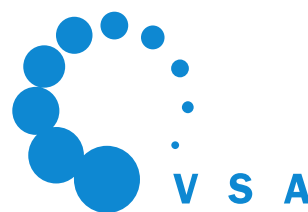


Verband Schweizer
Abwasser- und
Gewässerschutz-
fachleute

Association suisse
des professionnel·le·s
de la protection
des eaux

Associazione svizzera
dei professionisti
della protezione
delle acque

Swiss Water
Association



GESTION DES PROCESSUS DE DIGESTION ET DE CODIGESTION

Guide



Mentions légales

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 Rüsch-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 : Guide
Lieu : Glattbrugg
Année : 2025

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, Winterthour

Conception

VSA

Disponible chez

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

SOMMAIRE

1	Introduction	7
1.1	Groupe cible et utilisation	7
1.1.1	Limites	7
1.2	Conditions-cadres et bases	8
1.3	Principes complémentaires	8
2	Procédure d'évaluation et d'optimisation de l'exploitation	9
3	Évaluation de l'état actuel de la digestion et la codigestion	11
3.1	Paramètres des processus	11
3.2	Concept de mesure et d'analyse	12
3.2.1	Grandeurs et méthodes de mesure	12
3.2.2	Procédure d'élaboration d'un concept de mesure	14
3.2.3	Assurance qualité	14
3.3	Méthode d'évaluation de l'état actuel	14
3.3.1	Évaluation et interprétation des données de mesure et d'analyse	15
3.3.2	Limites du modèle	22
3.4	Évaluation de l'état actuel à l'aide de l'outil Excel	22
4	Conditions préalables à la codigestion	23
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	25
4.1.6	Expertise professionnelle	25
4.2	Méthode d'évaluation de l'extension de l'acceptation de cosubstrats	25
4.3	Logistique de la codigestion	27
4.4	Expérience de l'exploitation	27
5	Optimisations	28
5.1	Optimisation des processus	28
5.2	Optimisations de l'exploitation	28
6	Conclusions	30
6.1	Modèles et outils de paramètres	30

6.2	Discussions d'expert-e-s	30
7	Perspectives	31
7.1	Paramètres HRT, SRT, RB et SB	31
7.2	Méthodes d'analyse de données et réseaux neuronaux	31
7.3	Modèles dynamiques (et statiques) basés sur des réseaux neuronaux et sur des modèles mécanistes	31
7.4	Adéquation à la pratique des outils	31
8	Bibliographie	33
Annexe		34
A.1	Outil de calcul des paramètres et évaluation de l'inhibition (outils Excel) avec explications	34
A.2	Tableaux et figures relatifs au concept de mesure et à la méthode simple d'évaluation des processus	34
A.3	Méthodes d'analyse de données et réseaux neuronaux	56

LISTE DES ABREVIATIONS

AGV	Acides gras volatils (en allemand : FOS)
BMP	Potentiel biométhane (dans les calculs, l'indice Y_{CH_4} est utilisé à cet effet, voir ci-dessous)
CAP	Composés aromatiques polycycliques
CH_4	Méthane
COT	Carbone organique total
COV	Composés organiques volatils (volatile organic carbon)
DCO	Demande chimique en oxygène
Fe	Fer
Fe(IV)	Fer IV
H_2	Hydrogène
H_2O	Eau
H_2S	Hydrogène sulfuré
HAc	Acide acétique
HRT	Temps de séjour hydraulique (hydraulic retention time)
HS^-	Ion hydrogénosulfure
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.
MS	Matière sèche = résidu sec (voir RS)
MSO	voir PAF
NO_2	Nitrite
NO_3	Nitrate
NH_3	Ammoniac
N_{tot}	Composés azotés totaux
OFEN	Office fédéral de l'énergie
OFDF	Office fédéral de la douane et de la sécurité des frontières
PAF	Perte au feu = matière sèche organique (voir MSO)
P_{tot}	Composés phosphorés totaux
Q	Débit
RB	Charge organique du digesteur
RC	Résidu de calcination
RS	Résidu sec (voir MS)
SB	Charge de boues organiques
SRT	Temps de séjour des solides (boues) (sludge retention time)
S_{tot}	Composés soufrés totaux
T	Température
TAC	Composés inorganiques totaux du carbone (total anorganic carbon)
$\dot{V}$	Débit volumique
% vol.	Volume en pourcentage
Y_{biogaz}	Production de biogaz : volume de biogaz spécifique déterminé empiriquement en l_N/kg MSO-dégradée dans des conditions standard définies en laboratoire et généré par le traitement biologique anaérobie d'une quantité définie de matière organique utilisée dans l'essai.
Y_{CH_4}	Analogue à Y_{biogaz} pour du biométhane au lieu du biogaz. La grandeur correspond à la notion de potentiel biométhane (= BMP), souvent utilisée par ailleurs. En revanche, la taille ne correspond pas à la définition microbiologique du coefficient de rendement du biométhane Y_{CH_4} .

1 INTRODUCTION

La mission principale des STEP est la protection des eaux. Cependant, dans un environnement en constante évolution, les STEP sont toujours confrontées 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.

Le présent guide 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. Le guide 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.

Les auteur·rice·s de ce guide sont conscient·e·s que les résultats de ce travail sont complexes et concernant principalement les grandes installations. En outre, ce travail est une première étape dans le domaine de l'optimisation des processus de digestion dans les STEP. Il convient de souligner que les méthodes, concepts et outils élaborés devront être appliqués, vérifiés et optimisés dans une prochaine étape.

1.1 Groupe cible et utilisation

- STEP (groupe cible principal)
- Planificatrices et planificateurs
- Offices / autorités
- Entreprises d'élimination des déchets /entreprises industrielles et artisanales

Les STEP constituent le groupe cible principal de ce guide. L'analyse du fonctionnement d'une installation de digestion et l'estimation des réserves sont des thèmes particulièrement utiles 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 planificatrices et planificateurs ou les autorités peuvent également en profiter. 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 du présent guide 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 du présent guide 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

Le présent guide 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 exploitant·e·s restent ainsi nécessaires. Le guide 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 du présent guide repose sur la compréhension d'une installation de digestion. Celui-ci se compose des intrants (substrats et grandeurs perturbatrices), des grandeurs cibles et des produits de la digestion (voir Figure 1).

Le guide porte sur 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 le secteur de l'assainissement » [1].

Une analyse statique est effectuée et l'on part du principe que les réacteurs sont entièrement mélangés.

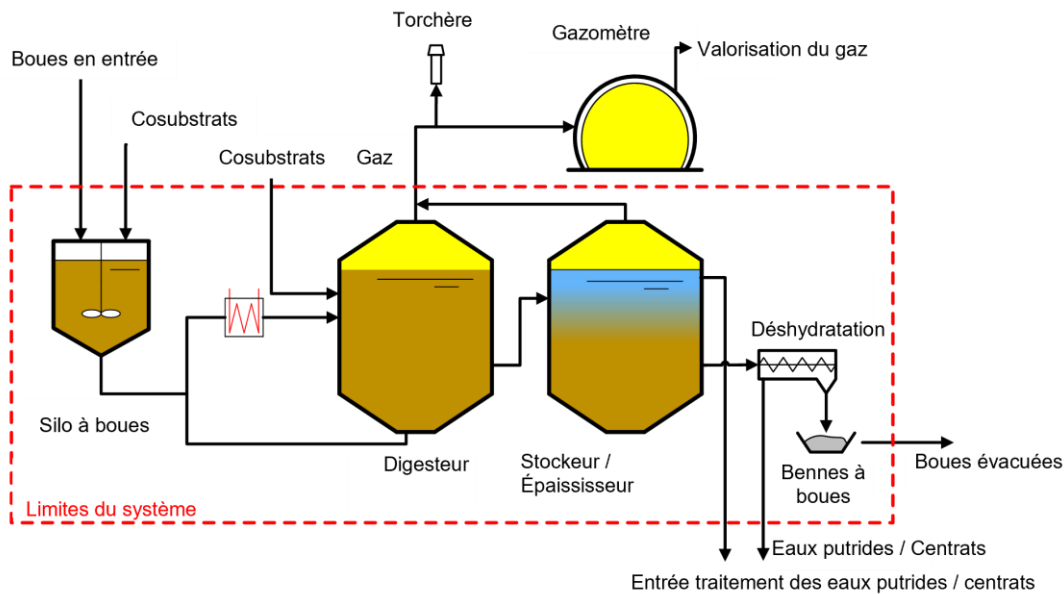


Figure 1 :
Limites du système :
exemple d'une installation
de digestion ou de
codigestion simple

1.3 Principes complémentaires

Pour de plus amples informations et principes, nous renvoyons au modèle mathématique ADM1 [2] ainsi qu'aux deux aide-mémoires DWA M-368 [3] et M-380 [4].

2 PROCEDURE D’EVALUATION ET D’OPTIMISATION DE L’EXPLOITATION

Les principales étapes de l’évaluation et l’optimisation de l’exploitation à l’aide du présent guide 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 du guide ainsi qu’à l’outil de calcul détaillé des paramètres (chapitre 3.4).

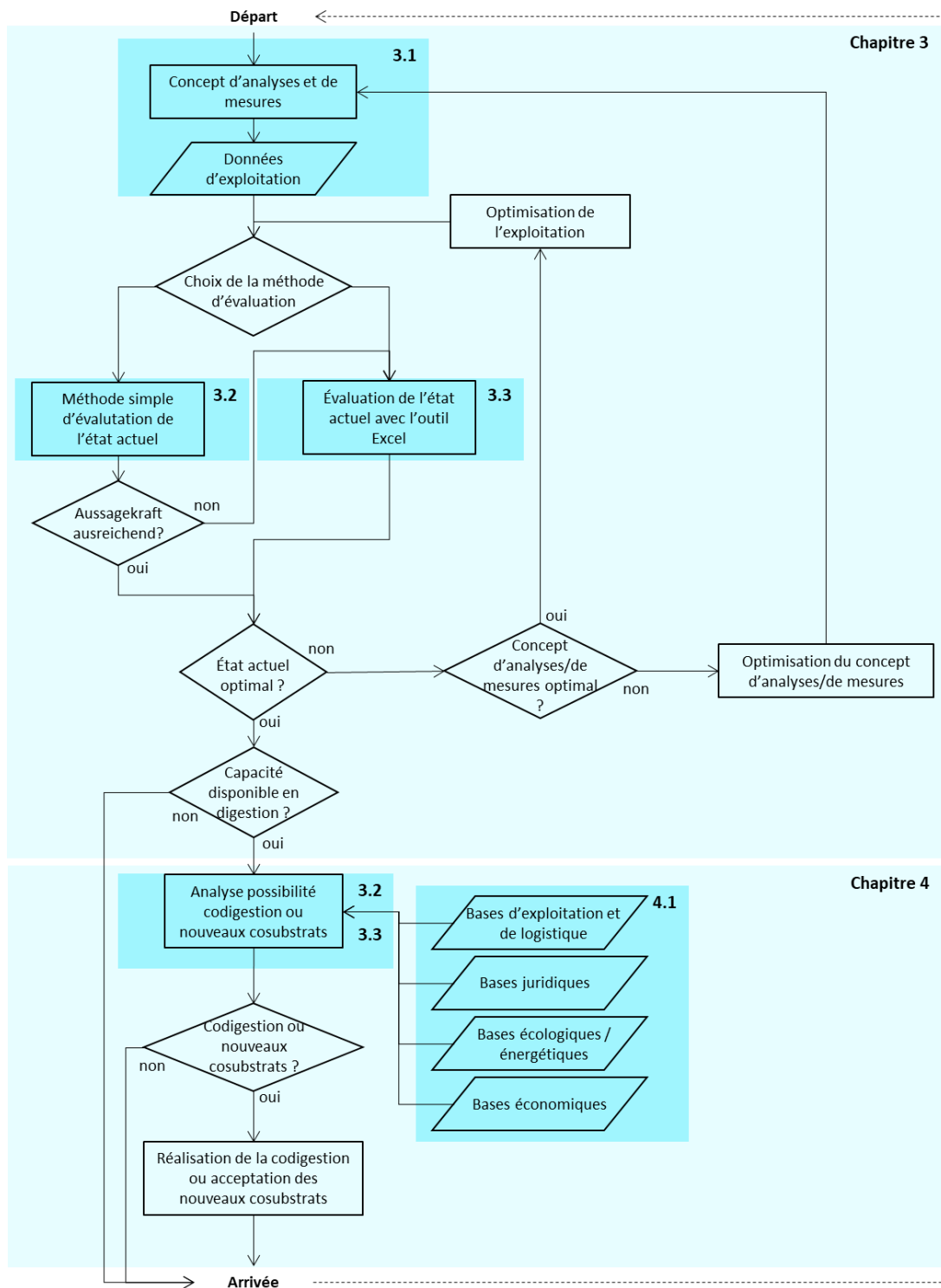


Figure 2 :
Procédure d'évaluation et d'optimisation de l'exploitation d'une installation de digestion ou de codigestion

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 ; elle 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 pour 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.

