

# GESTION DES PROCESSUS DE DIGESTION ET DE CODIGESTION

Recommandation



## Impressum

La présente publication concrétise les exigences de la législation fédérale sur la protection des eaux, assure une bonne pratique et permet une exécution uniforme par les autorités. Elle a été réalisée avec le plus grand soin et en toute bonne foi. Le VSA décline toutefois toute responsabilité quant à son exactitude, son exhaustivité et son actualité. Toute responsabilité quant à d'éventuels dommages de nature matérielle ou immatérielle pouvant résulter de l'application de la présente publication est exclue.

### Auteurs

Martin Kühni, ZHAW Wädenswil  
Lucien Biolley, EPF Zurich  
Tobias Siegerist, TBF + Partner AG  
Florian Rüschi-Pfund, ZHAW Wädenswil  
Imre Antalffy, ZHAW Wädenswil  
Alissa Tophinke, ZHAW Wädenswil  
Urs Baier, ZHAW Wädenswil

### Membres du groupe de suivi

Adrian Fasel, ara region bern AG  
Markus Hürlimann, AV Altenrhein  
Beat Kobel, Ryser Ingenieure AG  
Manfred Tschui, Holinger AG

### Mode de citation conseillé

Auteur : Association suisse des professionnels de la protection des eaux (VSA)  
Titre : Gestion des processus de digestion et de codigestion  
Sous-titre : Recommandation  
Lieu : Glattbrugg  
Année : 2023

### Éditeur

Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute  
Association suisse des professionnels de la protection des eaux  
Associazione svizzera dei professionisti della protezione delle acque

### Photo de titre

milad.ch, Winterthur

### Conception graphique

VSA

### Impression

Appenzeller Druckerei AG, 9100 Herisau

### Disponible chez

VSA, Europastrasse 3, Case postale, CH-8152 Glattbrugg,  
téléphone 043 343 70 70, sekretariat@vsa.ch, www.vsa.ch

# SOMMAIRE

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>7</b>
1.1	Objectifs et utilisateurs	7
1.1.1	Limites	7
1.2	Conditions-cadres et bases	8
<b>2</b>	<b>Procédure d'évaluation et d'optimisation de l'exploitation</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>Évaluation de l'état actuel de la digestion et la codigestion</b>	<b>10</b>
3.1	Paramètres des processus	10
3.2	Concept de mesure et d'analyse	11
3.2.1	Grandeurs et méthodes de mesure	11
3.2.2	Procédure d'élaboration d'un concept de mesure	13
3.2.3	Assurance qualité	13
3.3	Méthode simple d'évaluation de l'état actuel	13
3.3.1	Évaluation et interprétation des données de mesure et d'analyse	14
3.3.2	Limites du modèle simple	21
3.4	Évaluation de l'état actuel à l'aide de l'outil Excel	21
<b>4</b>	<b>Conditions préalables à la codigestion</b>	<b>23</b>
4.1	Conditions générales	23
4.1.1	Bases en matière d'exploitation	23
4.1.2	Bases juridiques	23
4.1.3	Bases écologiques	24
4.1.4	Bases économiques	24
4.1.5	Bases en matière de biologie/technique des procédés	24
4.1.6	Expertise professionnelle	24
4.2	Méthode simple d'évaluation de l'extension de l'acceptation des cosubstrats	25
4.3	Logistique de la digestion avec codigestion	27
4.4	Expérience de l'exploitation	27
<b>5</b>	<b>Optimisations</b>	<b>28</b>
<b>6</b>	<b>Conclusions et perspectives</b>	<b>29</b>
6.1	Conclusions	29
6.1.1	Modèles et outils de paramètres	29
6.1.2	Discussions d'experts	29
6.1.3	Méthodes d'analyse de données et réseaux neuronaux	29
6.1.4	Optimisation des processus	32

6.1.5	Protection des eaux : mission de base de la station d'épuration	32
6.2	Perspectives	33
6.2.1	Paramètres HRT, SRT, RB et SB	33
6.2.2	Méthodes d'analyse de données et réseaux neuronaux	33
6.2.3	Modèles dynamiques (et statiques) basés sur des réseaux neuronaux et sur des modèles mécanistes	33
6.2.4	Adéquation à la pratique des outils	33
6.2.5	Réédition de la recommandation	34

## **7 Bibliographie 35**

A.1	Outil de calcul des paramètres et évaluation de l'inhibition (outils Excel) avec instructions	36
A.2	Tableaux et figures relatifs au concept de mesure et à la méthode simple d'évaluation des processus	36
Tableau 1 :	Grandeurs de mesure et d'analyse selon la Figure 3 avec les fréquences de mesure recommandées. Les grandeurs dérivées (calculées) sont également indiquées. ((VSA, 2020), modifiée)	36

# LISTE DES ABREVIATIONS

Acides org.	Acides organiques (dans le présent contexte : somme acide acétique + acide propionique + acide butyrique)
BMP	Potentiel biométhane : volume spécifique de méthane en $l_N/kg$ $MSO_{utilisée}$ , déterminé empiriquement en laboratoire dans des conditions standard définies, qui est produit lors de la biodégradation anaérobie (fermentation) d'une quantité définie de matière organique utilisée dans l'essai.
CAP	Composés aromatiques polycycliques
$CH_4$	Méthane
COV	Composés organiques volatils
DCO	Demande chimique en oxygène
Fe	Fer
FeIV	Fer IV
$H_2$	Hydrogène
$H_2O$	Eau
$H_2S$	Hydrogène sulfuré
$HS^-$	Ion hydrogénosulfure
HAc	Acide acétique
HRT	Temps de séjour hydraulique (hydraulic retention time)
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattheure
LCFA	Acides gras à longue chaîne (Long Chain Fatty Acids)
$l_N$	Litre normalisé : volume de gaz en l sous 1013 mbar et 273,15 K
MES	Matières en suspension
MF	Masse fraîche : masse d'une substance ou d'un substrat à l'état d'origine en kg. Elle contient en particulier la totalité de l'eau contenue dans l'échantillon.
MSO	Matière sèche organique
MS/RS	Matière sèche/Résidu sec
$NO_2$	Nitrite
$NO_3$	Nitrate
$NH_3$	Ammoniac
Ntot	Composés azotés totaux
OFDF	Office fédéral de la douane et de la sécurité des frontières
OFEN	Office fédéral de l'énergie
PAF	Perte au feu
Ptot	Composés phosphorés totaux
Q	Débit
RB	Charge organique du digesteur
RC	Résidu de calcination
SB	Charge organique de boues
SRT	Temps de séjour des solides (boues) (sludge retention time)
Stot	Composés sulfurés totaux
T	Température
$\dot{V}$	Débit volumique
% vol.	Volume en pourcentage
$Y_{biogaz}$	Production de biogaz, rapportée à la masse de substrat dégradé, en $l_N$ gaz sec/kg $MSO_{dégradée}$ (= rendement de biogaz = biogas yield)
$Y_{CH_4}$	Production de méthane, rapportée à la masse de substrat dégradé, en $l_N$ gaz méthane sec/kg $MSO_{dégradée}$ (= rendement de méthane = methane yield)

Version consultation



# 1 INTRODUCTION

La mission principale des STEP est la protection des eaux. Cependant, dans un environnement en constante évolution, les exploitants de STEP sont toujours confrontés à des questions d'optimisation économique et énergétique, dans lesquelles l'exploitation de la digestion et l'utilisation éventuelle de cosubstrats jouent un rôle essentiel.

La présente recommandation doit permettre d'évaluer l'état d'un digesteur ou d'une unité de méthanisation d'une station d'épuration communale et de mettre en évidence son potentiel d'optimisation. La recommandation a également pour but de traiter des questions en lien avec la codigestion : d'une part savoir si l'installation dispose de la capacité nécessaire pour une codigestion (supplémentaire), et d'autre part déterminer les conséquences possibles de l'acceptation de cosubstrats. Ces questions sont abordées sous l'angle de l'exploitation, de la biologie/technique des procédés, de la législation et de l'environnement.

L'état actuel et le degré d'optimisation d'une digestion dépendent fortement de l'installation concernée. Cela vaut également pour une éventuelle décision de codigestion ou d'acceptation de cosubstrats supplémentaires. Chaque situation individuelle peut présenter une très grande complexité et donc nécessiter des analyses très détaillées. Une méthode fiable pour évaluer un système aussi complexe consiste à recourir à des paramètres de processus. Dans un calcul statique, les données d'exploitation utilisées peuvent être converties en paramètres dont les valeurs permettent de déduire des indications sur l'état ainsi que des recommandations pour l'optimisation d'une digestion.

Il est par ailleurs recommandé d'élaborer un concept de mesure qui contribue à créer la base de données nécessaire à cet effet et qui fournisse les mesures permettant une exploitation sûre.

## 1.1 Objectifs et utilisateurs

- Exploitants de STEP (groupe cible principal)
- Planificateurs
- Offices / Autorités
- Entreprises d'élimination / Entreprises industrielles et artisanales

Les exploitants de STEP constituent le groupe cible principal de la présente recommandation. L'analyse du fonctionnement d'une installation de digestion et l'estimation des réserves sont des thèmes particulièrement pertinents pour l'exploitation d'une STEP. Cependant, ces étapes aident également à la planification stratégique ou au dimensionnement d'une installation de traitement des boues d'épuration. Les planificateurs ou les autorités peuvent également en tirer profit. L'évaluation générale d'une installation de méthanisation peut par ailleurs aider à analyser et à optimiser le fonctionnement d'autres digesteurs qui ne sont pas intégrés dans une station d'épuration, c'est pourquoi les entreprises d'élimination de l'industrie et de l'artisanat sont également concernées.

Le premier objectif de la présente recommandation est de présenter, par une approche en trois étapes, une possibilité d'analyser, améliorer et éventuellement étendre la digestion dans une STEP. Il s'agit d'abord de relever l'état actuel de la digestion ainsi que des autres parties de l'installation impliquées (p. ex. traitement du gaz ou étape d'épuration biologique) (chapitres 3.2, 3.3 et 3.4). Ce relevé permet ensuite d'estimer le potentiel d'amélioration. Enfin, s'il existe des capacités de réserve, on peut réfléchir à l'extension de la digestion avec des cosubstrats (chapitre 4.2). Il existe ainsi des installations qui produisent jusqu'à 45 % de leur gaz à partir de la codigestion.

L'autre objectif de la présente recommandation est de classifier les cosubstrats possibles et de fournir un aperçu des conséquences liées à leur utilisation (chapitres 4.3 et 4.4).

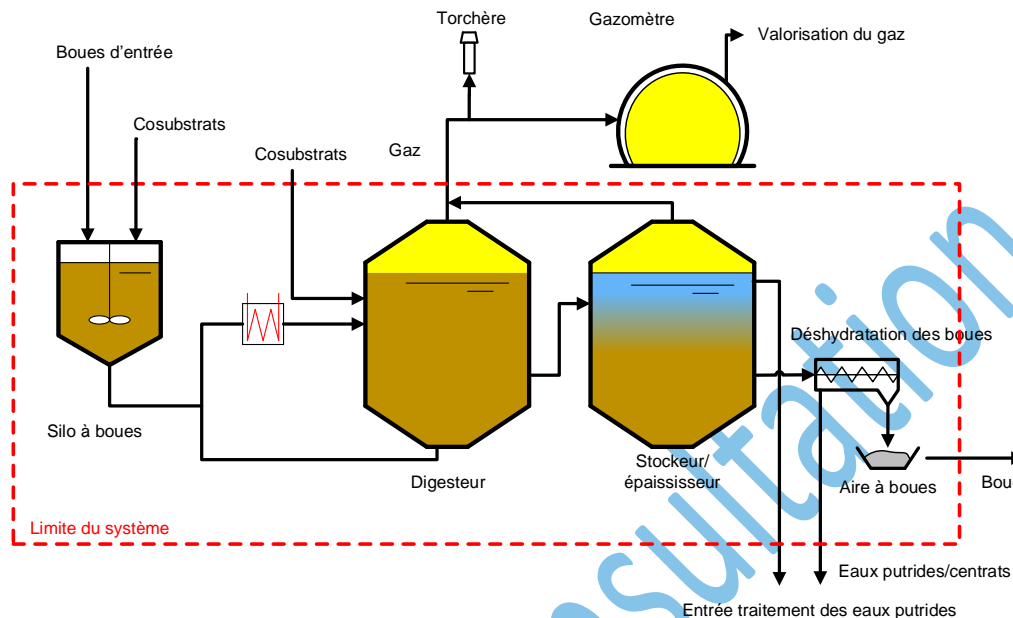
### 1.1.1 Limites

La présente recommandation est conçue comme une aide à la décision lors de l'exploitation des installations de digestion ou de méthanisation. Elle ne propose pas de régulation automatique de l'installation ; les interventions des exploitants restent ainsi nécessaires. La recommandation ne peut pas offrir d'aide pour les questions relatives à la dynamique de l'exploitation (variations journalières, régulations sur la base des valeurs mesurées). Elle est plutôt destinée à servir d'outil de réflexion générale et de planification stratégique de l'exploitation.

## 1.2 Conditions-cadres et bases

L'élaboration de la présente recommandation repose sur la compréhension d'une installation de digestion comme système. Celui-ci se compose des intrants (substrats et grandeurs perturbatrices), des grandeurs cibles et des produits de la digestion (voir Figure 1).

La recommandation porte sur le l'exploitation de la digestion, mais pas sur la valorisation du gaz. Pour les thèmes relatifs à la valorisation du gaz, on se reportera à la recommandation « Énergie dans les stations d'épuration » (VSA et OFEN, 2010).



**Figure 1 :**  
Limites du système :  
exemple d'une installation  
de digestion ou de  
codigestion simple

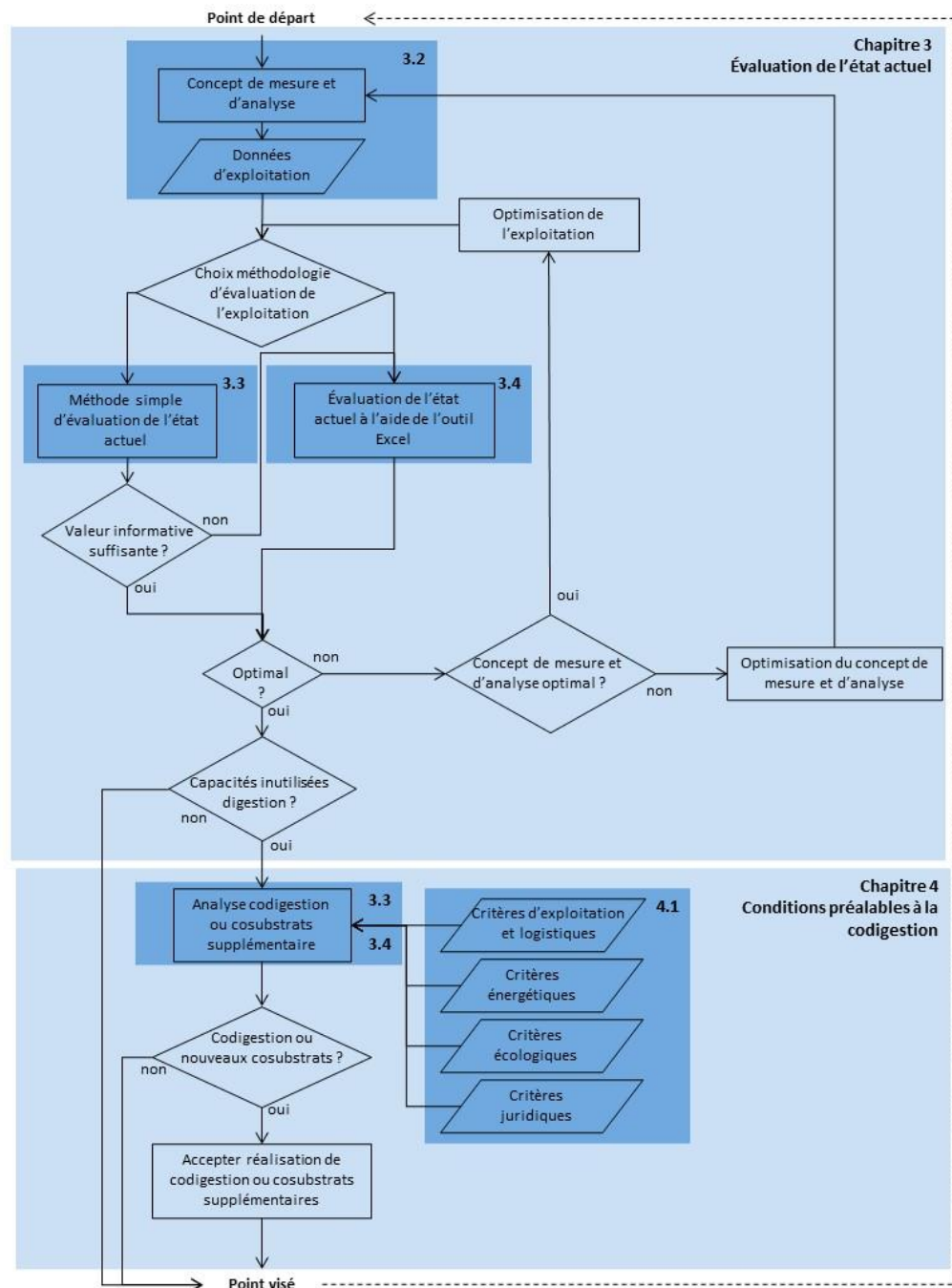


## 2 PROCEDURE D'ÉVALUATION ET D'OPTIMISATION DE L'EXPLOITATION

Les principales étapes de l'évaluation et l'optimisation de l'exploitation à l'aide de la présente recommandation sont les suivantes :

- Optimisation du concept de mesure et d'analyse
- Évaluation de l'état actuel
- Évaluation des capacités inutilisées
- Analyse relative à l'utilisation de la codigestion.

Le schéma suivant représente la procédure proposée pour l'évaluation et l'optimisation de l'exploitation. Les numéros de chapitre à l'intérieur du graphique renvoient aux chapitres suivants de la recommandation ainsi qu'à l'outil de calcul détaillé des paramètres (chapitre 3.4).



