



ETUDE N° 07-0418/1A

SYNTHESE / EXTENDED ABSTRACT
FRANÇAIS / ENGLISH

**FREINS ET DEVELOPPEMENTS DE LA FILIERE BIOGAZ :
LES BESOINS EN RECHERCHE ET DEVELOPPEMENT**

**LIMITS TO BIOGAS TECHNOLOGY :
PROSPECTIVE FOR THE R&D**

décembre 2009

P. BUFFIERE, R. BAYARD, P. GERMAIN - LGCIE – INSA de Lyon

Créée en 1989 à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD – REseau COopératif de Recherche sur les Déchets – est le fruit d'une triple coopération entre industriels, pouvoirs publics et chercheurs. L'objectif principal de RECORD est le financement et la réalisation d'études et de recherches dans le domaine des déchets et des pollutions industrielles. Les membres de ce réseau (groupes industriels et organismes publics) définissent collégalement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

- ✓ En Bibliographie, le document dont est issue cette synthèse sera cité sous la référence :
RECORD, Freins et développements de la filière biogaz : les besoins en recherche et développement, 2009, 134 p, n°07-0418/1A.

- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)
www.ademe.fr

RESUME

Les freins au développement de la filière biogaz ont été étudiés en vue de dresser des perspectives de Recherche et Développement. Cette étude est basée d'une part, sur une analyse bibliographique et d'autre part sur une enquête auprès des acteurs de la filière. Les principaux axes de recherche prioritaires peuvent être répartis en trois catégories :

- Ceux qui sont bien couverts (ce qui ne signifie pas forcément qu'ils sont bien connus) par l'offre de R&D : caractérisation des gisements de matière organique et des digestats, mécanismes fondamentaux de la méthanisation, modélisation ;
- Ceux qui sont couverts mais dont l'effort de recherche pourrait être mieux coordonné : instrumentation des procédés, préparation de la charge, prétraitements.
- Ceux qui sont très peu couverts par l'offre de R&D : la **valorisation du biogaz** (volet analytique, volet purification, et développement des piles à combustibles), les aspects **mécaniques**, le **mélange et la rhéologie** (digestion des solides) et les **transferts couplés** (pour le stockage et la méthanisation par voie sèche).

D'autres besoins sont également identifiés sur les aspects sociaux et la sécurité des installations. De manière générale, il existe une demande importante pour des sites expérimentaux en vraie grandeur.

MOTS CLES

biogaz, recherche, énergie, valorisation, procédés, stockage.

SUMMARY

Perspectives of Research and Development on biogas have been identified based on an analysis of the scientific and technological limits. This study is based on two pillars: bibliography analysis and enquiry among experts and actors of the biogas world. The most urgent research orientations that have been identified can be distributed in three categories:

- Research topics well covered by the R&D: organic matter characterization, fundamentals of anaerobic digestion mechanisms.
- Research topics that could receive more attention by a better coordination between the research centers: process instrumentation, solid waste pretreatments.
- Research topics that are poorly studied: energy from biogas (analytical problems, biogas purification, fuel cells), mechanical problems, mixing and rheology (especially for waste digestion), hydraulic and mass transfer (especially for landfilling and dry digestion).

Other requirements have been identified: social aspects and process safety. The need for full size experimental investigations is also clearly expressed.

KEY WORDS

biogas, research, energy, valorization, processes, landfilling.

INTRODUCTION

Cette étude a pour objet d'identifier les freins au développement de la filière biogaz en termes de Recherche et Développement. Il s'agit d'identifier les points forts et les points faibles de la filière, et de tenter de voir si les réponses venant des centres de recherche permettent de répondre aux besoins des acteurs et aux questions qui se posent au niveau du terrain. Sous le terme de « filière biogaz », nous retrouvons tous les processus créés par l'homme et qui permettent de générer du biogaz valorisable du point de vue de l'énergie :

- Processus et procédés de traitement d'effluents liquides et de boues ;
- Processus et procédés de traitement des résidus et produits organiques solides ;
- Centres de stockage (Installation de stockage de déchets non dangereux, ISDND).

PORTEE ET LIMITES DE L'ETUDE

La méthode utilisée pour réaliser cette étude est basée sur deux approches :

Une **étude bibliographique**, que nous avons organisée selon la filière, depuis la matière première (le gisement de déchets et produits organiques mobilisables en méthanisation), les procédés et les centres de stockage, les modes de valorisation du biogaz, sans oublier les sous-produits de la filière.

Une **enquête auprès des acteurs de terrain** via un questionnaire unique. Elle s'est déroulée au printemps 2009 selon le protocole suivant :

- Elaboration d'un guide d'entretiens (questionnaire) ;
- Constitution d'un panel d'experts / personnes interrogées ;
- Contacts téléphoniques ou directs auprès des personnes concernées ;
- Dépouillement de l'enquête et résultats.

