



Nouveaux Systèmes Énergétiques

Comité stratégique de filière

MEMOIRE TECHNIQUE – SOLUTIONS DE PRETRAITEMENT BIOLOGIQUE EN METHANISATION

GROUPE DE TRAVAIL

BIOGAZ

SOUS-GROUPE DE TRAVAIL

INDUSTRIALISATION – COMPÉTITIVITÉ

Juillet 2021

1	PREAMBULE	3
2	PRESENTATION GENERALE DES SOLUTIONS DE PRETRAITEMENT BIOLOGIQUE	4
2.1	INTRODUCTION	4
2.2	LES EFFETS BIOLOGIQUES RECHERCHES AU TRAVERS D'UNE HYDROLYSE EN TETE DE PROCEDE	6
2.1	HYDROLYSE DITE CATALYSEE	7
2.2	HYDROLYSE SEMI-AEROBIE CATALYSEE	9
2.3	HYDROLYSE EN FOSSE DE MELANGE SIMPLE	13
2.4	ADJONCTION D'ENZYMES	15
3	TABLEAU COMPARATIF DES SOLUTIONS / GRILLE D'ANALYSE & INTERETS	16

Le présent mémoire technique fait suite aux **objectifs d'amélioration continue des méthodes et pratiques de conception et d'exploitation des unités de méthanisation** portés par le groupe de travail Biogaz du Comité Stratégique de Filière Nouveaux Systèmes Energétiques (CSF NSE).

Afin de répondre à ces enjeux, un **groupe de travail « Prétraitements »** a notamment été mis en place, avec la charge d'entamer une réflexion globale autour des solutions de prétraitements mécaniques et biologiques des intrants avant incorporation en cuve de digestion. L'objectif initial de ce groupe de travail étant idéalement d'aboutir une **standardisation technologique**, c'est-à-dire de faire ressortir une solution « universelle » de prétraitement des intrants. Et ce pour, in fine, **faciliter et sécuriser le travail de conception et d'exploitation des unités de méthanisation**.

Au cours des échanges portés par les membres du groupe de travail, il est rapidement ressorti **qu'un tel niveau de standardisation n'était ni techniquement pertinent ni même réalisable**, du fait entre autres de la grande variabilité des types d'intrants incorporés et de leurs caractéristiques.

De fait, il a alors été décidé de mandater des professionnels spécialistes de la filière afin de **capitaliser leurs retours d'expériences** sur les différentes technologies de prétraitements existantes, et d'en ressortir une **étude comparative**. L'objectif final étant cette fois de développer un **outil d'aide à la décision**, permettant de sélectionner la **solution de prétraitements la plus adaptée à chaque projet**, en fonction notamment des intrants incorporés.

La rédaction d'un mémoire technique a ainsi été entreprise, et confiée à deux spécialistes du secteur :

- La société BIOVALO, représentée par Pierre FONTANILLE, et chargée de l'analyse comparative des solutions de prétraitements mécaniques
- La société BIOGAZ INGENIERIE, représentée par Stéphane DUTREMEE, et chargée de l'analyse comparative des solutions de prétraitements biologiques

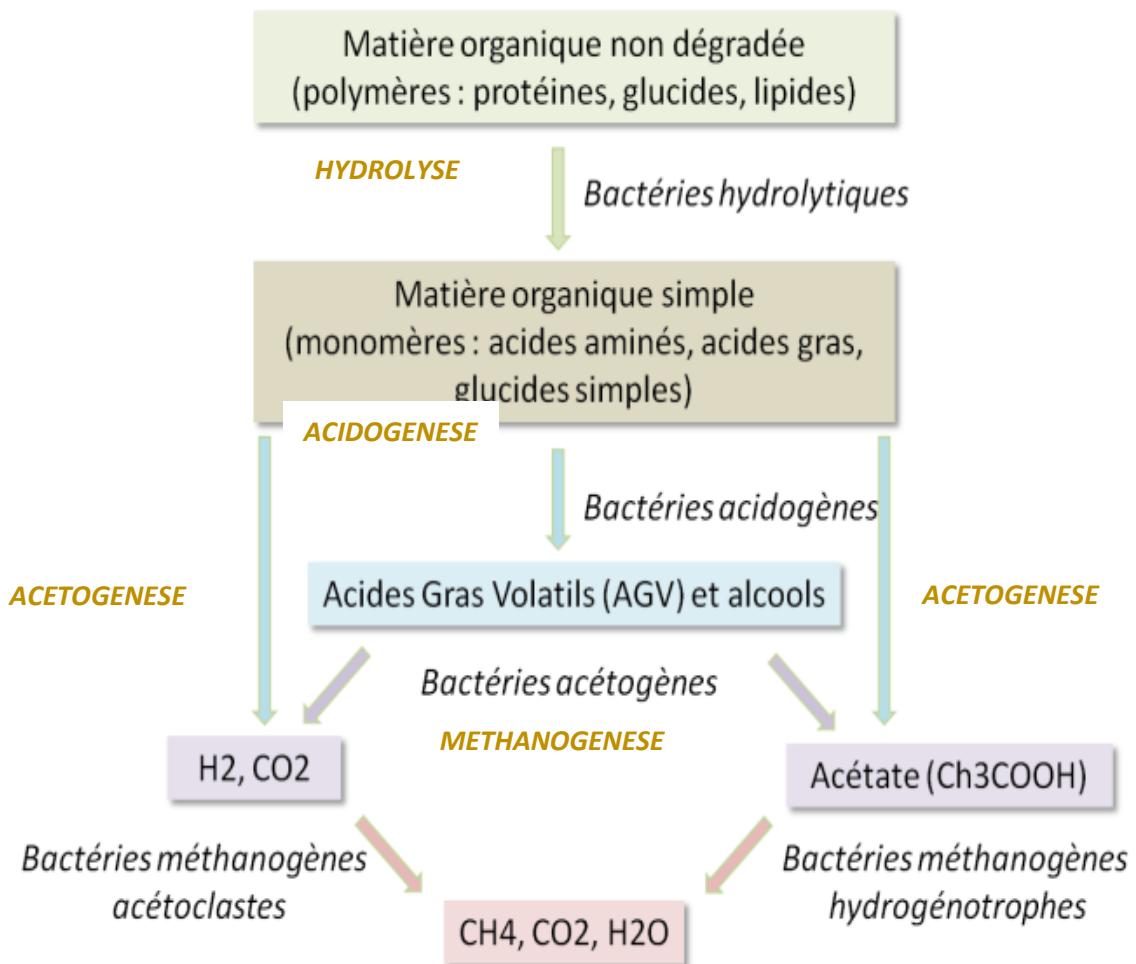
Ainsi, ce mémoire qui se base sur les retours d'expérience de BIOGAZ INGENIERIE, détaille les différentes solutions existantes de prétraitements biologiques, et propose une analyse technique comparative de ces solutions. Ce document est fondé sur le retour d'expérience de plus de 20 sites sur le territoire national sur des dynamiques en filière de digestion agricoles, ou co-digestion sur bases agricoles et sur biodéchets agro-industriels.

