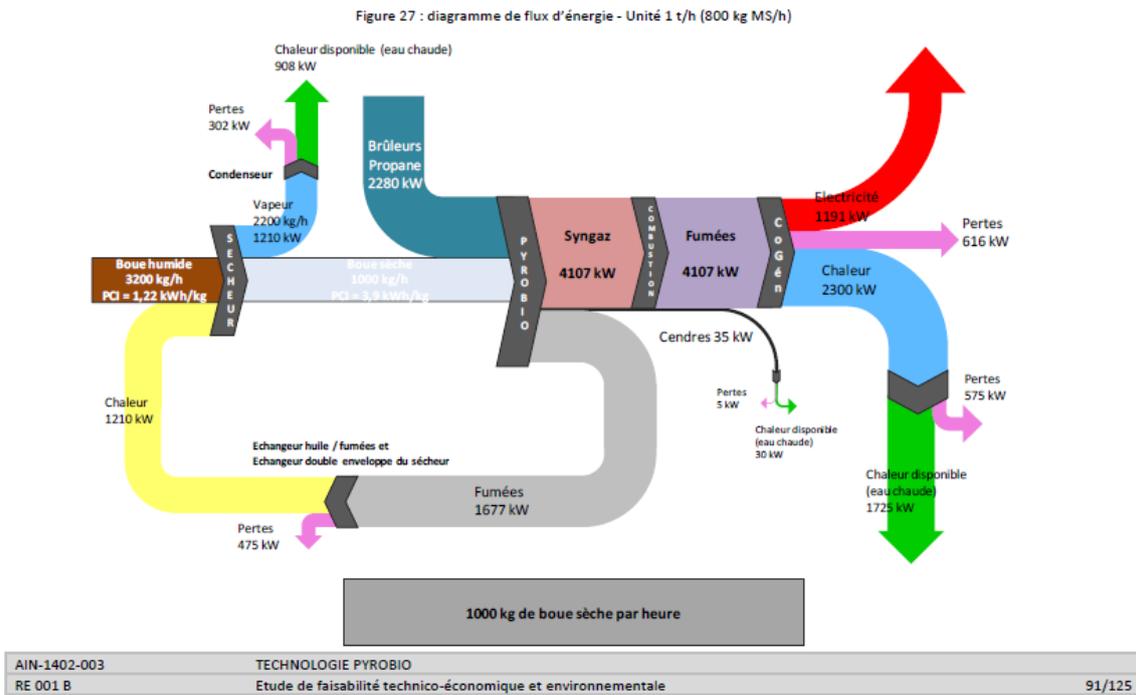


Figure 8 : Flux d'énergie sur le site de Fismes (A3i)

L'énergie fatale disponible à la combustion du propane pour chauffer les billes d'acier permettant la pyrolyse est réutilisée par la valorisation des fumées dont les calories permettent le séchage des boues humides entrantes.

Bibliographie :

http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/joe_20150818_0189_0001_1_-2.pdf

http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2010.334.01.0017.01.FRA

<http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000027995928&categorieLien=id>

http://www.amorce.asso.fr/media/filer_public/86/a6/86a61c3a-c107-4611-b27a-fc1a5b3bde2e/dj13_cadre_juridique_boues_step_.pdf

<http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/Gaf14p107.pdf>

http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/15147_strategie-bas-carbone_4p_def_light.pdf

<http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/enquete-collecte-dechets-service-public-2011.pdf>

<http://www.cd2e.com/node/286>

http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/chiffres-cles-dechets-201507_8500.pdf

https://www.agroparistech.fr/IMG/pdf/Bouallegue_vf.pdf

http://www.gd-maroc.info/fileadmin/user_files/pdf/Etudes/SMQ-AF_EvaluationduGisement-min.pdf

http://www.presse.ademe.fr/files/avis_ademe_incineration_2012.pdf

<http://www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/014000625.pdf>

Annexe 1 : valorisation énergétique par type de déchets (source Finaxo)