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 de la performance et de l'état de la digestion.

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 le secteur d'assainissement » [1], chapitre 7, page 214 propose probablement l'évaluation la plus simple. En partant d'une production moyenne de boues fraîches de 35 kg MS par an et par équivalent-habitant (EH), la production moyenne de gaz d'épuration est estimée à 8 Nm³ 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.

Le présent guide doit permettre une analyse plus approfondie. Les deux chapitres 3.3 et 3.4 ont pour objet de présenter à l'exploitant-e 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 le présent guide (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 (ρ)
- 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 gras)
- Concentration d'hydrogène du réacteur (H₂)

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 » désigner 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·e 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 « données d'analyse ».

La recommandation « Données d'analyse dans les STEP » [5] décrit une méthodologie pour le relevé et l'évaluation de données de mesure et d'analyse dans des stations d'épuration communales de différentes tailles. Pour la digestion ou la codigestion, le présent guide se base sur les affirmations et concepts de la recommandation « Données d'analyse dans les STEP ». 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 de flux 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 correspond à une collecte d'informations complète correspondant aux possibilités actuelles pour les grandes installations. Les installations plus petites déterminent en général un nombre moins important de grandeurs. Le diagramme de flux 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 de flux 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. L'annexe 1 de la recommandation « Données d'analyse dans les STEP » [5] regroupe les définitions et méthodes de détermination des grandeurs de mesure et d'analyse.

Les grandeurs de mesure des domaines d'activité suivants ne sont pas prises en compte dans le présent guide :

- 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.)

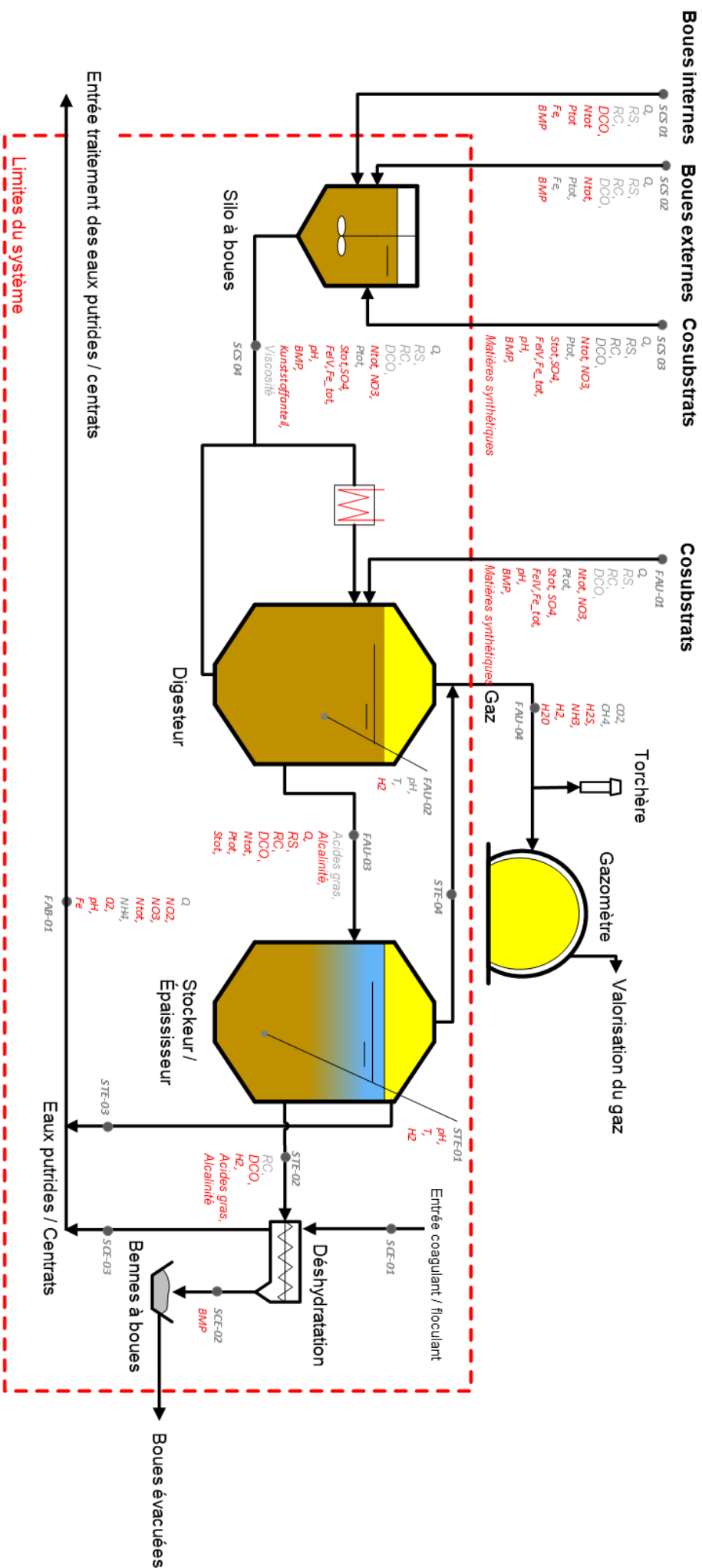


Figure 3 : Schéma de flux de base de la codigestion avec contenu informatif étendu [5] (compléments en rouge)

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.
- Les grandeurs de mesure dans le digesteur doivent notamment être déterminées pour chaque cuve, notamment en cas de montage en série.
- 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/épaississeur servent à déterminer le taux de dégradation global de RS, PAF et DCO et à analyser la production de gaz dans le stockeur/épaississeur (le Fe est uniquement utilisé pour les campagnes de bilan de masse).
- Le BMP des bennes à boues (paramètre) est dû à des problèmes de stockage ultérieurs (potentiel de méthane résiduel).
- Pour une analyse plus précise de la production de gaz dans le digesteur et dans le stockeur/épaississeur, les données relatives aux gaz devraient être relevées séparément pour les deux réacteurs (non indiqué dans la figure 3).
- Les installations avec une configuration de réacteur selon la figure 3 ne permettent pas de différencier le SRT du HRT (annexe : 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 de flux 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 conseillé de procéder selon le chapitre 4.3 de la recommandation « Données d'analyse dans les STEP » [5]. Par rapport à la codigestion/digestion dans la recommandation [5] « 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 digesteur et stockeur/épaississeur.

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-e 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 « Données d'analyse dans les STEP » [5] donne 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 fer, 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 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 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 repose sur les Tableau 1 – Tableau 3 en annexe et est présentée ci-après à l'aide de six diagrammes de déroulement reliés entre eux (diagrammes 1 – 6). La recommandation de procédure est construite de telle sorte 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 ou autres (connaissances préalables découlant de l'expérience pratique, connaissances d'expert-e-s, 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 présente un modèle de processus simple, majoritairement qualitatif, qui repose sur les connaissances relatives aux processus. Un schéma du processus de digestion anaérobie et du métabolisme du soufre permet d'illustrer les grandeurs et les indications du Tableau 3 (Illustration 4 en annexe). Le schéma représente les sous-processus de la digestion (hydrolyse, acidogenèse, acétogenèse, méthanogenèse).

Aucune feuille de calcul n'est fournie pour cette méthode, 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.

Remarques sur la procédure proposée :

- 1) Justification d'une approche 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/épaississeur), 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*HRT. C'est pourquoi il faut utiliser des valeurs moyennes sur 3*HRT (pas de résolution plus élevée), sinon l'erreur est trop importante. Les valeurs de mesure manquantes doivent être remplacées par des valeurs interpolées linéairement. Une feuille Excel ou un programme est nécessaire pour le calcul.
- 2) Rediscuter éventuellement de RB et SB, valeur maximale pour RB incertaine (RB, SB et chapitre 6.2).
- 3) 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.
- 4) La nécessité d'une valeur minimale pour HRT n'est pas certaine (HRT et chapitre 6.2).
- 5) 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.
- 6) Pour les boues internes et externes, utiliser en règle générale directement la valeur empirique de digestions optimales de 360 à 400 l_N CH₄/kg PAF au lieu de Y_{CH₄}* η_y.

Instructions:

Début → Parcourir les étapes → Fin

Si un calcul est nécessaire → Formule dans la case grise

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

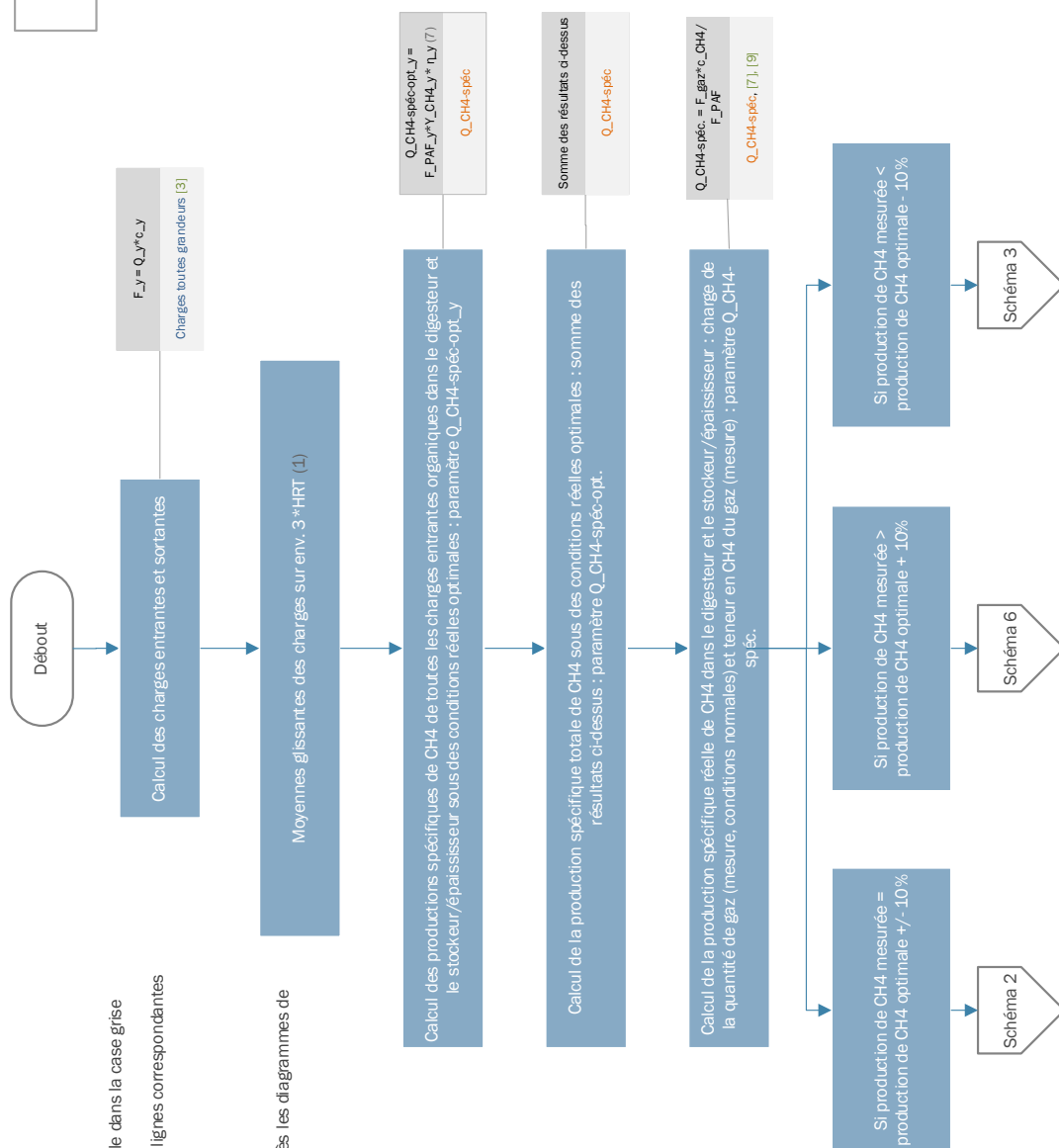
Bleu -> Tableau 1 en annexe

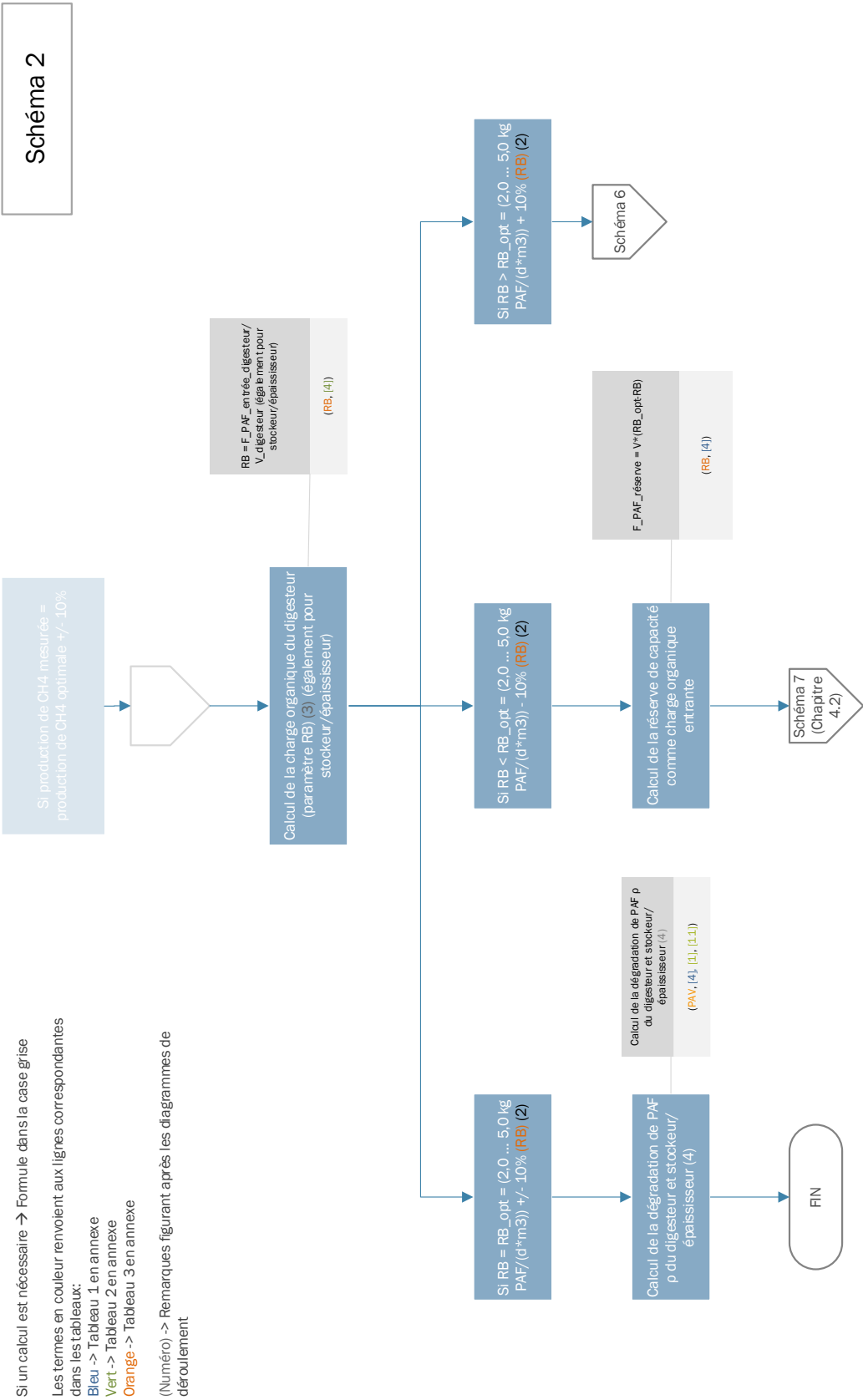
Vert -> Tableau 2 en annexe

Orange -> Tableau 3 en annexe

(Numéro) -> Remarques figurant après les diagrammes de déroulement

Schéma 1





Si un calcul est nécessaire → Formule dans la case grise

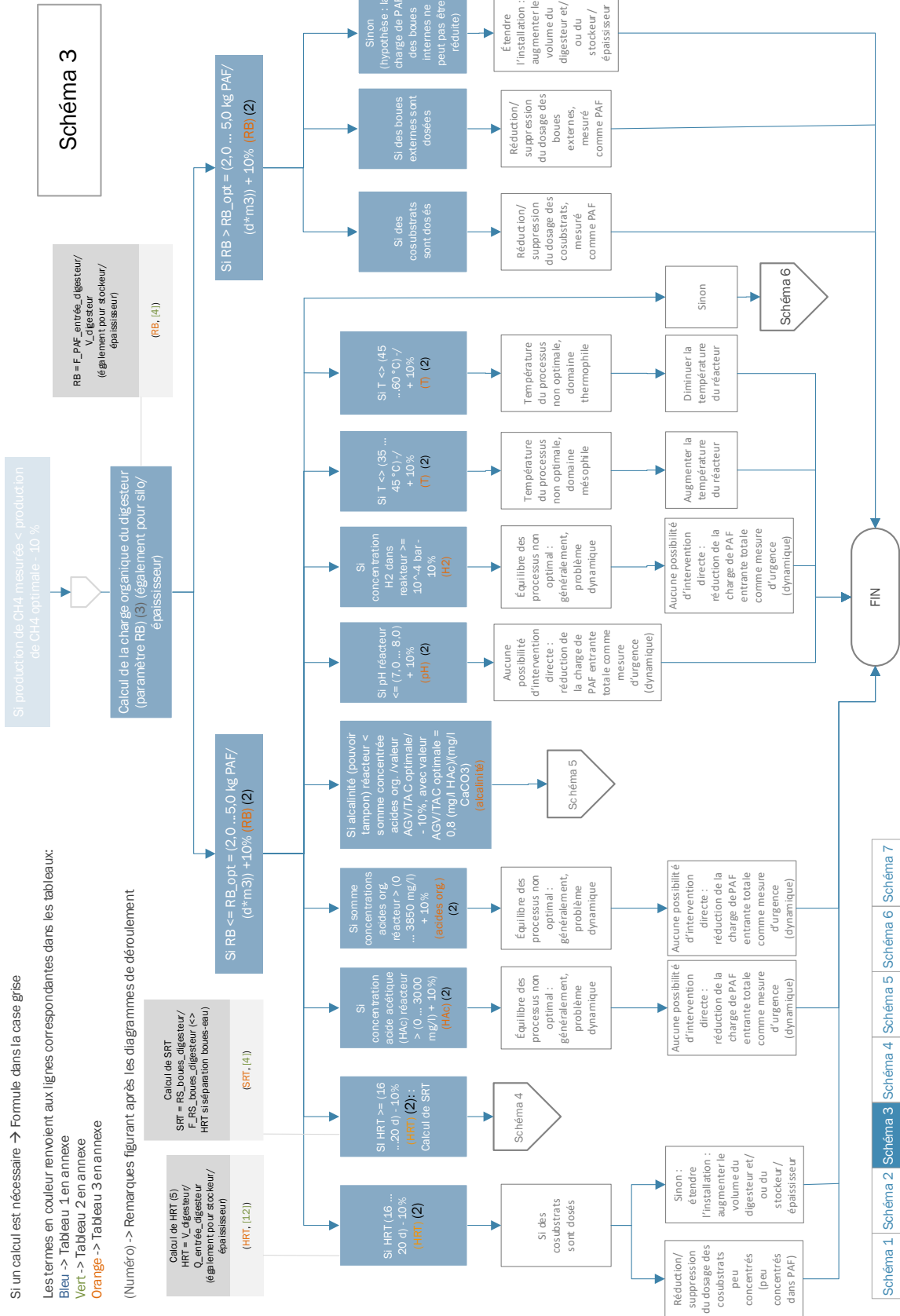
Les termes en couleur renvoient aux ligres correspondantes dans les tableaux:

Bleu → Tableau 1 en annexe

Vert → Tableau 2 en annexe

Orange → Tableau 3 en annexe

(Numéro) → Remarques figurant après les diagrammes de déroulement

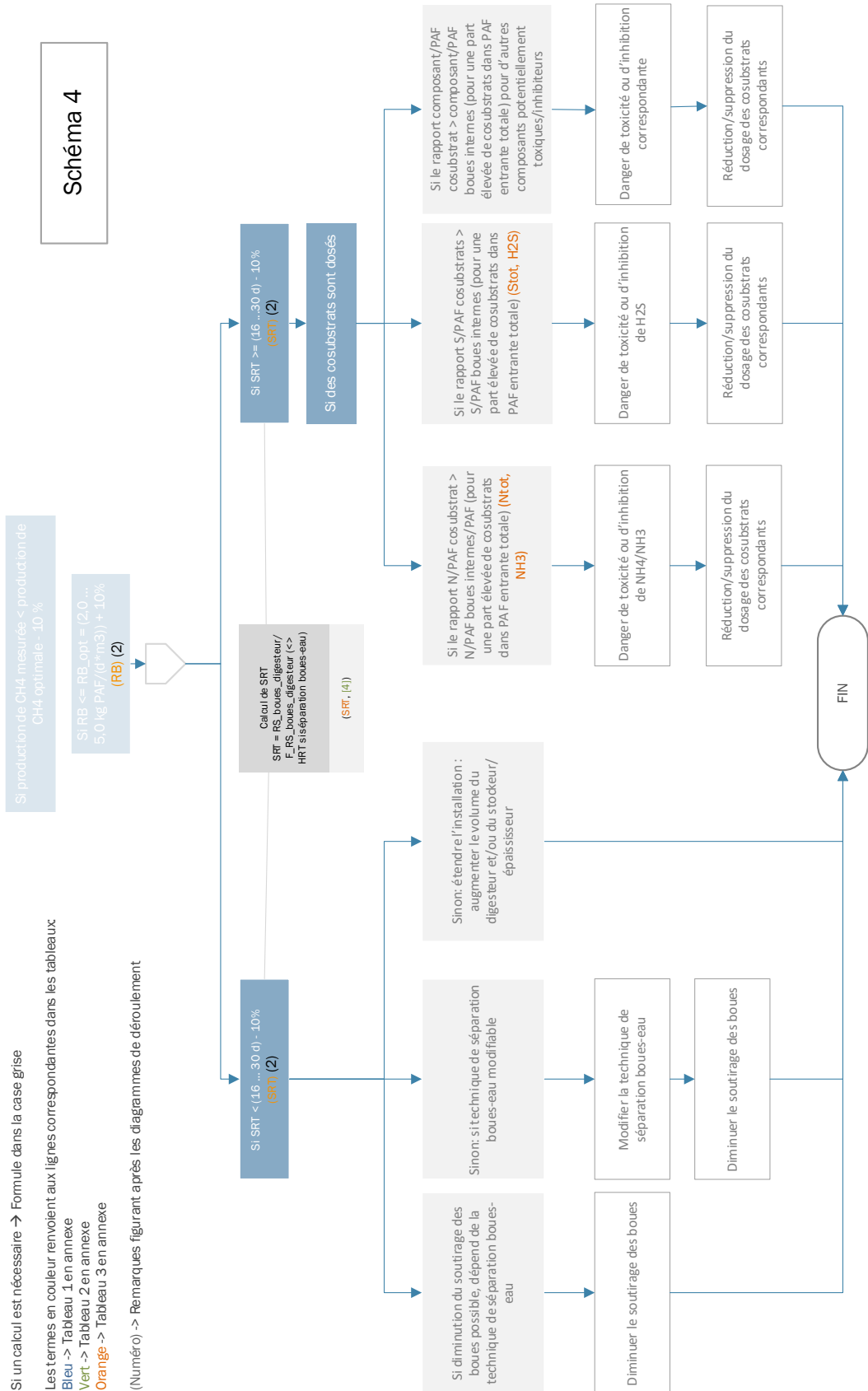


Si un calcul est nécessaire → Formule dans la case grise

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



Si un calcul est nécessaire → Formule dans la case grise

Les termes en couleur renvoient aux lignes correspondantes dans les tableaux

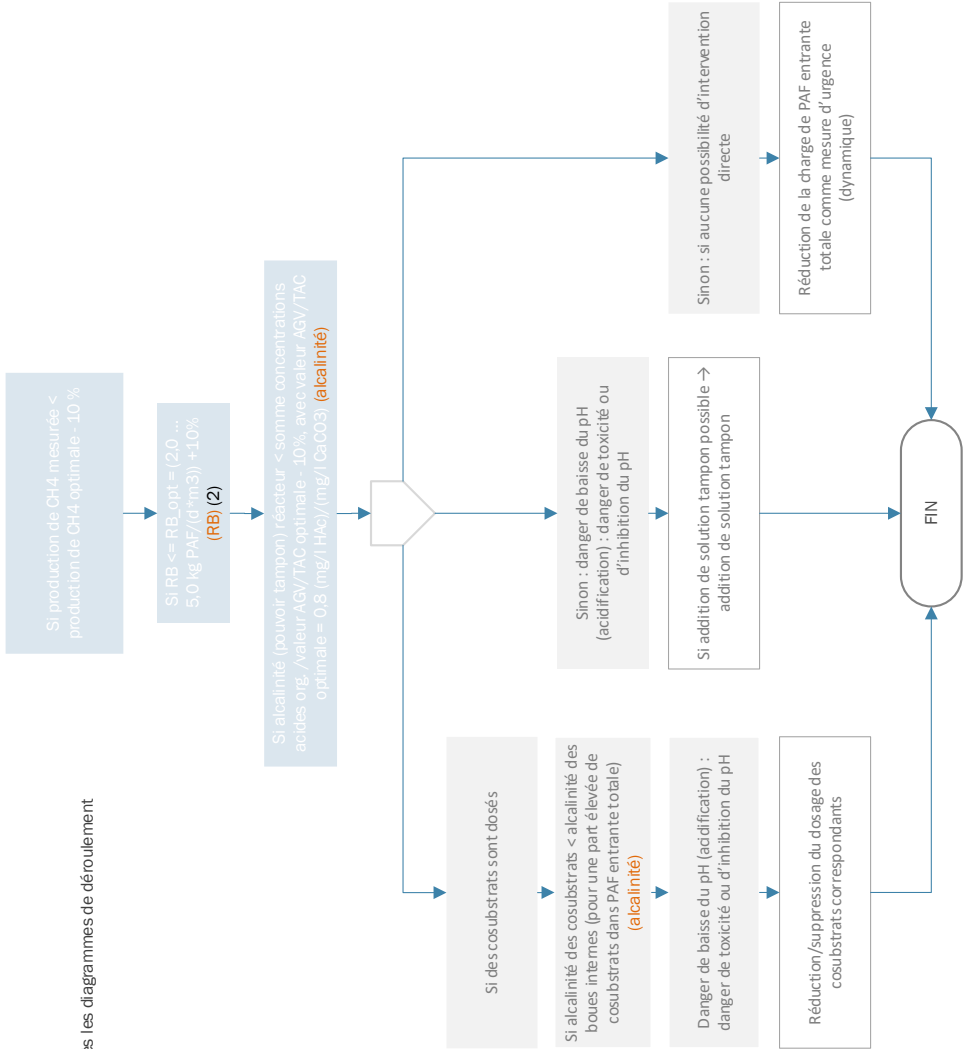
Bleu → Tableau 1 en annexe

Vert → Tableau 2 en annexe

Orange → Tableau 3 en annexe

(Numéro) → Remarques figurant après les diagrammes de déroulement

Schéma 5

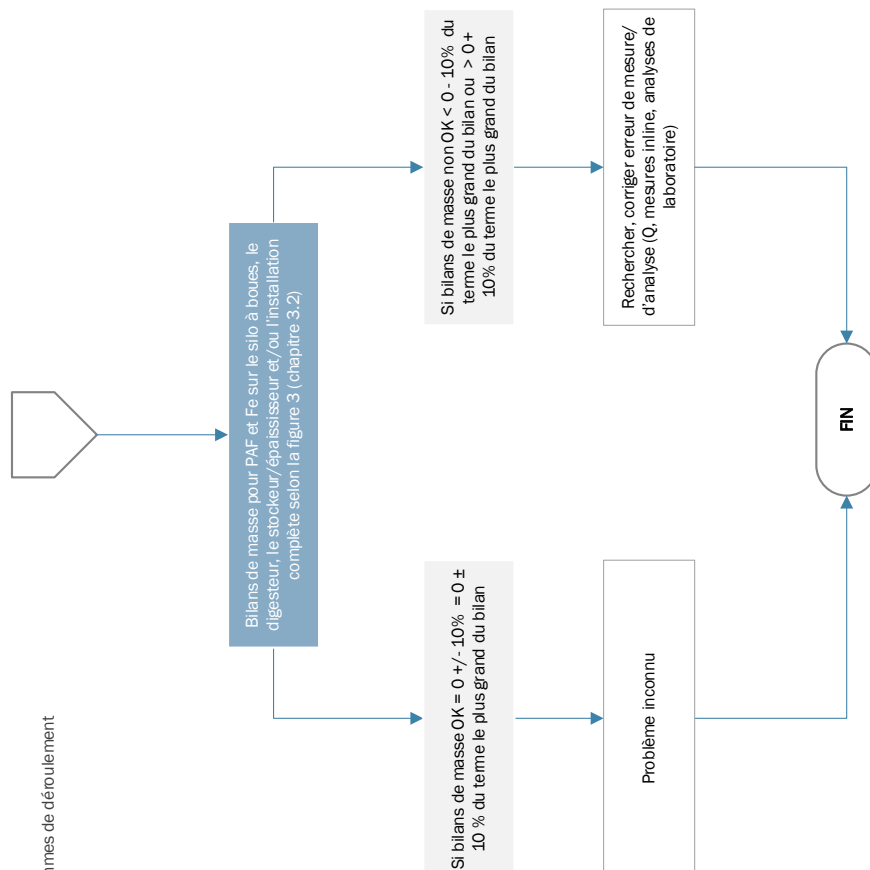


Si un calcul est nécessaire → Formule dans la case grise

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



3.3.2 Limites du modèle

Le modèle de la méthodologie décrite est en grande partie 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 dans l'outil Excel décrit au chapitre 3.4.
- Utilisation des indications de ce modèle dans un autre modèle numérique (quantitatif).
- Utilisation des indications résultant de ce modèle par l'exploitant-e directement sur l'installation et surveillance des modifications de l'exploitation (surveillance normale de l'exploitation, contrôle des résultats). Le résultat est ensuite à nouveau évalué à l'aide du modèle, 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 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 plus 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 au guide :

- 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 5).

Les points suivants constituent les principales extensions de l'outil des paramètres détaillé et de l'évaluation de l'inhibition par rapport à l'outil simple :

- base de données intégrée pour les rendements en méthane 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 dans Excel.

4 CONDITIONS PREALABLES A LA CODIGESTION

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

- Discussions d'expert·e·s entre des chef·fe·s d'exploitation de STEP et le groupe de suivi du présent guide ;
- Outil de travail pour la réception de cosubstrats ; [6]
- 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. 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 capacité 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.

Des considérations régionales doivent également être prises en compte : Y a-t-il d'autres installations de méthanisation dans la région ? La mise en place d'une codigestion dans la STEP entraîne-t-elle une situation de concurrence ? Y aurait-il éventuellement des synergies et une collaboration judicieuse ?

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 capacité). 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, il ne faut pas sous-estimer leur logistique (station de réception, balance, ...), leur traitement, leur stockage et leur dosage ultérieur. 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. L'odeur excessive ainsi que l'inflammabilité ou l'explosivité doivent également être prises en compte dans l'évaluation, sans oublier les aspects hygiéniques. Voir à ce sujet les informations dans l'aide-mémoire DWA M-380 [4].

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'exploitation, soumise au contrôle de l'office cantonal concerné, contient une liste des déchets validés et est en outre limitée dans le temps (généralement 5-10 ans). Le travail requis pour obtenir cette autorisation ne doit pas être sous-estimé.

Une codigestion fait d'une STEP un producteur d'énergie. Or, il est demandé aux producteurs d'énergie de pouvoir expliquer comment les matières premières utilisées pour la production d'énergie sont produites. Cela signifie que la méthode de production de chaque cosubstrat doit être indiquée, ce qui implique une charge administrative considérable.

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 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·e 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.
- Si le gaz d'épuration produit une source d'énergie renouvelable destinée à la vente (biométhane ou électricité), les cosubstrats doivent figurer sur une liste positive de l'OFDF (anciennement Direction générale des douanes) et donc être considérés comme des déchets biogènes ou des résidus de production.

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 :

- les cosubstrats conviennent-ils à l'ajout dans le digesteur (vérification par essais de dégradation) ?
- 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 ;
- émissions de méthane de l'installation de fermentation : la codigestion génère une production accrue de gaz. Il convient de prendre des mesures pour éviter les émissions de méthane (p. ex. silo à boues couvert et raccordé à l'installation de gaz) et d'estimer le potentiel de méthane résiduel dans les boues digérées.
- 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·e 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 :

- achat éventuel de cosubstrats ;
- transport des cosubstrats ;
- coûts d'investissement pour la station de réception et le traitement des cosubstrats ;
- coûts énergétiques pour le chauffage du cosubstrat ;
- coûts de personnel supplémentaires ;
- coûts supplémentaires d'élimination des boues ;
- traitement supplémentaire des eaux putrides.

