

# Analyse du digesteur de la STEP-ERES

**Acronyme : AD-STEP-ERES**

**Projet CeTT n° 56817**

Mark McCormick  
Institut de Génie Thermique (IGT)  
Unité de systèmes industriels de bioénergie (SIB)  
Avenue des Sports 20  
CH-1401 Yverdon-les-Bains

10 novembre 2016

## Table des matières

Objectifs et résumé.....	3
Description des Installations.....	3
Résultats et discussion.....	4
Paramètres physico-chimiques .....	4
Alcalinité .....	6
Phosphate .....	7
Métaux.....	8
Régime hydraulique, charge organique, production de biogaz du digesteur anaérobie .....	9
Analyse hydraulique du digesteur .....	13
Conclusions et recommandations .....	18
Remerciements .....	20
Références .....	20

### OBJECTIFS ET RÉSUMÉ

L’objectif du projet est d’analyser le procédé de digestion anaérobie des boues de la STEP-ERES dans le but de relever des dysfonctionnements ou des opportunités d’amélioration de l’abattement de la matière organique et la production de biogaz. Les résultats obtenus seront comparés à des valeurs usuelles ou théoriques pour la digestion anaérobie. Des exemples d’opportunités d’amélioration sont l’intensité de brassage du digesteur et le régime d’alimentation.

Les résultats principaux de cette étude sont la mise en évidence du teneur de PO<sub>4</sub> et de Fe élevée dans le digesteur, d’un chemin de court-circuit, le taux relativement faible d’abattement de la matière organique, la mauvaise production volumique de biogaz et l’indépendance de la production de biogaz sur le temps de séjour hydraulique. Toutes les conclusions et les recommandations sont résumées dans un tableau qui se trouve à la fin de ce rapport. L’auteur reste à disposition pour fournir des compléments d’information.

### DESCRIPTION DES INSTALLATIONS

La STEP-ERES a 2 digesteurs anaérobies identiques qui sont alimentés en alternance avec un mélange d’environ 40% de boue primaire et 60% de boue secondaire. Le volume utile de chaque digesteur est 2600 m<sup>3</sup>. L’HEIG-VD a reçu des copies des plans des installations et des données opérationnelles qui peuvent être consultées sur demande. Chacun des 2 digesteurs est muni d’un dispositif d’échantillonnage de digestat liquide prélevé de 4 endroits du digesteur. La prise n°1 échantillonne la conduite par laquelle les boues sortent du fond du digesteur vers la centrifugeuse.

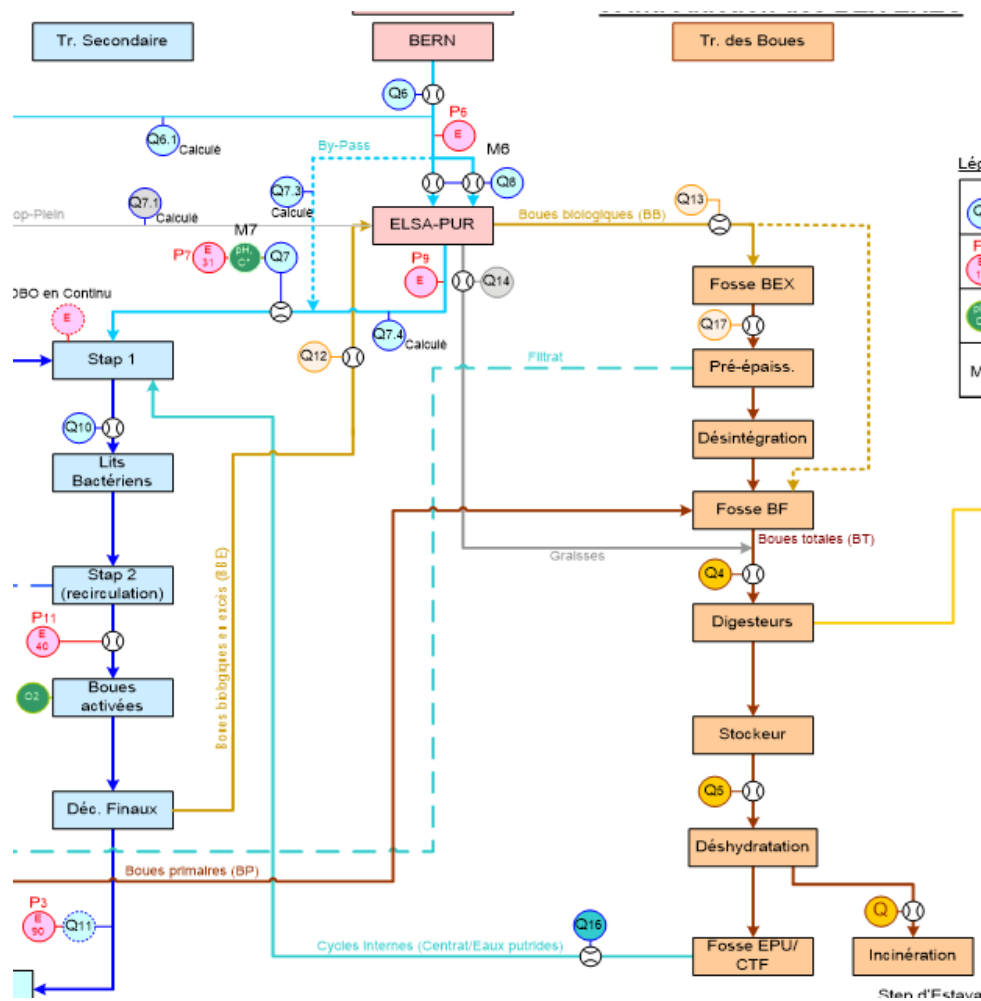


Figure 1

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

### Paramètres physico-chimiques

Le 26 avril, le 17 mai et le 8 juin des échantillons de 1 litre ont été prélevés des 4 prises de digesteur n° 1 et de digesteur n°2. Le tableau 1 ci-dessous est une liste des paramètres analysés. Les résultats des analyses des paramètres physico-chimiques du digesteur sont présentés dans le tableau en annexe.

Paramètres physico-chimiques déterminés. Références des méthodes sur demande.

Table 1

pH	Matière sèche	Matière volatile sèche	Cendres	PCS	PCI	C	H	N	O
	%	% du MS	% du MS	MJ/kg sec	MJ/kg sec	% MS	% MS	% MS	% MS

Table 2

tATP	dATP	cATP	BSI	AGV, comme acétate	COD	TOC	NH <sub>4</sub> -N	PO <sub>4</sub>	Alcalinité, comme CaCO <sub>3</sub>
ng/l	ng/l	ng/l	%	mg/l	g/l	mg/l	mg N/l	mg/l	mg/l

Les valeurs remarquables obtenues (voir le tableau des résultats en annexe) qui indiquent un dysfonctionnement possible sont la matière sèche (trop basse) et la matière volatile, le PCS et le NH<sub>4</sub> (trop élevés). La concentration de matière volatile et le PCI sont environ 10% plus élevés que celles du digesteur de la STEP d'Yverdon. Les valeurs indiquent une dégradation incomplète du substrat. La teneur en NH<sub>4</sub> mesurée dans le centrât et le digestat de la STEP ERES est à la limite inférieure de concentration inhibiteur de la digestion anaérobie (Drosg).

Les valeurs remarquables qui indiquent un bon fonctionnement du digesteur sont le ATP, la BSI et l'alcalinité. La valeur de tATP (Adénosine Triphosphate total) est parmi les plus élevées que nous n'avons jamais mesurées. Le BSI (Biomass Sludge Index) est le rapport entre le dATP (morte) et l'ATP. Le BSI est bas ce qui indique un bon état des microbes.