BIOMASSE	PRODUCTION D'ENERGIE THERMIQUE	EQUIVALENT GAZ GRONING	EQUIVALENT FUEL
1 t de bois (15 % d'eau)	3 800 KWH	380 Nm3	333 Litres
1 t de papier / carton	4 100 KWH	421 Nm3	369 Litres
1 t de pneus	6 750 KWH	1 000 Nm3	880 Litres
1 t de boues sèches	3 280 KWH	252 Nm3	220 Litres
1 t de vinasse (40 % d'eau)	1 420 KWH	125 Nm3	110 Litres

Annexe 2 : La récupération d'énergie, Conseil général des Mines

Biomasse	Production énergie thermique incinération
1 t de papier sec	4000 kWh
1 t carton sec	4410 kWh

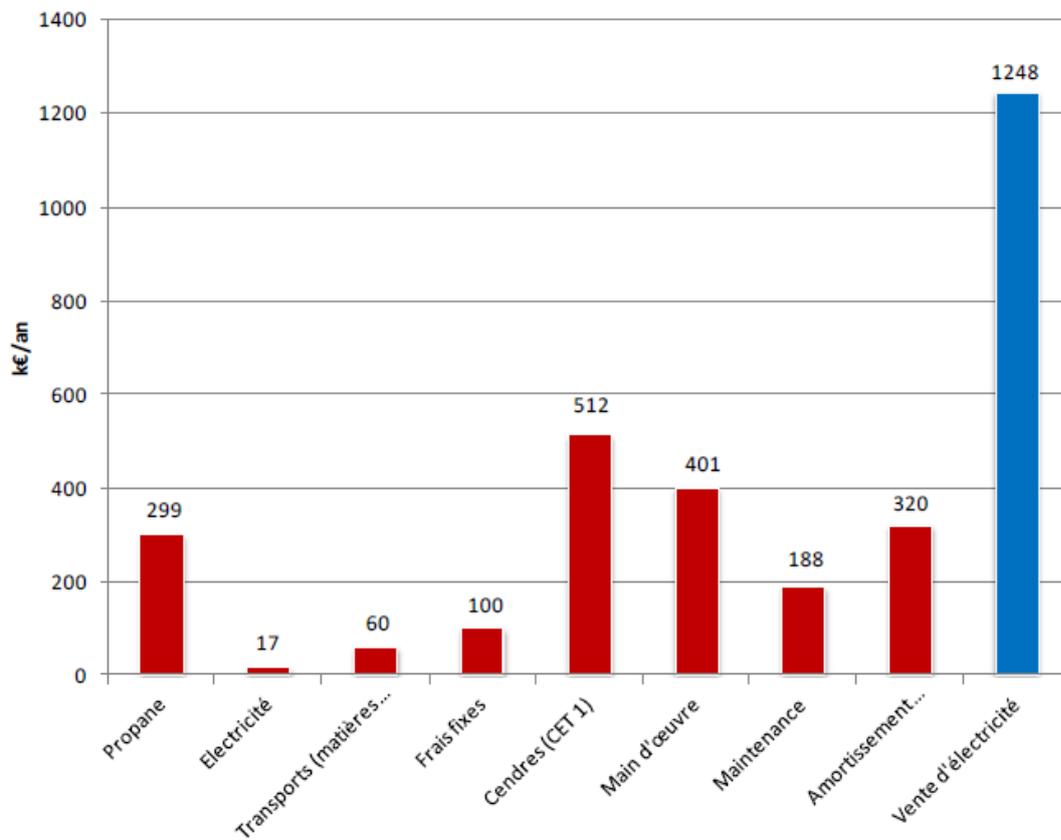
Annexe 3 : Composition des fumées émises sur le site de Fismes (Laboratoire LCES, Rapport AEI)

