

# cométh<sup>a</sup>

Partenariat d'innovation

Cotraitement des boues des eaux usées du SIAAP et de la fraction organique des ordures ménagères résiduelles du Syctom

## ACTES DE LA JOURNÉE TECHNIQUE

14 NOVEMBRE 2019



l'agence  
métropolitaine  
des déchets  
ménagers



Service public de l'assainissement francilien



## PROGRAMME

AVANT-PROPOS	3
LE SYCTOM ET LE SIAAP, DEUX OPÉRATEURS PUBLICS FRANCILIENS EN SYNERGIE	4
OUVERTURE DE LA JOURNÉE TECHNIQUE	6
<b>ENSEIGNEMENTS DE LA PHASE 1 DU PARTENARIAT D'INNOVATION COMÉTHA</b>	<b>8</b>
Premiers enseignements pour la maîtrise d'ouvrage	8
Approche technique et juridique du partenariat d'innovation	12
Retours sur la phase 1 par les groupements titulaires	16
Perpectives	24
<b>FOCUS SUR QUATRE AXES DE RECHERCHE</b>	<b>26</b>
Thème 1 : Optimiser la méthanisation pour traiter un mélange original d'intrants	26
Thème 2 : Récupérer les nutriments	32
Thème 3 : Explorer de nouvelles solutions pour la transformation du digestat au service du bilan énergétique	38
Thème 4 : Maximiser la production de biogaz par la méthanation	45
CONCLUSION DE LA JOURNÉE TECHNIQUE	52





## AVANT-PROPOS

Le 14 novembre 2019, le Sycatom et le SIAAP ont organisé au Forum des images de Paris une journée technique sur le projet Cométhha animée par Carine Morin-Batut, fondatrice d'Éclidéa.

Pour la mise en œuvre de ce projet inédit, le SIAAP et le Sycatom ont retenu la procédure du partenariat d'innovation. Le défi a été relevé par 4 groupements pluriels, associant des entreprises (grandes et petites), des laboratoires, des universités et des startups :

- >> SUEZ / ARKOLIA Énergies / ETIA
- >> Tilia / GICON France-Biogaz / DBFZ / Fraunhofer IGB
- >> VINCI Environnement / Naldeo / CEA LITEN / INSA
- >> John Cockerill Proserpol / Sources / UniLaSalle / UTC

La journée technique s'est tenue à l'issue de la Phase 1, après dix-huit mois de recherche et développement. En décembre 2019, le Sycatom et le SIAAP ont retenu les groupements conduits par GICON France-Biogaz / Tilia et par John Cockerill Proserpol / Sources pour participer à la Phase 2 du partenariat d'innovation, dédiée à la conception, à la construction et à l'exploitation d'une unité industrielle pilote.

**Plus d'informations sur le projet : [cometha.fr](http://cometha.fr)**



## LE SYCTOM ET LE SIAAP, DEUX OPÉRATEURS PUBLICS FRANCILIENS EN SYNERGIE

Le Syctom et le SIAAP sont au service du territoire le plus densément peuplé de France : l'agglomération parisienne. De par leurs missions, le traitement des déchets ménagers et des eaux usées, ils s'inscrivent pleinement dans l'économie circulaire francilienne et participent au développement d'une réflexion à grande échelle.



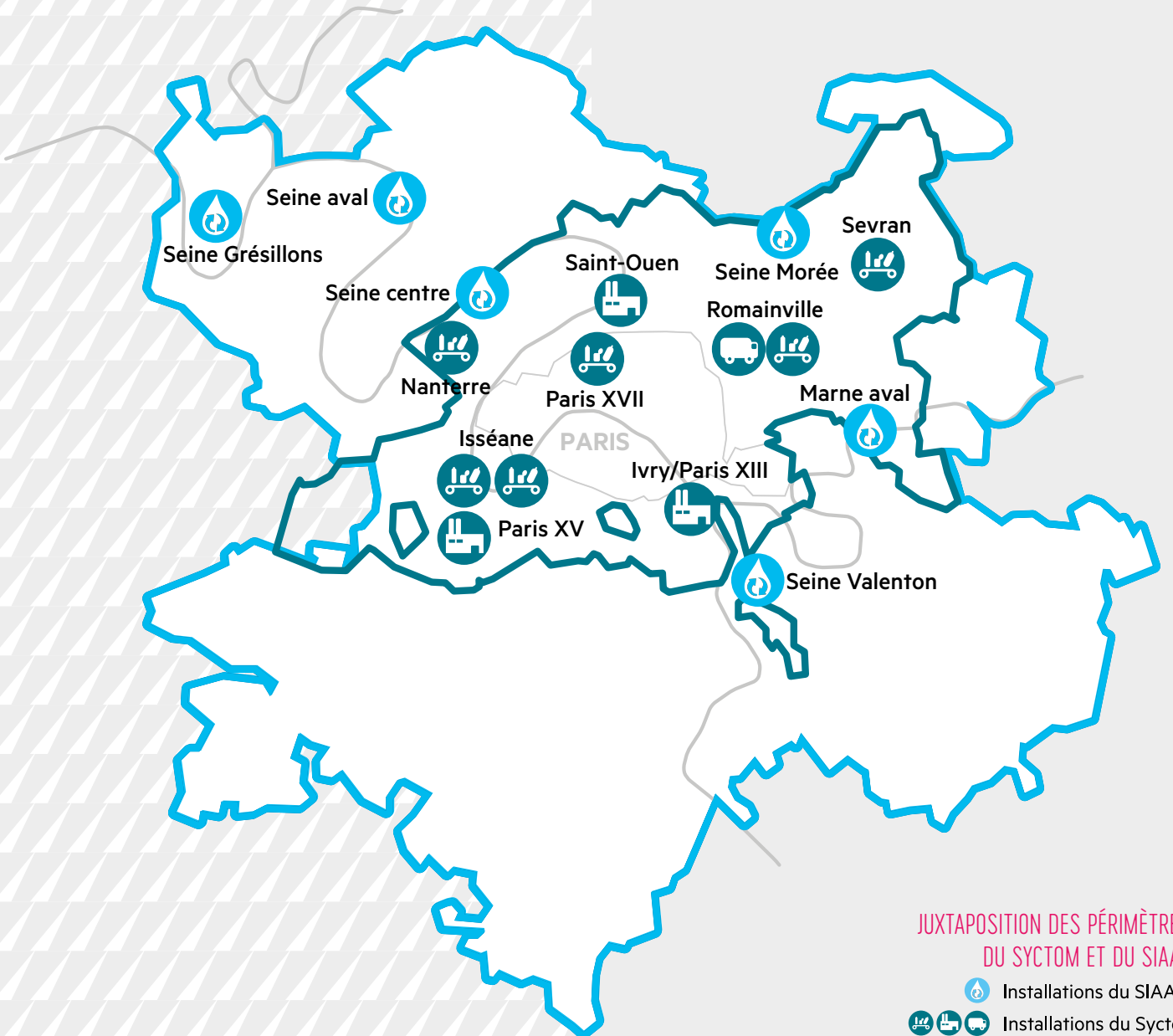
Le Syctom est le premier opérateur public européen de traitement et de valorisation des déchets ménagers, avec un territoire de près de 6 millions d'habitants soit la moitié de la population francilienne. Créé en 1984, il regroupe 85 communes, dont 82 communes de la Métropole du Grand Paris. Ces communes sont réparties sur 5 départements : Paris, Hauts-de-Seine, Seine-Saint-Denis, Val-de-Marne et Yvelines. Le Syctom a traité en 2018 plus de 2,3 millions de tonnes de Déchets ménagers et assimilés (DMA) dans ses installations de valorisation énergétique, de transfert et de tri.

Dans un contexte de raréfaction des matières premières et de transition énergétique, tous ces déchets doivent être considérés comme des ressources. Un défi au quotidien pour le Syctom, toujours en quête d'innovations pour optimiser les performances de ses installations (hausse du rendement énergétique, amélioration des process de tri et de recyclage) et trouver des solutions au traitement des différents flux de déchets. Le Syctom participe ainsi à l'émergence d'un modèle plus vertueux et plus durable, l'économie circulaire, pour la transition écologique et la ville de demain.



Le SIAAP, Syndicat interdépartemental pour l'assainissement de l'agglomération parisienne, est l'acteur public de référence pour l'assainissement des eaux usées domestiques, industrielles et pluviales, au service de 9 millions d'habitants. Une fois transportées vers l'une de ses usines, tout au long d'un réseau de 440 kilomètres de canalisations, 2,3 millions de m<sup>3</sup> d'eaux usées sont dépolluées, chaque jour, dans 6 usines de traitement des eaux usées, avant d'être rejetées dans la Seine et dans la Marne, en permettant le maintien du bon état écologique des eaux et la préservation de la biodiversité.

Acteur engagé pour l'environnement, le SIAAP réalise une mission d'intérêt général qui va au-delà du traitement des eaux usées : valorisation énergétique des sous-produits issus de l'épuration des eaux usées, protection des milieux naturels, anticipation des évolutions aussi bien climatiques que démographiques. Depuis 2016, le SIAAP a engagé un plan stratégique de long terme : « SIAAP 2030 : ensemble, construisons l'avenir », pour donner au SIAAP les moyens d'être toujours plus performant, grâce à l'optimisation de ses procédés, de son organisation et de son outil industriel.



# OUVERTURE DE LA JOURNÉE TECHNIQUE



**Carine Morin-Batut**  
Fondatrice d'Éclidéa  
Animatrice de la journée technique

D'après le ministère de l'Économie et des Finances, le CNRS, la SNCF, l'Assistance publique des hôpitaux de Paris et les ministères de la Défense et de l'Éducation nationale se sont lancés dans des partenariats d'innovation. Le partenariat d'innovation Cométha, conduit par le Sycotom et le SIAAP, est le premier à s'intéresser aux domaines de l'eau et des déchets.

La Journée technique a pour objectif de décrypter les recherches effectuées, et les orientations qui ont été retenues en fonction des objectifs et des résultats obtenus. En revanche, aucune donnée précise sur ce qu'il y a de plus innovant ne sera dévoilée, en raison de contraintes liées à la propriété intellectuelle.

Le partenariat d'innovation n'est pas la première collaboration entre le Sycotom et le SIAAP. Ils avaient déjà travaillé ensemble autour d'un projet de cométhanisation en Seine-Saint-Denis, abandonné en 2014. Créer des synergies et jouer des complémentarités de leurs objets fait sens pour les élus comme pour les directions des deux maîtres d'ouvrage qui ont décidé de relancer un projet commun.

Le partenariat d'innovation est un marché public permettant à l'acheteur public d'obtenir une solution qui n'existe pas sur le marché et pour laquelle il est nécessaire de faire appel à l'innovation. Avant le lancement du partenariat, un *benchmark* a été réalisé pour s'assurer qu'une solution de traitement adaptée aux besoins du Sycotom et du SIAAP n'existait pas déjà. Un projet a été identifié en Pologne mais il s'est avéré que les intrants utilisés étaient des biodéchets et des boues de station d'épuration. Il ne s'agissait donc pas des mêmes intrants que ceux du projet Cométha.

En effet, ce dernier ne vise pas les biodéchets, ceux issus de la collecte sélective actuellement en place ou qui sera mise en place. Il vise la fraction organique résiduelle, la partie organique qui reste dans la poubelle après les collectes sélectives de biodéchets qui sont ou qui seront mises en place. Ensuite, Cométha vise les boues des stations d'épuration, les boues des eaux usées, en provenance du SIAAP. Il y en a beaucoup, mais elles seront utilisées de façon limitée dans le projet afin d'obtenir le meilleur résultat et le meilleur rendement. Il faut également regarder avec intérêt la possibilité d'utiliser du fumier équin et des graisses issues des traitements des eaux usées.

Au-delà de l'ambition affichée de traiter un mélange inédit d'intrants, les objectifs du Sycotom et du SIAAP étaient également de montrer la pertinence du mélange vis-à-vis de la productivité en méthane. Dès le début du projet Cométha, le retour au sol de la fraction organique issue de la poubelle grise a été délibérément écarté. Il s'agit donc d'imaginer d'autres formes de valorisations matière et énergétique, permettant de minimiser les volumes de sous-produits issus des traitements mis en place.

Une particularité notable du partenariat d'innovation est que l'acheteur public peut conclure avec un ou plusieurs opérateurs économiques des contrats individuels, menés de façon séparée. Cométha est l'un des seuls partenariats d'innovation qui ait fait le choix de jouer avec cette particularité, en choisissant de contractualiser avec quatre titulaires pour sa Phase 1, dédiée à la recherche et au développement. Le partenariat d'innovation Cométha se déroule en trois phases. En effet, à l'issue de chacune des phases, les



## PRIORISER

Fraction  
organique  
résiduelle

## INCLURE

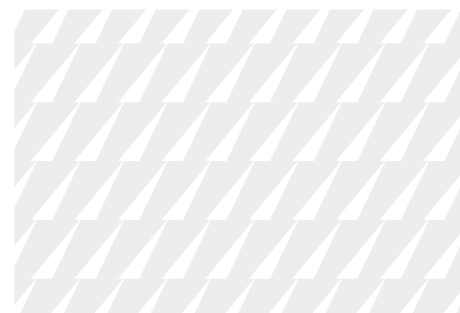
Boues des  
eaux usées

## ÉTUDIER

Fumier  
équin

## ENVISAGER

Graisses

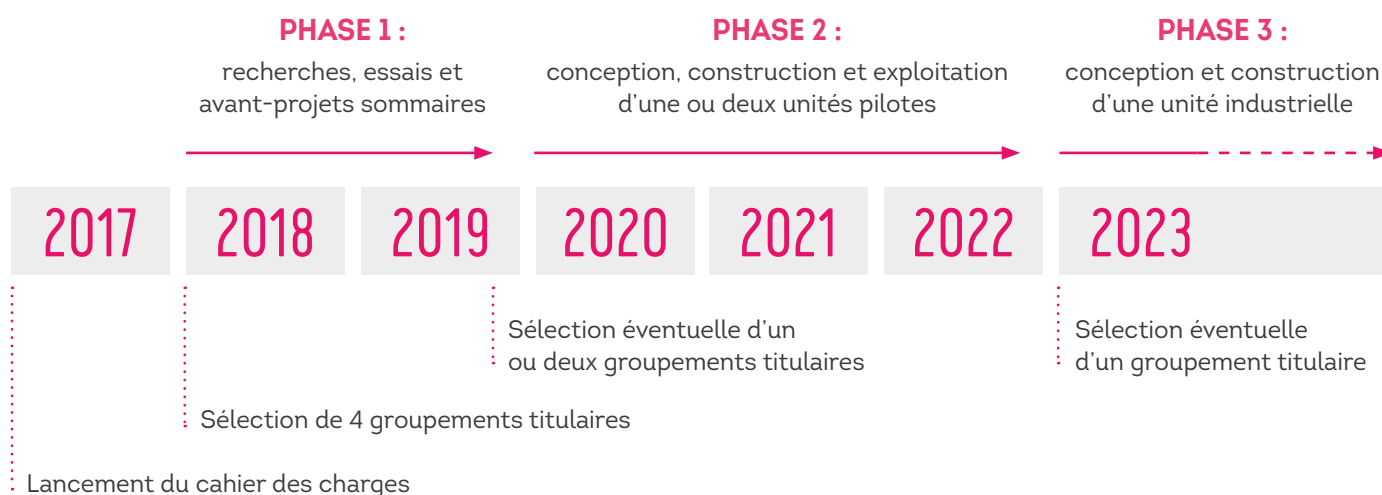


maîtres d'ouvrages choisissent de poursuivre ou de ne pas poursuivre. En 2017, neuf candidatures ont été déposées. Six offres ont été reçues et les deux maîtres d'ouvrage ont fait le choix de contractualiser avec quatre titulaires pour participer à la Phase 1. La Phase 2, si elle a lieu, sera dédiée à la construction et à l'exploitation d'un ou plusieurs pilotes pour l'expérimentation de différentes solutions techniques retenues. Elle durerait 36 mois. Une Phase 3 de construction de l'unité industrielle pourrait ensuite être menée si les maîtres d'ouvrage le décident.

À l'issue de la Phase 1, des innovations étaient attendues à différents niveaux : les pré-traitements des intrants, la méthanisation elle-même pour maximiser la transformation de la matière organique, la recherche de solutions de valorisation pour le digestat pour diminuer le volume des produits en sortie et la récupération des nutriments, notamment l'azote et le phosphore.

Dès le début de la Phase 1, quatre approches techniques très différentes ont été envisagées par les

quatre titulaires, surprenant les maîtres d'ouvrages. Elles différaient en termes d'enchaînement dans les ensembles fonctionnels mais aussi en termes d'innovations à imaginer sur un bloc fonctionnel lui-même. Un ensemble fonctionnel est un ensemble qui répond à une fonction technique et dans le cas du projet Cométhà, trois ensembles fonctionnels principaux peuvent être distingués : la méthanisation qui intègre le traitement du biogaz, le traitement de la phase solide du digestat et le traitement de la phase liquide.



# ENSEIGNEMENTS DE LA PHASE 1 DU PARTENARIAT D'INNOVATION COMÉTHA



## PREMIERS ENSEIGNEMENTS POUR LA MAÎTRISE D'OUVRAGE

**Denis Penouel**

Directeur général adjoint Prospective  
SIAAP

Il s'agit de reprendre la définition de la femme idéale, empruntée à une définition de l'homme idéal, selon Confucius : *« elle devait donc réussir à mener sa vie entre terre et ciel, le nez assez près de la terre pour distinguer, mais pas trop près au risque de ne plus rien voir. Ses actes gagnaient alors en précision et en distinction. Elle devait aussi savoir lever le nez vers le ciel pour relier, mais pas trop, au risque de s'envoler vers des altitudes où plus rien d'humain n'est distinguable. Elle devenait alors apte à faire des choix avec sagesse et avec efficacité ».*

Le constat sur l'évolution de la planète est semblable à celui que partagé il y a un peu plus d'un an, au moment de la Matinée technique, en septembre 2018. Quatre enjeux écologiques majeurs avaient été identifiés : le dérèglement climatique, la perte accélérée de biodiversité, la raréfaction des ressources et la multiplication des risques sanitaires environnementaux. Finalement, depuis un an, il n'y a eu que d'excellentes nouvelles. L'IPBES, la plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité a lancé une alerte au moment de la COP 14 : il y a un décalage de onze COP entre le climat et la biodiversité. La destruction de la biodiversité et des écosystèmes a atteint des niveaux inquiétants. Le dangereux déclin de la nature est constaté, ainsi qu'un taux d'extinction des espèces sans précédent et qui s'accroît. Le GIEC a annoncé le 8 octobre 2018 que l'augmentation de la température de la planète devrait atteindre 1,5°C, non pas en fin de siècle, mais entre 2030 et 2052 suivant les hypothèses. Même si les États tiennent leurs engagements de la COP 21, ce sera +3°C en fin de siècle. Le GIEC a également fait le constat le 25 septembre 2019 d'une accélération du réchauffement climatique et d'un bouleversement de

l'océan et de la cryosphère par le changement climatique. Selon ce rapport, les populations des régions montagneuses sont de plus en plus exposées aux aléas, à la diminution de la ressource en eau, aux glissements de terrain, aux avalanches. Et les glaciers les plus petits, en particulier en Europe, devraient perdre 80 % de leur masse d'ici 2100. À mesure que les glaciers des montagnes reculent, ils modifient également la disponibilité en eau et sa qualité. Cela aura de nombreuses répercussions en aval sur des secteurs comme l'agriculture, le tourisme, l'hydroélectricité, les loisirs... Dans le même temps, et par ailleurs, la hausse du niveau des mers pourrait atteindre entre 30 et 60 centimètres d'ici 2110. Dans les pires des scénarios, cette élévation atteindrait un mètre. Depuis 40 ans, l'océan a absorbé des quantités importantes de dioxyde de carbone, entraînant son acidification avec des répercussions sur la répartition et l'abondance de la faune et de la flore marine. Dans ces circonstances, il est compréhensible que la théorie de l'effondrement, la collapsologie, le catastrophisme, le pessimisme refassent surface. Énoncer la litanie des risques auxquels l'humanité doit faire face est une chose plutôt aisée et vendeuse, mais proposer et mettre en œuvre des solutions pragmatiques en est une autre.

Il y a 30 ans, il y avait déjà des chercheurs, des bureaux d'étude, des entreprises, des donneurs d'ordres. La puissance publique existait déjà. Pourtant, du point de vue des enjeux globaux, en particulier du climat, la trajectoire n'était pas bonne. Sans doute, l'appropriation des enjeux et des solutions n'était-elle pas partagée, mais réservée à une élite intellectuelle, longtemps inaudible ou ignorée. Sans doute également les modèles économiques, ainsi que les grands

équilibres géopolitiques ont-ils été préservés. Et pourtant, ces modèles actuels conduisent là où il est trop hasardeux d'aller. Il est donc nécessaire de s'engager dans des changements systématiques transformationnels, et plus simplement, dans le changement du modèle de société.