Les acides gras volatiles sont des produits de dégradation intermédiaires. La détermination de l'identité et la concentration des acides gras volatiles donnent une indication sur le fonctionnement de la population de bactéries méthanogènes. Le test colorimétrique Hach Lange mesure la concentration des groupes carboxyliques sans identifier l'espèce d'acide gras volatile. La concentration déterminée est exprimée en équivalents d'acide acétique qui est le substrat de bactéries acéto-clastiques méthanogènes. Pourtant, la présence d'autres acides gras volatiles pourrait indiquer un dysfonctionnement de l'activité biologique du digesteur. En complément au test Hach Lange, la concentration des acides gras individuelles a été déterminée par chromatographie en phase gazeuse (GC-FID). Les résultats présentés dans le tableau ci-dessous et en annexe démontrent la présence d'autres acides gras volatiles que l'acide acétique. Leurs concentrations sont bien en dessous de la valeur maximum acceptable de 740 mg/l propionate (Boe 2008).

Table 3

		Didesteur 1 Concentration en mg/L				Didesteur 2 Concentration en mg/L			
	N° de prise	D1-1	D1-2	D1-3	D1-4	D2-1	D2-2	D2-3	D2-4
Série 8.06	Acide acétique	2.2	1.4	0.8	0.7	0.6	1.4	0.9	0.0
	Acide propinique	34.6	52.0	42.1	47.0	12.1	28.4	21.8	58.0
	Acide isobutyrique	36.7	34.4	25.2	0.0	9.2	19.6	21.2	29.6
	Acide butyrique	41.1	46.3	39.9	47.8	23.1	25.8	30.5	55.2
	Acide isovalérique	27.1	29.5	18.2	17.8	0.0	31.7	10.1	36.0
	Acide valérique	57.7	92.9	64.5	58.7	122.8	45.2	40.9	62.1
	Acide caproïque	40.3	37.3	0.0	34.5	17.5	43.8	22.0	38.4
	Acide heptanoïque	47.9	46.2	33.7	45.5	12.9	40.7	31.3	0.0
	Concent totale	247.3	302.7	224.5	217.5	180.8	192.7	156.7	240.9
	Concentration en acétate	176.0	211.0	143.4	155.1	119.5	141.8	109.5	182.2
Série du 17.05	Acide acétique	1.7	1.6	1.2	0.5	1.6	0.9	2.3	2.2
	Acide propinique	77.2	50.7	55.7	11.4	49.7	28.0	36.3	70.4
	Acide isobutyrique	35.7	0.0	0.0	12.0	25.9	0.0	53.7	16.9
	Acide butyrique	68.6	46.3	19.1	29.9	81.2	64.9	43.7	79.2
	Acide isovalérique	41.6	26.2	29.9	6.0	0.0	34.2	25.6	39.2
	Acide valérique	121.1	85.6	36.1	31.0	83.9	59.9	60.7	102.1
	Acide caproïque	81.6	38.7	50.8	21.2	57.3	42.7	40.8	81.4
	Acide heptanoïque	65.6	38.2	29.3	39.6	171.1	49.1	0.0	0.0
	Concent totale	411.5	248.6	171.2	130.5	413.5	236.9	222.3	310.0
Concentration en acétate	303.3	177.5	137.8	89.3	272.8	167.7	169.9	249.8	
Série 25.04	Acide acétique	1.0	0.5	2.1		1.2	1.4	2.4	1.7
	Acide propinique	38.8	13.4	71.5		25.0	38.6	44.1	69.2
	Acide isobutyrique	0.0	6.2	0.0		24.3	23.4	0.0	65.3
	Acide butyrique	45.2	36.2	89.5		66.0	47.3	71.5	51.2
	Acide isovalérique	60.2	7.0	36.9		18.8	42.7	0.0	43.1
	Acide valérique	57.3	18.3	65.8		70.6	78.9	52.4	66.2
	Acide caproïque	28.5	14.8	52.5		33.4	0.0	28.3	77.0
	Acide heptanoïque	45.3	23.3	73.5		32.4	85.2	76.3	77.6
	Concent totale	247.8	105.1	339.3		238.3	317.5	246.7	374.3
	Concentration en acétate	167.9	73.6	242.4		167.7	191.5	167.5	277.0

Dans le but de quantifier des substances inorganiques solubles le centrât du centrifuge a été analysé. Les résultats de la STEP-ERES et de la STEP d'Yverdon sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Table 4

Paramètre	Conductivité	NH4	PO4	Fe
Unité	µSiemens/cm	mg/l	mg/l	mg/l
STEP-ERES	11'100	1591	23.4	1.9
STEP-Yverdon-les-Bains	7'300	891	0.8	1.5

On remarque que la concentration de toutes les substances analysées est plus élevée dans le centrât de la STEP-ERES que dans celui d'Yverdon.

#### Flux de NH<sub>4</sub>, PO<sub>4</sub> et Fe

Dans les but de connaître les flux de NH<sub>4</sub>, PO<sub>4</sub> et de Fe entrant et sortant du digesteur, des échantillons ont été prélevés et analysés et les flux de masse ont été calculés sur la base de débits liquides de 2014.

Table 5

		Entrée (Q4)	Sortie (prise n°1)	Centrât
Fe	mg/l	68.3	875	1.9
PO4	mg/l	23.9	1'770	23.7
NH4	mg/l	n.m.	1'964	1591
Fe	kg/an	2673 (soluble)	34'241	74
PO4	kg/an	935	69'264	927
NH4	kg/an	n.m.	76'855	62'259

La concentration basse et la petite masse de Fe et de PO<sub>4</sub> dans le centrât indiquent que le précipité de PO<sub>4</sub> est stable dans le digesteur anaérobie.

#### Alcalinité

3 substances participent à la création de l'alcalinité du digesteur :

- AGV
- Bicarbonate
- NH<sub>4</sub>

L'alcalinité des échantillons du 25.04.2016 du digesteur n°1 et du digesteur n°2 de (la prise n°1, sortie du digesteur) a été déterminé par titration de 250 ml de boue avec de l'acide hydrochlorique.

FOS/TAC. Le FOS est l'acronyme allemande pour AGV et le TAC est celle de l'alcalinité carbonate.

Le rapport FOS/TAC est un indicateur qui est souvent utilisé pour évaluer la stabilité d'un processus de digestion. Un rapport FOS/TAC élevé indique que le processus d'acidogénèse n'est pas en équilibre avec le processus de méthanogénèse et par conséquent le processus de digestion anaérobie risque un dysfonctionnement imminent. Les valeurs de FOS et de TAC ont été calculées à partir des résultats de titration.

Table 6

		Digesteur n°1	Digesteur n°2
<b>FOS (comme CaCO<sub>3</sub>)</b>	mg/l	1'998	1'322
<b>TAC (comme CH<sub>3</sub>COOH)</b>	mg/l	7'247	3'003
<b>FOS/TAC</b>		0.28	0.44

Dans le but de déterminer si la charge du digesteur correspond à sa capacité, les valeurs déterminées peuvent être comparées aux valeurs empiriques.

Table 7

Rules of thumb for the assessment of FOS/TAC ratios  
(empirical values provided by DEULA–Nienburg).

FOS/TAC ratios	Background	Measure
>0.6	Highly excessive biomass input	Stop adding biomass
0.5–0.6	Excessive biomass input	Add less biomass
0.4–0.5	Plant is heavily loaded	Monitor the plant more closely
0.3–0.4	Biogas production at a maximum	Keep biomass input constant
0.2–0.3	Biomass input is too low	Slowly increase the biomass input
<0.2	Biomass input is far too low	Rapidly increase the biomass input

Source : Hach lange

Les résultats démontrent que le digesteur n°1 est sous-alimenté par rapport à sa capacité de digestion de la matière organique volatile (FOS/TAC Digesteur n°1 = 0,28). Par contre, le digesteur n°2 est légèrement sûr alimenté (FOS/TAC Digesteur n°1 ; 0,44).