Le panel d'expert comprend initialement 47 personnes :

- 29 Industriels : centres de recherche (11), bureaux d'étude (5), exploitants (8), fournisseurs d'équipements (5).
- 18 académiques / collectivités / associations se répartissant de la manière suivante : recherche publique (10), collectivités (2), institutionnels (5), association (1).

Toute catégorie confondue, nous avons recueilli 28 réponses sur 47 personnes contactées, soit un taux de participation de 60% environ. Sauf quelques exceptions, la majorité des entretiens ont été réalisés par téléphone. La durée d'un entretien est de l'ordre de 60 minutes.

En préambule à cette synthèse, nous souhaitons alerter le lecteur sur les biais de méthode et les limites inhérentes à notre démarche. Ils sont de notre point de vue au nombre de 4 :

- Le problème de la **non-exhaustivité**, qui se pose au niveau de l'analyse bibliographique : le nombre de publications techniques et scientifiques est considérable (concernant les publications liées au biogaz, Google Scholar™ donne 2900 réponses en 2006, 6110 en 2007, 4900 en 2008 et près de 2400 pour les 3 premiers trimestres de 2009). Il est techniquement impossible de prendre connaissance de l'ensemble de ces données scientifiques, c'est pourquoi l'analyse bibliographique est passée au crible de critères relevant plutôt de la subjectivité des auteurs (intérêt, originalité, curiosité). Globalement donc, notre étude comporte 215 références bibliographiques, ce qui est sans doute encore beaucoup trop.

- Le problème de la **représentativité du panel d'experts** consultés dans le cadre de l'enquête : ce panel, forcément de faible taille, était initialement constitué pour donner un aperçu assez complet des acteurs de la filière. Cependant, le taux de réponse de 60% a engendré un biais dans cet équilibre.

- Le problème de la **subjectivité des auteurs**, qui se pose tout au long de l'étude, et qui, malgré toute l'attention que nous avons portée à en limiter les effets (en nous efforçant par exemple de bannir toute interprétation excessive), aura pu nous entraîner vers des choix méthodologiques forcément incomplets.

- La **forte imbrication** des champs **sociaux**, **environnementaux**, **économiques** et **scientifiques** dans le cadre particulier de cette étude rend souvent difficile l'interprétation des réponses des acteurs de la filière. S'agit-il pour les personnes interrogées de freins au développement d'ordre technique seulement, ou plutôt liés à la réglementation, ou, plus simplement, à un manque d'information et de diffusion de la culture scientifique ?

ADEQUATION ENTRE RECHERCHE ET BESOINS

L'analyse bibliographique est structurée autour de 5 volets dans le rapport :

- Les fondamentaux de la méthanisation : processus microbiens.
- Les « matières premières » permettant de produire du biogaz : nature, caractérisation, mode de conversion en méthane,
- La valorisation énergétique : comment produire de l'énergie à partir du biogaz.
- Les procédés ;
- Les sous-produits.

Cette analyse nous a permis de dégager les principaux axes de recherche qui sont traités dans le monde, ainsi que les perspectives envisagées. Nous mettons ici en parallèle à ces axes les besoins en recherche identifiés à partir de l'enquête auprès des acteurs de la filière.

1. Les processus microbiens de la méthanisation

➤ *La recherche dans le domaine*

La bibliographie est très documentée sur des sujets liés à la connaissance des **mécanismes biologiques fondamentaux** de la méthanisation, ainsi qu'au développement de la **modélisation mathématique des processus microbiens**. Une illustration de ces recherches est la mise en place par le groupe de travail spécialisé sur la digestion anaérobie de l'IWA (International Water Association) du premier modèle de connaissance sur la digestion anaérobie (anaerobic digestion model 1, **ADM1**) en 2002. Cependant, de nombreux domaines fondamentaux sont encore à l'étude, notamment pour ce qui concerne les **communautés microbiennes** de la digestion anaérobie (connaissance, nature et fonction des micro-organismes, mode d'organisation de ces communautés). Sur un autre registre, le **contrôle thermodynamique de certaines réactions biochimiques** (notamment la dégradation des acides gras à longue chaîne issus de l'hydrolyse des graisses) constitue également un champ de recherches ouvert. Citons également la production de **bio-hydrogène**, qui est un axe actuel fort.

La communauté scientifique mondiale est fortement structurée autour de ces thématiques, et l'offre de recherche est assez étendue.

➤ *Les besoins en recherche*

L'enquête révèle que du point de vue des utilisateurs de la méthanisation, les aspects fondamentaux n'arrivent pas dans les axes prioritaires. Le compartiment biologique des procédés est réputé « s'adapter » aux conditions opératoires. Cependant, les mécanismes de la digestion anaérobie sont particulièrement complexes et, parmi les dysfonctionnements observés sur certaines installations, certains ont certainement pour origine un problème biologique. De ce point de vue donc, la nécessité de la recherche dans le domaine n'est pas remise en cause.

