

LIVRET COMÉTHA

PHASE 1
2018 - 2019

cométha



l'agence
métropolitaine
des déchets
ménagers



**PARTENARIAT D'INNOVATION
COTRAITEMENT DES BOUES DES EAUX USÉES DU SIAAP
ET DE LA FRACTION ORGANIQUE DES ORDURES MÉNAGÈRES RÉSIDUELLES DU SYCTOM**

Remerciements à ¹

- > Dairo BALLESTAS CASTRO Coordinateur de Programme « Nouveaux méthanes »
GRTGaz, Research and Innovation Center for Energy
(RICE)
- > Fabrice BELINE Directeur de recherche, INRAE
- > Coralline BLIND Directrice Générale des Services, SMET 71
- > Jean-Marie CHAUMEL Référent méthanisation, Ademe Île-de-France
- > Fabien ESCULIER Coordonnateur du programme de recherche et action
OCAPI et chercheur Laboratoire Eau Environnement et
Systèmes Urbains (LEESU) , Ecole des Ponts ParisTech
- > Anthony MAZZENGA Directeur Gaz Renouvelables GRTGaz

- > Pierre HIRTZBERGER Directeur Général des Services Techniques, Syctom
- > Martial LORENZO Directeur Général des Services, Syctom jusqu'en 2021

- > Jacques OLIVIER Directeur Général, SIAAP
- > Denis PENOUEL Directeur Général adjoint, SIAAP jusqu'en 2021,
Directeur Général, Syctom à partir de septembre 2021

- > Equipe John Cockerill / Sources / UniLaSalle / UTC
- > Equipe SUEZ / ARKOLIA Energies / ETIA
- > Equipe Tilia / GICON France-Biogaz / DBFZ / Fraunhofer IGB
- > Equipe VINCI Environnement / Naldeo / CEA Liten

- > Amétyst - Unité de méthanisation à Montpellier
- > Syndicat Mixte d'Etudes et de Traitement des Déchets Ménagers et Assimilés (SMET 71)
ECOCEA - Unité de Tri-Méthanisation-Compostage

- > Benech/BE Leader innovation - Assistance à maîtrise d'ouvrage propriété intellectuelle
- > Ecogeos - Prestataire échantillonnage
- > Groupement setec énergie environnement / setec hydratec / Sage Engineering -
Assistance à maîtrise d'ouvrage technique
- > Parimage - Assistance à maîtrise d'ouvrage communication
- > SENSEI avocats, ex-Sartorio - Assistance à maîtrise d'ouvrage juridique

Conception & rédaction : Carine Morin-Batut - Eclidéa

Illustrations : Alexia Leibbrandt - Big Sista

Maquette et mise en page : Parimage

1. Les titres et organisations mentionnés correspondent à la période de phase 1 du projet Cométha.

LE PROJET COMÉTHA

PHASE 1

« Tu m'as donné ta boue et j'en ai fait de l'or »

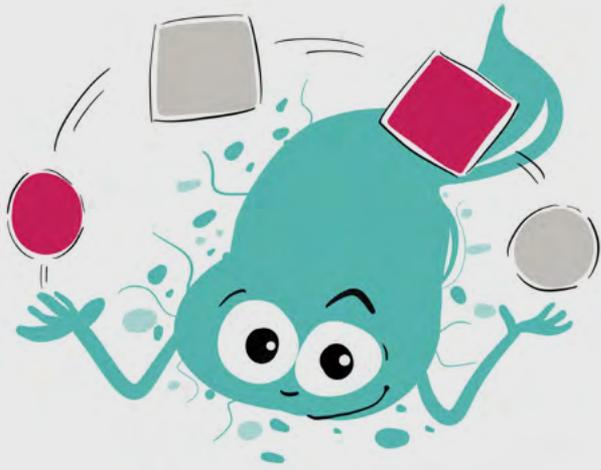
Les Fleurs du Mal, Charles Baudelaire



Nos déchets organiques, nos boues et notre fumier sont précieux.

Les informations scientifiques et techniques contenues dans ce livret sont celles correspondant à l'état des connaissances issues de la première partie de l'aventure (phase de recherche et développement du projet) qui s'est achevée fin 2019.

Les données chiffrées fournies sont celles des rapports d'essais et avant-projets sommaires (APS) proposés par les titulaires. Les promesses faites à ce stade devront être confirmées (ou non) en phase d'études de conception des unités pilotes par les deux titulaires retenus.



Tout le monde savait que c'était impossible à faire. Puis un jour est venu un homme qui ne le savait pas. Et il l'a fait. //

Winston Churchill



Sans la curiosité de l'esprit, que serions-nous ? Telle est bien la beauté et la noblesse de la science : désir sans fin de repousser les frontières du savoir, de traquer les secrets de la matière et de la vie sans idée préconçue des conséquences éventuelles.

Marie Curie



ILS ONT DIT ...



Les plus grandes épreuves auxquelles le Monde aura à faire face dans les années à venir seront la surpopulation, le manque de ressources (eau, matières premières, pétrole...), des pandémies de toutes sortes de maladies connues et nouvelles, des pollutions de toutes sortes (chimiques, air, eau, alimentation...). //

Albert Einstein



L'homme de science ne vise pas un résultat immédiat. Il ne s'attend pas à ce que les idées qu'il avance soient facilement acceptées. Son travail est comme celui d'un cultivateur, pour l'avenir. Son devoir est de jeter les bases pour ceux qui sont à venir et de montrer la voie. Il vit, travaille et espère. //

Nikola Tesla



Les innovations technologiques n'ont pas besoin de changer le monde pour être significatives ou importantes.

Steve Jobs



La seule voie qui offre quelque espoir d'un avenir meilleur pour toute l'humanité est celle de la coopération et du partenariat.

Kofi Annan



Propos introductifs	9
Les déchets ont encore de la ressource	13
1. Extraire ce qui est valorisable et rare de nos boues et nos déchets	14
2. L'extraction et la valorisation ne doivent pas se faire à tout prix	15
3. La force des approches complémentaires	16
Préparer l'avenir	17
1. La difficile question du retour au sol	18
2. Pourquoi s'intéresser au méthane ?	19
3. Un projet pour faire bouger les cadres réglementaires	21
Innovations technologiques du projet Cométhà	24
Filières complètes proposées à l'issue de la phase 1	28
1. Les intrants et leurs préparations	30
2. Les procédés de cométhanisation	33
3. Aller encore plus loin et récupérer ce qui a de la valeur dans le digestat en sortie de méthanisation	35
4. Des procédés de conversion thermo-chimiques pour aller plus loin dans le traitement du digestat ou de sa phase solide	37
5. Intérêt et pertinence de la méthanation	44
6. La récupération des nutriments	47
Ensemble, on va plus loin	54
Bibliographie	58



Amendement agricole / Apport d'un produit fertilisant ou d'un matériau destiné à améliorer la qualité des sols (en termes de structure et d'acidité)

Biocombustible / Combustible produit à partir de matières organiques d'origine végétale ou animale pouvant être converti en énergie thermique

Biochar / Produit solide obtenu à partir de procédés de traitements thermochimiques de matières organiques (pyrolyse, carbonisation hydrothermale...), riche en carbone et pouvant notamment être utilisé comme combustible ou amendement agricole

Biogaz / Produit gazeux de la méthanisation, essentiellement composé de méthane (CH_4), de dioxyde de carbone (CO_2) et de vapeur d'eau (H_2O); d'autres composés gazeux sont également présents en très faible quantité, comme le sulfure d'hydrogène (H_2S)

Bioplastiques / Matière plastique étant entièrement ou partiellement constituée de matière d'origine biologique

Carbonisation hydrothermale (HTC) / Procédé thermochimique de conversion de composés organiques en hydrocharbon à une température élevée (entre 160 et 260 °C) sous pression (10 à 50 bar), durant un temps qui varie de 5 minutes à 12 heures. Ce processus imite la formation de charbon brun (lignite) qui dans la nature se déroule sur 50 000 ans à 50 millions d'années

Collecte séparative ou collecte sélective / Collecte des déchets ménagers en plusieurs flux différenciés

Cométhanisation / Processus permettant de méthaniser un mix d'intrants d'origines différentes

Compostage / Processus biologique aérobie de conversion et de valorisation des matières organiques en un produit normé, stabilisé, hygiénique, semblable à un terreau, riche en composés humiques et minéraux appelé compost

Digestat / Sous-produit de la méthanisation, principalement composé de matière organique non convertie en biogaz et de matières minérales (azote, phosphore)

Digesteur / Cuve étanche où se déroule la méthanisation

Electrolyse / Réaction chimique dans laquelle les substances sont décomposées en substances simples et/ou d'autres substances composites sous l'influence d'un courant électrique

Energivore / Qui consomme beaucoup d'énergie

Epannage / Technique consistant à répandre des engrais, des amendements, des pesticides

Filière / Dans le domaine des déchets ou de Cométha, enchaînement d'opérations et de procédés permettant le traitement d'un intrant (filiale de traitement de déchets)

Fluide supercritique / État mi-liquide et mi-gazeux d'un fluide (ex : eau), obtenu à haute température et à haute pression (pour l'eau, 374°C, 221 bar)

Fraction organique résiduelle (FOR) / Fraction essentiellement composée de matières organiques obtenue suite à une action de tri-préparation des ordures ménagères résiduelles

Gazéification / Procédé de conversion thermochimique à haute température (700-1 200 °C) se déroulant en absence ou en présence très réduite d'oxygène (milieu réducteur) et permettant de convertir la matière organique en un gaz de synthèse (syngaz) valorisable énergétiquement

Hydrocharbon / Type de biochar, obtenu par carbonisation hydrothermale (HTC)

Inhibiteur / Substance ou organisme qui ralentit ou s'oppose à un processus

Intrant / Matière introduite dans une unité de traitement

Mésophile / Se dit de la méthanisation fonctionnant à une température située dans une plage entre 30° et 40°C²

Méthanation / Processus biologique ou chimique de conversion en méthane (CH₄) d'un mélange gazeux composé principalement d'hydrogène (H₂), de monoxyde de carbone (CO) et de dioxyde de carbone (CO₂)

Méthanisation / Processus biologique de dégradation de la matière organique en absence d'oxygène, permettant de produire du biogaz et du digestat. Il existe différentes voies de méthanisation (voie liquide, voie sèche) qui diffèrent selon les paramètres de siccité, de viscosité des intrants

Méthanogénèse / Ensemble de voies métaboliques produisant du méthane chez certains microorganismes, qualifiés de méthanogènes.

Mix / Assemblage de différents intrants

Mode batch / Essais réalisés dans un système de production fermé fonctionnant de façon discontinue par lots successifs

Nutriments / Substance organique ou minérale, directement assimilable par les sols

Objectifs de développement durable (ODD) / Objectifs fixés par les Nations Unies pour répondre aux défis mondiaux auxquels nous sommes confrontés

Potentiel méthanogène / BMP (Biochemical methane potential), indicateur permettant de déterminer la quantité de biogaz (CH₄) pouvant être produite par la dégradation en absence d'oxygène d'un substrat organique

Pouvoir calorifique / Quantité d'énergie thermique libérée lors de la combustion. Grandeur qualifiant un vecteur énergétique (gaz, biochar, ...)

Pyrogazéification / Appellation générique pour un ensemble de procédés de conversion thermochimique à différentes températures et pressions : pyrolyse, torréfaction, gazéification...

Pyrolyse / Procédé de conversion thermochimique opéré dans une gamme de

températures assez large (350-900 °C), se déroulant en absence ou en présence très réduite d'oxygène et permettant de décomposer la matière organique en 3 sous-produits valorisables : syngaz, biochar et/ou huile selon la température de travail

Résilience / Capacité d'une population bactérienne à faire face aux variations d'un milieu

Siccité / Pourcentage massique de matières sèches contenues dans un produit humide ; un produit constitué à 80 % d'eau possède une siccité de 20 %

Struvite / Matière fertilisante riche en phosphore, valorisable en agriculture

Syngaz (ou gaz de synthèse) / Produit gazeux issu de procédés thermochimiques à haute température (pyrolyse, gazéification), essentiellement composé d'azote (N_2), de dioxyde de carbone (CO_2), de monoxyde de carbone (CO), de méthane (CH_4) et d'hydrogène (H_2), pouvant être valorisé énergétiquement

Temps de séjour hydraulique / Durée théorique du séjour d'un élément (particule, volume de fluide) en cours de traitement dans un équipement (ex : TSH du mix dans le digesteur)

Thermophile / Se dit de la méthanisation fonctionnant à une température située dans une plage entre 50° et 65°C²

TMCS / Chimie-sorption transmembranaire, technologie permettant la récupération de sulfate d'ammonium

Torréfaction / Procédé de conversion thermochimique à basse température (200-350 °C environ), se déroulant en absence ou en présence réduite d'oxygène et permettant de transformer la matière organique en biochar

Traitement thermochimique / Modification de la structure d'un produit, sous action de la chaleur et de la pression, et sous atmosphère contrôlée en oxygène

Valorisation organique / Désigne l'ensemble des modes de valorisation des déchets biodégradables, par exemple la méthanisation ou le compostage

Vaporeformage / Reformage de la vapeur, processus permettant par exemple la production d'hydrogène à partir de méthane

Water shift reaction / Réaction chimique entre l'eau et un gaz riche en carbone (monoxyde de carbone, ou dioxyde de carbone), dont l'objectif est de produire de l'hydrogène

LISTE DES ABRÉVIATIONS

Al	Aluminium
APS	Avant-projet sommaire
BMP	Biochemical methane potential, potentiel méthanogène
C	Carbone
CH ₄	Méthane
Cl	Chlore
CO ₂	Dioxyde de carbone
Cr	Chrome
COD	Carbone organique dissous
COT	Carbone organique total
CSR	Combustibles solides de récupération
Cu	Cuivre
DCO	Demande chimique en oxygène
DMA	Déchets ménagers et assimilés
Fe	Fer
FOR	Fraction organique résiduelle
GES	Gaz à effet de serre
H ₂ S	Sulfure d'hydrogène, ou hydrogène sulfuré
H ₂ SO ₄	Acide sulfurique
HTC	Hydrothermal carbonization, ou carbonisation hydrothermale
ICPE	Installations classées pour la protection de l'environnement
Mg	Magnésium
MV	Matière volatile
N-NH ₄	Ammonium
N-NO ₂ ⁻	Nitrite
N-NO ₃ ⁻	Nitrate
Ni	Nickel
Nt	Azote total
ODD	Objectifs de développement durable
Pb	Plomb
PCI	Pouvoir calorifique inférieur
Pt	Phosphore total
P ₂ O ₅	Pentoxyde de phosphore
PO ₄ ⁻	Phosphate
Si	Silicium
tMB	Tonne de matière brute
tMS	Tonne de matière sèche
TSH	Temps de séjour hydraulique
Zn	Zinc

“Un projet unique par sa taille, son ambition et son ouverture d’esprit”

 Coralline BLIND, SMET 71

Ce livret raconte le début d’une aventure. Il est une porte ouverte vers des options d’avenir pour des approches territoriales décloisonnées. Il est une source d’inspiration en termes de solutions et de partenariats pour faire un pas de plus vers l’atteinte des objectifs de développement durable (ODD), vers plus de circularité des ressources et dans la lutte contre le changement climatique.

Sur le territoire du Sycotom, la fraction organique représente 30 à 40 % des ordures ménagères. Malgré la volonté et l’obligation³ de développer les collectes séparatives de biodéchets qui permettent un retour au sol de bonne qualité, les premiers retours d’expérience de territoires montrent que 100 % de cette matière ne sera pas captée par les collectes sélectives⁴. Ainsi, se questionner sur le devenir de la fraction organique résiduelle c’est :

- > se laisser la possibilité d’une plus forte valorisation (matière et énergie) donc d’une meilleure circularité des ressources ;
- > par voie de conséquence, se laisser la possibilité d’améliorer les rendements des incinérateurs en place (les intrants appauvris en matière organique auront un pouvoir calorifique plus important).

Le SIAAP, quant à lui, doit prendre en compte l’avenir incertain des boues issues de stations d’épuration urbaines, dont le retour au sol pourrait être remis en cause. De nouvelles contraintes pourraient être imposées à l’épandage et au compostage⁵. S’ajoute à ces contraintes l’éloignement de plus en plus important des sites de valorisation. L’organisation actuelle de la filière boues en matière de valorisation organique au SIAAP (47 % de compostage, 11 % d’épandage)⁶ pourrait donc être fragilisée.

Le benchmark⁷ réalisé en 2016 a mis en évidence que la cométhanisation d’une fraction organique résiduelle avec des boues n’avait pas ou peu été étudiée jusque là. Le Partenariat d’Innovation a été lancé à la suite de cette étude par le Sycotom et le SIAAP en novembre 2016.

Ce livret raconte le début d’une aventure scientifique, technologique, institutionnelle et humaine.