#### Phosphate

La concentration de  $PO_4$  mesuré dans le digestat est très élevée. La teneur élevée de  $PO_4$  n'a pas d'effet nocif à la digestion. La  $PO_4$  est un des composants d'ATP. Alors, une explication possible de la concentration d'ATP particulièrement élevée mesuré dans les digesteurs de la STEP ERES est la concentration élevée de  $PO_4$  dans le digesteur ce qui fait que le P n'est jamais limitant pour le synthèse d'ATP.

Dans le but de précipiter le  $FePO_4$ , de la  $FeSO_4Cl$  (Tri-Fer12.5) est ajouté dans la partie aérobie de la STEP. Dans les conditions réductrices du digesteur anaérobie, le Fe pourrait être réduit et par conséquence une partie du  $PO_4$  se dissout pour finir dans les effluents finals de la STEP. Dans le digesteur de la STEP-ERES la concentration relativement faible de  $PO_4$  mesurée dans le centrât démontre la bonne efficacité de la technique de précipitation utilisée et la partition du  $PO_4$  dans la fraction solide du digestat envoyée en incinération. Il n'y a pas d'évidence de nouvelle dissolution important de  $PO_4$  dans le digesteur. Toutefois, en comparaison à la STEP d'Yverdon-les-Bains, la concentration de  $PO_4$  mesurée dans le centrât de la STEP ERES est 29 fois plus élevée et 1,3% du phosphate quitte le digesteur en forme soluble dans le centrât.

La technologie de précipitation de  $FePO_4$  employée actuellement enlève 28'700 kg de  $PO_4$  par an (estimation basée sur les données de 2014). En prenant la valeur de 23.4 mg  $PO_4$ /litre de centrât et en multipliant par 30'267 m<sup>3</sup>/an (calculé à partir des données 2014) de centrât, on constate que seulement 708 kg/a de  $PO_4$  retournent à la STEP via le centrât.

L'industrie laitière utilise couramment le  $Na_3PO_4$  pour préparer des solutions de nettoyage des installations. Les eaux de lavage d'ELSA sont une source possible de  $PO_4$ . Des analyses ponctuelles (6 mesures en 15 mois) ont relevée entre 7 et 84 mg  $PO_4$ /l d'eau usée brute d'ELSA et la moyenne des analyses conduites par la STEP-ERES est 12 mg de P/l (égal à 37 mg  $PO_4$ /l). En multipliant la concentration

moyenne de PO<sub>4</sub> (37 mg/l) fois le volume total des eaux entrantes d'ELSA (1'460'000 m<sup>3</sup>/an) on obtient une charge de 50'400 kg PO<sub>4</sub>/an, ce qui est environ 80% de la charge totale en P du digesteur anaérobie.

Techniquement, la solution la plus simple pour réduire la quantité de PO<sub>4</sub> sortant de la STEP serait de faire remplacer le Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> par un autre produit. Pourtant, cette solution n'est probablement pas facile pour ELSA à mettre en œuvre. En plus, le produit remplaçant risque d'induire d'autres problèmes de fonctionnement de la STEP.

Au lieu de précipiter le PO<sub>4</sub> avec le fer, il serait possible de faire précipiter le PO<sub>4</sub> et le NH<sub>4</sub> en forme de Magnésium Ammonium Phosphate (MAP, Struvite) et d'ensuite séparer le précipitât pour utilisation comme engrais. Le tableau ci-dessous esquisse le projet potentiel.

Table 8

Quantité de PO <sub>4</sub> dans le digestat	moles/an	729'091
Quantité de PO <sub>4</sub> dans le digestat	kg/an	69'264
Quantité de NH <sub>4</sub> dans le digestat	moles/an	4'269'736
Quantité de NH <sub>4</sub> dans le digestat	kg/an	76'855
Substance limitante	PO4/NH4	Quantité de PO4
Quantité de Mg(OH) <sub>2</sub> à acheter	moles/an	729'091
Achats de Fe évités	kg/an	34'241
Quantité de MAP produit	kg/an	99'885
Quantité de Mg(OH) <sub>2</sub> à acheter	kg/an	42'506
PO <sub>4</sub> restant dans le boue sortante du digesteur	mg/l	0
Réduction de PO <sub>4</sub>	%	100
NH <sub>4</sub> restant dans le boue sortante du digesteur	mg/l	1'629
Réduction de NH <sub>4</sub>	%	17

Métaux

Mosey et. al. (1971) a proposé un constant K qui exprime la charge totale en certains métaux lourds. Selon Mosey, il existe une possibilité de disfonctionnement si la concentration de métaux lourds dépasse 400 milli équivalents/kg de matière sèche dans le digestat. Son disfonctionnement est presque certain si la concentration dépasse 800 milli équivalents/kg de matière sèche. Les concentrations de métaux lourds ont été déterminées par XRF d'un échantillon de 10 litres de boue entrante et le constant, K, a été calculé selon la formule de Mosey.

$$K = \left[ \frac{\frac{Fe}{27.9} + \frac{Zn}{32.7} + \frac{Ni}{29.4} + \frac{Pb}{103.6} + \frac{Cd}{56.2} + 0.67 \frac{Cu}{31.8}}{\text{solids concentration}} \right]$$

Selon Mosey et. al.

Table 9

Date	20160628	90160920	90160920
Source	ERES	ERES	Yverdon

Fe	mg/kg	51'300	84'050	123'200
Zn	mg/kg	256	546	869
Ni	mg/kg	9	9	0
Pb	mg/kg	0	0	0
Cd	mg/kg	0	0	0
Cu	mg/kg	54	107	433
<b>K</b>	<b>meq/kg</b>	<b>1'848</b>	<b>3'032</b>	<b>4'451</b>

La valeur moyenne du constant K, calculée à partir de seulement 2 valeurs mesurées est de 2440 milli équivalents/kg de matière sèche ce qui est 3 fois plus que la valeur où le disfonctionnement du digesteur est certain. Les concentrations de Zn, Ni, Pb, Cd et Cu ne sont pas élevées. Alors on peut conclure que c'est le Fe qui est en concentration trop élevée dans le digesteur.

Dans une autre étude de digesteurs mésophiles de 4,8 litres infiniment mélangés, Ofverstrom *et. al.* (2011) ont étudié l'effet de différentes concentrations de Fer sur la performance des digesteurs. Ils ont ajouté du Fe correspondant à la concentration entre 52'000 et 81'000 mg Fe/kg MS mesurés dans les digesteurs de la ville de Göteborg (SE). Ils ont observé que l'ajout de FeCl<sub>3</sub> au digesteur pour obtenir 50'000 mg Fe/kg de matière sèche dans le digestat n'avez pas d'effet sur la production de biogaz tandis que l'ajout de 100'000 mg Fe/kg de matière sèche a diminué la production de biogaz par 30%. Pour comparaison, les concentrations de Fe mesurée dans la boue sortant du digesteur de la STEP-ERES sont 51'300 mg/kg et 84'050 mg/kg ce qui est en dessous de la concentration inhibiteur déterminé par Ofverstrom. La concentration de Fe mesurée dans le digestat du digesteur de la STEP d'Yverdon est supérieure à la concentration inhibitrice de 100'000 mg/kg. En conclusion, la concentration de Fe mesurée dans le digesteur de la STEP-ERES est similaire à la concentration d'autres digesteurs de STEP municipaux. Toutefois, une réduction de la concentration de Fer pourrait améliorer le fonctionnement du digesteur.