Parmi le panel interrogé peu de personnes mentionnent un intérêt pour la production de bio-hydrogène par digestion anaérobie.

2. Le gisement : connaissance et exploitation

➤ *La recherche dans le domaine*

La **caractérisation de la matière organique** est très liée à la connaissance des mécanismes biologiques fondamentaux de la méthanisation, mais constitue un champ de recherches à part dans la mesure où ces études débouchent, d'un point de vue opérationnel, sur des applications diverses :

- Analyse de la biodégradabilité et potentiel énergétique des gisements ;
- Méthodologie de suivi de la dégradation ;
- Co-digestion ;

Sur ces 3 points, la communauté scientifique mondiale est fortement structurée, et l'offre de recherche est assez étendue.

Les études portant sur les **prétraitements** sont un peu moins nombreuses, en partie parce qu'elles sont souvent déconnectées de l'analyse fine de la matière organique. Il semble cependant que les deux aspects soient amenés à converger dans les années à venir. Ce sujet ouvre donc de larges perspectives dans le domaine des déchets solides, et la thématique de la préparation de la charge émerge comme une préoccupation importante.

➤ *Les besoins en recherche*

Le thème de la **caractérisation des gisements** est identifié comme **prioritaire**, en particulier au niveau des besoins en standardisation de protocoles d'essais (tests de biodégradabilité type BMP,

mesures de DCO sur solides). Ce domaine est reconnu cependant comme bien couvert par l'offre de R&D.

Le thème des **prétraitements**, qui recouvre aussi bien les mécanismes de l'hydrolyse des déchets que les **dispositifs mécaniques**, est moins bien couvert, et recueille également un caractère prioritaire dans l'enquête.

3. Production de biogaz : réacteurs et centres de stockage

➤ *La recherche dans le domaine*

Les sujets liés à la **mise en œuvre de la méthanisation** sont assez nombreux. Les années 90 ont été émaillées par le développement des techniques de contrôle avancé des procédés, et par une large diffusion de la modélisation mathématique. Aujourd'hui, le modèle ADM1 constitue la base de travail et la synthèse des connaissances sur le domaine. Il semble aujourd'hui que les applications de ces techniques soient encore **limitées par l'instrumentation et les capteurs**, et seules quelques équipes abordent ces sujets.

Dans les procédés de traitement de déchets solides ou dans les centres de stockage, l'étude des **transferts couplés** (écoulements en milieu poreux ou en milieu hétérogène polyphasique), ainsi que les problèmes de **rhéologie** apparaissent comme des perspectives incontournables pour les recherches de demain. Ici encore, la mise en œuvre de ces recherches est limitée par la disponibilité d'instruments fiables et adaptés.

➤ *Les besoins en recherche*

Beaucoup de besoins en recherche sont exprimés sur le thème du **stockage**, notamment au niveau de la préparation de la charge et des prétraitements, et sur les approches de caractérisation physique des alvéoles (écoulements, transferts hydriques). Même si des compétences sont reconnues au niveau de l'offre de R&D, la majorité des acteurs s'accordent pour exprimer **un besoin urgent de sites pilotes** pour de l'expérimentation en vraie grandeur.

La méthanisation en réacteur est un domaine bien couvert pour les effluents liquides, mais de nombreux besoins émergent au niveau de la **digestion des solides**, en particuliers sur les aspects **mélange et rhéologie**, mais aussi sur **l'instrumentation et la modélisation**. La **co-digestion** (et en particulier la caractérisation des co-substrats et le problème des **graisses**) est un domaine où des besoins sont clairement exprimés.

4. Produire de l'énergie à partir du biogaz

➤ *La recherche dans le domaine*

Dans le domaine de la **valorisation du biogaz**, les études spécifiques sont beaucoup moins nombreuses. Parmi les nombreuses thématiques associées à ce sujet, nous relevons d'une part le **mode de valorisation** (chaleur, électricité, injection réseau, carburant pour véhicule, pile à combustible) qui entraîne dans chaque cas des filières d'épuration différentes. De nombreux procédés commerciaux sont proposés pour répondre aux exigences requises en termes de pureté, en liaison avec le type de valorisation envisagée. Nous ne trouvons que très peu de **recherche spécifique sur le biogaz** pour les techniques d'épuration, car les systèmes mis en œuvre sont généralement non spécifiques. D'autre part, de nombreux problèmes analytiques subsistent pour la détection des éléments mineurs.