3. [REF A]

4. A Lorient, 37 kg/hab de biodéchets ont été collectés en 2017, à Colmar Agglomération 36 kg/an/hab, 32 kg/hab/an sur le territoire du Sictom Val de Saône en 2017 [REF B]. Le meilleur ratio identifié à ce jour étant de 69 kg/hab/an, obtenu en porte-à-porte sur le syndicat Mixte de Thann-Cernay [REF C]. Les déchets organiques représentent en moyenne 83 kg/an/hab - [REF D]

5. [REF F]

6. Chiffres 2019.

7. [REF G]



ÉTAPE 1

2 ANS

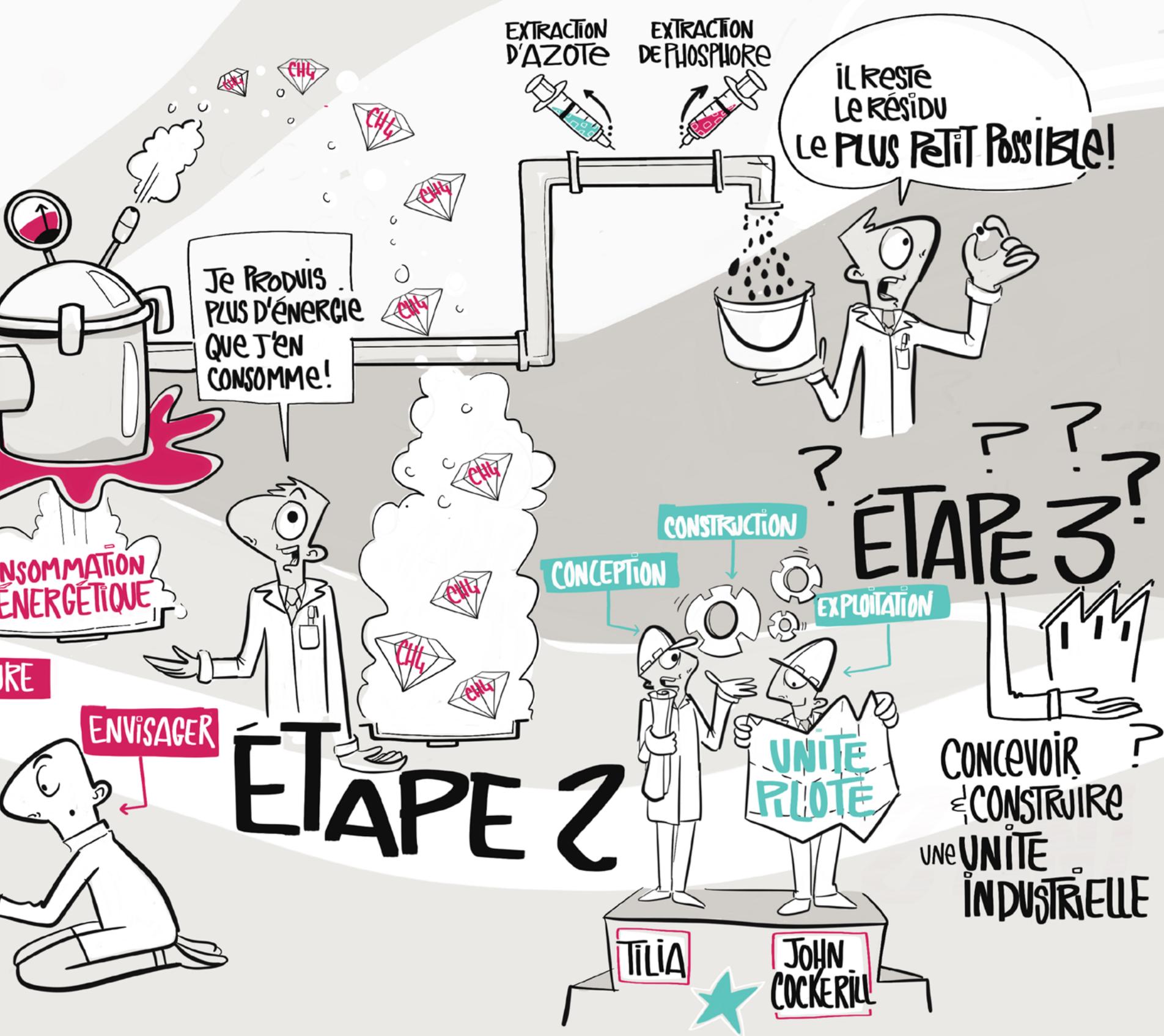
- SUEZ
- VINCI
- TILIA
- JOHN COCKERILL

PRIORISER

ÉTUDIER

INCLURE





LES DÉCHETS ONT ENCORE DE LA RESSOURCE

Le point de vue consistant à considérer qu'il est pertinent de réfléchir à une voie de valorisation efficace de la fraction organique résiduelle (FOR) des ordures ménagères ne fait pas consensus aujourd'hui parmi les acteurs du secteur. **Et s'il restait suffisamment de matière organique à valoriser dans cette fraction malgré le développement des collectes sélectives spécifiques ?**

D'une part, les consignes de tri sur les déchets alimentaires ne concernent pas 100 % de la matière organique et, d'autre part, le taux de participation à ces collectes spécifiques n'est pas non plus de 100 %. Aujourd'hui, les collectes sélectives en place permettent de détourner vers les filières spécifiques de valorisation organique entre 40 et 80 % de cette matière contenue dans les ordures ménagères⁸.

Se lancer dans le projet Cométhà, c'était juste considérer qu'il est prudent de ne pas mettre tous ses œufs dans le même panier.

Malgré la mise en place d'actions de sensibilisation pour limiter le gaspillage, favoriser le réemploi et la mise en place de collectes sélectives performantes, à moyen terme, il restera toujours une fraction organique dans la poubelle grise. Les unités d'épuration produiront toujours des boues, et des résidus graisseux. Il semble alors pertinent d'identifier les solutions permettant de valoriser ces déchets, de les caractériser et de les comparer.

Le projet Cométhà ambitionne de construire des connaissances et des expériences :

- > **sur les procédés d'extraction possibles de l'azote et du phosphore présents dans les boues, la FOR, le fumier ou les graisses ;**
- > **sur les valorisations matière et énergétique possibles de ce qu'il restera après la mise en place de collectes sélectives performantes des déchets alimentaires ;**
- > **sur la pertinence de travailler avec des mix d'intrants pour l'efficacité des valorisations matière et énergétique.**



76 000
tonnes par an
de fraction organique
résiduelle disponible
pour le projet

1. Extraire ce qui est valorisable et rare de nos boues et nos déchets

“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.”

Fabien ESCULIER, LEESU

Actuellement, la France dépend à hauteur de 95 % des importations pour sa fertilisation minérale. D’une part, la production d’engrais azotés est fortement émettrice de gaz à effet de serre car elle consomme de grandes quantités de gaz naturel, d’autre part, les phosphates naturels employés proviennent de ressources non renouvelables, aux stocks limités⁹.

La récupération des nutriments comme le phosphore ou l’azote dans les boues, les déchets ou le fumier participera à la résilience des territoires et des pratiques agricoles et ainsi contribuera à l’atteinte de l’ODD 2 (éliminer la faim, assurer la sécurité alimentaire, améliorer la nutrition et promouvoir l’agriculture durable) et à lutter contre le changement climatique.

Si on considère la FOR et les boues en proportions égales (en matière sèche), on peut considérer que l’azote provient à 15 % de la FOR et 85 % des boues, quand le phosphore vient à 10 % de la FOR et 90 % des boues.¹⁰

Au cours du projet, les équipes s’intéressent à l’azote ammoniacal ($N-NH_4$), à l’azote total (Nt), aux nitrates ($N-NO_3^-$) ou aux nitrites ($N-NO_2^-$), au phosphore et à leurs transformations possibles pour obtenir un débouché parmi les suivants :

- > solution de sulfate d’ammonium : utilisée comme engrais ;
- > la struvite : utilisée comme engrais agricole à assimilation lente ;
- > solution concentrée d’ammoniac : utilisée dans de nombreux procédés industriels ou même dans les fours d’incinération comme traitement des oxydes d’azote gazeux.



LE SAVIEZ-VOUS ?

Dans l’antiquité romaine, les nutriments contenus dans les urines étaient utilisés en agriculture.

Au début du 20^e siècle plus de la moitié de l’azote de l’urine et des matières fécales de l’agglomération parisienne étaient recyclées et utilisées pour l’agriculture¹¹.

9. [REF H]

10. [REF P]

11. [REF I] et [REF J]

2. L'extraction et la valorisation ne doivent pas se faire à tout prix

“Des services urbains régénératifs, sobres, sélectifs”

Denis PENOUEL, Syctom (ex SIAAP)

Le projet Cométhà cherche à enrichir la connaissance sur le catalogue des solutions technologiques qui seront disponibles demain.

Les défis à relever dans ce projet sont plus qu'intéressants sur les plans scientifique et technique. Mais à l'heure où la ressource énergétique est précieuse, **il est fondamental d'inscrire un projet comme celui-ci dans une démarche de recherche de sobriété. C'est bien un des objectifs affichés par le Syctom et le SIAAP de présenter un bilan énergétique global positif.** C'est-à-dire prendre le pari de réussir à proposer un enchaînement de solutions qui consomme moins d'énergie qu'il n'en produit.

Ce défi est de taille. En effet, l'optimisation des technologies, la multiplication de briques technologiques ou encore l'ajout de procédés de pré-traitement des intrants permettant d'améliorer leur potentiel méthanogène, sont par définition énergivores.

L'extraction de la matière, de l'énergie et leurs valorisations ne peuvent pas être faites à n'importe quel prix économique (maîtrise des coûts d'investissement et d'exploitation), social (intégration en milieu urbain dense en considérant l'acceptabilité sociale et la sûreté des personnes) et environnemental (impact environnemental au sens large et spécifiquement sobriété énergétique).

Chaque titulaire a donc veillé à ce que les bilans énergétiques des enchaînements de procédés proposés soient plus que positifs et que les impacts environnementaux soient limités au minimum, et compensables pour ceux qui ne peuvent être évités.

Les essais ont permis de démontrer de ce point de vue :

- > que le traitement des différents intrants en mélange permet d'atteindre un bilan énergétique et environnemental supérieur à celui atteint dans le cadre de filières séparées ;
- > que la valorisation énergétique du digestat issu de la méthanisation par traitements thermochimiques permet d'atteindre l'équilibre énergétique de toute la filière. En effet, le digestat a un contenu résiduel riche en carbone.



ENSEIGNEMENTS

La mise en place de traitements thermochimiques du digestat peut permettre de moderniser l'infrastructure et d'adapter les industries afin de les rendre durables et ainsi contribuer à l'atteinte de l'objectif de développement durable n°9 (bâtir une infrastructure résiliente, promouvoir une industrialisation durable qui profite à tous et encourager l'innovation).

3. La force des approches complémentaires

“Répondre aux défis environnementaux auxquels notre planète est confrontée en participant proactivement au processus de transition énergétique décidé par notre nation”

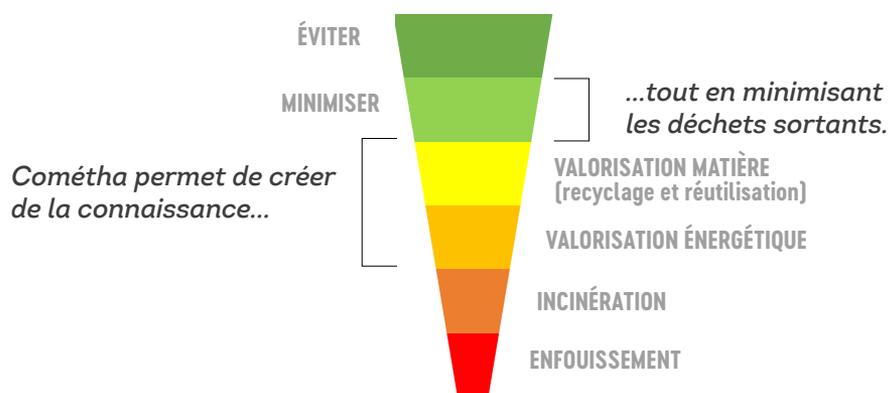
Jacques OLIVIER, SIAAP

La complémentarité des approches permet d'augmenter les performances globales de circularité et de valorisation ainsi qu'une meilleure agilité pour s'adapter aux rebondissements qui ne manqueront pas de survenir sur de nombreux sujets : retour au sol, rareté de certaines ressources, importance de l'autonomie énergétique.

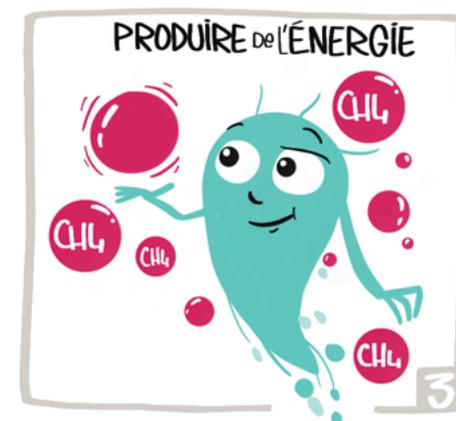
Le code de l'environnement¹² instaure une hiérarchie des modes de traitement. Pour répondre aux enjeux d'avenir, il est prudent de disposer de différentes solutions, qui, combinées et hiérarchisées, plutôt qu'opposées, permettent d'aller le plus loin possible dans la valorisation.

Le projet de Cométhà s'inscrit dans cette démarche. Il s'inscrit en aval de collectes sélectives de déchets alimentaires portées politiquement et réglementairement pour une valorisation organique et un retour au sol. Il permet :

- > **une valorisation des nutriments** encore présents dans la fraction organique résiduelle des ordures ménagères dans une logique d'épuisement de la matière ;
- > *in fine*, **une valorisation énergétique** telle qu'elle permette une production d'énergie renouvelable au-delà de la propre consommation de la filière.



La complémentarité des approches permet une performance accrue et plus d'agilité pour s'adapter aux nouveaux contextes à venir.



PRÉPARER L'AVENIR

“On est bloqués depuis un certain nombre d’années et réellement, l’innovation était éminemment nécessaire, il fallait faire avancer les choses, faire bouger les lignes !”

Jean-Marie CHAUMEL, Ademe Île-de-France

Le projet Cométhà, par l’accumulation de connaissances et d’expériences qu’il permet, participe activement à faire avancer la France sur le chemin de l’atteinte des objectifs de développement durable (voir pages 22-23).

Pour renforcer le cercle vertueux de l’économie circulaire, les pouvoirs publics vont devoir piloter et adapter les réglementations. Alors qu’il participe aussi à respecter la loi transition énergétique¹³, ce projet a pour vertu d’identifier les freins, voire les blocages réglementaires qui existent aujourd’hui. Par exemple sur les questions :

- > des autorisations de traitement des mélanges ;
- > des nomenclatures ICPE pour les nouvelles technologies qu’il pourrait être pertinent de déployer ;
- > de la sortie du statut de déchet des nutriments extraits ou d’autres sous-produits de traitement pour permettre leur valorisation organique ;
- > d’injection de gaz renouvelables de nouvelle génération dans les réseaux de gaz naturel.

Il va falloir être agile, évoluer rapidement et faire bouger les lignes là où il est pertinent de le faire.



1. La difficile question du retour au sol

“La récupération des nutriments est d’intérêt général.”

Fabien ESCULIER, LEESU

Les domaines de l'eau et des déchets ont leur part à prendre dans la mise en place de sociétés qui tendent vers plus de circularité. Les boues, graisses issues de l'épuration, le fumier, comme la fraction organique résiduelle, contiennent de nombreuses et précieuses ressources (voir chapitre 1).

Les projets de valorisation de la fraction organique résiduelle sous forme d'un amendement agricole sont très compliqués à mettre en œuvre pour des questions d'acceptabilité et de compatibilité juridique avec la réglementation française actuelle.

La question du retour au sol des boues est, quant à elle, dans une phase délicate¹⁴ du fait de la possible remise en question du mélange avec les déchets verts triés à la source après 2026 et du fait d'une éventuelle baisse des seuils fixés dans le Décret Socle Commun pour l'épandage.



RETOUR AU SOL : QUELLE STRATÉGIE ?

Les fortes barrières actuelles liées au retour au sol ont orienté le projet vers un objectif de maximisation de la valorisation énergétique. Cependant, le projet Cométhà est construit de manière à ne fermer aucune porte et il cherche à caractériser les capacités d'extraction des nutriments (phosphore, azote), à différentes étapes de la filière, dans le cas où les barrières réglementaires et sociales seraient un jour levées.



La question du retour au sol : des évolutions sont indispensables

2. Pourquoi s'intéresser au méthane ?

“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.”

Anthony MAZZENGA, GRTgaz

La méthanisation des déchets organiques pour produire du biogaz est d'autant plus pertinente que non seulement le biométhane est stockable, mais son transport est aisé, surtout en zone urbaine dense. Les réseaux de transport et de distribution de gaz naturel sont présents partout et en capacité de recevoir et transporter des quantités supplémentaires de gaz.



Le méthane : vecteur énergétique d'avenir

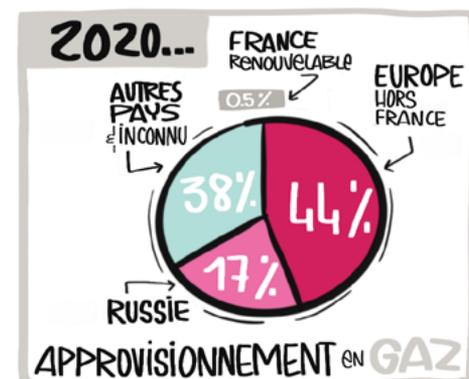
Le biogaz, clone renouvelable du gaz naturel, est essentiellement composé de méthane, de dioxyde de carbone et de vapeur d'eau. Une fois épuré, il devient un biométhane qui peut atteindre les prescriptions techniques des opérateurs de réseaux de gaz. Le contexte réglementaire est actuellement favorable pour l'émergence d'une filière de biométhane (issu de méthanisation ou autres procédés thermochimiques) injecté dans les réseaux de gaz naturel et utilisé en substitution de l'ensemble des usages de ce dernier. Il peut aussi être utilisé en usage domestique (chauffage, cuisson, eau chaude sanitaire), en mobilité, comme carburant pour certains véhicules ou en production simultanée de chaleur et d'électricité via la cogénération.

Les procédés actuels de méthanisation qui permettent la production de biogaz ne dégradent qu'une partie de la matière organique : celle qui est la plus facilement accessible par les bactéries. La production de méthane est ainsi limitée et génère un résidu à traiter en grande quantité, le digestat, qui a donc un contenu résiduel en matière organique assez élevé.

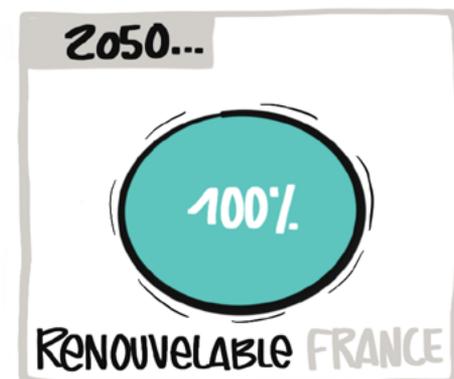
Le digestat constitue une matière pertinente pour des post-traitements non plus biologiques, mais thermochimiques, permettant ainsi de maximiser la production de gaz, dont une large partie peut être valorisable.