Il y a toutefois des bonnes nouvelles. La quatrième révolution industrielle est en cours, avec une accélération phénoménale de la mise à disposition des technologies. L'éducation et la formation d'une population toujours plus nombreuse sont constatées partout dans le monde. Les villes, même là où les États veulent prendre un peu de retard, prennent le pas et ont des objectifs très ambitieux en matière de climat. Toutes les conditions sont donc sans doute réunies pour rendre plus fructueuses l'imagination et la productivité collective. Les innovateurs du monde ont déposé la bagatelle de 3 millions de brevets en 2017 dans le monde. Certes, il y en a 1,5 million en Chine. Néanmoins, il y a une capacité d'innovation très importante et la transformation de ce monde, en assurant sa transition vers un développement durable, est portée par l'Agenda 2030 de l'ONU. Ce plan a été adopté en septembre 2015 par 196 pays, et donne un certain nombre de lignes directrices. Il vise à transformer notre modèle de développement, dans un contexte dorénavant mondialisé. Il doit entraîner la société civile, donner un sens commun, redonner confiance et atteindre des objectifs. Les entreprises, les ONG, les collectivités, les citoyens et les États ont 10 ans pour faire converger leurs forces afin d'atteindre 17 objectifs de développement durable. Les objectifs couvrent l'intégralité des enjeux, comme le climat, la biodiversité, l'énergie et l'eau, mais également, la pauvreté, l'égalité des genres, la prospérité économique ou encore la paix, l'éducation et bien d'autres. Cet Agenda se caractérise par la reconnaissance de liens intrinsèques sur toutes ces questions mondiales et ce langage commun est essentiel pour faciliter le rassemblement autour d'objectifs partagés qui réduiront les injonctions paradoxales, les contradictions et les incohérences. L'Agenda 2030 prône une démarche multisectorielle, inclusive, participative. Cela revient à créer une communauté multi échelles d'acteurs, en érigeant l'apprentissage entre pairs en levier de réussite. Demain, les stratégies d'entreprise intégreront les objectifs de développement durable dans les *reportings* RSE et orienteront les investissements à l'aune des objectifs.

Concernant les domaines du SIAAP, il faut noter parmi les objectifs de développement durable le besoin d'accès universel à des services d'eau potable et d'assainissement gérés en toute sécurité, la zéro artificialisation nette des sols, la neutralité carbone en 2050 avec un objectif intermédiaire en 2030 et

le souhait d'inscrire la protection du climat dans la constitution. Nombre de ces objectifs vont reposer sur les secteurs des déchets liquides et solides. Le Syctom et le SIAAP ont donc la responsabilité de renforcer leur rôle dans la gestion des ressources naturelles pour une économie circulaire, dans une logique de circuit court. Il faut définir les technologies les mieux adaptées aux objectifs fixés pour une politique de valorisation des nutriments et des énergies contenus dans les eaux usées et les déchets organiques : le carbone, l'azote et le phosphore.

Une fois les objectifs fixés, l'approche multisectorielle, pluridisciplinaire apparaît comme la plus efficiente. Le partenariat d'innovation du Syctom et du SIAAP réunit des équipes de recherche, des entreprises, des bureaux d'études, avec des objectifs proportionnés aux enjeux écologiques précipités. La confiance ne peut venir que d'une démarche rigoureuse et d'une communication par la preuve et c'est ce qu'il est prévu de réaliser à chaque étape du projet Cométhà.

Finalement, promouvoir des synergies puissantes et efficaces entre les services publics de la gestion de l'eau et de l'assainissement, des déchets, de l'énergie, fait partie de la stratégie à long terme des deux syndicats. Cette perspective de complémentarité et de décloisonnement est un levier qui permettra de mieux vivre en ville demain. Les mégapoles de demain ne pourront pas être des verrues carbonées, alors même que les sociétés modernes vivent dans la volonté de construire un monde au maximum soulagé des énergies fossiles. Cette ouverture et cette culture du dialogue ont pour corolaire le partage de l'information et l'engagement de transparence. L'enjeu est aussi de considérer que cette mission d'information et de pédagogie sur les activités du Syctom et du SIAAP est un des leviers de mobilisation collective et de responsabilisation de l'ensemble des acteurs. Relier les domaines est un des enjeux des politiques publiques et des services urbains, représentant autrement dit, une vision holistique et une approche transversale avec des regards croisés. C'est une approche complexe, subtile, exigeante, alternant le lointain et le proche et qui se nourrit de diversité, de paradigme et de réflexions individuelles et collectives. Ce n'est clairement pas la voie la plus simple, mais c'est par elle que le Syctom et le SIAAP espèrent atteindre les objectifs de l'Agenda 2030, avec l'ambition d'un monde plus durable et plus solidaire pour nos enfants.

Confucius a aussi dit : « *le tout est plus grand que la somme des parties* » : c'est ce que le Syctom et le SIAAP veulent démontrer avec le projet Cométhà.



**Pierre Hirtzberger**

Directeur général des services techniques  
Syctom

Trouver des solutions pour les boues d'épuration et la fraction organique des déchets ménagers constitue un enjeu important pour le Syctom et pour le SIAAP, d'autant que ce sont des matières dont le retour au sol continue à poser question et est de moins en moins probable. Il s'agit de déterminer s'il existe une synergie, en réduisant au maximum les éventuels résidus des procédés, puisque ces derniers peuvent poser problèmes.

Le Syctom et le SIAAP ont la responsabilité de trouver des solutions pour ces produits car ils ont la charge d'un service public sur une partie significative de la population française. Ils portent également une responsabilité sociétale de lancer des démarches d'innovation. Depuis plusieurs années, le Syctom et le SIAAP ont choisi le gaz comme vecteur énergétique. Le projet Cométha doit participer au verdissement des réseaux de gaz naturel.

*« Depuis plusieurs années, le Syctom et le SIAAP ont choisi le gaz comme vecteur énergétique. Le projet Cométha doit participer au verdissement des réseaux de gaz naturel. »*

Le premier enseignement est que le partenariat d'innovation est une grande aventure puisque les deux maîtres d'ouvrages pilotent quatre projets, entraînant une charge importante de travail. En outre, il convient de faire attention à ne pas avoir les réflexes de pilotage de marchés publics classiques. Il s'agit également de ne jamais oublier que quatre groupements sont titulaires d'un marché : à ce titre, il s'agit bien d'une exécution d'un marché et non d'une comparaison stricte entre des offres.

Le deuxième enseignement est une confirmation pour le Syctom et le SIAAP : il est possible faire « 1 + 1 égal plus que 2 » en traitant ensemble boues d'épuration et fraction organique résiduelle issue des déchets ménagers. Les premiers résultats le démontrent, et des synergies moins évidentes ont été identifiées, notamment avec l'utilisation de fumier équin qui montre un réel intérêt pour la cométhanisation.

Le troisième enseignement concerne l'innovation. Lorsque le partenariat d'innovation a été lancé, les maîtres d'ouvrage attendaient de l'innovation sur la méthanisation et sur les traitements biologiques. Finalement, les principales innovations se concentrent autour du traitement aval des digestats, les traitements thermochimiques. C'est une nouveauté très intéressante, puisque, au-delà du simple projet Cométha, les avancées sur ces technologies pourraient aider le Syctom, notamment, sur d'autres flux de déchets. Des perspectives s'ouvrent sur ce sujet.

Le quatrième enseignement concerne la méthanation. Le traitement thermochimique conduit à la production d'un nouveau gaz, un gaz de synthèse, le syngaz. Une méthanation peut alors être mise en œuvre pour transformer ce syngaz en méthane, puisque les collectivités ont fait le choix du biométhane comme vecteur énergétique. Les réseaux de gaz, qu'ils soient de distribution ou de transport, sont à la fois un vecteur de transport de cette énergie mais également un outil de stockage très intéressant. L'injection permet de ne pas faire de choix d'usage, puisque le gaz naturel et le biométhane peuvent être utilisés pour de multiples usages.



Le dernier enseignement concerne la récupération des nutriments, de l'azote et du phosphore, qui constitue une problématique forte dans le traitement des eaux. Le phosphore est une ressource d'origine fossile. Des États européens ont déjà adopté des stratégies très ambitieuses pour le récupérer, notamment l'Allemagne et la Suisse. La récupération de l'azote est à la fois un enjeu pour la fertilisation des sols agricoles, mais aussi un enjeu pour la lutte contre le changement climatique, puisque l'azote utilisé par les agriculteurs est issu d'une production fortement émettrice de gaz à effet de serre. Les résultats sur la récupération des nutriments sont très intéressants alors que ce n'était pas un objectif prioritaire au lancement de Cométha.

Découvertes techniques et innovations ont un lien direct avec l'encadrement réglementaire. Pour les traitements thermochimiques, la situation concernant le classement des installations n'est pas très claire. C'est un frein à l'innovation et un frein au développement industriel de ces techniques. Le Syctom et le SIAAP soutiendront les démarches de la filière

en faveur d'une clarification réglementaire sur ces techniques de traitement thermochimique. Il y a par ailleurs des produits, non pas au sens juridique, mais au sens chimique, qui sont générés par les différentes filières imaginées par les groupements titulaires, et il est nécessaire que ces substances aient un statut juridique. Face aux États européens qui utilisent la procédure de sortie de statut de déchets, la France apparaît globalement très frileuse, avec à la clé un nomadisme de matières premières secondaires vers d'autres États. Le Syctom et le SIAAP seront très vigilants pour faire avancer au plus vite ces sujets, afin que ces procédés puissent trouver leur place dans le respect des normes environnementales. Enfin, le Syctom et le SIAAP souhaitent participer au débat sur l'injection de gaz dans les réseaux, y compris sur le plan juridique, afin de verdir ces réseaux. C'est un des chemins importants, réalisables et efficaces pour contribuer significativement à la lutte contre le changement climatique.





## APPROCHE TECHNIQUE ET JURIDIQUE DU PARTENARIAT D'INNOVATION

### Blaise Eglie-Richters

Associé-gérant, Sartorio Avocats

Assistant à maîtrise d'ouvrage juridique

Un partenariat d'innovation est un marché public d'un type nouveau apparu en 2014, comblant un manque dans le panel des marchés publics traditionnels : celui de pouvoir acheter une chose qui n'existe pas sur le marché. Pour avoir recours à un partenariat d'innovation, la première démarche à suivre est donc de vérifier si le produit, le service ou les travaux existent déjà sur le marché. Si ce n'est pas le cas, il est alors possible de se lancer dans l'aventure du partenariat d'innovation.

Une autre particularité de ce partenariat d'innovation est qu'il est possible de confier un marché de prestations à une ou plusieurs équipes qui réaliseront de la recherche et développement. Si cette phase est fructueuse, la même équipe pourra exécuter la prestation. Dans le cas de Cométhha, c'est l'une des quatre équipes - si ce partenariat d'innovation va jusqu'au bout - qui réalisera l'unité pilote, puis l'unité industrielle.

Une dernière particularité du partenariat d'innovation est qu'il prend en compte le risque de non concrétisation puisqu'il est toujours possible qu'un projet de recherche et de développement n'aboutisse pas. Il est alors possible de quitter le partenariat d'innovation sans conséquences économiques pour la personne publique.

Le Sycotom et le SIAAP ont fait le choix de confier, sur un même sujet, plusieurs marchés différents à plusieurs équipes. Les chances de parvenir à un résultat sont multipliées, minimisant les risques de non-concrétisation du projet.

De nombreuses problématiques totalement inédites se posent dans la conduite d'un partenariat d'innovation puisque c'est un objet juridique complètement nouveau.

D'abord, la propriété intellectuelle est un sujet extrêmement complexe et central, qui mérite une profonde réflexion en amont du lancement de tout partenariat d'innovation. Le Cabinet Sartorio Avocats a été accompagné par le professeur Nicolas Binctin et par Xavier Rataboul, conseil en propriété

industrielle. La propriété intellectuelle a des impacts sur l'organisation et le prix du marché. Chaque titulaire est-il propriétaire des résultats obtenus ? Ou est-ce la collectivité qui a vocation à être propriétaire des résultats, notamment si des brevets sont déposés ? Le Sycotom et le SIAAP ont fait le choix d'en être propriétaires pour de nombreuses raisons. La première étant qu'ils sont financeurs de la phase de recherche et développement. La deuxième est qu'il est envisageable de construire plusieurs installations si les résultats sont à la hauteur des espérances : il est donc parfaitement légitime que les deux syndicats soient propriétaires des résultats. Pour autant, les quatre équipes titulaires qui contribuent à les développer sont également légitimes et il leur sera donc concédé des droits exclusifs pour exploiter en dehors du territoire des deux syndicats les brevets qui pourraient éventuellement naître de Cométhha.

Ensuite, la construction du prix des différentes phases est un enjeu majeur. En 2017, il a été demandé aux équipes de remettre un prix, mais il n'était alors

*« Le Sycotom et le SIAAP ont fait le choix de confier, sur un même sujet, plusieurs marchés différents à plusieurs équipes. Les chances de parvenir à un résultat sont multipliées, minimisant les risques de non-concrétisation du projet. »*



pas envisageable de leur demander d'en remettre un sur la phase de l'unité industrielle (Phase 3). En effet, ce sont précisément les Phases 1 et 2 qui permettront de déterminer le contenu de la future unité industrielle et son cahier des charges. Le Sycotom et le SIAAP ont choisi de placer tous les groupements titulaires sur un pied d'égalité pour la Phase 3, avec un budget de 70 millions d'euros incluant une variable d'ajustement dépendante de la capacité minimale garantie de traitement sur laquelle chaque groupement titulaire s'est engagé. Les Phases 1 et 2 seront donc l'occasion d'aller bien au-delà de cette capacité minimale garantie et de démontrer les performances de cette future unité industrielle.

Enfin, la mise en concurrence, qui se poursuivra pendant des années, est une nouveauté. Si le partenariat d'innovation est choisi, il est nécessaire d'anticiper sur ce sujet puisque la mise en concurrence suppose de respecter la confidentialité du travail entre les quatre groupements titulaires. La poursuite de cette mise en concurrence signifie une égalité de traitement entre ces derniers avec un nombre de règles assez rigides. Pour autant, ces règles sont parfois totalement incompatibles avec la nécessité de souplesse dans l'exécution d'un marché public. Par exemple, le dépôt d'une réponse à un appel d'offre « classique » doit impérativement se faire dans le temps imparti, au risque de n'être ni lue, ni ouverte, ni analysée. A contrario, dans un partenariat d'innovation, il est courant que des prestations arrivent avec quelques heures ou quelques jours de retard, sans que la face du monde n'en soit changée.





**Claire Vittoz**

Directrice de projet, setec énergie environnement  
 Assistant à maîtrise d'ouvrage technique

Pour un assistant à maîtrise d'ouvrage technique, le partenariat d'innovation est un défi avec de nombreux enjeux en matière d'assistance technique, de pilotage et de coordination de suivi de quatre projets en parallèle. Conformément au programme technique qui avait été établi par le Syctom et le SIAAP, la Phase 1 s'est déclinée en trois sous-phases, afin de :

- >> connaître les intrants et valider le système de traitement établi par les quatre titulaires (phase 1A) ;
- >> procéder aux tests expérimentaux en laboratoire (phase 1B) ;
- >> concevoir l'unité pilote qui sera potentiellement construite en Phase 2 (phase 1C).

La phase 1A, qui s'est déroulée de mars à juillet 2018, consistait en l'analyse de plusieurs séries d'échantillons des différents intrants (composition physique et mécanique) afin d'identifier par exemple une éventuelle présence de fibres ou d'inertes pouvant gêner les réactions de méthanisation et autres réactions en aval de la méthanisation. La composition chimique a également été analysée afin de relever éventuellement la présence d'inhibiteurs. Enfin, le potentiel méthanogène de ces différents intrants a été analysé, afin de savoir si celui-ci pouvait être exprimé en totalité voire plus par rapport à des projets classiques. L'objectif de cette phase 1A pour les quatre titulaires était de déterminer le meilleur mix d'intrants, pour réaliser les essais expérimentaux en phase 1B. À l'issue de cette phase, l'assistant à maîtrise d'ouvrage et la maîtrise d'ouvrage se sont aperçus de la nécessité d'un outil de comparaison des résultats. En effet, il était nécessaire d'avoir une caractérisation de référence afin de pouvoir comparer les quatre projets à l'issue de la Phase 1, avec un potentiel méthanogène de référence, des taux de matières brutes ou de matières sèches de référence pour chaque intrant.

La phase 1A a également permis d'établir le protocole d'expérimentation de chacun des quatre projets. Ce protocole est la base des essais expérimentaux de la phase 1B, permettant de valider les performances de chaque ensemble fonctionnel innovant au niveau

laboratoire, à partir des performances prévisionnelles établies par chaque groupement titulaire au stade de la remise des offres. L'assistant à maîtrise d'ouvrage devait faire preuve d'une grande vigilance sur la représentativité des essais, afin de s'approcher au plus vite des conditions réelles d'une unité pilote en Phase 2 et d'une unité industrielle en Phase 3.

À partir de juin 2018 et pendant un an, les essais expérimentaux ont été réalisés en laboratoire sur différents pilotes de tailles variées. Cette phase 1B a été sanctionnée par la réalisation d'un rapport d'essai détaillant toute la démarche, les essais réalisés et les résultats obtenus. L'interprétation de ces résultats a alors permis de déterminer le système de traitement consolidé en fin de phase 1B. À cette étape, l'assistant à maîtrise d'ouvrage a validé les quatre rapports d'essai en plusieurs temps. Il s'agissait d'abord de s'assurer que le rapport était conforme au programme technique et au protocole qui avait été validé en phase 1A. Ensuite, l'analyse des résultats a été réalisée en vérifiant notamment leur pertinence et leur justesse d'interprétation. À cette étape, les quatre groupements titulaires ont été challengés afin de savoir si les résultats obtenus permettaient vraiment de valider les performances prévisionnelles ou encore des performances supérieures. L'assistant à maîtrise d'ouvrage a donc tenté de savoir de quelles manières ces performances ainsi que les bilans matières et énergies associés avaient été confirmés par les essais, ou infirmés.

Finalement, la Phase 1 a représenté 15 laboratoires impliqués pour les quatre titulaires, soit une centaine de personnes. Cette phase a également rassemblé 300 essais en laboratoire, permettant de tester 50 ensembles fonctionnels sur tous les systèmes de traitement confondus. Pour la totalité de ces essais, 20 tonnes d'intrants, constitués de 6 tonnes de fraction organique résiduelle, 11 tonnes de boues d'épuration et 2,3 tonnes de fumier équin, ont été prélevées à partir de 12 campagnes de prélèvement réalisées en 2018 et 2019. Enfin, 90 réunions ont été organisées, totalisant près de 400 heures.

15 LABORATOIRES  
IMPLIQUÉS90 RÉUNIONS  
(400 HEURES)PRÈS DE  
20 TONNES D'INTRANTS  
PRÉLEVÉS100 PERSONNES  
IMPLIQUÉES300 ESSAIS EN  
LABORATOIRE

12 CAMPAGNES

ENVIRON 50 ENSEMBLES FONCTIONNELS TESTÉS

(6 TONNES DE FO<sub>r</sub>,  
11 TONNES DE BOUES ET  
2,3 TONNES DE FUMIER ÉQUIN)

Le suivi en parallèle de quatre marchés représentait plusieurs défis.

Le premier défi à relever était d'assurer l'égalité de traitement des quatre groupements titulaires ainsi qu'une avancée concomitante des quatre partenariats. En effet, l'objectif était de fournir aux quatre groupements titulaires les mêmes informations tout au long de la Phase 1 afin qu'ils avancent au même rythme pour valider les rapports d'essai et les études d'avant-projet sommaire à la même date. Un important travail de concertation et de coordination a été mené puisque chaque information fournie aux titulaires a été filtrée et réfléchiée avant d'être donnée.

Le deuxième défi était d'entretenir une démarche de co-construction de la solution innovante avec chaque groupement, tout au long de la Phase 1. Il s'agissait de concilier le monde de la recherche et de la construction industrielle, en un temps record, puisqu'entre la fin de la Phase 1 et le début de la construction de

l'unité industrielle, il se passera théoriquement 4 ans.

Enfin, le troisième défi a été de ne jamais perdre de vue les intérêts du Sycotom et du SIAAP et les objectifs du projet Cométhra, puisque la réponse au besoin initial est de créer une unité industrielle innovante. Il ne fallait pas oublier, au fur et à mesure de ce travail de recherche et de développement, la finalité du projet : la création d'une installation industrielle en Phase 3. Pour cela, la souplesse contractuelle du marché de partenariat d'innovation a permis d'avancer au gré des avancées techniques et du travail itératif de la démarche d'innovation.