➤ *Les besoins en recherche*

Le thème de la **valorisation du biogaz** est sans aucun doute celui pour lequel l'offre de R&D est considérée comme presque inexistante. Ces besoins se font en effet sentir à plusieurs niveaux :

- Au niveau **analytique** tout d'abord : quantification des composés traces via des indicateurs globaux (présence de composés siliciés, halogénés, sulfurés,...).
- Au niveau de la **purification** avant valorisation ensuite, domaine dans lequel les acteurs interrogés se montrent très démunis au niveau des choix techniques « clés en main » qui leur sont proposés, à partir de techniques qu'ils estiment non adaptées (et généralement trop coûteuses) à la spécificité du biogaz.
- Le développement de nouvelles techniques de valorisation, telles que les piles à combustibles, est également un besoin assez récurrent et également peu couvert en recherche.

5. Les sous-produits de la filière biogaz

➤ *La recherche dans le domaine*

En tant que tels, les sous produits liquides issus de la filière biogaz sont relativement bien caractérisés. Ils représentent de plus des flux relativement limités. Les principales questions liées à leur gestion (qu'il s'agisse de traitement ou de valorisation) sont associées à des aspects réglementaires ou juridiques. En particulier, la question de leur réutilisation (directe ou non) en agriculture nécessite de préciser le cadre juridique (normes, valeurs limites de certains composés, etc.).

Concernant les sous-produits solides (digestats), dès lors que la question du retour au sol (et donc de la valorisation matière) est abordée, le digestat devient un produit et non plus un déchet. Il existe ici une contradiction dans la forme du point de vue réglementaire, mais également pour le citoyen.

En termes de recherche, la question de l'innocuité des digestats est prégnante : on demande avant tout qu'un digestat ne soit pas potentiellement dangereux lorsqu'il est épandu. Il semble cependant que la caractérisation des digestats comme produit intéressant du point de vue agronomique soit également d'actualité : il ne suffit pas en effet que le produit soit compatible, il est également intéressant qu'il ait des atouts.

Ici encore, et à l'instar des sous produits liquides, la gestion des digestats est à la fois une question de connaissance des produits (composition, innocuité, valeur agronomique), mais également une question d'ordre social et une question d'image. Les perspectives (ou besoins en recherche) relèvent donc davantage de choix politiques et réglementaires.

➤ *Les besoins en recherche*

La gestion des **sous-produits liquides** (type lixivats) n'évoque pas de besoins urgents, mais plutôt des besoins récurrents sur les modes de traitement et d'élimination. Des clarifications sont requises en particulier au niveau de la valorisation et de la réutilisation comme fertilisant : définition de seuils au niveau des micropolluants organiques et métalliques, en particulier. Les recherches sur la précipitation de la struvite sont également considérées avec bienveillance.

La question des **digestats** est très souvent reliée à des problèmes d'ordre réglementaires ou sociaux, et n'appelle pas à proprement parler à développer de nouvelles compétences en recherche, mais plutôt un effort en terme de qualification de ces produits.

6. Structuration de la communauté scientifique

Dans le domaine du biogaz, la recherche s'organise surtout autour de la communauté scientifique issue du traitement des eaux (IWA), et de celle, moins abondante, du monde des déchets (ISWA, IWWG). Ces deux « mondes » sont très souvent disjoints, et ne se rencontrent qu'en de rares occasions.

La communauté IWA fédère des centres de recherche organisés autour de l'approche « bioprocédé », et présente des compétences dans le domaine de la caractérisation, de la mise en œuvre et du suivi des méthaniseurs. Elle manque cependant cruellement de compétences sur les aspects « mécaniques » au sens très large, qu'il s'agisse de système de prétraitement des déchets, d'analyse des écoulements et du mélange.

Les communautés issues des déchets fédèrent des compétences sur la gestion des centres de stockage, et intègrent sans doute davantage de mécaniciens, bien que, nous l'avons vu, les aspects liés aux écoulements soient largement moins bien traités que les aspects concernant les phénomènes se produisant à une échelle locale.

Il est à noter qu'aucune de ces communautés scientifiques ne s'est ouverte à la question de la valorisation du biogaz.

LES FREINS AU DEVELOPPEMENT DE LA FILIERE BIOGAZ

L'analyse qualitative des réponses a permis d'identifier quelques freins au développement de la filière biogaz, et de lister quelques pistes pour les recherches à venir.

➤ **Freins au développement non liés à des questions techniques**

- Economie et rentabilité des projets : les raisons identifiées sont principalement liées à des effets d'échelle (rapport coût / taille des installations) ou à des défauts de conception qui sont surtout dus au non-respect des cahiers des charges concernant la qualité des déchets.
- Freins réglementaires : le biogaz n'est pas une filière reconnue au niveau de la réglementation, et les installations sont régies par des codes souvent contradictoires.
- Utilisation du biogaz : les choix sont encore difficiles à faire, il existe très peu d'outils d'aide à la décision.
- Collecte et nature du gisement : très souvent, la collecte sélective est moins efficace que prévue, de nombreux contaminants (verre, métaux) sont présents dans les déchets et impactent directement sur la bonne marche des installations (surcoûts en exploitation).
- Mode de gestion des installations : ils peuvent être liés ou bien à l'inadéquation des procédés avec les déchets traités, ou bien à la méconnaissance de technologies nouvelles de la part d'exploitants peu formés.