Dans une étude¹⁵ récemment mise à jour, l'ADEME, GRDF et GRT Gaz rappellent les potentiels importants de production de gaz de synthèse, qui après traitement, permettent d'augmenter les quantités de méthane d'origine non-conventionnelle injectées dans les réseaux publics de transport et de distribution de gaz naturel. Les récentes crises illustrent l'importance de rechercher l'indépendance en gaz de la France et incitent à accélérer les investissements dans ce sens.

Vers un mix de gaz 100 % renouvelable
« Fabriqué en France »¹⁶



JE PEUX PARTICIPER !



15. [REF L]

16. [REF M]

Un droit d'accès aux ouvrages de distribution de gaz est aujourd'hui garanti pour tous les producteurs de gaz renouvelables¹⁷. Si la notion de « gaz renouvelable » n'est pas encore explicitement définie dans la loi, elle peut vraisemblablement intégrer toute forme de syngaz produit à partir de déchets ou de biomasse.

Pour la mise en œuvre effective de ce droit d'accès pour tous les projets d'injection de syngaz issu de traitements thermochimiques, il est nécessaire d'étendre les modalités d'accès aux infrastructures gazières (aujourd'hui définies pour le biométhane) à l'ensemble des gaz naturels qualifiés de « renouvelables ». Pour cela, la compatibilité du syngaz issu de ces traitements avec les prescriptions des réseaux de gaz doit être testée et confirmée.

L'émergence d'une filière de production de méthane renouvelable par de nouveaux traitements thermochimiques fait face à plusieurs enjeux aujourd'hui :

- > des enjeux techniques : démontrer l'opérabilité industrielle, la pertinence technico-économique, et la compatibilité du syngaz produit avec les prescriptions techniques des opérateurs de réseaux de gaz naturel ;
- > des enjeux réglementaires : finaliser les modalités d'accès aux réseaux de gaz naturel pour les projets avec injection (réalisation d'études détaillées, accès au registre de capacités, modalités contractuelles de l'injection, droit à l'injection, etc.).



Qu'en est-il des rejets de CO₂ dans le projet Cométha ?

Dès le début du projet, fin 2016, différentes pistes sont explorées pour minimiser les rejets de dioxyde de carbone dans le projet Cométha. La méthanation, étudiée en phase 1 par deux groupements puis mise en place à l'échelle pilote par l'un des deux titulaires, permet de maximiser la conversion de dioxyde de carbone en méthane, ce qui

diminue mécaniquement la quantité de dioxyde de carbone produit.

Deux titulaires se sont également intéressés à la valorisation du dioxyde de carbone émis : l'un misant sur la production de microalgues pour consommer le dioxyde de carbone et l'autre explorant la possibilité d'une valorisation industrielle après récupération.



LE SAVIEZ-VOUS ?

D'autres projets actuellement en cours au SIAAP ou au Sycotom testent la faisabilité de nourrir des microalgues à partir du dioxyde de carbone, à travers des puits de carbone¹⁸ ou des photobioréacteurs, afin de le transformer en biocombustible ou en bioplastique.

Ces technologies de stockage du dioxyde de carbone sont prometteuses bien qu'elles soient encore en développement.

17. [REF N]

18. [REF O]

3. Un projet pour faire bouger les cadres réglementaires

“Continuons à anticiper”

Martial LORENZO, ancien directeur général du Sycotm

La phase 1 du projet a d'ores et déjà permis d'identifier quatre enjeux réglementaires :



La question des mélanges	La nomenclature	Le statut de déchet	L'injection des nouveaux méthanes	
Les résultats de la phase 1 du projet Cométhà ont démontré la pertinence d'un traitement des différents intrants en mélange par rapport à des traitements dans le cadre de filières séparées.	Les techniques nouvelles liées aux traitements thermochimiques ne peuvent en aucun cas relever de la même nomenclature que l'incinération alors même que le processus thermochimique à l'œuvre est totalement différent.	Les sous-produits issus des traitements thermochimiques sont un mélange de résidus à haut pouvoir calorifique (PCI) et de cendres.	Les nutriments extraits, où que ce soit dans les filières étudiées et par quelque procédé que ce soit, ont le statut de déchet.	Le méthane issu de procédés de (co)méthanisation, méthanation ou de pyrogazéification, comme celui du projet Cométhà, peut faire partie des solutions qui permettront d'atteindre un mix de gaz renouvelable français en 2050 et ainsi contribuer à l'indépendance gazière du pays.
Pour que des unités de cométhanisation soient créées, la réglementation doit laisser la possibilité de traiter certains mélanges d'intrants.	Quelle rubrique ICPE pour la torréfaction, la pyrolyse, la carbonisation hydrothermale ou la gazéification ?	La sortie de ces résidus ou des cendres du statut de déchet permettrait de les valoriser plutôt que de les enfouir.	La sortie des nutriments extraits, du statut de déchet, permettrait de les repositionner dans une démarche d'économie circulaire. Leur vocation est de pouvoir, par exemple, retourner au sol.	Il reste à inventer la réglementation qui permettra une injection de ces nouveaux méthanes dans les réseaux.



Faisabilité sociale et perception du citoyen

Le monde de l'eau et celui des déchets sont très régulièrement confrontés à la question de l'acceptabilité de leurs infrastructures. On peut s'attendre à ce que des technologies nouvelles, peu connues du grand public suscitent des craintes, qu'elles soient environnementales, sanitaires, liées à la qualité de vie ou encore à l'intégration urbaine.

La question des risques perçus doit être prise en considération le plus tôt possible dans la communication et la concertation autour de projets de ce type pour permettre de sensibiliser et de convaincre autour de la plus grande circularité que permettent ces innovations. Ces nouveaux modes de traitement sont plus vertueux que ceux actuellement existants.

CONTRIBUTION AUX OBJECTIFS DE DÉVELOPPEMENT DURABLE DU PROJET COMÉTHA

La récupération des nutriments comme le phosphore ou l'azote participe à la résilience des pratiques agricoles.

Maximiser la transformation de la matière organique en gaz renouvelable comme la réduction de la charge des effluents rejetés à l'issue de la filière participe à limiter la pollution de l'eau et de l'air.



La réalisation des unités pilotes apportera de nouveaux éléments de connaissance et permettra de faire évoluer la maturité des briques innovantes.

La réalisation du projet CométhA permettra de réduire significativement l'impact environnemental des filières en place.

La récupération des nutriments permet une gestion plus durable de la matière organique. Minimiser les résidus et limiter les rejets dans l'eau et l'air.

La réduction de la charge des effluents rejetés à l'issue de la filière participe à limiter la pollution de l'eau.

L'un des premiers objectifs de Cométha est d'accroître la production de gaz renouvelable. Le projet Cométha participe à la promotion d'un partenariat entre acteurs européens pour le développement de technologies innovantes.

Le projet Cométha participe à la promotion d'une politique axée sur l'innovation et stimulant la croissance des entreprises, laboratoires de recherche et startups. La récupération du phosphore et de l'azote participe à l'amélioration de l'efficacité de l'utilisation des ressources.



INNOVATIONS TECHNOLOGIQUES DU PROJET COMÉTHA

“Nous avons l’ambition, peut-être la prétention de pouvoir faire aussi un peu avancer la science.”

 Pierre HIRTZBERGER, Syctom

Nous avons fait le choix de **vous proposer une lecture transversale des filières proposées par les équipes titulaires**. Cette présentation entremêlée des projets nous a semblé, d’une part, plus riche d’enseignements qu’une simple lecture linéaire de chacun des 4 avant-projets d’unité pilote proposés à l’issue de la phase 1 et, d’autre part, plus à l’image du déroulement de la phase 1. En effet, durant cette phase de recherche et développement, 4 projets ont été menés en parallèle. Cela a impliqué de fait une réflexion en itération des maîtres d’ouvrage et de leurs assistants tout en préservant l’égalité de traitement des quatre titulaires dans une démarche transparente.

Ainsi, la lecture des pages qui suivent vous portera tour à tour vers des questionnements et innovations autour :

1. des intrants et de leurs préparations ;
2. de la cométhanisation en tant que telle ;
3. de la valorisation complémentaire du digestat sortant de la méthanisation ;
4. des traitements thermo-chimiques (dont la pyrogazéification) ;
5. de la méthanation ;
6. de la récupération des nutriments (azote et phosphore).

Elle vous permettra enfin d’avoir une vision très synthétique de chacune des quatre filières qui ont été proposées au stade d’avant-projet. La bibliographie utilisée pour rédiger l’ensemble de ce chapitre 3 est référencée par [REF P].



Comment résumer en une soixantaine de pages le travail de plus de 100 personnes, 300 essais réalisés, 50 procédés ou combinaison de procédés testés, 20 tonnes d'intrants analysés ?

Il a fallu être synthétique. Très synthétique.

Il a fallu faire des choix.

Les prochaines pages vont notamment vous apporter un éclairage sur les procédés de conversion thermo-chimique, la méthanation consécutive à ces procédés, ainsi que sur la récupération des nutriments.

Si toutes les briques technologiques ne sont pas intégrées à la phase 2 des unités pilotes, elles n'en sont pas moins intéressantes et leur lecture parallèle permet d'avoir des éléments d'informations, voire de comparaison sous différents angles.

IMPACT ENVIRONNEMENTAL

Aller plus loin dans la recherche de l'expression du potentiel méthanogène nécessite l'ajout de technologies et procédés souvent consommateurs d'énergie.

Les premières approches de bilan énergétique réalisées sur les propositions pilotes confirment que le premier poste d'émissions de GES d'une telle filière est lié à l'énergie (85 % des émissions) et notamment aux besoins en chaleur.

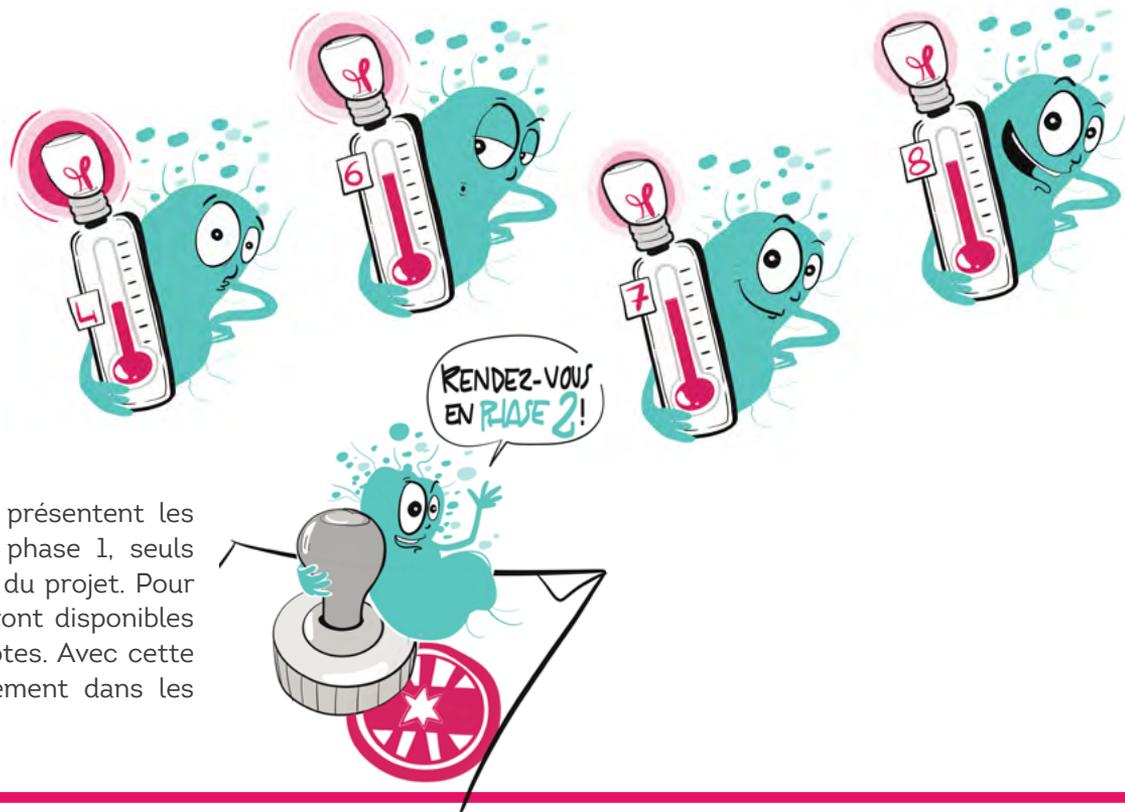
Il est indispensable de veiller à ce que les bilans énergétiques soient plus que positifs pour que certains procédés de la filière fonctionnent en autoconsommation. C'est d'ailleurs le sens d'un des objectifs que ce sont fixés le SIAAP et le Sycatom au lancement du projet.