La concentration de Calcium de 550 mg/l dans le digesteur est bien en dessous de la concentration inhibiteur de 7000 mg/l (Jackson-Moss). La concentration d'aucun des autres métaux identifiés dépasse la seuil d'inhibition de la digestion anaérobie (Drosg).

#### *Régime hydraulique, charge organique, production de biogaz du digesteur anaérobie*

Les données fournies par la STEP ERES ont été analysées dans le but de constater des disfonctionnements biologiques et de proposer des pistes d'amélioration. Les résultats sont comparés à ceux de la STEP d'Yverdon-les-Bains (YLB) et des valeurs cibles sont proposées.

Table 10

Caractéristiques des digesteurs anaérobie		Digesteur n°1	Digesteur n°2	YLB, 2012	Cible/recommandation
Volume	m3	3'000	3'000	2'815	3'000
Volume utile (liquide)	m3	2'600	2'600	2'300	2'600
Pression (gazomètre)	mbar	20	20		20
Temps de séjour hydraulique	jours	34 (été 2016) 47 (2014)		39	35-40
Siccité des boues entrantes (sortie égoutteur)	% MES	5.1	5.1	7 (2013)	7

Siccité des boues primaires fraîches entrantes au digesteur	%	3.5	3.5	> 3.3 car les boues externes sont en petite quantité	
Matière sèche moyenne digestat	%	2.1	2.1	3.6	4
Température moyenne	°C	36	36	36.4	37
Température minimum	°C	35	35	29	36
Température maximum	°C	37	37	39.3	38
pH moyenne		7.8	7.8	7.4	7.4
Brassage au gaz	m3/h	320	320	250	240
Brassage au gaz	kW él	19	19	14	13
Régime de brassage		Intermittent, 8h/jour	Intermittent, 8h/jour		Intermittent
Intensité électrique de brassage	W/m3	7.3	7.3	5.9	5
Biogaz, teneur en méthane	% vol	61-65	61-65	66	65
Biogaz, production journalière moyenne, 2014	m3/jour	923	923	1'490 (2014)	1'820
Biogaz, production journalière écarte type, 2014	m3/mois	254	254	242 (2014)	182
Biogaz, production journalière, Coefficient de variation	m3/mois	0.28	0.28	0.16	0.1
Production volumétrique de biogaz (bg/volume utile)	m3/m3/jour	0.36	0.36	0.65	0.7
Rendement de production de biogaz	m3/t m.o. chargée	580	580	420	600

Des variations mensuelles du volume ou de la charge organique entrante pourraient perturber le processus biologique de digestion. Les valeurs relevées par la STEP de janvier à novembre 2014 sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Table 11

2014	Volume boue entrant	Charge MO	Production de biogaz	Volume boue out	Sortie MO	HRT
	m3/mois	tonnes/mois	m3/mois	m3/mois	tonnes/mois	jours
<b>moyenne</b>	3544	97	56148	3261	33	47
<b>écarte-type</b>	525	18	15457	1042	12	10
<b>CV</b>	15	18	28	32	36	22

On remarque que les coefficients de variation par mois sont importants. Les coefficients de variation journalier pendant l'étude du traceur (juin à septembre 2016) sont de 31 % pour le volume de boue entrante et de 146% pour le volume de boue sortante. La charge organique journalière n'était pas mesurée. Un effort de réduire le coefficient de variation de la charge journalière et mensuelle est recommandé car toute variation des paramètres importantes à l'activité biologique tels que la température, le temps de résidence des cellules dans le digesteur, la charge organique et la composition du substrat est une cause de stress qui réduit l'activité biologique.

La cible pour la production de biogaz est basée sur le digesteur d'Yverdon-les-Bains et les valeurs théoriques présentées par IAE Bioenergy (Drosg et Bachmann). Les maximums sont 746 Nm<sup>3</sup> t<sup>-1</sup> MO pour glucides, 1390 Nm<sup>3</sup> t<sup>-1</sup> VS pour lipides et 800 Nm<sup>3</sup> t<sup>-1</sup> VS for protéines (VDI 4630, 2006). Selon Bachmann (2015) la production de biogaz des digesteurs des STEP municipaux est entre 450 et 500 m<sup>3</sup>/ t m.o. chargée. Dans de bioréacteurs de 4,8 litres Ofverstrom et. al. ont obtenu 1200 m<sup>3</sup>/t m.o. chargée. Le rendement de biogaz des digesteurs de la STEP d'Yverdon est de 420 m<sup>3</sup>/t m.o. chargée.

Le digesteur de la STEP-ERES est alimenté avec un mélange d'environ 40% de boues primaires et 60% de boues biologiques tandis que le digesteur de la STEP d'Yverdon reçoit environ 66% de boues primaires et 33% de boues biologiques. Il est connu que le rendement de biogaz à partir de boues primaires est supérieur à celui des boues biologiques.