*« La souplesse contractuelle du marché de partenariat d'innovation a permis d'avancer au gré des avancées techniques et du travail itératif de la démarche d'innovation. »*



## RETOURS SUR LA PHASE 1 PAR LES GROUPEMENTS TITULAIRES



**Stéphane Cordier**  
Directeur général adjoint  
SUEZ

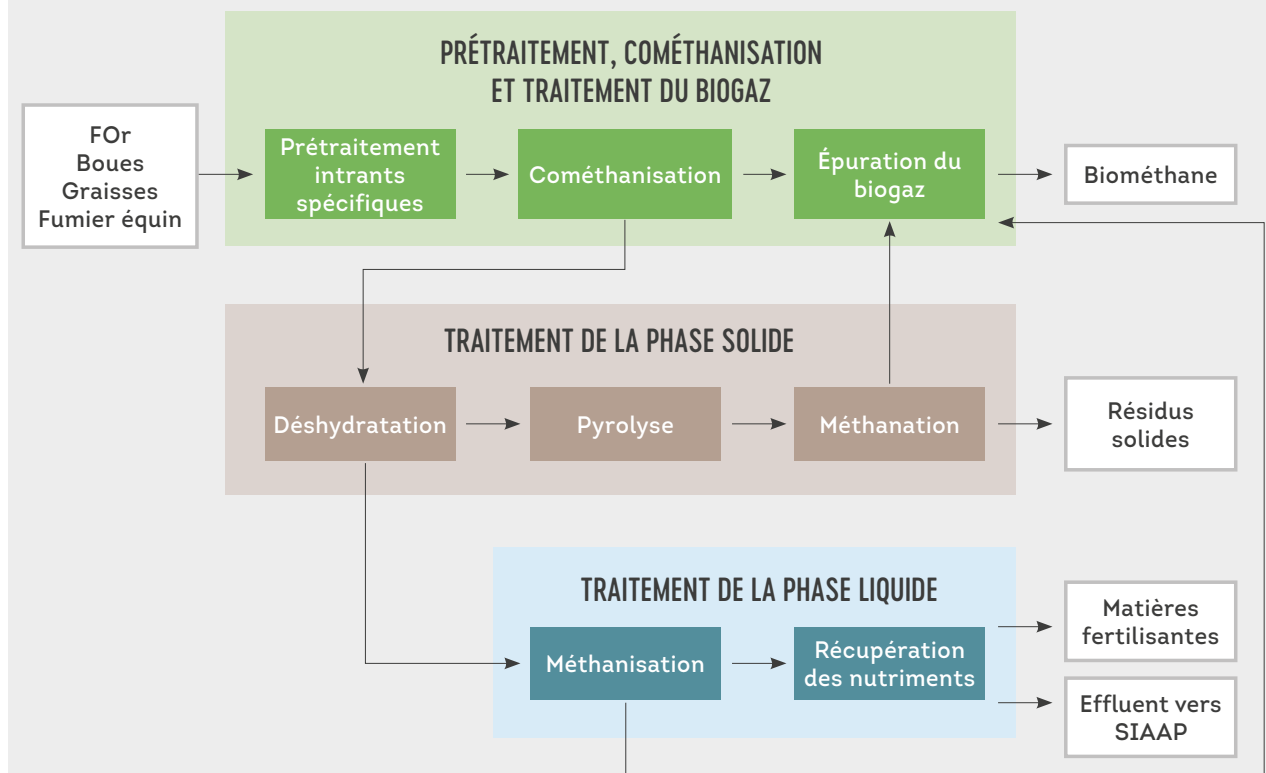
Le groupement Suez s'est fortement mobilisé pour cette Phase 1 du projet Cométha, avec une vingtaine d'experts et d'ingénieurs, une vingtaine de techniciens, 18 mois d'essais en laboratoire représentant plus de 10 000 analyses et 85 essais pilotes autour de 5 thèmes. Ces 18 mois d'essais ont permis d'aboutir à une filière comprenant les ensembles suivants :

- >> une cométhanisation en voie épaisse associée à une hydrolyse biologique en amont ;
- >> un traitement de la phase solide par déshydratation, séchage de boues et pyrolyse ;

- >> une valorisation du syngaz issu de la pyrolyse par méthanation biologique
- >> une valorisation des sous-produits liquides par méthanisation, afin d'augmenter encore la quantité de biogaz produite ;
- >> une épuration du biogaz avant injection dans le réseau.

L'association de ces unités performantes et innovantes permet d'envisager un potentiel méthanogène supérieur à 100 %.

### FILIÈRE RETENUE



Le parti pris du groupement a été de traiter les boues digérées, difficilement biodégradables, afin de leur donner une deuxième vie. Faire le choix de la méthanisation en voie épaisse signifiait alors réduire la taille des ouvrages et optimiser les investissements. La déshydratation et la pyrolyse des digestats permet le non-retour au sol et la maximisation de la production de biométhane.

La première brique est la cométhanisation par voie sèche, un procédé développé par Arkolia Énergies nommé Arkométha®. Ce procédé consiste à augmenter le traitement, la quantité de fraction organique résiduelle traitée sur la filière avec un fonctionnement régulier et optimisé autour de 25 % de siccité. Cette digestion en voie sèche permet de réduire significativement le volume des digestats, entre 30 et 50 % par rapport à des méthaniseurs fonctionnant en voie humide. Le deuxième bloc de traitement est la phase liquide. Le choix du groupement s'est porté sur le traitement des boues de cométhanisation, afin d'obtenir un syngaz qui est ensuite transformé en biogaz par méthanation. En amont de la pyrolyse, une ultra déshydratation

associée à un sécheur permet de produire un gâteau à forte siccité. Enfin, la méthanation biologique permet de transformer le monoxyde de carbone, le dioxyde de carbone et l'hydrogène en syngaz. La méthanisation des effluents liquides et le stripping de l'azote se font dans un réacteur à boues granulaires, permettant de réduire la charge de retour en tête de station d'épuration. Finalement, les effluents du méthaniseur en voie liquide passent par une unité de stripping de l'azote qui permet de récupérer et de valoriser l'azote ammoniacal du filtrat, avec deux avantages. La charge en azote est ainsi réduite et du sulfate d'ammonium valorisable dans le secteur agricole est produit.

En conclusion, il est important de souligner que le groupement Suez a conçu ces propositions avec une double vision, celle du constructeur et de l'exploitant, pour qui il y a deux obligations : les performances doivent être excellentes, et l'exploitation doit être simple et robuste. Ce partenariat est résolument créateur d'opportunités d'innovation. Il permet de créer une filière d'avenir et de réaliser ce que certains ont imaginé depuis de nombreuses années.



**Christophe Hug et Cécile Dalverny**  
Co-président, et Manager de projet Tilia

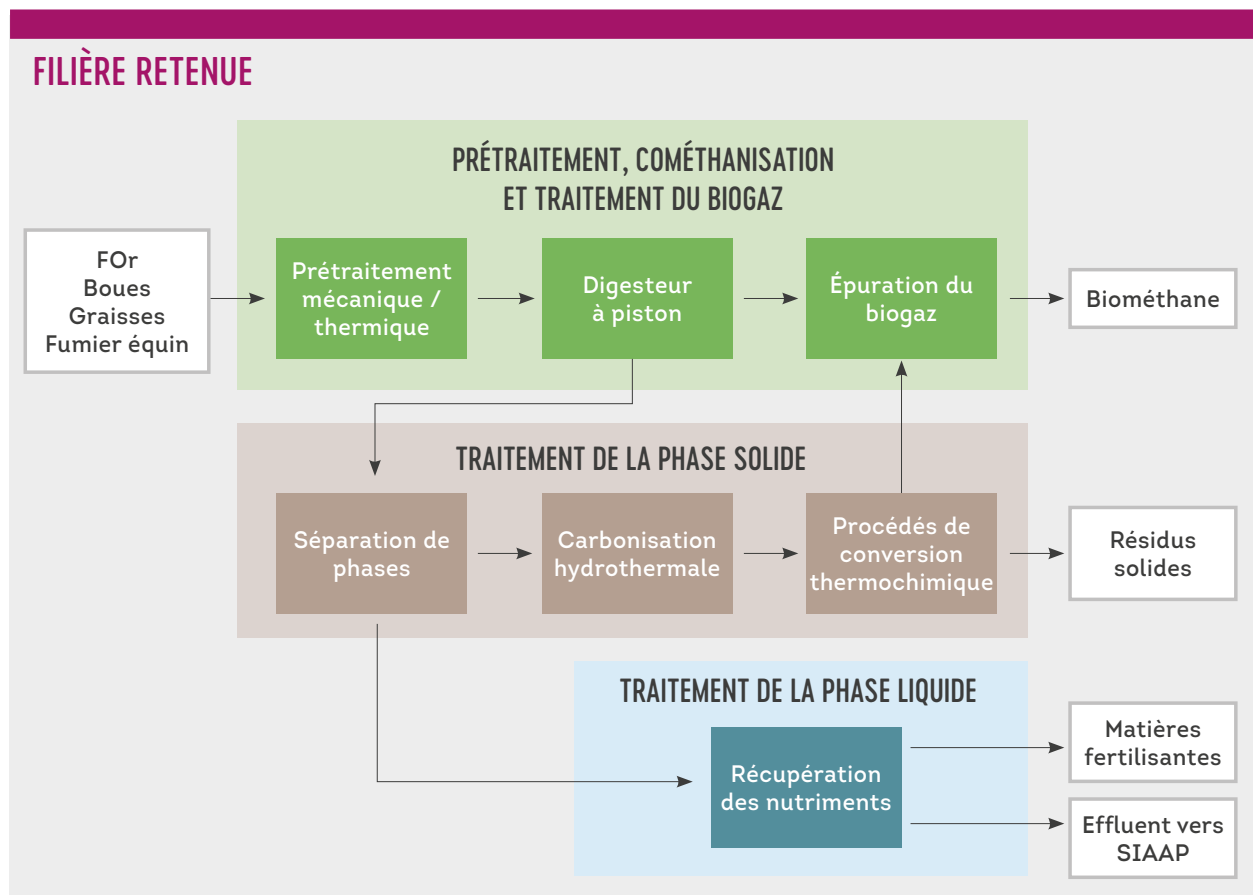
La Phase 1 du projet Cométha a été très active ; il s'agissait de proposer une première solution, avec des ensembles fonctionnels à définir, des décisions à prendre et une performance attendue. Le système est très complexe et au-delà de la propriété intellectuelle des ensembles fonctionnels, il existe des dizaines ou des centaines de décisions à prendre, en transparence et en partenariat avec le Syctom et le SIAAP et leurs assistants, afin de pouvoir codévelopper une solution encore plus performante et plus sûre.

Tilia et ses différents partenaires ont eu pour objectif la coordination et l'intégration des résultats afin de produire la meilleure solution possible, autant sur la production de méthane, le bilan énergétique, la minimisation des résidus, la récupération des nutriments, que sur la faisabilité technique, opérationnelle et économique. Il était important de trouver les bonnes

combinaisons et de travailler sur des modules innovants, permettant d'obtenir des résultats très différents. Le protocole d'essai suivi par le groupement avait pour objectif de combiner toutes les idées, de proposer de nombreuses combinaisons afin d'arriver finalement à une solution la plus performante possible.

Les 18 mois de la Phase 1 peuvent être résumés en plusieurs chiffres. Tout d'abord, 8 000 kilogrammes d'échantillons ont été prélevés en région parisienne alors que les laboratoires de recherche sont à Dresde, Leipzig et Stuttgart en Allemagne. Il était donc nécessaire de prévoir toute la logistique afin de s'assurer que la qualité des intrants à l'arrivée était la même qu'au départ, pour garantir la qualité des résultats. En parallèle, 19 ateliers de travail internes au groupement ont eu lieu, qui se sont accompagnés de centaines d'heures de réunions téléphoniques





et d'appels. Chaque laboratoire ne réalisait pas ses essais individuellement : tous coopéraient, notamment lors des réunions où chacun présentait ses résultats aux autres membres du groupement.

Plusieurs compétences sont partagées entre les différents membres, notamment sur la méthanisation, grâce au grand nombre d'experts présents dans le groupement Tilia. Ils ont évalué les conséquences d'un module sur d'autres modules, afin d'arriver à fournir une solution technique et une solution économique faisant sens au niveau global. Ce travail a aussi été complété par les échanges réguliers avec le Sycotom et le SIAAP, notamment lors des réunions mensuelles, où plusieurs variantes avec des performances différentes étaient présentées. Il était donc important d'avoir un retour des maîtres d'ouvrage pour orienter les travaux.

Pour la technologie de méthanisation, le DBFZ maîtrise la technique du digesteur à piston. Les essais ont donc utilisé l'unité pilote de digesteur à piston de l'institut qui fonctionne en continu utilisé. Le Fraunhofer Institut à Stuttgart est leader dans la digestion à charge élevée, et GICON est le spécialiste de la digestion par percolation. Ces trois technologies ont été testées parallèlement avec les intrants du partenariat d'innovation, pour ensuite comparer les résultats. Pour la méthanisation, l'objectif prioritaire

était la productivité en méthane ainsi que les résultats économiques puisque les coûts d'investissement et les coûts d'opérations avaient été calculés dès le départ, à la fois pour l'unité pilote et pour l'unité industrielle. Finalement, une matrice de décisions a permis de retenir le digesteur à piston, meilleur choix technique et économique.

Le travail du groupement a d'abord porté sur le prétraitement des quatre intrants qui font l'objet de nombreux préjugés, préconçus et possibilités. Le groupement est parvenu à faire le tri et à proposer une solution qui, en termes de résultats, a permis d'aller plus loin que ce qu'il envisageait initialement. Le groupement a aussi travaillé sur une méthanisation par digesteur à piston adapté qui a pu être optimisé pour ce mélange d'intrants. Le traitement retenu pour la phase solide se caractérise par la séparation, la carbonisation hydrothermale, et les procédés thermochimiques, avec des conditions d'exploitation assez limitées : des niveaux de pression assez bas et un niveau de température raisonnable, avec un important avantage énergétique. Enfin, le groupement a pu constater que le positionnement de la technologie de récupération des nutriments était un enjeu des essais.





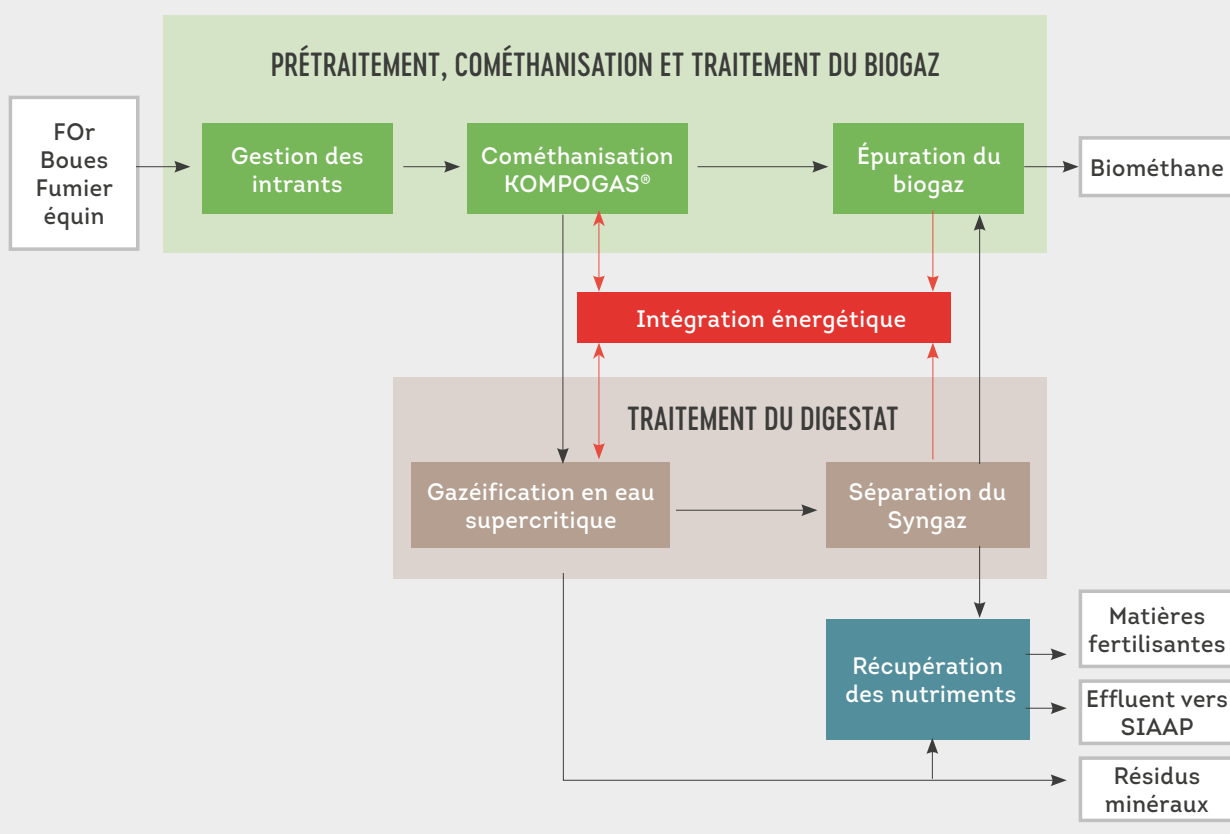
**Thomas Chauveau**  
Directeur développement  
VINCI Environnement

Le groupement VINCI Environnement a principalement travaillé sur une technologie de codigestion des intrants, suivie d'une étape innovante de gazéification en eau supercritique. Ces 18 mois ont impliqué 8 laboratoires, dont 5 du CEA et 3 laboratoires des INSA. Au total, 26 chercheurs et techniciens ont été mobilisés.

La phase de caractérisation a été menée avec toutes les analyses physicochimiques nécessaires sur des mélanges très hétérogènes et de nature très variable. Pendant 6 mois, 2,5 tonnes d'intrants ont été testées, avec près de 8 000 heures d'essais, en

dehors des heures d'ingénierie. Le challenge était de proposer une filière adaptée à la flexibilité des intrants et de les utiliser sans aucune préparation mécanique si possible, sauf pour le broyage du fumier équin. Il s'agissait également d'obtenir un mélange simple à préparer, avec les bonnes proportions d'intrants, compatible avec la technologie utilisée. Enfin, il fallait valoriser chaque molécule de carbone, afin de produire le maximum de biogaz et de favoriser la production d'hydrogène pour l'autonomie en énergie, l'alimentation du réseau en biométhane et la récupération des nutriments.

## FILIÈRE RETENUE



Le groupement VINCI Environnement avait initialement imaginé de préparer les intrants avec des ultrasons, technologie qui consistait à déstructurer partiellement la matière organique pour obtenir un meilleur pouvoir méthanogène. Cette technologie a finalement été écartée.

Par ailleurs, le groupement a paramétré la cométhanisation. Il a retenu un procédé Kompogas®, qui est aujourd'hui bien éprouvé dans le monde, avec 80 équipements qui fonctionnent aujourd'hui et qui donnent des résultats très efficaces sur des natures de déchets très différents. À titre d'exemple, la Suisse utilise beaucoup de déchets verts et de biodéchets, de collectes sélectives, alors que la France travaille beaucoup sur les matières organiques issues

des ordures ménagères résiduelles et des déchets agricoles. Le procédé Kompogas® est donc parfaitement adapté pour ces intrants, et des essais à échelle réduite sur maquette ont été réalisés afin d'obtenir les meilleures performances.

D'autre part, la gazéification en eau supercritique a été testée principalement par le CEA. Le challenge était de récupérer un digestat directement admissible dans le gazéificateur en eau supercritique, système extrêmement innovant pour ce type de produits. Il est important de souligner le travail réalisé sur l'intégration énergétique, puisque le procédé de gazéification dégage plus d'énergie qu'il n'en reçoit. En résumé, la filière présente une très bonne intégration énergétique avec une forte production de biométhane.



**Olivier Bernat**

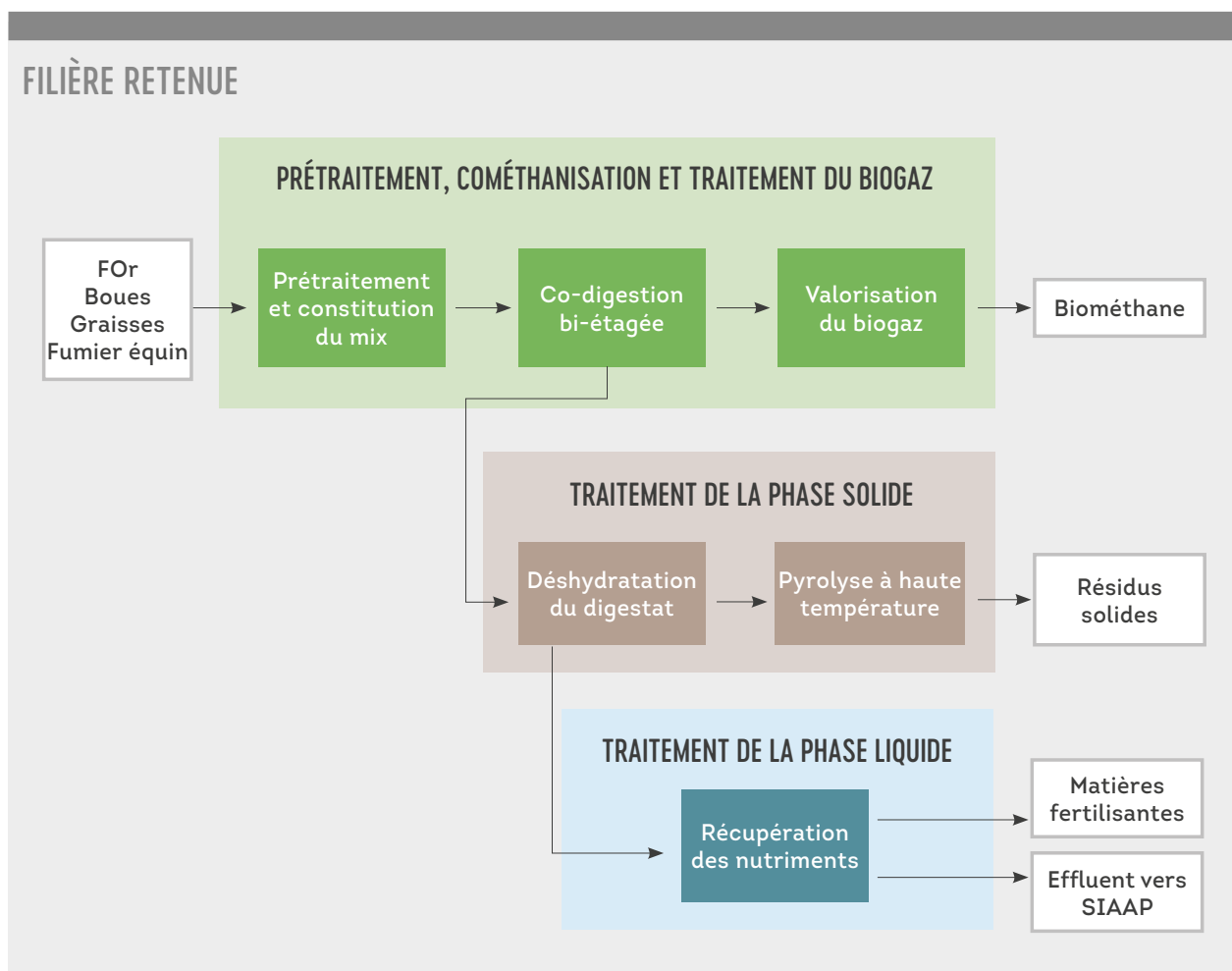
Directeur technique secteur  
John Cockerill Proserpol

La phase de recherche et développement fut une aventure technique et scientifique, mais aussi une aventure humaine. Ce projet a réuni des équipes qui se connaissaient mais qui n'avaient jamais eu l'occasion de travailler ensemble sur un projet aussi ambitieux. Il s'agit du groupe John Cockerill, avec sa société Proserpol, de la société Sources, et du monde académique avec UniLaSalle Beauvais ainsi que l'université technologique de Compiègne. La société Haarslev, une société danoise, a également accompagné John Cockerill pour l'augmentation des performances des méthaniseurs notamment. Le résultat de cette aventure humaine est une équipe, un groupement particulièrement cohérent, complémentaire, avec beaucoup de convivialité, largement au-delà de ce qui était espéré initialement. Ce fut un groupement avec une vision commune et des objectifs partagés aussi bien au quotidien que sur la durée, avec une très belle dynamique.