2.1 INTRODUCTION

Avant toute présentation des solutions de prétraitement biologique existantes, il est important de rappeler le processus biologique en action lorsque l'on parle de méthanisation.

La méthanisation est un processus biologique naturel au cours duquel des éléments organiques complexes vont être transformés en éléments simples, grâce à l'action de bactéries anaérobies et de différents intermédiaires de réaction synthétisés par ces bactéries. Parmi ces éléments simples, on citera le méthane (CH_4), le dioxyde de carbone (CO_2), ou le sulfure d'hydrogène (H_2S), principaux composants du biogaz.

La méthanisation peut être décomposée en quatre phases de dégradation : l'hydrolyse, l'acidogénèse, l'acétogénèse et la méthanogénèse. Chacune de ces phases fait intervenir un type de bactéries spécifique (ex : bactéries hydrolytiques pour l'hydrolyse).



Les solutions de prétraitements existantes vont intervenir spécifiquement sur la première étape de la méthanisation : l'hydrolyse, c'est-à-dire la dégradation de composés organiques complexes et insolubles en monomères solubles (acides aminés, acides gras, glucides simples).

Cette décomposition est induite par l'action **d'enzymes extracellulaires** synthétisées par des bactéries, et **se fait donc de manière indirecte**.

Les bactéries en jeu lors de l'hydrolyse sont de deux groupes : **anaérobies strictes** (évoluant dans un milieu sans oxygène) et **anaérobies-facultatifs** (tolérantes au dioxygène). Le processus biologique d'hydrolyse peut donc se faire **en milieu anaérobie ou aérobie**.

A l'inverse, les autres phases de la méthanisation (acidogénèse, acétogénèse et méthanogénèse) font intervenir des **bactéries anaérobies-strictes, ce qui rend impossible leur fonctionnement en présence d'oxygène**. De fait, le processus de méthanisation classique se déroule en milieu anaérobie, afin de permettre le développement de toutes les bactéries nécessaires.

La gamme de pH optimale pour le développement des bactéries hydrolytiques et acidogènes est comprise entre 4.5 et 6.3, soit un milieu relativement acide (pour rappel, le pH moyen d'un milieu de digestion en méthanisation est compris entre **7 et 7.5**). L'hydrolyse peut cependant avoir lieu dans une plage de tolérance beaucoup plus importante de 4 à 8 de pH. **Le processus classique de digestion en méthanisation n'est donc pas optimal pour le bon fonctionnement de la phase d'hydrolyse**. En revanche, il l'est pour le fonctionnement de l'acétogénèse et de la méthanogénèse.

A noter que les bactéries hydrolytiques, tout comme les bactéries acidogènes, ont un **temps de multiplication rapide**, de l'ordre de quelques heures seulement. A l'inverse, les bactéries intervenant lors de l'acétogénèse et de la méthanogénèse ont un **temps de multiplication beaucoup plus lent**, de l'ordre de plusieurs jours.

Pour produire les exo-enzymes responsables de la dégradation de la matière organique, **les bactéries hydrolytiques anaérobies facultatives consomment le dioxygène dissout dans le milieu de digestion**. Ce dioxygène étant par nature peu soluble et étant par conséquent peu présent dans le milieu, cette consommation induit **une diminution du taux d'O₂ dans le milieu de digestion**, et cause de fait une **réduction du potentiel redox nécessaire au développement des bactéries anaérobies strictes**. Ainsi, le **processus de développement des bactéries anaérobies facultatives rentre en concurrence avec celui des bactéries anaérobies strictes** intervenant dans les différentes phases de la méthanisation, **ce qui peut alors entraîner une diminution ou non optimisation du rendement de l'unité**. Cette concurrence étant accentuée par la différence de temps de division entre les bactéries anaérobie-strictes et les bactéries anaérobies-facultatifs, à l'avantage de ces dernières.

Typiquement et par exemple, en cas de suralimentation du digesteur en intrants, la forte disponibilité de matière organique digestible peut entraîner un développement croissant des bactéries hydrolytiques et acidogènes. Ceci encore accentué par leur faible temps de division. La production d'acides gras volatiles (produits de l'acidogénèse) augmentant alors significativement, cela a pour effet une diminution du pH, qui devient défavorable au développement des bactéries acétogènes et méthanogènes. Le processus complet de méthanisation ne peut plus opérer : c'est le principe de **l'acidose**.

Ainsi, afin d'éviter la concurrence entre bactéries et d'optimiser le processus d'hydrolyse, plusieurs procédés ont vu le jour, comme le développement de fosses d'hydrolyse externes, en amont des cuves de digestion. **Deux procédés d'hydrolyse externes seront ici développés** : l'hydrolyse dite catalysée et l'hydrolyse dite semi-aérobie catalysée. **La solution de prétraitement par fosse de mélange sera également présentée, et enfin, la solution de traitement biologique par ajout d'enzymes sera abordée**.

2.2 LES EFFETS BIOLOGIQUES RECHERCHES AU TRAVERS D'UNE HYDROLYSE EN TÊTE DE PROCÉDÉ

Il est important de bien comprendre la notion d'acidification recherchée au travers de l'hydrolyse et de ne pas la confondre avec l'acidité liée au pH. Au travers d'une hydrolyse biologique il est recherché la création d'acides organiques en forte concentrations (Acide acétique, propionique, ...) qui sont les précurseurs des phases méthanogènes. En général, le ratio acides totaux / alcalinité (appelé : FOS/TAC ou AGV/TAC) est recherché à l'inverse de celui d'un digesteur, c'est à dire que l'on recherche un ratio proche de 1 et même au-delà de 1, signe d'une présence forte d'acides précurseurs.

Généralement lorsque l'on évoque une hydrolyse on s'attend à obtenir un pH bas. La baisse de pH est induite effectivement par l'acidification (création d'acides acétique, propionique, ... précurseurs des phases méthanogènes). Cependant le pH du milieu n'est pas nécessairement extrêmement acide, cela dépendra de la nature des intrants et de leur alcalinité.

Il est important de noter que les substrats lignocellulosiques type fumiers sont des produits à hydrolyse dite lente et possédant une alcalinité importante (pouvoir tampon). De fait ces derniers ne donnent pas nécessairement une baisse du pH importante. Le pH peut aussi rester relativement neutre du fait d'une dilution opérée dans les cuves avec du digestat qui apporte une alcalinité importante. Ainsi une hydrolyse peut fonctionner et être fonctionnelle sur des plages de plus ou moins pH neutres, l'important étant la création et la concentration en acides organiques précurseurs et non le pH.

L'hydrolyse dite catalysée est le processus d'hydrolyse externe le plus simple et le plus économique.

Ce système se base sur une cuve dédiée, équipée d'un système d'extraction d'air avec ventilateur et filtration d'odeur, d'un ou plusieurs agitateurs et d'un système de chauffage (repris sur le circuit d'eau chaude, en aval de la chaudière en injection, ou sur le circuit de récupération de chaleur en cogénération).