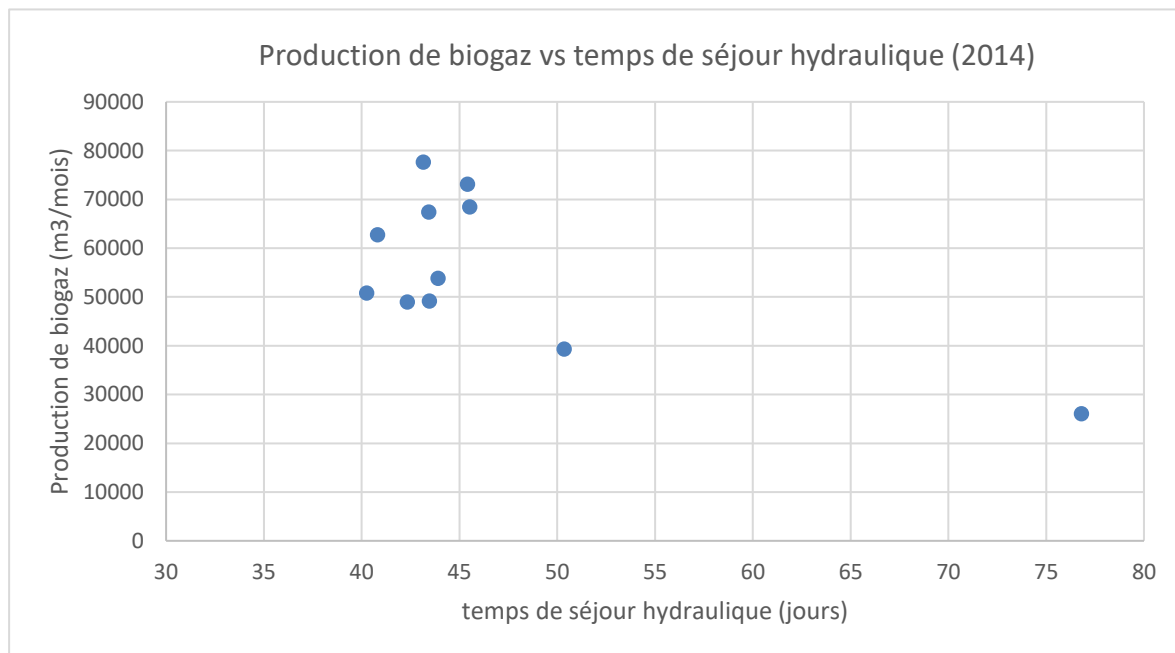


Figure 2

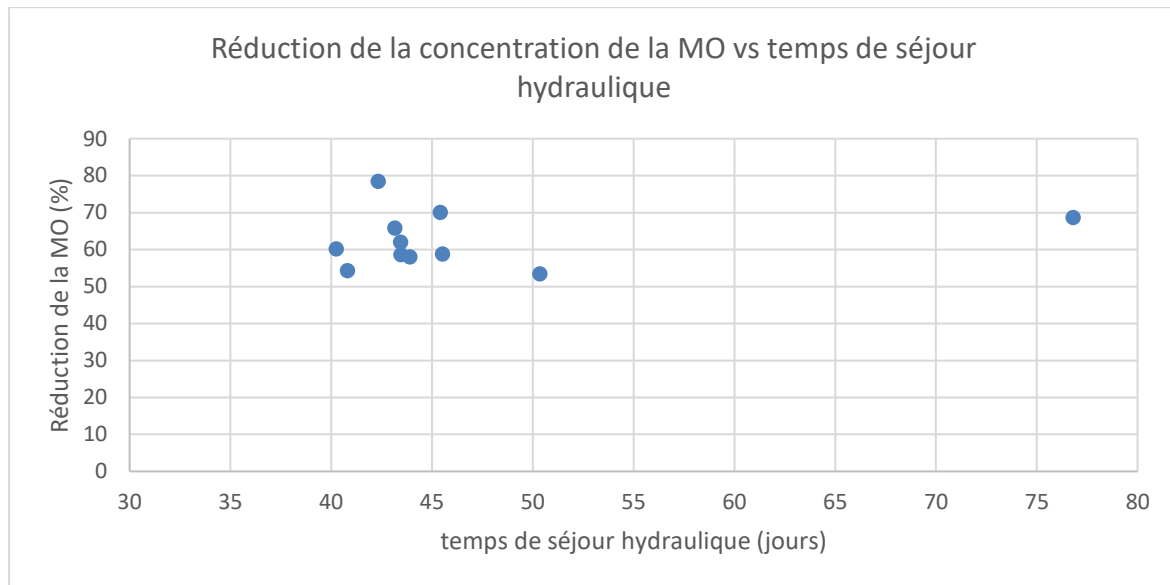


Figure 3

On constate que la production de biogaz et la réduction de la matière organique sont indépendantes du temps de séjour hydraulique qui variaient entre 40 et 77 jours en 2014. Le temps de séjour pendant l'étude du traceur en été 2016 était seulement 34 jours. Normalement, le temps de séjour d'un réacteur infiniment mélangé est lié au taux d'abattement (et par conséquent la production de biogaz et la réduction de la matière organique) selon la relation suivant :

$$R_{su} = (S_o - S) \Theta \text{ où}$$

$R_{su}$  : taux d'utilisation du substrat (kg MO/m<sup>3</sup>/jour) = taux d'abattement

$S_o$  : concentration du substrat entrant (kg MO/m<sup>3</sup>)

$S$  : concentration du substrat sortant (kg MO/m<sup>3</sup>)

$\Theta$  : temps de séjour hydraulique

A partir des données de 2014, le taux d'abattement est  $-0.375 \pm 0.082$  kg MO/m<sup>3</sup>/jour et la réduction moyenne de la concentration de la matière organique est 17 kg/m<sup>3</sup> (63%). Le temps de séjour correspondant au taux d'abattement et la réduction moyenne est alors 45 jours ( $17/0.375 = 45$ ). En 2014 le temps de séjour moyenne était 41 jours et pendant la présente étude de traceur en été 2016 le temps de séjour de 34 jours était bien inférieur au temps de séjour de 45 jours nécessaire pour la destruction de la matière organique.

L'indépendance des taux de production de biogaz et de réduction de la matière inorganique du temps de séjour hydraulique démontrent un dysfonctionnement. Une explication possible est que l'activité biologique actuelle est bien inférieure à l'activité maximale possible. Cette explication de faible activité est en accord avec l'observation de la faible production volumique de 0,36 m<sup>3</sup> biogaz/m<sup>3</sup> liquide utile/jour. Autrement dit, puisque la croissance est faible, l'allongement du temps de séjour ne profite pas au culture de microbes.

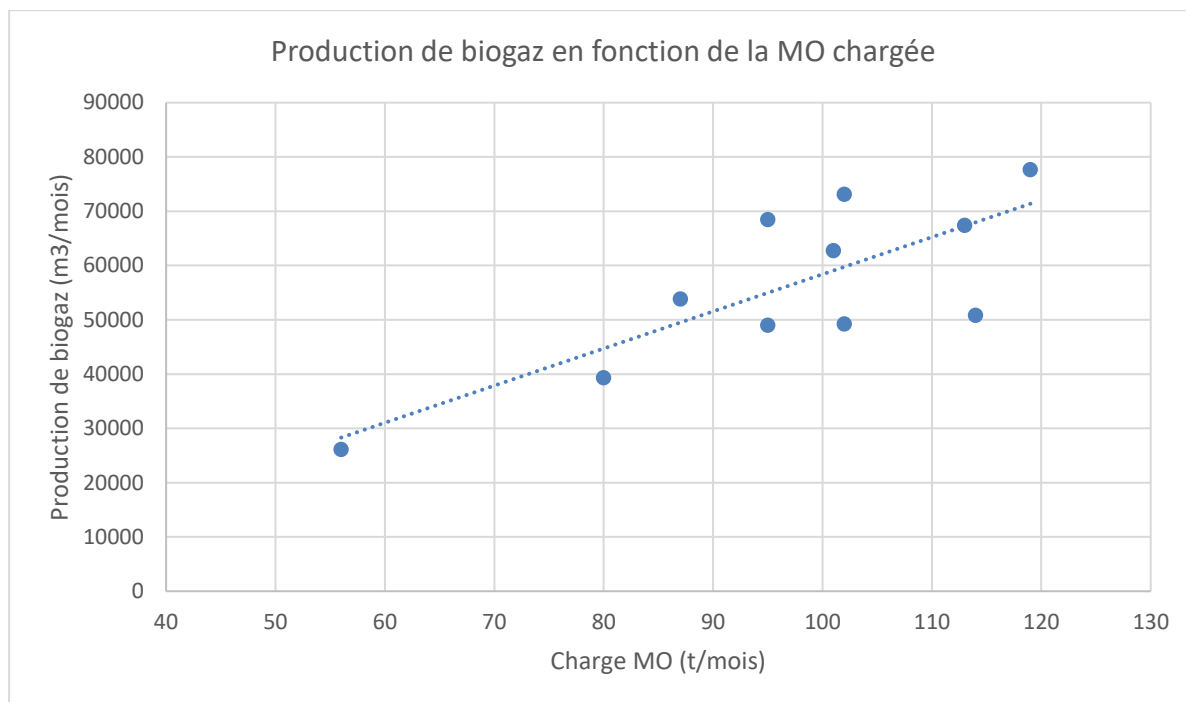


Figure 4

La figure ci-dessus montre que la production de biogaz augmentait avec l'augmentation de la charge organique. Ce résultat implique que les digesteurs ne sont pas surchargés en matière organique.