**Figure 2 :**  
Procédure d'évaluation et d'optimisation de l'exploitation d'une installation de digestion ou de codigestion

### 3 ÉVALUATION DE L'ÉTAT ACTUEL DE LA DIGESTION ET LA CODIGESTION

#### Pourquoi évaluer l'état d'une installation de digestion ?

L'évaluation de l'état actuel constitue la base de la conduite et de la surveillance des processus lors de l'exploitation de la digestion et la codigestion et permet d'identifier les optimisations possibles des processus. Le passage de la digestion pure à la codigestion ainsi que l'acceptation de nouveaux cosubstrats dans la codigestion existante constituent des cas particuliers d'optimisation. La conduite et la surveillance des processus ont but de maintenir la stabilité de l'exploitation de l'installation à un niveau de performance qui correspond au minimum à la capacité de dimensionnement de l'installation pour la charge de conception.

Il est important de bien faire la distinction entre l'évaluation des processus et l'évaluation de l'exploitation. L'évaluation des processus comprend l'évaluation des processus scientifiques de l'installation sur la base des données de mesure et d'analyse relevées dans le cadre du concept de mesure (chapitre 3.2). L'évaluation de l'exploitation comprend en plus des critères écologiques, logistiques, économiques, etc. L'objectif de l'évaluation des processus est la conduite optimale des processus de l'installation sous l'angle de la technique des procédés, tandis que l'objectif de l'évaluation de l'exploitation est la conduite optimale de l'ensemble de l'exploitation.

#### Quelles sont les possibilités d'évaluation d'une digestion ?

Il existe de nombreuses possibilités pour évaluer l'état des processus dans une installation. La recommandation « Énergie dans les stations d'épuration » (VSA et OFEN, 2010), chapitre 6, page 10, propose probablement l'évaluation la plus simple. En partant d'une production de boues fraîches de 35 kg RS par an et par équivalent-habitant (EH), la production de gaz d'épuration est estimée à 8 Nm<sup>3</sup> par an et par EH. Cette production peut être multipliée par le nombre d'EH d'une STEP afin d'obtenir une première estimation grossière des quantités de gaz d'épuration attendues.

La présente recommandation doit permettre une analyse plus approfondie. Il ne faut pas oublier par ailleurs, lors de l'évaluation de la digestion, que d'autres parties de l'installation, comme le traitement du gaz ou le traitement biologique, dépendent directement de la performance et de l'état de la digestion.

Les deux chapitres 3.3 et 3.4 ont pour objet de présenter à l'exploitant une approche possible (méthodologie, outil) pour l'évaluation des processus. Les deux approches reposent sur les mêmes bases de processus et peuvent être utilisées indépendamment l'une de l'autre. La complexité et la valeur informative augmentent fortement entre le premier et le deuxième outil.

#### 3.1 Paramètres des processus

Les paramètres des processus peuvent être soit mesurés, soit calculés. Ils prennent, en fonction du processus, des valeurs caractéristiques comparables, indépendamment de l'installation. Il s'agit soit de grandeurs primaires mesurées ou analysées liées à des produits intermédiaires dans le processus (par exemple la concentration d'hydrogène ou la concentration d'acides organiques dans le digesteur), soit de grandeurs calculées (dérivées) à partir des grandeurs mesurées ou analysées (Tableau 2 en annexe).

Les paramètres des processus constituent les éléments centraux des outils d'évaluation des processus proposés dans la présente recommandation (chapitres 3.3 et 3.4). Les paramètres suivants y sont utilisés:

- Production spécifique de méthane d'un substrat sous des conditions optimales (Q\_CH4-spéc-opt\_y)
- Production spécifique de méthane réelle totale (Q\_CH4-spéc)
- Charge organique du digesteur (RB)
- Dégradation des PAF ( $\rho$ )
- Temps de séjour hydraulique (HRT)
- Temps de séjour des solides (boues) (SRT)
- Concentration d'acide acétique du réacteur (HAc)
- Concentration de la somme acide acétique + acide propionique + acide butyrique du réacteur (acides org.)
- Concentration d'hydrogène du réacteur (H<sub>2</sub>)

La définition et le calcul des paramètres des processus sont donnés dans les Tableaux 1 et 2 en annexe. Dans la suite de ce document, le terme « paramètres » désigne les paramètres des processus.

### 3.2 Concept de mesure et d'analyse

L'évaluation des processus de digestion et de codigestion nécessite des données de mesure et d'analyse. Il s'agit en général d'une multitude de grandeurs et valeurs de mesure et d'analyse différentes, qui doivent en outre être relevées à différents endroits de l'installation (points de mesure) et à des fréquences diverses (résolution). C'est pourquoi l'exploitant doit élaborer un concept de mesure et d'analyse approprié, dans lequel doivent également être comprises différentes méthodes pour maintenir la qualité des données (assurance qualité, avec détection des erreurs de mesure et plausibilisation des données) ainsi que des méthodes de calcul de grandeurs dérivées, notamment les paramètres de la digestion ou de la codigestion (chapitre 3.3).

Le but du présent chapitre est de fournir les bases et les indications permettant d'élaborer (ou d'améliorer) et d'appliquer un tel concept de mesure et d'analyse pour une installation donnée. Il convient de noter que, par la suite, les termes « concept de mesure » et « données de mesure » englobent également les termes « concept d'analyse » et les « données d'analyse ».

La recommandation VSA (2020) décrit une méthodologie pour le relevé et l'évaluation des données de mesure et d'analyse dans des stations d'épuration communales de différentes tailles. Elle explique les raisons pour lesquelles les exploitants devraient suivre cette méthodologie et présente la procédure d'élaboration d'un concept de mesure et d'analyse correspondant. La motivation et la méthodologie pour maintenir la qualité des données (assurance qualité) y sont également traitées. L'évaluation comprend aussi le calcul des grandeurs dérivées, y compris les paramètres.

Pour la digestion et la codigestion, la présente recommandation se base sur les informations et les concepts de la recommandation VSA (2020). Les principaux éléments déterminants pour la digestion et la codigestion sont présentés ci-après. Ils sont en outre complétés par des adaptations et des extensions qui concernent spécifiquement la digestion et la codigestion.

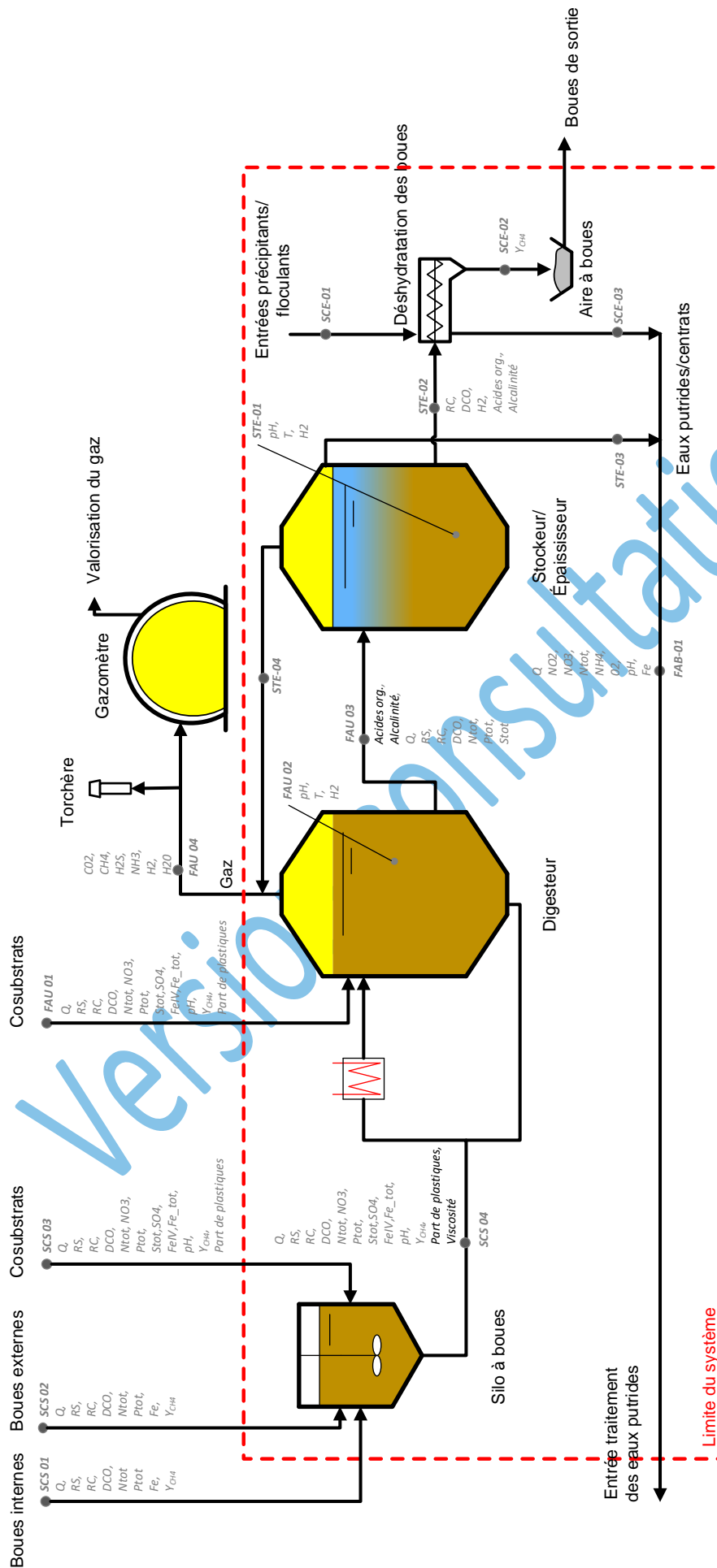
#### 3.2.1 Grandeurs et méthodes de mesure

La Figure 3 montre le diagramme d'écoulement de base d'une codigestion, avec indications des points de mesure et des points de prélèvement, ainsi que les grandeurs de mesure et d'analyse (« paramètres ») correspondantes. L'éventail des grandeurs de mesure et d'analyse représentées correspond à une collecte d'informations complète conforme à l'état de la technique pour les grandes installations. Les installations plus petites déterminent en général un nombre moins important de grandeurs. Le diagramme d'écoulement de base représente la configuration de base de la codigestion. Les grandes installations sont dotées de plusieurs réacteurs ou cuves montés en parallèle ou en série. Les installations avec digestion pure (sans codigestion) peuvent être représentées à l'aide du schéma d'écoulement de base en y supprimant les admissions de cosubstrats (silo à boues et digesteur) et les grandeurs de mesure et d'analyse associées aux cosubstrats.

Le Tableau 1 en annexe récapitule les grandeurs de mesure et d'analyse selon la Figure 3. La fréquence de mesure recommandée est indiquée pour chaque grandeur. Une liste des définitions et des méthodes de détermination des grandeurs de mesure et d'analyse figure à l'Annexe 1 de la recommandation VSA (2020).

Les grandeurs de mesure des domaines d'activité suivants ne sont pas prises en compte dans la présente recommandation :

- concepts de sécurité (alarmes de niveau, alarmes de gaz, détecteurs d'incendie, etc.)
- applications de données météorologiques
- données relatives aux machines (vitesses de rotation, couples, temps de fonctionnement, données thermiques, etc.)



**Figure 3 :** Diagramme d'écoulement de base de la codigestion avec contenu informatif étendu (VSA, 2020) adapté

#### Remarques sur les grandeurs de mesure et d'analyse (figure 3, tableau 1)

- Les valeurs des cosubstrats doivent en principe être déterminées pour chaque cosubstrat.
- Les valeurs des boues fraîches (respectivement la somme des valeurs des boues produites par la STEP) correspondent à la différence entre les valeurs du silo à boues et les valeurs des silos à boues externes ainsi que des cosubstrats.
- La grandeur  $H_2O$  dans le gaz peut être supprimée si le gaz de digestion est séché avec récupération du condensat dans le digesteur et le silo à boues.
- Les valeurs en sortie du stockeur/épaisseur servent à déterminer le taux de dégradation global de RS, MSO et DCO et à analyser la production de gaz dans le stockeur/épaisseur (le Fe est uniquement utilisé pour les campagnes de bilan de masse).
- BMP de l'aire à boues (paramètre) en raison de problèmes de stockage ultérieurs : activité des boues ou potentiel de gaz résiduel.
- Pour une analyse plus précise de la production de gaz dans le digesteur et dans le stockeur/épaisseur, les données relatives aux gaz devraient être relevées séparément pour les deux réacteurs (non indiqué dans la figure 3).
- Les installations dotées d'une configuration de réacteur selon la figure 3 ne permettent pas de faire la distinction entre SRT et HRT (annexes : tableau 1, tableau 2, tableau 3), c'est-à-dire que  $SRT = HRT$ . Si l'on vise  $SRT > HRT$ , il faut prévoir à la sortie une séparation boue-eau avec rétention ou recyclage des boues séparées dans le ou les réacteurs.

#### 3.2.2 Procédure d'élaboration d'un concept de mesure

Le diagramme d'écoulement de base représenté à la Figure 3, avec le Tableau 1 associé figurant en annexe, correspond à la codigestion ou à la digestion pure avec l'obtention du maximum d'informations et donc le maximum de possibilités d'évaluation, de surveillance et d'optimisation de l'exploitation. De nombreuses stations d'épuration suisses, surtout les plus anciennes et les plus petites, ne sont pas dotées de ce concept de mesure. Il y a plusieurs raisons à cela, souvent parfaitement justifiées. Pour adapter le concept de mesure présenté ci-dessus aux besoins spécifiques de la STEP étudiée, il est recommandé de procéder selon le chapitre 4.3 de la recommandation VSA (2020). Par rapport à la codigestion/digestion dans la recommandation VSA (2020) « STEP complexe », le concept de mesure du présent document comporte des extensions dans les domaines de l'analyse des cosubstrats, des points de dosage des cosubstrats et des grandeurs de contrôle des processus dans le digesteur et le stockeur/épaisseur.

Les données de mesure et d'analyse sont précieuses et leur obtention ainsi que leur assurance qualité requièrent des efforts importants, c'est pourquoi elles doivent être utilisées de manière optimale pour évaluer, surveiller et optimiser les processus de digestion et de codigestion. Il ne sert à rien de collecter des données de la meilleure façon possible si celles-ci ne sont pas évaluées ou réutilisées par la suite. Avant même d'établir un concept de mesure, l'exploitant doit définir clairement les objectifs de la collecte des données de mesure et d'analyse. C'est pourquoi le concept d'évaluation des données, traité au chapitre 3.3, est le facteur d'influence le plus important de l'ensemble du concept de mesure et d'analyse.

#### 3.2.3 Assurance qualité

L'assurance qualité des données de mesure et d'analyse est un élément central du concept de mesure. Les bilans de masse constituent à cet égard un outil d'assurance qualité essentiel. Ils permettent de détecter les erreurs dans les mesures online et inline ainsi que dans les analyses de laboratoire. Le chapitre 5 de la recommandation VSA (2020) fournit un aperçu complet de l'assurance qualité à l'aide de bilans de masse et d'autres méthodes. Il comporte des exemples de bilans de masse pour le phosphore, le Fe, la DCO et les PAF. Une partie de ces exemples traite explicitement de la digestion. La partie qui se réfère à l'ensemble de la STEP peut être appliquée par analogie à la digestion.

### 3.3 Méthode simple d'évaluation de l'état actuel

#### Comment obtenir facilement une vue d'ensemble des processus ?

Sur la base des grandeurs de mesure et d'analyse du concept de mesure (chapitre 3.2), ce chapitre présente une méthode simple d'évaluation des processus (évaluation de l'état actuel) de la digestion et de la codigestion. L'outil décrit au chapitre 3.4 permet une évaluation plus approfondie ou plus détaillée. Les deux approches reposent sur les mêmes bases de processus (modèle).

### 3.3.1 Évaluation et interprétation des données de mesure et d'analyse

Le concept d'évaluation des données comprend la procédure d'évaluation des données pour l'analyse, la surveillance et l'optimisation des processus de digestion et de codigestion. La recommandation de procédure pour la méthodologie simple repose sur les tableaux 1, 2 et 3 en annexe et est présentée ci-après à l'aide de six diagrammes de déroulement reliés entre eux (figures x-y). La recommandation de procédure est construite de manière à ce qu'une mesure soit prise à chaque étape (en cas de besoin). Après une étape (position « Fin »), l'étape suivante est lancée (position « Début »). Un cycle continu d'évaluation et d'optimisation des processus est ainsi mis en place.

La procédure fait la distinction entre la détermination de grandeurs dérivées par calcul et l'interprétation des données :

- Avec le calcul d'autres grandeurs dérivées (p. ex. les charges), le **calcul** des paramètres des processus (chapitre 3.1) fait partie des premières étapes de l'évaluation des données de mesure et d'analyse. Les Tableaux 1 et 2 en annexe contiennent un récapitulatif des principales grandeurs dérivées (calculées) utilisées pour interpréter les résultats des mesures et des analyses de la digestion et de la codigestion. Une partie de ces grandeurs sont des paramètres (signalés en rouge).
- Pour l'**interprétation** des données, des connaissances sur les processus biologiques de la fermentation, etc. (connaissances préalables découlant de l'expérience pratique, connaissances d'experts, résultats de recherche) sont toujours nécessaires. Le Tableau 3 en annexe présente un récapitulatif d'indications et de conclusions relatives aux données de mesure et d'analyse ainsi qu'aux données dérivées (p. ex. les paramètres). La compilation n'est pas exhaustive et se limite aux éléments qui concernent les processus de fermentation. Le tableau correspond en fait à une forme de modèle de processus simple, majoritairement qualitatif, qui repose sur les connaissances des processus. Un schéma du processus de digestion anaérobie et du métabolisme du soufre (Figure en annexe) permet d'illustrer les grandeurs et les indications du Tableau 3. Le schéma représente les sous-processus de la digestion (hydrolyse, acidogenèse, acétogenèse, méthanogenèse).