Fonctionnement :

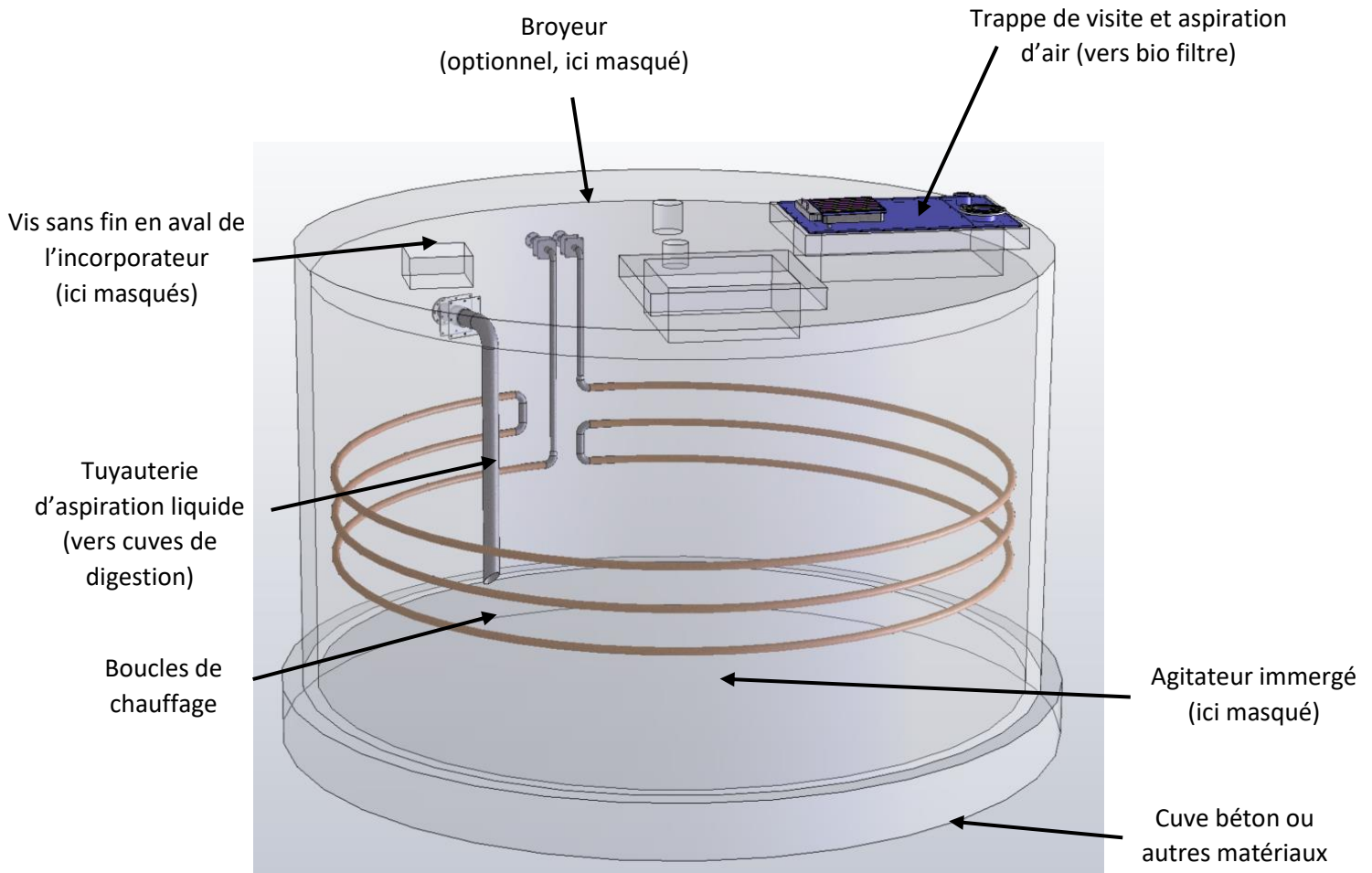
L'objectif étant ici de d'atteindre le **couple température / oxygénation / temps de rétention** pour la favorisation de l'action des bactéries hydrolytiques, et notamment les bactéries anaérobies-facultatives :

- La ventilation par extraction d'air permet une **meilleure oxygénation** qu'en cuve étanche anaérobie. Le flux d'air permet d'induire une oxygénation. Cette oxygénation reste cependant faible car elle n'est pas réalisée dans la masse de matière.
- Le ou les agitateurs permette(nt) de limiter à la fois le processus de sédimentation au fond de la cuve et de flottaison croûtage en surface, et participe(nt) à l'homogénéisation du mix et de l'oxygénation du milieu en créant un régime turbulent.
- La température est pilotée entre 30 et 38°C, et a une action de **catalyseur de la réaction d'hydrolyse**. Elle permet également de limiter le développement de bactéries méthanogènes anaérobies-strictes au fond de la cuve (lié à la recirculation de digestat et potentielle absence d'oxygène dû à une solubilisation hétérogène sur toute la hauteur des cuves en cas d'agitation insuffisante).

La fosse est placée en aval l'incorporateur de biomasse solide. La matière solide est convoyée dans la fosse ; il est nécessaire de procéder à une **dilution obligatoire du mix d'intrants** par adjonction d'intrants liquides et/ou recirculation de digestat, **l'objectif étant d'atteindre un taux de MS compris entre 8 et 12%**. Au-delà, la viscosité du mix pouvant entraîner diverses complications : augmentation de la consommation des agitateurs, usure prématurée des pâles et des motoréducteurs, difficulté de pompage et bourrage des aspirations/refoulements.

En option, la fosse d'hydrolyse peut être équipée d'un broyeur en aval de l'incorporateur. Le choix d'un tel équipement se fera en fonction de la fibrosité des intrants solides (fumiers, paille, CIVE...). En cas d'intrants fibreux la préparation par broyage en amont ou sur la ligne d'incorporation est indispensable pour améliorer les performances hydrolytiques mais aussi les conditions de broyages dans la cuve.

Schéma de principe d'une cuve Hydrolyse catalysée



Si cette solution est relativement facile à mettre en place et à piloter, elle montre rapidement ses limites :

- **Le taux de brassage de l'air reste faible**, puisque l'oxygénation n'est assurée que par un simple différentiel de pression grâce au flux d'air circulant, entraînant une nécessité d'un temps de séjour dans la cuve de 2 à 8 jours afin d'obtenir l'acidification requise.
- **L'hétérogénéité de la solubilisation de l'oxygène sur la hauteur de la cuve entraînée par la faible oxygénation** peut entraîner l'apparition d'une phase anaérobie en fond de cuve et le développement de bactéries méthanogènes, et ainsi entraîner des pertes de méthane.
- **Le procédé est piloté exclusivement en phase aérobie** (excepté une éventuelle phase étanche en fond de cuve) : les bactéries acidogènes anaérobies-strictes ne peuvent donc pas s'y développer. On assiste donc seulement à une fragmentation des molécules organiques complexes, (hydrolyse), sans formation majeure d'acides gras volatils (acidogénèse). Ce qui n'entraîne par conséquent en général qu'une faible diminution du pH, ne suffisant pas à atteindre la plage optimale pour le développement des bactéries hydrolytiques et acidogènes. De fait, le rendement de l'hydrolyse catalysée uniquement par chauffage et en aérobie par simple flux d'air reste donc assez bas sur des substrats agricoles.