Il est possible de résumer ces 18 mois de travaux en quelques chiffres : 1 000 kilogrammes de fraction

organique résiduelle, 1 200 litres de boues, 120 kilogrammes de fumier équin et 50 kilogrammes de graisses. Ces 18 mois représentent également 2 600 analyses sur 517 jours de suivi des différents pilotes, ainsi que 28 week-ends passés à surveiller et alimenter les différents pilotes, dans un souci de maximiser la représentativité de ces essais. Cette expérience s'est basée sur 36 réunions du groupement afin d'assurer la cohésion des différents essais réalisés sur plusieurs sites en France et à l'étranger ainsi que 22 réunions avec le Syctom, SIAAP et leurs assistants. Enfin, des visites d'installations industrielles ont eu lieu, afin de mettre en œuvre certaines des briques technologiques retenues dans la solution de référence.

Au-delà de ces chiffres, la filière consolidée est finalement assez proche de la filière imaginée au départ, à quelques adaptations près. Les intrants subissent d'abord un prétraitement qui a pour objectif de faciliter leur traitement ultérieur et d'éviter certains désagrèments. Ce sont des prétraitements de broyage,



de mélange et de dilution puisque le groupement a choisi de travailler en phase liquide. Le mélange ainsi constitué est ensuite admis au cœur de l'installation, la cométhanisation bi-étagée. Il s'agit de deux étapes de méthanisation : une étape thermophile suivie d'une étape mésophile. Un procédé complémentaire, développé par Haarslev et adapté spécifiquement aux objectifs du projet Cométha, permet de maximiser la production de biogaz. Le digestat sortant de la cométhanisation est déshydraté puis séché avant d'être admis sur le réacteur de valorisation thermo-chimique. Enfin, le groupement s'est intéressé à la phase liquide issue de la déshydratation du digestat, traitée notamment avec un objectif de récupération de nutriments, en l'occurrence l'azote.

Après 18 mois de tests, la filière s'avère être robuste, cohérente et apte à répondre aux objectifs très ambitieux du projet Cométha. Les modifications ou adaptations apportées sont assez peu profondes et ne remettent pas en cause les hypothèses initiales. Le groupement a également réussi à identifier de manière très claire les principaux défis à relever dans la Phase 2 : la Phase 1 a permis d'affiner les paramètres dimensionnant pour l'unité pilote mais aussi pour l'installation industrielle.

# TEMPS D'ÉCHANGES

## La récupération du gaz carbonique a-t-elle été envisagée dans un ou plusieurs projets ?

**Pierre Hirtzberger** : Ce n'était pas un objectif initial des maîtres d'ouvrage qui ont des projets en cours sur ce sujet. Toutefois, certains groupements titulaires se sont intéressés à la question.

**Christophe Hug** : Dans la solution du groupement Tilia, une partie du dioxyde de carbone est réutilisée dans la méthanation.

## Est-il possible d'avoir un ordre de grandeur de rendement énergétique ?

**Pierre Hirtzberger** : Le rendement énergétique dépasse 100 % du pouvoir méthanogène théorique des intrants que les groupements utilisent. Autrement dit, avec la combinaison des systèmes de traitement, les quatre groupements sont parvenus à plus de 100 % de manière significative.

**Denis Penouel** : L'objectif pour le SIAAP et le Syctom est d'accompagner autant que faire se peut la politique nationale de transformation, portée par GRDF et GRT Gaz, de remplacement du gaz fossile qui transite dans le réseau national par du gaz renouvelable. Le bilan obtenu par les groupements titulaires est très largement exportateur de biométhane et ces chiffres sont tout à fait significatifs à l'échelle d'une région comme l'Île-de-France.

## L'aspect économique a-t-il été pris en compte ?

**Pierre Hirtzberger** : Les maîtres d'ouvrage sont soucieux d'obtenir des résultats techniques mais il y a un cadre budgétaire pour le projet Cométhath. Des engagements ont été pris par les quatre groupement titulaires sur les trois phases du projet avec un mécanisme financier spécifique aux deux premières phases. Sur la Phase 1, les groupements titulaires ont été en position de proposer un schéma d'analyse et de démarche de laboratoire, accompagné d'un prix, que les maîtres d'ouvrage ont jugé pertinents ou non. Les prix des quatre groupements titulaires retenus ont été jugés pertinents, cohérents avec les évolutions scientifiques et techniques. Néanmoins, le Syctom et le SIAAP étaient conscients que ce prix pouvait bouger en fonction des résultats de la phase de recherche et de développement. Pour la Phase 3, les incertitudes sont plus nombreuses : le Syctom et le SIAAP ne savent pas ce qu'ils vont construire, ni ce que cela va coûter, mais ils se doivent de tenir un budget. Ce dernier s'élève à 70 millions d'euros.

**Christophe Hug** : Le groupement s'est attaché à avoir toujours une estimation aussi précise que possible des coûts sur le cycle de vie, pour l'aide à la décision et le choix des options techniques.

**Olivier Bernat** : Les groupements titulaires ne se trouvent pas dans une démarche de pure recherche où il s'agit simplement d'essayer de trouver les procédés les plus innovants qui ne seraient pas viables économiquement. Il est possible d'imaginer des solutions magnifiques en laboratoire mais qui sont extrêmement difficiles à gérer, voire très coûteuses. La Phase 3, est dans la ligne de mire du groupement John Cockerill. Dans tous les choix réalisés et toutes les orientations prises, les coûts d'investissement et d'exploitation ont été pris en compte.

## Quelle sera l'origine de la fraction organique résiduelle ?

**Pierre Hirtzberger** : Cette fraction organique résiduelle n'est pas encore produite aujourd'hui. Elle constitue un des flux sortants du futur centre Iury/Paris XIII. Les groupements titulaires ont travaillé avec les boues du SIAAP qui existent et avec la fraction organique résiduelle fournie par l'installation de traitement de déchets de Chagny, qui produit aujourd'hui une fraction organique résiduelle très semblable à celle qui serait produite à Iury/Paris XIII.

## Le retour au sol est-il intégré ou exclu par Cométhà ?

**Pierre Hirtzberger** : Le projet a été développé pour de la fraction organique résiduelle et des boues d'épuration, pour lesquelles le retour au sol pourrait devenir compliqué. Pour les fumiers équin, la problématique n'est pas tout à fait la même : il n'y a pas de perspective d'interdiction juridique mais les producteurs de ces déchets ont des difficultés à trouver des traitements adaptés.

**Denis Penouel** : Le fumier équin provient des écuries de Maisons-Laffitte, qui en produit chaque année 20 000 tonnes. Maisons-Laffitte a rencontré le Syctom et le SIAAP et leur a demandé de trouver une solution, de proximité. Les maîtres d'ouvrage ont alors intégré cet intrant dans ce partenariat d'innovation, l'idée globale étant que différents produits organiques pouvaient avoir la même finalité et contribuer à la transition énergétique. En l'occurrence, il s'agissait de démontrer que trois produits, c'était mieux que deux. Et peut-être deux, mieux qu'un.

## Le sulfate d'ammonium est aujourd'hui un déchet. Dans quelles conditions et quelle filière serait-il traité ?

**Pierre Hirtzberger** : Le sulfate d'ammonium a effectivement toujours le statut de déchet. Un travail administratif est donc nécessaire pour que ce déchet puisse être confirmé en tant que produit au sens juridique.

## La proportion de boues semble être plus importante que celle de fraction organique résiduelle : quelles sont les incidences ?

**Pierre Hirtzberger** : La « recette de cuisine » est différente dans les quatre groupements. Les deux produits sont très différents. Les boues d'épuration comprennent beaucoup d'eau alors que la fraction organique résiduelle est un produit plutôt sec. En matière brute, les quantités de boues d'épuration sont bien plus importantes, mais en matière sèche, c'est l'inverse. La priorité de Cométhà reste la fraction organique résiduelle.

## Le SIAAP a-t-il l'intention de prendre en compte le coût de la tonne traitée parmi les critères de sélection des candidats ?

**Denis Penouel** : Le coût de la tonne traitée sera effectivement pris en compte.

## S'il fallait faire quelque chose différemment pour cette Phase 1, quelle serait-elle ?

**Pierre Hirtzberger** : S'il fallait faire différemment, la phase de recherche et de développement serait allongée. La difficulté est de laisser le temps aux groupements titulaires de produire des résultats tout en obtenant des réponses rapidement. La Phase 1 a été un peu allongée de 4 à 5 mois par rapport au planning initial envisagé. Par ailleurs, il serait utile de laisser les groupements titulaires innover encore plus. Le Syctom et le SIAAP peuvent se permettre de prendre davantage de risques quand l'exploitation du service public au quotidien n'est pas menacée. En plus, les groupements titulaires sont complexes : il y a des chercheurs, des ingénieurs, des exploitants et des constructeurs qui doivent trouver leurs propres marques pour travailler ensemble.

**Denis Penouel** : Le plaisir du Syctom et du SIAAP est celui d'avoir fait travailler autant de professions qui ne se parlaient peut-être pas autant. Les chercheurs agissent sur le long-terme, les bureaux d'études ne sont pas des constructeurs et les entreprises ont une préoccupation économique évidente. Finalement tous ces acteurs ont été réunis en donnant cette double focale d'un travail très précis et d'une vision. Des rencontres avec des structures étrangères révèlent que le projet Cométhà intéresse : les villes de Los Angeles, New York et Singapour ont demandé les résultats.



## PERSPECTIVES

**Jacques Olivier**  
Directeur général  
SIAAP

Le partenariat entre le Syctom et le SIAAP est remarquable par son efficacité et pour avoir permis l'émergence d'une méthode de travail novatrice entre les deux services publics et les mondes de la recherche, de l'entreprise et de l'expertise. Une équipe multisectorielle et pluridisciplinaire a été constituée avec les deux structures publiques qui pilotent, challengent et rendent compte. Le Syctom et le SIAAP, ainsi que les assistants à maîtrise d'ouvrage qui les accompagnent, ont d'ores et déjà élargi leur vision et leurs compétences techniques et juridiques, grâce au partage de connaissances entre les deux mondes techniques : les déchets solides et les déchets liquides.

*« L'objectif final de ce travail est l'émergence d'une nouvelle filière de production d'énergie, susceptible d'être valorisée en France et à l'international. Il s'agit d'une des principales missions du service public à la française. »*

En participant activement à ce partenariat d'innovation, les quatre groupements d'entreprises contribuent d'une manière nouvelle et originale au développement et à la recherche en France. L'objectif final de ce travail est l'émergence d'une nouvelle filière de production d'énergie, susceptible d'être valorisée en France et à l'international. Il s'agit d'une des principales missions du service public à la française.

Le service public a également pour rôle d'œuvrer pour le progrès. Le Syctom et le SIAAP pourraient céder à la facilité et se replier sur l'existant, en abandonnant l'innovation d'intérêt général, mais ce n'est pas le chemin qu'ils ont choisi. En revanche, les maîtres d'ouvrage entendent les doutes et craintes, surtout après l'accident majeur de Seine Aval, et il apparaît plus que jamais nécessaire d'apporter les garanties de sécurité que chacun est en droit d'attendre des services publics. Ce sujet sera majeur dans le cadre de la future Phase 2.

Le Syctom et le SIAAP contribuent pleinement au choix de la Nation par la transition énergétique. Leur partenariat vient renforcer cette volonté, en participant activement à la recherche de solutions et pour la récupération et le recyclage des déchets. Afin de renforcer ce cercle vertueux de l'économie circulaire, les pouvoirs publics sont nécessaires pour adapter les réglementations. Il faut également former les agents et changer les comportements, notamment l'approche en silo si ancrée dans cette société.

Pour y contribuer, le seul choix réalisable est de passer en 2020 à la phase 2 du projet Cométhha !





**Martial Lorenzo**  
Directeur général des services  
Syctom

Le Syctom et le SIAAP considèrent que ce partenariat est une véritable réussite tant sur le fond que sur la forme, avec une collaboration très étroite entre les deux syndicats.

Par leur taille et les volumes de déchets liquides ou solides qu'ils traitent, ils sont non seulement uniques en région parisienne, mais également en France et en Europe. Le Syctom et le SIAAP ont donc des obligations et une responsabilité particulières, notamment en termes d'innovation.

Cependant, ils ont besoin de l'aide des représentants de l'État, non pas d'un point de vue financier, mais d'un point de vue réglementaire. Les deux syndicats travaillent en faveur de la transition écologique et énergétique mais de nombreux freins existent. La commande publique et le marché public constituent un carcan juridique, que le Syctom et le SIAAP aimeraient voir se délier afin qu'ils puissent poursuivre leurs innovations. Le partenariat d'innovation, récemment introduit dans le code des marchés publics, donne espoir pour l'avenir.

*« La commande publique et le marché public constituent un carcan juridique, que le Syctom et le SIAAP aimeraient voir se délier, afin qu'ils puissent poursuivre leurs innovations. Le partenariat d'innovation, récemment introduit dans le code des marchés publics, donne espoir pour l'avenir. »*

Le comité syndical du Syctom a décidé d'un moratoire sur l'unité de valorisation organique prévue dans le cadre du projet Ivry/Paris XIII afin de prendre le temps de réfléchir, de compter et d'évaluer, pour pouvoir finalement produire un projet adapté à l'évolution du contexte réglementaire. Pour autant, il y aura toujours une fraction organique résiduelle. À ce jour, la matière organique représente 30% d'une poubelle de 350 ou 400 kilogrammes et seulement 15 kilogrammes peuvent être captés dans le meilleur des cas, 2 kilogrammes dans le pire. Le Syctom traitant chaque année 1,8 million de tonnes de déchets, la matière organique résiduelle représente finalement 600 000 tonnes. Cette matière organique peut être compostée, saisie à la source et traitée autrement, mais il existe une marge entre les 70 000 tonnes de fraction organique résiduelle qui seraient extraites par l'unité de valorisation organique à Ivry/Paris XIII, et les 600 000 tonnes de matière organique résiduelle dans les poubelles.

Le coût total du projet Cométhà est de 100 millions d'euros, si l'ensemble de l'opération est réalisé. En fin de Phase 1, les 4 candidats ont reçu environ 10 millions d'euros. À titre de comparaison, en deux ans et demi, le Syctom a dépensé 13 millions d'euros pour expérimenter la collecte des déchets alimentaires à la source, qui ne relève pourtant pas de sa compétence. Le service public a en effet pour responsabilité de ne négliger aucune piste puisqu'il est impossible de se détourner de la question du contenu de la poubelle et de la façon dont il faut la traiter.

Le Syctom s'y prépare dans le projet de méthanisation, en partenariat avec le SIAAP, mais également sur le secteur de Gennevilliers, avec un autre grand syndicat, le Sigeif.

C'est le devoir du Syctom de poursuivre l'aventure Cométhà : il faut continuer d'ouvrir de nouvelles voies, d'anticiper et d'innover.

# FOCUS SUR QUATRE AXES DE RECHERCHE



## THÈME 1 : OPTIMISER LA MÉTHANISATION POUR TRAITER UN MÉLANGE ORIGINAL D'INTRANTS



**Fabrice Béline**

Directeur de recherche de l'unité OPAALE  
IRSTEA

“ *Tout seul, on va vite.  
Ensemble, on va loin* ”

*Grand Corps Malade,  
slameur*

Cette citation semble appropriée au partenariat d'innovation Cométhha puisqu'il s'agit de mélanger différents intrants afin d'aller plus loin dans la production de biogaz. Les deux objectifs majeurs du partenariat sont l'optimisation de la méthanisation pour traiter plusieurs intrants et la maximisation de la production de biogaz et de méthane.

Après une vingtaine d'années à travailler sur des sujets assez proches de la valorisation et du traitement des déchets et effluents organiques, il était visible dans les publications scientifiques que  $1 + 1$  était égal à 3, 4 et même 5 de temps en temps. Aujourd'hui, il semble que  $1 + 1$  égal plutôt 2, voire 3.

Finalement, sans révéler les solutions, il existe deux voies principales d'optimisation pour cette cométhanisation :

- >> les mélanges : peut-il y avoir des synergies sur ces mélanges ?
- >> les procédés : une conception originale ou un enchaînement de blocs fonctionnels original permet-il d'innover ?

Trois synergies sont possibles :

- >> une synergie rhéologique, en adaptant la teneur en eau du mélange au procédé. En mélangeant différents substrats, il est possible d'obtenir une teneur en eau optimale qui diffère selon les procédés ;
- >> une synergie réactionnelle, en fournissant les nutriments nécessaires aux différentes bactéries mises en jeu dans le procédé. Des substrats peuvent manquer de certains éléments et il est possible d'obtenir un milieu nutritionnel optimal en mélangeant deux intrants ;
- >> une synergie biologique, plus difficile à obtenir, avec des activations enzymatiques. Mélanger deux éléments permettrait d'en dégrader un davantage grâce aux enzymes produites par l'autre.

Concernant la voie des procédés, il est possible d'optimiser l'ensemble fonctionnel en choisissant différents réacteurs : infiniment mélangés, liquides, solides ou par piston. La méthanisation peut se faire à différentes températures. Lorsque la température oscille autour de 35°C, on parle de méthanisation mésophile. Autour de 55°C, il s'agit plutôt de méthanisation thermophile. Il est également possible de pré-traiter ou post-traiter la matière, voire d'imaginer des boucles de recirculation. Ces voies d'optimisation sont toutefois à mettre en regard des coûts qu'elles engendrent.



### André Pauss

Professeur du département  
de génie des procédés  
industriels  
UTC



### Simon Bigot

Ingénieur chargé  
d'affaires  
Sources

La méthanisation comprend plusieurs sous-ensembles. Dans un premier temps, il s'opère une transformation par phase hydrolysée des matières organiques polymériques en matières organiques plus simples, à partir des bactéries hydrolytiques. Ces matières hydrolysées vont alors être transformées, dans une phase d'acidogenèse, par les bactéries acidogènes, formant un mélange d'acides gras volatils et d'alcool. Ces acides sont ensuite transformés à leur tour par des bactéries acétogènes, dans une phase d'acétogenèse, en un ensemble de précurseurs de la méthanisation : l'acétate, l'hydrogène et le dioxyde de carbone. Les archéobactéries méthanogènes vont finir par transformer l'acétate, le dioxyde de carbone et l'hydrogène en biogaz, principalement composé de dioxyde de carbone et de méthane avec de l'eau.

Si toutes ces étapes sont intégrées dans un même réacteur, il est nécessaire de le gérer par rapport à l'étape la plus grande, c'est-à-dire la méthanogenèse. Grouper les étapes d'acidogenèse et d'acétogenèse dans un réacteur distinct du réacteur dédié à la méthanogenèse est une autre possibilité puisque ces dynamiques sont plus rapides et que ces bactéries se développent plus rapidement. Consacrer un deuxième réacteur à la méthanogenèse avec un temps de séjour différent permettra à la matière de prendre plus de temps à se dégrader, engendrant une réaction en deux étapes avec un étage d'hydrolyse et d'acétogenèse et un autre de méthanogenèse.

Le projet Cométha propose un cadre atypique puisqu'il consiste en un traitement commun d'intrants solides avec la fraction organique résiduelle et le fumier équin, et d'intrants liquides avec les boues d'épuration. L'enjeu est de trouver le type de procédé de méthanisation le plus adapté au traitement de ces intrants. Le groupement John Cockerill a retenu un système de traitement qui permet d'optimiser les différentes étapes biologiques afin de déplacer les équilibres réactionnels dans l'objectif de maximiser la conversion de la matière organique en biogaz, ce qui répond à un des objectifs du projet. Le système

de traitement doit aussi proposer une forte résilience à la variabilité des intrants autant en matière qualitative que quantitative. La résilience d'un procédé est sa capacité à rebondir face à un changement imposé, et à revenir à la situation initiale sans souffrir d'un dysfonctionnement biologique. Le système de traitement doit aussi fonctionner en voie liquide, permettant un accès facilité à la matière organique pour atteindre un meilleur taux de conversion de la matière organique en biogaz.

Ainsi, le groupement John Cockerill a fait le choix d'une digestion bi-étagée. Le premier étage est consacré à l'acidogenèse et est réalisé au sein d'un réacteur thermophile fonctionnant à 55°C. Il est couplé en série avec un réacteur mésophile fonctionnant à 37°C, siège de la méthanogenèse. Cette séparation des deux grandes étapes biologiques permet une production optimisée du biogaz.