Aucune feuille de calcul n'est fournie pour la méthode simple pour les raisons suivantes :

- L'outil Excel (chapitre 3.4) contient de toute façon ces calculs et va même au-delà.
- Le cas échéant, au moins une partie des calculs est déjà implémentée dans le système de gestion de l'installation, de sorte qu'il est possible de recourir directement aux résultats des calculs correspondants.
- Les calculs indiqués dans la recommandation de procédure et dans le Tableau 2 en annexe peuvent facilement être effectués (séparément) ou une feuille de calcul peut facilement être créée à cet effet





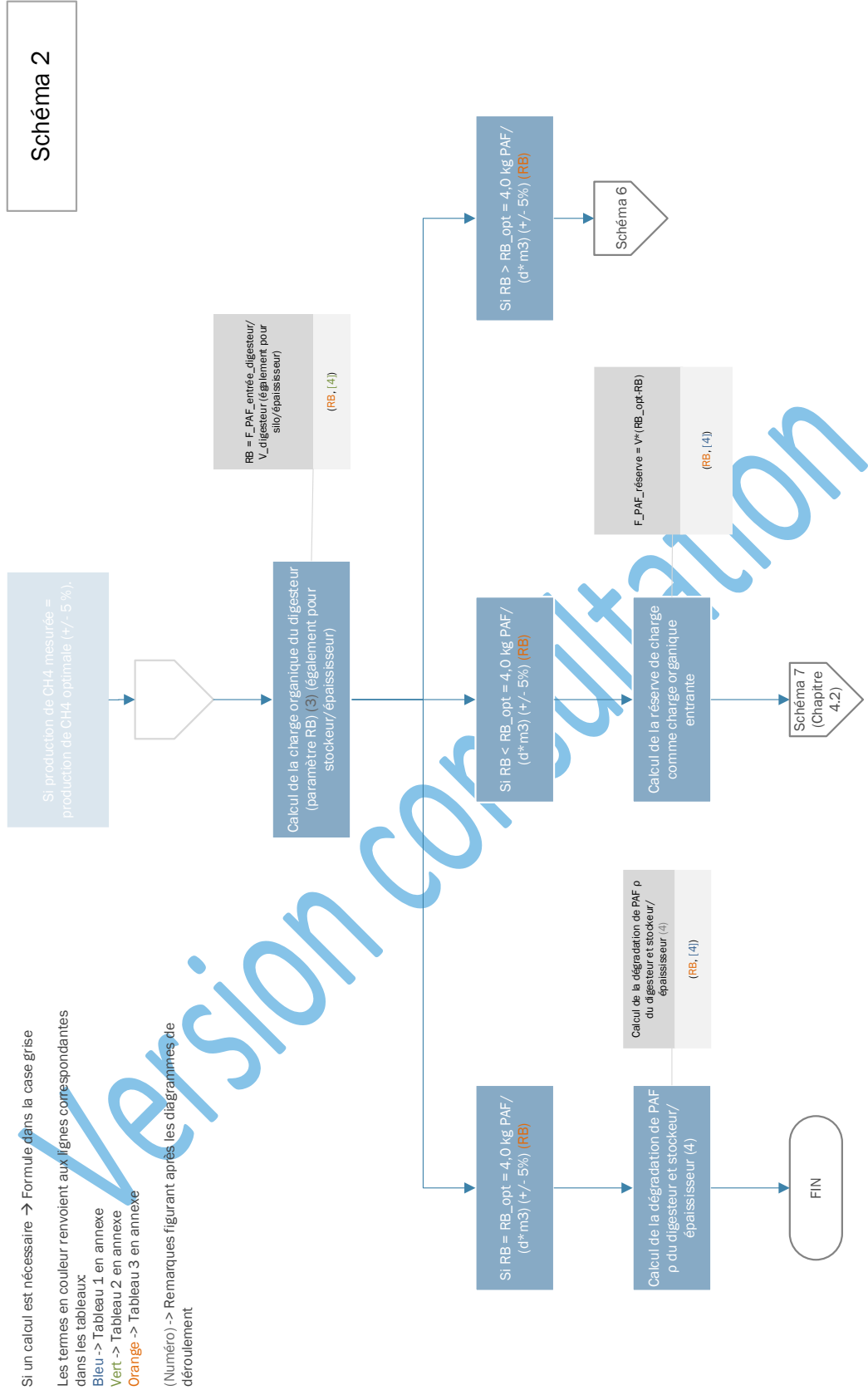
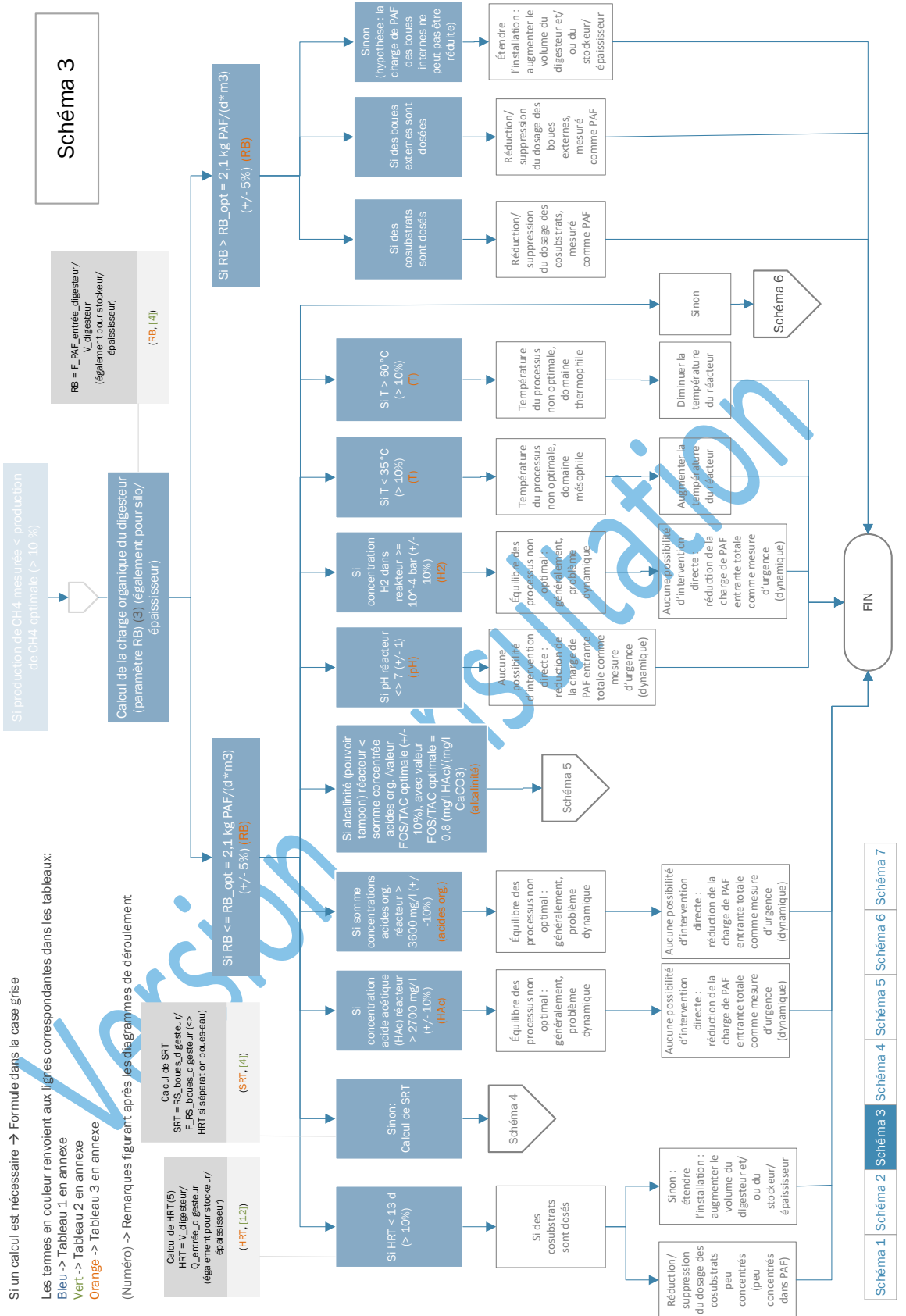


Schéma 1	Schéma 2	Schéma 3	Schéma 4	Schéma 5	Schéma 6	Schéma 7
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------



Si un calcul est nécessaire → Formule dans la case grise

Les termes en couleur renvoient aux lignes correspondantes dans les tableaux:

Bleu → Tableau 1 en annexe

Vert → Tableau 2 en annexe

Orange → Tableau 3 en annexe

(Numéro) → Remarques figurant après les diagrammes de déroulement

## Schéma 4

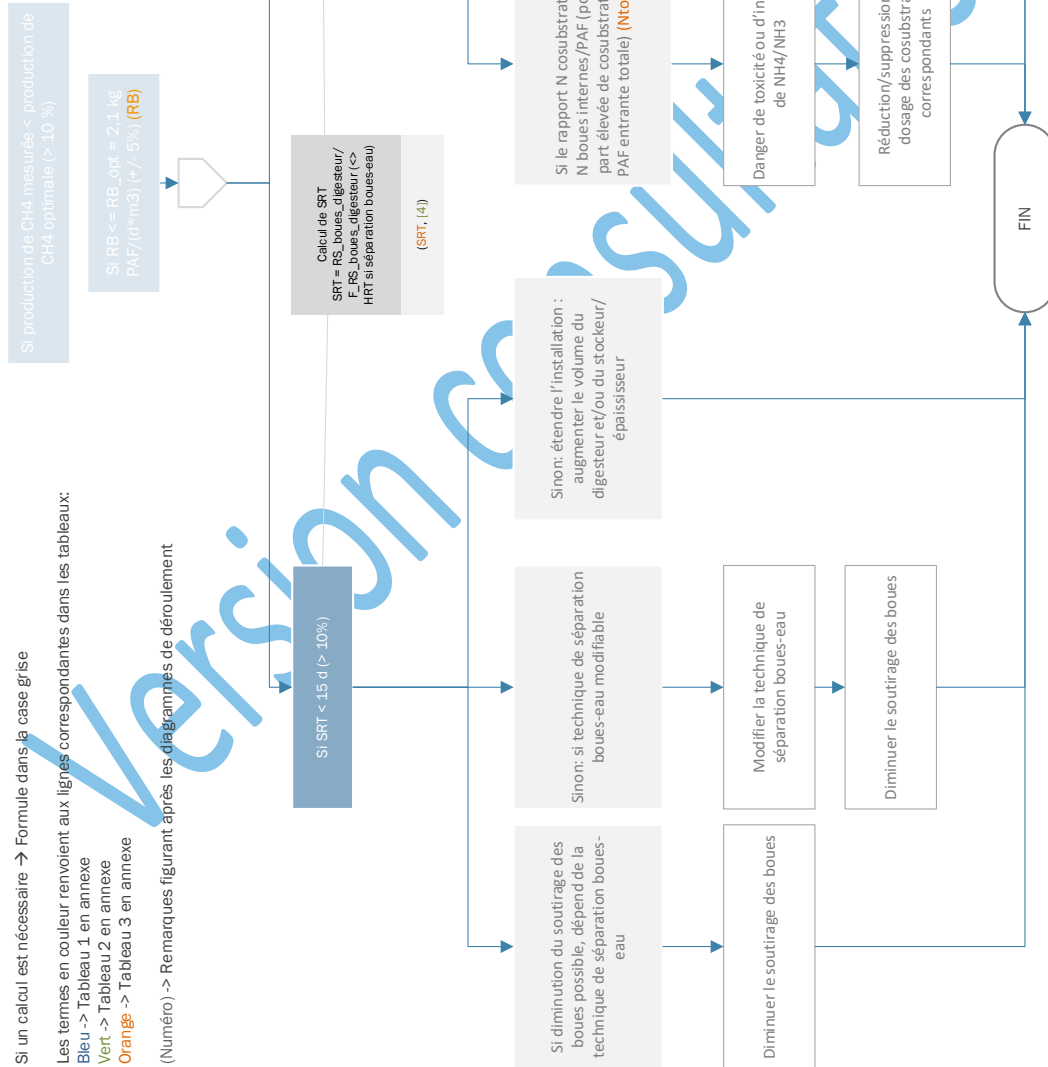


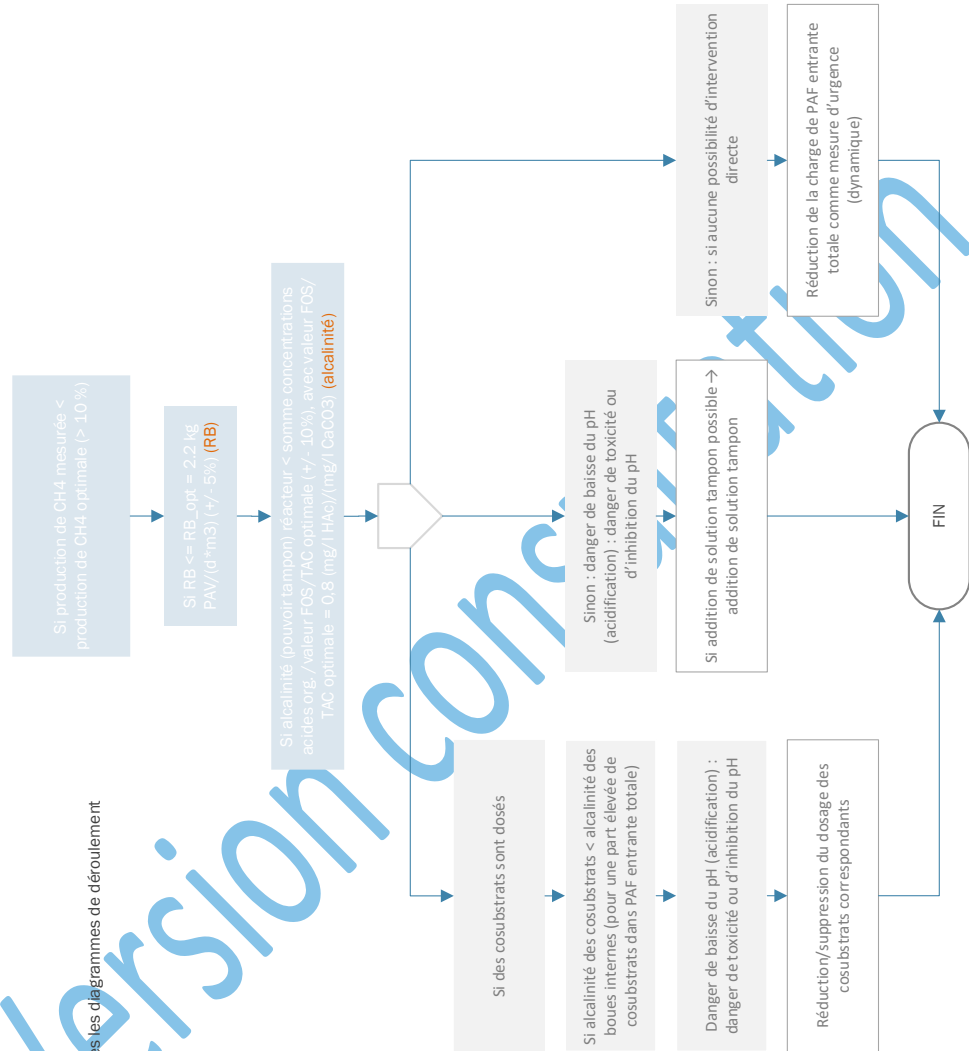
Schéma 1	Schéma 2	Schéma 3	Schéma 4	Schéma 5	Schéma 6	Schéma 7
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Si un calcul est nécessaire → Formule dans la case grise

Les termes en couleur renvoient aux lignes correspondantes dans les tableaux:  
 Bleu → Tableau 1 en annexe  
 Vert → Tableau 2 en annexe  
 Orange → Tableau 3 en annexe

(Numéro) → Remarques figurant après les diagrammes de déroulement

## Schéma 5



Si un calcul est nécessaire → Formule dans la case grise

Les termes en couleur renvoient aux lignes correspondantes dans les tableaux:  
Bleu → Tableau 1 en annexe  
Vert → Tableau 2 en annexe  
Orange → Tableau 3 en annexe

(Numéro) → Remarques figurant après les diagrammes de déroulement

Schéma 6

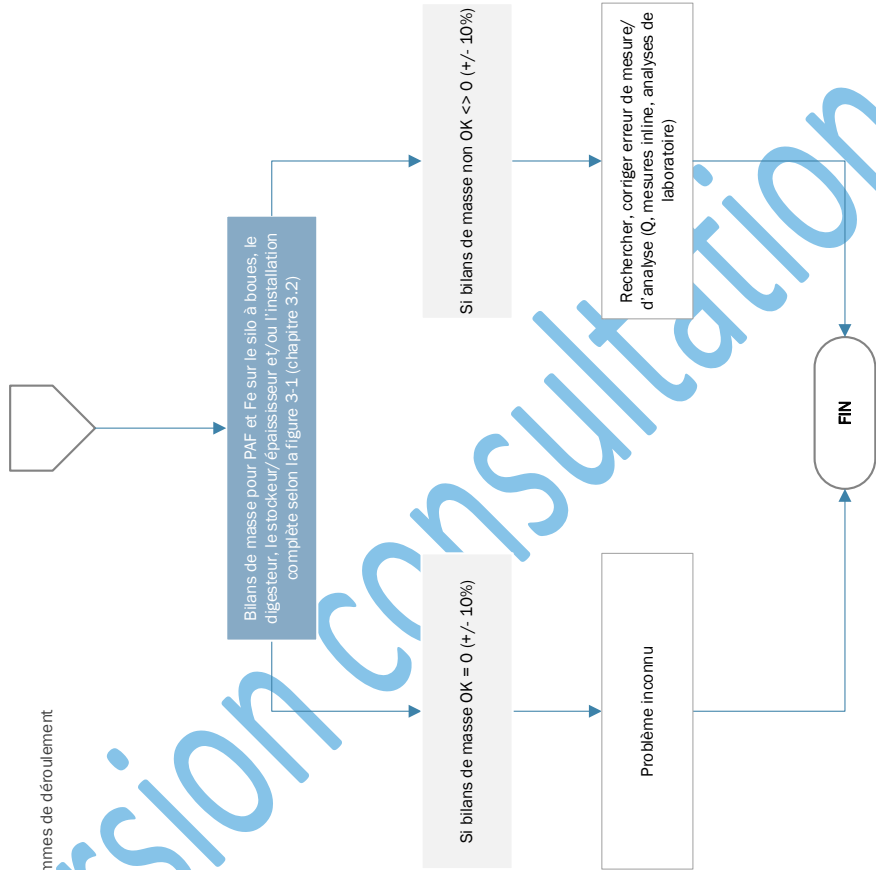


Schéma 1	Schéma 2	Schéma 3	Schéma 4	Schéma 5	Schéma 6	Schéma 7
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Remarques :