L'hydrolyse semi aérobie catalysée comble les principales lacunes de l'hydrolyse catalysée, en intégrant de facto un système d'oxygénation dynamique.

Cette technologie a initialement été développée pour répondre à la problématique de la valorisation des intrants de l'industrie agro-alimentaire, facilement et rapidement dégradables, et de fait précurseurs des risques d'acidose (car forte synthèse d'AGV en un court laps de temps).

Au début des années 2000, elle a été adaptée pour les intrants agricoles, riches en cellulose, afin de **favoriser la voie de synthèse de l'acide acétique (précurseur principal du méthane)** par rapport aux autres voies métaboliques en jeu dans le processus de méthanisation.

Fonctionnement :

Tout comme l'hydrolyse catalysée, l'hydrolyse semi-aérobie catalysée se base sur une cuve dédiée, équipée d'un ou plusieurs agitateurs et d'un système de chauffage (repris sur le circuit d'eau chaude, en aval de la chaudière en injection, ou sur le circuit de récupération de chaleur en cogénération).

Cependant, à la différence de l'hydrolyse catalysée, la fosse d'hydrolyse semi-aérobie est étanche et **équipée de buses d'aération**. Un système d'extraction d'air sans ventilateur permet quant à lui de réguler la pression à l'intérieur de la fosse, par évacuation des gaz après passage par un bio filtre (aucun rôle d'aération à la différence de la fosse d'hydrolyse catalysée). A l'intérieur de la fosse s'alternent des **phases aérobies (aérations forcées dans la masse de matière, depuis le fond de la cuve) et anaérobies**, permettant d'adapter les conditions du milieu aux différentes phases de la méthanisation, et de favoriser le développement des types de bactéries souhaités. Ainsi, de manière chronologique :

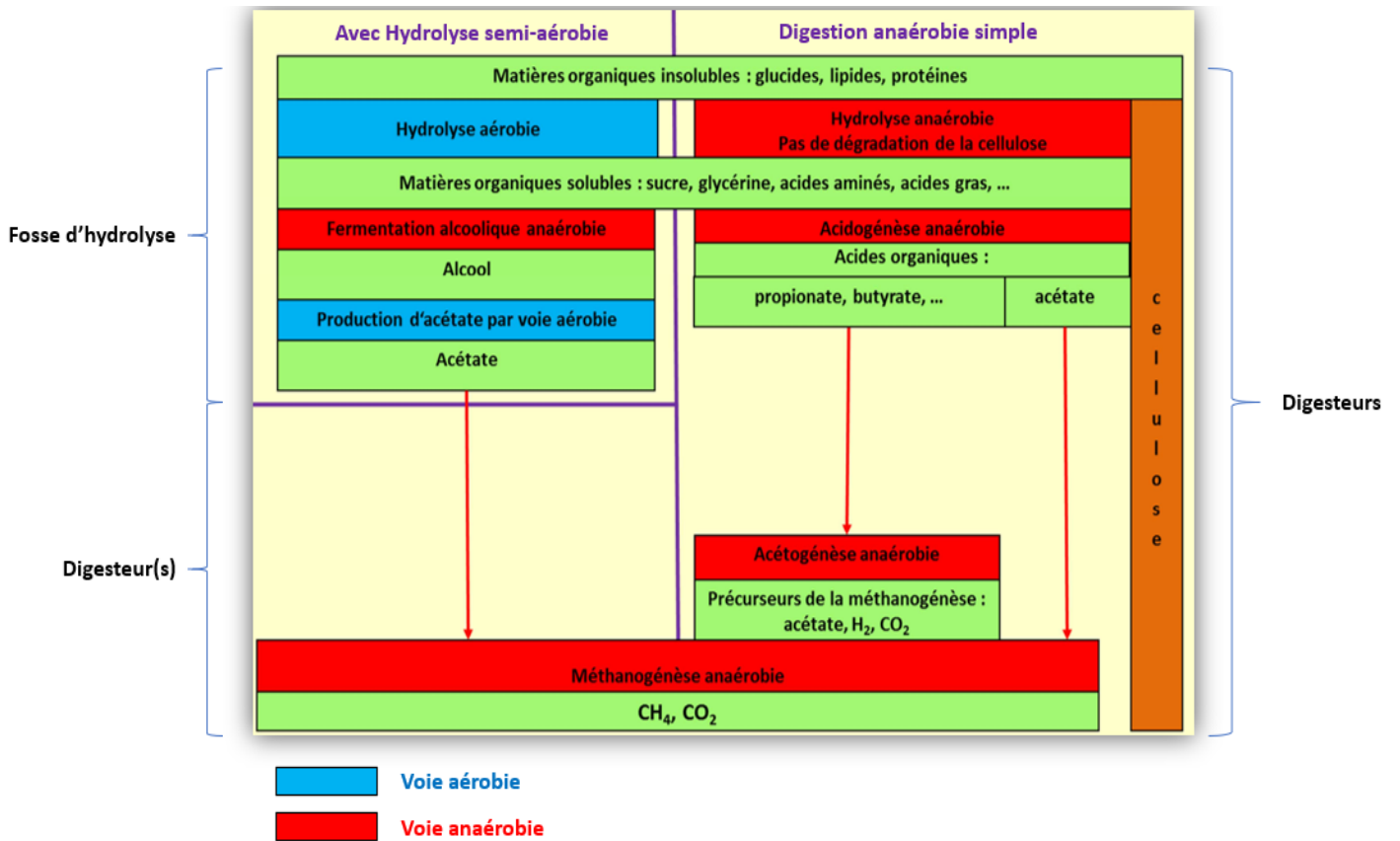
1. **Phase aérobie = hydrolyse** → Dégradation des matières organiques complexes en monomères solubles par des bactéries anaérobies-facultatives
2. **Phase anaérobie = Fermentation alcoolique** → Synthèse d'éthanol, intermédiaire de réaction à la production d'acide acétique
3. **Phase aérobie = Production d'acide acétique** à partir de l'éthanol

L'enchaînement chronologique de ces trois phases amène, à partir des mêmes intrants, à une synthèse plus importante d'acide acétique comparé à la digestion anaérobie classique, grâce à la sélection des voies métaboliques les plus adéquates. Le ratio acide acétique sur acide propionique (produit de l'acidogénèse en digestion anaérobie classique, mais non valorisable directement en biogaz) est alors supérieur, ce qui implique une plus grande efficacité du processus de méthanogénèse.

L'objectif dans le pilotage de l'hydrolyse semi-aérobie catalysée est donc de **transférer le mix vers les cuves de process à la fin de la production aérobie d'acétate**. Au-delà, si les conditions du milieu restent anaérobies, l'acétate sera transformé en méthane et dioxyde de carbone dans la fosse d'hydrolyse. Le temps de séjour est donc un facteur clé du rendement d'une fosse d'hydrolyse semi-aérobie catalysée et est très réduit (de 0.5 à 1.2 jours). Il est ajusté par retour d'analyses labo pendant la phase de mise en service.