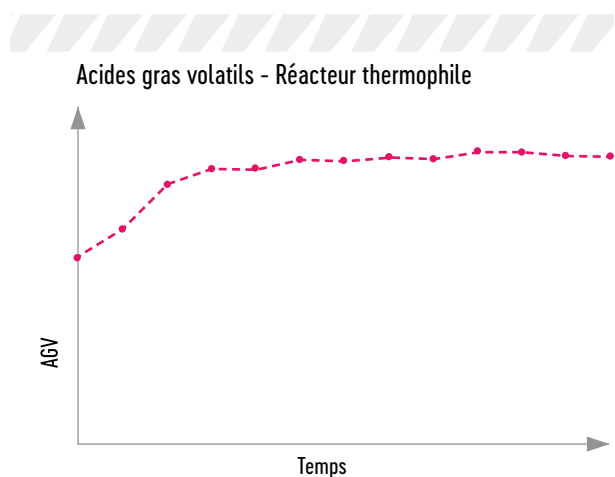
Le choix de la cométhanisation en voie liquide peut surprendre puisque le projet Cométha priorise le traitement de la fraction organique résiduelle, un intrant solide. Cependant, le groupement John Cockerill a retenu la voie liquide afin de disposer de réacteurs infiniment mélangés (CSTR), offrant robustesse, stabilité et facilité d'exploitation. L'innovation ne se trouve pas dans la mise en place de réacteurs infiniment mélangés, mais dans le couplage et la combinaison judicieuse entre un réacteur thermophile fonctionnant en série et un réacteur mésophile auquel il faut adjoindre un ensemble de procédés pour déplacer les équilibres réactionnels et favoriser la conversion de la matière organique en biogaz.

Les essais réalisés lors de la Phase 1 ont été réalisés en deux grandes étapes. La première portait sur la cométhanisation d'un mix restreint à partir de fraction organique résiduelle et de boues d'épuration afin d'optimiser les réacteurs thermophiles et mésophiles. Ces différents essais faisaient varier le temps de séjour des différents réacteurs et la charge appliquée pour optimiser le temps de séjour et la charge appliquée. Ces premiers essais ont également permis

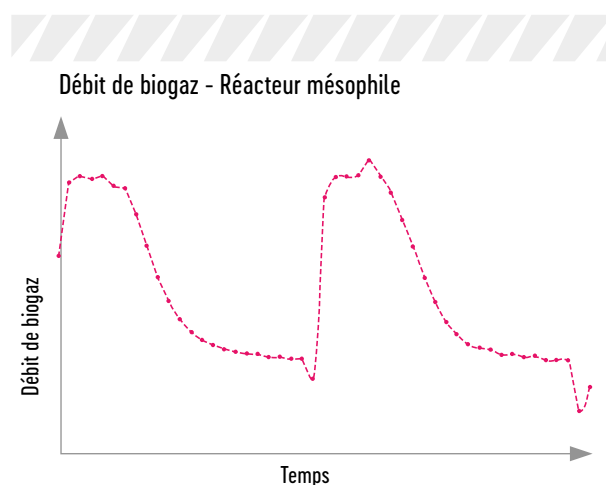
d'analyser le comportement du procédé face à ces intrants atypiques et d'étudier les réactions de l'ensemble. Enfin, il était nécessaire de déterminer les rendements de conversion et le niveau de transformation de la matière organique en biogaz. La deuxième étape a été réalisée sur un mix complet incluant, outre la fraction organique résiduelle et les boues d'épuration, du fumier équin. L'objectif était de valider les performances sur ces réacteurs thermophiles et mésophiles et de préciser les meilleurs paramètres pour la charge appliquée le du temps de séjour. Il s'agissait aussi d'étudier l'impact de l'intégration du fumier équin, d'augmenter la représentativité des essais en augmentant le volume réactionnel et de valider les rendements de conversion.

Les essais en mix restreint et en mix complet ont suivi une méthodologie similaire, sur un volume plutôt réduit. Les réacteurs du mix restreint offraient un volume utile de 5 litres, tandis que pour les essais de mix complet, il s'agissait d'un volume de 15 litres. Les deux réacteurs fonctionnaient en mode infiniment mélangé. Durant les expérimentations, les paramètres suivants ont été surveillés : teneur en acides gras volatils, production de méthane (débit et qualité), teneur en matières sèches et teneur en matières organiques entre l'entrée et la sortie. Ces réacteurs ont été alimentés de manière semi-continue, quotidiennement.

Le résultat de la première phase en mix restreint a permis de constater une très forte conversion des intrants en acides gras volatils dans l'étape thermophile. Dans la phase mésophile, ces acides gras volatils ont été transformés en méthane avec un taux d'expression du potentiel méthanogène conforme aux attentes, ainsi qu'une excellente résilience du procédé face aux variations de charge et aux à-coups. Les performances ont été maintenues pendant toute la durée des essais pour une même charge appliquée.



La deuxième phase en mix complet, avec le fumier équin, a permis de confirmer les résultats précédents et de démontrer l'intérêt de cet intrant en quantité restreinte dans le mélange de fraction organique résiduelle et de boues d'épuration. En effet, le fumier équin permet d'équilibrer le rapport carbone/azote et d'augmenter la production de biogaz, tout en levant l'inhibition à l'ammonium. Les paramètres de dimensionnement ont également été confirmés dans cette deuxième étape et les différents dysfonctionnements rencontrés ont finalement permis d'élaborer des solutions en prévision des Phases 2 et 3.



Les essais ont donc confirmé l'intérêt de la cométhanisation bi-étagée en voie liquide et ont mis en évidence l'intérêt de la séparation des deux phases, thermophile et mésophile, permettant d'exprimer le maximum du potentiel méthanogène des intrants. Cette étape a également permis de montrer la résistance aux variations de charge du réacteur. L'ajout de fumier équin, qui n'était pas une priorité au départ, a prouvé son intérêt puisqu'il a permis de stabiliser la production et le rapport carbone/azote, et d'obtenir un système de méthanisation performant atteignant des rendements en méthane importants.



**Stéphane Hattou**

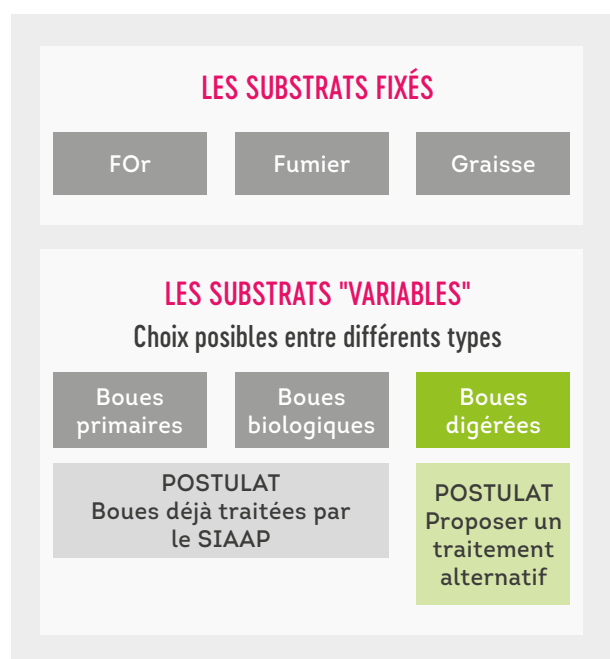
Directeur R&D  
Arkolia Énergies

Le Sycotom et le SIAAP souhaitaient savoir s'il existait un mélange optimal permettant d'atteindre 100 % du taux d'expression du potentiel méthanogène. Il s'agit d'un objectif ambitieux et de nombreuses réflexions ont été lancées quant aux différentes conditions de procédé. Le groupement conduit par Suez a fait le choix de ne pas utiliser de boues d'épuration primaires ou secondaires, mais de se focaliser sur les boues digérées avec le postulat d'apporter une solution alternative et complémentaire à ce qui est réalisé sur les sites du SIAAP, où les boues d'épuration sont déjà méthanisées. Le groupement a ainsi retenu un mix d'intrants incluant fraction organique résiduelle, boues d'épuration digérées, fumier équin et graisses. Le groupement devait ensuite choisir entre réacteur infiniment mélangé (CSTR) ou réacteur piston. La nature des substrats étudiés a finalement révélé que

la fraction organique résiduelle, le fumier équin ou les boues d'épuration digérées pouvaient être déshydratées, permettant d'opter pour la voie épaisse. De plus, la voie épaisse est compatible avec un réacteur piston, plus performant qu'un réacteur CSTR. Par ailleurs, l'hydrolyse biologique a été retenue plutôt que l'hydrolyse thermique. Cette dernière intervient plutôt en amont de la cométhanisation tandis que l'hydrolyse biologique se déroule à l'entrée du réacteur piston sous une suite de réacteurs agités.

Afin de mimer ce fonctionnement piston et de vérifier que les temps de séjour partiels à l'intérieur du réacteur piston étaient maîtrisés, il était nécessaire de partir d'un premier compartiment, de l'alimenter et le soutirer afin de constituer l'alimentation d'un deuxième compartiment et ainsi de suite. L'alimentation se situe en bas du pilote de manière à ne jamais faire entrer d'oxygène puisque le pilote doit toujours se trouver en voie anaérobie.

Le travail sur l'hydrolyse a été réalisé avec des boues hydrolysées d'un point de vue thermique. Cette partie a été effectuée au sein du laboratoire DEEP de l'INSA à Lyon sur un réacteur de 20 litres basé sur trois températures, trois durées, quatre mélanges différents et deux produits constitués à partir des substrats sélectionnés. Afin d'évaluer l'impact de l'apport d'une éventuelle hydrolyse, des mesures du potentiel méthanogène ont été réalisées par rapport à des référentiels de produits faits sans hydrolyse. À chaque étape, les répercussions sur le taux d'expression du potentiel méthanogène et sur la cinétique étaient évaluées.



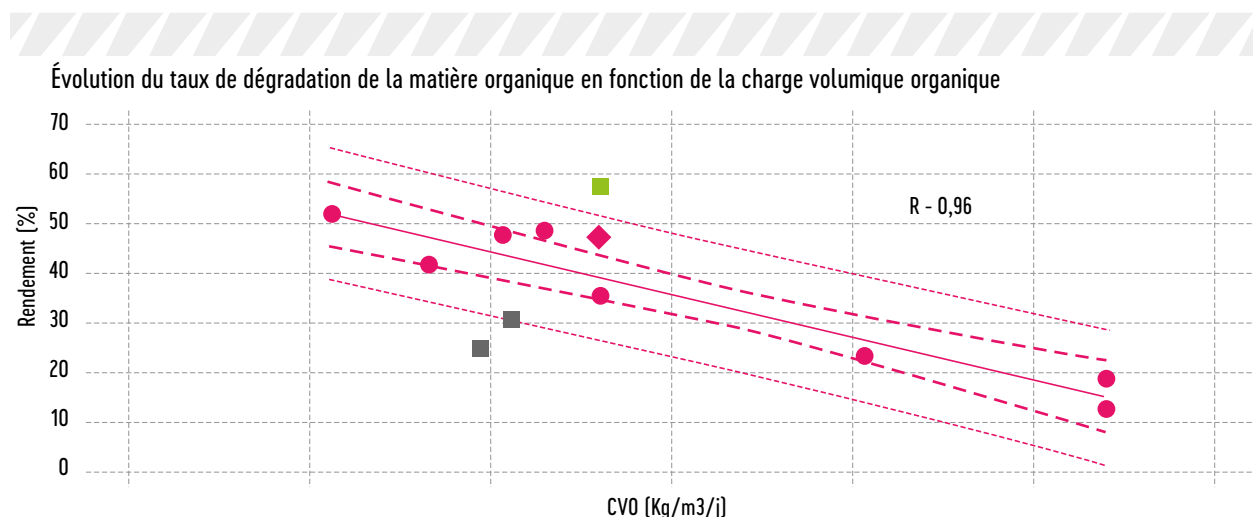


Dans un digesteur en voie épaisse, une recirculation de digestat brut est classiquement pratiquée. L'avantage de cette recirculation de digestat brut est de diminuer la siccité en entrée de digesteur et de pouvoir finalement fonctionner à des siccités importantes. Pour autant, l'effet piston se perd progressivement puisque le process tend vers un fonctionnement de réacteur de type CSTR. Le choix de ne pas recirculer le digestat brut a donc été fait et des mesures rhéologiques ont été mises en place afin de connaître le seuil d'écoulement du mix d'intrants en entrée de digesteur. Elles ont permis de déterminer la siccité maximale à laquelle le système pouvait aller avant blocage du digesteur. Le groupement Suez a alors pu définir les siccités d'entrée du mélange à l'entrée du digesteur, sans recirculation du digestat brut, afin de conserver l'effet piston.

La deuxième phase de tests réalisés portait sur un fonctionnement en milieu concentré, plus sensible aux phénomènes d'inhibition puisqu'il y a moins d'eau et puisque les inhibiteurs sont plus concentrés. De plus, sur les digesteurs à forte siccité, les cinétiques d'hydrolyse sont ralenties. Des essais discontinus en batch ont alors été réalisés afin de déterminer les seuils d'inhibition à partir desquels il était possible de rencontrer des problèmes au niveau biologique. Afin d'adapter les biomasses et de se rendre compte du seuil maximal avant de rentrer en inhibition, des alimentations successives ont été réalisées sur différents mélanges. La caractérisation de la matière a permis de connaître la dégradation maximale des matières organiques en fonction des quantités de carbohydrate protéine et lipide de chaque constituant et de travailler sur des paramètres biologiques tels que les ratios carbone/azote. Par la suite, quatre mélanges ont été définis avec différentes proportions d'intrants.

Le graphique ci-dessous représente la dégradation de la matière organique en fonction de la charge organique. Chaque point représente deux mois d'essai en période stabilisée sur un total de 17 mois d'essais de période stabilisée. Les essais ont permis de calculer les volumes de chaque compartiment à l'intérieur d'un piston afin d'obtenir une dégradation optimale, basée sur une répartition différente des volumes en fonction des mix d'intrants. Des essais de reproductibilité ont également été réalisés.

Après l'optimisation du mélange et du fonctionnement du process piston, les résultats atteignent 100 % du taux d'expression du potentiel méthano-gène. Si une étape d'hydrolyse est incluse, un taux d'expression du potentiel méthano-gène supérieur à 100 % peut être atteint car la matière est travaillée préalablement. La méthodologie mise en place au sein du groupement Suez a permis de répondre à la demande initiale du projet Cométhha puisque les proportions ont été optimisées avec des configurations optimales. Des modèles d'extrapolation ont été mis en place et un taux d'expression de 100 % du potentiel méthano-gène a été validé à l'échelle du pilote. L'hydrolyse biologique, dont l'intérêt a été démontré par l'INSA à Lyon, est intégrée au niveau du pilote. Tous les essais ont finalement permis de proposer un design de pilote pour la Phase 2 qui s'appuie sur des performances démontrées à l'échelle du laboratoire et de pilotes de 100 litres.



# TEMPS D'ÉCHANGES

Afin de maximiser la production de biogaz, quelle est la voie d'optimisation la plus intéressante ? Celle sur les intrants ou celle sur les procédés ?

**Stéphane Hattou** : L'association de fraction organique résiduelle et de boues d'épuration est une véritable opportunité, même si ces produits présentent des caractéristiques parfois opposées. L'écoulement à l'intérieur du digesteur et l'optimisation des temps de séjour sont des paramètres à travailler, que ce soit en voie liquide ou épaisse, afin d'optimiser l'association des intrants. La siccité peut aussi être modifiée en amont de la méthanisation, par traitement biologique ou thermique. En effet, entre boues d'épuration et fraction organique résiduelle, certains éléments diffèrent fortement : la fraction organique résiduelle s'hydrolyse dix fois plus vite que les boues d'épuration et un prétraitement est pertinent pour ces dernières. La dégradation de la matière organique diffère également entre ces deux intrants, alors que la dégradation du fumier équin est intermédiaire.

**André Pauss** : Des problèmes rhéologiques apparaissent même en voie liquide. Deux solutions sont possibles :

- un process en deux étapes, thermophile puis mésophile, avec un temps de séjour optimisé afin de maximiser la production. Le fumier équin est extrêmement bénéfique puisqu'il permet de lever les inhibitions et de stabiliser le rapport carbone/azote ;
- le prétraitement des boues d'épuration, qui améliore ensuite la méthanisation.

La première étape de la digestion bi-étagée produit-elle du méthane ?

**Simon Bigot** : L'objectif de la première étape est de maximiser la production d'acides gras volatils afin d'alimenter le réacteur mésophile. Pendant l'étape thermophile, une production de méthane peut toutefois être identifiée mais elle reste insignifiante par rapport à l'étape mésophile.

Quel type de boues est utilisé par John Cockerill ?

**Simon Bigot** : Le groupement utilise des boues biologiques non-digérées.

Deux réacteurs valent-ils mieux qu'un seul en termes de temps de séjour ? L'hydrolyse permet-elle de diminuer les temps de séjour ? Si oui, de combien ?

**Stéphane Hattou** : La voie épaisse, pour minimiser les volumes, l'étape préalable d'hydrolyse et l'optimisation des temps de séjour permettent d'avoir un temps de séjour global réduit. Une productivité maximale sur un volume de digesteur le plus petit possible peut ainsi être obtenue.

**Simon Bigot** : La question de la rentabilité du procédé est finalement liée à une question d'échelle. Il est possible de séparer les phases sur un tonnage faible, mais le coût sera plus important. Avec des tonnages importants, le temps global diminue et la rentabilité est atteinte.



## THÈME 2 : RÉCUPÉRER LES NUTRIMENTS



**Antoine Dalibard**  
Chef de groupe  
Fraunhofer IGB

Les principaux nutriments essentiels à la croissance des organismes vivants et des plantes en particulier sont l'azote, le potassium, le phosphore, le calcium et le soufre. Ces nutriments arrivent dans les sols par l'intermédiaire des engrais, notamment minéraux. Retirés avec les plantes lors de la récolte, ils se retrouvent après consommation des produits dans les déchets solides et liquides, ou en tant que résidu des procédés de transformation des plantes. Actuellement, la quasi-totalité de ces nutriments est donc perdue, alors que des procédés très énergivores sont nécessaires pour éliminer ces nutriments dans les systèmes d'épuration d'eau. De plus, l'azote séparé ne peut être utilisé puisqu'il est évacué à l'état gazeux dans l'atmosphère. Des sels d'aluminium et de fer sont utilisés pour précipiter le phosphate, qui ne peut ainsi pas être utilisé comme engrais. Pourtant, la production d'engrais minéraux consomme énormément de ressources fossiles : les engrais azotés nécessitent de l'ammoniac dont la production requiert du gaz naturel. De plus, les engrais phosphatés sont extraits de gisements et un procédé de purification énergivore est nécessaire. Enfin, la surfertilisation des sols, engendrée par l'utilisation excessive des engrais, et notamment l'épandage de fumier, entraîne une pollution des eaux de surface et des eaux souterraines, qui entraîne à son tour des phénomènes tels que l'eutrophisation.

Dans le cadre du projet Cométha, le groupement Tilia a développé et expérimenté plusieurs technologies pour tenter de réduire ces pertes de nutriments afin de diminuer la production d'engrais minéraux.

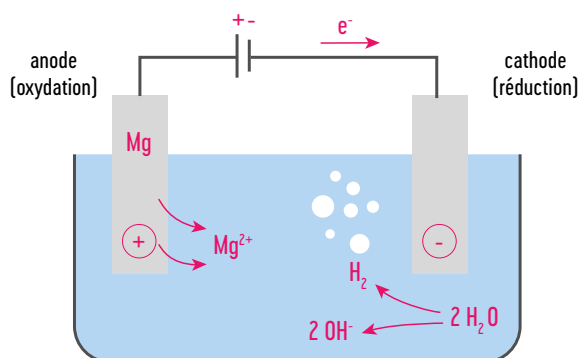
Pour la première technique, la récupération chimique du phosphore, un sel de magnésium est ajouté au substrat à traiter. Ce dernier réagit avec l'ammonium et le phosphate du substrat, pour ensuite être précipité en phosphate de magnésium d'ammonium, plus connu sous le nom de struvite. Après séchage et déshydratation, il est utilisé sous forme de sel et peut être directement utilisé en tant qu'ajout nutritif dans les engrais. Le rendement et la qualité dépendent fortement des substrats traités, de la qualité du produit obtenu, du rendement de la performance du système et des paramètres du procédé.

La seconde technique est la récupération électrochimique du phosphore. Développée et brevetée par le Fraunhofer IGB de Stuttgart, elle ne requiert pas l'ajout de produits chimiques, mais apporte le magnésium nécessaire à la réaction de précipitation par voie électrolytique. Un courant fournissant le substrat en ions de magnésium est appliqué à une anode de magnésium afin de précipiter la struvite. Ce procédé permet d'ajuster la valeur du pH sans avoir à ajouter de solutions caustiques, car il y a une libération d'ions hydroxyde à la cathode qui permet d'augmenter le pH et d'optimiser la réaction de précipitation de la struvite.

### Récupération électro-chimique du phosphore

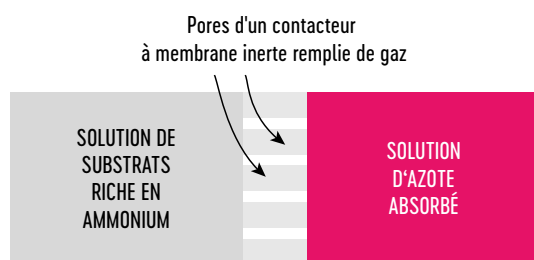
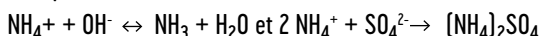
Côté anode (+) :  $\text{Mg} \rightarrow \text{Mg}^{2+} + 2 \text{e}^-$

Côté cathode (-) :  $2 \text{H}_2\text{O} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 (\text{g}) + 2 \text{OH}^-$



Enfin, la technologie employée pour la récupération de l'azote est la technologie AmmoRe®. Des contacteurs à membranes sont utilisés avec une solution absorbante. L'ammonium se volatilise en ammoniac, passe de l'autre côté de la membrane et est récupéré dans la solution absorbante. Le traitement par membrane permet d'obtenir un produit très pur en sortie, sous forme de sel.