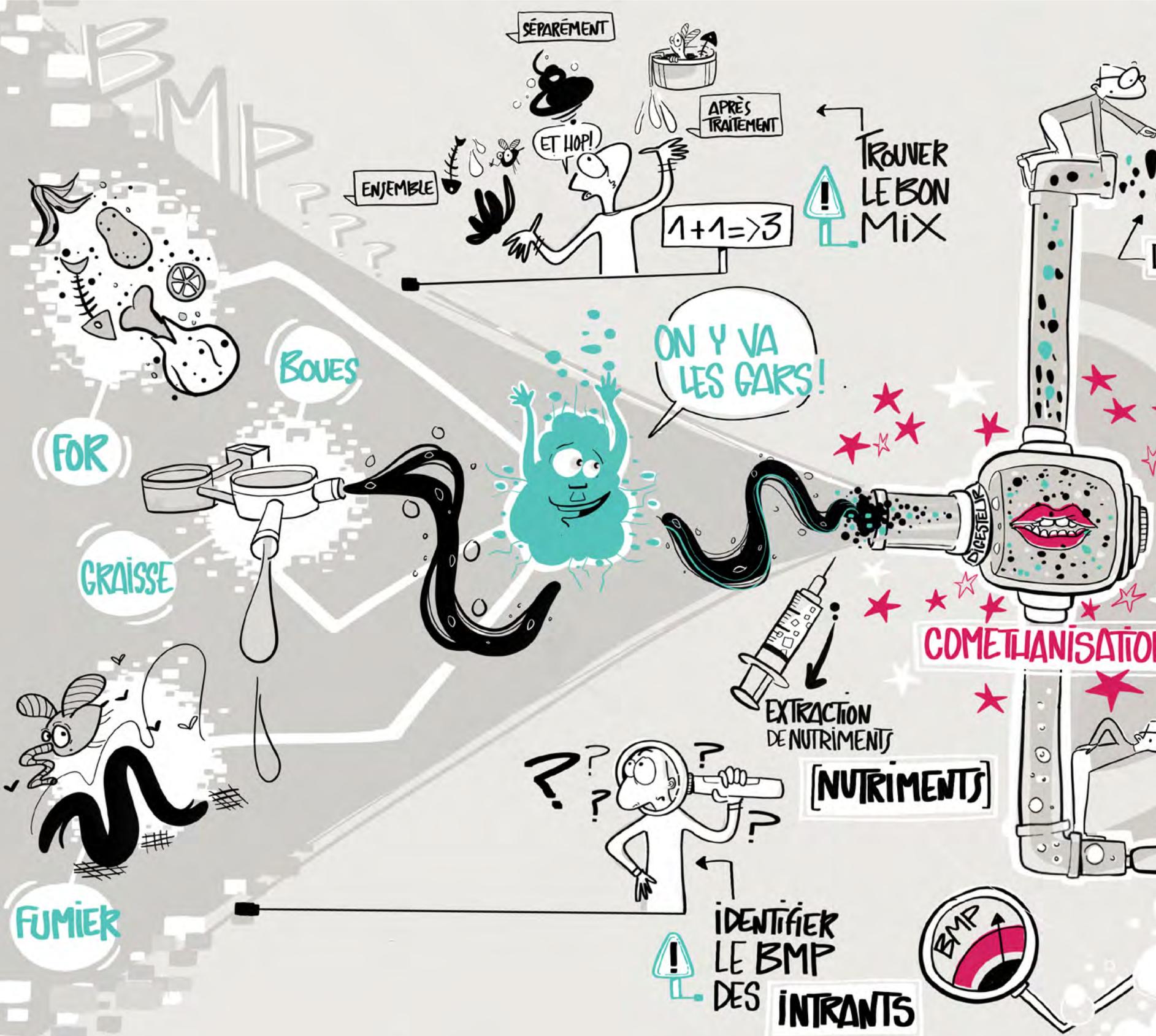
INNOVATION

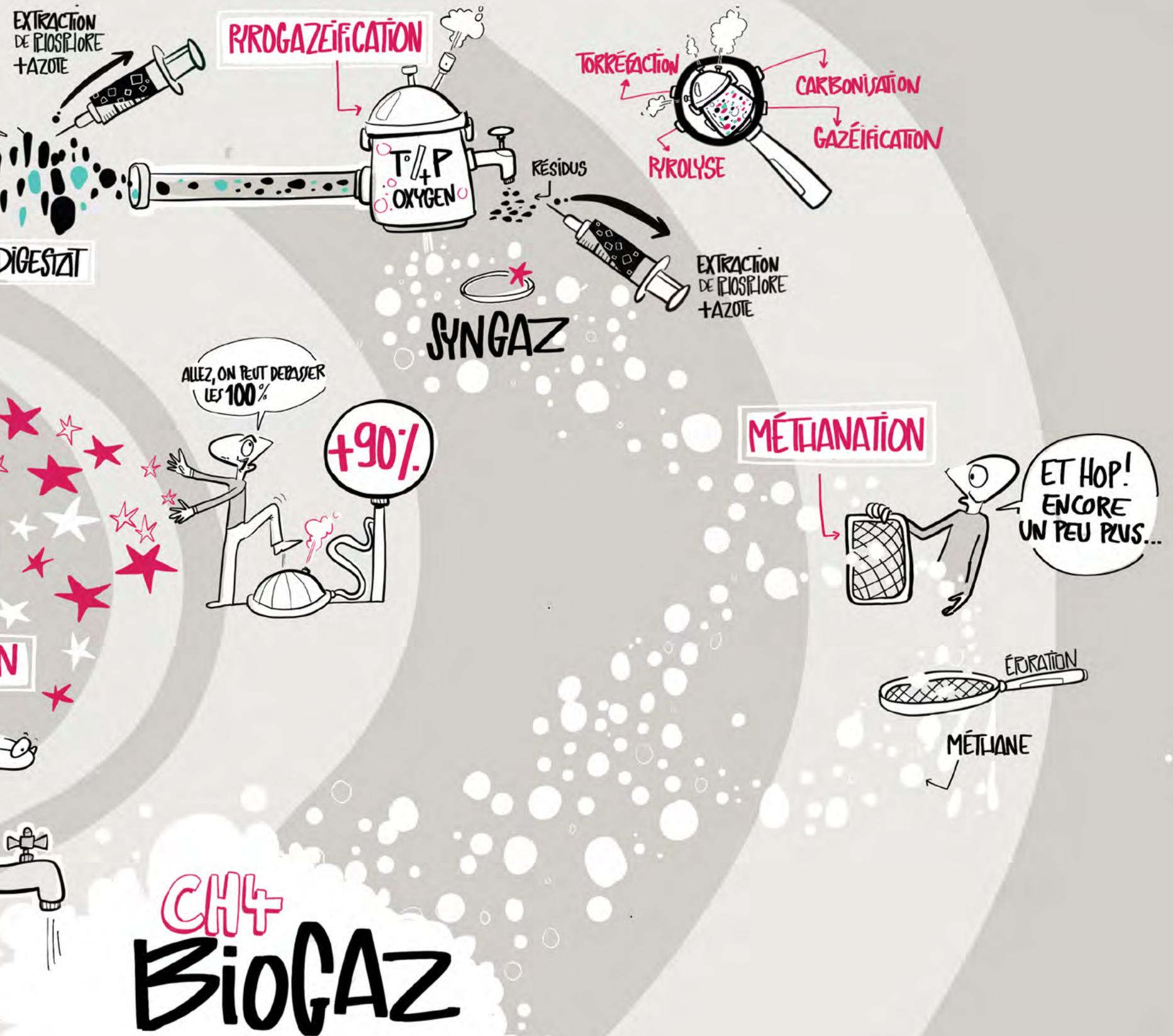
Toutes les propositions qui ont été formulées par toutes les équipes ont été qualifiées selon leur niveau de maturité technologique sur une échelle qui comprend 9 niveaux. Le niveau 1 est le plus bas niveau de maturité technologique. Le niveau 4 correspond à la validation en laboratoire alors que le niveau 9 correspond à un système éprouvé à travers des mises en œuvre réussies.

EN ROUTE VERS LA PHASE 2

Malgré toutes les promesses que présentent les différents procédés envisagés en phase 1, seuls certains sont étudiés dans la suite du projet. Pour eux des résultats plus avancés seront disponibles à l'issue de la phase des unités pilotes. Avec cette vignette, vous les repérez facilement dans les prochaines pages.



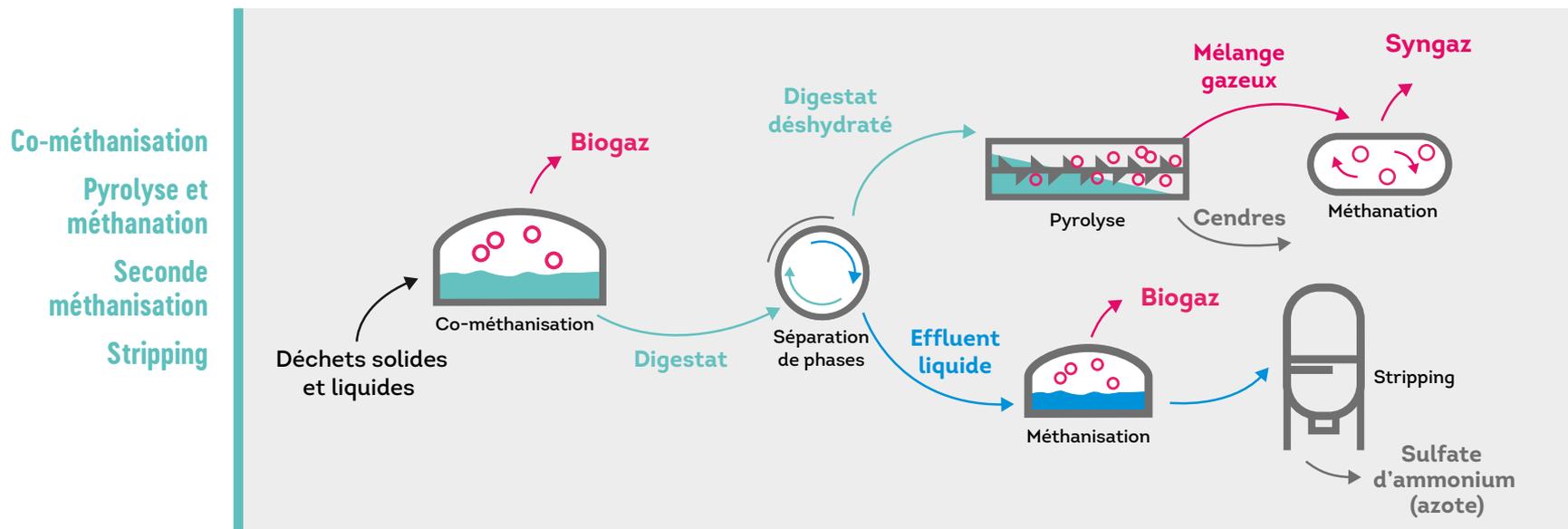
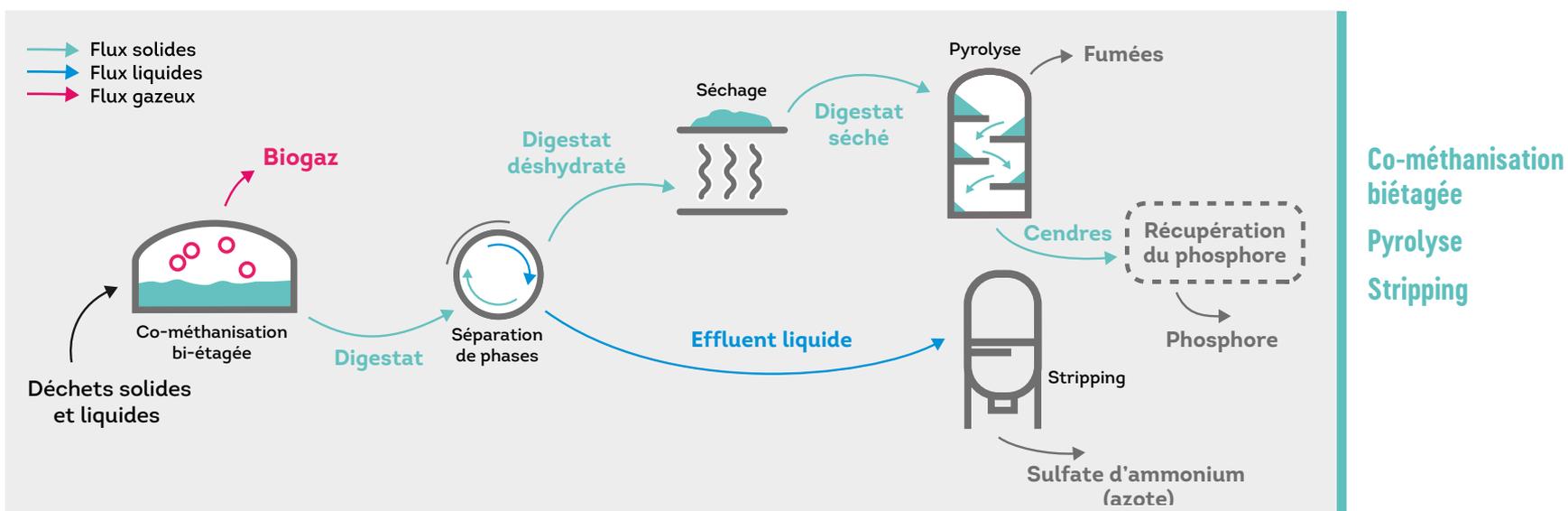




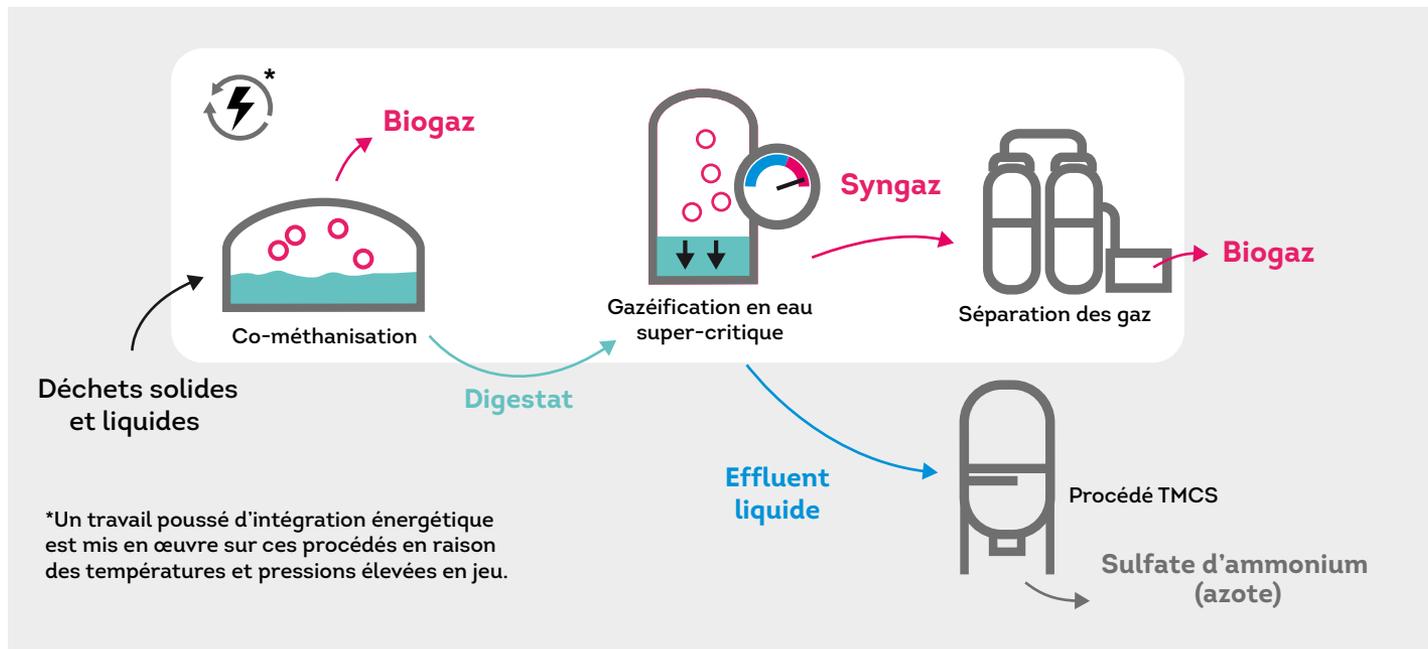
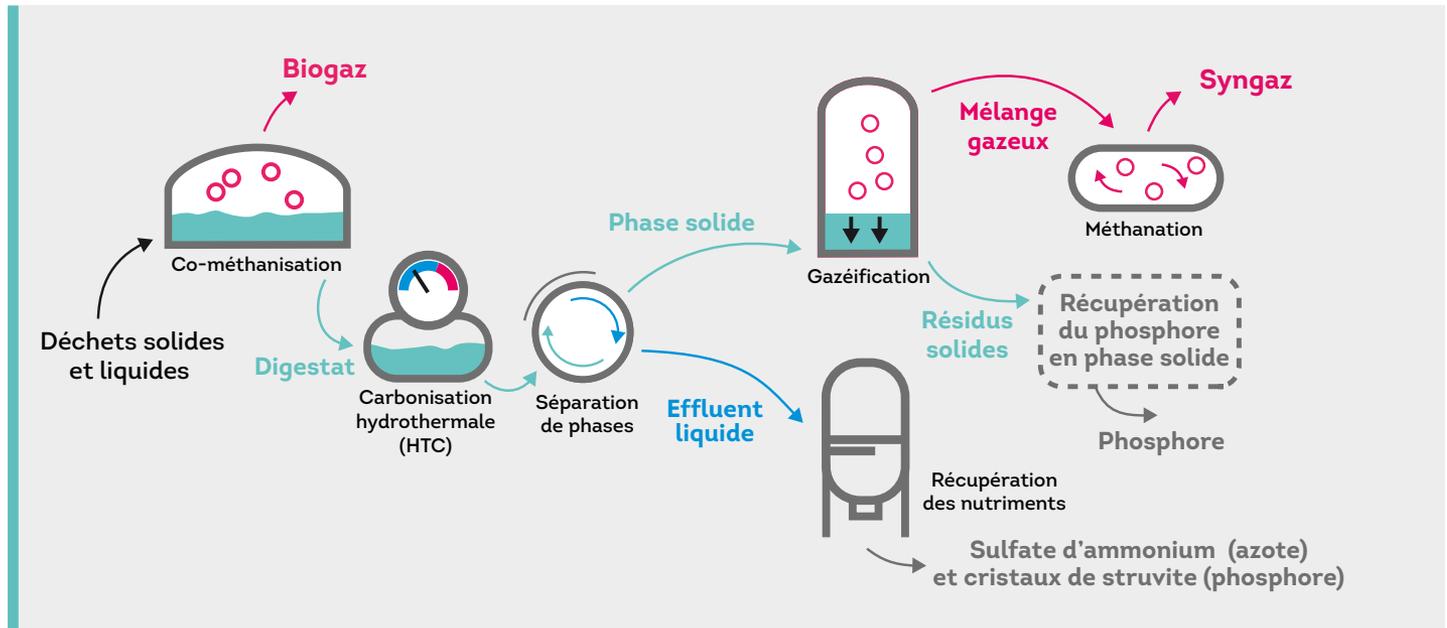
Filières complètes proposées à l'issue de la phase 1

“Quatre filières qui répondent aux critères initiaux et qui sont différentes”

 Fabrice BELINE, INRAE



Co-méthanisation
Carbonisation
hydrothermale
(HTC)
Gazéification et
méthanation
Récupération des
nutriments

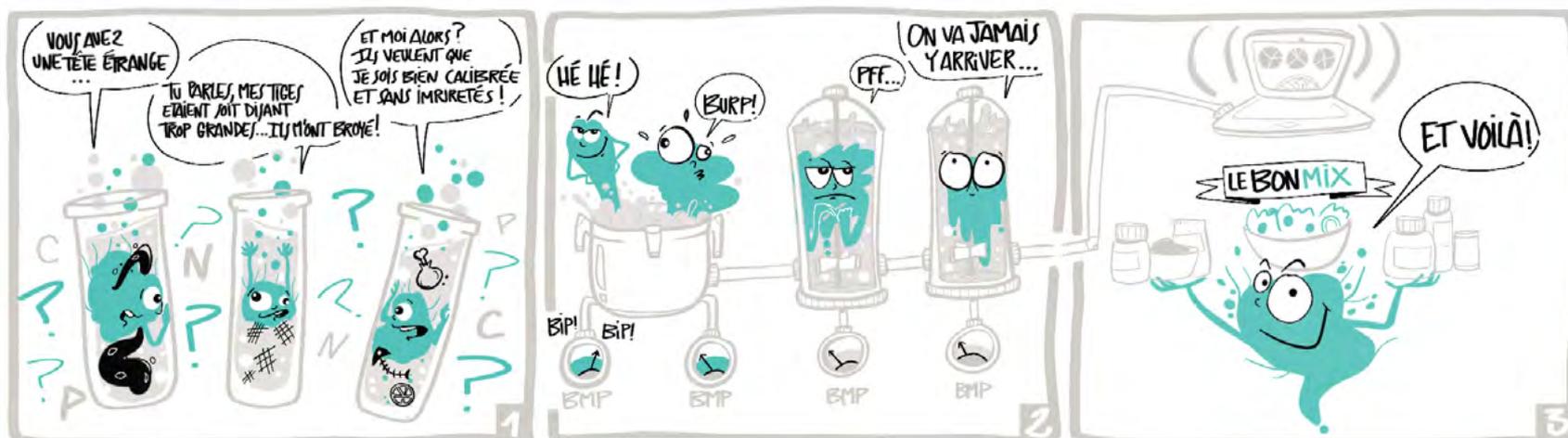


Co-méthanisation
Gazéification en
eau super-critique
Procédé TMCS

La gestion mutualisée de différents déchets et sous-produits a permis d'accroître la pertinence des différents procédés techniquement et énergétiquement. L'enseignement global sur ce point est qu'il faut raisonner sur un territoire dans son ensemble.

1. Les intrants et leurs préparations

Nous appelons intrant, ce qui entre dans une unité de traitement. Les intrants, dans le cas du projet Cométhà, regorgent de ressources (voir Chapitre 1.1) que le projet cherche à valoriser : carbone, phosphore, azote...



Objectif : trouver le bon mix intrants / préparation / process

L'étude des intrants, une démarche en 3 temps :

- > d'abord, pour valoriser les intrants, il faut identifier précisément leur composition physico-chimique, leur charge en matière organique¹⁹. Les concentrations de carbone et de macronutriments sont aussi analysées afin d'évaluer le potentiel de récupération de nutriments comme l'azote ou le phosphore ;
- > ensuite, la production maximale de méthane qui peut être attendue à l'issue de la méthanisation de chaque intrant (Biochemical Methane Potential - BMP)²⁰ fait l'objet de nombreux tests ;
- > enfin, tous ces tests, extrapolés, permettent de choisir la composition du mix d'intrants la plus pertinente au regard des pré-traitements et des procédés qui sont envisagés par les différentes équipes.