- 1) Justification : examen stationnaire, modèle stationnaire : le temps d'adaptation le plus long en cas de modification des grandeurs d'entrée est déterminé par l'hydraulique du réacteur à agitation de la digestion/codigestion (digesteur et stockeur/épaisseur), en dehors des modifications à long terme de la composition de la population biologique. L'hydraulique du réacteur a pour effet que les grandeurs ou leurs valeurs numériques sont à l'état stationnaire (équilibre) au bout d'environ  $3 \cdot \text{HRT}$ . C'est pourquoi il faut utiliser des valeurs moyennes sur  $3 \cdot \text{HRT}$  (pas de résolution plus élevée), sinon les erreurs sont trop importantes. Remplacer les valeurs de mesure manquantes par des valeurs interpolées linéairement ! Une feuille Excel ou un programme est nécessaire pour le calcul.
- 2) Pour les boues internes et externes, utiliser en règle générale directement la valeur empirique des digestions optimales de  $360 - 400 \text{ l}_N \text{ CH}_4/\text{kg PAF}$  au lieu de  $\text{BMP}_Y \cdot \eta_Y$ .
- 3) Rediscuter éventuellement de RB et SB, valeur maximale pour RB incertaine (RB, SB et chapitre 6.2).
- 4) Les calculs indiqués ici peuvent bien entendu également être effectués pour des états de processus non optimaux (qui ne figurent pas dans la recommandation de procédure), par exemple pour déterminer les écarts par rapport à la dégradation optimale ou à la productivité optimale.
- 5) La nécessité d'une valeur minimale pour HRT n'est pas certaine (HRT et chapitre 6.2).
- 6) En général : l'ordre chronologique de réalisation/mise en œuvre (éventuelle) des mesures recommandées ne doit pas correspondre obligatoirement à l'ordre de la recommandation de procédure présentée ici. La réalisation pratique ou son ordre chronologique doit plutôt tenir compte d'autres critères, tels que la faisabilité, les dépenses, les conditions-cadres de planification, etc.

### 3.3.2 Limites du modèle simple

Le modèle simple est majoritairement qualitatif. Cependant, certaines valeurs numériques sont données et certains calculs sont possibles avec les tableaux correspondants. Si, par exemple, la valeur déterminée pour un paramètre de l'installation n'est pas optimale, il est possible de calculer à l'aide du modèle dans quelle mesure il faudrait modifier certaines grandeurs d'origine pour ramener la valeur caractéristique dans la plage optimale.

Cette approche permet également d'obtenir des résultats quantitatifs, même si ceux-ci sont très limités. Par exemple, si le résultat obtenu est « Réduction du dosage des cosubstrats », le dosage des cosubstrats peut être réduit de 10% (dans un premier temps par calcul uniquement et non de manière concrète sur l'installation). Il est possible ensuite de répéter la procédure avec cette modification et d'évaluer (à nouveau) l'installation ou la conduite des processus. Cela reste toutefois très limité, car les données de mesure qui montreraient la réponse de l'installation à la mesure prise font défaut (et ne peuvent pas non plus être simulées). Avec certaines hypothèses sur les données manquantes, la procédure correspond néanmoins à une forme simple de simulation de processus (analyse d'impact, analyse de scénarios, ...). En plusieurs itérations (à chaque fois après adaptation du dosage des cosubstrats), on peut ainsi déterminer très grossièrement le dosage de cosubstrat conduisant à un état optimal du processus. Cela correspond à une indication quantitative. Cette procédure est en principe possible pour toutes les mesures recommandées.

Pour obtenir de véritables indications quantitatives, les possibilités sont les suivantes :

- Réutilisation des indications (qualitatives) du modèle simple dans l'outil Excel décrit au chapitre 3.4.
- Utilisation des indications du modèle simple dans un autre modèle numérique (quantitatif).
- Utilisation des indications du modèle simple par l'exploitant directement sur l'installation et suivi des modifications d'exploitation (surveillance normale de l'exploitation, contrôle d'efficacité). Le résultat est ensuite à nouveau évalué à l'aide du modèle simple, etc. (cycle d'amélioration/optimisation).

### 3.4 Évaluation de l'état actuel à l'aide de l'outil Excel

#### Comment réaliser une évaluation stationnaire approfondie des processus de fermentation ?

Le modèle simple du chapitre précédent n'est pas suffisant si, en plus des indications qualitatives et quantitatives simples, des indications quantitatives plus étendues sur les processus sont nécessaires. C'est pourquoi un outil Excel a été élaboré afin d'analyser et d'évaluer les processus de fermentation à l'état stationnaire. Cette analyse permet également d'avoir un aperçu de l'adaptation des processus dans des conditions modifiées et est donc en mesure de fournir facilement une modélisation quantitative, alors que le modèle simple décrit avant tout l'état actuel. Les grandeurs de mesure et d'analyse (chapitres 3.1 et 3.2) constituent à nouveau la base de cette approche.

L'outil comporte deux parties, qui sont jointes à la recommandation :

- Outil des paramètres proprement dit
- Outil d'évaluation de l'inhibition

Les Tableaux 1, 2 et 3 en annexe ainsi que la recommandation de procédure du chapitre 3.3 sont également pensés comme une introduction à l'outil Excel d'évaluation, de surveillance et d'optimisation de la digestion et de la codigestion (chapitre 3.4).

Par rapport à l'outil simple, les principales extensions de l'outil des paramètres détaillé et de l'évaluation de l'inhibition sont les suivantes :

- base de données intégrée des potentiels de formation du méthane (potentiels biométhane BMP) d'un grand nombre de substrats, avec accès direct à ces données ;
- prise en compte de différentes configurations de réacteurs de digestion et de codigestion (montages en parallèle et en série) ;
- calcul des données énergétiques à partir des données de gaz ;
- évaluation semi-quantitative de l'inhibition (plages de valeurs critiques, etc. pour les substances inhibitrices/toxiques) ;
- implémentation interactive sous Excel.

Version consultation



## 4 CONDITIONS PREALABLES A LA CODIGESTION

Les bases suivantes ont été utilisées pour la rédaction de ce chapitre :

- Discussions d'experts entre des chefs d'exploitation de STEP et le groupe de suivi de la présente recommandation ;
- Outil de travail pour l'acceptation de cosubstrats (Fasel A. et Schiller A., 2019)
- Valeurs empiriques d'autres installations de digestion (expérience ZHAW).

### 4.1 Conditions générales

#### Quelles sont les conditions préalables à une codigestion ?

De manière générale, on peut dire que seules de grandes installations devraient envisager une codigestion, car elle nécessite des dépenses minimales, indépendantes de la taille de l'installation, auxquelles les petites installations ne peuvent faire face, du moins pas sans une aide extérieure.

Il est indiscutable que toute réflexion sur la codigestion ne doit jamais mettre en péril l'activité centrale d'une STEP, à savoir la protection des eaux (et donc l'épuration des eaux usées). Ce principe est absolument fondamental et prime sur toutes les considérations suivantes.

#### 4.1.1 Bases en matière d'exploitation

En matière d'exploitation, la condition déterminante pour l'acceptation de cosubstrats est l'existence d'une surcapacité de la digestion (réserves de charge). Une surcharge hydraulique est plutôt improbable avec les cosubstrats (petites quantités). En outre, le stockage, le traitement et, le cas échéant, l'injection ou la valorisation du biogaz doivent pouvoir absorber un accroissement de la production de gaz. Enfin, en cas d'acceptation de cosubstrats, leur préparation, leur stockage et leur dosage ultérieur ne doivent pas être sous-estimés. Ils doivent d'abord être amenés à un état pompable, débarrassés de leurs impuretés et, par exemple, chauffés s'il s'agit de substrats gras. Les mauvaises odeurs excessives, l'inflammabilité et l'explosivité doivent également être prises en compte dans l'évaluation.

#### 4.1.2 Bases juridiques

Les bases juridiques pour l'acceptation et l'élimination (méthanisation) de cosubstrats varient d'un substrat à l'autre, mais aussi d'un canton à l'autre. En principe, les entreprises doivent demander une autorisation à la Confédération et au canton. Cette autorisation d'exploiter, soumise au contrôle de l'office cantonal compétent (par exemple le Service de l'environnement), contient une liste des déchets autorisés et est limitée dans le temps (habituellement entre 5 et 10 ans). Le travail requis pour obtenir cette autorisation ne doit pas être sous-estimé.

Les points suivants sont également importants d'un point de vue juridique :

- Sous-produits animaux : l'élimination des sous-produits animaux est soumise à autorisation et contrôlée par le service vétérinaire cantonal.
- Cosubstrats alcooliques : pour que des substrats alcooliques ne soient pas soumis à la loi sur l'alcool, ils doivent soit provenir de l'industrie ou de l'artisanat en tant que déchets d'alcool, soit être dénaturés dans le cas contraire.
- L'utilisation de substrats alcooliques s'accompagne d'une autorisation pour la procédure d'engagement formel de l'Office fédéral de la douane et de la sécurité des frontières (OFDF). Celle-ci exige que les composés organiques volatils (COV) ne s'échappent pas dans l'atmosphère et oblige l'exploitant à établir et présenter un bilan de COV annuel.
- Si le biogaz traité est injecté dans le réseau de gaz naturel, une nouvelle demande d'exonération de l'impôt sur les huiles minérales doit être déposée du fait de la valorisation supplémentaire de cosubstrats. De plus, les cosubstrats doivent figurer sur une liste positive de l'OFDF et être ainsi considérés comme des déchets ou résidus de production biogènes.

Cette liste n'est sûrement pas complète, mais elle contient les points les plus importants.

#### **4.1.3 Bases écologiques**

Pour décider de l'acceptation d'un cosubstrat, il est pertinent de prendre également en compte les aspects écologiques. Ceux-ci ne sont généralement pas consignés et ne peuvent donc pas être consultés. Une certaine compétence technique et une sensibilité aux spécificités locales sont donc nécessaires.

Les considérations suivantes doivent être prises en compte :

- biodégradabilité des recirculations issues de la codigestion dans la filière de traitement des eaux usées de la STEP ;
- aspects écotoxicologiques des composants non dégradés dans les eaux ;
- si un déchet disponible peut sans problème être utilisé directement comme engrais liquide dans l'agriculture, il ne devrait pas être digéré dans une STEP.

#### **4.1.4 Bases économiques**

La rentabilité n'est pas toujours incompatible avec l'écologie. Il est essentiel pour l'exploitant de STEP que le recours aux cosubstrats soit rentable, ou du moins qu'il n'ait pas à la fin une incidence financière négative. Les recettes générées par le surplus de biogaz doivent impérativement être comparées aux coûts supplémentaires engendrés.

Les principaux coûts supplémentaires sont les suivants :

- éventuellement, achat de cosubstrats ;
- transport des cosubstrats ;
- coûts d'investissement pour la préparation des cosubstrats ;
- coûts énergétiques pour le chauffage du cosubstrat ;
- coûts de personnel supplémentaires ;
- coûts supplémentaires d'élimination des boues ;
- traitement supplémentaire des eaux troubles.

Pour améliorer la rentabilité des cosubstrats, il est recommandé d'avoir une DCO élevée ou une teneur élevée en matière grasse (de préférence végétale). Il est également préférable d'utiliser des substrats exempts d'impuretés. D'un point de vue économique, il faut donc faire la distinction entre les cosubstrats liquides et donc pompables et tous les autres cosubstrats dont la préparation est plus complexe. Comme la rentabilité d'un cosubstrat est largement influencée par le rendement de méthane ou de gaz, celui-ci doit être évalué le mieux possible. Les méthodes et outils décrits aux chapitres 3.3, 3.4 et 4.2 peuvent être utilisés à cet effet. Si les rendements spécifiques de méthane ou de gaz de cosubstrats ou de composés entrants quelconques font défaut, ils peuvent être déterminés à l'aide d'essais standardisés en laboratoire (p. ex. VDI 4630). Il s'agit d'un moyen judicieux de gagner en sécurité lors de la prise de décision concernant l'acceptation de cosubstrats.

#### **4.1.5 Bases en matière de biologie/technique des procédés**

Une extension de la digestion par des cosubstrats entraîne une modification de la composition et de la quantité des eaux putrides, qui, à son tour, a une incidence sur le traitement biologique de la STEP. Celui-ci ne doit être ni surchargé ni trop perturbé dans son fonctionnement (dégradation de la floculation et donc moins bonne déshydratation, etc.), c'est pourquoi il est recommandé de respecter une faible teneur en azote. Celle-ci est particulièrement élevée dans les substrats riches en protéines. De manière générale, il faut tenir compte de la biodégradabilité des recirculations de la codigestion dans la filière de traitement des eaux de la STEP ainsi que d'une éventuelle inhibition du traitement biologique par les recirculations.

Afin de prévenir d'éventuelles inhibitions du processus, il convient d'éviter les composés organiques nocifs tels que les composés aromatiques polycycliques (CAP), le toluène, le benzène, les solvants, les composés organiques d'étain, les mercaptans et la suie.

#### **4.1.6 Expertise professionnelle**

La mise en place d'une codigestion implique une motivation à acquérir une meilleure compréhension et à faire face aux problèmes qui ne manqueront pas de se poser. En outre, il convient de réfléchir à l'extension du concept de mesure (chapitre 3.2).

## **4.2 Méthode simple d'évaluation de l'extension de l'acceptation des cosubstrats**

### **Comment exploiter pleinement les réserves de capacité de la digestion et de la codigestion avec des cosubstrats ?**

Après la méthode simple d'évaluation de l'état actuel des processus abordée au chapitre 3.3, il s'agit ici d'élargir la méthode. Le but est d'évaluer les possibilités d'exploiter les réserves de capacité existantes de la digestion et de la codigestion par l'utilisation de nouveaux cosubstrats ou l'augmentation de l'utilisation des cosubstrats dans l'installation. Il s'agit d'utiliser pleinement le volume disponible du digesteur pour produire le maximum de méthane possible.

Version consultation



### 4.3 Logistique de la digestion avec codigestion

#### Quelles sont les exigences logistiques imposées à l'exploitation par une codigestion ?

Il n'est pas prévu que la présente recommandation couvre une mise en œuvre de la codigestion qui inclue l'étude de projet, l'équipement mécanique et les étapes de procédé supplémentaires. Ce chapitre donne quelques indications d'exploitation à prendre en compte pour la planification d'une codigestion.

Comme indiqué au chapitre 4.1 pour les conditions d'exploitation, les caractéristiques suivantes des cosubstrats déterminent la logistique de la codigestion. Les mesures requises sont indiquées pour chacune d'elle :

- **Mauvaises odeurs** : un espace fermé destiné à la réception (sas pour camions) évite les nuisances olfactives dans l'environnement.
- **Dosabilité** : il est parfois nécessaire ou judicieux de stocker un cosubstrat ou de le doser pendant une période prolongée. Cela est possible grâce à des cuves de stockage et des pompes d'alimentation adéquates. Il convient cependant de vérifier au préalable la stockabilité d'un cosubstrat.
- **Pompabilité** : les cosubstrats gras ou congelés doivent pouvoir être chauffés. Les autres substrats doivent d'abord être concassés dans un broyeur et mis en suspension pour former une bouillie.
- **Impuretés** : la bonne pompabilité peut être garantie par l'utilisation combinée d'un broyeur-séparateur à marteaux et d'un tamis à boues.
- **Dépôts dans le digesteur** : malgré d'importantes mesures, les dépôts dans le digesteur entraîneront au fil du temps une réduction de sa capacité. Il convient donc de prévoir de le vidanger et le nettoyer régulièrement dans le cadre de l'exploitation

### 4.4 Expérience de l'exploitation

#### Quel est le niveau d'expérience requis pour une codigestion ?

Pour toute installation, l'expérience en matière d'exploitation est extrêmement importante, quel que soit le processus. Le but de la présente recommandation et ses annexes n'est pas d'entrer en concurrence avec l'expérience de l'exploitation, mais de la renforcer.

De nombreux responsables d'exploitation d'installations de digestion de STEP savent d'instinct très bien conduire leur installation et leur processus. Néanmoins, certaines installations déploient beaucoup d'efforts pour optimiser et maintenir la production de gaz d'épuration sur leur site à un niveau constant. D'autres installations, qui ne disposent ni des moyens ni du temps requis, doivent pouvoir en bénéficier.

En plus des calculs et des autres critères de la codigestion déjà mentionnés, de nombreux autres facteurs (qui ne peuvent pas être abordés ici) ainsi que l'intuition jouent un rôle essentiel dans la prise de décision en faveur ou en défaveur de l'introduction ou l'extension de la codigestion. Quoi qu'il en soit, l'optimisation des processus requiert un niveau élevé de compétence technique et d'expérience de l'exploitation. Sans cela, elle devrait être mise en œuvre avec précaution, même avec la présente recommandation.

## 5 OPTIMISATIONS

Les mesures d'optimisation des processus permettent d'améliorer les performances d'une installation. Dans le cas des installations de digestion et de codigestion, cela se traduirait par exemple par une augmentation de la production de gaz pour un volume de digesteur inchangé. Cependant, ces mesures comprennent aussi l'amélioration des propriétés des boues digérées, telles que la déshydratabilité ou le rendement de dégradation de certaines substances.