### Récupération AmmoRe(r) de l'azote



Plusieurs essais ont été menés par le groupement Tilia afin d'évaluer ces différentes technologies. Les objectifs étaient de déterminer le ou les procédés de récupération des nutriments les plus adaptés, leurs paramètres de fonctionnement optimal, leurs positions optimales dans la chaîne de traitement et leurs coûts. Différents paramètres et ajouts chimiques ont été utilisés afin d'évaluer le rendement de réaction, pour finalement trouver un optimum de fonctionnement. Les résultats des essais ont finalement permis de produire une évaluation technique sur le volume de nutriments disponibles, la qualité du filtrat, les concentrations en phosphore et en azote, et la demande de produits chimiques que nécessite chaque procédé. Une évaluation économique a également été réalisée, par rapport à la consommation énergétique et à tous les composants utilisés pour le procédé tels que l'acide sulfurique et l'acide nitrique, et au regard de la revente des nutriments. Cette double évaluation, économique et technique, a finalement permis de choisir la meilleure technologie, et de la placer de la façon la plus pertinente dans la chaîne de traitement imaginée par le groupement Tilia.



**Xavier Lefebvre**

Directeur adjoint du CRITT GPTE  
INSA Toulouse

L'un des objectifs du partenariat d'innovation Cométhha est la valorisation de l'ensemble des sous-produits de la matière, qu'elle soit organique ou minérale. Pour valoriser la matière minérale, générée notamment par la gazéification en eau supercritique retenue par le groupement VINCI Environnement, deux types de solutions ont été envisagées : une solution existante - un système conventionnel de nitrification/dénitrification - et une solution beaucoup plus innovante - le procédé de chimio-sorption transmembranaire (TMCS). La gazéification en eau supercritique génère plusieurs sous-produits intéressants : les saumures, un effluent clair et un condensat. Préalablement, une séparation de phase apparaît nécessaire afin de récupérer des sables et des résidus minéraux d'une part, et d'autre part de générer un effluent clair envoyé en chimio-sorption transmembranaire.

Les saumures sont des effluents très concentrés, composés majoritairement de matières minérales précipitées ou agglomérée, où le phosphore est présent. La valorisation du phosphore a été écartée car les analyses et les caractérisations des saumures ont révélé une réelle difficulté pour la récupération de ce minéral.

Les autres effluents de la gazéification sont les condensats, composés de bicarbonate et d'ammonium. Ainsi, le groupement VINCI Environnement s'est essentiellement intéressé à l'azote et a retenu le procédé de TMCS, pour chimio-sorption transmembranaire, qui se caractérise par un enchaînement d'opérations unitaires permettant de récupérer l'ammonium contenu dans l'effluent clair. Ce dernier n'a d'intérêt que s'il est possible de le valoriser et, en août 2019, un amendement à la norme engrais a permis d'y introduire tous les produits azotés d'origine agricole ou les produits d'effluents gazeux contenant de l'ammonium.

La première étape du procédé TMCS consiste à ajuster le pH. L'intérêt du système développé est de pouvoir bénéficier d'une source interne d'alcalinité, le bicarbonate contenu dans l'effluent clair, pouvant générer une base permettant d'élever le pH. Si nécessaire, un ajout de base exogène peut être effectué. La deuxième étape est basée sur des systèmes de précipitation afin de protéger la membrane, qui ne doit pas être colmatée. Ensuite, pour faciliter l'extraction de l'ammoniac, la troisième étape consiste à modifier la température. Dans ce cas de figure, le pilote imaginé par le groupement génère beaucoup de chaleur excédentaire, qu'il est possible d'utiliser. Enfin, la quatrième étape est l'extraction de l'ammoniac par un module membranaire, avec une production de sulfate d'ammonium à partir de l'acide sulfurique. Le carter membranaire, composé de fibres, contient l'effluent avec l'ammoniac et de l'acide sulfurique en circulation. Un phénomène de désorption puis d'adsorption de l'ammoniac à travers les pores de la membrane dans la phase gaz intervient. Finalement, du sulfate d'ammonium est obtenu

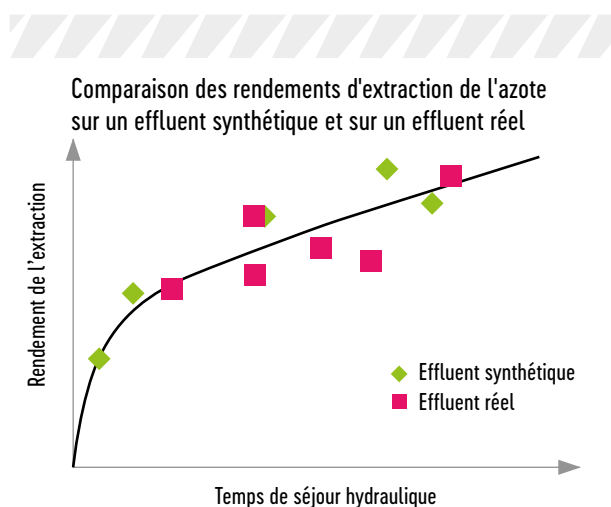
Bien que des unités de TMCS soient déjà déployées, cette technologie reste innovante car son objet de valorisation dans le cadre du projet Cométhha est différent. Le procédé a déjà été appliqué en Suisse sur des digestats de boues avec des résultats très intéressants et des rendements d'extraction de l'azote supérieurs à 80 %. L'objectif du groupement VINCI Environnement était de réfléchir à l'applicabilité de cette technologie dans le cadre du projet, sur un condensat produit à partir de la gazéification d'un digestat de boues d'épuration, de fraction organique résiduelle et de fumier équin.



Conditionnement de l'effluent et déplacement de l'équilibre  $\text{NH}_4 > \text{NH}_3$ 

L'INSA utilise cette technologie depuis quatre ans et a donc accumulé un certain nombre de savoir-faire, notamment en étudiant les facteurs d'optimisation. Les rendements d'extraction sont dépendants d'un certain nombre de paramètres qui peuvent être le temps de séjour, le temps de contact dans le contacteur, le pH et la température.

Cette technologie est assez robuste et peu dépendante de la matrice. Elle produit des résultats assez proches, autant sur un effluent synthétique que sur un effluent réel (voir graphique ci-dessous), avec des rendements pouvant atteindre 90 %. La compacité du procédé TMCS est aussi intéressante si une contrainte foncière s'impose dans le cadre du projet Cométha.



Le groupement s'est aussi intéressé à l'intégration énergétique. Lorsqu'un bilan énergétique est réalisé, il est obligatoire d'avoir la même unité et l'unité utilisée ici est le kilowattheure (kWh) par kilo d'azote (KgN). Le procédé TMCS a différents postes : il faut ajouter de la chaleur, de la soude et de l'acide. Après essais, il apparaît que le procédé permettait de déconcentrer l'effluent de manière importante (jusqu'à 80 %), avec 20 % restant sur la station d'épuration du SIAAP par rapport à un traitement complet de cet effluent azoté. Finalement, cette technologie permettrait de faire des économies assez significatives en énergie, à hauteur de 30 %.

En conclusion, la filière complexe de TMCS choisie par VINCI Environnement entraîne la récupération de la masse minérale sous forme de sable via les saumures et sous forme d'ammonium.



**Fabien Esculier**

Coordinateur du programme de recherche Ocapi et chercheur LEESU, École des Ponts Paris Tech

Le programme Ocapi s'intéresse au métabolisme urbain et au devenir des matières organiques des villes, notamment les urines, les matières fécales et les biodéchets. En 1850, Paris avait une grande unité de production de sulfate d'ammonium à partir de ces matières organiques, sulfate qu'elle exportait en Angleterre. Le projet Cométhha conduit à s'intéresser de nouveau au sulfate d'ammonium.

L'arrêt des travaux sur la production de sulfate d'ammonium correspond à l'invention des déchets urbains et au moment où les villes se découplent des champs. Les matières organiques deviennent des matières à éliminer au moindre coût, alors que les ressources fossiles permettent de compenser l'absence ou la faible valorisation de l'énergie et des nutriments contenus dans la matière organique que la ville produit. Cette période se termine progressivement, accompagnée d'un mouvement fort sur l'énergie, en lien avec le changement climatique : une des solutions serait alors de convertir le carbone de la matière organique en énergie, afin d'augmenter la capacité énergétique d'un pays sous-alimenté. Une prise de conscience sur la récupération des nutriments en France est aussi en cours, notamment car les engrais azotés nécessitent de grandes quantités d'énergie fossile. L'usine AZF qui les fertilisait a explosé il y a

dix-huit ans, le gisement du gaz de Lacq qui fournissait les engrais azotés français est quasiment vide et le gisement de la mer du Nord est presque épuisé. L'Union européenne a classé le phosphore comme ressource critique. Pour son approvisionnement, la France n'a pas de phosphore fossile et l'importe intégralement pour l'ajouter sur ses cultures afin de permettre l'alimentation.

Le programme de recherche Ocapi s'intéresse à la séparation à la source. Si les matières non consommées (urines, matières fécales et déchets alimentaires) sont considérées comme des ressources, la séparation à la source peut permettre d'obtenir les matières les plus pures et de poursuivre des voies de valorisation très intéressantes. En revanche, lorsqu'il y a collecte et séparation, il est impossible de considérer qu'il y aura un tri optimal. L'enjeu est donc de valoriser au mieux les déchets alimentaires qui se retrouveront dans les fractions non triées des déchets que produit la ville. La récupération des nutriments est alors d'intérêt général. Cependant, les freins sont nombreux : les modèles économiques et les réglementations rendent difficile la mise en œuvre de filières et circulations vertueuses d'un point de vue écologique.

# TEMPS D'ÉCHANGES

## Quels sont les freins et leviers pour la récupération des nutriments ?

**Xavier Lefebvre** : La plus grosse difficulté concerne le phosphore car il est déjà possible de le séparer et de le précipiter en solution dans les digestats. Le SIAAP utilise du chlorure ferrique, formant des complexes très stables, qui doivent être séparés et purifiés afin de créer un produit valorisable. En revanche, récupérer une quantité significative de phosphore dans un digestat est presque une impasse. Pour l'azote, il n'y a pas vraiment de difficultés hormis une considération énergétique à prendre en compte : il s'agit de le traiter complètement, ce qui requiert beaucoup d'énergie, ou de le valoriser en consommant un peu moins d'énergie. Fabriquer de l'ammonium est possible, même si cela consomme de l'énergie.

**Antoine Dalibard** : L'énergie est effectivement un frein mais le prix de l'énergie fossile va augmenter et les différentes technologies de récupération des nutriments vont devenir compétitives sur le marché. Elles permettront peut-être de lever les barrières physiques ou techniques.

## Quelle est la situation réglementaire actuelle ?

**Xavier Lefebvre** : La norme NF U42-001 a été publiée après quatre années de travaux, sans mise en application obligatoire. Cette dernière est attendue au premier semestre 2020, et plus vraisemblablement en juin-juillet 2020. Les produits, le sulfate ou le nitrate d'ammonium, ne posaient pas de problème mais deux procédés ont été intégrés : le stripping et le lavage de gaz/traitement d'air dans les stations d'épuration et les installations de méthanisation. Les procédés évoqués précédemment dans les présentations nécessiteraient vraisemblablement un nouveau dossier technique pour être admis au sein de cette norme.

## Pourquoi privilégier la production de sulfate d'ammonium et non celle de nitrate d'ammonium ?

**Xavier Lefebvre** : Utiliser de l'acide sulfurique ou de l'acide nitrique pour faire du nitrate d'ammonium ne va pas changer les performances. L'enjeu est la solubilité du produit et de sa précipitation, bien que le nitrate d'ammonium soit assez soluble dans l'eau. Finalement, tout dépend de la demande.





## THÈME 3 : EXPLORER DE NOUVELLES SOLUTIONS POUR LA TRANSFORMATION DU DIGESTAT AU SERVICE DU BILAN ÉNERGÉTIQUE



**Anthony Mazzenga**  
Directeur gaz renouvelables  
GRTgaz

Dans les différentes solutions mises en avant par les groupements, la méthanisation est fondamentale. En septembre, 107 unités de méthanisation injectant du gaz dans les réseaux de GRTgaz et participant à la décarbonation du mix énergétique français ont été enregistrées. Dans son scénario 100 % gaz renouvelables à horizon 2050, l'Ademe considère que 30 % du gaz proviendra de la méthanisation et que 40 % du gaz sera produit par des procédés thermochimiques et notamment par pyrogazéification.

Dans le cas du projet Cométha, les procédés thermochimiques permettent d'envisager une transformation complète de la matière issue de la méthanisation et d'éviter des retours au sol non souhaités.

Ces matières sèches ou déshydratées sont généralement traitées par combustion ou par incinération. La matière est oxydée grâce à l'air, et de la chaleur voire de l'électricité sont produites, ainsi que des cendres et des mâchefers. Ces procédés sont parfaitement connus et maîtrisés et sont utilisés quotidiennement par le Syctom et le SIAAP pour le traitement de leurs déchets ou de leur digestat, mais ils ne trouvent un intérêt que s'il y a un besoin de chaleur à proximité.

À l'inverse, d'autres procédés thermochimiques permettent de produire des composés d'intérêts ou des composés dont la consommation est stable durant l'année. Ces procédés regroupent principalement la torréfaction, la pyrolyse et la carbonisation

MATIÈRES SÈCHES		MATIÈRES LIQUIDES (≤ 25% MATIÈRES SÈCHES)
<b>Combustion et incinération</b>	<b>Procédés de pyrogazéification (torréfaction, pyrolyse, carbonisation hydrothermale)</b>	<b>Gazéification en eau supercritique</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; Chaleur</li> <li>&gt; Cogénération</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; Chaleur</li> <li>&gt; Cogénération</li> <li>&gt; Biométhane / H<sub>2</sub></li> <li>&gt; Carburant liquide</li> <li>&gt; Produits chimiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; Biométhane / H<sub>2</sub></li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; Cendres</li> <li>&gt; Mâchefers</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; Résidu solide à haut PCI</li> <li>&gt; Cendres</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; Sels</li> <li>&gt; Saumure</li> </ul>



hydrothermale. Ils se différencient en fonction du niveau de température auquel les intrants sont portés, et de la présence ou non d'agents gazéifiants (air, oxygène, vapeur d'eau). En fonction des recettes, des gaz de synthèse - ou syngaz - contenant plus ou moins de méthane, d'hydrogène, de monoxyde de carbone, de dioxyde de carbone et d'autres composés, sont obtenus. Ces syngaz peuvent être immédiatement envoyés vers des chaudières ou vers des turbines, ou conduits en méthanation, pour obtenir du méthane voire de l'hydrogène. En outre, la fraction d'huile contenue dans les syngaz issus de pyrolyse peut être récupérée pour créer des carburants liquides. De nombreux carburants liquides de deuxième génération sont ainsi issus de procédés de gazéification suivie d'une synthèse chimique. Des résidus solides à haut pouvoir calorifique, valorisables en combustion ou en incinération, peuvent aussi être obtenus quand la matière n'est pas totalement décomposée. Un dernier procédé thermochimique va permettre de traiter des matières liquides avec des

taux de matière sèche inférieurs à 25 %. Il s'agit de la gazéification en eau supercritique. Ce procédé est adapté aux éléments qui ne peuvent être incinérés, ou qui, avant incinération, nécessitent d'enlever le maximum d'eau à travers des centrifugations et des séchages. Avec la gazéification en eau supercritique, ces éléments sont directement traités pour produire un syngaz, ainsi que des sels ou de la saumure.

Les procédés thermochimiques fonctionnent très différemment en fonction des matières qu'ils peuvent traiter ou dans les composés qu'ils produisent. Les niveaux de maturité sont aussi assez divers : ils sont souvent moindres que l'incinération ou la combustion qui ont de nombreuses années de retour d'expérience, mais certains procédés atteignent un *technology readiness level* de 7-8. Ils peuvent donc être déployés dans le planning prévu par le projet Cométhà.

GRTgaz souhaite tendre vers ces procédés qui permettront de créer des gaz de synthèse. Intégrer ces gaz dans les réseaux est d'ores et déjà faisable.







**Olivier Bernat**  
Directeur technique  
secteur  
John Cockerill



**Nabil Mabrouk**  
Directeur commercial  
John Cockerill

Pour traiter le digestat issu de la cométhanisation, le groupement John Cockerill propose d'utiliser une technologie déjà développée : le réacteur thermo-chimique NESAS<sup>®</sup>. Ce dernier est par exemple utilisé pour le grillage de minerai dans l'hydroméallurgie extractive, la régénération de charbons actifs ou, la pyrolyse de boues issues de l'industrie pétro-chimique. En revanche, il n'a jamais été utilisé pour la torréfaction ou la pyrolyse d'intrants similaires à ceux du projet Cométha et les essais menés en Phase 1 visaient notamment à s'assurer que le réacteur était compatible avec ces intrants.

Le réacteur NESAS<sup>®</sup> est un réacteur à plusieurs étages, à soles multiples. Le digestat est admis par le haut du réacteur, et descend progressivement d'étage en étage. Ce dispositif permet à la fois de retourner le produit, de le faire avancer sur la sole pour ensuite le faire descendre à l'étage suivant. Ce réacteur permet de maîtriser la température étage par étage, l'atmosphère souhaitée - plus ou moins pauvre en oxygène - et le temps de séjour. Dans un même réacteur, il est donc possible de remplir plusieurs fonctions au fur et à mesure que le produit progresse. Avec d'autres réacteurs, il peut exister des problématiques de fusion et de collage des résidus minéraux dans les étages inférieurs où les températures sont les plus élevées, tandis que le réacteur NESAS<sup>®</sup> est particulièrement adapté pour éviter ces problèmes.

Finalement, les avantages de ce réacteur sont multiples :

- >> le process est complètement interne, ce qui évite des équipements de transfert d'une zone à l'autre ;
- >> le réacteur accepte les variations de charge et de nature de produit, ce qui est adapté aux intrants versatiles et flexibles du projet Cométha ;
- >> la régulation des températures est précise, étage par étage, ce qui constitue un avantage considérable, puisque de par sa conception, ce procédé ne génère que de très faibles entraînements de poussière.

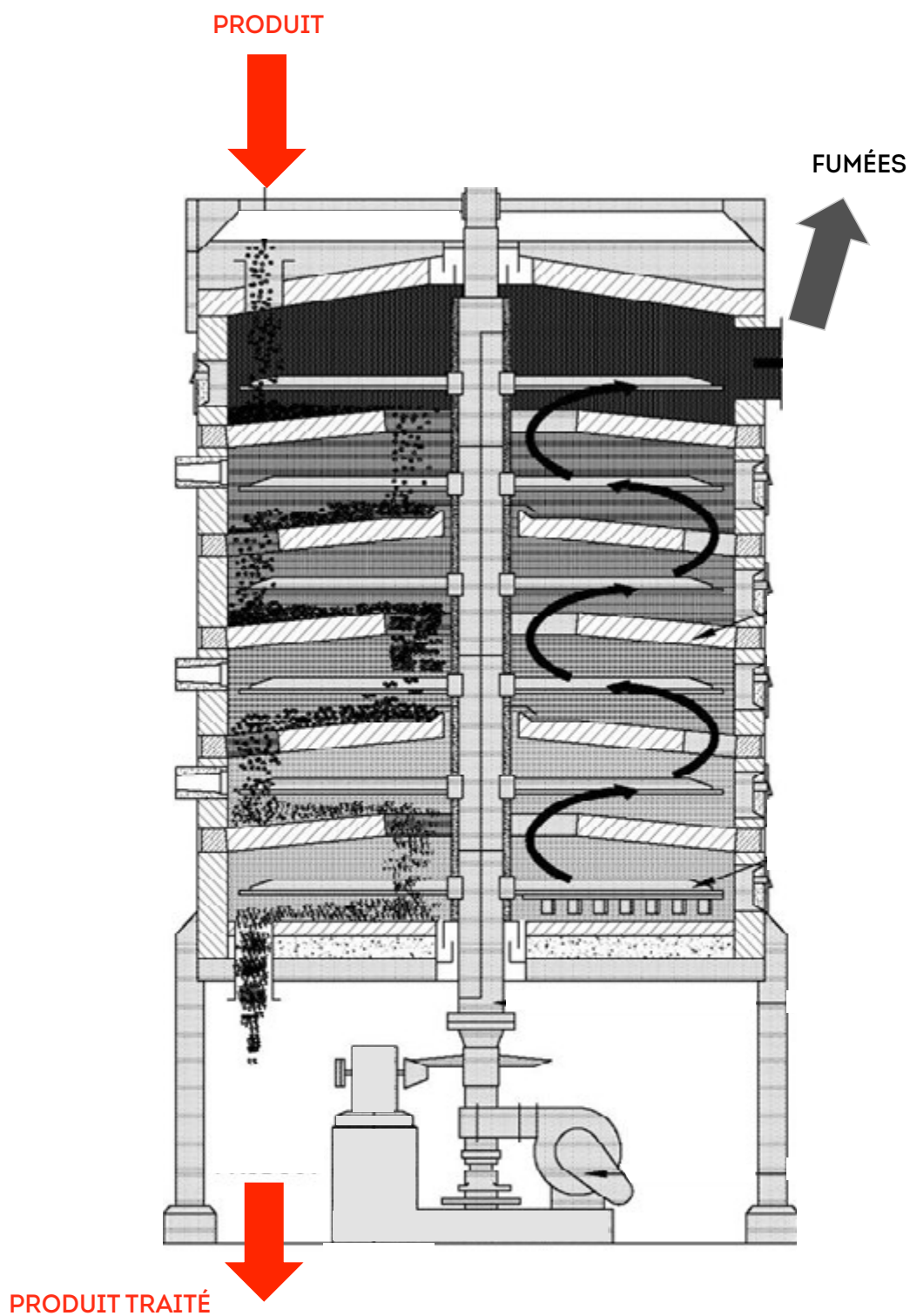
Les essais de procédés thermo-chimiques devaient s'adapter au fur et à mesure des résultats obtenus, c'est pourquoi John Cockerill a travaillé sur un mix restreint, sans fumier équin, et sur un mix complet. Des essais ont été réalisés en étuve de laboratoire, puis avec un pilote batch afin d'obtenir des éléments plus représentatifs, notamment concernant la rhéologie du digestat. Il était par ailleurs nécessaire de produire du digestat en quantité suffisante et de mettre en place un dispositif expérimental différent des réacteurs de 5 litres sur lesquels était testée la méthanisation.