Ont été analysés en phase de caractérisation des intrants : 6 tonnes de matière brute (tMB) de FOR, 11 tMB de boues²¹, 3 tMB de fumier équin, et quelques centaines de kilos de graisses.

19. La performance de la cométhanisation est directement liée à la charge en matière sèche organique des intrants.

20. Pour évaluer le BMP, on mesure la vitesse de production de biogaz (cinétique de fermentation) et la composition en méthane (CH₄) et dioxyde de carbone (CO₂) des gaz issus de la réaction. Le BMP s'exprime en litres ou m³ de CH₄ par kilo de matière.

21. Différentes boues ont été testées : boues biologiques ou mixtes, digérées ou non digérées.

Ces tests ont également permis de répondre aux questions suivantes :

Existe-t-il dans les intrants des facteurs limitants à la méthanisation ?

Aucun paramètre potentiellement inhibiteur (métaux, ammoniac, phénol...) de la réaction dans le digesteur, n'est identifié, bien que la concentration d'azote doive être surveillée pour éviter une hausse brusque. Le rapport carbone/azote dans la FOR, tel que mesuré, se situe dans la plage idéale pour la croissance des micro-organismes.

Une attention particulière doit être accordée par la suite à la présence de soufre qui peut se traduire par une concentration non souhaitable de sulfure d'hydrogène (H_2S) dans le biogaz.

Pourquoi mélanger les intrants est-il pertinent et quel rôle joue chacun des intrants ?

Plusieurs paramètres influent sur les intrants : l'origine, la saison, certains événements (fortes pluies, période d'inondations, infiltrations d'eau dans les réseaux...). Des variations importantes dans la composition des intrants peuvent avoir un impact sur la performance des systèmes de traitement proposés. Or, il existe une véritable variabilité des propriétés de la FOR comme des boues.

- > L'utilisation d'un mix d'intrants a naturellement tendance à tamponner les variations intrinsèques d'un seul intrant. Il permet également d'obtenir le taux adéquat de charge organique pour une meilleure expression du BMP selon le type de digesteur envisagé.
- > La teneur en azote ammoniacal (ammonium) varie significativement entre les échantillons de FOR et de boues. Il est préférable d'ajuster les proportions du mélange d'intrants, permettant de maîtriser la teneur en ammonium et ainsi d'éviter les inhibitions.
- > Enfin, la FOR et le fumier non préparés ont des taux de dégradation très différents, ce qui n'encourage pas, au premier abord, la cométhanisation de ces deux intrants. La préparation est une des pistes étudiées pour gérer ces intrants à cinétiques différentes.

Le broyage mécanique : plus de matière organique dégradée

Le broyage mécanique déstructure la matière ce qui permet de la rendre plus accessible par la suite. En augmentant la surface active disponible pour les micro-organismes, il permet de maximiser le taux de dégradation de la matière organique au cours de la cométhanisation.

Le broyage contribue également à l'homogénéisation²² du mix d'intrants. La technique du broyage, est utilisée par la plupart des équipes seulement pour le fumier. L'une des équipes l'utilise également pour la FOR.



RÉSULTATS

Le gain de BMP lié au broyage a été estimé à 8 %.
Ce chiffre devra être confirmé en phase pilote.



Le pré-traitement par ultrasons : certains ont essayé...

Le procédé par ultrasons²³ sur un substrat liquide permet la formation de microbulles de gaz qui grossissent, vibrent et implosent au rythme des phases de compression et d'expansion. Du fait de ces effets mécaniques et chimiques, son application sur une boue biologique ou sur un mélange de boues et de FOR permet de désagréger les floccs et de déstructurer les particules organiques de grande taille. De ce fait, on s'attend à ce que l'application d'ultrasons, sur un mélange de boues et de FOR, permette d'améliorer la solubilisation de la matière organique, la quantité de méthane produit,

ainsi que la vitesse de production de méthane et donc d'obtenir un meilleur BMP du mélange d'intrants. Eh bien non, **les tests ont démontré qu'il n'y avait aucun effet significatif sur la vitesse de production du méthane, ni sur la quantité de méthane produit.**

Procédés thermiques sous pression des intrants : une bonne idée

La réalisation d'études de pré-traitement par procédés thermiques permet de valider leurs effets en termes de réduction du temps de digestion²⁴, d'augmentation simultanée du rendement de biogaz et de réduction du volume de digestat.

Les intrants, qui doivent rester pompables, sont chauffés autour de 160°C. La combinaison température, durée et détente de la surpression résultante permet de détruire la structure cellulaire et de rendre les constituants plus accessibles lors de la phase de digestion anaérobie.

Ces procédés thermiques d'hydrolyse sont testés à différents niveaux de pression (de 4 à 10 bars) et sur des durées variables de 30 à 45 minutes.



RÉSULTATS

Le gain de BMP lié à :

- > une hydrolyse de la FOR ou du fumier durant 45 minutes à 165°C sous 5 à 6 bars est estimé à 8 % par une équipe. On observe également une réduction du temps de séjour nécessaire dans le digesteur.
- > une hydrolyse durant 45 minutes à 165°C sous 5 à 6 bars des boues biologiques non digérées est estimé à 43 %
- > une hydrolyse durant 30 minutes à 165°C sous 10 bars de boues digérées oscille entre +5 à +20% en fonction de leur origine. Une réduction du temps de séjour nécessaire dans le digesteur est également observée.

Une hydrolyse thermique de boues non digérées entraîne aussi une augmentation importante des nutriments dissous.

Par ailleurs, cela accélère la cinétique de production permettant d'optimiser le dimensionnement du digesteur. Enfin, l'augmentation de la température d'hydrolyse semble avoir un effet bénéfique sur ces deux paramètres (cinétique et BMP). Ces résultats devront être confirmés en phase pilote.



²². L'homogénéité des intrants joue un rôle dans la performance des digesteurs

²³. Fréquence d'environ 21 kHz

²⁴. Plus le temps de digestion est court et plus le dimensionnement du digesteur est faible et donc l'emprise foncière faible

2. Les procédés de cométhanisation

Les technologies de méthanisation sur lesquelles s'appuient les titulaires sont éprouvées pour des intrants simples ou en mélange. L'originalité et l'intérêt du projet résident dans le fait d'**utiliser, pour un mélange spécifique, les technologies qui ont fait leurs preuves en cherchant à obtenir le plus fort taux de conversion du carbone possible, le meilleur rendement de production de méthane (CH₄).**

Digesteur horizontal à flux piston (à recirculation)	Digesteur à flux piston à 2 compartiments	Digesteur horizontal à flux piston	Unité de digestion par voie liquide bi-étagée
FOR : 56 % MB Boues non digérées : 30 % MB Fumier : 14 % MB Graisse : 0,0 % MB	FOR : 48 % MB Boues digérées hydrolysées déshydratées : 49 % MB Fumier : 3 % MB Graisse : autour de 0,3 % MB	FOR : 39 % MB Boues biologiques non digérées : 51 % MB Fumier : 10 % MB Graisse : 0,3 % MB	FOR : 33 % MB Boues biologiques non digérées : 65 % MB Fumier : 2 % MB Graisse : 0,2 % MB
Voie sèche Siccité < 35 % MS	Voie sèche Siccité de 25 % de MS	Voie sèche Siccité de 25 % de MS	Voie liquide Siccité de 10 % de MS
Fonctionnement en régime thermophile (53-55°C)	Deux réacteurs : un réacteur d'hydrolyse + un réacteur de méthanisation en deux zones (52°C)	Hydrolyse thermique Méthanogénèse sur l'étage mésophile (37°C)	Un étage thermophile (55°C) Un étage mésophile (37°C)
Flux piston (avec recirculation) TSH de 21 à 30 jours	Flux piston à 2 compartiments TSH de 3 jours, puis de 13 jours, puis de 10 jours	Flux piston TSH de 21 à 24 jours	Alimentation continue ou semi-continue TSH de 2 jours puis de 12 à 15 jours
Obtenu en mode batch : 94 % du BMP théorique	Obtenu en mode batch : 100 % du BMP théorique	Obtenu en mode batch : 94 % du BMP théorique	Obtenu en mode batch : 110 % du BMP théorique
Recirculation du digestat en tête de méthaniseur			Mise en place d'une recirculation

Choix de digesteurs par les 4 équipes, après de nombreux tests réalisés²⁵

²⁵. Les résultats indiqués portent uniquement sur l'étape de digestion. Les étapes ultérieures permettant de produire du CH₄ ne sont pas prises en compte ici.

Les performances de la cométhanisation peuvent être influencées par :

- > les caractéristiques des intrants (siccité, teneur en matière organique, BMP, teneur en azote, etc.). Celles-ci dépendent du mix et des pré-traitements retenus (chapitre 3.1) ;
- > le temps de séjour en méthanisation.

Plus le temps de séjour est long et plus la taille des installations est importante. Un optimum technico-économique doit donc être recherché : maximisation de la conversion en carbone organique, en minimisant, d'une part, la consommation énergétique du digesteur et, d'autre part, l'investissement nécessaire à cette conversion maximale.

S'il est naturel de chercher à innover en optimisant « mix d'intrants + pré-traitements + procédés envisagés », certains ont aussi fait preuve de créativité à partir de technologies qui ont fait leurs preuves.



INFLUENCE DU MIX D'INTRANTS SUR LE TEMPS DE SÉJOUR

Les caractéristiques du mix d'intrants et le temps de séjour peuvent être liés. Certaines équipes ont par exemple identifié qu'avec les choix qu'elles ont fait, l'absence de fumier dans le mix permet de réduire le temps de séjour nécessaire à la dégradation de la matière organique.

Agitation et recirculation : des choix qui distinguent les quatre équipes

L'agitation au sein du digesteur est un paramètre crucial pour maximiser la production de biogaz. Les deux digesteurs piston horizontaux et les deux étages de digestion de l'unité bi-étagée en voie liquide sont agités mécaniquement. La recirculation mise en place dans le cas du premier digesteur horizontal s'ajoute à l'agitation mécanique : la matière recirculée, chargée en bactéries et partiellement décomposée, se mélange à la matière initiale. Dans le digesteur à flux piston à deux compartiments, c'est le biogaz produit qui permet l'agitation. Les bulles

de gaz injectées en certains endroits du digesteur permettent le déplacement de la matière d'un secteur à l'autre.

Les deux procédés de digestion sans recirculation distinguent une première étape de la digestion (l'hydrolyse biologique) en lui attribuant un volume spécifique. Cette sectorisation est prometteuse, et son impact sur la méthanisation sera suivi en phase de conception, construction et exploitation des unités pilotes.

3. Aller encore plus loin et récupérer ce qui a de la valeur dans le digestat en sortie de méthanisation

“Rare sont les projets aujourd’hui qui abordent la matière organique dans une logique de valorisation complète (énergie et nutriment)”

Fabien ESCULIER, LEESU



Lorsqu’on injecte des intrants dans un méthaniseur, outre le biogaz, il ressort du digestat plein de promesses...

Lors de la digestion par les bactéries anaérobies, entre 70 et 90 % de la matière organique biodégradable (lipides, protides, glucides, cellulose, hémicellulose) introduite dans les digesteurs est altérée et en partie transformée en méthane et dioxyde de carbone. Au passage, une partie de l'azote est minéralisée, de même que le phosphore organique.

La transformation de la matière organique biodégradable est donc seulement partielle dans les digesteurs. Bien qu'il soit possible d'optimiser l'expression du potentiel méthanogène, il reste des éléments organiques non minéralisés dans le digestat.

Certaines équipes choisissent de séparer le digestat en deux phases liquide et solide et de soumettre l'une de ces phases à des procédés thermochimiques, d'autres choisissent de soumettre directement le digestat brut à ce type de procédés.

Toutes les équipes cherchent à aller plus loin dans la valorisation énergétique en travaillant le digestat et en proposant une récupération de nutriments comme l'azote et le phosphore.

Saviez-vous qu'il y a encore du biogaz à aller chercher dans la phase liquide du digestat ?

Que ce soit après une déshydratation, un séchage, un procédé thermique ou une carbonisation hydrothermale associée à une déshydratation du digestat, la phase liquide du digestat reste riche en matières organiques. C'est un substrat intéressant pour d'autres unités de production de biogaz.

C'est pourquoi, en phase de recherche et développement (phase 1), deux des quatre équipes ont testé la séparation de phase et ont proposé de positionner une seconde méthanisation, à ce stade de leur filière ou après la récupération des nutriments, afin de produire du méthane supplémentaire à partir de la phase liquide.



RÉSULTATS

Les tests et calculs réalisés par une des équipes permettent d'estimer autour de 4 % le supplément d'expression de potentiel méthanogène que permettrait ce bloc de méthanisation de la phase liquide.

4. Des procédés de conversion thermochimiques pour aller plus loin dans le traitement du digestat ou de sa phase solide

Différents procédés thermochimiques tels que la pyrolyse, la gazéification et la carbonisation hydrothermale doivent être considérés comme des technologies intéressantes. **D'abord parce qu'il s'agit de procédés peu gourmands en foncier, ce qui est particulièrement intéressant en zones urbaines denses. Ensuite parce que ces technologies permettent de créer de nombreuses synergies entre les différents flux que l'on retrouve au cœur du métabolisme urbain : flux liés au cycle de l'eau, flux de déchets ou de matière et flux d'énergie.**

Pyrogazéifier consiste à chauffer un produit (ou déchet) organique à haute température en absence ou en défaut d'oxygène. La carbonisation hydrothermale est un procédé similaire conduit en présence d'eau.

Le traitement thermique de la matière organique permet de la valoriser sous la forme de deux fractions distinctes :

- > **un résidu solide** fait d'un mélange de biochar, un résidu à haut Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI), et de cendres, résidus minéraux au pouvoir calorifique faible ;
- > **un gaz de synthèse, dit syngaz**, constitué de méthane, d'hydrogène et de monoxyde de carbone. Sa composition varie selon les procédés employés et les paramètres choisis.

Les quantités d'énergie disponibles dans chaque fraction testée dépendent de la nature de la matière organique, mais aussi des paramètres de traitement (température, pression, concentration d'oxygène dans l'atmosphère, temps de séjour).



QUELQUES ENJEUX DES PROCÉDÉS DE CONVERSION THERMOCHIMIQUE

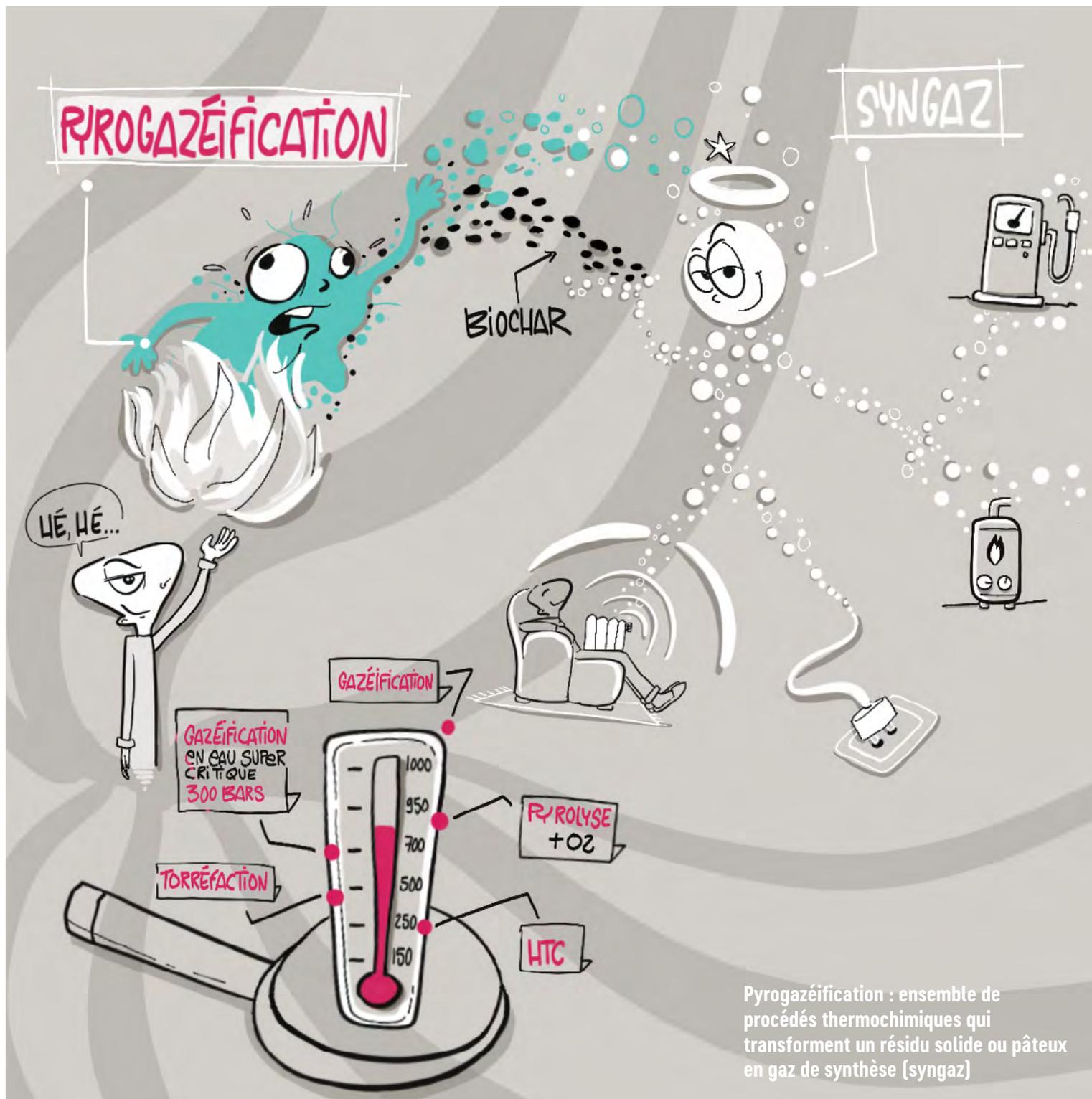
- > Démontrer leur opérabilité industrielle
- > Confirmer la pertinence technico-économique de la filière
- > Lever les freins réglementaires
- > Le cas échéant, évaluer la compatibilité du syngaz produit avec les prescriptions techniques liées à l'injection dans les réseaux

“La gazéification des déchets est une technologie d’avenir car elle crée de fait une nouvelle strate dans la pyramide de la hiérarchie des modes de traitement des déchets. Elle permet certes une valorisation énergétique mais également une valorisation matière puisque le méthane et l’hydrogène sont des gaz qui peuvent servir de matière première à des procédés industriels.”