Les mesures d'optimisation permettent d'améliorer l'installation non seulement sur le plan de l'exploitation, mais aussi sur les plans financier, écologique et logistique.

Du point de vue financier, il peut s'agir de mesures visant à réduire les coûts du transport ou de l'énergie. Sur le plan écologique, outre la réduction de l'énergie nécessaire au chauffage du digesteur ou au pompage des boues, cela pourrait être l'optimisation du bilan global de l'impact environnemental (par exemple en examinant si une codigestion, avec le transport des cosubstrats et le rendement de dégradation supplémentaire du traitement biologique, est pertinente ou non en termes d'émissions de CO<sub>2</sub>). Les mesures d'optimisation logistique regroupent des réflexions sur les processus de transport et de stockage qui entraînent des dépenses d'exploitation et des mesures de construction.

Les optimisations des processus sont traitées au chapitre 3, en particulier au chapitre 3.4.

Les optimisations de l'exploitation sont abordées au chapitre 4, en particulier en lien avec la codigestion. Bien entendu, des optimisations d'exploitation sont également possibles pour les digesteurs sans codigestion. Elles découlent souvent des mesures d'optimisation des processus (un meilleur rendement de gaz permettra par exemple d'optimiser le bilan énergétique et de réduire les coûts). Comme il a été dit au chapitre 4.4, les optimisations de l'exploitation sur la base de la présente recommandation devraient être mises en œuvre avec précaution et en collaboration avec les spécialistes correspondants.

## 6 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

### 6.1 Conclusions

La question à la base de la présente recommandation a été traitée dans le cadre du projet à l'aide des méthodes suivantes :

- données bibliographiques, notamment les paramètres (chapitres 3.1, 3.2), les connaissances techniques, modèles de paramètres (chapitres 3.3, 3.4)
- discussions d'experts (chapitres 4.1, 4.3, 4.4)
- méthodes d'analyse de données, réseaux neuronaux
- modèles mécanistes (étude des méthodes exclusivement, idées de structures de modèles)

Si les deux premières approches méthodologiques sont bien établies dans la discipline (« état de la technique »), les deux dernières relèvent encore largement du domaine de la recherche et du développement. En conséquence, les deux premières approches, et plus particulièrement la première, se sont révélées pertinentes au cours du projet et la recommandation repose sur leurs résultats. Les deux dernières approches sont prometteuses pour répondre à la problématique du projet. Cependant, les efforts de développement nécessaires à cet effet n'auraient pas permis d'obtenir de résultats concrets dans le cadre de l'étendue possible du projet. Les modèles mécanistes ont été uniquement étudiés en tant qu'outils possibles pour répondre à la question du projet, sans être utilisés (leur utilisation n'était pas non plus exigée dans le cadre du mandat du projet). Des méthodes d'analyse de données et des réseaux neuronaux (machine learning) ont été utilisés et ont fourni des résultats prometteurs. Deux exemples marquants sont présentés sous « Méthodes d'analyse de données et réseaux neuronaux » (voir ci-dessous).

#### 6.1.1 Modèles et outils de paramètres

Les deux outils de calcul des paramètres décrits aux chapitres 3.3 et 3.4 sont au « cœur » de la recommandation. L'outil le plus simple correspond à une simple recommandation de procédure d'évaluation et d'optimisation des processus. Il est destiné en premier lieu aux exploitants d'installations de digestion et de codigestion. Il fournit principalement des indications qualitatives. L'outil ne contient pas de programmes prêts à l'emploi ou d'autres modules d'application. L'outil plus complet, dont les objectifs de principe sont les mêmes, permet en revanche d'obtenir des réponses plus détaillées et plus quantitatives aux questions d'évaluation et d'optimisation de la digestion et de la codigestion. Il est disponible sous la forme d'un programme interactif (sous Excel).

#### 6.1.2 Discussions d'experts

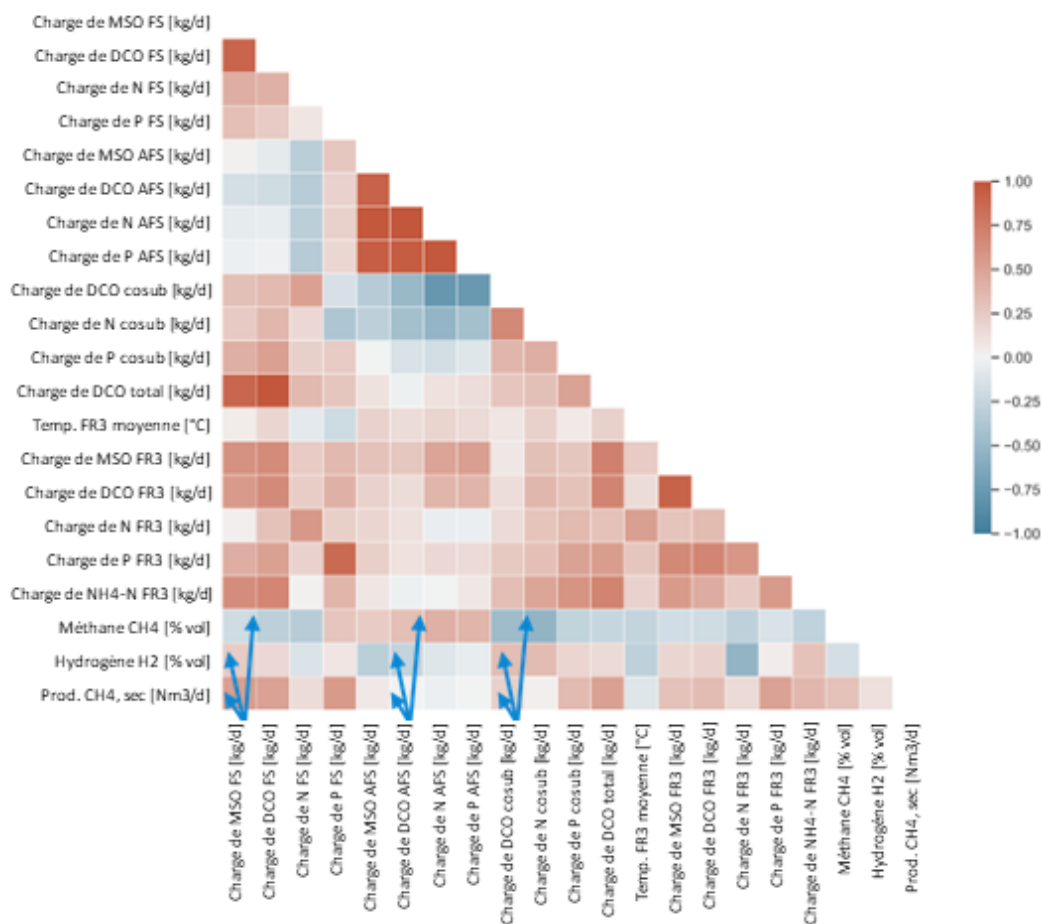
L'évaluation et l'optimisation de la digestion et de la codigestion vont au-delà de la simple évaluation et optimisation des processus associés. Les discussions d'experts ont fourni des informations essentielles de première main, qui touchent en particulier les aspects de l'exploitation, logistiques, juridiques, écologiques et économiques impliqués dans la prise de décision en faveur d'un dosage accru de cosubstrats ainsi que de nouveaux cosubstrats (non utilisés jusqu'à présent dans l'installation). De plus, les discussions d'experts ont montré l'importance cruciale d'une grande expérience de l'exploitation des installations, sans laquelle il n'est pratiquement pas possible de prendre des décisions vouées au succès dans le domaine (notamment) de la codigestion. Les outils (mathématiques) resteront donc toujours des aides et ne pourront jamais remplacer l'expérience de l'exploitation.

#### 6.1.3 Méthodes d'analyse de données et réseaux neuronaux

Quelques résultats intéressants d'analyses de corrélation simples (méthode d'analyse de données simple) sont présentés à la Figure 4.



**Figure 4 :** Corrélation par paires de toutes les charges entrantes et sortantes et des rapports de la codigestion à la STEP de Berne (données d'exploitation de la STEP de Berne 2015 - 2019, moyenne glissante sur environ 3\*HRT). Légende : rouge = corrélations positives, bleu = corrélations négatives, intensité de couleur = force de corrélation (échelle de droite).



La production de  $\text{CH}_4$  présente une corrélation positive relativement forte avec la charge organique présente dans les boues internes et une corrélation positive un peu moins forte avec celle des cosubstrats (flèches). Le dosage des cosubstrats ne permet donc pas d'agir aussi fortement sur la production de  $\text{CH}_4$  (par rapport aux boues internes). Ces résultats sont conformes aux attentes et prouvent la valeur informative de l'analyse de corrélation (une certaine « vérification » de la méthode). D'autre part, les charges organiques de la digestion sont corrélées négativement avec la teneur (proportion) en  $\text{CH}_4$  du gaz produit, et ce de manière particulièrement forte pour les charges des cosubstrats (pourtant relativement faibles). La concentration de  $\text{H}_2$ , paramètre essentiel de la chaîne de processus (produit intermédiaire, mais en phase liquide, Figure ), est cependant à nouveau corrélée positivement avec la charge organique alors que les valeurs correspondantes pour les boues externes montrent justement une corrélation inverse. Ces résultats laissent une grande marge de manœuvre pour formuler des hypothèses sur le processus, avec les idées correspondantes pour des interventions possibles en vue de l'optimisation de celui-ci.

Ainsi, des débits élevés de substances à travers la chaîne de processus pourraient entraîner une augmentation de la concentration nécessaire de  $\text{H}_2$ , qui est la concentration déterminante (d'une partie) de la méthanogenèse. La concentration de  $\text{H}_2$  à l'équilibre dans la phase gazeuse serait alors également augmentée, ce qui pourrait entraîner un certain déplacement de la production de  $\text{CH}_4$  vers la production de  $\text{H}_2$ . Ou alors, en cas de charges élevées, le SRT plus court qui en résulte souvent pourrait entraîner une certaine diminution de la population méthanogène (méthanogènes à croissance lente). Cela pourrait entraîner ensuite une augmentation de la concentration de  $\text{H}_2$  dans le digesteur et une (légère) diminution de la production relative de  $\text{CH}_4$ . De plus, si les charges sont élevées, les composants carbonés moins oxydés des boues pourraient être moins bien dégradés par rapport aux composants plus oxydés, ce qui pourrait entraîner une augmentation du rapport  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$  dans le gaz. Une charge élevée suite à une production accrue d'acides pourrait aussi simplement entraîner une augmentation de la part de  $\text{CO}_2$  émise dans le gaz et éventuellement, en parallèle, de la part de  $\text{CH}_4$  dissoute dans l'effluent (débit hydraulique généralement plus élevé). De nombreuses autres hypothèses sont envisageables.

Ces relations n'ont pas pu être étudiées plus en détail dans le cadre du présent projet. Ainsi, il convient entre autres de faire attention à d'éventuelles corrélations entre des grandeurs d'entrée supposées en principe comme non corrélées. L'addition de boues externes pourrait poser un « problème » de ce type.

Un exemple d'utilisation d'un réseau neuronal (méthode de machine learning) est présenté ci-dessous (Figure 5).

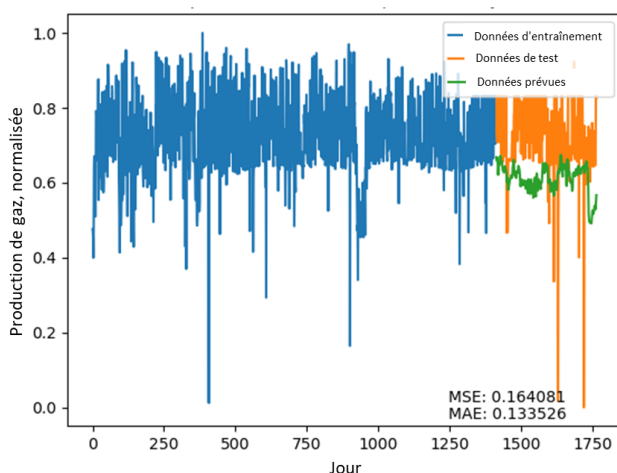
Les résultats donnent une première idée de la manière dont l'apprentissage avec des données qui sont plus fortement corrélées avec la grandeur cible (corrélation de la DCO totale avec la production de  $\text{CH}_4$ ) conduit manifestement à une meilleure prédiction que l'apprentissage avec des données d'entrée moins corrélées (corrélation de toutes les données avec la production de  $\text{CH}_4$ ). Les résultats ne devraient être comparables que si les conditions expérimentales sont identiques (même réseau neuronal, etc.). Il convient de préciser qu'il s'agit ici de premiers résultats et qu'aucune autre étude n'a pu être réalisée dans le cadre du présent projet. Néanmoins, sur la base de ces résultats, nous formulons l'hypothèse suivante (sans avoir recherché dans la littérature des approches déjà existantes allant dans ce sens) :

Hypothèse :

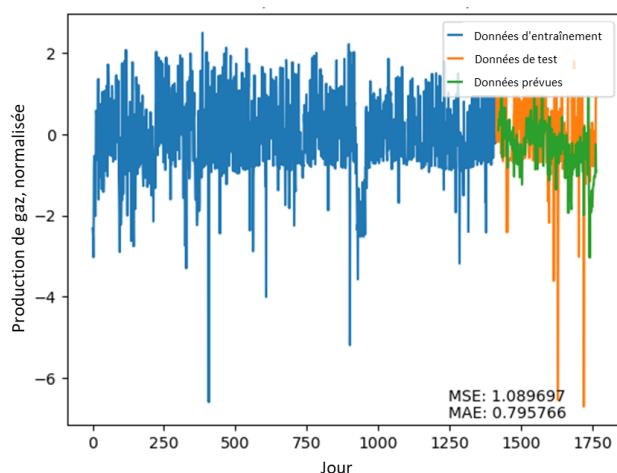
La qualité de prévision d'une méthode de machine learning basée sur un réseau neuronal est une mesure de la corrélation entre les données d'entrée et de sortie correspondantes. La méthode (ou l'outil) convient donc pour les tâches d'analyse de données.

Les deux exemples présentés ci-dessus montrent à notre avis le potentiel considérable des méthodes d'analyse de données et des réseaux neuronaux pour obtenir des indications d'intérêt pour l'évaluation et l'optimisation des processus.

Données réelles par rapport aux prévisions, 10 époques, 3 jours de prévision



Données réelles par rapport aux prévisions, 100 époques



**Figure 5:** Prédiction de la production de  $\text{CH}_4$  de la codigestion à la STEP de Berne sur une année après l'entraînement d'un réseau neuronal avec les données d'entrée de la codigestion sur quatre ans (données d'exploitation de la STEP de Berne 2015 - 2019). Vert = production de  $\text{CH}_4$  prédite, orange = production de  $\text{CH}_4$  mesurée pendant l'année de prédiction. Image du haut : entraînement avec toutes les données en entrée. Image du bas : entraînement avec la DCO totale en entrée uniquement.

#### 6.1.4 Optimisation des processus

Les analyses et outils stationnaires de la recommandation ne se prêtent que de manière limitée à l'optimisation des processus. Des méthodes et des modèles dynamiques seraient nécessaires pour une optimisation complète, car la plupart des écarts par rapport aux conditions ou aux déroulements optimaux des processus sont dus à des modifications dynamiques des valeurs en entrée ou à d'autres facteurs d'influence (perturbations). Par ailleurs, les données nécessaires à l'optimisation des processus, qui constituent notamment une condition préalable à une modélisation dynamique réussie, sont insuffisantes dans la plupart des installations. Cela concerne surtout la résolution temporelle des données de mesure et d'analyse (chapitre 6.2).

On peut indiquer les potentiels d'optimisation suivants :

1. Pour les digestions pouvant être évaluées avec les méthodes et outils stationnaires de la recommandation :
  - En cas de charge optimale :
    - Aucun autre potentiel d'optimisation
  - En cas de surcharge :
    - Réduction de la charge (charges entrantes)
    - Augmentation du volume du digesteur
    - Éventuellement, transformation pour un mode de fonctionnement thermophile
    - Éventuellement, transformation en un procédé avec rétention des boues (les bases manquent actuellement)
  - En cas de sous-charge (réserves de capacité) :
    - Augmentation de la charge par l'acceptation de boues externes (supplémentaires)
    - Passage à la codigestion
  - En général :
    - Prétraitement des boues internes et externes (non étudié dans le projet)
2. Pour les digestions pouvant être évaluées avec des méthodes et modèles dynamiques (seulement évoquées dans le projet) :
  - Idem que pour le point 1, mais avec des potentiels supplémentaires pour les installations non sous-chargées (équilibre des charges, etc.) -> possibilités de régulation
3. Pour les codigestions pouvant être évaluées avec les méthodes et outils stationnaires de la recommandation :
  - En cas de charge optimale :
    - Modifications éventuelles des cosubstrats (composition, proportions) -> optimisations de la dégradabilité, production de méthane/gaz, digestat, inhibitions, charges de retour, etc.
  - En cas de surcharge :
    - Réduction des quantités de cosubstrats, éventuellement suppression complète.
    - Sinon, idem que pour le point 1
  - En cas de sous-charge (réserves de capacité) :
    - Acceptation de cosubstrats supplémentaires ou en quantités plus importantes
    - Éventuellement, acceptation de boues externes (supplémentaires)
  - En général :
    - Prétraitement des boues internes et externes (non étudié dans le projet)
4. Pour les codigestions pouvant être évaluées avec des méthodes et modèles dynamiques (seulement évoqués dans le projet) :
  - Idem que pour le point 3, mais avec des potentiels supplémentaires pour les installations non sous-chargées (équilibre des charges, etc.) -> possibilités de régulation

#### 6.1.5 Protection des eaux : mission de base de la station d'épuration

La protection des eaux est la mission de base et l'activité principale de la station d'épuration. En tant que valorisation des flux secondaires et du point de vue de la récupération d'énergie des eaux usées, la digestion relève incontestablement de cette mission. L'utilisation de cosubstrats peut être judicieuse pour tirer parti des réserves de performance et devrait être appréciée comme offre dans le domaine de l'élimination des déchets industriels. Cependant, de nombreuses conditions limites sont à prendre en compte. Il est certain que la valorisation des cosubstrats doit rester une activité secondaire couvrant les coûts de l'exploitation. Il faut éviter qu'elle soit subventionnée de manière croisée par les taxes sur les eaux usées, qui doivent par nature être affectées à la protection des eaux.