Résumé des principaux freins au développement « non techniques »

Nature	Détail
Economie et rentabilité des installations	Coûts d'exploitation (qualité du tri), débouchés énergétiques (chaleur, électricité, carburant), valorisation matière (digestats)
Obstacles réglementaires	Lourdeur des procédures administratives, filière non reconnue par l'administration, statut du digestat, injection biogaz dans réseau
Utilisation du biogaz	Choix du mode de valorisation, tarifs de rachat, gestion prévisionnelle de la production
Gisement	Logistique et efficacité de la collecte, fluctuations saisonnières, pérennité des gisements
Obstacles sociaux et sociétaux	Organisation de la collecte sélective, implantation des installations, statut du digestat
Mode de gestion des installations	Inadaptation du procédé au produit traité, formation des personnels exploitants

➤ **Freins au développement d'ordre technique**

- Les problèmes de conception : non-conformité des intrants, adaptation des chaînes de tri requises, positionnement de l'installation de méthanisation dans la filière, conception des alvéoles de stockage (infiltration d'eau pluviale, entrées d'air, fuites et émissions furtives de biogaz).
- Les problèmes d'exploitation : problèmes mécaniques, préparation de la charge, odeurs, moussage, graisses, problèmes de sécurité des installations.

➤ **Les problèmes techniques pouvant faire l'objet d'actions de R&D**

- La préparation de la charge et les prétraitements ;
- Les problèmes mécaniques et les problèmes de mélange dans les digesteurs ;
- La valorisation du biogaz (traitement des impuretés, régulation de la qualité, développement de nouvelles techniques de valorisation) ;
- L'instrumentation et la modélisation ;
- La valorisation des digestats.

Principales questions de recherche identifiées auprès des acteurs de la filière

Préparation de la charge	Prétraitements
Caractérisation du gisement	Prévision du comportement
Problèmes mécaniques et mélanges en voie sèche	Systèmes mécaniques inadaptés, méconnaissance des milieux de digestion sèche, rhéologie
Valorisation du biogaz	Développement de techniques robustes, plus adaptées et moins coûteuses
Instrumentation	Capteurs et indicateurs pour le suivi et la gestion
Valorisation du digestat	Innocuité, valeur agronomique

CONCLUSION : LES AXES PRIORITAIRES EN R&D

D'un point de vue global, l'offre en R&D est jugée plutôt dynamique, que ce soit à l'échelle française ou européenne. Cependant, pour la partie française les compétences sont apparemment très morcelées, et se recoupent assez systématiquement sur certains domaines, comme la microbiologie et l'étude des transformations biochimiques. Dans certains cas, les approches développées dans les laboratoires publics sont jugées trop « pointues » et éloignées du terrain. Il est intéressant de noter que la connaissance des **mécanismes biologiques** fondamentaux n'est pas un domaine jugé prioritaire dans l'enquête, bien que, implicitement, cette connaissance soit souvent incontournable.

Si nous considérons les domaines de recherche plus précisément, les aspects prioritaires qui sont les mieux couverts par l'offre de R&D sont les domaines liés à la **caractérisation** et à la **valorisation** du digestat.

Les domaines mal couverts par la recherche sont surtout ceux de la **valorisation du biogaz**, et les **aspects mécaniques / mélange**. La quasi-totalité des personnes interrogées sont incapables de mentionner des laboratoires ou des centres de recherche compétents dans ces domaines. Le pendant est noté pour les centres de stockage, où des manques importants se font sentir dans le domaine de la compréhension des **écoulements réactifs** en milieu insaturés.

Concernant le volet **préparation de la charge / prétraitement**, il semble que les compétences soient partiellement disponibles, mais sans doute mal mobilisées autour de questions trop ponctuelles. Nombre de personnes interrogées s'étonnent de la multitude d'études sur l'influence de tel ou tel prétraitement sur le potentiel méthanogène d'un déchet, sans pour autant savoir quel est le compartiment de la matière organique qui est rendu plus accessible par le prétraitement étudié.

Il est également souligné des manques en termes de recherche « industrielle », c'est-à-dire sur des dispositifs réels, en particulier au niveau du **stockage**. Un certain nombre de personnes émettent l'idée de **plateforme de recherche** sur des **sites réels** dans le domaine. Ces idées trouvent également un écho dans le domaine des réacteurs de méthanisation, davantage pour l'évaluation des techniques de traitement et le test de différents systèmes mécaniques à petite échelle.