Le fait d'alterner les phases aérobies et anaérobies permet, à la différence de l'hydrolyse catalysée, de favoriser la réaction d'hydrolyse mais également la production d'acide acétique en plus grandes proportions, par la voie de la fermentation alcoolique (phase anaérobie). Cette production d'acide permet une **diminution significative du pH**, d'avantage favorable aux bactéries hydrolytiques. Ces bactéries sont alors plus à même de se développer, ce qui renforce d'autant plus les réactions de dégradations de la matière organique.

Schéma comparatif Hydrolyse semi aérobie / Processus en digesteur



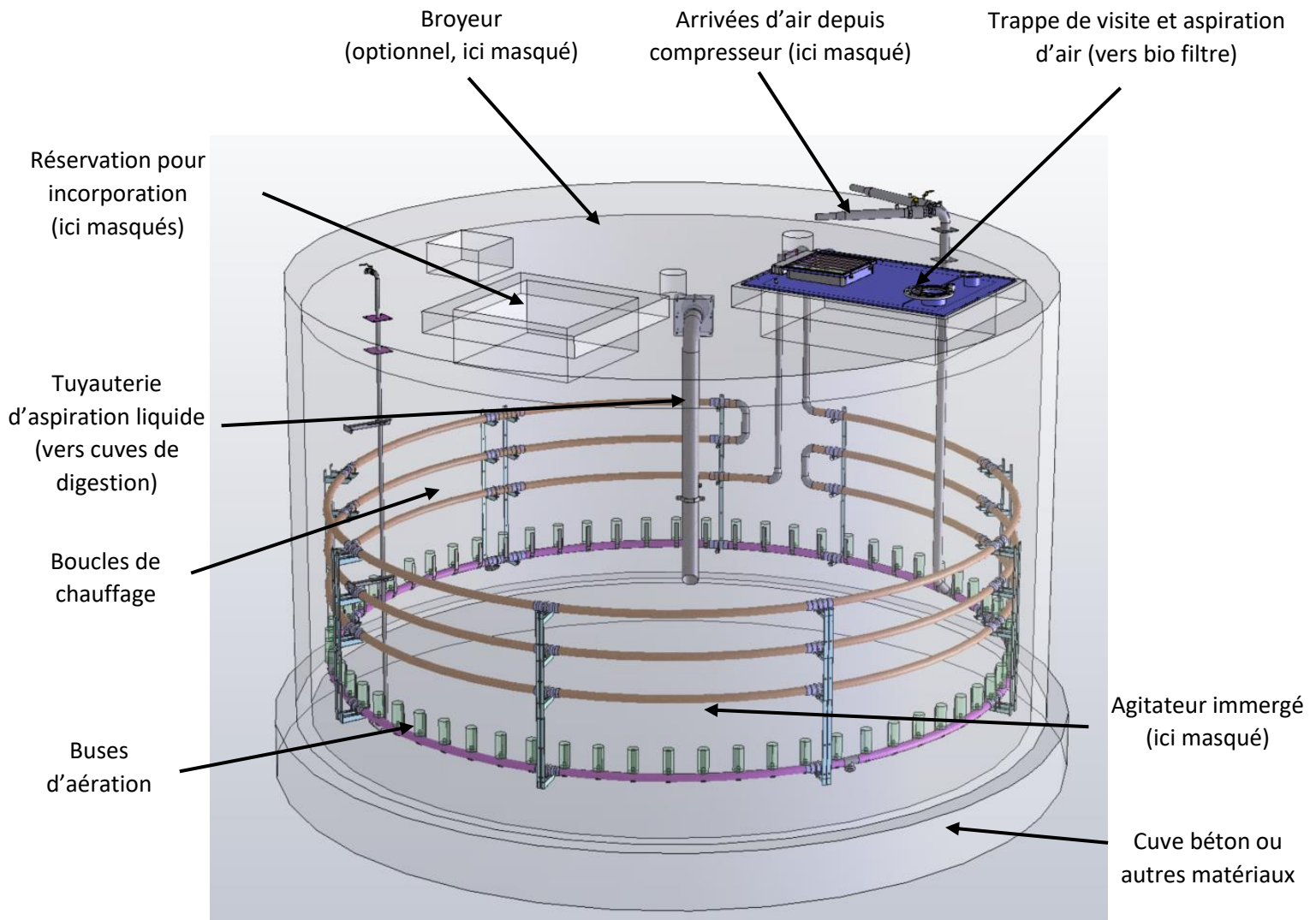
Ainsi, sur cette solution, on ne constate plus seulement un couple température/oxygénation comme pour l'hydrolyse catalysée, mais un **triptyque température/oxygénation/pH**, doublement favorable à l'action des bactéries hydrolytiques et acidogènes :

- La ventilation dynamique est assurée par un compresseur et des buses spécifiquement conçues, projetant des fines bulles d'air sous haute pression et permettant de fait une **oxygénation nettement plus efficace** qu'en fosse d'hydrolyse catalysée.
- Tout comme pour l'hydrolyse catalysée, le ou les agitateurs permette(nt) de limiter le processus de sédimentation au fond de la cuve et les phénomènes de flottaisons/croutages, et participe(nt) à l'homogénéisation du mix et de l'oxygénation du milieu en créant un régime turbulent.
- La fosse d'hydrolyse se doit d'être **parfaitement étanche**, pour éviter tout échange gazeux avec l'atmosphère et conserver les conditions anaérobies au besoin. Un extracteur d'air équipé d'un bio filtre est toujours présent, servant ici uniquement à réguler la pression à l'intérieur de la cuve et capter les odeurs.
- La température est pilotée entre 32 et 37°C, et a une action de **catalyseur de la réaction d'hydrolyse**. Elle permet également de limiter le développement de bactéries méthanogènes anaérobies-strictes pouvant se développer au fond de la cuve pendant les phases anaérobies (induites par la recirculation de digestat).

De la même manière que la fosse d'hydrolyse catalysée, La fosse d'hydrolyse semi-aérobie est placée en aval l'incorporateur de biomasse solide. Un convoyage entraine la matière dans la fosse, après **dilution obligatoire du mix** par recirculation de digestat et/ou adjonction d'intrants liquides. **L'objectif étant toujours d'atteindre un taux de MS compris entre 8 et 12%**. Au-delà, la viscosité du mix pouvant entrainer diverses complications : augmentation de la consommation des agitateurs, usure prématurée des pâles et des motoréducteurs, difficulté de pompage et bourrage des aspirations/refoulements ou des buses d'aération.

En option, la fosse d'hydrolyse peut être équipée d'un broyeur en aval de l'incorporateur. Le choix d'un tel équipement se fera de la même manière en fonction de la fibrosité des intrants solides (fumiers, paille, CIVE...).

Schéma de principe d'une cuve Hydrolyse semi aérobie catalysée



Le principe de fonctionnement de l'hydrolyse semi-aérobie offre de nombreux avantages :

- **Favorisation des processus biologiques d'hydrolyse et de synthèse de l'acétate**, entraînant une meilleure dégradation de la matière organique et une plus grande efficacité de la méthanogénèse.
- **De fait, diminution du temps de rétention hydraulique minimal nécessaire à la bonne dégradation de la matière, et donc optimisation du volume utile des cuves de digestion** (gain économique à prendre en compte dans le calcul du retour sur investissement de la fosse d'hydrolyse semi-aérobie).
- Stabilisation de la production de biogaz par dégradation homogène et régulière de la matière organique
- Limitation de la perte en méthane grâce au système de chauffage, inhibant le développement des bactéries méthanogènes.