 Pierre HIRTZBERGER, Syctom²⁶

Les équipes se sont penchées sur différents procédés thermochimiques pour évaluer leurs performances :

- > **la pyrolyse** qui consiste à chauffer le produit à des températures situées entre 400 et 950°C, en absence ou en présence réduite d’oxygène, produisant une phase gazeuse (syngaz), liquide (huile) et solide (mélange de biochar et de cendres) ;
- > **la carbonisation hydrothermale** (HTC) qui consiste à chauffer le digestat (à forte teneur en eau) entre 160 et 200°C sous pression pour en faire un vecteur énergétique solide appelé hydrocharbon, obtenir un gaz contenant du méthane et solubiliser une partie de la matière organique afin de pouvoir la rendre biodisponible pour la digestion anaérobie et ainsi augmenter la production de biogaz ;
- > **la gazéification** qui consiste à chauffer le produit à une température supérieure à 1000°C, en défaut d’agent oxydant (ex : oxygène) pour transformer les phases non gazeuses en syngaz et obtenir un biochar ;
- > **la torréfaction** qui consiste à chauffer le produit à des températures d’environ 300°C, en absence ou en présence réduite d’oxygène, conduit à du gaz, d’une part, et à un mélange biochar-cendres, d’autre part (solide) ;
- > **la gazéification en eau supercritique** qui permet de valoriser le digestat en sortie de cométhanisation, en condition hydrothermale, c’est-à-dire sous pression forte (300 bar) et haute température (500-700°C) afin d’obtenir un syngaz et un biochar.



Pyrolyse de la phase solide du digestat sorti de cométhanisation



INNOVATION TECHNOLOGIQUE

Le procédé Biogreen®, permet de convertir le digestat, préalablement séché (pour obtenir un taux d'humidité du digestat de l'ordre de 10 %), en syngaz riche en méthane, en huile, en biochar et en cendres. La pyrolyse est opérée à 800°C durant 20 minutes. Ce procédé nécessite un faible apport en oxygène, ce qui évite d'appauvrir le gaz par effet de dilution.

Le syngaz produit dans ces conditions est composé d'environ 10 % de méthane. Les autres composés majoritaires sont le monoxyde de carbone (CO) à environ 30 %, le dihydrogène (H₂) à environ 35 % et le dioxyde de carbone (CO₂) entre 10 à 15 %.

Le syngaz obtenu est épuré avant d'accéder à l'étape de méthanation biologique (cf chapitre 3.5).

L'huile issue du procédé de pyrolyse peut être utilisée comme combustible ou dans les industries de chimie renouvelable.

Le résidu solide, mélange de biochar et de cendres, peut être valorisé en tant que combustible dans une Unité de Valorisation Énergétique. Si le pouvoir calorifique du résidu solide est jugé trop faible en raison d'une part de cendres trop importante, ce résidu n'est pas valorisé en tant que combustible. Par ailleurs, le biochar peut être valorisé en agronomie (réteneur d'eau et amendement de sol), dans le cadre de plans d'épandage. Le biochar utilisé dans les sols devient alors un puits de carbone.



OPTIMISATION ÉNERGÉTIQUE

Malgré des besoins internes importants en énergie, l'optimisation énergétique de la filière complète dans laquelle s'insère ce procédé permet d'atteindre un bilan énergétique positif.

Carbonisation hydrothermale du digestat pour le transformer en hydrocharbon que l'on gazéifie



INNOVATION TECHNOLOGIQUE

La carbonisation hydrothermale (HTC) est un procédé de conversion thermo-chimique de substances organiques, à température élevée et en présence d'eau qui doit permettre de transformer le digestat en vecteur énergétique solide (hydrocharbon). Cette technologie, bien connue pour le traitement des boues

de stations d'épuration, mérite d'être étudiée pour le digestat issu d'un digesteur à piston qui traite un mix d'intrants.

Le fonctionnement dans un milieu d'eau chaude permet à la biomasse humide et aux boues d'être traitées sans séchage préalable. L'utilisation du procédé HTC est une alternative moins énergivore qu'un séchage classique.

Quinze essais de laboratoire ont permis de faire varier la température entre 180 et 220°C pour un temps de séjour variant de 30 à 90 minutes en condition de pH de départ situé entre 3 et 7.

Un hydrocharbon ayant des teneurs en matière sèche de plus de 60-70 % est produit sans séchage thermique. Il est transportable et valorisable énergétiquement par combustion ou par pyrolyse / gazéification comme nous le verrons par la suite. Il est composé notamment à 60 % de matière sèche de carbone et à 7 % de matière sèche d'hydrogène.

Le gaz qui ressort du procédé HTC n'est pas très adapté à une utilisation énergétique car seules quelques traces de méthane (3 % vol) et d'hydrogène (1 % vol) sont présentes dans la phase gazeuse. Le composé dominant est le dioxyde de carbone (96 % vol).

Enfin, la phase liquide en sortie de traitement est la fraction la plus riche en nutriments sous forme dissoute et mérite d'être testée sur des installations de récupération de nutriments (voir chapitre 3.7).

L'objectif de la gazéification en aval de la carbonisation hydrothermale est de produire un produit gazeux (syngaz) contenant du monoxyde de carbone et de l'hydrogène à partir d'une phase solide par réaction avec un « partenaire » de réaction gazeuse, appelé agent de gazéification.

La composition du gaz dépend principalement de la composition du combustible d'origine, de la température (au-dessus de 900°C) et de la pression. Elle dépend aussi du processus de gazéification : gazéification en lit fixe, gazéification par double lit fluidisé, gazéification par flux de gaz entraîné...



OPTIMISATION ÉNERGÉTIQUE

Les besoins en énergie thermique ou électrique du procédé de gazéification restent limités.

Par ailleurs, il a été estimé qu'à l'échelle industrielle, la gazéification dans la filière projetée contribuerait à hauteur de 16 % à la production de chaleur de l'ensemble de la filière. Les 84 % restant sont produits par une chaudière hydrocharbon en sortie de la carbonisation hydrothermale (HTC).

Le bilan thermique de cet enchaînement carbonisation hydrothermale / gazéification et chaudière hydrocharbon est largement positif.

Traitement thermochimique du digestat : torréfaction ou pyrolyse, comparaison de procédés



INNOVATION
TECHNOLOGIQUE

L'équipe qui avait choisi au départ du projet comme solution de référence la torréfaction a implémenté, en laboratoire, un traitement thermique du digestat via un réacteur à soles multiples (NESA). Cet équipement permet de tester une large gamme de conditions de traitement, tant en

termes de température que de présence ou défaut d'oxygène, ce qui permet de moduler les propriétés des produits obtenus et de rechercher l'optimum du bilan énergétique.

La structure de ce réacteur permet de mettre en place différents procédés de pyrogazéification (torréfaction, pyrolyse), sous forme d'une succession d'étapes. La torréfaction permet d'assécher et de préchauffer le digestat. Les étapes de pyrolyse, de combustion des gaz et de combustion des solides sont bien séparées. Les combustions interviennent en fin de procédé, afin d'éviter les imbrûlés. L'agent oxydant est alors introduit en excès.

Un intérêt pour la torréfaction et la pyrolyse a été démontré :

- > la présence de fumier dans le mix fait remonter le pouvoir calorifique supérieur dans le cas d'une pyrolyse ;
- > après 2 heures à haute température, le résidu solide est presque complètement minéralisé. Il serait donc possible d'obtenir une minéralisation quasi complète du digestat à haute température, avec un temps de séjour de l'ordre de 2 heures en régime industriel ;

- > les cendres issues de la pyrolyse contiennent principalement des oxydes de calcium, de la silice et de l'alumine. La teneur en pentoxyde de phosphore, P_2O_5 , est également appréciable (de l'ordre de 10 %). Le résidu de la pyrolyse peut donc faire l'objet d'une ou plusieurs valorisation(s) : phosphore d'abord, cendres ensuite (secteur de la construction).

L'avantage du procédé de torréfaction est de fournir un produit solide avec un pouvoir calorifique attractif, en théorie valorisable en chaudière. En réalité, ce produit reste à ce jour sous le statut de déchet, ce qui empêche actuellement sa valorisation au sein des chaufferies. Le digestat sorti de cométhanisation présente un taux de cendres élevé. Cela le rend moins attractif que de la biomasse classique, de type bois, avec qui il serait en concurrence. **Ces deux points ont eu raison de la torréfaction, abandonnée à ce stade au profit de la pyrolyse.**

La pyrolyse choisie est un traitement thermique à haute température qui permet de transférer un maximum d'énergie chimique de la phase solide vers la phase gazeuse. Dans le procédé étudié, le gaz obtenu passe par une étape de combustion afin de couvrir les besoins en chaleur de l'installation. La quantité de résidu solide est, quant à elle, réduite à son minimum (c'est-à-dire le résidu minéral : les cendres).



AUTOCONSOMMATION DE CHALEUR

À l'échelle industrielle, la pyrolyse apporterait 80 % de la chaleur produite par l'ensemble de la filière.

VALORISATION DES CENDRES ?

Les cendres, actuellement classées sous le statut de déchet et dont on envisage d'extraire le phosphore, ne peuvent faire l'objet d'une valorisation agronomique directe. Des traitements spécifiques pourraient permettre d'envisager leur sortie de statut de déchet et leur valorisation.

Gazéification en eau supercritique du digestat



INNOVATION
TECHNOLOGIQUE

Comme pour tous les corps purs, la courbe de vaporisation de l'eau présente un point d'arrêt, dit point critique ($P \geq 221$ bars et $T \geq 374^\circ\text{C}$). Au-delà, le domaine d'existence est appelé fluide supercritique (ou gaz hypercritique) et présente des propriétés très particulières, intermédiaires entre celles du gaz et du liquide.

La gazéification en eau supercritique consiste en une décomposition par hydrolyse de composés organiques. L'eau présente dans le digestat est utilisée comme média de transformation vers le gaz de synthèse. Le procédé produit un mélange gazeux composé de dioxyde de carbone (CO_2), monoxyde de carbone (CO), hydrogène (H_2), méthane (CH_4) et d'autres hydrocarbures légers. Les gaz formés sont parfaitement solubles et forment un mélange monophasique.

Ce procédé est appliqué au digestat en sortie de cométhanisation sous forte pression (300 bar) et haute température (500-700°C).

Lors de la phase 1, 23 essais ont été réalisés en mode batch (discontinu). On retient que :

- > plus l'intrant est chargé en matière sèche (10 %, 15 % ou 20 % de matière sèche), plus on produit de gaz ;
- > la préparation du digestat tend à diminuer le volume de gaz produit et la part de méthane dans le mélange gazeux ;
- > augmenter la température favorise la conversion de la ressource en gaz. Il est conseillé de travailler a minima à 500°C ;
- > la montée en température progressive a également une importance. Elle permet

de favoriser le méthane au détriment de l'hydrogène :

- > l'optimum entre les rendements matière et la dépense énergétique correspond à une siccité de 20 % de matière sèche et une température de 600°C .

L'influence de ces paramètres joue sur le volume du gaz produit et aussi sur sa composition (de 16 à 36,5 % de méthane) ou encore sur le taux de conversion du carbone en gaz, liquide et solide.

D'après les 6 essais réalisés, en continu, avec des taux de matière sèche de 10 à 13 % conformes à ce que l'on peut envisager en unité industrielle et des températures de 537°C à 614°C , la part de méthane reste dans les valeurs observées en mode batch (21 à 23 %).

Le procédé retenu fonctionne en deux temps : une mise sous pression (270-300 bar) du digestat chauffé à 150°C pour capter et évacuer la majeure partie de la fraction inorganique du co-digestat, puis un transfert vers un second réacteur-échangeur à 600°C .

Les tests et calculs réalisés lors de la phase 1 permettent d'estimer autour de 40 % le supplément d'expression de potentiel méthanogène que permettrait le traitement du digestat par gazéification en eau supercritique.

Un effluent riche en sel minéraux (appelé saumure), et des effluents clairs sont également récupérés en sortie du procédé. La saumure contient du phosphore précipité qu'il est relativement difficile d'extraire et des effluents qui contiennent de l'azote.



INTÉGRATION ÉNERGÉTIQUE

L'hydrogène produit par le procédé de gazéification en eau supercritique peut, par le biais d'une chaudière gaz, apporter une partie de la chaleur nécessaire à une température de 600°C . S'il n'est pas suffisant, alors il faut utiliser une partie du CH_4 qui par combustion produira le complément de chaleur. L'enjeu est donc que l'hydrogène et une partie seulement du méthane produits, soient suffisants pour maintenir la température du procédé. A cette condition seulement, le procédé sera globalement producteur net de méthane.

Les simulations réalisées ont montré que pour un digestat donné (qui contient au moins 40 % d'inorganiques dans la matière sèche), une récupération de chaleur interne au procédé de l'ordre de 70 à 75 % est nécessaire pour que le système de gazéification reste producteur net d'énergie.

5. Intérêt et pertinence de la méthanation

“La méthanation est une brique technologique qui se retrouve au croisement de plusieurs filières de production de nouveaux gaz. Elle peut se greffer à plusieurs types d’enchaînements, de procédés”

Dairo BALLESTAS CASTRO, RICE

La méthanation consiste à faire réagir le monoxyde de carbone et/ou le dioxyde de carbone avec l’hydrogène, pour générer du méthane et de l’eau.

Ainsi, la technologie « méthanation » ne peut-être positionnée qu’après un procédé qui aurait transformé le digestat en partie en phase gazeuse : le syngaz. Par exemple après une brique technologique « pyrogazéification » (voir chapitre 3.4).

Divers procédés de méthanation existent dont la conversion catalytique et la méthanation biologique (biocatalyse à partir de microorganismes).

Les procédés de catalyse chimique sont coûteux, impliquent habituellement des pressions et températures élevées et sont sensibles aux composés soufrés (H_2S), présents dans le syngaz. Ces inconvénients peuvent être évités en utilisant la voie biologique pour transformer les composés du syngaz en méthane à des températures et pressions normales. Cependant, la réaction est plus lente et nécessite donc un volume de réacteur de méthanation plus important.

Lors de la réaction de méthanation biologique, dans un réacteur comparable à un digesteur de méthanisation, l’hydrogène et le dioxyde de carbone sont transformés en méthane par une faune bactérienne. Le gaz produit a une composition similaire à celui du biogaz produit par la méthanisation et peut être mélangé à ce dernier pour être traité (épuration, odorisation) dans un épurateur commun puis pour être injecté dans les réseaux publics de transport et de distribution de gaz naturel.

Les équipes qui ont opté pour cette technologie l’ont envisagée en conditions mésophiles (35-37°C).

La méthanation : un procédé qui permet de renforcer la part de méthane dans un syngaz obtenu par un procédé de pyrogazéification !



Les tests réalisés par certaines équipes permettent d'identifier les perspectives suivantes :



Cet enchaînement a permis d'atteindre une promesse de teneurs en méthane d'environ 40 %.
Le supplément d'expression de potentiel méthanogène de cet enchaînement est estimé entre 25 et 30 %.

Un traitement complémentaire (water shift reaction) est intégré entre la gazéification et la méthanation pour mélanger le monoxyde de carbone à de la vapeur d'eau et le transformer en hydrogène ($\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$). Ainsi, il est possible d'introduire plus d'hydrogène dans le réacteur de méthanation et donc d'augmenter la conversion en méthane jusqu'à 45 %.

Le rendement énergétique de cet enchaînement (entre l'hydrocharbon entrant dans la gazéification et le méthane sortant de la méthanation) s'élevait à 22 % lors des essais menés par l'une des équipes.

Dans cet enchaînement, c'est essentiellement l'hydrogène contenu dans le syngaz à la sortie de la gazéification qui est valorisé.



Cet enchaînement a permis d'atteindre une promesse de teneurs en méthane de plus de 25 %.
Le supplément d'expression de potentiel méthanogène de l'enchaînement est estimé entre 10 et 15 %.



MÉTHANATION ET ÉNERGIE

Les besoins en énergie thermique ou électrique de la méthanation restent limités par rapport à d'autres procédés et notamment par rapport aux procédés de pyrogazéification.

6. La récupération des nutriments

Cometha s'intéresse principalement au phosphore et à l'azote. Pour simplifier, considérons que l'azote et le phosphore contenus dans le mix d'intrants, après différents traitements dont la cométhanisation, vont majoritairement se retrouver, pour l'azote, dans la phase liquide et, pour le phosphore, dans la phase solide.

L'une des équipes a étudié la possibilité de récupérer une partie du phosphore directement sur une partie du mix d'intrants avant la phase de méthanisation. Toutes les autres options de récupération de l'azote ou du phosphore étudiées sont situées après la cométhanisation, juste en aval ou après différents traitements complémentaires.

Les investigations autour de la récupération des nutriments sont fondamentales dans le projet pour minimiser les résidus après traitement, l'un des objectifs affichés par le SIAAP et le Sycotom et pour limiter la charge des effluents qui seront rejetés et traités par les installations du SIAAP en sortie de filières.