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 retours issus de la codigestion dans la filière de traitement des eaux de la STEP ainsi que d'une éventuelle inhibition du traitement biologique par les retours.

Il faut tenir compte du fait que, selon l'emplacement du prélèvement d'échantillons d'entrée, de tels flux internes peuvent ne pas être détectés et que, par conséquent, la charge en azote effective due aux retours dans le traitement biologique n'est pas immédiatement visible.

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 ne sont pas autorisés dans une codigestion et pourraient en outre inhiber les processus. Les composés traces organiques tels que les inhibiteurs de corrosion, les pesticides, etc. peuvent également entraver les processus.

L'inhibition du processus peut se manifester par la formation de mousse ou l'augmentation des acides gras. De plus, il faut également veiller à ce qu'aucune substance critique comme le bromure ou les nitrosamines (à éviter dans l'étape de traitement des micropolluants) ne parvienne dans les eaux usées via le dosage des cosubstrats.

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 d'évaluation de l'extension de l'acceptation de 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.

La procédure d'extension de la méthode est représentée ci-dessous.

Si un calcul est nécessaire → Formule dans la case grise

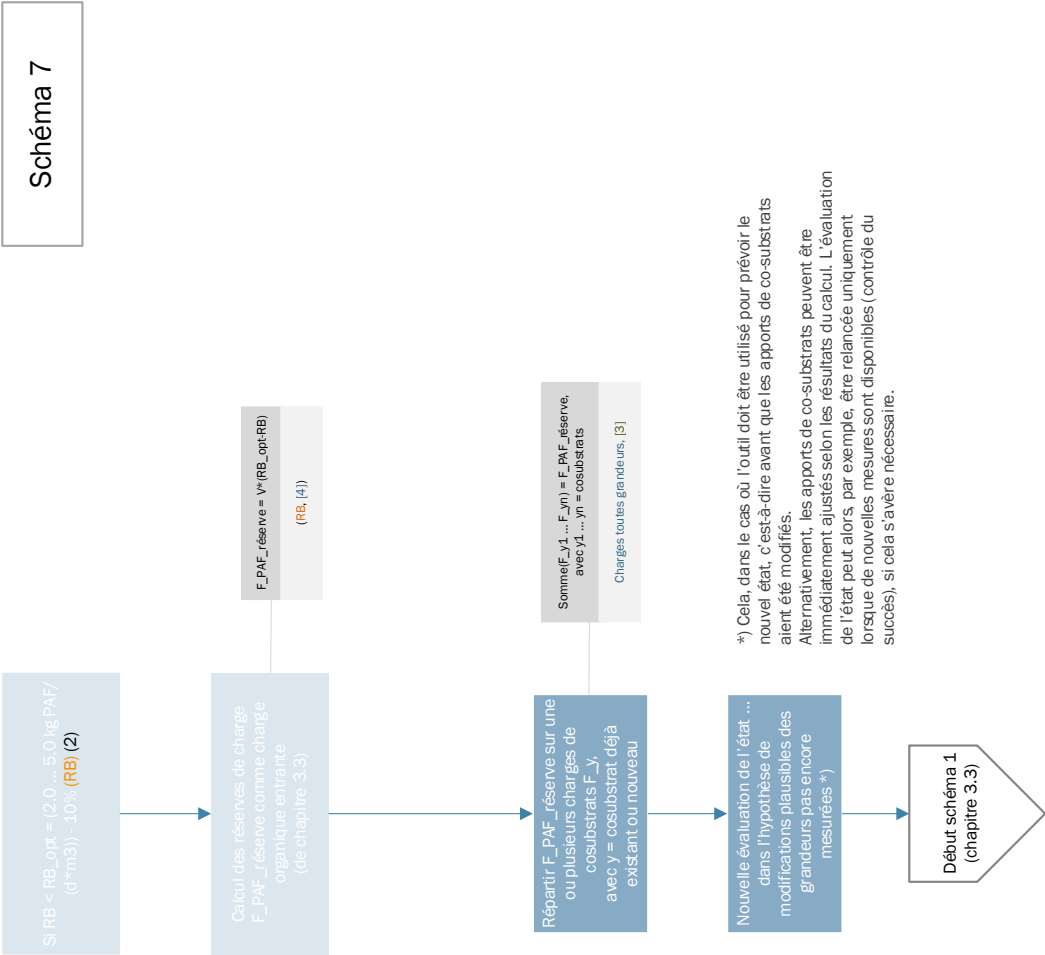
Les termes en couleur renvoient aux lignes correspondantes dans les tableaux

Bleu → Tableau 1 en annexe

Vert → Tableau 2 en annexe

Orange → Tableau 3 en annexe

(Numéro) → Remarques figurant après les diagrammes de déroulement



4.3 Logistique de la codigestion

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

Il n'est pas prévu que le présent guide couvre une mise en œuvre de la codigestion qui inclut 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 :

- **Odeur** : un espace fermé pour la réception (sas pour camions) empêche les nuisances olfactives dans l'environnement. Le cas échéant, un raccordement ou la réalisation d'une installation d'évacuation d'air vicié (avec filtre) est nécessaire.
- **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 toutes les mesures mises en place pour les éviter, les dépôts au fond du digesteur finiront par entraîner une réduction de la capacité de celui-ci au fil du temps. La vidange et le nettoyage réguliers doivent donc être prévus par l'entreprise.
- **Traçabilité des cosubstrats** : il doit être possible de prouver à tout moment de quelles sources proviennent les cosubstrats utilisés.

4.4 Expérience de l'exploitation

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

L'expérience en matière d'exploitation est importante sur toute installation, quel que soit le processus. Le but du présent guide et ses annexes n'est pas d'entrer en concurrence avec l'expérience de l'exploitation, mais de la renforcer.

En plus des calculs et des autres critères de la codigestion déjà mentionnés, de nombreux autres facteurs (qui ne peuvent pas être abordés ici) 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 le présent guide. Dans tous les cas, il vaut la peine d'échanger avec les STEP qui pratiquent la codigestion dans le cadre de la planification et de profiter de leurs expériences.

5 OPTIMISATIONS

Pour les optimisations d'installations de digestion et de codigestion, on distingue les optimisations des processus et les optimisations de l'exploitation.

5.1 Optimisation des processus

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.

Il est possible d'optimiser les processus en comparant l'état actuel de l'installation à un état idéal théorique. Cela peut se faire à l'aide d'outils tels que décrits au chapitre 3, en particulier au chapitre 3.4. La comparaison avec les paramètres théoriquement possibles permet d'estimer le potentiel d'optimisation.

Les analyses stationnaires et les outils de ce guide ne se prêtent toutefois 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). Notamment lorsqu'il s'agit d'élaborer des possibilités de régulation (p. ex. pour une compensation des charges, etc.), cela ne peut se faire qu'au moyen d'une approche dynamique.

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 (voir aussi chapitre 6.2). Les données devraient être disponibles dans une résolution nettement plus élevée. Pour ce faire, il faudrait probablement davantage de sondes en ligne/d'analyseurs.

On peut indiquer les potentiels d'optimisation suivants avec des méthodes/outils stationnaires :

En général :

- Mesure ciblée et continue de paramètres importants pour pouvoir procéder à une évaluation de l'état
- Inspections et nettoyages afin de détecter et d'éliminer les influences perturbatrices suffisamment tôt
- Prétraitement des boues internes et externes (non étudié dans le projet)

En cas de surcharge de l'installation :

- Réduction de la charge (charges entrantes)
- Augmentation du volume du digesteur
- En cas de fonctionnement en série : Passage au fonctionnement parallèle
- Éventuellement, transformation pour un mode de fonctionnement thermophile
- Éventuellement conversion vers un procédé avec rétention des boues (les bases manquent actuellement)
- Codigestion : Réduction des quantités de cosubstrats, éventuellement suppression complète.

En cas de sous-charge (réserves de capacité) :

- Augmentation de la charge par l'acceptation de boues externes (supplémentaires)
- Passage à la codigestion
- Pour les installations de codigestion : Augmentation de la charge en acceptant des quantités supplémentaires/plus importantes de cosubstrats

En cas de charge optimale d'une codigestion :

- Modifications éventuelles des cosubstrats (composition, proportions) pour optimiser la dégradabilité, la production de méthane/gaz, les digestats, les inhibitions, les charges des retours, etc.

5.2 Optimisations de l'exploitation

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. La liste suivante ne prétend pas être

exhaustive, mais doit servir de source d'inspiration pour les domaines dans lesquels une installation présente un potentiel d'optimisation :

Sur le plan **financier**, des optimisations sont envisageables dans les domaines suivants :

- Réduction des coûts de transport (évent. concept de transport optimisé tel que conteneurs plus grands, trajets combinés, mais aussi taux de déshydratation plus élevé pour les faibles volumes de transport, distances plus courtes en raison d'un changement de fournisseur/d'acheteur, etc.)
- Réduction des coûts énergétiques grâce à des installations plus efficaces sur le plan énergétique, meilleure exploitation du gaz, meilleure isolation (moins de pertes de chaleur)
- Réduction des charges de personnel grâce à des optimisations des processus d'exploitation, processus nécessitant moins de maintenance, charge administrative aussi faible que possible (notamment en cas de codigestion)
- Utilisation des subventions disponibles pour les énergies renouvelables et mesures de réduction des émissions de gaz à effet de serre

Des optimisations **écologiques** sont possibles à bien des égards :

- Réduction des besoins énergétiques pour le chauffage du digesteur ou le pompage des boues
- Optimisation du bilan global de l'impact environnemental (p. ex. en examinant si une codigestion, y compris le transport des cosubstrats et un rendement de dégradation supplémentaire de l'étage biologique, est judicieuse ou non du point de vue des émissions de gaz à effet de serre)
- Mesures visant à atteindre les objectifs Zéro Net (p. ex. réduction des émissions de protoxyde d'azote dans la biologie, ce qui est notamment lié aux retours contenant de l'azote provenant du traitement des boues)
- Réduction des émissions de gaz à effet de serre en évitant des fuites du biogaz issu de la fermentation et du stockage des boues
- Éviter les longues distances de transport – p. ex. pour l'évacuation des boues
- Optimisation de la gestion de la chaleur – p. ex. en couvrant si possible la totalité des besoins en chaleur par la production propre. Cela peut avoir pour conséquence de réduire la production d'électricité par le biogaz, mais de supprimer par exemple l'utilisation de combustibles fossiles pour le chauffage.

Les mesures d'optimisation logistiques nécessitent des réflexions sur les thèmes suivants :

- Processus de transport : livraison et évacuation des boues/cosubstrats, logistique sur le site de la STEP, espace nécessaire pour les gros véhicules, etc.
- Processus de stockage : place nécessaire, mesures d'exploitation pour permettre les livraisons de cosubstrats (ou de boues externes)
- Mise en digestion : mesures nécessaires jusqu'à ce que les cosubstrats (ou boues externes) soient traités et amenés en digestion. Le temps de préparation peut varier ici fortement, notamment en fonction du choix des cosubstrats.

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 nous l'avons déjà mentionné au chapitre 4.4, de telles optimisations de l'exploitation ne doivent toutefois être mises en œuvre qu'avec prudence et avec la collaboration des spécialistes correspondants.

Pour d'autres mesures concernant l'optimisation d'une installation de digestion ou de codigestion, nous renvoyons en outre à l'aide-mémoire DWA M380 [4].