## **6.2 Perspectives**

### **6.2.1 Paramètres HRT, SRT, RB et SB**

Nous recommandons de poursuivre les recherches sur l'importance et la pertinence des paramètres HRT, SRT, RB et SB, en particulier pour les installations de codigestion avec un dosage élevé de cosubstrats (par rapport aux boues internes et aux boues externes) et en particulier pour les installations avec séparation boues-eau en sortie, c'est-à-dire avec la possibilité de distinguer entre HRT et SRT (chapitre 3.3 et tableau 3).

### **6.2.2 Méthodes d'analyse de données et réseaux neuronaux**

Les premiers résultats décrits au chapitre 6.1 (« Exemples marquants ») sont pour nous une motivation pour conduire des études supplémentaires en utilisant des méthodes d'analyse de données et des réseaux neuronaux. Sur la base de l'hypothèse formulée au chapitre 6.1, nous recommandons d'autres études afin de déterminer les principales possibilités d'influence d'une conduite de processus plus ciblée et optimale dans le domaine de la digestion et de la codigestion.

### **6.2.3 Modèles dynamiques (et statiques) basés sur des réseaux neuronaux et sur des modèles mécanistes**

Outre l'application décrite du machine learning à l'analyse des données, celui-ci se prête naturellement aussi à la création de modèles complexes comprenant de nombreuses grandeurs (et grandeurs cibles) d'entrée et de sortie. À l'instar des modèles mécanistes (par ex. les modèles de la famille ADM1 de l'IWA), ils permettent de modéliser des digestions et des codigestions complètes. Il est ensuite possible d'optimiser, de piloter et de réguler les processus de manière dynamique et ciblée. Les modèles neuronaux présentent une série d'avantages et d'inconvénients par rapport aux modèles mécanistes, et il est possible que les deux approches de modélisation ne conviennent pas aussi bien à chaque système réel. Des recherches sont encore nécessaires dans ce domaine. Il est néanmoins certain que de telles approches, quelle que soit leur nature, impliquent des exigences élevées en matière de qualité et surtout de volume des données de mesure et d'analyse. Dans la plupart des cas, les concepts de mesure actuels dans le domaine de la digestion et de la codigestion ne sont pas capables de répondre à ces exigences. Pour résoudre des problématiques de nature dynamique avec les modèles correspondants, il faut en premier lieu augmenter la résolution temporelle des données de mesure (fréquences de mesure). Cela inclut également des optimisations de processus, des commandes et des régulations plus poussées. En outre, dans de tels cas, il faut souvent prévoir des points de mesure supplémentaires (augmentation de la résolution spatiale) ainsi que d'autres grandeurs de mesure (grandeurs de processus comme l'hydrogène, etc.). Ici aussi, nous recommandons des études complémentaires, qui devraient toujours intégrer une évaluation des avantages et des coûts. Cela vaut aussi bien pour les études que pour les réalisations.

Dans le prolongement des réflexions statiques de la présente recommandation, nous proposons de poursuivre l'étude du problème à l'aide de modèles mécanistes statiques (par ex. ADM1) et d'approches statiques de machine learning. Tout modèle dynamique peut également avoir une application statique : cela simplifie alors de nombreux calculs et, surtout, la question de la résolution temporelle des données de mesure n'est plus aussi critique dans un tel cas de figure. Il serait alors avantageux d'utiliser la méthode d'analyse des données de mesure par machine learning mentionnée ci-dessus (si l'adéquation de la méthode était confirmée). D'autres méthodes d'analyse de données qui n'ont pas pu être développées dans le cadre de la présente recommandation (par exemple les approches multivariées) pourraient également y être ajoutées.

### **6.2.4 Adéquation à la pratique des outils**

Les outils de la recommandation ont été partiellement calibrés ou vérifiés, avec relativement peu de données de STEP réelles. En outre, il n'existe encore aucun retour d'expérience issu de la pratique concernant leur facilité d'utilisation. Nous recommandons impérativement de tester les outils dans le cadre d'études de cas sur place, dans des STEP de différentes tailles. Ces tests doivent être effectués par les exploitants eux-mêmes et accompagnés, par exemple, par le VSA, des bureaux d'ingénieurs ou la ZHAW. Leur but est d'évaluer l'adéquation à la pratique et la facilité d'utilisation des outils. De plus, les retours issus de la pratique doivent être recueillis et utilisés pour améliorer les outils ou les développer davantage.

#### **6.2.5 Réédition de la recommandation**

Comme nous l'avons indiqué plus haut, nous considérons la recommandation comme dynamique, c'est-à-dire en évolution permanente (amélioration, adaptation, optimisation). De notre point de vue et de celui du VSA, il faudrait viser une nouvelle édition de la recommandation dans environ cinq ans.

Version consultation

## 7 BIBLIOGRAPHIE

- Allen E., Wall D.M., Herrmann C., Murphy J.D. (2016). A detailed assessment of resource of biomethane from first, second and third generation substrates. *Renew. Energy* 87, 656–665. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.10.060>.
- Fasel A. et Schiller A. (2019). Arbeitshilfe für die Annahme von Co-Substraten. ara region bern ag, Herrenschwanden.
- Rosenwinkel K.-H., Kroiss H., Dichtl N., Seyfried C.-F., Weiland P. (2015). *Anaerobtechnik: Abwasser-, Schlamm- und Reststoffbehandlung, Biogasgewinnung*. Springer-Verlag.
- VSA (2020). Données d'analyse dans les STEP. Recommandation, Association suisse des professionnels de la protection des eaux (VSA), Glattbrugg 2020.
- VSA et OFEN (2010). Énergie dans les stations d'épuration. Recommandation, Association suisse des professionnels de la protection des eaux (VSA) et Office fédéral de l'énergie, Glattbrugg 2020 et Berne 2010.

Version consultation

# ANNEXES

## A.1 Outil de calcul des paramètres et évaluation de l'inhibition (outils Excel) avec instructions

Ces outils et les instructions sont joints séparément à la recommandation.

## A.2 Tableaux et figures relatifs au concept de mesure et à la méthode simple d'évaluation des processus

**Tableau 1 :** Grandeurs de mesure et d'analyse selon la Figure 3 avec les fréquences de mesure recommandées. Les grandeurs dérivées (calculées) sont également indiquées. ((VSA, 2020), modifiée)

**Tableau 2 :** Formules de calcul des grandeurs (dérivées) du Tableau 1 ((VSA, 2020), modifiée)

**Tableau 3 :** Indications et conclusions concernant les données de mesure et d'analyse et les données dérivées de la digestion et de la codigestion (Tableaux 1 et 2). Les indications reposent sur les principales relations de la digestion. Signification : W et -> = effet, U = cause, cp = corrélation positive (la valeur dépendante augmente lorsque la valeur d'entrée augmente), cn = corrélation négative (la valeur dépendante diminue lorsque la valeur d'entrée augmente)

**Figure 6 :** Schéma de processus de la digestion anaérobie (Rosenwinkel et al., 2015) et processus anaérobie de sulfuration : respiration des sulfates.



**Tableau 4 :** Grandeurs de mesure et d'analyse selon la Figure 3 avec les fréquences de mesure recommandées. Les grandeurs dérivées (calculées) sont également indiquées. ((VSA, 2020), modifiée)

Points de mesure, points de prélèvement	Grandeur de mesure ou d'analyse	Unité	Type de grandeur (Paramètres signalés en rouge)	Fréquence de mesure, d'analyse, périodicité	Justification de la périodicité	Remarques
Entrée silo à boues, toutes les boues internes (SCS-01)	Q	l/s	Mesure inline			
	RS	g/l ou %	Analyses de laboratoire (échantillon, évent. moyenne de plusieurs dans un échantillon composite)	Deux fois par semaine, une fois par semaine	Dynamique de la composition des boues	
	RC	g/l ou % de RS	Analogue à RS	Analogue à RS	Analogue à RS	
	PAF	Analogue à RC	Calculée à partir de RS et RC	Analogue à RS	Analogue à RS	Calcul Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., [1]
	DCO	g/l	Analyses de laboratoire (échantillon, évent. moyenne de plusieurs dans un échantillon composite)	Deux fois par semaine, une fois par semaine	Dynamique de la composition des boues	
	Ntot	mg/l	Analyses de laboratoire	Deux fois par semaine, une fois par semaine	Dynamique de la composition des boues	
	Ptot	mg/l	Analyses de laboratoire	Deux fois par semaine, une fois par semaine	Dynamique de la composition des boues	
	Fe	mg/l	Analyses de laboratoire	Tous les six mois	Bilan Fe	
	BMP	l <sub>N</sub> /kg de PAF	Analyses de laboratoire			Ou utiliser valeur de la littérature
	Microplastiques	mg/l	Analyses de laboratoire	Tous les six mois	Contrôle, déduction en cas de PAF	
Entrée silo à boues, boues externes (SCS-02)	Q	l/s	Mesure inline			
	RS	g/l ou %	Analyses de laboratoire (échantillon, évent. moyenne de plusieurs dans un échantillon composite)	Deux fois par semaine, une fois par semaine	Dynamique de la composition des boues	
	RC	g/l ou % de RS	Analogue à RS	Analogue à RS	Analogue à RS	

Points de mesure, points de prélèvement	Grandeur de mesure ou d'analyse	Unité	Type de grandeur (Paramètres signalés en rouge)	Fréquence de mesure, d'analyse, périodicité	Justification de la périodicité	Remarques
	PAF	Analogue à RC	Calculée à partir de RS et RC	Analogue à RS	Analogue à RS	Calcul <b>Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.</b> , [1]
	DCO	g/l	Analyses de laboratoire (échantillon, évent. moyenne de plusieurs dans un échantillon composite)	Deux fois par semaine, une fois par semaine	Dynamique de la composition des boues	
	Ntot	mg/l	Analyses de laboratoire	Deux fois par semaine, une fois par semaine	Dynamique de la composition des boues	
	Ptot	mg/l	Analyses de laboratoire	Deux fois par semaine, une fois par semaine	Dynamique de la composition des boues	
	Fe	mg/l	Analyses de laboratoire	Tous les six mois	Bilan Fe	
	BMP	I <sub>N</sub> /kg de PAF	Analyses de laboratoire			Ou utiliser valeur de la littérature
	Microplastiques	mg/l	Analyses de laboratoire	Tous les six mois	Contrôle, déduction en cas de PAF	
Entrée silo à boues, cosubstrats 1 ... n (SCS-03)	Q	l/s	Mesure inline, évent. offline			Ou directement charge dans masse fraîche, RS ou PAF
	RS	g/l ou %	Analyses de laboratoire (échantillon, évent. moyenne de plusieurs dans un échantillon composite)	Variable	Fonction du cosubstrat ou de la production de cosubstrat	Justificatif par les fournisseurs des cosubstrats
	RC	g/l ou % de RS	Analogue à RS	Variable	Fonction du cosubstrat ou de la production de cosubstrat	Justificatif par les fournisseurs des cosubstrats
	PAF	Analogue à RC	Calculée à partir de RS et RC	Variable	Fonction du cosubstrat ou de la production de cosubstrat	Justificatif par les fournisseurs des cosubstrats / Calcul <b>Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.</b> ,[1]
	DCO	g/l	Analyses de laboratoire (échantillon, évent. moyenne de plusieurs dans un échantillon composite)	Variable	Fonction du cosubstrat ou de la production de cosubstrat	Justificatif par les fournisseurs des cosubstrats
	Ntot	mg/l	Analyses de laboratoire	Variable	Fonction du cosubstrat ou de la production de cosubstrat	Justificatif par les fournisseurs des cosubstrats

Points de mesure, points de prélèvement	Grandeur de mesure ou d'analyse	Unité	Type de grandeur (Paramètres signalés en rouge)	Fréquence de mesure, d'analyse, périodicité	Justification de la périodicité	Remarques
	Ptot	mg/l	Analyses de laboratoire	Variable	Fonction du cosubstrat ou de la production de cosubstrat	Justificatif par les fournisseurs des cosubstrats
	Stot	mg/l	Analyses de laboratoire	Variable	Fonction du cosubstrat ou de la production de cosubstrat	Justificatif par les fournisseurs des cosubstrats
	NO3	mg/l	Analyses de laboratoire	Variable	Fonction du cosubstrat ou de la production de cosubstrat	Justificatif par les fournisseurs des cosubstrats
	NO2	mg/l	Analyses de laboratoire	Variable	Fonction du cosubstrat ou de la production de cosubstrat	Justificatif par les fournisseurs des cosubstrats
	SO4	mg/l	Analyses de laboratoire	Variable	Fonction du cosubstrat ou de la production de cosubstrat	Justificatif par les fournisseurs des cosubstrats
	Fe	mg/l	Analyses de laboratoire	Variable	Fonction du cosubstrat ou de la production de cosubstrat	Justificatif par les fournisseurs des cosubstrats
	Fe(IV)	mg/l	Analyses de laboratoire	Variable	Fonction du cosubstrat ou de la production de cosubstrat	Justificatif par les fournisseurs des cosubstrats
	BMP	l <sub>N</sub> /kg de PAF	Analyses de laboratoire	Variable	Fonction du cosubstrat ou de la production de cosubstrat	Justificatif par les fournisseurs des cosubstrats
	pH		Mesure en laboratoire	Variable	Fonction du cosubstrat ou de la production de cosubstrat	Justificatif par les fournisseurs des cosubstrats
	Microplastiques	mg/l	Analyses de laboratoire	Tous les six mois	Contrôle, déduction en cas de PAF	
Sortie silo à boues (SCS-04)	Q	l/s	Mesure inline			
	RS	g/l ou %	Analyses de laboratoire (échantillon, évent. moyenne de plusieurs dans un échantillon composite)	Deux fois par semaine, une fois par semaine	Dynamique de la composition des boues	
	RC	g/l ou % de RS	Analogue à RS	Analogue à RS	Analogue à RS	
	PAF	Analogue à RC	Calculée à partir de RS et RC	Analogue à RS	Analogue à RS	Calcul Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., [1]
	DCO	g/l	Analyses de laboratoire (échantillon, évent. moyenne de plusieurs dans un échantillon composite)	Deux fois par semaine, une fois par semaine	Dynamique de la composition des boues	

Points de mesure, points de prélèvement	Grandeur de mesure ou d'analyse	Unité	Type de grandeur (Paramètres signalés en rouge)	Fréquence de mesure, d'analyse, périodicité	Justification de la périodicité	Remarques
	Ntot	mg/l	Analyses de laboratoire	Deux fois par semaine, une fois par semaine	Dynamique de la composition des boues	
	Ptot	mg/l	Analyses de laboratoire	Deux fois par semaine, une fois par semaine	Dynamique de la composition des boues	
	NO3	mg/l	Analyses de laboratoire	Deux fois par semaine, une fois par semaine	Dynamique de la composition des boues	
	NO2	mg/l	Analyses de laboratoire	Deux fois par semaine, une fois par semaine	Dynamique de la composition des boues	
	SO4	mg/l	Analyses de laboratoire	Deux fois par semaine, une fois par semaine	Dynamique de la composition des boues	
	Fe(IV)	mg/l	Analyses de laboratoire	Deux fois par semaine, une fois par semaine	Dynamique de la composition des boues	
	BMP	l <sub>N</sub> /kg de PAF	Analyses de laboratoire	Une fois par an	Contrôle bilan du silo à boues, perte du silo à boues	
	Microplastiques	mg/l	Analyses de laboratoire	Tous les six mois	Contrôle, déduction en cas de PAF	
Entrée digesteur, cosubstrats 1 ... n (FAU-01)						Analogue à « Entrée silo à boues, cosubstrats 1 ... n » (SCS-03)
Digesteur (FAU-02)	pH		Mesure inline			
	T	°C	Mesure inline			
Sortie digesteur (FAU-03)	RS	g/l ou %	Analyses de laboratoire (échantillon, évent. moyenne de plusieurs dans un échantillon composite)	Deux fois par semaine, une fois par semaine	Dynamique de la composition des boues	
	RC	g/l ou % de RS	Analogue à RS	Analogue à RS	Analogue à RS	
	PAF	Analogue à RC	Calculée à partir de RS et RC	Analogue à RS	Analogue à RS	Calcul Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., [1]
	DCO	g/l	Analyses de laboratoire (échantillon, évent. moyenne de plusieurs dans un échantillon composite)	Deux fois par semaine, une fois par semaine	Dynamique de la composition des boues	

Points de mesure, points de prélèvement	Grandeur de mesure ou d'analyse	Unité	Type de grandeur (Paramètres signalés en rouge)	Fréquence de mesure, d'analyse, périodicité	Justification de la périodicité	Remarques
	Acide acétique (HAc)	g/l	Analyses de laboratoire <b>Paramètre</b>	Tous les six mois et en cas de problèmes de fonctionnement	Indique des problèmes dans la chaîne de processus anaérobies	
	Acides org. (somme acide acétique + acide propionique + acide butyrique)	g/l	Analyses de laboratoire <b>Paramètre</b>	Tous les six mois et en cas de problèmes de fonctionnement	Indique des problèmes dans la chaîne de processus anaérobies	
	H2	mg/l	Mesure inline, <b>paramètre</b>			
	Alcalinité (pouvoir tampon)	meq/l	Analyses de laboratoire	Tous les six mois et en cas de chute du pH		
	BMP	l <sub>N</sub> /kg de PAF	Analyses de laboratoire	Tous les six mois	Dégradabilité, contrôle des processus dans digesteur	
Stockeur/épaississeur (STE-01)	pH		Mesure inline			
	T	°C	Mesure inline			
Stockeur/épaississeur, sortie des boues (STE-02)	Q	l/s	Mesure inline			
	RS	g/l ou %	Analyses de laboratoire (échantillon, évent. moyenne de plusieurs dans un échantillon composite)	Deux fois par semaine, une fois par semaine	Dynamique de la composition des boues	
	RC	g/l ou % de RS	Analogue à RS	Analogue à RS	Analogue à RS	
	PAF	Analogue à RC	Calculée à partir de RS et RC	Analogue à RS	Analogue à RS	Calcul Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., [1]
	DCO	g/l	Analyses de laboratoire (échantillon, évent. moyenne de plusieurs dans un échantillon composite)	Deux fois par semaine, une fois par semaine	Dynamique de la composition des boues	
	Acide acétique (HAc)	g/l	Analyses de laboratoire <b>Paramètre</b>	Tous les six mois et en cas de problèmes de fonctionnement	Indique des problèmes dans la chaîne de processus anaérobies	
	Acides org. (Σ acide acétique + acide propionique + acide butyrique)	g/l	Analyses de laboratoire <b>Paramètre</b>	Tous les six mois et en cas de problèmes de fonctionnement	Indique des problèmes dans la chaîne de processus anaérobies	