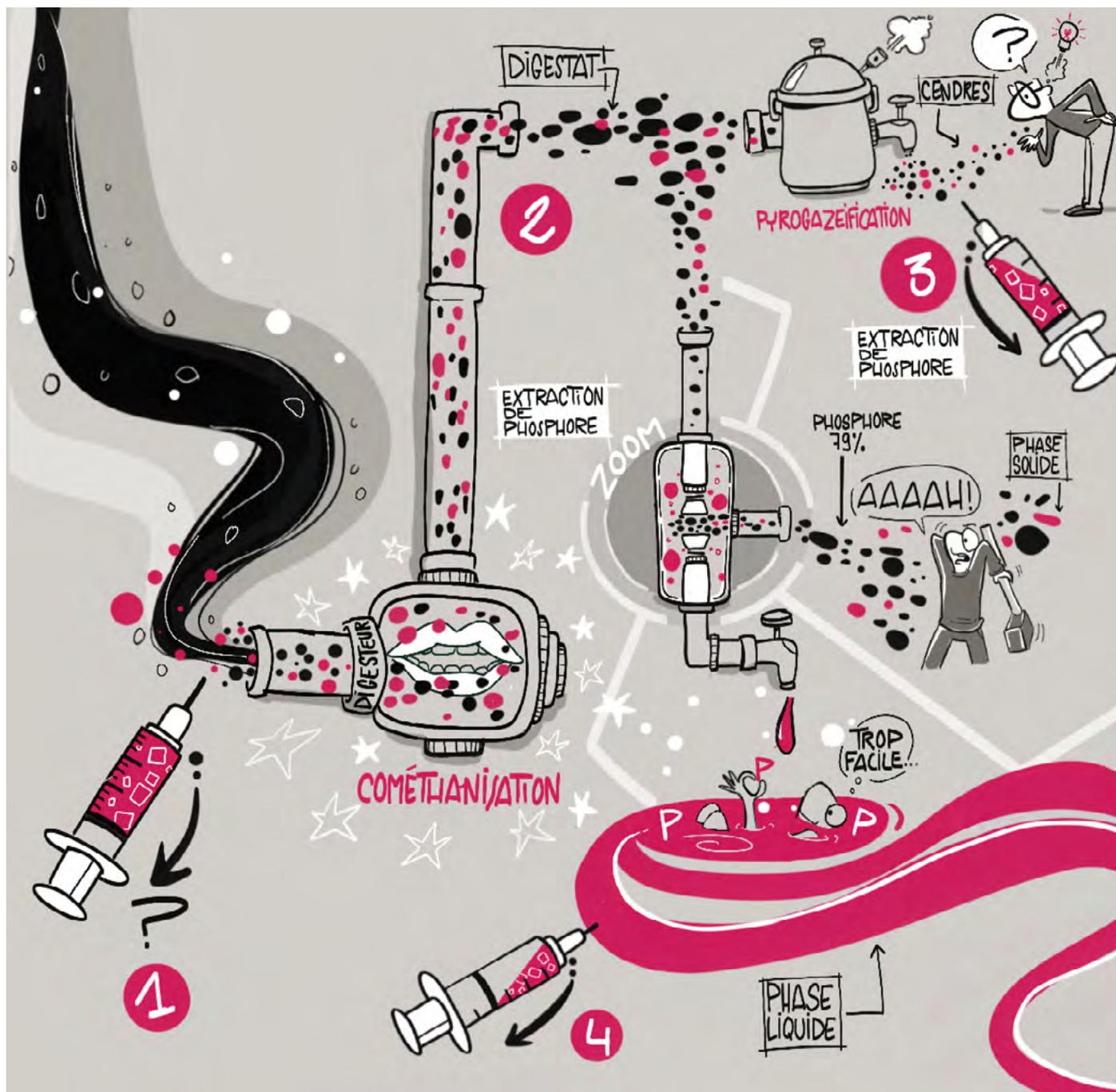
LES ENJEUX PARTICULIERS DE LA RÉCUPÉRATION DU PHOSPHORE

La production de matières fertilisantes peut éviter des émissions de gaz à effet de serre non négligeables sur un bilan optimisé si les réactifs choisis ont une faible contribution carbone.

L'acide citrique, utilisé dans la production de struvite, apparaît comme un poste important des émissions de gaz à effet de serre (le 3^e sur l'une des filières proposées). Au-delà de la recherche de solutions alternatives sur les réactifs utilisés pour l'extraction du phosphore, il peut être intéressant d'investiguer une récupération dans les cendres ce qui permettrait également de réduire la quantité de déchets générés.

Lors de la caractérisation des digestats issus de la cométhanisation, **il a été estimé qu'en aval de la digestion, plus de 85 % du phosphore présent dans les intrants est retenu en phase solide.** Cela illustre la difficulté de récupérer le phosphore en phase liquide et incite à envisager également sa récupération sur la phase solide (par exemple sur les cendres de pyrolyse).

Les différentes méthodes expérimentées pour la récupération du phosphore



Aller chercher le phosphore là où il est facilement accessible plutôt que là où il y en a le plus ?

Récupérer le phosphore directement sur le mix d'intrants



INNOVATION TECHNOLOGIQUE

L'idée ici est de procéder à une récupération électrochimique du phosphore contenu dans les boues et la FOR, en amont de la digestion.

Le procédé ePhos®, qui est alors positionné après un module d'hydrolyse thermique sous pression des boues et de la FOR, permet d'obtenir du phosphate par voie électrochimique et sans utilisation de produit chimique.

Le phosphate et l'ammonium, grâce à une électrode de magnésium, précipitent en magnésium-ammonium-phosphate ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$), également appelé struvite.

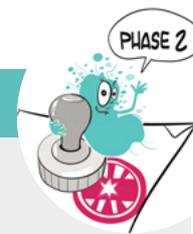
La consommation électrique relativement faible (environ $0,78 \text{ kWh/m}^3$) représente un atout considérable pour ce procédé qui sera comparé lors de la phase des unités pilotes avec le procédé BioEcoSim® (cf focus ci-après).

Si on le positionne après l'hydrolyse thermique, on s'attend à ce que les nutriments soient plus facilement accessibles, donc à une « récolte » plus importante. En effet, l'hydrolyse permet d'augmenter la solubilisation des nutriments. Les tests réalisés sur des boues issues d'un traitement intégrant une déphosphatation physico-chimique, ont montré une multiplication par 7 des concentrations en phosphate ($\text{PO}_4\text{-P}$), et par 3 de celles en azote ammoniacal ($\text{NH}_4\text{-N}$).



RÉSULTATS

L'efficacité de récupération du phosphore à partir de ce procédé positionné après une hydrolyse thermique a été estimée durant la phase 1 à environ 12 %. La difficulté de récupération du phosphore dans les boues d'épuration, et de fait dans le mix, est notamment due à la précipitation de ce dernier lors du traitement au chlorure ferrique en station d'épuration. En phase pilote, le positionnement du procédé au sein de la filière et les rendements ainsi obtenus évolueront.



Récupérer le phosphore après la cométhanisation



INNOVATION TECHNOLOGIQUE

La technologie BioEcoSim® est une technologie innovante qui a été initialement développée pour la valorisation du fumier et du digestat de méthanisation dans un environnement agricole.

Cette technologie a été testée dans le cadre du projet Cometha pour valoriser :

- > le digestat de cométhanisation (fraction liquide)
- > le résidu en sortie de carbonisation hydrothermale HTC (fraction liquide).

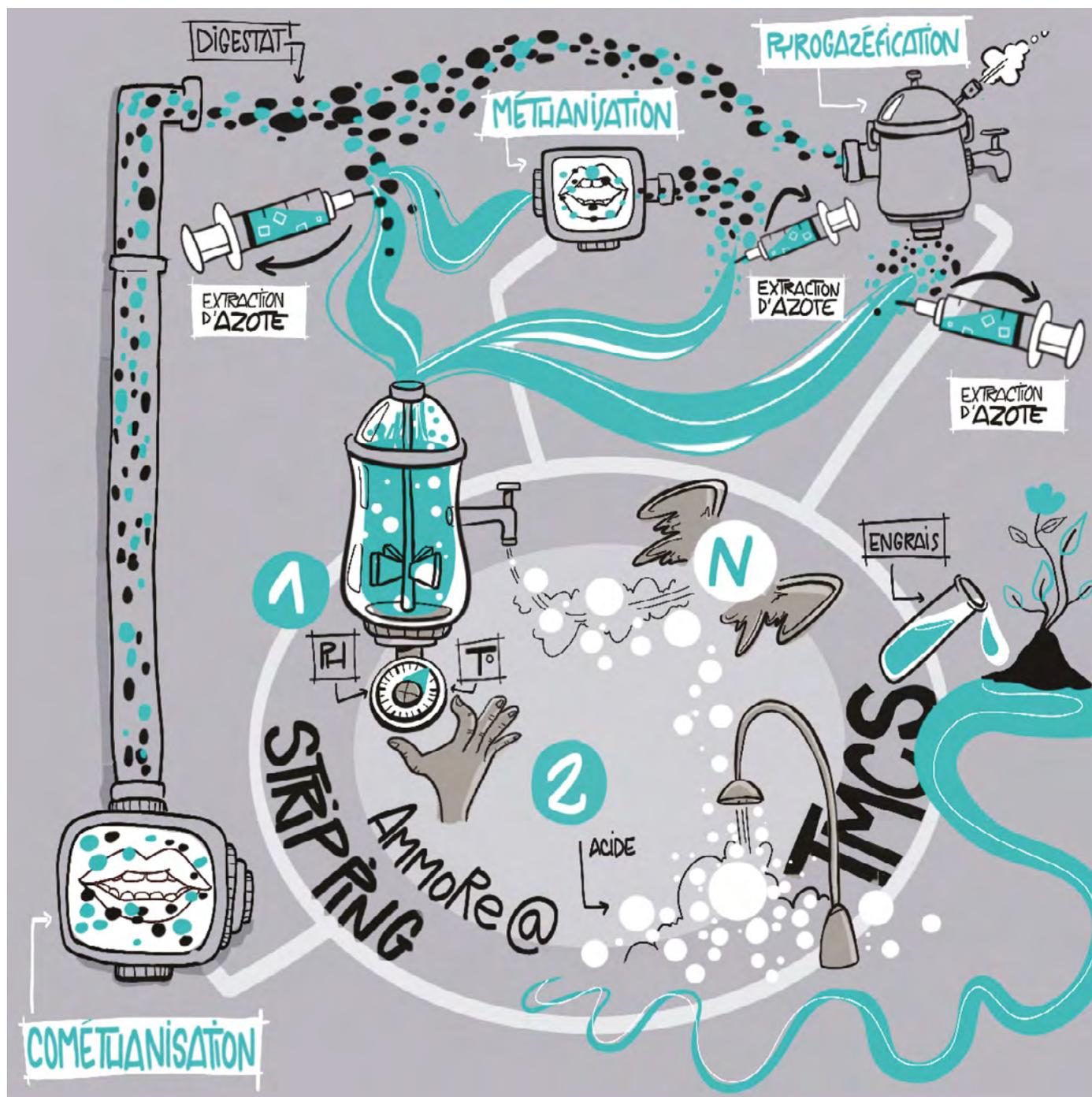


RÉSULTATS

L'efficacité de récupération du phosphore à partir du digestat de cométhanisation a été estimée à 43 % contre 50 % à partir des boues en sortie de procédé HTC.



Les différentes méthodes expérimentées pour la récupération de l'azote



Autant les procédés envisagés par les différentes équipes sont très similaires, autant la question du positionnement du procédé dans la filière a fait l'objet de nombreux tests.

Pour la récupération de l'azote, deux orientations techniques ont été envisagées par les 4 équipes : le stripping et un procédé TMCS (techniques de chimio-sorption membranaires), le procédé AmmoRe.

Le procédé de stripping se déroule en deux étapes :

- > la première permet de libérer l'ammoniac et de le transférer de la phase liquide à la phase gaz. Un ajustement du pH et de la température de l'effluent est nécessaire afin de se placer dans des conditions optimales de stripping ;
- > la seconde permet de transférer et de concentrer l'ammoniac récupéré dans la phase gazeuse vers une phase liquide sous forme de sulfate d'ammonium à travers le lavage du gaz avec une solution d'acide.

Le produit obtenu est une solution de sulfate d'ammonium.

Le procédé AmmoRe est un procédé de type TMCS (traitement par chimie-sorption transmembranaire) permettant d'extraire l'azote sous forme de sel d'ammonium.



ENJEUX PARTICULIERS DE LA RÉCUPÉRATION DE L'AZOTE

La consommation de soude, utilisée pour l'extraction de l'azote est très impactante en termes d'émissions de GES. Une solution alternative de hausse du pH dans les procédés, sans ajout de soude, serait un plus.

La consommation d'énergie par les procédés d'extraction de l'azote par stripping est non négligeable. Le procédé AmmoRe semble donc moins énergivore.

Récupérer l'azote juste en aval de la cométhanisation



INNOVATION TECHNOLOGIQUE

L'équipe ayant positionné l'unité de stripping sur la phase liquide en aval de la cométhanisation a testé plusieurs températures situées entre 39°C et 70°C. Il a été observé que plus la température du traitement augmente, plus le rendement du procédé augmente.

La température optimale retenue est de l'ordre de 65-70°C.

Les tests ont également montré que plus le pH augmente et plus le rendement du procédé est bon. L'augmentation du pH nécessite cependant une plus grande consommation de soude. L'équipe a donc étudié l'impact d'un stripping du dioxyde de

carbone (CO₂), à 30°C en amont du stripping de l'azote, pour faire augmenter le pH. L'objectif était de limiter les consommations de soude du procédé par la mise en œuvre de cette étape complémentaire. Les tests réalisés ont démontré que le stripping du dioxyde de carbone (CO₂) permet d'atteindre le pH optimal identifié à 9,5 pour le stripping de l'azote tout en réalisant une économie substantielle de soude (jusqu'à 30 %). Le troisième paramètre qui a été étudié est le ratio air / liquide de la seconde étape de ce procédé. Dans les mêmes conditions de pH et de température, plus le ratio augmente et plus le rendement atteint est important.



RÉSULTATS

Les estimations à ce stade promettent un rendement d'abattement sur l'azote présent dans la phase liquide d'environ 90 %, soit environ la moitié de l'azote présent dans le mix d'intrants sélectionnés.

Récupérer l'azote en sortie de carbonisation hydrothermale



INNOVATION TECHNOLOGIQUE

Une équipe a choisi de mettre en œuvre le procédé AmmoRe et d'étudier deux positionnements possibles :

- > en aval de la cométhanisation pour traiter le digestat ;
- > en aval de la carbonisation hydrothermale pour traiter la phase liquide en sortie de procédé.

Après une filtration, l'eau s'écoule dans un réservoir fermé et agité dans lequel on ajoute de l'hydroxyde de sodium pour maintenir le pH à 10. En sortie de réservoir, le fluide est chauffé jusqu'à 50°C, pour recirculer à travers un module à membrane, où de

l'acide est utilisé pour retirer l'ammonium du liquide. Pendant que l'eau recircule à travers une membrane du côté de la paroi, elle est appauvrie en ammonium. L'acide recircule du côté du conduit jusqu'à ce qu'il soit saturé d'ammonium. Grâce à la mesure du pH, le processus s'arrête automatiquement et la solution enrichie en ammonium est déchargée dans un réservoir de stockage.



RÉSULTATS

L'efficacité de récupération de l'azote à partir du digestat de cométhanisation visée en phase des unités pilotes est de 79 %. L'étape de carbonisation hydrothermale permet d'optimiser le taux de récupération de l'azote dans le mix d'intrants.



Récupérer l'azote en sortie de gazéification en eau supercritique



INNOVATION TECHNOLOGIQUE

L'équipe ayant intégré dans sa filière le procédé de gazéification en eau supercritique a étudié la mise en place d'une récupération de l'azote par un procédé TMCS. Ce procédé est mis en place sur les effluents clairs de la gazéification et se déroule en deux étapes principales :

- > étape de stripping du dioxyde de carbone (CO_2), qui ainsi fait remonter le pH de la solution favorisant la forme d'ammoniac (NH_3), par rapport à la forme d'ion ammonium (NH_4^+) ;

- > étape de filtration de l'ammoniac par un passage en phase gazeuse, une filtration sur des membranes dédiées, puis une récupération de l'ammoniac transféré dans une solution d'acide sulfurique pour favoriser le transfert et pour produire une solution finale de sulfate d'ammonium.



RÉSULTATS

Les tests réalisés montrent qu'il est ainsi possible de récupérer environ 50 % de l'azote présent dans l'effluent clair produit en sortie de gazéification en eau supercritique. Le taux de récupération peut s'approcher de 95 % en ajoutant de la soude pour atteindre un pH de 9,3. Sur l'ensemble de la filière de traitement, le taux de récupération attendu à l'échelle industrielle est estimé à 64 % de l'azote du mix d'intrants sélectionnés.

Récupérer l'azote après la méthanisation du digestat



INNOVATION
TECHNOLOGIQUE

L'équipe concernée a choisi de positionner le stripping en toute fin de filière. Le procédé est appliqué sur la phase liquide en sortie de méthanisation de la phase liquide du digestat.



RÉSULTATS

Les tests montrent que, dans les conditions retenues (60°C, pH de 9,5), **cette position dans la filière permet de récupérer 80 % de l'azote ammoniacal présent à cette étape**, soit environ 30 % de l'azote du mix d'intrants sélectionnés

ENSEMBLE, ON VA PLUS LOIN

“L'utilité et l'intérêt pour l'utilisateur de l'union des compétences entre services publics”

 Jacques OLIVIER, SIAAP

Ensemble,

les intrants cométhanisés atteignent un bilan énergétique et environnemental supérieur à celui atteint dans le cadre de filières séparées.

Ensemble,

le SIAAP et le Sycotom imaginent des solutions de rupture pour ajouter de nouvelles pages au catalogue des solutions de demain.

Ensemble,

les maîtres d'ouvrage et les assistants aux maîtres d'ouvrage ont porté 4 projets de recherche en parallèle (400 heures de réunions !).

Ensemble,

les équipes de chacun des titulaires ont fait preuve d'une grande créativité pour atteindre, voire dépasser les 3 objectifs²⁷ fixés (9 brevets déposés).

Une aventure qui a pour origine la volonté de synergie de deux maîtres d'ouvrage et qui a pour moteur la volonté de mutualiser les forces, les savoir-faire et les idées.



27. 1. Maximiser la conversion du carbone organique en méthane / 2. Présenter un bilan énergétique global positif / 3. Minimiser les résidus après traitement.

L'aventure commence en 2016. La matière organique fédère autour d'elle les deux maîtres d'ouvrage qui à leur tour rassemblent autour d'eux des assistants à maîtrise d'ouvrage techniques, juridiques, spécialistes de la concertation et de la communication ou encore expert en propriété industrielle.