Le groupement John Cockerill a essayé la pyrolyse et la torréfaction, notamment pour évaluer leurs conditions d'exploitation. Le groupement a réalisé des tests de paillasse sur de petites quantités en laboratoire afin de caractériser le produit fini, ainsi qu'un test sur un pilote industriel pour évaluer les caractéristiques de comportement du digestat dans l'équipement. Plusieurs points devaient être vérifiés : propriétés rhéologiques du produit, adéquation de l'équipement au produit, éventuelles modifications nécessaires.

Le produit brut obtenu en sortie de la torréfaction est composé de matière organique et d'une fraction minérale assez importante. Initialement, cette solution avait été retenue pour obtenir un produit valorisable en chaufferie, mais la fraction minérale pose problème. Dans le cas de la pyrolyse, un produit entièrement minéralisé est obtenu, avec un faible pouvoir calorifique. Au final, la torréfaction permet d'obtenir un produit valorisable d'un point de vue énergétique, mais le gain par rapport au produit brut - le digestat - est faible. En outre, les essais réalisés montrent un intérêt à se diriger plutôt vers la pyrolyse. La solution du groupement a alors été réorientée vers la pyrolyse couplée à valorisation du syngaz afin d'obtenir un bilan énergétique favorable.

Enfin, le résidu minéral obtenu par pyrolyse, riche en phosphore, apparaît intéressant et de nombreux travaux de recherche sont en cours. Cependant, à l'échelle du pilote qui sera mis en œuvre pour la Phase 2, le groupement John Cockerill a jugé que

la récupération du phosphore n'était pas pertinente à cette échelle puisqu'elle se trouve déjà en phase d'essai très poussée sur des installations bien plus grosses.



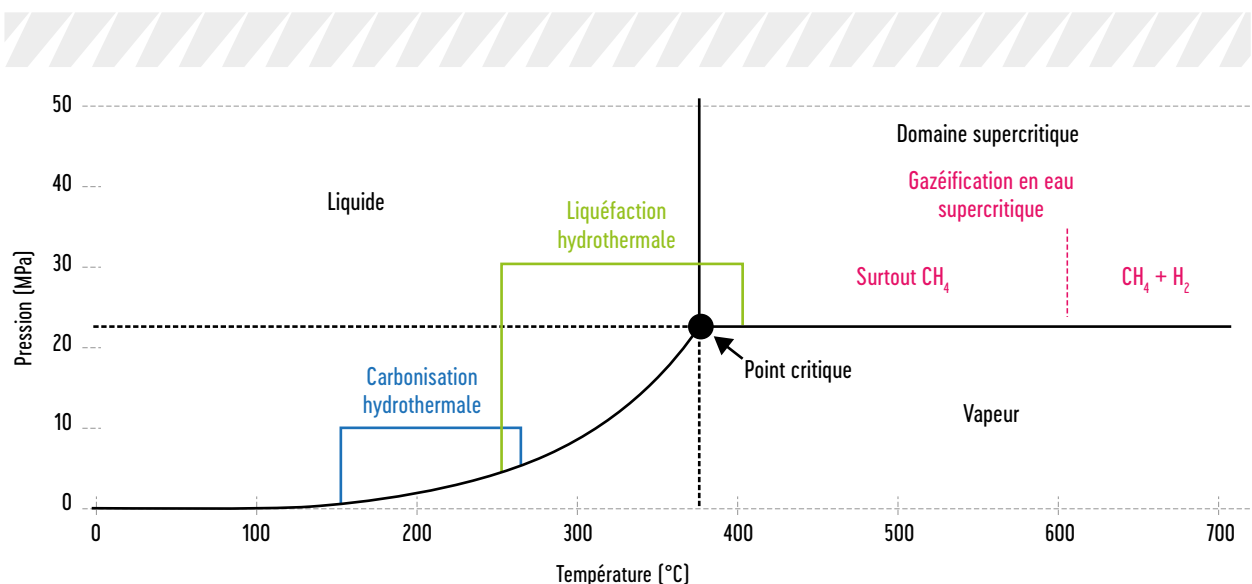


**Isabelle Chapuis**  
 Chef de laboratoire  
 CEA

Dans le cadre du partenariat d'innovation Cométha, le groupement conduit par VINCI Environnement a pris le parti d'implémenter une technologie en rupture : la gazéification en eau supercritique. Ce procédé a été retenu pour plusieurs raisons, notamment car il permet de valoriser le carbone résiduel encore présent en quantité dans le digestat, de séparer la fraction minérale et de la concentrer.

La gazéification en eau supercritique est un procédé en pression, qui agit au-delà du point critique de l'eau, à plus de 300 bar et à haute température (entre 500 et 700°C), ce qui entraîne une hygiénisation de la ressource. Au-delà de ce point critique, les propriétés de l'eau changent : elle agit comme un solvant et un réactif très puissant, permettant d'atteindre des taux de conversion du carbone en gaz de l'ordre de 90 % sur certaines ressources. Ce procédé produit un gaz à très haut pouvoir calorifique, sans goudron ni polluants, essentiellement composé de méthane, d'hydrogène et de dioxyde de carbone. La gazéification peut être orientée pour maximiser la production d'hydrogène, mais dans le cas du projet Cométha, ce gaz participe à l'équilibre énergétique de la filière.

Le CEA travaille sur cette technologie depuis une quinzaine d'années, notamment en oxydation pour traiter des effluents et détruire les pathogènes ou d'autres molécules. L'oxydation est un procédé déjà mis en œuvre à l'échelle de la démonstration et même à l'échelle industrielle, sur de multiples ressources, notamment des microalgues, de la liqueur noire ou des boues de station d'épuration. En revanche, l'appliquer sur du digestat de méthanisation constitue une nouveauté. En outre, il s'agit de valider les performances atteignables pour ce produit, la faisabilité d'un fonctionnement en continu et l'intégration énergétique pour rendre le procédé producteur net de méthane et avoir un bilan énergétique positif. En effet, le cadre du partenariat d'innovation Cométha interdit l'apport d'énergie externe envisagé pour le pilote et l'usine et il faut rechercher un procédé autonome en énergie et même producteur avec un bilan net en énergie.



Le groupement a mis en œuvre une approche expérimentale en trois étapes :

- >> réaliser des essais en batch sur le digestat pour obtenir rapidement une idée des performances atteignables sur ce produit en faisant varier un certain nombre de paramètres ;
- >> mener des essais en continu pour valider la faisabilité d'un procédé en continu appliqué à cette ressource très chargée en particules inorganiques, qui représentent jusqu'à 45-50 % de la matière sèche introduite dans le procédé, ce qui est très significatif et apporte un certain nombre de contraintes sur le procédé ;
- >> modéliser pour trouver le meilleur schéma d'intégration énergétique possible.

Le groupement a réalisé une vingtaine d'essais en batch sur de petites quantités de matière, avec des temps de séjour de quinze à trente minutes, des températures qui pouvaient aller de 400°C à 650°C et une matière sèche plus ou moins concentrée, entre 10 % et 20 % à l'entrée du réacteur. La matière était ajoutée en présence d'eau dans les bonnes proportions dans le réacteur batch autoclave qui était ensuite fermé. La température était augmentée et le réacteur était finalement sous pression. À la fin du temps de séjour, les produits et le gaz obtenus en gazéification en eau supercritique étaient analysés. Les résultats pouvaient être assez variables en fonction des différents paramètres testés. Les meilleurs résultats obtenus en matière de conversion du carbone en gaz, et notamment en méthane et en hydrogène, ont été atteints à une température globalement supérieure à 500°C et à un taux de matière sèche le plus élevé possible (jusqu'à 20 %).

Le pilote en continu est encore unique en France et traite jusqu'à 10 kilogrammes de matière par heure. Huit essais ont été réalisés et ont permis de valider un fonctionnement en continu sur plusieurs heures. Le groupement travaillait pour la première fois sur cette ressource, nécessitant plusieurs adaptations :

- >> une préparation par broyage, la granulométrie de la matière injectée étant contrainte puisque le pilote n'est compatible qu'avec de petits débits ;
- >> une amélioration du système de pressurisation et d'injection ;
- >> un système pour extraire la saumure a été mis en œuvre ;
- >> un système original de séparation des gaz, à partir d'un système de séparation haute pression, puis basse pression. À haute pression, lorsque la température diminue, le méthane et l'hydrogène

sont séparés sous forme gazeuse, mais le dioxyde de carbone et l'eau sont toujours à l'état liquide. Dans un séparateur basse pression, le dioxyde de carbone revient sous forme gazeuse et peut être séparé de l'eau.

Le groupement a globalement obtenu des rendements de conversion du carbone en gaz de 70 %, avec des taux en méthane et hydrogène de plus de 60 %. Néanmoins, le groupement entend aller plus loin à l'échelle industrielle, dans la mesure où le pilote utilisé pour les essais n'était pas complètement optimisé pour le digestat. En particulier, il était nécessaire de composer avec cette fraction minérale très importante qui perturbait les transferts thermiques du pilote. Une augmentation du temps de séjour permettrait assez facilement d'augmenter ce rendement déjà très intéressant.

De nombreux travaux ont été menés en modélisation. Plus de cinquante configurations avec différents schémas d'intégration énergétique ont été simulées avec des bilans matière-énergie réalisés à chaque étape, permettant d'identifier les paramètres opératoires les plus importants, notamment le pourcentage de matières sèches, la température et le taux d'inorganiques. En effet, l'enjeu était de trouver un compromis entre le niveau de température et un bon rendement de conversion du carbone en gaz, avec des implications sur la conception technologique du pilote.

Pour l'étude d'avant-projet sommaire, le groupement VINCI Environnement a travaillé sur le passage à l'échelle pilote de la technologie (fois dix). L'accent a été mis sur le développement de solutions innovantes et inédites, notamment pour l'injection sous pression de la matière et la gestion des résidus liquides et solides. Il s'agissait également de séparer la fraction inorganique pour maximiser les taux de conversion du carbone en gaz et d'optimiser la récupération de chaleur. Cette dernière étape a été une aventure passionnante puisque le groupement a dû faire appel à de nombreux laboratoires au sein du CEA, qui maîtrisent les procédés en pression et développent les technologies des réacteurs, notamment pour le domaine nucléaire. Le CEA a aussi bénéficié du soutien important de VINCI Environnement et d'équipementiers externes. Le groupement est allé très loin dans le design technique, les calculs thermomécaniques, les choix de matériaux, ainsi que dans la consultation des fabricants pour vérifier la faisabilité de la fabrication et évaluer de manière très fine les CAPEX sur les technologies.



## TEMPS D'ÉCHANGES

### Le fumier équin facilite-t-il les procédés thermochimiques ? Quel est son impact sur le bilan énergétique et la charge minérale ?

**Olivier Bernat** : En dépit des a priori, le fumier équin a un effet positif sur toutes les étapes qui précèdent la pyrolyse, ce qui n'était pas évident initialement puisque le fumier équin apporte des fibres, des composants et des matières potentiellement gênantes. C'est pourquoi le groupement John Cockerill a tenu à faire les essais en grandeur réelle avec le système de mise en mouvement de la matière du réacteur NESAS<sup>®</sup>, appelé les bras de râblage. Ces essais ont permis de lever les craintes.

**Isabelle Chapuis** : Des tests en batch ont été réalisés afin de tester chaque ressource seule et le digestat. Il était impossible de mettre en œuvre le convoyage sur le pilote en continu. Il était aussi difficile de mettre en œuvre un système de broyage unique sur le fumier et d'obtenir la ressource avec la bonne granulométrie pour les pilotes. Toutefois, des tests sur des digestats ont été réalisés, et les résultats étaient bons en présence de fumier équin. Ils devront être confirmés sur l'unité pilote.

### Quelles sont les contraintes réglementaires pour l'injection dans le réseau des gaz issus de traitements thermochimiques ?

**Anthony Mazzenga** : Il est d'usage d'injecter dans les réseaux un gaz aux spécifications du gaz naturel, c'est-à-dire plus de 97 % de méthane et des composés : traces de dioxyde de carbone, d'azote et autres. Cependant, il faut prendre en compte l'impact de ces gaz sur les propres ouvrages de GRTgaz et sur les équipements des clients consommateurs. Les angles réglementaires et sanitaires sont également à prendre en compte. La Direction générale de la prévention des risques (DGPR) avait saisi l'Anses pour vérifier l'innocuité des gaz qui étaient injectés dans les réseaux puisqu'ils pouvaient être amenés à être brûlés en combustion ouverte dans les foyers. Aujourd'hui, il n'y a pas de réponse. Des campagnes sur des sites en Europe et en France sont en cours pour s'assurer que les composés susceptibles d'être présents dans le syngaz produit par les procédés thermochimiques sont connus et qualifiés et qu'ils respectent bien les valeurs limites acceptables.







## THÈME 4 : MAXIMISER LA PRODUCTION DE BIOGAZ PAR LA MÉTHANATION



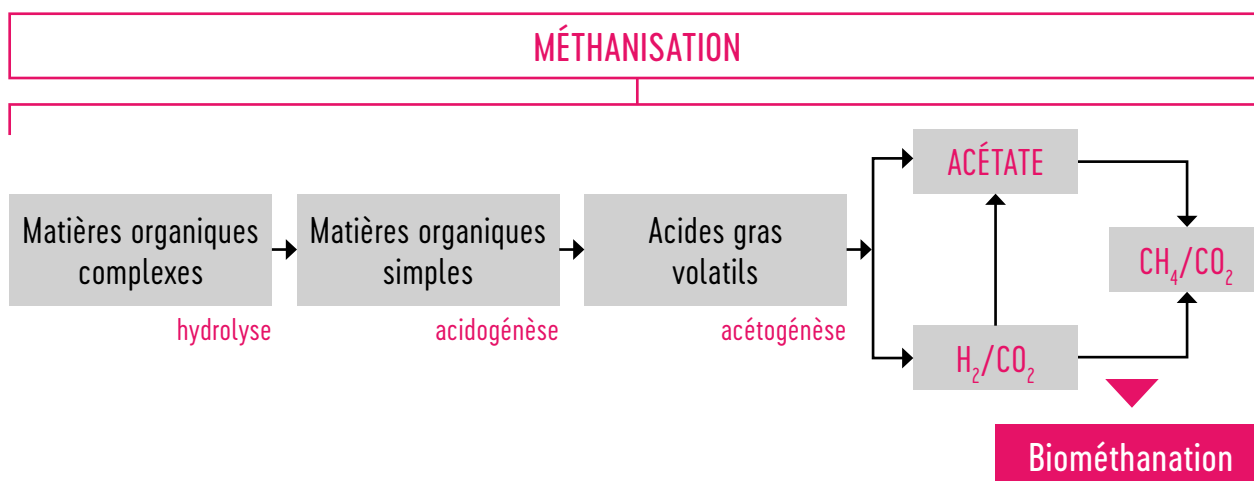
**Mathieu Haddad**  
Ingénieur application biosolide  
Suez

Trois filières de production de biogaz sont présentes dans la solution imaginée par Suez :

- >> le biogaz produit par la cométhanisation, à l'issue de laquelle le digestat est transformé en gâteau par déshydratation ;
- >> le biogaz produit par la méthanisation en voie liquide de l'effluent de déshydratation ;
- >> le biogaz produit par la méthanation du syngaz issu de la pyrolyse du gâteau. Préalablement, le syngaz doit être purifié de toutes impuretés.

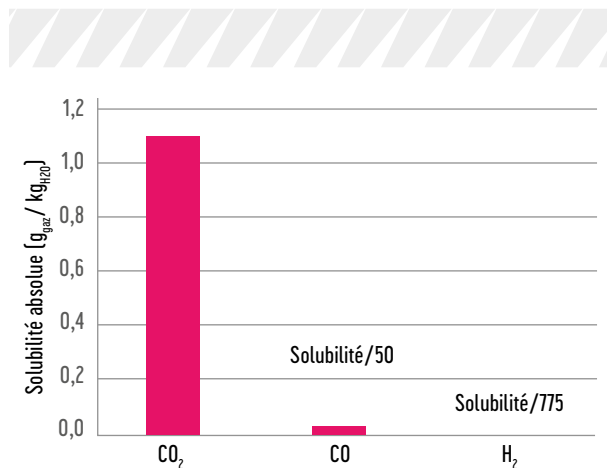
La méthanation est la formation du méthane à partir d'une molécule de dioxyde de carbone et de quatre molécules d'hydrogène. La méthanation est une sous-partie de la méthanisation : elle vient réduire les matières organiques complexes vers les acides gras volatils concentrés en acétate, ou en hydrogène et dioxyde de carbone pour faire du méthane. La méthanation peut aussi être réalisées hors méthanisation sur du syngaz.

Dans ce cas, deux des composés du syngaz, le dioxyde de carbone et l'hydrogène, forment du méthane. Le monoxyde de carbone peut aussi être transformé de multiples façons : la biomasse est adaptable en fonction des conditions environnementales, notamment la température, mais aussi de la concentration en monoxyde de carbone. Il est donc possible de maîtriser la transformation du syngaz en méthane à condition de passer le verrou technologique du transfert. En effet, si le groupement Suez sait transformer du solide ou du soluble en gaz, transformer du gaz en gaz est plus complexe : les microorganismes vivent dans la phase liquide et ne consomment que du gaz soluble. Il faut donc transférer le gaz à la phase liquide afin que les microorganismes puissent agir.



Ce transfert est complexe et dépend de plusieurs paramètres :

- >> la pression partielle du gaz, c'est-à-dire le pourcentage de chacun des composés dans le syngaz : c'est une donnée intangible, car elle est liée au procédé en amont, la pyrolyse ;
- >> la constante d'Henry, qui dépend de la température et de la pression ;
- >> la solubilité : il est possible de solubiliser jusqu'à 1,1 gramme de dioxyde de carbone à 35°C dans un litre d'eau. En revanche, le monoxyde de carbone est cinquante fois moins soluble, et l'hydrogène l'est huit cent fois moins. Solubiliser l'hydrogène et le monoxyde de carbone dans le gaz est donc la plus grosse difficulté ;
- >> le coefficient de transfert volumique (kLa), qui est fonction du design, de la température et de la pression du réacteur de biométhanation.

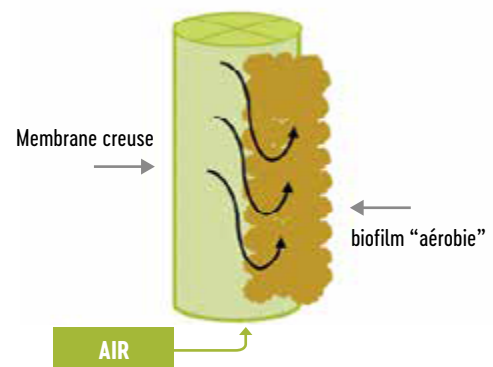


Pour remédier au problème de la solubilité, le groupe Suez a opéré un transfert d'application, et non de technologie. Ce problème est en effet connu sur les bassins d'aération : l'oxygène est très peu soluble et des technologies membranaires pour la diffusion de l'oxygène ont été développées. Le système est assez simple : de l'air est injecté au travers de dizaines de milliers de membranes plongées dans les bassins, conduisant à la solubilisation de cet air : la surface d'échange entre le gaz et la biomasse est ainsi maximisée. Un biofilm en aérobie permet d'avoir une diffusion sans bullage du gaz. Dans le cadre du projet Cométhà, le syngaz remplace l'air. Le syngaz traverse des membranes à l'échelle du micromètre.

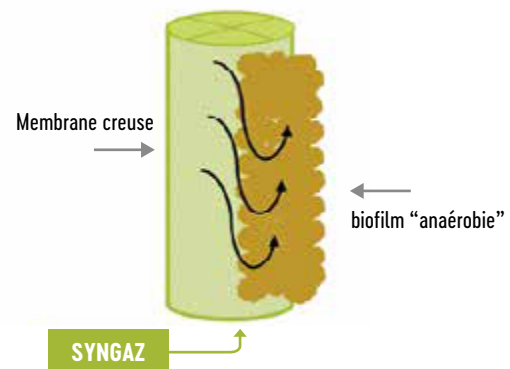
Durant quatre mois, un réacteur membranaire avec un syngaz a été testé, avec des performances de conversion supérieures à 80 % et des résultats très satisfaisants. Entre méthanation biologique et méthanation catalytique, le groupement Suez a choisi la biométhanation, technologie sobre et simple sans mécanique, et très peu consommatrice d'énergie. La biométhanation intervient dans une fourchette de température comprise entre 35° et 50°C, à pression ambiante, ce qui réduit fortement les coûts. Surtout, ce catalyseur biologique est insensible aux impuretés.

Pour conclure, le fil directeur de la technologie choisie se veut avant tout durable avec une très faible consommation d'électricité, aucune partie mécanique dans le réacteur et une solution modulaire. Pour déterminer les caractéristiques de diffusion des membranes, il suffit de répliquer les modules, que l'on soit à l'échelle du laboratoire ou industrielle. De ce fait, la mise à l'échelle est vraiment simple.