Points de mesure, points de prélèvement	Grandeur de mesure ou d'analyse	Unité	Type de grandeur (Paramètres signalés en rouge)	Fréquence de mesure, d'analyse, périodicité	Justification de la périodicité	Remarques
	H2	mg/l	Mesure inline, paramètre			
	Alcalinité (pouvoir tampon)	meq/l	Analyses de laboratoire	Tous les six mois et en cas de chute du pH		
	BMP	l <sub>N</sub> /kg de PAF	Analyses de laboratoire	Tous les six mois	Dégradabilité, contrôle des processus dans Stockeur/épaississeur	
<b>Stockeur/épaississeur, sortie des eaux putrides (STE-03)</b>						
<b>Gaz (FAU-04 et STE-04)</b>	Q	l/s	Mesure inline (avec calcul)			Gaz séché, condensat retourné directement dans le digesteur et le silo à boues. En l <sub>N</sub> /s : Calcul Tableau, [2]
	CH4, CO2, NH3, H2S	%	Mesure inline			
	H2	%	Mesure inline, paramètre			
<b>Déshydratation des boues, entrée des flocculants (SCE-01)</b>	Q_floculants	l/s	Mesure inline			
<b>Déshydratation des boues, transfert aire à boues (SCE-02)</b>	Q	l/s	Mesure inline			
	RS	g/l ou %	Analyses de laboratoire (échantillon, évent. moyenne de plusieurs dans un échantillon composite)	Deux fois par semaine, une fois par semaine	Dynamique de la composition des boues	
	RC	g/l ou % de RS	Analogue à RS	Analogue à RS	Analogue à RS	
	PAF	Analogue à RC	Calculée à partir de RS et RC	Analogue à RS	Analogue à RS	Calcul Tableau 2, [1]
	DCO	g/l	Analyses de laboratoire (échantillon, évent. moyenne de plusieurs dans un échantillon composite)	Deux fois par semaine, une fois par semaine	Dynamique de la composition des boues	

Points de mesure, points de prélèvement	Grandeur de mesure ou d'analyse	Unité	Type de grandeur (Paramètres signalés en rouge)	Fréquence de mesure, d'analyse, périodicité	Justification de la périodicité	Remarques
	Ntot	mg/l	Analyses de laboratoire	Deux fois par semaine, une fois par semaine	Dynamique de la composition des boues	
	Ptot	mg/l	Analyses de laboratoire	Deux fois par semaine, une fois par semaine	Dynamique de la composition des boues	
	Stot	mg/l	Analyses de laboratoire	Deux fois par semaine, une fois par semaine	Dynamique de la composition des boues	
	Fe	mg/l	Analyses de laboratoire	Tous les six mois	Bilan Fe	
	BMP	l <sub>N</sub> /kg de MSO	Analyses de laboratoire <b>Paramètre</b>	Tous les six mois	Modifications, potentiel de gaz résiduel	
Déshydratation des boues, sortie des eaux putrides (SCE-03)						
Entrée traitement des eaux putrides (FAB-01)	Q	l/s	Mesure inline			
	MES	mg/l	Analyses de laboratoire	Une fois par mois	Contrôler performance de la déshydratation des boues	
	Ntot	mg/l	Analyses de laboratoire	Deux fois par semaine, une fois par semaine	Dynamique de la composition des boues	
	Ptot	mg/l	Analyses de laboratoire	Deux fois par semaine, une fois par semaine	Dynamique de la composition des boues	
	NH4	mg/l	Analyses de laboratoire	Deux fois par semaine, une fois par semaine	Dynamique de la composition des boues	
	Microplastiques	mg/l	Analyses de laboratoire	Tous les six mois	Contrôle, pollution traitement des eaux putrides et filière de traitement des eaux	
	Fe	mg/l	Analyses de laboratoire	Tous les six mois	Bilan Fe	
Plusieurs/tous points de mesure, points de prélèvement (AMO)	Charges toutes grandeurs (= quantités = masses/temps) F_grandeur	kg/d	Calculée			Calcul Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., [3]

Points de mesure, points de prélèvement	Grandeur de mesure ou d'analyse	Unité	Type de grandeur (Paramètres signalés en rouge)	Fréquence de mesure, d'analyse, périodicité	Justification de la périodicité	Remarques
	Charge organique du digesteur RB	kg PAF/m <sup>3</sup> /d	Calculée, paramètre			PAF = MOS / Calcul Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., [4]
	Charge de boues organiques SB	kgPAF/kg_RS_boues/d	Calculée, paramètre			Calcul Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., [5]
	Production de gaz Q_gaz	l <sub>N</sub> /s, m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /a	Calculée			Gaz séché Calcul Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., [6]
	Production spécifique de gaz Q_gaz_spéc	l <sub>N</sub> /kgPAF	Calculée, paramètre si rapportée à l'installation			Calcul Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., [7]
	Production de méthane Q_CH4	l <sub>N</sub> /s, m <sup>3</sup> <sub>N</sub> /a	Calculée			Calcul Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., [8]
	Production spécifique de méthane Q_CH4_spéc	l <sub>N</sub> /kgPAF	Calculée, paramètre si rapportée à l'installation			Calcul Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., [9]
	Potentiel biométhane BMP	l <sub>N</sub> /kgPAF	Calculée, paramètre si rapporté à la sortie			Détermination en laboratoire, conditions normalisées Calcul Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., [10]
	Dégradation des PAF (dégradation de MSO)	%	Calculée, paramètre si rapportée à l'installation			Calcul Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., [11]
	Temps de séjour hydraulique HRT (t_hydr)	d	Calculée, paramètre			Calcul Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., [12]
	Temps de séjour des boues SRT	d	Calculée, paramètre			Calcul Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., [13]



Version consultation

**Tableau 5 :** Formules de calcul des grandeurs (dérivées) du Tableau 1 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ((VSA, 2020), modifiée)

Numéro	Grandeur calculée (dérivée) (paramètres signalés en rouge)	Formule de calcul
[1]	PAF	$PAF = RS - RC$
[2]	Q	Convertir en l <sub>N</sub> /s (1bar, 273,15 K) : $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$
[3]	Charges toutes grandeurs (F_grandeur)	$F\_grandeur = Q \cdot c\_grandeur$
[4]	Charge organique du digesteur (RB), paramètre	$RB = F\_PAF\_entrée\_digeur / V\_digeur$
[5]	Charge de boues organiques (SB), paramètre	$SB = F\_PAF\_entrée\_digeur / RS\_boues\_digeur$
[6]	Production de gaz (Q_gaz)	Convertie à partir de Q de fonctionnement mesurée sous 1bar, 273,15 K, avec $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$
[7]	Production spécifique de gaz Q_gaz_spéc, paramètre si rapportée à l'installation (voir formule)	$Q\_gaz\_spéc = Q\_gaz / F\_PAF\_entrée\_digeur$
[8]	Production de méthane (Q_CH4)	$Q\_CH4 = Q\_gaz \cdot c\_CH4$
[9]	Production spécifique de méthane (Q_CH4_spéc) paramètre si rapportée à l'installation (voir formule)	$Q\_CH4\_spéc = Q\_gaz\_spéc \cdot c\_CH4$
[10]	Potentiel biométhane (BMP), paramètre si rapportée à la sortie	$BMP = V\_gaz \cdot c\_CH4 / m\_PAF\_utilisé$
[11]	Dégradation des PAF (dégradation de MSO) [%], paramètre	$\rho = (F\_PAF\_entrée\_digeur - F\_PAF\_sortie\_digeur) / F\_PAF\_entrée\_digeur$
[12]	Temps de séjour hydraulique (HRT = t_hydr), paramètre	$HRT = V\_digeur / Q\_entrée\_digeur$
[13]	Temps de séjour des boues (SRT), paramètre	$SRT = RS\_boues\_digeur / F\_RS\_boues\_digeur$

**Tableau 6 :** Indications et conclusions concernant les données de mesure et d'analyse et les données dérivées de la digestion et de la codigestion (Tableaux 1 et 2). Les indications reposent sur les principales relations de la digestion. Signification : W et -> = effet, U = cause, cp = corrélation positive (la valeur dépendante augmente lorsque la valeur d'entrée augmente), cn = corrélation négative (la valeur dépendante diminue lorsque la valeur d'entrée augmente)

Point de mesure, point de prélèvement	Grandeur de mesure, grandeur d'analyse, grandeur dérivée	Signification - La grandeur résulte de U - La grandeur entraîne W ou la grandeur -> W - Autres significations	Valeur ou plage de valeurs optimale en ce qui concerne le critère indiqué (uniquement pour les paramètres)	Signification, conclusion si supérieure (uniquement pour les paramètres)	Signification, conclusion si inférieure (uniquement pour les paramètres)	Remarques
Entrée silo à boues, toutes les boues internes (SCS-01)	Q	W : avec concentration : charge, pollution (cp) W : HRT (cp)				
	RS	W : avec Q : charge en masse, pollution (cp), partiellement biodégradable, partiellement nutriments				
	RC	W : avec Q : charge inorganique, pollution (cp), partiellement nutriments				
	PAF	W : avec Q : charge inorganique, pollution (cp), partiellement biodégradable				
	DCO	W : avec Q : charge de DCO, pollution (cp), partiellement biodégradable				
	Ntot	W : avec Q : charge de Ntot, pollution (cp), nutriments hydrolysés en NH3/NH4				
	Ptot	W : avec Q : charge de Ptot, pollution (cp), nutriments partiellement hydrolysés en PO4				P non hydrolysé dans les boues précipitées
	Stot	W : avec Q : charge de Stot, pollution (cp), nutriments hydrolysés en HS				
	Fe	Nutriments pour bilans de masse (contrôle des appareils de mesure)				
	BMP	Production de CH4 et dégradation des PAF en laboratoire (cp avec BMP)				
	Microplastiques	W : augmentent les microplastiques en sortie (cp) inertes, à soustraite des PAF				

Point de mesure, point de prélèvement	Grandeur de mesure, grandeur d'analyse, grandeur dérivée	Signification - La grandeur résulte de U - La grandeur entraîne W ou la grandeur -> W - Autres significations	Valeur ou plage de valeurs optimale en ce qui concerne le critère indiqué (uniquement pour les paramètres)	Signification, conclusion si supérieure (uniquement pour les paramètres)	Signification, conclusion si inférieure (uniquement pour les paramètres)	Remarques
Entrée silo à boues, boues externes (SCS-02)	Q, RS, RC, PAF, DCO, Ntot, Ptot, Stot, Fe, BMP, microplastiques	Analogue à « toutes les boues internes »				
Entrée silo à boues, cosubstrats 1 ... n (SCS-03)	Q, RS, RC, PAF, DCO	Analogue à « toutes les boues internes »				
	Ntot	Analogue à « toutes les boues internes », valeurs élevées -> NH4 élevé à l'entrée du traitement des eaux putrides				
	Ptot	Analogue à « toutes les boues internes », valeurs élevées -> PO4 élevé dans l'aire de boues et, évent., à l'entrée du traitement des eaux putrides				
	Stot	Analogue à « toutes les boues internes », valeurs élevées -> H2S élevé dans le gaz -> problèmes de corrosion				
	NO3	W : avec Q : charge de NO3, pollution (cp), W : dénitrification en N2 -> consommation des PAF dégradables, augmentation de la charge de CO2 dans le gaz				
	NO2	W : avec Q : charge de NO2, pollution (cp), W : toxicité sur les micro-organismes du biogaz (en cas de concentrations élevées)				
	SO4	W : avec Q : charge de SO4, pollution (cp), W : sulfatoréduction en HS--> H2S -> consommation de PAF dégradable et				

Point de mesure, point de prélèvement	Grandeur de mesure, grandeur d'analyse, grandeur dérivée	Signification - La grandeur résulte de U - La grandeur entraîne W ou la grandeur -> W - Autres significations	Valeur ou plage de valeurs optimale en ce qui concerne le critère indiqué (uniquement pour les paramètres)	Signification, conclusion si supérieure (uniquement pour les paramètres)	Signification, conclusion si inférieure (uniquement pour les paramètres)	Remarques
		problèmes de corrosion, augmentation de la charge de CO2 dans le gaz				
	Fe	Analogue à « toutes les boues internes »				
	Fe(IV)	W : avec Q : charge de Fe(IV), pollution (cp) W : réduction du Fe(IV) en Fe (III)--> consommation des PAF dégradables, augmentation de la charge de CO2 dans le gaz				
	BMP	Analogue à « toutes les boues internes »				
	pH	Consomme la capacité tampon (éventuellement pertinent pour Q élevé)				
	Microplastiques	Analogue à « toutes les boues internes »				
<b>Sortie silo à boues (SCS-04)</b>	Q, RS, RC, PAF, DCO, Ntot, Ptot, Stot, NO3, NO2, SO4, Fe(IV), BMP, microplastiques	Analogue à « cosubstrats » Bilans de masse pour les contrôles, éventuellement dégradation dans le silo à boues				
<b>Entrée digesteur, cosubstrats 1 ... n (FAU-01)</b>						<b>Analogue à « Entrée silo à boues, cosubstrats 1 ... n » (SCS-03)</b>
<b>Digesteur (FAU-02)</b>	pH*	W : une valeur inférieure inhibe ... bloque les processus de la chaîne de processus anaérobies	6 - 8		Réduction des performances jusqu'au blocage complet de la chaîne de processus anaérobies	
	T	W : tous les bioprocessus dépendent de la température	35 – 40°C : domaine mésophile 40 – 60°C : domaine thermophile	W : dénaturation des enzymes -> défaillance des fonctions enzymatiques des processus -> défaillance de la dégradation des PAF et de la production de gaz	Réduction des vitesses métaboliques -> réduction du taux de dégradation de PAF et de la production de gaz	

Point de mesure, point de prélèvement	Grandeur de mesure, grandeur d'analyse, grandeur dérivée	Signification - La grandeur résulte de U - La grandeur entraîne W ou la grandeur -> W - Autres significations	Valeur ou plage de valeurs optimale en ce qui concerne le critère indiqué (uniquement pour les paramètres)	Signification, conclusion si supérieure (uniquement pour les paramètres)	Signification, conclusion si inférieure (uniquement pour les paramètres)	Remarques
Sortie digesteur (FAU-03)	RS	Relevé processus de dégradation dans le digesteur				Inutile si le digesteur doit être uniquement relevé avec le lit de boue du stockeur/épaisseur
	RC	Pour détermination des PAF (cellule inférieure)				Analogue à cellule supérieure
	PAF, DCO	Relevé processus de dégradation dans le digesteur				Analogue à cellule supérieure
	Acide acétique (HAc)	Produit intermédiaire important de la production de biogaz, produit de l'acétogénèse, substrat direct de la production de méthane (méthanogénèse), indicateur de l'équilibre des processus de biogaz	0 - 3000 mg/l pour des processus de biogaz équilibrés	Production de méthane (méthanogénèse) insuffisante	- Hydrolyse insuffisante - Acidogénèse insuffisante	Ibu (2021) <b>Paramètre</b>
	Acides org (somme acide acétique + acide propionique + acide butyrique)	Produits intermédiaires importants de la production de biogaz, indicateurs de l'équilibre des processus de biogaz	Acides org. (somme) 3720 mg/l Acide acétique 3000 mg/l Acide propionique 700 mg/l Acide butyrique 20 mg/l pour des processus de biogaz équilibrés	- Production de méthane (méthanogénèse) insuffisante - Éventuellement, production d'acide acétique insuffisante (autres acides trop élevés) - En cas de capacité tampon faible, chute du pH -> blocage complet des processus subséquents	- Hydrolyse insuffisante - Acidogénèse insuffisante	Ibu (2021) <b>Paramètre</b>
	H2	Produit intermédiaire important de la production de biogaz, substrat direct de la production de méthane (méthanogénèse), indicateur de l'équilibre de la fermentation/des processus de biogaz	... mg/l pour une fermentation/des processus de biogaz équilibrés	Production de méthane (méthanogénèse) insuffisante, effet toxique sur la production de H2	Production de H2 insuffisante, -> production de méthane (méthanogénèse) insuffisante	<b>Paramètre</b>