Adéquation de l'offre de R&D aux besoins exprimés

Questions de recherche	Offre abondante	Offre adaptée	Offre insuffisante	Offre inexistante
Préparation de la charge			x	
Caractérisation du gisement		x		
Problèmes mécaniques				x
Mélange (voie sèche)			x	
Transferts hydriques (stockage)			x	
Valorisation biogaz				x
Instrumentation			x	
Mécanismes biologiques	x			
Analyse énergétique			x	
Aspects sociaux				x
Valorisation du digestat		x		
Sécurité			x	

INTRODUCTION

The objective of this work is to identify the limits to the development of biogas technologies in terms of R&D. Scientific and technological strengths and weaknesses have been analyzed and compared to the answers given by the research centers, in order to check the adequation between research and field problems. What we call “biogas technology” covers all processes created by man to produce biogas that can be used for energy production:

- Anaerobic processes for wastewater and sludge treatment;
- Anaerobic processes for solid waste treatment;
- Landfills.

LIMITS OF THE WORK – NOTICE TO THE READER

The methodology used for our work is based on two aspects:

Bibliography analysis: this part of the work has been organized from the origin of the organic matter (the “pool” of biodegradable waste that can be used to produce methane) to the biogas processes (including landfills), the production of energy from biogas, and the management of the by-products associated to biogas technologies.

Enquiry: several experts of biogas have been asked to answer a questionnaire. This has been done during the spring 2009 according to the following procedure:

- Elaboration of the questionnaire ;
- Constitution of a panel (experts) ;
- Phone calls or direct contacts with the experts.
- Analysis of answers.

47 people have been contacted:

- 29 from industry: research centers (11), consulting engineers (5), operators (8), suppliers (5).
- 18 from university / municipalities / associations among which: public research (10), municipalities (2), institutions (5), association (1).

We have obtained 28 answers on 47 people (around 60% participants). With few exceptions, the majority of the interviews have been done by phone. The average duration of a phone call is 60 minutes.

Before the presentation of the results, we wish to warn the readers on the compulsory biases and limits to our conclusions. We have identified 4 of them:

- The problem of **coverage** that arises from the bibliography analysis. The number of technical publications on biogas is incredibly high (the answers given by Google Scholar™ are 2900 occurrences in 2006, 6110 in 2007, 4900 in 2008 et around 2400 pour les 9 first month in 2009). It is technically impossible to read all of them. This is why only a limited number of publications have been selected for our study (around 215 references, which is still high). The criteria for this selection are mostly based on the authors subjectivity: originality of the work, interest, curiosity.

- The **representative character** of the experts: the panel is limited in number. It was at first constituted to give a broad overview of all the actors in the field. The limited number of answers has probably generated a bias

- The **subjectivité of the authors**, which is a recurrent point. Despite of our efforts to prevent any personal or excessive interpretation, we may have favoured some methodological options.

- The extreme interconnexion between the different fields (**sociology, environment, economy, science**) in this study makes sometimes difficult to understand the answers given, in the way that some answers reveals only technical or scientific problems, while others reveal obstacles associated to the law, or only a lack of information and diffusion of the scientific knowledge.

COMPARISON BETWEEN RESEARCH AND RESEARCH REQUIREMENTS

The bibliography is organized around 5 items in the final report:

- The fundamentals of anaerobic digestion;
- The analysis, characterization, and mode of degradation of complex organic matter;
- The processes for biogas production;
- The production of energy from biogas;
- The management of by-products (leachate and digested solids).

This analysis enables us to select the most important research topics that are under study through the world, together with the associated research perspectives. In the present abstract, we compare the main conclusions of this analysis with the research requirements identified during the enquiry among the actors of the biogas world.

1. Fundamentals of anaerobic digestion

➤ *Ongoing research*

The bibliography is well documented on **fundamentals of biological mechanisms** in anaerobic digestion and on the **modeling of microbial processes**. The elaboration of the 1st anaerobic digestion model (ADM1) in 2002 by the IWA dedicated specialized group illustrate this dynamism.

Many other fundamentals aspects are still under study:

- Fundamentals of anaerobic digestion **microbial communities**: description, nature, function, mode of organization of such communities.
- The **thermodynamic control of some biochemical reaction** (such as the degradation of fatty acids by syntrophic bacteria).
- The production of **biohydrogen** by anaerobic digestion.

The scientific community is extensively structured around those topics and the « offer » for research is vaste.

➤ *Research needs*

The enquiry reveals that fundamentals of anaerobic digestion do not constitute the main field of needed research. It is generally considered that the biological compartment is self-adapting to the operational conditions. Nevertheless, since anaerobic digestion mechanisms are complex, some operational problem might have a biological origin. The majority of people thus consider that basic research in the field is still required.

Among the people that answered the questionnaire, very few of them are mentioning the production of biohydrogen by anaerobic digestion as an important field.