6 CONCLUSIONS

La question à la base du présent guide 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'expert·e·s (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 le guide 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 Modèles et outils de paramètres

Les deux outils de calcul des paramètres décrits aux chapitres 3.3 et 3.4 sont au « cœur » du guide. 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 exploitant·e·s 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).

6.2 Discussions d'expert·e·s

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'expert·e·s 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'expert·e·s 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.

7 PERSPECTIVES

7.1 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).

7.2 Méthodes d'analyse de données et réseaux neuronaux

Le projet a réalisé des analyses de corrélation simples et étudié l'utilisation de réseaux neuronaux pour prévoir les processus. Les résultats sont rassemblés dans l'annexe A.3.

Ces premiers résultats sont pour nous une motivation à conduire des études supplémentaires en utilisant des méthodes d'analyse de données et des réseaux neuronaux. Sur la base de l'hypothèse formulée en annexe, 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.

7.3 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 du présent guide, 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 du présent guide (par exemple les approches multivariées) pourraient également y être ajoutées.

7.4 Adéquation à la pratique des outils

Les outils du guide 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 exploitant·e·s eux-mêmes ou elles-mêmes et accompagnés, par exemple, par le VSA, des bureaux d'ingénieur·e·s 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. Cela pourrait également être réalisé en tant que projet consécutif à ce guide.

8 BIBLIOGRAPHIE

- [1] VSA, Énergie dans le secteur de l'assainissement - Guide, Glattbrugg, 2026.
- [2] D. Bastone, J. Keller, I. Angelidaki, S. Kalyuzhnyi, S. Pavlostathis, A. Rozzi, W. Sanders, H. Siegrist et V. Vavilin, «The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1),» *Water Science and Technology*, vol. Vol 45, n° 10, pp. 65-73, 2002.
- [3] DWA, Merkblatt DWA-M 368 "Biologische Stabilisierung von Klärschlamm", Hennef, 2014.
- [4] DWA, Merkblatt DWA-M 380 "Co-Vergärung in kommunalen Klärschlammfaulbehältern, Abfallvergärungsanlagen und landwirtschaftlichen Biogasanlagen", Hennef, 2020.
- [5] VSA, Analytikdaten auf ARA - Empfehlung, Glattbrugg.
- [6] S. A. Fasel A., Arbeitshilfe für die Annahmen von Co-Substraten, Herrenschwanden, 2019.
- [7] K.-H. Rosenwinkel, H. Kroiss, N. Dichtl, C.-F. Seyfried et P. Weiland, *Anaerobtechnik: Abwasser-, Schlamm- und Reststoffbehandlung, Biogasgewinnung*, Springer, 205.
- [8] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, «Leitfaden Biogas - Von der Gewinnung zur Nutzung,» <https://mediathek.fnr.de/leitfaden-biogas.html>, Zugriff 2020.
- [9] E. Allen, D. Wall, C. Herrmann et J. Murphy, «A detailed assessment of resource of biomethane from first, second and third generation substrates,» *Renew. Energy*, vol. 87, pp. 656-665, 2016.
- [10] DWA, Arbeitsblatt DWA-A 131 "Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen", Hennef, 2016.

ANNEXE

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

Ces outils et les instructions sont joints séparément au guide.

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 Figure 3, avec les fréquences de mesure recommandées. Les grandeurs dérivées (calculées) sont également indiquées. [5], modifiée

Tableau 2 : Formules de calcul pour les grandeurs calculées (dérivées) du Figure 3 [5], modifié

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 [7]) et processus anaérobie de sulfuration : respiration des sulfates.

Tableau 1 : Grandeurs de mesure et d'analyse selon Figure 3, avec les fréquences de mesure recommandées. Les grandeurs dérivées (calculées) sont également indiquées. [5], 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 Tableau 2, formule [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	
	N _{tot}	mg/l	Analyses de laboratoire	Deux fois par semaine, une fois par semaine	Dynamique de la composition des boues	
	P _{tot}	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	
	Y _{CH4}	l _N /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	
	PAF	Analogue à RC	Calculée à partir de RS et RC	Analogue à RS	Analogue à RS	Calcul Tableau 2, formule [1]

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
	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	
	N _{tot}	mg/l	Analyses de laboratoire	Deux fois par semaine, une fois par semaine	Dynamique de la composition des boues	
	P _{tot}	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	
	Y _{CH4}	l _N /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 Tableau 2, formule [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
	N _{tot}	mg/l	Analyses de laboratoire	Variable	Fonction du cosubstrat ou de la production de cosubstrat	Justificatif par les fournisseurs des cosubstrats
	P _{tot}	mg/l	Analyses de laboratoire	Variable	Fonction du cosubstrat ou de la production de cosubstrat	Justificatif par les fournisseurs des cosubstrats
	S _{tot}	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
	NO ₃	mg/l	Analyses de laboratoire	Variable	Fonction du cosubstrat ou de la production de cosubstrat	Justificatif par les fournisseurs des cosubstrats
	NO ₂	mg/l	Analyses de laboratoire	Variable	Fonction du cosubstrat ou de la production de cosubstrat	Justificatif par les fournisseurs des cosubstrats
	SO ₄	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
	Y _{CH4}	l _N /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 Tableau 2, formule [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	
	N _{tot}	mg/l	Analyses de laboratoire	Deux fois par semaine, une fois par semaine	Dynamique de la composition des boues	
	P _{tot}	mg/l	Analyses de laboratoire	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
	NO ₃	mg/l	Analyses de laboratoire	Deux fois par semaine, une fois par semaine	Dynamique de la composition des boues	
	NO ₂	mg/l	Analyses de laboratoire	Deux fois par semaine, une fois par semaine	Dynamique de la composition des boues	
	SO ₄	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	
	Y _{CH4}	l _N /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 Tableau 2, formule [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 Paramètre	Tous les six mois et en cas de problèmes de fonctionnement	Indique des problèmes dans la chaîne de processus anaérobies	
	Acides gras. (somme acide acétique + acide propionique + acide butyrique)	g/l	Analyses de laboratoire Paramètre	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
	+ acide iso-butyrique + acide valérianique + acide iso-valérianique)					
	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		
	Y _{CH4}	l _N /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 Tableau 2, formule [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 Paramètre	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 + acide iso-butyrique + acide valérianique + acide iso-valérianique)	g/l	Analyses de laboratoire Paramètre	Tous les six mois et en cas de problèmes de fonctionnement	Indique des problèmes dans la chaîne de processus anaérobies	
	H ₂	mg/l	Mesure inline, paramètre			

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
	Alcalinité (pouvoir tampon)	meq/l	Analyses de laboratoire	Tous les six mois et en cas de chute du pH		
	Y _{CH4}	l _N /kg de PAF	Analyses de laboratoire	Tous les six mois	Dégradabilité, contrôle des processus dans stockeur/épaississeur	
Stockeur/épaississeur, sortie des eaux putrides (STE-03)						
Gaz (FAU-04 et STE-04)	Q	l/s	Mesure inline (avec calcul)			Gaz séché, condensat retourné directement dans le digesteur et le silo à boues. En l _N /s : calcul Tableau 2, formule [2]
	CH ₄ , CO ₂ , NH ₃ , H ₂ S	%	Mesure inline			
	H ₂	%	Mesure inline, paramètre			
Déshydratation des boues, entrée des floculants (SCE-01)	Q_floculants	l/s	Mesure inline			
Déshydratation des boues, transfert bennes à boues (SCE-02)	Q	l/s	Mesure inline			De plus, les masses évacuées (pertinentes en termes de coûts et donc fiables) peuvent être utilisées comme contrôle pour le bilan de masse.
	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, formule [1]
	DCO	g/l	Analyses de laboratoire	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
			(échantillon, évent. moyenne de plusieurs dans un échantillon composite)			
	N _{tot}	mg/l	Analyses de laboratoire	Deux fois par semaine, une fois par semaine	Dynamique de la composition des boues	
	P _{tot}	mg/l	Analyses de laboratoire	Deux fois par semaine, une fois par semaine	Dynamique de la composition des boues	
	S _{tot}	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	
	Y _{CH4}	l _N /kg de PAF	Analyses de laboratoire Paramètre	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	
	N _{tot}	mg/l	Analyses de laboratoire	Deux fois par semaine, une fois par semaine	Dynamique de la composition des boues	
	P _{tot}	mg/l	Analyses de laboratoire	Deux fois par semaine, une fois par semaine	Dynamique de la composition des boues	
	NH ₄	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	Charges toutes grandeurs (= quantités = masses/temps)	kg/d	Calculée			Calcul Tableau 2, formule [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
(AMO)	F_grandeur					
	Charge organique du digesteur RB	kg PAF/m ³ /d	Calculée, paramètre			PAF = MOS / Calcul Tableau 2, formule [4]
	Charge de boues organiques SB	kgPAF/kg_RS_boues/d	Calculée, paramètre			Calcul Tableau 2, formule [5]
	Production de gaz Q_gaz	l _N /s, m ³ _N /a	Calculée			Gaz séché Calcul Tableau 2, formule [6]
	Production spécifique de gaz Q_gaz_spéc	l _N /kgPAF	Calculée, paramètre si rapportée à l'installation			Calcul Tableau 2, formule [7]
	Production de méthane Q_CH4	l _N /s, m ³ _N /a	Calculée			Calcul Tableau 2, formule [8]
	Production spécifique de méthane Q_CH4_spéc	l _N /kgPAF	Calculée, paramètre si rapportée à l'installation			Calcul Tableau 2, formule [9]
	Y _{CH4s}	l _N /kgPAF	Calculée, paramètre si rapporté à la sortie			Détermination en laboratoire, conditions normalisées Calcul Tableau 2, formule [10]
	Dégradation de PAF (dégradation de MSO)	%	Calculée, paramètre si rapportée à l'installation			Calcul Tableau 2, formule [11]
	Temps de séjour hydraulique HRT (t_hydr)	d	Calculée, paramètre			Calcul Tableau 2, [12]
	Temps de séjour des boues SRT	d	Calculée, paramètre			Calcul Tableau 2, formule [13]

Tableau 2: Formules de calcul pour les grandeurs calculées (dérivées) du Figure 3 [5], modifiée

Numéro	Grandeur (paramètres marqués en rouge)	Symbole	Formule de calcul
[1]	Perte au feu	PAF	$PAF = RS - RC$
[2]	Débit	Q	Convertir en l _N /s (1bar, 273,15 K) : $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$
[3]	Charge pour substance « y »	F _y	$F_y = Q \cdot c_y$
[4]	Charge organique du digesteur	RB	$RB = F_{PAF_entrée_digeur} / V_{digeur}$
[5]	Charge de boues organiques	SB	$SB = F_{PAF_entrée_digeur} / RS_{boues_digeur}$
[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}	$Q_{gaz_spéc} = Q_{gaz} / F_{PAF_entrée_digeur}$
[8]	Production de méthane	Q _{CH4}	$Q_{CH4} = Q_{gaz} \cdot c_{CH4}$
[9]	Production spécifique de méthane	Q _{CH4_spéc}	$Q_{CH4_spéc} = Q_{gaz_spéc} \cdot c_{CH4}$
[10]	Rendement en méthane (Yield)	Y _{CH4}	$Y_{CH4} = V_{gaz_CH4} / m_{PAF_utilisé}$
[11]	Dégradation de PAF[%]	ρ	$\rho = (F_{PAF_entrée_digeur} - F_{PAF_sortie_digeur}) / F_{PAF_entrée_digeur}$
[12]	Temps de séjour hydraulique	HRT	$HRT = V_{digeur} / Q_{entrée_digeur}$
[13]	Temps de séjour des boues	SRT	$SRT = RS_{boues_digeur} / F_{RS_boues_digeur}$

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).