*Analyse hydraulique du digesteur*

Dans le but d'obtenir une courbe de distribution du temps de résidence d'un traceur dans le digesteur, une solution de 48.78 kg de Chlorure de Lithium dans l'eau a été injecté le 21 juin au point d'arrivée de la boue fraîche dans le digesteur n°1. Des échantillons de digestat sortant ont été prélevés régulièrement de la prise n°1 pendant les 97 jours suivants. Dans le cas idéal, le traceur est immédiatement distribué dans le digesteur et la concentration de traceur diminue dans le temps selon la courbe « idéale » en orange dans le graphique ci-dessous. La concentration théorique au début de 3053 ug/l est obtenue par supposition de dissolution instantanée du Lithium dans le volume utile du digesteur infiniment mélangé

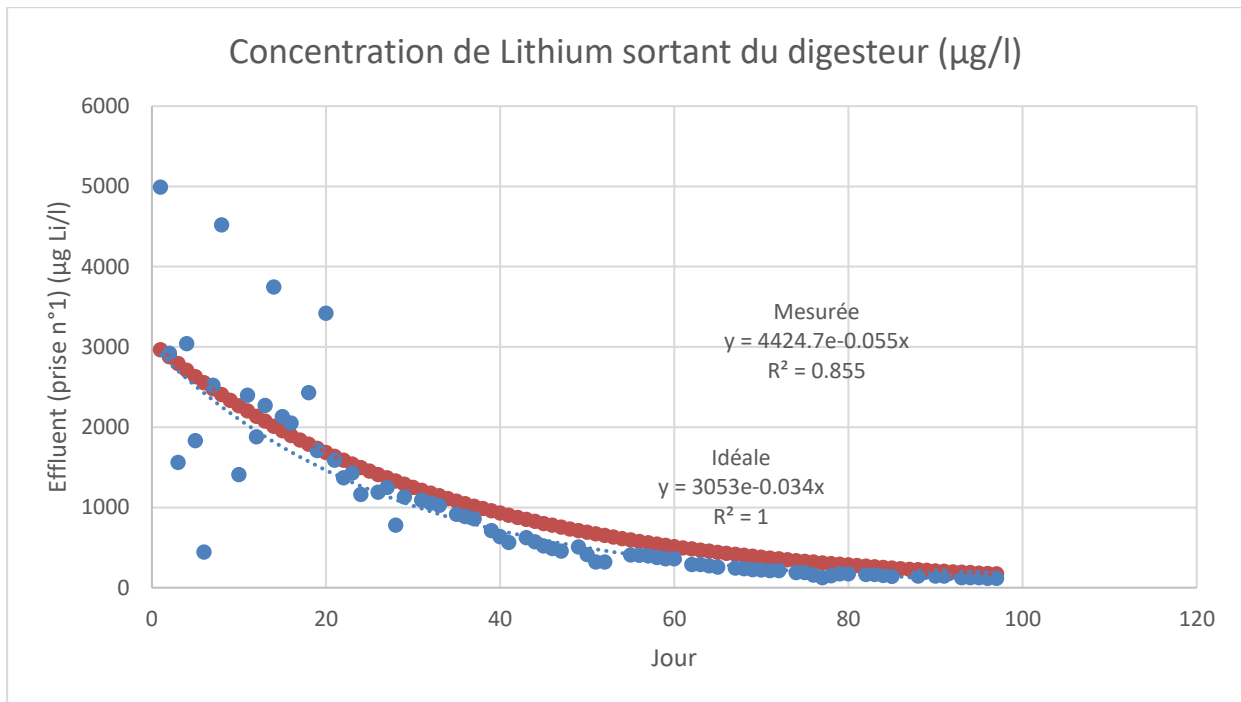


Figure 5

La courbe en bleu représente la concentration de Lithium mesuré dans les échantillons prises suivant l'injection du traceur. Les points en bleu représentent la distribution du temps de résidence du traceur dans le temps. La courbe des tirés en bleu est obtenue de la régression des valeurs de lithium mesurées dans les échantillons de digestat sortant du digesteur.

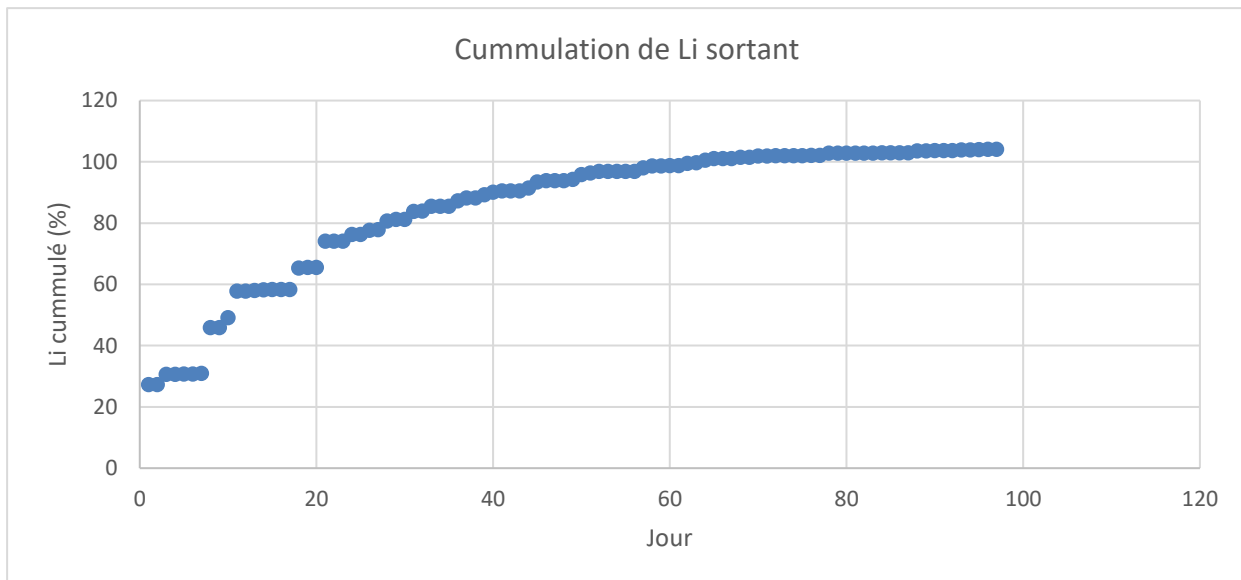


Figure 6

Les échantillons ont été analysés et des graphiques construits dans le but d'obtenir les valeurs conventionnelles des indices et des caractéristiques qui décrivent l'efficacité de mélange du digesteur

L'agitation d'un digesteur anaérobie est lente et par conséquent la courbe réelle de sortie du traceur dévie de la courbe idéale de sortie de traceur d'un digesteur parfaitement mélangé. Cette différence entre le réelle et l'idéale est modélisée par une série de réacteurs infiniment mélangés. La fonction E(t) ci-dessous

décrit la distribution typique des temps de résidence dans une série de réacteurs infiniment mélangés réels. La valeur de n représente le nombre de réacteurs conceptuels en série.