Tous embarquent dans l'aventure et emmènent avec eux 4 équipes titulaires : deux équipes françaises et deux européennes. Toutes les équipes alliant ingénierie, opérateur et laboratoire de recherche.

Sur le plan technique, la phase 1 se relève être un véritable lieu d'apprentissage entre pairs au sein des équipes titulaires et aussi entre la maîtrise d'ouvrage, ses assistants ou chacune des équipes.

Cométha rassemble autour de mêmes enjeux des spécialistes de différents secteurs. C'est bien la richesse de cette approche multisectorielle qui a fait émerger les idées et qui a permis de relever les défis.



17 PARTENARIATS POUR LA RÉALISATION DES OBJECTIFS



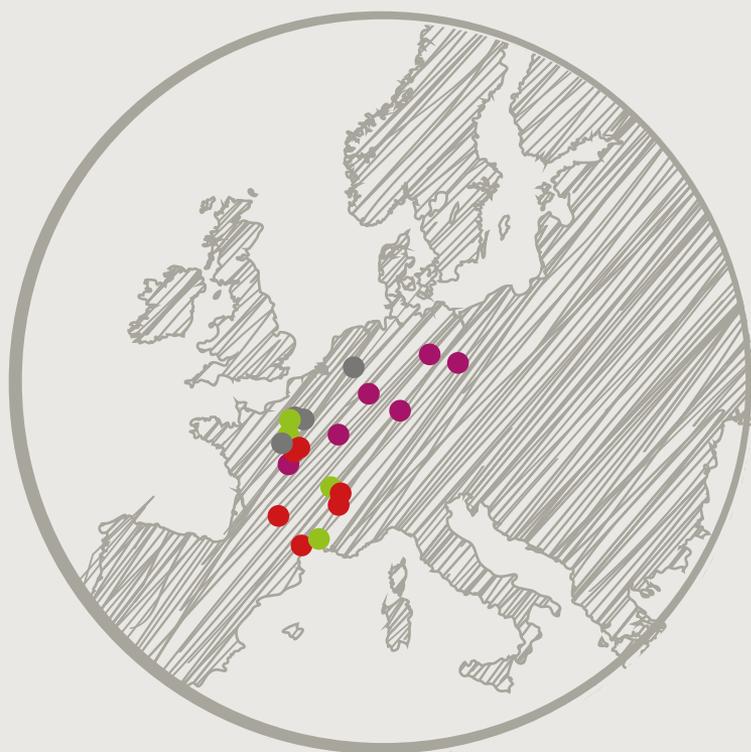
La grande ambition des objectifs de développement durable s'articule autour d'une coopération et de partenariats mondiaux solides.

Ces partenariats, inclusifs, sont nécessaires pour un programme de développement durable réussi. Construits sur des principes et des valeurs, une vision commune et des objectifs communs qui placent les peuples et la planète au centre, ils sont nécessaires au niveau mondial, régional, national et local.

Les deux pilotes actuellement en cours de construction permettront de traiter entre 250 et 350 kgMS/j. Selon le mix d'intrants retenu, les pilotes accueilleront entre 150 et 250 tMB/an de FOR, entre 200 et 500 tMB/an de boues non digérées, entre 15 et 40 tMB/an de fumier équin et quelques graisses pour chacun des pilotes.

Des grandes villes dans le regard Cométha avec attention

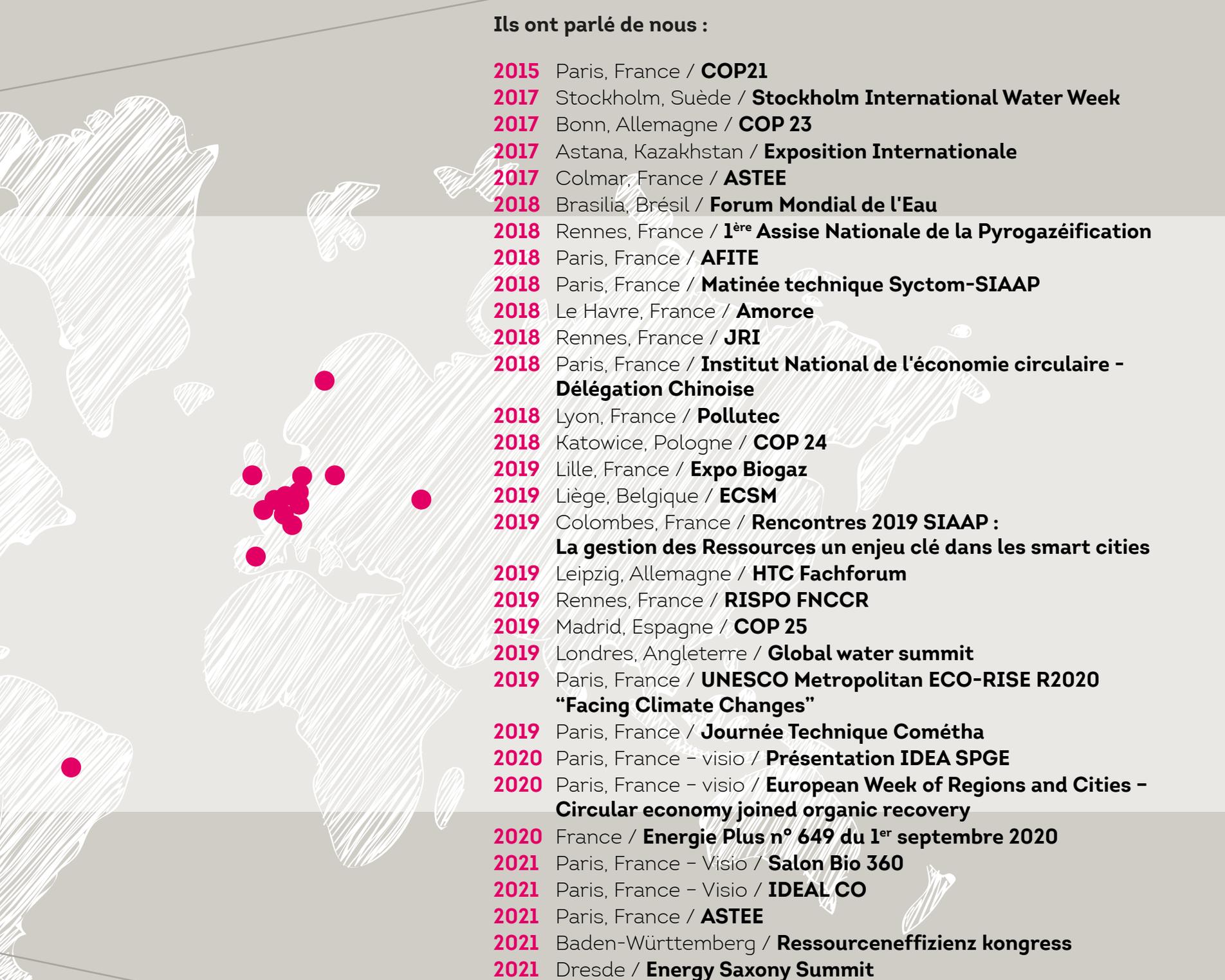
Denis Penouel, Syctom (ex SIAAP)



Nos partenaires :

Tilia	France et Allemagne
DBFZ	Leipzig, Allemagne
Fraunhofer IGB	Stuttgart, Allemagne
Gicon	Cottbus, Allemagne
France Biogaz	Strasbourg
Suez	Paris / Narbonne
Arkolia énergies	Mudaison
Etia	Compiègne
INSA	Lyon
Vinci Environnement	Paris
CEA Liten	Grenoble
Naldéo	Paris
INSA	Lyon, Toulouse
INRAE	Narbonne
John Cockerill	Liège, Belgique
Sources	Paris
UniLaSalle	Beauvais
UTC	Compiègne

Ils ont parlé de nous :

- 
- 2015 Paris, France / **COP21**
 - 2017 Stockholm, Suède / **Stockholm International Water Week**
 - 2017 Bonn, Allemagne / **COP 23**
 - 2017 Astana, Kazakhstan / **Exposition Internationale**
 - 2017 Colmar, France / **ASTE**
 - 2018 Brasilia, Brésil / **Forum Mondial de l'Eau**
 - 2018 Rennes, France / **1^{ère} Assise Nationale de la Pyrogazéification**
 - 2018 Paris, France / **AFITE**
 - 2018 Paris, France / **Matinée technique Syctom-SIAAP**
 - 2018 Le Havre, France / **Amorce**
 - 2018 Rennes, France / **JRI**
 - 2018 Paris, France / **Institut National de l'économie circulaire - Délégation Chinoise**
 - 2018 Lyon, France / **Pollutec**
 - 2018 Katowice, Pologne / **COP 24**
 - 2019 Lille, France / **Expo Biogaz**
 - 2019 Liège, Belgique / **ECSM**
 - 2019 Colombes, France / **Rencontres 2019 SIAAP : La gestion des Ressources un enjeu clé dans les smart cities**
 - 2019 Leipzig, Allemagne / **HTC Fachforum**
 - 2019 Rennes, France / **RISPO FNCCR**
 - 2019 Madrid, Espagne / **COP 25**
 - 2019 Londres, Angleterre / **Global water summit**
 - 2019 Paris, France / **UNESCO Metropolitan ECO-RISE R2020 "Facing Climate Changes"**
 - 2019 Paris, France / **Journée Technique Cométha**
 - 2020 Paris, France - visio / **Présentation IDEA SPGE**
 - 2020 Paris, France - visio / **European Week of Regions and Cities - Circular economy joined organic recovery**
 - 2020 France / **Energie Plus n° 649 du 1^{er} septembre 2020**
 - 2021 Paris, France - Visio / **Salon Bio 360**
 - 2021 Paris, France - Visio / **IDEAL CO**
 - 2021 Paris, France / **ASTE**
 - 2021 Baden-Württemberg / **Ressourceneffizienz kongress**
 - 2021 Dresde / **Energy Saxony Summit**

Liste des références :

- A.** Loi pour la transition énergétique et pour la croissance verte. Disponible sur <https://www.ecologie.gouv.fr/loi-transition-energetique-croissance-verte>
- B.** ADEME, Région Normandie, CA Lisieux Normandie. Impacts du déploiement de la collecte séparée des biodéchets. Colloque sur les impacts du déploiement de la collecte séparée des biodéchets à Lisieux, 15 juin 2018 à Lisieux.
- C.** Syndicat Mixte de Thann – Cernay. Comment réduire de plus de 60 kg/hab/an les OMR via la collecte sélective des biodéchets en porte-à-porte. Expérience exemplaire. 2021. Disponible sur <https://optigede.ademe.fr/fiche/comment-reduire-de-plus-de-60-kghaban-les-omr-la-collecte-selective-des-biodechets-en-porte>
- D.** ADEME. Campagne nationale de caractérisation des déchets-ménagers-et-assimilés. Modecom, 2017.
- E.** FABREGAT Sophie. Valorisation énergétique des boues d'épuration : des incertitudes émergent. Actu-environnement, mai 2021.
- F.** Astee. Dossier sur le compostage des boues d'épuration urbaine. Techniques-Sciences-Méthodes, Mars 2020, p.11-33.
- G.** Etude de marché relative au caractère innovant du projet de cométhanisation du SIAAP et du Sycotom. Numéro : IP 15 048 ME A NTE ZO 002 B0.
- H.** LESUEUR Thomas. FOCUS Ressources naturelles. Ministère de la transition écologique et solidaire, 2020. Disponible sur https://notre-environnement.gouv.fr/IMG/pdf/focus_ressources_naturelles_version_complete.pdf
- I.** EL HADJ Karim. Comment l'urine humaine pourrait aider les agriculteurs du futur. Journal Le Monde, 2020. Disponible sur https://www.lemonde.fr/videos/video/2020/08/12/comment-l-urine-humaine-pourrait-aider-les-agriculteurs-du-futur_6048804_1669088.html
- J.** ESCULIER Fabien. Le système alimentation/excrétion des territoires urbains : régimes et transitions socio-écologiques. Thèse de doctorat – LEESU, laboratoire Eau Environnement et Systèmes Urbains, 2018.
- K.** Article Code de l'environnement. Disponible sur <https://www.legifrance.gouv.fr/>
- L.** ADEME, GRDF et GRTGaz. Un mix de gaz 100 % renouvelable en 2050. Etude exploratoire, Janvier 2018.
- M.** <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-energie-2021/14-gaz-naturel>
- N.** Loi relative à l'énergie et au climat le 08 novembre 2019 et article L. 111-97 du code de l'énergie. Disponibles sur <https://www.legifrance.gouv.fr/>
- O.** SIAAP. O. SIAAP. Présentation du puits de carbone. Dossier de presse, 2017. https://www.siaap.fr/fileadmin/user_upload/Siaap/6_Presse_et_publications/Espace_presse/dossiers_de_presse/2017_DP_SEC_puits_carbone.pdf
- Sycotom. Faire du CO₂ de nos déchets une ressource circulaire, renouvelable et maîtrisée. https://www.sycotom-paris.fr/fileadmin/mediatheque/Innovations/Captation_CO2/PlaqueCapageCo2.pdf



P. Ensemble des documents techniques émis par les 4 titulaires au cours de la phase 1 :

John Cockerill / Sources / UniLaSalle / UTC

Rapport de sous-phase 1A - **Caractérisation des intrants**, Novembre 2018
 Rapport de sous-phase 1A - **Protocole d'expérimentation**, Juillet 2018
 Rapport de sous-phase 1A - **Définition du Système de Traitement**, Août 2018
 Rapport de sous-phase 1B - **Essais expérimentaux**, Août 2019
 Rapport de sous-phase 1C (APS Unité Pilote) - **Mémoire de présentation de l'unité pilote**, Septembre 2019
 Cadre de réponse - **Synthèse des innovations proposées**, Septembre 2019

SUEZ / Arkolia Energies / ETIA / INSA

Rapport de sous-phase 1A - **Caractérisation des intrants**, Octobre 2018
 Rapport de sous-phase 1A - **Protocole d'expérimentation**, Octobre 2018
 Rapport de sous-phase 1A - **Définition du Système de Traitement**, Septembre 2018
 Rapport de sous-phase 1B - **Rapport final tests expérimentaux**, Juin 2019
 Rapport de sous-phase 1C (APS Unité Pilote) - **Mémoire de présentation de l'unité pilote**, Septembre 2019
 Cadre de réponse - **Synthèse des innovations proposées**, Novembre 2019

Tilia / GICON France-Biogaz / DBFZ / Fraunhofer IGB

Rapport de sous-phase 1A - **Caractérisation des intrants**, Octobre 2018
 Rapport de sous-phase 1A - **Protocole d'expérimentation**, Septembre 2018
 Rapport de sous-phase 1A - **Définition du Système de Traitement**, Septembre 2018
 Rapport de sous-phase 1B - **Rapports d'essais**, Mai 2019
 Rapport de sous-phase 1C (APS Unité Pilote) - **Mémoire de présentation de l'unité pilote**, Septembre 2019
 Cadre de réponse - **Synthèse des innovations proposées**, Septembre 2019

Vinci Environnement / Naldeo / CEA Liten / INSA / INRAE

Rapport de sous-phase 1A - **Caractérisation des intrants**, Septembre 2018
 Rapport de sous-phase 1A - **Protocole d'expérimentation**, Décembre 2018
 Rapport de sous-phase 1A - **Définition du Système de Traitement**, Septembre 2018
 Rapport de sous-phase 1B - **Réalisation des Essais Expérimentaux**, Juin 2019
 Rapport de sous-phase 1C (APS Unité Pilote) - **Mémoire de présentation de l'unité pilote**, Septembre 2019
 Cadre de réponse - **Synthèse des innovations proposées**, Novembre 2019

Q. HIRTZBERGER Pierre. Valorisation des déchets - Sortez votre boussole. Décembre 2020. Institut Sapiens

Brevets déposés :

- > Dispositif d'injection sous haute pression d'une ressource organique
- > Procédé de gazéification en eau supercritique
- > Dispositif d'injection sous haute pression d'un mélange humide
- > Réacteur échangeur thermique
- > Installation et procédé de gazéification hydrothermale de biomasse
- > Procédé de système de production de biogaz et de traitement de boues de station d'épuration
- > Dispositif de traitement d'intrants mis en œuvre dans un tel dispositif
- > Dispositif d'extraction de nutriments phosphore et azote contenus dans un effluent liquide et procédé d'extraction mis en œuvre dans un tel dispositif
- > Dispositif de traitement d'intrants bi-étagé et procédé de traitement mis en œuvre dans un tel dispositif

Publication :

- > AMODEO CORRADO, HATTOU STEPHANE, BUFFIERE PIERRE, BENBELKACEM HASSEN. Temperature phased anaerobic digestion (TPAD) of Organic Fraction of Municipal Solid Waste (OFMSW) and Digested Sludge (DS): effect of different hydrolysis conditions, Février 2021. Disponible sur <https://hal.archives-ouvertes.fr/>

SYCTOM ET SIAAP EN BREF

“L’approche multisectorielle, multidisciplinaire est celle qui est la plus efficiente”

 Denis Penouel, Syctom (ex SIAAP)



Le Sycotom 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 10 % de la population française.

Le Sycotom, l'agence métropolitaine des déchets ménagers, est l'établissement public chargé de traiter et valoriser les déchets produits par 6 millions d'habitants de 82 communes (Paris et proche banlieue), soit 10% de la population française. Chaque année, ce sont 2,3 millions de tonnes de déchets qui sont traités. 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 Sycotom, 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 Sycotom 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 transportés vers l'une de ses usines, tout au long d'un réseau de 440 kilomètres de canalisations, 2,3 millions de m³ d'eaux usées sont dépollués, chaque jour, dans 6 usines de traitement des eaux usées, avant d'être rejetés 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 process, de son organisation et de son outil industriel.



**l'agence
métropolitaine
des déchets
ménagers**

Plus d'informations :
sycotom-paris.fr



Service public de l'assainissement francilien

Plus d'informations :
siaap.fr



l'agence
métropolitaine
des déchets
ménagers