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 (cp) W : HRT (cp)				
	RS	W : avec Q : charge en masse (cp), partiellement biodégradable, partiellement nutriments				
	RC	W : avec Q : charge inorganique (cp), partiellement nutriments				
	PAF	W : avec Q : charge inorganique (cp), partiellement biodégradable				
	DCO	W : avec Q : charge de DCO (cp), partiellement biodégradable				
	N _{tot}	W : avec Q : charge de N _{tot} (cp), nutriments hydrolysés en NH ₃ /NH ₄				
	P _{tot}	W : avec Q : charge de P _{tot} (cp), nutriments partiellement hydrolysés en PO ₄				P non hydrolysé dans les boues précipitées
	S _{tot}	W : avec Q : charge de S _{tot} (cp), nutriments hydrolysés en HS				
	Fe	Nutriments pour bilans de masse (contrôle des appareils de mesure)				
	Y _{CH4}	Production CH ₄ et dégradation du PAF en laboratoire (cp avec Y _{CH4})				
	Microplastiques	W : augmenter les microplastiques en sortie (cp) inertes, à soustraite de 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, N _{tot} , P _{tot} , S _{tot} , Fe, Y _{CH4} , 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 »				
	N _{tot}	Analogue à « toutes les boues internes », valeurs élevées -> NH ₄ élevé à l'entrée du traitement des eaux putrides				
	P _{tot}	Analogue à « toutes les boues internes », valeurs élevées -> PO ₄ élevé dans les bennes de boues et, évent., à l'entrée du traitement des eaux putrides				
	S _{tot}	Analogue à « toutes les boues internes », valeurs élevées -> H ₂ S élevé dans le gaz -> problèmes de corrosion				
	NO ₃	W : avec Q : charge de NO ₃ (cp), W : dénitrification en N ₂ -> consommation de PAF dégradable, augmentation de la charge de CO ₂ dans le gaz				
	NO ₂	W : avec Q : charge de NO ₂ (cp) W : toxicité sur les micro-organismes du biogaz (en cas de concentrations élevées)				
	SO ₄	W : avec Q : charge de SO ₄ (cp) W : sulfatoréduction en HS--> H ₂ S -> consommation de PAF dégradable et problèmes de corrosion, augmentation de la charge de CO ₂ dans le gaz				
	Fe	Analogue à « toutes les boues internes »				
	Fe(IV)	W : avec Q : charge de Fe(IV) (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
		W : réduction du FE(IV) en Fe (III)--> consommation de PAF dégradable, augmentation de la charge de CO ₂ dans le gaz				
	Y _{CH4}	Analogue à « toutes les boues internes »				
	pH	Consomme la capacité tampon (éventuellement pertinent pour Q élevé)				
	Microplastiques	Analogue à « toutes les boues internes »				
Sortie silo à boues (SCS-04)	Q, RS, RC, PAF, DCO, N _{tot} , P _{tot} , S _{tot} , NO ₃ , NO ₂ , SO ₄ , Fe(IV), Y _{CH4} , microplastiques	Analogue à « cosubstrats » Bilans de masse pour les contrôles, éventuellement dégradation dans le silo à boues				
Entrée digesteur, cosubstrats 1 ... n (FAU-01)						Analogue à « Entrée silo à boues, cosubstrats 1 ... n » (SCS-03)
Digesteur (FAU-02)	pH*	W : une valeur inférieure inhibe ... bloque les processus de la chaîne de processus anaérobies	-7,0 – 8,0		Réduction des performances jusqu'au blocage complet de la chaîne de processus anaérobies	[8]
	T	W : tous les bioprocessus dépendent de la température	35 – 45°C : domaine mésophile 45 – 60°C : domaine thermophile	W : dénaturation des enzymes -> défaillance des fonctions enzymatiques des processus -> défaillance de la dégradation de PAF et de la production de gaz	Réduction des vitesses métaboliques -> réduction du taux de dégradation de PAF et de la production de gaz	[7], [8]
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/épaississeur

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
	RC	Pour détermination de 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 dégradation anaérobie, produit de l'acétogénèse, substrat direct de la production de méthane (méthanogénèse) montre 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	<u>Source inconnue</u> (Ibu (2021) dans l'outil d'évaluation de l'inhibition) Paramètre
	Acides gras (somme acide acétique + acide propionique + acide butyrique + acide iso-butyrique + acide valériannique + acide iso-valériannique)	Les principaux produits intermédiaires de la dégradation anaérobie montrent l'équilibre des processus de biogaz	Acides gras (somme) 0- 3850 mg/l Acide acétique 0 – 3000 mg Acide propionique 0 – 700 mg Acide butyrique 0 – 20 mg Acide isobutyrique 0 – 10 mg Acide valériannique 0 – 100 mg Acide iso-valériannique 0 – 20 mg 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	Source inconnue (Ibu (2021) dans l'outil d'évaluation de l'inhibition) Paramètre
	H ₂	Produit intermédiaire important de la dégradation anaérobie, substrat direct de la production de méthane (méthanogénèse), montre l'équilibre des processus de fermentation/biogaz	Pression partielle p _{H2} < 10 ⁻⁴ bar pour un équilibre équilibré des processus de fermentation/de biogaz	Production de méthane (méthanogénèse) insuffisante, effet toxique sur la production de H ₂	Production de H ₂ insuffisante, -> production de méthane (méthanogénèse) insuffisante	[7] Paramètre
	Alcalinité (pouvoir tampon)	W : empêche la chute du pH lors de la libération d'acides gras (acidogénèse et acétogénèse) -> évite la réduction des performances jusqu'au blocage complet de la chaîne de processus anaérobies	<u>Alcalinité [mg CaCO₃] = concentration acides gras volatile/leur optimale (AGV/TAC),</u> <u>Avec une valeur AGV/TAC optimale = 0,8 (mg HAc)/(mg CaCO₃)</u>			[8]

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
		Quotient acides gras volatils./alcalinité devrait être compris entre ... et ... (valeur AGV/TAC)				
	Y _{CH4}	Diminution de la capacité de production spécifique de CH ₄ en laboratoire via le digesteur				Inutile si le digesteur doit être uniquement relevé avec le lit de boue du stockeur/épaisseur
Stockeur/épaisseur (STE-01)	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 »	
Stockeur/épaisseur, sortie des boues (STE-02)	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 gras (somme acide acétique + acide propionique + acide butyrique + acide iso-butyrique + acide valériannique + acide iso-valériannique)	Analogue à « Sortie digesteur »	Analogue à « Sortie digesteur »	Analogue à « Sortie digesteur »	Analogue à « Sortie digesteur »	Paramètre
	H ₂	Analogue à « Sortie digesteur »	Analogue à « Sortie digesteur »	Analogue à « Sortie digesteur »	Analogue à « Sortie digesteur »	Paramètre
	Alcalinité (pouvoir tampon)	Analogue à « Sortie digesteur »				
	Y _{CH4}	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
Stocker/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
	CH ₄	W : avec Q : charge de CH ₄ (cp) Charge de CH ₄ : grandeur cible à maximiser en termes de gain d'énergie Application également comme ressources de matières				Analogue à cellule supérieure
	CO ₂	W : avec Q : charge de CO ₂ (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 H ₂				Analogue à cellule supérieure
	CH ₄ /CO ₂	Composition du gaz en ce qui concerne CH ₄ et CO ₂ 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 Paramètre
	NH ₃	W : avec Q : charge de NH ₃ (cp) W : en tant que concentration de NH ₄ en phase liquide, toxique pour les processus de fermentation				Doit être mesuré séparément en cas de relevé séparé des processus du digesteur et du stockeur/épaisseur

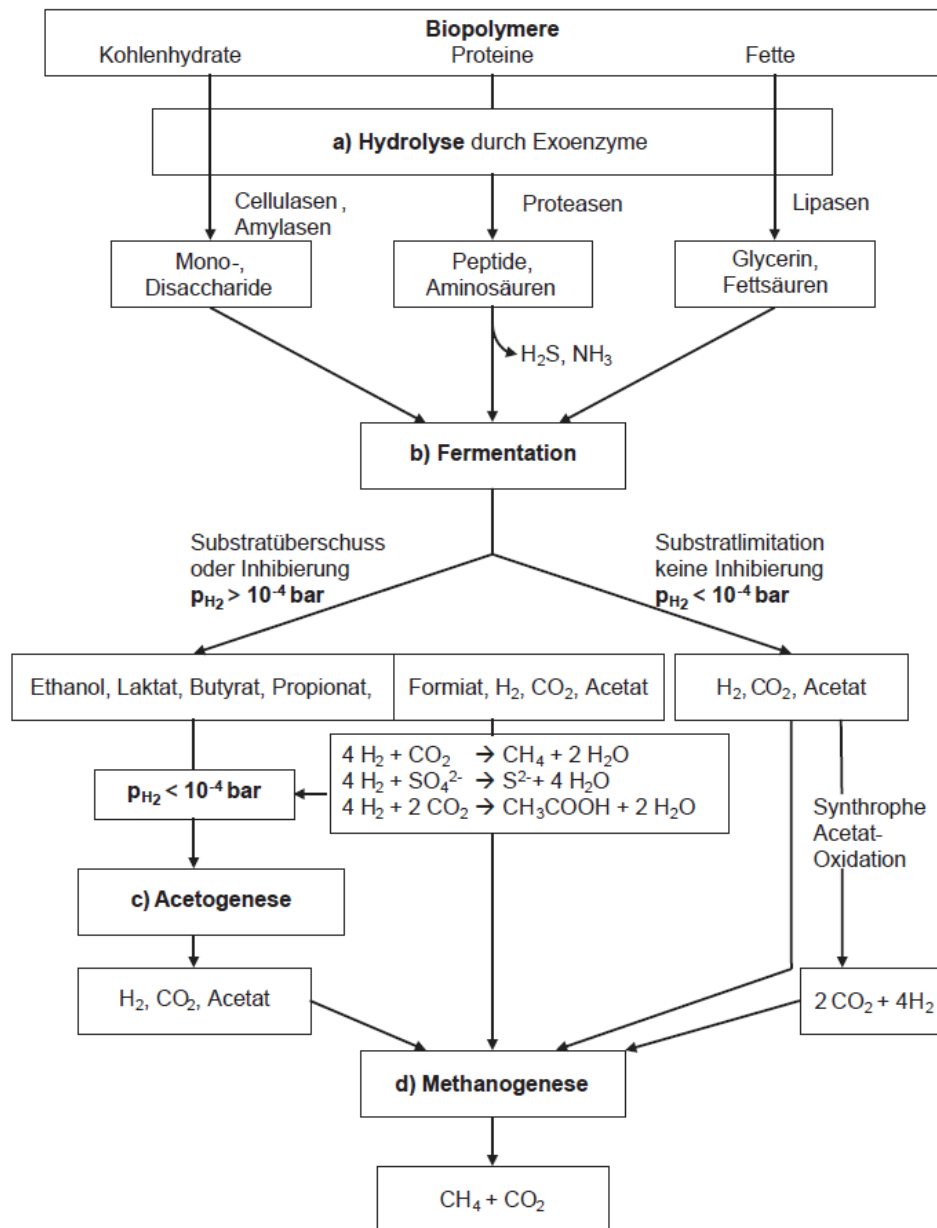
Point de mesure, point de prélèvement	Grandeur de mesure, grandeur d'analyse, grandeur dérivée	Signification - La grandeur résulte de U - La grandeur entraîne W ou la grandeur -> W - Autres significations	Valeur ou plage de valeurs optimale en ce qui concerne le critère indiqué (uniquement pour les paramètres)	Signification, conclusion si supérieure (uniquement pour les paramètres)	Signification, conclusion si inférieure (uniquement pour les paramètres)	Remarques
	H ₂ S	W : avec Q : charge de H ₂ S (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
	H ₂	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 Paramètre
Déshydratation des boues, entrée des floculants (SCE-01)	Q_floculants	Améliore la déshydratabilité des boues				
Déshydratation des boues, transfert bennes à boues (SCE-02)	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				
	PAF	Analogue à cellule supérieure, pour PAF				Augmente la valeur calorifique