Compo fumée			Emission			
Compartment	[air/low population density]	mg/Nm3 de fumées	Electricité		Chaleur	
			kg alloué à élec/Nm3 syngaz	kg/kWh	kg alloué à chal/Nm3 syngaz	kg/MJ
Carbon dioxide, biogenic	CO ₂	1,23E+05	2,10E-01	1,300E-01	6,73E-02	6,138E-03
Carbon monoxide, biogenic	CO	3,875	6,64E-06	4,109E-06	2,13E-06	1,941E-07
Methane, biogenic	CH ₄	0,350	6,00E-07	3,712E-07	1,92E-07	1,753E-08
NM VOC, non-methane volatile organic compounds	COV	7,550	1,29E-05	8,007E-06	4,14E-06	3,781E-07
Nitrogen oxides	NO _x	283,500	4,86E-04	3,006E-04	1,56E-04	1,420E-05
Particulates, <2.5 µm	poussières	1,003	1,72E-06	1,063E-06	5,50E-07	5,020E-08
Vanadium	V	0,004	7,59E-09	4,698E-09	2,43E-09	2,218E-10
Chromium	Cr	0,047	8,04E-08	4,971E-08	2,57E-08	2,348E-09
Manganese	Mn	0,131	2,25E-07	1,394E-07	7,21E-08	6,581E-09
Cobalt	Co	0,004	7,59E-09	4,698E-09	2,43E-09	2,218E-10
Nickel	Ni	0,010	1,78E-08	1,100E-08	5,69E-09	5,196E-10
Copper	Cu	0,032	5,53E-08	3,418E-08	1,77E-08	1,614E-09
Arsenic	As	0,002	3,96E-09	2,452E-09	1,27E-09	1,158E-10
Cadmium	Cd	0,005	9,18E-09	5,680E-09	2,94E-09	2,682E-10
Antimony	Sb	0,004	7,59E-09	4,698E-09	2,43E-09	2,218E-10
Thallium	Tl	0,004	7,59E-09	4,698E-09	2,43E-09	2,218E-10
Lead	Pb	0,020	3,45E-08	2,137E-08	1,11E-08	1,009E-09
Mercury	Hg	0,020	3,51E-08	2,173E-08	1,12E-08	1,026E-09
Hydrogen fluoride	HF	0,475	8,14E-07	5,037E-07	2,61E-07	2,379E-08
Sulfure dioxide	SO ₂	14,175	2,43E-05	1,503E-05	7,78E-06	7,099E-07
Hydrogen chloride	HCl	1,675	2,87E-06	1,776E-06	9,19E-07	8,388E-08
Ammonia	NH ₃	2,325	3,99E-06	2,466E-06	1,28E-06	1,164E-07
Hydrocarbons, aromatic	Fluoranthène	0,825	1,41E-06	8,749E-07	4,53E-07	4,131E-08
Hydrocarbons, aromatic	Benzo(B)fluoranthène	0,078	1,33E-07	8,219E-08	4,25E-08	3,881E-09
Benzo(a)pyrene	Benzo(A)pyrène	0,028	4,71E-08	2,916E-08	1,51E-08	1,377E-09
Dioxins, measured as 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxins	Dioxines (PCDD) et Furanes (PCDF)	0,000	4,29E-11	2,651E-11	1,37E-11	1,252E-12

Annexe 4 : Composition des cendres, site de Fismes

Elément	Quantité (mg/kg)	Seuil épandage (mg/kg)	d'autorisation
V	31,66		
Cr	477,00		
Mn	502,15		200
Co	17,18		
Ni	538,63		3000
Cu	1060,30		
Zn	1791,75		
As	3,43		20
Se	5,96		
Cd	4,16		
Sn	44,77		
Sb	1,18		
Te	0,07		800
Tl	0,00		10
Pb	157,88		
Hg	0,10		4000
V	31,66		

Annexe 5: Coûts et gain de Pyrobio sur le site de Fismes (A3i)



Green Cross France et Territoires

33 rue Chaptal, 92300 Levallois-Perret
contact@gcft.fr – <http://www.gcft.fr>