Le présent mémoire technique ayant pour objectif de présenter les différentes solutions de pré-traitement biologique, la fosse de mélange ne devrait en toute logique pas y être détaillée. En effet, l'action biologique de cette solution reste relativement limitée. Cependant, les solutions présentées ci-dessus étant systématiquement liées à un principe de dilution des intrants, la présentation d'une telle solution se révèle ici pertinente.

Fonctionnement :

Le principe de fonctionnement de la fosse de mélange réside dans une **dilution des intrants solides** avant transfert vers les cuves de digestion (d'avantage **prétraitement mécanique** que biologique). **L'objectif étant d'obtenir un mix homogène, entre 8 et 12% de MS**, afin limiter les problèmes mécaniques, et de faciliter la fixation des microorganismes sur la matière organique et de fait faciliter sa dégradation. Ce principe de dilution est notamment intéressant pour les **produits à faible densité et à forte fibrosité** (paille par exemple) qui engendreraient des difficultés de mélange dans les cuves de process en cas d'incorporation indépendante. La fosse de mélange est équipée d'un ou plusieurs agitateurs afin de limiter le processus de sédimentation au fond de la cuve, et d'améliorer l'homogénéité du mix et de l'oxygénation en créant un régime turbulent.

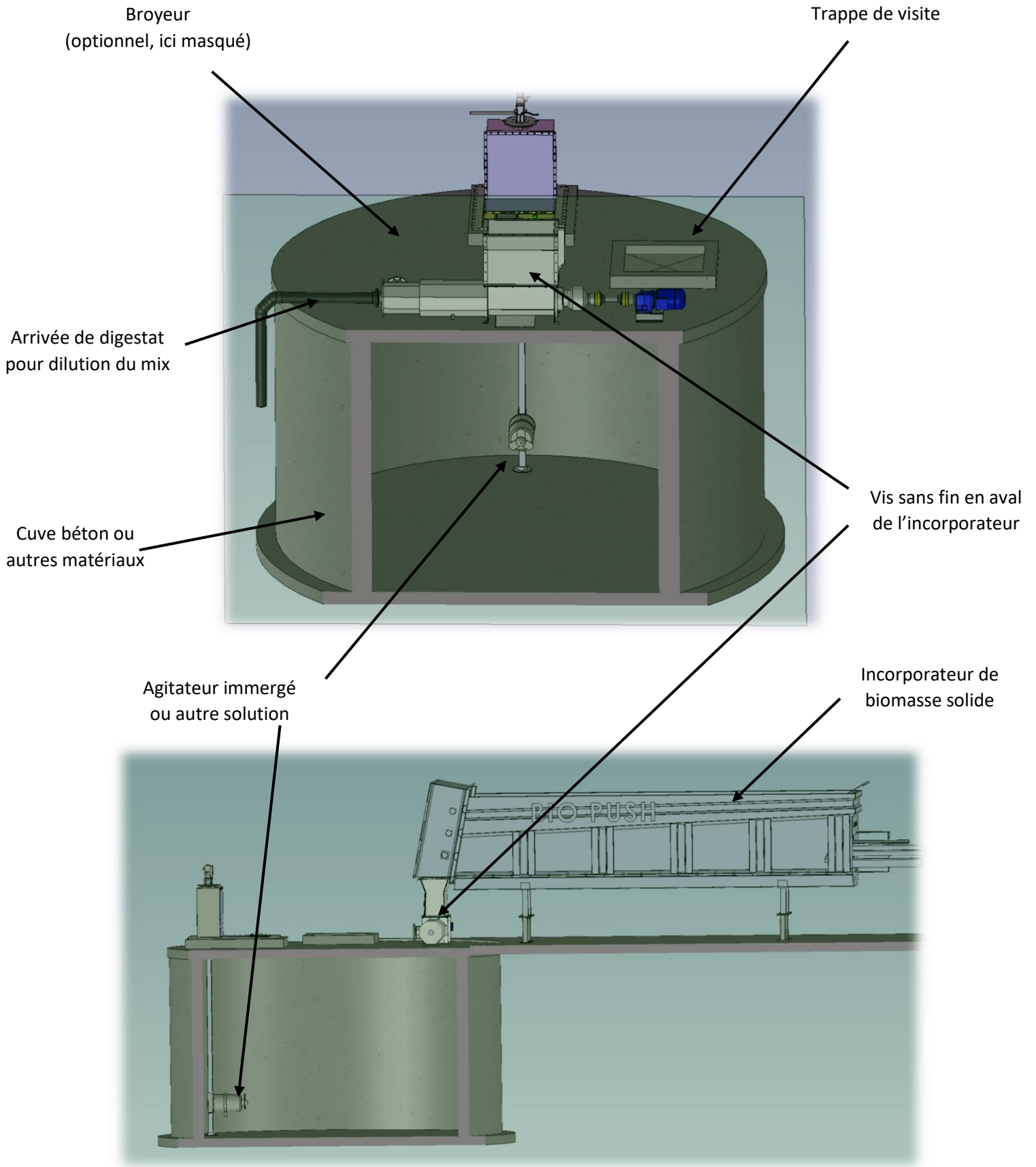
En supplément de l'action mécanique de la fosse de mélange, il est à noter que cette solution de prétraitement joue également un rôle biologique mineur, proche de celui de l'hydrolyse catalysée. En effet, la fosse de mélange n'étant pas étanche, le mix évolue en milieu aérobie. Une hydrolyse aérobie rentre alors en action, et facilite de fait la dégradation des matières organiques complexes en monomères solubles.

Cependant, l'efficacité de l'action biologique de la fosse de mélange est à relativiser. En effet, contrairement à l'hydrolyse catalysée, la fosse de mélange n'est pas équipée d'un système de chauffage ni d'un système de ventilation. De fait, la solubilisation de l'oxygène reste limitée et ne peut être homogène sur toute la hauteur de la cuve. De plus, la température n'étant pas pilotée, aucune inhibition du développement de potentielles bactéries méthanogènes anaérobies n'est mise en place.

De la même manière que la fosse d'hydrolyse catalysée, La fosse de mélange est placée en aval l'incorporateur de biomasse solide. Un convoyage entraîne la matière dans la fosse, après **dilution obligatoire du mix** par recirculation de digestat et/ou introduction d'intrants liquides. Au-delà, la viscosité du mix pouvant entraîner diverses complications : augmentation de la consommation des agitateurs, usure prématurée des pâles et des motoréducteurs, difficulté de pompage et bourrage des aspirations/refoulements.

Une fosse de mélange ouverte à l'air permet donc une acidification plus ou moins importante du mix de substrats. Cependant comme aucun chauffage n'est réalisé l'acidification reste relative et sensibles aux périodes hivernales. Ces cuves n'étant pas développées pour créer une acidification, le temps de séjour n'est pas non plus adapté à la recherche d'une hydrolyse acidifiante, même si l'on constate largement la création d'acides organiques dans ces ouvrages.