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
	DCO	Analogue à cellule supérieure, pour DCO				Analogue à cellule supérieure
	N _{tot}	W : avec Q : charge de N _{tot} (cp)				
	P _{tot}	W : avec Q : charge de P _{tot} (cp) W : effort de transport, effort de valorisation Récupération de P Grandeur cible à maximiser en ce qui concerne la récupération de P				
	S _{tot}	W : avec Q : charge de S _{tot} (cp)				
	Fe	Pour bilans de masse (contrôle des appareils de mesure)				
	Y _{CH4}	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 dégradable 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 (FAB-01)	Q	W : avec concentration : charge (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
	MES	W : avec Q : charge en tant que masse (cp)				
	N _{tot}	W : avec Q : charge de N _{tot} (cp)				
	P _{tot}	Analogue à cellule supérieure, pour P _{tot}				
	NH ₄	Analogue à cellule supérieure, pour NH ₄				
	Microplastiques	Analogue à la 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 <u>Le domaine varie en fonction de l'installation (substrats, technique des procédés, degrés de dégradation, taille de l'installation).</u>	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 selon l'outil Excel et [7] Paramètre
	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 Paramètre
	Production de gaz Q_gaz	Production de gaz convertie aux conditions normales				Calcul Tableau 2, formule [2]
	Production spécifique de gaz Q_gaz_spéc	Production de gaz/Charge PAF U : RB (cp), SB (cp), HRT (cp), SRT (cp), inhibitions/toxicités (cp)	$\eta * Y_{CH_4} / c_{CH_4}$ dans le gaz η = 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	Paramètre si rapportée à l'installation
	Production de méthane Q_CH4	Analogue à production de gaz, mais avec facteur c_CH4 du gaz	Q_gaz*c_CH4 du gaz			
	Production spécifique de méthane Q_CH4_spéc	Analogue à production spécifique de gaz, mais avec facteur c_CH4 du gaz U : analogue à production spécifique du gaz	$\eta * Y_{CH_4}$ η = 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	Paramètre si rapportée à l'installation
	Dégradation de 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	Paramètre si rapportée à l'installation
	HRT	Temps de contact pour les processus (cp) RB, si concentrations entrantes inchangées (cp)	13 – 25 d (< SRT possible uniquement avec séparation des boues et rétention/recyclage)	Installation sous-chargée, volume de construction trop élevé, très bonnes dégradation et production de gaz	Évent. RB trop élevée (voir colonne « Signification »), installation évent. surchargée, événement. mauvaise dégradation, événement. production de gaz faible	13 – 25 d valent pour 76 – 100 % Degré de dégradation de la part de boues dégradables [9]

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
			<u>Le domaine varie en fonction de l'installation (substrats, technique des procédés, degrés de dégradation, taille de l'installation). Pour les installations communales, les règles 16 à 20 d s'appliquent. En principe, les chiffres pour le digesteur et le lit de boue du stockeur/épaississeur s'appliquent ensemble.</u>		--> dépend de la cinétique des processus En cas de dosage élevé de cosubstrats, peut différer considérablement de la digestion pure !	<u>16 – 20 d pour les STEP communales selon [10]</u> Paramètre
	SRT	Croissance biomasse active, multiplication des (groupes d')organismes	15 – 30 d (> HRT possible uniquement avec séparation des boues et rétention/recyclage), <u>< HRT inutile)</u> <u>En principe, les chiffres pour le digesteur et le lit de boue du stockeur/épaississeur s'appliquent ensemble.</u>	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 [7] Paramètre



Sulfate respiration:

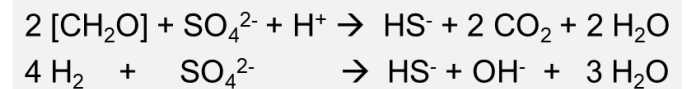


Illustration 4 Liens : Schéma du processus de fermentation anaérobie [7]. À droite : Processus anaérobies de sulfuration : respiration des sulfates.

A.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 7.

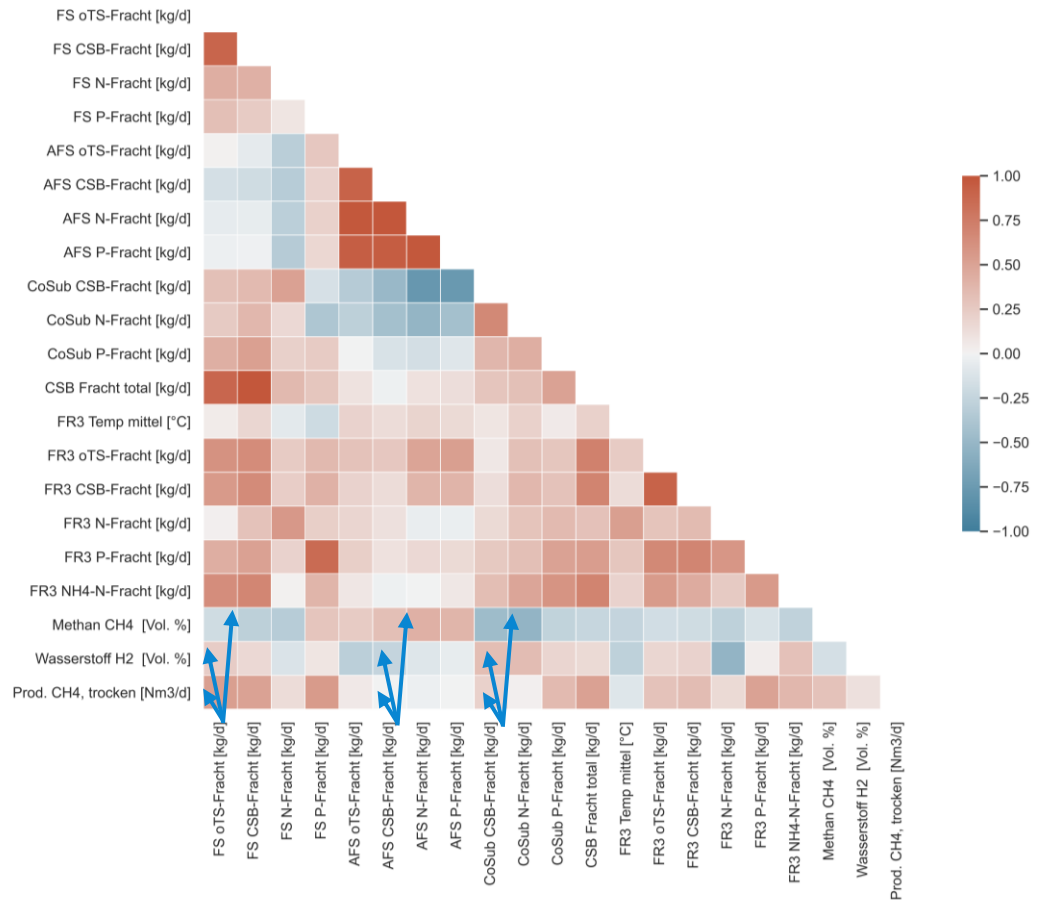


Figure 5 : Corrélation par paires de toutes les charges entrantes et sortantes et des rapports de la codigestion à la STEP de Berne (données d'exploitation de la STEP de Berne 2015 - 2019, moyenne glissante sur environ 3*HRT). Légende : rouge = corrélations positives, bleu = corrélations négatives, intensité de couleur = force de corrélation (échelle de droite).

La production de 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 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 CH_4 du gaz produit, et ce de manière particulièrement forte pour les charges des cosubstrats (pourtant relativement faibles). La concentration de H_2 , paramètre essentiel de la chaîne de processus (produit intermédiaire, mais en phase liquide, Illustration 4), 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 H_2 , qui est la concentration déterminante (d'une partie) de la méthanogenèse. La concentration de H_2 à l'équilibre dans la phase gazeuse serait alors également augmentée, ce qui pourrait entraîner un certain déplacement de la production de CH_4 vers la production de 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 H_2 dans le digesteur et une (légère) diminution de la production relative de 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 CO_2/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 CO_2 émise dans le gaz et éventuellement, en parallèle, de la part de 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 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 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.

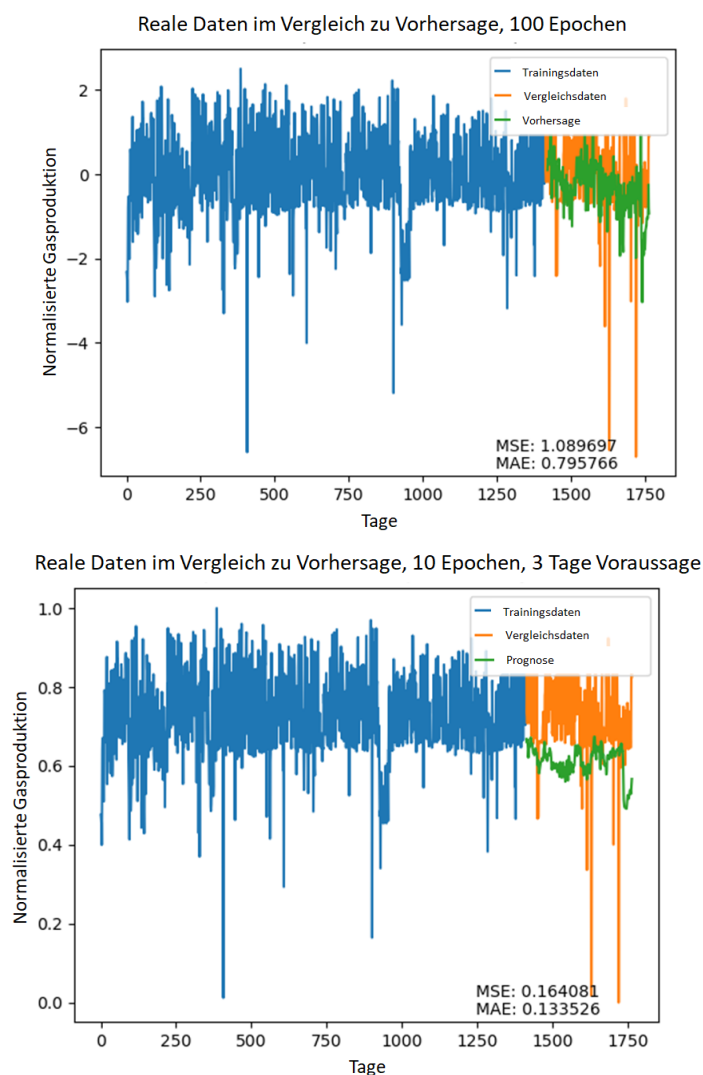


Figure 6 : Prédiction de la production de CH_4 de la codigestion à la STEP de Berne sur une année après l'entraînement d'un réseau neuronal avec les données d'entrée de la codigestion sur quatre ans (données d'exploitation de la STEP de Berne 2015 - 2019). Vert = production de CH_4 prédite, orange = production de 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.

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.



Association suisse des professionnels
de la protection des eaux (VSA)
Europastrasse 3
Postfach, 8152 Glattbrugg
sekretariat@vsa.ch
www.vsa.ch
Tél. 043 343 70 70