Traitement eaux usées : méthode innovante de diffusion d'oxygène dans un biofilm



Traitement syngaz : utiliser la technologie membranaire pour diffuser le syngaz dans un biofilm





**Maylis Mercat**  
Ingénieure d'étude  
Gicon France-Biogaz



**Michael Tietze**  
Directeur du département  
de recherche  
en bioénergie,  
Gicon France-Biogaz

La méthanation est l'étape ultime de la méthanisation qui utilise des bactéries archées pour transformer l'hydrogène et le dioxyde de carbone en méthane. La méthanation est souvent associée à des technologies de *power to gas*, pour la gestion des surproductions éoliennes qui ne peuvent pas être injectées sur le réseau, ce qui induit des pertes de production assez importantes. Le *power to gas* signifie la conversion d'électricité en hydrogène par électrolyse de l'eau. Cependant, ce gaz a une densité énergétique relativement faible et il est difficilement stockable. Il reste possible d'injecter de l'hydrogène dans le réseau de gaz naturel, dans des proportions relativement faibles. Au regard des ordres de grandeur du projet Cométhà, ce n'est pas une option qui a été retenue. En outre, la technologie d'électrolyse de l'eau n'est pas viable à l'heure actuelle, ni économiquement ni énergétiquement, car elle utilise énormément d'électricité. Il convient ainsi de s'intéresser à d'autres voies de production d'hydrogène, notamment grâce aux procédés thermochimiques, *via* la méthanation du syngaz.

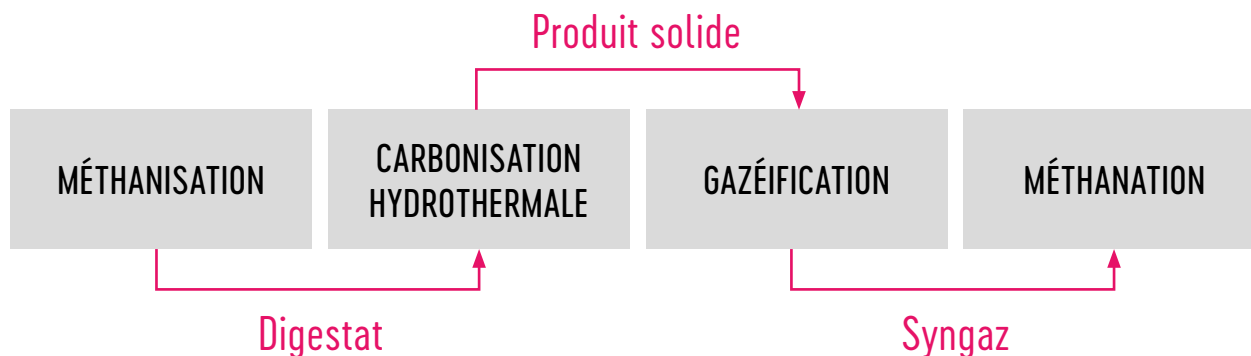
La méthanation peut être catalytique ou biologique. La méthanation catalytique est une réaction à haute température et à haute pression alors que la méthanation biologique est une réaction beaucoup plus simple. C'est donc celle que le groupement Tilia a souhaité mettre en œuvre pour Cométhà. La méthanation biologique n'est pas une nouveauté puisque cette technologie a été brevetée par Gicon et l'Université de Cottbus à l'échelle de laboratoire, puis adaptée à une échelle semi-industrielle - environ 10 m<sup>3</sup>, ce qui correspond à la taille du pilote qui serait installé en Phase 2 du partenariat d'innovation. Cette technologie repose sur un réacteur à lit fixe par ruissellement : le réacteur comprend des garnissages qui permettent d'augmenter la surface d'échange entre le gaz et l'eau. En effet, l'hydrogène a besoin d'être solubilisé dans l'eau afin d'être transformé en biométhane par les bactéries qui vivent en milieu aqueux. En outre, ces garnissages permettent aux bactéries de se fixer, et d'avoir un meilleur contact avec l'eau. Dans le réacteur, le gaz arrive par le bas. Un mélange

d'hydrogène et de dioxyde de carbone, et une eau en circulation semi-continue permettent de maintenir une ambiance propice au développement de ces bactéries, et de contrôler la température pour rester en condition mésophile. Il s'agit aussi de réguler le pH car le dioxyde de carbone est très soluble dans l'eau. Or, plus il y a de dioxyde de carbone dans l'eau, plus le milieu s'acidifie. Il faut donc réguler le pH et l'apport en nutriments, car les bactéries ont besoin de nutriments pour vivre et se développer.

L'avantage de ce système est qu'il est très fiable : il n'est pas nécessaire d'avoir une filtration et un traitement des gaz en entrée. Il permet un taux de conversion relativement élevé du dihydrogène en biométhane. La flore bactérienne est la même que celle des réacteurs de méthanisation. L'ensemencement peut se faire avec des boues d'épuration, ou tout simplement avec du digestat issu de méthanisation. L'intérêt est d'avoir une flore bactérienne très riche qui supporte beaucoup mieux les variations de composition de gaz en entrée, ainsi que les variations de pH et de température.

Des essais ont été réalisés à grande échelle avec un syngaz reconstitué, ainsi que des essais en laboratoire avec du biogaz injecté directement dans le réacteur de méthanation ce qui permet de valoriser le dioxyde de carbone et de passer d'un taux de concentration de méthane d'environ 50-55 % à un taux de plus de 90 %. Les résultats ont montré que pour optimiser la réaction, un couple pH / température relativement stable était requis et parfois l'ajout de substances additionnelles comme des nutriments. Toutefois, les nutriments sont déjà présents dans les boues d'épuration. Il est donc possible d'améliorer les performances du réacteur de méthanation avec les intrants du SIAAP.

Le groupement Tilia a fait le choix d'une méthanation en fin de chaîne. L'objectif principal du projet Cométhà étant la valorisation du carbone, la méthanisation est incontournable mais elle ne permet de valoriser qu'un peu plus de la moitié du carbone initialement contenu dans les intrants.



C'est pour cette raison que le groupement a implémenté différentes étapes pour valoriser le reste du carbone, notamment avec deux étapes thermo-chimiques, la carbonisation hydrothermale et la gazéification. La carbonisation génère un produit solide qui est valorisé en gazéification, et le syngaz produit est ensuite traité en méthanation.

La carbonisation hydrothermale est un procédé thermo-chimique qui a plusieurs avantages justifiant son positionnement en amont de la chaîne :

- >> pas de prétraitement du digestat, qui entre directement dans le réacteur après méthanisation ;
- >> fonctionnement compatible avec un digestat relativement liquide, écartant toute étape énergivore de séchage ou d'étape de séparation physique ;
- >> faible consommation énergétique avec une matière chauffée à environ 180°C et 10 bar, ce qui est relativement élevé par rapport à la méthanation, mais reste raisonnable pour un procédé thermo-chimique ;
- >> séparation facile des liquides et des solides.

Le biochar peut être conditionné sous forme de pellets et utilisé dans toutes les voies de valorisation du charbon classique, ou bien dans un gazéifieur. Plusieurs technologies de gazéifieur, permettant de produire un syngaz riche en hydrogène, en monoxyde de carbone et en dioxyde de carbone, ont été étudiées par le groupement Tilia. Le couplage entre carbonisation hydrothermale et gazéification trouve tout son intérêt dans la mesure où l'un des procédés est très peu sensible aux variations d'intrants alors que l'autre l'est beaucoup plus. La carbonisation hydrothermale permet de produire un biochar très stable, facilement valorisable en gazéification.

Dans cette filière de traitement, la méthanation augmente la productivité en méthane, après les optimisations précédemment évoquées. Elle permet aussi d'améliorer le bilan énergétique global puisque la méthanation profite de la chaleur produite par la gazéification. La méthanation ne requiert pas d'équipement sous très haute pression et sous très haute température. Enfin, l'absence d'étape de prétraitement permet de préserver un bilan énergétique positif.



### Dairo Ballestas Castro

Coordonnateur programme nouveau méthane  
Research Innovation Centre for Energy (RICE)

La méthanation est une brique technologique qui se retrouve au croisement de plusieurs filières de production de nouveaux gaz. La méthanation peut se greffer à plusieurs types d'enchaînements, de procédés, avec par exemple le *power to gas*. Dans le cas du projet Cométhà, la méthanation permet de valoriser le dioxyde de carbone issu de l'épuration de biogaz ou de valoriser le syngaz produit à partir de procédés thermochimiques. Par ailleurs, la méthanation est l'étape finale, ou une des étapes finales du processus cinétique de méthanisation. Des acteurs se penchent ainsi sur l'utilisation de la méthanation de façon à l'intérieur ou directement couplée aux digesteurs pour maximiser la production du biogaz en injectant de l'hydrogène. La technologie de méthanation pourrait aussi être intégrée dans les réacteurs de gazéification hydrothermale.

La méthanation produit un gaz qui a plusieurs appellations : biométhane, méthane de synthèse... Il n'y a pas de consensus sur la dénomination de ce gaz. Avant injection dans le réseau, ce gaz doit être purifié. Pour un opérateur de réseau, il est important que ce gaz respecte des spécifications techniques qui vont permettre d'assurer la maîtrise des impacts sur la chaîne du gaz.

Il y a quelques exemples de projets et de pilotes qui utilisent la brique méthanation, dont certains en Europe qui injectent le gaz produit. Le premier exemple est le projet GoBiGas en Suède qui met en place un procédé de pyrogazéification avec une méthanation catalytique. L'équipe du Laboratoire RICE a réalisé une campagne d'essais sur ce site pour relever les composés traces qu'il est possible de retrouver dans les gaz et produits de GoBiGas. Les résultats ont été très satisfaisants puisque les gaz produits respectent les spécifications et sont d'ores et déjà admis dans le réseau suédois.

Autre exemple en Europe avec le projet Biocat : c'est un procédé *power to gas* pour la production de l'hydrogène qui récupère du dioxyde de carbone issu de l'épuration du biogaz d'un site adjacent au site Biocat.

L'installation repose sur une méthanation biologique fournie par Electrochaea, également aussi sur un projet en France. Un autre projet français, porté aussi par Storengy est le projet de *power to gas* MéthyCentre qui utilise le dioxyde de carbone provenant de l'épuration d'un biogaz avec une méthanation catalytique.

GRTgaz porte aussi plusieurs projets autour de la méthanation :

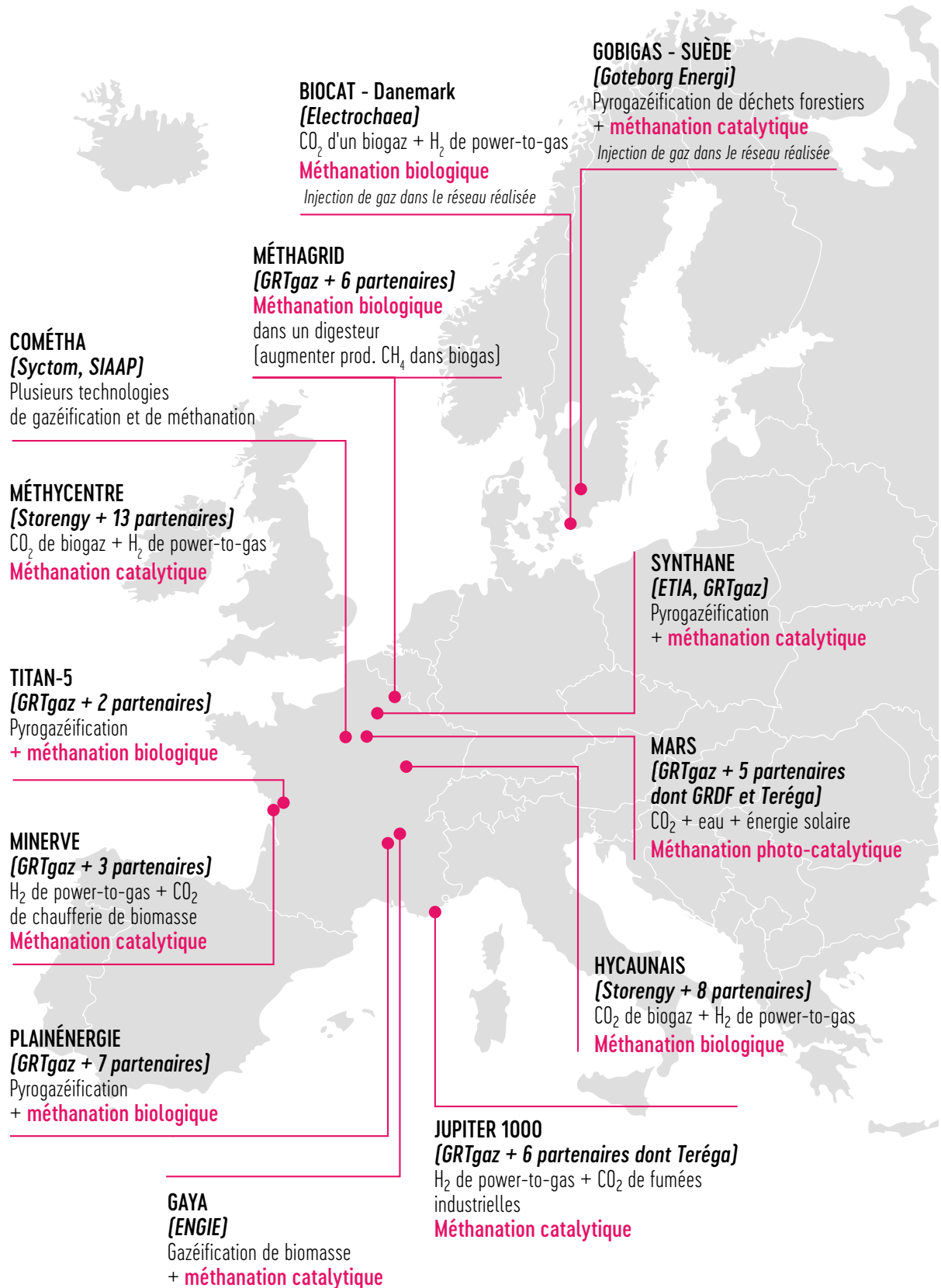
- >> le projet Titan 5 pour lequel la méthanation mise en place est une méthanation biologique fournie par TerraWatt ;
- >> le projet Pleine Énergie, avec huit partenaires, met en place une méthanation biologique fournie par Enosys ;
- >> le projet SYNTHANE en collaboration avec ETIA met en place la solution de gazéification d'ETIA avec une méthanation catalytique fournie par Prodeval ;
- >> le pilote Gaya, fourni par Engie qui est une méthanation catalytique de conception Engie.

Par ailleurs, GRTgaz soutient ou participe à des projets de recherche et de développement autour de la méthanation proprement dite avec le projet Minerve, le projet Methagrid et le projet Mars, qui associe GRTgaz et d'autres opérateurs de réseau comme GRDF et Teréga. Ce dernier repose sur un réacteur photocatalytique pour lequel la source de lumière est le soleil. À terme, il est envisagé d'utiliser une source de protons très neutre comme l'eau.

Pour l'injection de gaz, l'ensemble des opérateurs de réseau gaz de distribution, de transport et de stockage sont impliqués, ce qui démontre l'intérêt de cette brique technologique très importante pour atteindre les objectifs de transition énergétique.



## ÉTAT DES LIEUX DES PILOTES DE MÉTHANATION



# TEMPS D'ÉCHANGES

## Quels sont les critères pour choisir une méthanation catalytique par rapport à une méthanation biologique ?

**Maylis Mercat** : La méthanation biologique semble avoir le plus de points positifs au regard des contraintes du projet Cométha. La filière biologique est plus robuste aux variations de syngaz alors que les catalyseurs de méthanation catalytique y sont beaucoup plus sensibles. L'autre avantage de la méthanation biologique est sa facilité d'opérations, à basse température et basse pression. Le groupement Tilia n'a pas pour autant exclu la méthanation catalytique, pour le passage éventuel de la Phase 2 à la Phase 3.

**Mathieu Haddad** : La comparaison entre ces deux types de méthanation est aujourd'hui difficile car elles ne sont pas au même niveau de développement. La méthanation catalytique existe depuis près d'un siècle. Le technology readiness level est compris entre 7 et 9 en fonction de la technologie utilisée. À l'inverse, le technology readiness level de la méthanation biologique est compris entre 4 et 6. Le fossé en matière de coûts, CAPEX et OPEX entre méthanations catalytique et biologique devrait diminuer au fur et à l'avenir. La méthanation biologique semble pertinente en dessous de 500 m<sup>3</sup> de gaz à traiter, alors la méthanation catalytique paraît plus adaptée au-dessus de 2 000 m<sup>3</sup>. Entre les deux, c'est au cas par cas.

**Michael Tietze** : La méthanation catalytique requiert un gaz propre, sans polluants, pour fonctionner efficacement. Le choix dépend aussi de l'énergie disponible : l'ordre de grandeur de la consommation énergétique de la méthanation biologique est le kilowatt alors que celui de la méthanation catalytique est le mégawatt. Les deux technologies ont le même but et la même efficacité : l'enjeu est l'intégration du dispositif et la technologie précise retenue.

## Les membranes ne risquent-elles pas de souffrir de cette facilité à ne pas trop épurer qu'offre la méthanation biologique par rapport à la méthanation catalytique ?

**Mathieu Haddad** : Pour éviter ce risque, un traitement du syngaz est requis pour faire en sorte que ce qui est envoyé dans les membranes ne les bouche pas. Il ne s'agit pas d'une problématique technologique, mais plutôt TOTEX, lié au débit, au type d'installation et aux technologies mises en œuvre.

## Quels sont les inhibiteurs de la méthanation biologique ?

**Michael Tietze** : Le système réagit de façon sensible à la valeur du pH, en lien avec la solubilisation du dioxyde de carbone. L'autre point de vigilance est la température, qui doit être stable car il s'agit d'un système biologique. L'avantage de la méthanation biologique par rapport à la méthanation catalytique est son absence de sensibilité par rapport au gaz sulfurique. Il convient aussi d'être attentif aux autres composants du gaz produit, qui dépendent des intrants.

**Mathieu Haddad** : Deux inhibiteurs existent. Le premier est le syngaz et l'ammoniac qu'il contient, s'il est solubilisé. La deuxième partie est le monoxyde de carbone, utilisé comme source de carbone, qui peut être un inhibiteur à très haute concentration. Dans ce dernier cas, il y aura une adaptation de la biomasse vers des voies métaboliques différentes et l'inhibition n'est pas permanente. En revanche, avec l'ammoniac, la sélection de la biomasse est plus sévère.

## Quelle est la durée de la réaction ?

**Michael Tietze** : C'est une réaction relativement rapide, de l'ordre de quelques heures, grâce aux micro-organismes.

Carine Morin-Batut  
Éclidéa



Le projet Cométha, co-porté par le Sycotom et par le SIAAP, démontre toute la pertinence du décloisonnement et de la création de synergies entre deux domaines du service public de l'environnement, de l'eau et des déchets.

Quoiqu'il ressorte de ce partenariat d'innovation, les monde de l'eau et des déchets retireront collectivement la connaissance supplémentaire sur des sujets à enjeux nationaux et à enjeux mondiaux. La pertinence des mélanges, le traitement des intrants, la cométhanisation, la valorisation des digestats et la récupération des nutriments sont des sujets d'avenir.

L'innovation est pleine de surprises pour tous les protagonistes, maîtres d'ouvrage, assistants et titulaires. Des portes se ferment, d'autres s'ouvrent. Le cheminement est tout sauf une ligne droite, et la Phase 1 du projet Cométha l'a montré. Une fois arrivé au bout du chemin, il reste à faire bouger les lignes puisque ce qui est nouveau n'entre pas forcément dans le cadre réglementaire. Il faut donc accompagner l'émergence de nouvelles filières.

Les instances politiques du Sycotom et du SIAAP doivent se positionner dans les prochaines semaines, courant du mois de décembre, sur la poursuite ou non du projet Cométha.





## RÉCUPÉRATION DES NUTRIMENTS

**GRÂCE AUX DÉCHETS!**

Avec le développement des villes, on va **PRODUIRE + D'ÉNERGIE** et **DÉCHETS!**

ON EST... CACA... MAIS UTILE QUAND MÊME, HEIN?

ABSORPTION... DESORPTION... SORPTION? **DÉCIDEZ-VOUS!**

TOUS SUR RÉCUPÉRER L'AZOTE!

**MÉTANISATION**

**DIGESTAT LIQUIDE**

**SOLUTIONS** (ÉCARTILLES, ÉCONOMIQUES)

**HAZOTE**

**VINCI**      **TILIA**

alexia.leberaud | @pifgastalera

## OPTIMISATION DE LA MÉTHANISATION

**TOUT SEUL ON VA VITE, ENSEMBLE ON VA LOIN**

**HAUTE RÉSILIENCE DU PROCÉDÉ** (ce qui permet de rebondir et de revenir dans sa position initiale)

**voie LIQUIDE**

**voie ÉPAISSE**

**RÉSISTANCE & ROBUSTESSE!**

**BATCHES** (sur caractériser la matière!)

**2 LEVIERS**

**BOVES DIGÉRÉES**

LE MÉLANGE, OU LA FAÇON DE LE RÉSTER

TEST AVEC OU SANS FUMIER

55°C 1ère étape

37°C 2ème étape

et c'est carrément mieux avec!

**TEMPS DE SÉJOUR DANS LE DIGESTEUR**

**JOHN COCKERILL**      **BIO GAZ**      **SUEZ**

alexia.leberaud | @pifgastalera

Plus d'informations : [cometha.fr](https://www.cometha.fr)

Contacts :

---

Sylvie Mariaud  
Relations Collectivités locales et Presse  
[mariaud@sycdom-paris.fr](mailto:mariaud@sycdom-paris.fr)

Patricia Gbeuly  
Responsable Communication externe  
[patricia.gbeuly@siaap.fr](mailto:patricia.gbeuly@siaap.fr)



l'agence  
métropolitaine  
des déchets  
ménagers



Service public de l'assainissement francilien