Schéma de principe d'une cuve de mélange



2.4 ADJONCTION D'ENZYMES

L'adjonction d'enzymes n'est pas un « prétraitement » à proprement parlé. En effet, il s'agit d'avantage d'une solution de « traitement » biologique, agissant directement en cuve de digestion. Cette solution ne demande donc pas d'aménagement technique supplémentaire par rapport à la digestion anaérobie classique.

Pour autant, l'objectif final de l'ajout d'enzyme est sensiblement identique aux procédés d'hydrolyse externes : **favoriser le processus d'hydrolyse** et de fait la dégradation de la matière organique en monomère et notamment l'attaque de la cellulose difficilement dégradable.

Ainsi, les enzymes sélectionnées sont des **enzymes hydrolytiques**. Par adjonction de ces dernières, on va chercher à remplacer le processus de synthèse naturelle des enzymes extracellulaires par les bactéries hydrolytiques (cf. introduction), en apportant directement la quantité nécessaire d'enzymes à la dégradation de la matière organique du mix. Cela permet ainsi **de s'absoudre en partie des contraintes physico-chimiques du milieu de digestion** nécessaires au bon développement de ces bactéries, et notamment des **contraintes liées au pH**, facteur limitant pour la phase d'hydrolyse en cuve de digestion étanche anaérobie (voir introduction).

De fait, l'adjonction d'enzymes hydrolytiques, en **favorisant la dégradation de la matière organique** dans les cuves de digestion, **augmente l'accessibilité de cette matière pour les microorganismes**. Théoriquement, il doit donc en découler une augmentation du rendement de production de biogaz de l'unité par tonne de matière introduite.

Après réalisation d'une campagne de mesures sur site client avec traitement statistique des résultats, BIOGAZ INGENIERIE n'a cependant pas pu faire apparaître de gain significatif sur la teneur en méthane du biogaz, ou sur la capacité de production globale de l'unité.

En revanche, des améliorations significatives ont pu être constatées au niveau de la viscosité du mix. En effet, la meilleure fragmentation des matières organiques complexes induite par l'ajout des enzymes hydrolytiques a entraîné une plus grande homogénéité du mélange, et une plus grande fluidité.

De fait, il convient d'en faire ressortir un intérêt indirect mais réel sur le long terme : une **moindre usure des équipements** (pompe, agitateurs) induite par la réduction des frottements, et donc une **augmentation de leur durée de vie** amenant à une **réduction des coûts de maintenance de l'unité**. De même, les agitateurs et pompe étant moins sollicités, une **diminution de la consommation électrique** des équipements est à noter.

Enfin, une **diminution de l'odeur du digestat** a également pu être notée par les exploitants en phase d'épandage, confirmant de fait la meilleure dégradation des matières organiques complexes.



3 TABLEAU COMPARATIF DES SOLUTIONS / GRILLE D'ANALYSE & INTERETS

Solutions de prétraitement biologique	Principe de fonctionnement	Intérêts	Limites	Adaptée pour :	Inadaptée pour :	Coûts	Remarque d'après Retour d'expérience
Hydrolyse catalysée	Création d'une fosse de mélange de l'input d'intrant permettant une Hydrolyse par mise à l'air en flux circulant dans le bassin, et cuve chauffée.	<p>Fosse permettant de piéger les inertes lourds.</p> <p>Réduction de temps de séjour dans les digesteurs consécutivement (45 à 60 jours).</p> <p>Amélioration de la performance de dégradation de la cellulose.</p> <p>Stabilité du digesteur en termes de Ms par maîtrise amont de la pompabilité.</p> <p>Réduction des installations de brassage dans les digesteurs et leurs consommations.</p> <p>Amélioration de la teneur en CH4 du biogaz en sortie de digesteur + 5 à + 8 % de CH4 en plus dans le biogaz.</p> <p>Amélioration de la productivité en biogaz par tonne de matière brute introduite de + 3 à + 8 %.</p>	<p>Nécessite une maîtrise de la teneur en matière sèche dans la cuve. Induit la nécessité de disposer d'une fraction d'intrants liquides ou d'une recirculation importante en tête de filière.</p> <p>Induit la nécessité d'un brassage adapté et de fait des coûts de brassage en amont et des installations techniques complémentaires.</p> <p>Génératrice d'odeurs qui doivent être traitées.</p>	<p>Substrats agricoles, industriels, végétaux à faible rapidité de dégradation.</p> <p>Sur les substrats agricoles adapté pour les substrats type fumiers, ensilages, foin et fourrages, pailles, cannes de maïs.</p>	<p>Substrats facilement dégradables type graisses, huiles, glycérides, issues de céréales, pulpes de betteraves, mélasses.</p>	<p>CAPEX :</p> <p>Génie civil / Cuve : variable selon le dimensionnement de la cuve au regard des tonnages à traiter.</p> <p>Equipements à prévoir :</p> <p>A prévoir en sus de la cuve, agitation dimensionnée selon la cuve, distribution et réseau de chauffage dans la cuve, couverture de la cuve pour capter les odeurs, bio filtre dynamique, automatismes et capteurs.</p> <p>OPEX :</p> <p>Installations techniques à entretenir en sus, type agitation, chauffage. La majorité des OPEX liés reste cependant la consommation électrique pour le brassage et le cas échéant la consommation pour le pompage de digestats en tête de filière.</p>	<p>Installations d'hydrolyse les plus simples utilisées pour le domaine agricole et les substrats lignocellulosiques type fumiers, ensilages, pailles.</p> <p>Installations simples en pilotage biologique.</p> <p>Nécessite une attention particulière sur la gestion de teneur en Ms de l'input d'intrants.</p> <p>Une attention particulière doit être portée à l'accessibilité d'une fosse couverte pour le curage régulier des sédiments dans la cuve.</p> <p>Pas de pertes de biogaz dans cette phase amont.</p>