2. Resource : knowledge and use

➤ *Ongoing research*

The **characterization of organic matter** is often associated to anaerobic digestion fundamentals. It constitutes an important field of research by itself since it opens to very practical applications :

- Biodegradability / methane potential
- Methodology for the follow up of the degradation
- Codigestion

On these 3 aspects, the scientific community is strong and well structured.

The ongoing research on pretreatments seams less developed and is generally disconnected from organic matter characterization. These two aspects will probably converge in a near future, and this subject opens wide perspectives for research in the field of biological treatment of solid wastes.

➤ *Research needs*

The **characterization** of the resource is considered as a major research topic, especially for the problems of standadization of current laboratory practices (biodegradability assessment, biochemical methane potential, COD on solids). This domain is recognized as “well covered” by academic research.

Concerning the **pretreatments** (which includes hydrolysis mechanisms and mechanical devices), the research appears to be weak compared to the identified needs.

3. Biogas production in reactors and landfills

➤ *Ongoing research*

Topics associated to the operation of anaerobic digestion processes are quite numerous. During the 90's, an important research potential has been dedicated to advanced process control and automation. The research today is mostly based on the ADM1. Nevertheless, many applications of advanced control are still limited by the **instrumentation** (especially **sensors**), and very few research teams are active in the field.

In solid waste treatment processes and landfills, the analysis of multiple transfer phenomena (hydrodynamics of porous media, mass transfer in heterogeneous media, multiphase flow) together with rheological problems emerge as hot topics for the research of tomorrow. Here again, the development of these topics are still limited by the availability of adequate instruments.

➤ *Research needs*

Many research requirements are cited in **landfilling application: pretreatments, characterization of hydrodynamics and water transfers**. Even if expert teams are recognized in this field, the majority of people express an urgent need for pilot sites in full size.

Biomethanization (waste digestion in a reactor) is a well covered topic in the field of wastewater and sludge treatment. Nevertheless, it is recognized that many aspects of waste digestion are not enough studied, especially **hydrodynamics** (mixing), **rheology**, **instrumentation** and **modeling**. The subject of co-digestion (especially the fate of fat products) is also a field where the expectations are clearly indicated.

4. Energy from biogas

➤ *Ongoing research*

Making energy out of biogas is not a well-covered theme. Among the numerous aspects associated to this general subject, the possibilities for energy production are wide (heat, electricity, grid injection, fuel for vehicles, fuel cells). This implies for each case different strategies for **biogas treatment and purification**.

Many commercial processes are proposed to answer the specification associated to the mode of energy chosen. Despite of that, there is very few research specifically dedicated to biogas since the solutions proposed are non specific (usually adapted from existing process for natural gas treatments). In addition, many analytical problems subsist for the detection of minor components.

➤ *Research needs*

The large majority of people consider that the research in this field is close to nothing. Many requirements are expressed at several levels:

- **Analyticals**: quantification of trace components through global indicators (silicated compounds, sulfur compounds...);
- **Purification**: many people feel not prepared to make a selection between different "turnkey" processes that are proposed by the suppliers, and generally consider that the commercial offer is not adapted to their specifications (especially concerning the price).
- New technologies for energy production, such as fuel cells operating with biogas, are also mentioned as current research needs.

5. Biogas end-products

➤ *Ongoing research*

Liquid end-products of biogas processes (leachate) are relatively well known. Moreover, the fluxes are rather limited. The main questions for their management (treatment or valorization) are of regulatory nature. More particularly, the question of their reuse in agriculture needs more accurate regulatory limits (standards, limit values for some components, etc.).

The status of solid end-product (digestion residues or digestates) is rather unclear as soon as the question of returning it on soil is raised: is it a waste or is it a product? The status of undigested matter requires a more accurate definition.

In terms of research, the question is to know whether the solid end-products are dangerous for the environment or not when spread on land. It seems that knowing if those products could have an interesting value for fertilization is also raised: it is probably not enough to show that it is not dangerous; it would be more interesting to show that it really makes value.

Here again, the problem has several technical aspects (composition, agronomic value) but also social and regulatory aspects. The perspectives in terms of research in this field are thus rather unclear.

➤ *Research needs*

No urgent research needs have been expressed concerning the management of **leachate** and **liquid products**, apart for recurrent needs for treatment processes. Leachate reuse for fertilizing soils needs clarification in terms of limit values for organic and metallic micro pollutants. The research on struvite precipitation is seen as interesting.

The management of **solid products** is associated to regulatory questions, and does not require new research competence. The problem is rather to find methods to qualify (or not) the products.

6. The scientific community around biogas

The most active research community around biogas comes from the International Water Association (IWA, anaerobic digestion specialized group). Other associations, like ISWA and IWWG are more concerned by landfills. These two worlds are very separate and there are very limited relations between them.