Point de mesure, point de prélèvement	Grandeur de mesure, grandeur d'analyse, grandeur dérivée	Signification - La grandeur résulte de U - La grandeur entraîne W ou la grandeur -> W - Autres significations	Valeur ou plage de valeurs optimale en ce qui concerne le critère indiqué (uniquement pour les paramètres)	Signification, conclusion si supérieure (uniquement pour les paramètres)	Signification, conclusion si inférieure (uniquement pour les paramètres)	Remarques
	Alcalinité (pouvoir tampon)	W : empêche la chute du pH lors de la libération d'acides organiques (acidogénèse et acétogénèse) -> évite la réduction des performances jusqu'au blocage complet de la chaîne de processus anaérobies Quotient acides org./alcalinité devrait être compris entre ... et ... (valeur FOS/TAC)				
	BMP	Diminution de la capacité de production spécifique de CH4 en laboratoire via le digesteur				Inutile si le digesteur doit être uniquement relevé avec le lit de boue du Stockeur/épaisseur
<b>Stockeur/épaisseur (STE-01)</b>	pH*	Analogue à « Digesteur »	Analogue à « Digesteur »	Analogue à « Digesteur »	Analogue à « Digesteur »	
	T	Analogue à « Digesteur »	Analogue à « Digesteur »	Analogue à « Digesteur »	Analogue à « Digesteur »	
<b>Stockeur/épaisseur, sortie des boues (STE-02)</b>	Q, RS, RC, PAF, DCO	Est inférieur à Q à l'entrée du digesteur (en raison de la déduction des eaux troubles)				
	Acide acétique (HAc)	Analogue à « Sortie digesteur »	Analogue à « Sortie digesteur »	Analogue à « Sortie digesteur »	Analogue à « Sortie digesteur »	Paramètre
	Acides org (somme acide acétique + acide propionique + acide butyrique)	Analogue à « Sortie digesteur »	Analogue à « Sortie digesteur »	Analogue à « Sortie digesteur »	Analogue à « Sortie digesteur »	Paramètre
	H2	Analogue à « Sortie digesteur »	Analogue à « Sortie digesteur »	Analogue à « Sortie digesteur »	Analogue à « Sortie digesteur »	Paramètre
	Alcalinité (pouvoir tampon)	Analogue à « Sortie digesteur »				

Point de mesure, point de prélèvement	Grandeur de mesure, grandeur d'analyse, grandeur dérivée	Signification - La grandeur résulte de U - La grandeur entraîne W ou la grandeur -> W - Autres significations	Valeur ou plage de valeurs optimale en ce qui concerne le critère indiqué (uniquement pour les paramètres)	Signification, conclusion si supérieure (uniquement pour les paramètres)	Signification, conclusion si inférieure (uniquement pour les paramètres)	Remarques
	BMP	Analogue à « Sortie digesteur »				
Stockeur/épaisseur, sortie des eaux putrides (STE-03)						
Gaz (FAU-04 et STE-04)	Q	W : avec concentration : charge, (cp)				Doit être mesuré séparément en cas de relevé séparé des processus du digesteur et du Stockeur/épaisseur
	CH4	W : avec Q : charge de CH4 (cp) Charge de CH4 : grandeur cible à maximiser en termes de gain d'énergie Application également comme ressources de matières				Analogue à cellule supérieure
	CO2	W : avec Q : charge de CO2 (cp) W : diminue la valeur calorifique du biogaz W : effort de séparation lors du traitement du gaz Peut être utilisé pour la (bio)méthanisation de H2				Analogue à cellule supérieure
	CH4/CO2	Composition du gaz en ce qui concerne CH4 et CO2 U : nombre d'oxydation moyen de C dans les substrats (cn) Autres causes	Pour des raisons énergétiques, plus il est élevé, mieux c'est			Analogue à cellule supérieure Les graisses ont des nombres d'oxydation de C bas <b>Paramètre</b>
	NH3	W : avec Q : charge de NH3 (cp) W : en tant que concentration de NH4 en phase liquide, toxique pour les processus de fermentation				Doit être mesuré séparément en cas de relevé séparé des processus du



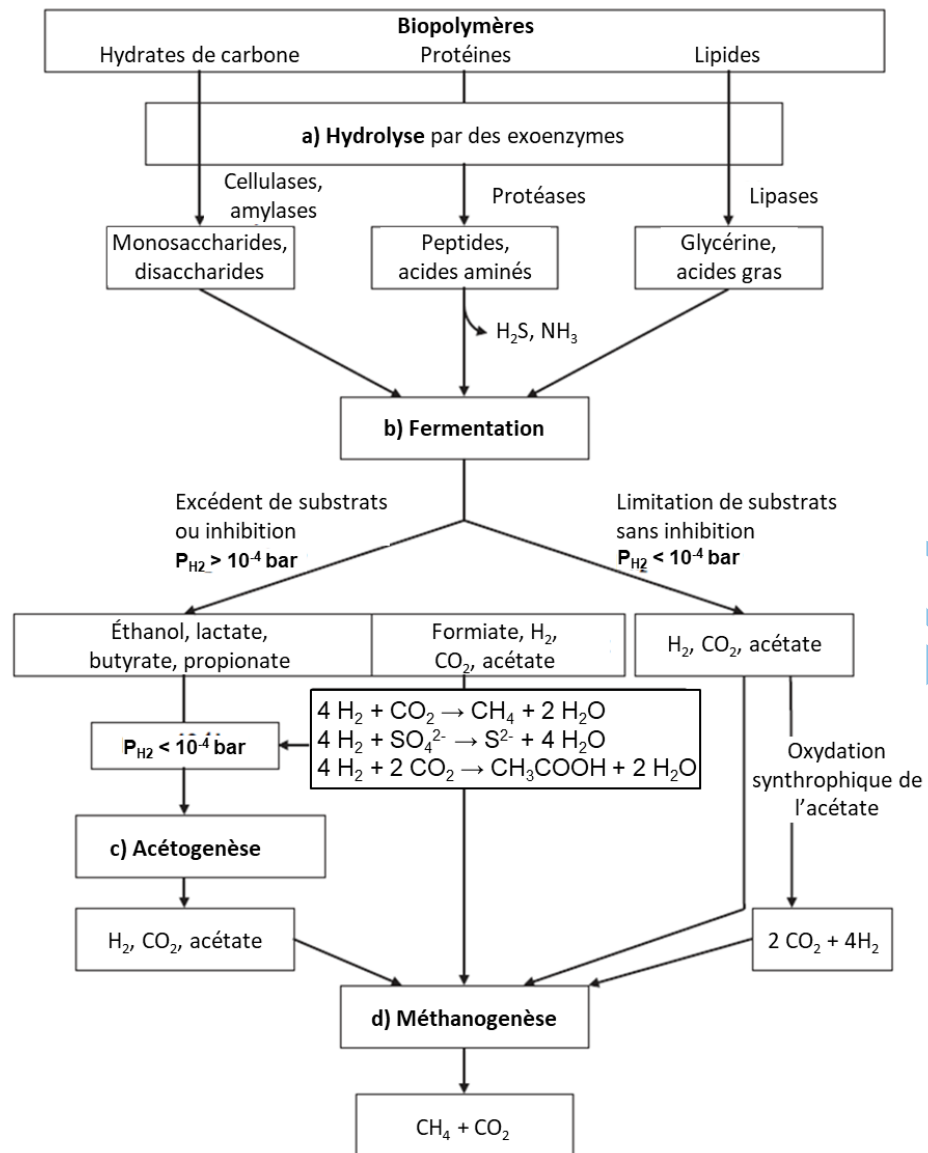
Point de mesure, point de prélèvement	Grandeur de mesure, grandeur d'analyse, grandeur dérivée	Signification - La grandeur résulte de U - La grandeur entraîne W ou la grandeur -> W - Autres significations	Valeur ou plage de valeurs optimale en ce qui concerne le critère indiqué (uniquement pour les paramètres)	Signification, conclusion si supérieure (uniquement pour les paramètres)	Signification, conclusion si inférieure (uniquement pour les paramètres)	Remarques
						digesteur et du Stockeur/épaisseur
	H2S	W : avec Q : charge de H2S (cp) W : problèmes de corrosion W : en tant que concentration de HS en phase liquide, toxique pour les processus de fermentation				Analogue à cellule supérieure
	H2	Analogue à « Sortie digesteur »	0,05 - 0,5 mg/l en phase liquide, converti en gaz (%) au moyen de la loi de Henry, pour une fermentation/des processus de biogaz équilibrés	Analogue à « Sortie digesteur »	Analogue à « Sortie digesteur »	Doit être mesuré séparément pour le digesteur et le Stockeur/épaisseur <b>Paramètre</b>
<b>Déshydratation des boues, entrée des flocculants (SCE-01)</b>	Q_flocculants	Améliore la déshydratabilité des boues				
<b>Déshydratation des boues, transfert à boues (SCE-02)</b>	Q	Quantité volumétrique de boues transférées (boues digérées) W : effort de transport, effort de séchage Grandeur cible à minimiser en ce qui concerne l'apport de boues				
	RS	W : avec Q : charge en tant que masse (cp) W : effort de transport, effort de valorisation Grandeur cible à minimiser en ce qui concerne l'apport de boues				
	RC	W : avec Q : Charge de RC (cp) W : effort de transport, effort de valorisation Grandeur cible à minimiser en ce qui concerne l'apport de boues				

Point de mesure, point de prélèvement	Grandeur de mesure, grandeur d'analyse, grandeur dérivée	Signification - La grandeur résulte de U - La grandeur entraîne W ou la grandeur -> W - Autres significations	Valeur ou plage de valeurs optimale en ce qui concerne le critère indiqué (uniquement pour les paramètres)	Signification, conclusion si supérieure (uniquement pour les paramètres)	Signification, conclusion si inférieure (uniquement pour les paramètres)	Remarques
	PAF	Analogue à cellule supérieure, pour PAF				Augmente la valeur calorifique
	DCO	Analogue à cellule supérieure, pour DCO				Analogue à cellule supérieure
	Ntot	W : avec Q : charge de Ntot (cp)				
	Ptot	W : avec Q : charge de Ptot (cp) W : effort de transport, effort de valorisation Récupération de P Grandeur cible à maximiser en ce qui concerne la récupération de P				
	Stot	W : avec Q : charge de Stot (cp)				
	Fe	Pour bilans de masse (contrôle des appareils de mesure)				
	BMP	Grandeur de laboratoire pour l'activité des boues livrées, potentiel de gaz résiduel, indicateur du fonctionnement optimal de l'ensemble de la cascade de processus de biogaz	0 – 50 l/kg de MSO : pour minimisation de l'activité des boues livrées, potentiel de gaz résiduel Pour un fonctionnement optimal de la cascade de production du biogaz	Problèmes de stockage, problèmes d'odeurs, pollution de l'environnement, santé, sécurité Au moins un processus de la chaîne n'a pas un fonctionnement optimal Cosubstrat peu ou lentement dégradé Surcharge de l'installation, RB trop élevée, SB trop élevée		Paramètre
Déshydratation des boues, sortie des eaux putrides (SCE-03)						
Entrée traitement des eaux putrides	Q	W : avec concentration : charge, pollution (cp)				

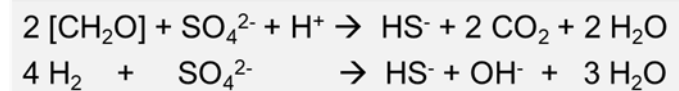
Point de mesure, point de prélèvement	Grandeur de mesure, grandeur d'analyse, grandeur dérivée	Signification - La grandeur résulte de U - La grandeur entraîne W ou la grandeur -> W - Autres significations	Valeur ou plage de valeurs optimale en ce qui concerne le critère indiqué (uniquement pour les paramètres)	Signification, conclusion si supérieure (uniquement pour les paramètres)	Signification, conclusion si inférieure (uniquement pour les paramètres)	Remarques
(FAB-01)						
	MES	W : avec Q : charge en tant que masse , pollution (cp)				
	Ntot	W : avec Q : charge de Ntot, pollution (cp)				
	Ptot	Analogue à cellule supérieure, pour Ptot				
	NH4	Analogue à cellule supérieure, pour NH4				
	Microplastiques	Analogue à cellule supérieure, pour microplastiques Sont inertes				
	Fe	Pour bilans de masse (contrôle des appareils de mesure)				
Plusieurs/tous points de mesure, points de prélèvement (AMO)	Charges toutes grandeurs (= quantités = masses/temps) F_grandeur	W : pollutions (cp) Rendements de dégradation absolus (cp) Productions de gaz absolues (cp) Quantités livrées absolues (cp)				
	Charge organique du digesteur RB	Évent. W : taux spéc. de dégradation (cp) Évent. productions spéc. de gaz (cp) Évent. potentiel méthane résiduel (cp) --> dépend de la cinétique des processus En cas de dosage élevé de cosubstrats, peut différer considérablement de la digestion pure ! (vaut également pour les indications de toutes les colonnes à droite !)	Compromis optimal avec le volume du réacteur (-> coûts) pour RB = 2,0 - 5,0 kg PAF/(d*m3) --> dépend de la cinétique des processus	Évent. taux spéc. de dégradation et productions spéc. de gaz insuffisants --> dépend de la cinétique des processus	Évent. taux spéc. de dégradation et productions spéc. de gaz plus élevés, mais généralement non rentable (volumes de réacteur importants) --> dépend de la cinétique des processus	Chiffres chapitre <b>Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.</b> et Rosenwinkel et al. (2015) <b>Paramètre</b>
	Charge de boues organiques SB	W : taux spéc. de dégradation (cp) Productions spéc. de gaz (cp) Potentiel méthane résiduel (cp)	SB pas encore répandu dans la pratique : pas encore de valeurs optimales disponibles	Taux spéc. de dégradation et productions spéc. de gaz insuffisants	Taux spéc. de dégradation et productions spéc. de gaz plus élevés (plus de « réserves » de biomasse active)	Le cas échéant, exclusivement dynamique lors de/après l'augmentation de la charge (charges de PAF), en fonction de

Point de mesure, point de prélèvement	Grandeur de mesure, grandeur d'analyse, grandeur dérivée	Signification - La grandeur résulte de U - La grandeur entraîne W ou la grandeur -> W - Autres significations	Valeur ou plage de valeurs optimale en ce qui concerne le critère indiqué (uniquement pour les paramètres)	Signification, conclusion si supérieure (uniquement pour les paramètres)	Signification, conclusion si inférieure (uniquement pour les paramètres)	Remarques
						la technique de procédé <b>Paramètre</b>
	Production de gaz Q <sub>gaz</sub>	Production de gaz convertie aux conditions normales				<b>Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., [2]</b>
	Production spécifique de gaz Q <sub>gaz_spc</sub>	Production de gaz/Charge PAF U : RB (cp), SB (cp), HRT (cp), SRT (cp), inhibitions/toxicités (cp)	$\eta$ *BMP/c <sub>CH4</sub> dans le gaz $\eta$ = facteur de transition du laboratoire à la réalité dans des conditions optimales = 0.9	Conditions de processus extrêmement favorables Erreur de mesure/d'analyse	RB, SB trop élevés HRT, SRT trop bas Inhibitions/Toxicités	$\eta$ , voir chapitre <b>Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.</b> <b>Paramètre si rapportée à l'installation</b>
	Production de méthane Q <sub>CH4</sub>	Analogue à production de gaz, mais avec facteur c <sub>CH4</sub> du gaz	Q <sub>gaz</sub> *c <sub>CH4</sub> du gaz			
	Production spécifique de méthane Q <sub>CH4_spc</sub>	Analogue à production spécifique de gaz, mais avec facteur c <sub>CH4</sub> du gaz U : analogue à production spécifique du gaz	$\eta$ *BMP $\eta$ = facteur de transition du laboratoire à la réalité dans des conditions optimales = 0.9	Conditions de processus extrêmement favorables Erreur de mesure/d'analyse	RB, SB trop élevés HRT, SRT trop bas Inhibitions/Toxicités	$\eta$ , voir chapitre <b>Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.</b> <b>Paramètre si rapportée à l'installation</b>
	Dégradation des PAF (dégradation de MSO) [%]	U : RB (cp), SB (cp), HRT (cp), SRT (cp), inhibitions/toxicités (cp)	40 – 60% pour la digestion Dépendant des cosubstrats en cas de codigestion	Digestion : Conditions de processus extrêmement favorables Erreur de mesure/d'analyse En plus, en cas de codigestion : dépendant des cosubstrats	Digestion : RB, SB trop élevés HRT, SRT trop bas Inhibitions/Toxicités En plus, en cas de codigestion : dépendant des cosubstrats	<b>Paramètre si rapportée à l'installation</b>
	HRT	Temps de contact pour les processus (cp)	13 – 25 d	Installation sous-chargée, volume de	Évent. RB trop élevée (voir colonne « Signification »),	Chiffres pour un taux de dégradation

Point de mesure, point de prélèvement	Grandeur de mesure, grandeur d'analyse, grandeur dérivée	Signification - La grandeur résulte de U - La grandeur entraîne W ou la grandeur -> W - Autres significations	Valeur ou plage de valeurs optimale en ce qui concerne le critère indiqué (uniquement pour les paramètres)	Signification, conclusion si supérieure (uniquement pour les paramètres)	Signification, conclusion si inférieure (uniquement pour les paramètres)	Remarques
		RB, si concentrations entrantes inchangées (cp)	(< SRT possible uniquement avec séparation des boues et rétention/recyclage)	construction trop élevée, très bonne dégradation et production de gaz	installation évent. surchargée, évent. mauvaise dégradation, évent. production de gaz faible --> dépend de la cinétique des processus En cas de dosage élevé de cosubstrats, peut différer considérablement de la digestion pure !	de 76 à 100 % de la part de boues dégradable (Allen et al., 2016) Digesteur et lit de boues Stockeur/épaississeur <b>Paramètre</b>
	SRT	Croissance biomasse active, multiplication des (groupes d')organismes	15 – 30 d (> HRT possible uniquement avec séparation des boues et rétention/recyclage)	Bonne dégradation (et production de gaz élevée), même avec substrats peu/lentement dégradables (cosubstrats) (croissance spécialistes dégradation)	Diminution à perte totale du rendement de dégradation et de la production de gaz suite au lessivage de la biomasse active	> 12 d (Rosenwinkel et al., 2015) Digesteur et lit de boues Stockeur/épaississeur <b>Paramètre</b>



### Respiration des sulfates:



**Figure 6** À gauche : Schéma de processus de la digestion anaérobie (Rosenwinkel et al., 2015). À droite : Processus anaérobies de sulfuration respiration des sulfates.

Version consultation

Version consultation



Association suisse des professionnels  
de la protection des eaux (VSA)  
Europastrasse 3  
Case postale, 8152 Glattbrugg  
sekretariat@vsa.ch  
[www.vsa.ch](http://www.vsa.ch)  
Tél. 043 343 70 70