<p>Hydrolyse semi-aérobie catalysée</p>	<p>Création d'une fosse de mélange de l'input d'intrant permettant une Hydrolyse par mise à l'air en flux forcé d'aération dans le bassin en alternance avec des phases anaérobies, et cuve chauffée.</p>	<p>Fosse permettant de piéger les inertes lourds.</p> <p>Réduction de temps de séjour dans les digesteurs consécutivement (25 à 40 jours).</p> <p>Amélioration de la performance de dégradation de la cellulose.</p> <p>Stabilité du digesteur en termes de Ms par maîtrise amont de la pompabilité et suppression des risques d'acidose du fait d'une alimentation en acide acétique sur les digesteurs (<i>sauf alimentation erratique depuis hydrolyse</i>).</p> <p>Réduction des installations de brassage dans les digesteurs et leurs consommations.</p> <p>Amélioration de la teneur en CH4 du biogaz en sortie de digesteur + 8 à + 10 % de CH4 en plus dans le biogaz.</p> <p>Amélioration de la productivité en biogaz par tonne de matière brute introduite de + 5 à + 12 % selon les substrats.</p>	<p>Nécessite une maîtrise de la teneur en matière sèche dans la cuve. Induit la nécessité de disposer d'une fraction d'intrants liquides ou d'une recirculation importante en tête de filière.</p> <p>Induit la nécessité d'un brassage adapté et de fait des coûts de brassage en amont et des installations techniques complémentaires.</p> <p>Génératrice d'odeurs importantes et d'émanations d'hydrogène sulfuré qui doivent être traités.</p> <p>Nécessite un entretien parfait de l'installation d'insufflation d'air, car en cas de rupture d'oxygénation de forts moussages peuvent se produire.</p>	<p>Substrats agricoles, industriels, végétaux à faible rapidité de dégradation.</p> <p>Sur les substrats agricoles adaptés pour les substrats type fumiers, ensilages, foin et fourrages, pailles, cannes de maïs.</p> <p>Sur les substrats industriels et dans des contextes de fortes fluctuations de typologies de matière, car permet d'alimenter les digesteurs en acides acétiques et donc de faire varier rapidement les rations.</p>	<p>Substrats facilement dégradables type huiles, glycérols, issues de céréales, pulpes de betteraves, mélasses.</p> <p>Sur ces substrats une perte de gaz est potentiellement importante car leur dégradation active dans ces types d'hydrolyses.</p>	<p>CAPEX :</p> <p><u>Génie civil / Cuve :</u> variable selon le dimensionnement de la cuve au regard des tonnages à traiter.</p> <p><u>Equipements à prévoir :</u></p> <p>A prévoir en sus de la cuve, agitation dimensionnée selon la cuve, distribution et réseau de chauffage dans la cuve, couverture de la cuve pour capter les odeurs, bio filtre dynamique, compresseur d'air et réseau de distribution, diffusion d'air, automatismes et capteurs, analyse des gaz d'évacuation.</p> <p>OPEX :</p> <p>Installations techniques à entretenir en sus, type agitation, chauffage, oxygénation. La majorité des OPEX liés reste cependant la consommation électrique pour le brassage et le cas échéant la consommation pour le pompage de digestats en tête de filière.</p>	<p>Installations d'hydrolyse plus complexes utilisées pour le domaine agricole et industriel. Dans le domaine agricole à privilégier sur les substrats lignocellulosiques type fumiers, ensilages, pailles, cannes de maïs.</p> <p>Installations simples en pilotage technique et biologique avec simple surveillance de teneur en Ms et FOS/TAC.</p> <p>Nécessite une attention particulière sur la gestion de teneur en Ms de l'input d'intrants.</p> <p>Une attention particulière doit être portée à l'accessibilité d'une fosse couverte pour le curage régulier des sédiments dans la cuve.</p> <p>Pas de pertes de biogaz dans cette phase amont.</p>
------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p>Fosse de mélange</p>	<p>Création d'une fosse de mélange de l'input d'intrant permettant une « Hydrolyse naturelle ».</p>	<p>Fosse permettant de piéger les inertes lourds.</p> <p>Légère, amélioration de la performance de dégradation de la cellulose.</p> <p>Stabilité du digesteur en termes de Ms par maîtrise amont de la pompabilité.</p> <p>Réduction des installations de brassage dans les digesteurs et leurs consommations.</p>	<p>Nécessite une maîtrise de la teneur en matière sèche dans la cuve.</p> <p>Induit la nécessité de disposer d'une fraction d'intrants liquides ou d'une recirculation importante en tête de filière.</p> <p>Induit la nécessité d'un brassage adapté et de fait des coûts de brassage en amont et des installations techniques complémentaires.</p>	<p>Substrats agricoles, industriels, végétaux à faible rapidité de dégradation. Attention, cependant comme la fosse est ouverte aux émanations d'odeurs via la génération d'acides gras volatils sur des produits facilement dégradables et d'autant plus avec une recirculation de digestat.</p>	<p>Substrats facilement dégradables type huiles, glycérides, issues de céréales, pulpes de betteraves, mélasses.</p> <p>Sur ces substrats une perte de gaz est potentiellement importante car leur dégradation active dans ces types d'hydrolyses « naturelles » non maîtrisées.</p>	<p>CAPEX :</p> <p><u>Génie civil / Cuve :</u> variable selon le dimensionnement de la cuve au regard des tonnages à traiter.</p> <p><u>Equipements à prévoir :</u></p> <p>A prévoir en sus de la cuve, agitation dimensionnée selon la cuve.</p> <p>OPEX :</p> <p>Installations techniques à entretenir en sus, type agitation. La majorité des OPEX liés restent cependant la consommation électrique pour le brassage et le cas échéant la consommation pour le pompage de digestats en tête de filière.</p>	<p>Installations simples pour le domaine agricole.</p> <p>Installations simples en pilotage technique, ne nécessitant pas de pilotage biologique.</p> <p>Nécessite une attention particulière sur la gestion de teneur en Ms de l'input d'intrants.</p> <p>Une attention particulière doit être portée à l'accessibilité de la fosse, à privilégier enterrée ou semi enterrée pour le curage régulier des sédiments dans la cuve.</p> <p>Attention au mix d'intrant et à la génération d'odeurs.</p>
-------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p>Adjonction d'enzymes</p>	<p>Hydrolyse in situ dans les digesteurs par augmentation de la teneur en enzymes pour la dégradation des fibres et la génération de monomères.</p>	<p>Augmentation de la surface d'attaque des fibres pour une génération plus importante de monomères pour les étapes biologiques consécutives.</p> <p>Amélioration de la viscosité et de la pompabilité du mélange en digestion. La matière est plus fluide, nécessitant moins de brassage.</p> <p>Facilité de l'épandage consécutivement sur un digestat brut du fait de la fluidité améliorée.</p>	<p>Pas de limites techniques particulières.</p>	<p>Adapté pour des rations riches en fibres et notamment pailles, cannes de maïs. Produits à dégradations lentes et difficiles.</p>	<p>Aucun intérêt sur les substrats facilement dégradables type lisiers, graisses, huiles, mélasses, pulpes.</p>	<p>CAPEX :</p> <p>Pas d'investissements à prévoir, adjonction sous forme liquide ou solide depuis les intrants dans les digesteurs.</p> <p>OPEX :</p> <p>Les coûts d'adjonction requis peuvent être conséquents si l'on souhaite à la fois obtenir un effet sur la production de biogaz et sur la viscosité. Les coûts sont très variables selon les fournisseurs et le type d'enzymes.</p>	<p>Facilité de mise en œuvre et de dosage des enzymes.</p> <p>Les coûts sont par contre conséquents. Si l'on souhaite les maîtriser, seul l'effet sur la viscosité se vérifie véritablement, l'effet sur la production de biogaz par tonne d'intrant est plus compliqué à valider.</p> <p>Intéressant dans le cadre de périodes annuelles complexes avec des pics de produits solides et difficilement dégradable afin d'améliorer la cinétique de dégradation dans un temps de séjour réduit.</p> <p>La viscosité et la fluidité du digestat sont nettement améliorés.</p> <p>Intéressant parfois pour consommer une croûte de flottaison dans un post digesteur / maturation. (Si cette dernière n'est pas d'envergure).</p>
------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------