The IWA community is more focused on “bioprocesses”: organic matter characterization, design and operation of biogas reactors. It is less concerned by mechanical or pretreatment problems (including mixing and mass transfer).

ISWA and IWWG are more focused on landfill technologies and include some mechanistic approaches (hydrodynamics and transfer).

None of those communities has really developed the question of energy from biogas.

LIMITS TO BIOGAS TECHNOLOGY

The qualitative analysis of the interviews has enabled us to identify limits to the development of biogas technology, and some outlooks for future research are listed below:

➤ **Non technical limits**

- Project economy: the ratio cost/size is very important for the economy of a biogas project. Moreover, some plants have encountered problems of design generally due to a gap between the expected waste quality and the actual waste to be treated.
- Regulatory limits: biogas does not correspond to a specific activity for the regulation, and biogas plants are sometimes subject to contradictory specifications (for instance, waste treatment vs. energy production).
- Energy from biogas: the selection of the appropriate mode of energy production is still difficult for many stakeholders.
- Collection of the waste: in many cases, source sorted waste are highly contaminated with undesired compounds like glass and metals, which has a direct negative influence on the equipments.
- Operational problems: they have two main origins: non adapted equipments and lack of skills (inadequate formation of operators to such new techniques).

Non technical limits in short

Nature	Detail
Project economy	Operation cost (waste quality), energy outputs (heat, electricity, fuel), organic matter valorization
Regulation	Long administrative procedures, unclear status of biogas systems, status of solid end-products, limits to grid injection of methane from biogas
Energy from biogas	Selection of the mode of energy production, tariff of electricity from biogas, prediction of energy production
Resource	Collect efficiency, seasonal variations, resource availability
Social limits	Organization of source-sorting, finding a site for a plant
Plant management	Inadequation between the plant and the product to be treated, education of the operators

➤ **Technical limits**

- Design problems: non conformity of waste, required modification of pre-treatment equipments, positioning the digester within the plant flow sheet, design of landfills towards rainwater infiltration, air inlet, biogas leakage.
- Operating problems: mechanical sorting, pre-treatments, odors, foaming, fats, safety of the plant.

➤ **Technical limits requiring R&D**

- Pre-treatments and load preparation ;
- Mechanical and mixing problems in digesters ;
- Biogas purification and energy production (treatment of impurities, quality control, development of new energy production processes) ;
- Modeling and instrumentation ;
- Making value of solid residues.

Research questions emerging from the questionnaire

Load preparation	Pre-treatments
Characterization	Prediction of the biogas system evolution
Mechanical and mixing problems in dry digestion	Unadapted mechanical devices, ill-defined digestion media, rheology
Energy from biogas	Development of robust, adapted and cheaper technologies,
Instrumentation	Sensors and indicators for process control
Making value out of the solid	Agronomic value

CONCLUSION : THE MOST IMPORTANT R&D TOPICS

From a general point of view, the offer from the R&D is considered as rather dynamic in France and in Europe. In France, the limited number of research teams is generally considered as “too specialized” on certain questions like microbiology or biochemical transformations. In some cases, the research in these laboratories is considered as “too far from field preoccupations”. In the same time, it is interesting to note that, even if the research on **anaerobic digestion fundamentals** never appear as an important topic, many people agree with a recurrent need in this field.

Considering the research needs more in detail, the subjects with the best “fit” between needs and offer are those of **organic matter characterization** and **solid product valorization**.

On the other hand, the subjects that are not enough « covered » by the academic research concern mostly the **mechanical** and **mixing problems**, especially in dry digestion. Among all the people that have been interviewed, none is able to mention any laboratory with a strong expertise in those fields. For landfills, there are needs in the field of understanding **reactive flows** in unsaturated media.

There are many active researches on the topic of **organic matter pre-treatment**. Nevertheless, it seems that the needs in this field are quite different than what is done in the laboratories. Many people are surprised to see that the studies on pretreatments are disconnected with the characterization of organic matter. For instance, a given treatment enables to increase the methane potential of a given waste, but no information is available on the mode of action of the pretreatment.

A lack of « industrial research » is also generally recognized by many people, especially for **landfills**. A large number of answers suggest the creation of **research platforms** on site. The idea of **demonstration platforms** is also mentioned for **waste digesters** in order to evaluate and compare several mechanical systems and treatment techniques at the pilot scale.

Adequation between the « research offer » and the « research needs »

Research problems	Abundant offer	Adapted offer	Low offer	No offer
Load preparation and pretreatments			x	
Characterization of organic matter		x		
Mechanical devices				x
Mixing (dry mode))			x	
Water transfer(landfill)			x	
Energy from biogas				x
Instrumentation			x	
Biological processes	x			
Energetic analysis			x	
Social aspects				x
Making value from solid residues		x		
Safety			x	