$$E(t) = \frac{t^{n-1}}{(n-1)! \tau_i^n} e^{-t/\tau_i}$$

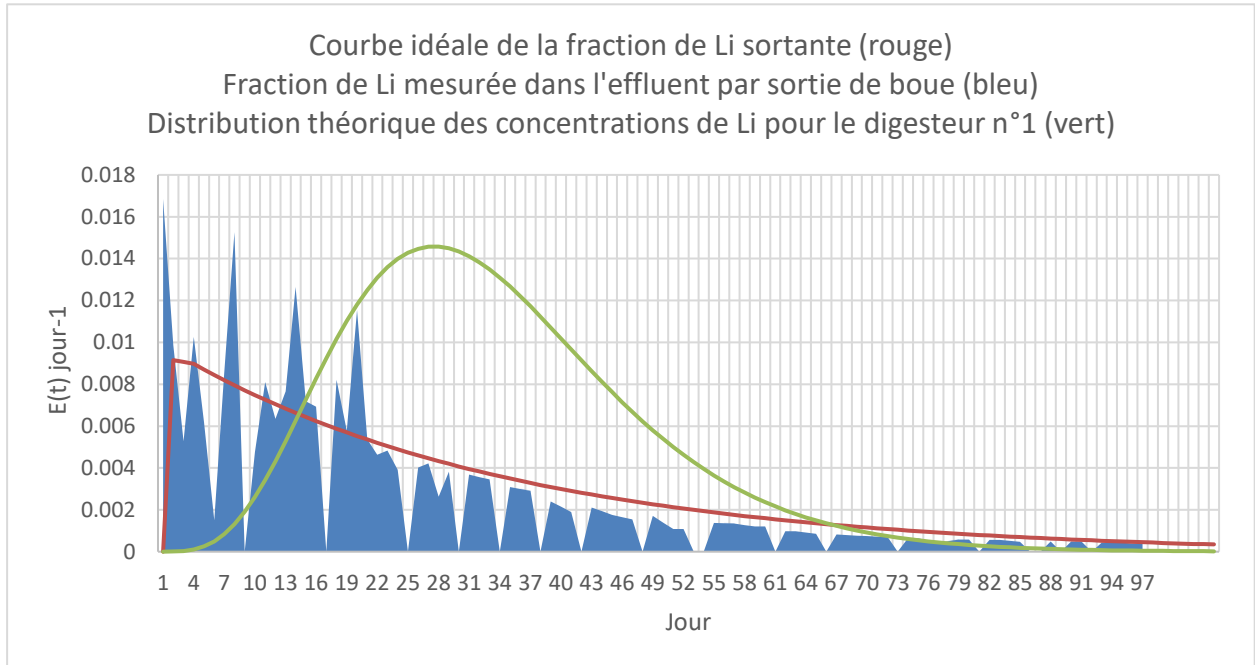


Figure 7

Ligne rouge : Dans le cas idéal, le Lithium est parfaitement mélangé le jour d'injection et la masse de Lithium sortant diminue régulièrement en fonction du temps de séjour hydraulique.

Courbe bleu : La masse de lithium réelle sortante est calculée en multipliant la concentration mesurée fois le volume réel sortant du digesteur. On remarque que pendant les premiers 20 jours la masse réelle sortante dépasse souvent la valeur idéale (ligne rouge). La masse de Lithium sortant en dessus de la ligne rouge comprend 67% du lithium injecté.

Ligne vert : Le nombre de réacteurs théoriques en série calculé à partir des valeurs de Lithium mesurées dans l'effluent du digesteur n°1 est 5.6. On observe aussi que le pic théorique en masse de Li sortant est à 28 jours ce qui est un peu moins que le temps de séjour typique des digesteurs de boue. Ce résultat indique que le digesteur est bien conçu et que le brassage fonction bien.

$$n = \frac{1}{\sigma_{\theta}^2} = \frac{\tau^2}{\sigma^2}$$

Le nombre théorique de réacteurs en série (n) est calculé à partir du temps de séjour hydraulique τ et la variance σ<sup>2</sup> de la distribution de Lithium dans l'effluent du digesteur. Sa valeur est typiquement entre 2 et 3.

$$t_m = \int_0^{\infty} tE(t) dt$$

Le temps de résidence moyenne du traceur (t<sub>m</sub>) calculé à partir de la concentration de Li mesurée dans l'effluent du digesteur

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (t - t_m)^2 E(t) dt$$

La variance du temps de résidence du traceur ( $\sigma^2$ ) est calculée à partir de la concentration de Li mesurée dans l'effluent du digesteur.

L'indice de court-circuit est calculé à partir du temps de la concentration maximum observée et le temps de sortie de 50% de la masse de traceur injectée ( $1 - T_p/T_{50}$ ). Une valeur proche de 1 indique la présence d'un court-circuit.

L'indice de Morrill,  $M_o$ , est le ratio du temps de sortie de 90% de la masse injectée sur le temps de sortie de 10% de la masse injectée ( $t_{90}/t_{10}$ ). La valeur devrait être inférieure à 10.

Le root mean square deviation (RMSD) indique la variation entre les valeurs mesurées par rapport à la courbe idéale de diminution de la concentration de Lithium dans l'effluent.

Les résultats des calculs des indices conventionnels sont présentés dans le tableau ci-dessous

Table 12

Nombre de jours du test	jours	97
Volume utile du digesteur, V	m <sup>3</sup>	2600
Débit sortant moyen, $v_o$	m <sup>3</sup> /jour	77
Temps de séjour théorique, T	jours	34
Concentration initiale de traceur Li, théorique	µg Li/l	3053
part de la masse initiale récupéré, Rec	%	104
Temps de détection initiale, $t_i$ *	jours	1
Temps d'arrivée de la concentration maximale, $T_p$	jours	1
Temps d'arrivée de 10% du Lithium, $t_{10}$	jours	1
Temps d'arrivée de 50% du Lithium, $t_{50}$	jours	10
Temps d'arrivée de 90% du Lithium. $T_{90}$	jours	40
Temps de résidence moyenne du traceur, $t_m$	jours	5.7
Variance du temps de résidence du traceur, $\sigma^2$	jours	203.3
Nombre théorique de cuves en série, n		5.6
Index of short circuiting ( $1 - T_p/T_{50}$ )		0.9
Index de Morrill ( $t_{90}/t_{10}$ ), $M_o$		40.0
RMSD, days 1 to 20		1064
RMSD, days 21 to 40		204
RMSD, days 1 to 40		766
RMSD, all		508
Nombre de jours où le volume sortant > 2X le volume entrant		26

On remarque que la durée de prise d'échantillons était environ 3 fois le temps de séjour hydraulique et que la quantité de Lithium mesurée dans l'effluent était 4% supérieur à la quantité de lithium injecté.

Cette différence pourrait être dû à la nécessité d'estimer des valeurs de concentration ou de volume les jours ou on n'avait pas les 2 données.

Les indices du temps d'arrivée indiquent la présence d'un court-circuit.

Le temps de résidence moyenne du traceur calculé indique qu'une grande partie du traceur sorte bien avant le temps de séjour hydraulique. Ceci indique la présence d'un court-circuit.

La racine carrée de la variance indique que la grande partie du Lithium est sortie moins que 15 jours après le temps de résidence moyenne.

Le nombre théorique de cuves en série calculé indique que la technique de mélange est adéquate (même bonne).

Les indices de short-circuiting et de Morill indiquent la présence d'un court-circuit.

Le RMSD élevée entre jours 1 et 20 indiquent que le traceur n'est pas distribué dans le digesteur de manière homogène pendant les premiers 20 jours.

Le volume sortant du digesteur a été comparé à 2X le volume entrant du digesteur. Pendant les 97 jours d'échantillonnage, le volume sortant était supérieur à 2X le volume entrant sur 26 jours (27% du temps). Sur ces jours, l'effet du court-circuit est particulièrement important. Une partie importante de la matière organique entrante aurait pu passer directement à la sortie sans être digérée.

En utilisant le test t de Student les résultats des déterminations de paramètres physico-chimiques ont été comparés entre elles et aussi contre la valeur moyenne globale. Avec un niveau de confiance de 95% on ne peut pas rejeter l'hypothèse nul d'aucune différence. En conclusion, il n'y a pas de différences entre les valeurs obtenues des 4 prises des digesteurs et par conséquent, on constate que les digesteurs sont bien mélangés.

## CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Table 13

Sujet	Conclusions ou recommandations
Technique d'introduction de la boue fraîche	La présence de court circuits est le problème le plus important relevé par cette étude. Il semble possible que des changements opérationnels simples à mettre en œuvre pourrait remédier ce problème. Dans le but d'assurer une bonne distribution de matière organique fraîche dans le digesteur et d'éviter des courts circuits il est recommandé de toujours (si ce n'est déjà pas le cas) faire la vidange journalière avant introduction de la boue et de brasser immédiatement après l'introduction de la boue fraîche. L'installation d'un distributeur de boue fraîche dans le digesteur est recommandée. La réduction de la variation des volumes journaliers entrants et sortants est aussi recommandé.
Destruction de la matière organique	Les valeurs de la PCS et de la MO sortante sont plus élevées dans le digesteur de la STEP-ERES que de celui d'Yverdon-les-Bains. Les causes possibles sont temps de séjour trop court pour digérer suffisamment la matière organique ou la présence d'une substance qui inhibe l'activité biologique (oxygène, métaux, produit chimique de synthèse...).
Production de Biogaz	La production de biogaz exprimée en volumes de biogaz/volume liquide utile du digesteur/jour est environ 50% des valeurs normales pour un digesteur de boues de STEP municipale. Toutefois, le rendement de biogaz sur m.o. chargée est normal.
Composition du biogaz	La concentration de CH <sub>4</sub> pourrait être augmentée par 5% volume. La concentration élevée de N <sub>2</sub> (mesurée en été 2016 par la STEP indépendamment de la présente étude) pourrait indiquer une entrée d'air indésirable. A partir des mesures de N <sub>2</sub> et O <sub>2</sub> fournies par la STEP, le débit d'entrée d'air est estimé être 4 l/s.
Temps de séjour hydraulique	Le temps de séjour pendant l'étude du traceur était de 34 jours seulement. Pourtant, selon les données pour 2014 reçues de la STEP, le temps de séjour moyen est 41 jours. Le temps de séjour devrait être entre 35 et 40 jours.
Température du digesteur	La température du digesteur doit être maintenue avec une précision de 1°C à une température de consigne entre 35 et 38°C. La température du digesteur de la STEP-ERES est conforme.
Variabilité du régime hydraulique	Les variations dans les volumes journaliers de boue ajoutée et enlevée sont trop grandes. Le coefficient de variation et le nombre de jours sans ajout de boue fraîche devraient être réduits.
Charge organique	L'augmentation de la production de biogaz avec l'augmentation de la charge organique a été mise en évidence. Etant donnée la ratio FOS/TOC basse et la concentration en acide gras volatiles basse, la charge en matière organique pourrait être augmenté sans augmenter la charge hydraulique. La teneur en matière sèche de la boue entrante devrait être augmentée.
Charge hydraulique	La charge hydraulique est trop élevée. Par conséquent, le temps de séjour hydraulique est trop court.

Teneur en matière sèche de la boue entrante	La MES sortant de l'égoutter est environ 7%, ce qui semble correct. Pourtant, la teneur en MES des boues primaires fraîches est seulement 3,5% et par conséquent augmente la charge hydraulique et diminue le temps de séjour hydraulique du digesteur.
Alcalinité	Le rapport FOS/TAC est suffisamment bas pour permettre une augmentation de la charge organique.
Acides gras volatiles	Les concentrations des acides gras volatiles, y compris le propionate, sont basses et n'indiquent pas de dysfonctionnement biologique.
Inhibition par métaux	La concentration de Fer est très élevée. Selon l'indice de Mosey, la concentration totale des métaux est inhibitrice à la digestion. Toutefois, les valeurs mesurées sont similaires aux valeurs mesurées dans d'autres STEP. Aucun autre métal n'est problématique.
Concentration de P	La concentration de P mesuré dans le digestat est très élevée. La récupération de P pourrait être intéressante économiquement. Le P n'est pas nocif à la digestion.
P entrante par les eaux usées d'ELSA	L'industrie laitière utilise couramment le $\text{Na}_3\text{PO}_4$ pour préparer des solutions de nettoyage des installations. Techniquement, la solution la plus simple serait de faire remplacer le $\text{Na}_3\text{PO}_4$ par un autre produit. Pourtant, cette solution n'est probablement pas facile pour ELSA à mettre en œuvre. En plus, le produit remplaçant risque d'induire d'autres problèmes de fonctionnement de la STEP.
Processus d'enlèvement de P	Il existe des procédés commerciaux de captage de P. Le P peut être enlevé en forme de $\text{Mg NH}_4 \text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (MAP or Struvite). Le captage et l'enlèvement du P dans le digestat permettra de diminuer la quantité de $\text{FeCl}_3$ ajoutée pour précipiter le P.
Efficacité de l'agitation du digesteur	Les conclusions de l'étude de la distribution du temps de résidence sont : Il y a un court-circuit par lequel environ 67% de la matière entrante peuvent sortir du digesteur en moins que 20 jours. Cette observation est la plus importante de cette étude et mérite une étude approfondie (études supplémentaires de traceur par exemple) de l'agitation et un éventuel projet d'amélioration.
Efficacité de l'agitation du digesteur	Les résultats de détermination des paramètres physico-chimiques montrent qu'il n'y a pas de différence significative entre les 4 points d'échantillonnage du digesteur. On peut conclure qu'à l'exception du court-circuit, le système d'agitation est efficace.
Technique d'agitation du digesteur	Le maintien de la technique de brassage par recirculation de biogaz est recommandé car elle permet d'introduire de la $\text{H}_2$ et du $\text{CO}_2$ dans le digestat. La puissance installée est adéquate. L'agitation devrait être faite de manière intermittente et jamais en même temps que la sortie du digestat du digesteur.
Temps de rétention des solides	Dans le but d'augmenter le temps de rétention des solides dans le digesteur la rétention de la fraction solide du digestat est recommandée. Ceci pourrait être fait de manière expérimentale avec la centrifugeuse existante. L'installation d'un hydrocyclone, tamis fin ou un procédé membranaire sont d'autres possibilités à étudier.

## REMERCIEMENTS

Merci à :

- Isabelle Monney pour les analyses physico-chimiques du digesteur
- Yves Bourdilloud, gérant, et ses collègues de la STEP-ERES pour fourniture des données de fonctionnement de la STEP-ERES et pour l'échantillonnage journalier pendant l'étude de temps de résidence.
- Olivier N'Doki pour les analyses chimiques (rapport en annexe)
- Jean-Bernard Michel, responsable de l'unité SIB à l'HEIG-VD

## RÉFÉRENCES

1. Bernhard Drosig (2015). IEA Bioenergy Technical Brochure: Process monitoring in biogas plants.
2. Ulrich Bretscher. The Basics of Chemical Phosphorus Elimination with Iron and Aluminum
3. Jackson-Moss, C.A., Duncan, J.R. & Cooper, D.R. The effect of calcium on anaerobic digestion *Biotechnol Lett* (1989) 11: 219. doi:10.1007/BF01026064
4. Hao et, al. New insights into the key microbial phylotypes of anaerobic sludge digesters under different operational conditions. *Water Research* 102 (2016) 158-169.
5. Van Lier et. al.. Effects of acetate, propionate, and butyrate on the thermophilic anaerobic degradation of propionate by methanogenic sludge and defined cultures. *Appl. Environ. Microbiol.* 1993, 59(4):1003 – 1011.
6. Nathalie Bachmann (2015). IEA Bioenergy. Sustainable biogas production in municipal wastewater treatment plants. Technical Brochure.
7. Costa Teixeira, Nascimento Siqueira. Performance Assessment of Hydraulic Efficiency Indexes. *J. Environ. Eng.* 2008.134:851-859.
8. H. Scott Fogler. From Elements of Chemical Reaction Engineering, Models for Nonideal Reactors, chapters 13 and 14. Fourth Edition. Pearson Education (2008).
9. Ofverstrom, Dauknys, Sapkaitė. The effect of iron salt on anaerobic digestion and phosphate release to sludge liquor. *Environmental Protection Engineering.* 2011 3(5): 123–126
10. Smith, Elliot and James. Characterisation of mixing patterns in an anaerobic digester by means of tracer curve analysis. *Ecological Modelling*, 69 (1993) 267-285.
11. Boe, Steyer and Angelidaki. Monitoring and control of the biogas process based on propionate concentration using online VFA measurement. *Water Science and Technology* 57.5. (2008) 661 – 666.