



Analyse des gains énergétiques potentiels et effectifs de stations d'épuration *a priori* économes en énergie

## **RAPPORT FINAL – Août 2019**

**Convention N° 2015 0748** 

IRSTEA – CENTRE DE LYON VILLEURBANNE UNITE DE RECHERCHE REVERSAAL

#### REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse (RMC) pour le soutien financier à ce projet.

Les auteurs remercient également les maîtres d'ouvrage et les exploitants des deux stations d'épuration étudiées, qui ont largement facilité la collecte des données et leur analyse, et ont permis le bon déroulement des campagnes de mesures.

Enfin, l'ensemble des personnes ayant contribué à la collecte et/ou à l'analyse des données présentées est remercié, notamment les stagiaires qui ont contribué au projet.

Gillot, S., Baquerizo, G., Canler, J.P., Fayolle, Y., Filali, A. (2019) Analyse des gains énergétiques potentiels et effectifs de stations d'épuration a priori économes en énergie - Rapport final.

SOⅣ	/MAIRE		
1	CONTEX	XTE ET OBJECTIFS	e
2	έτατ ο	ES LIEUX DES FOLUPEMENTS ET DES PRATIOUES PERMETTANT DE LIMITER	
		ATION ENERGETIQUE DES STATIONS D'EPURATION	. LA
22.	1 ORIE		٩
2.			10
2.	.Z IVIETF		10
2.	.3 PERFC	ORMANCES DES MOTEURS DES EQUIPEMENTS	10
	2.3.1	Mise en place de variateurs de vitesse	10
	2.3.3	Classes d'efficacité énergétique	11
	2.3.4	Maintenance des moteurs	12
2.	.4 Perfo	DRMANCES DES SYSTEMES DE POMPAGE ET DE PRODUCTION D'AIR	12
	2.4.1	Consommation énergétique des systèmes de pompage et de production d'air	12
	2.4.2	Courbes de fonctionnement des systèmes de pompage et de production d'air	12
	2.4.3	Optimisation énergétique des équipements de pompage et de production d'air	14
	2.4.3.1	Réduire la charge en aval des équipements de pompage et de production d'air	14
	2.4.3.2 dimens	Eviter le surdimensionnement et prise en compte du fonctionnement en sous-charge dar ionnement des équipements	ns le 14
	2.4.3.3	Réduire les fuites	15
	2.4.4	Systèmes de production d'air : Technologies existantes et pistes d'optimisation spécifiques	15
	2.4.4.1	Technologies existantes	15
	2.4.4.2 énergét	Innovations technologiques récentes impliquant un impact potentiel sur les performa iques	inces 16
	2.4.4.3	Autres éléments impactant la consommation énergétique associés aux systèmes de production d'a	air 17
	2.4.5	Systèmes de pompage : Technologies existantes et pistes d'optimisation spécifiques	17
2.	.5 Syste	MES D'AGITATION	18
	2.5.1	Agitateurs lents à grandes pales	18
	2.5.2	Agitateurs rapides	20
	2.5.3	Agitateurs hyperboloïdes	20
2.	.6 Syste	MES D'AERATION	21
	2.6.1	Présentation des paramètres caractéristiques des performances des systèmes d'aération	21
	2.6.2	Presentation des differentes technologies d'aeration	22
_	2.6.3	Gestion du système de production d'air à l'aide de données capteurs	24
2.	.7 Conc	LUSIONS	25
3. ENE	ANALYS RGETIQU	SE DES DONNEES DE FONCTIONNEMENT ET DES CONSOMMATIONS D'EPURATION ETUDIEES	)NS 27
3.	.1 Meth	IODOLOGIES EMPLOYEES	27
	3.1.1	Analyse des données de fonctionnement des stations d'épuration	27
	3.1.2	Analyse des consommations énergétiques des installations	28
3.	.2 Prese	NTATION DES SITES ET DES DONNEES ANALYSEES	30
	3.2.1	Descriptif des stations d'épuration	30
	3.2.2	Données analysees	32

3.3 ANAI	YSE DU FONCTIONNEMENT DES INSTALLATIONS – FILES EAU	33
3.3.1	Distribution des débits en entrée de la station	33
3.3.2	Analyse des caractéristiques des eaux résiduaires	35
3.3.2.1	Ratios caracteristiques	35
3.3.2.2	Biodegradabilité des eaux residuaires avant et apres decantation	35
3.3.3	Charges journalières	
3.3.3	3.1 Charges journalieres ramenées à l'equivalent habitant	
3.3.3	3.2 Charges massique des installations – age de boues	37
3.3.4	Rendements de dépollution des installations	
3.3.5	Zoom sur le fonctionnement des decanteurs primaires de la feyssine	39
3.3.6	Zoom sur le fonctionnement des reacteurs biologiques de bourg en Bresse	40
3.4 ANAI	YSE DU FONCTIONNEMENT DES INSTALLATIONS – FILES BOUES	41
3.4.1	Performances des ouvrages de dEshydratation des boues	41
3.4.1.1	Taux de capture	
3.4.4.2	Retours en tête des files boues	42
3.4.2	Performances des digesteurs	42
3.4.2.1	Caractérisation des boues en entrée et sortie les digesteurs	43
3.4.2.2	Rendements des digesteurs	45
3.4.2.3	Analyse des productions de biomethane	46
3.4.2.2	Utilisation du biogaz produit	47
3.5 Anai	YSE DES DEPENSES ENERGETIQUES DES INSTALLATIONS	48
3.5.1	Validation préalable des données	48
3.5.2	Types d'énergie utilisée	
3.5.3	Consommation energétique globale des installations	49
3.5.4	Consommation energétique par postes	50
3.6 CON	CLUSIONS	52
4. MODE	ISATION DU FONCTIONNEMENT DES INSTALLATIONS	54
4.1 Сног	X DES MODELES	54
4.1.1	Modèles biocinétiques	54
4.1.2	Modèles de fractionnement	55
4.1.2.1	Fractionnement des EAux résiduaires	55
4.1.2.2	Fractionnement des boues alimentant les digesteurs	56
4.1.3	Modeles de separation de phases	57
4.1.4	Modeles d'énergie	57
4.2 CALA	GE ET VALIDATION DES MODELES	59
4.2.1	Modeles biocinetiques	59
4.2.1.1	File eau	59
4.2.1.2	File boues	61
4.3 ANAI	YSE DE DIFFERENTS SCENARIOS A L'AIDE DE LA SIMULATION	63
4.3.1	Scenario 1. consommation energetique de la feyssine a charge nominale	63
4.3.2	Scenario 2. Impact de la temperature du digesteur de BOURG en BRESSE sur ses per 64	formances
4.3.3 en tete	Scenario 3. Impact de la charge reçue par le digesteur sur ses performances et sur 64	les retours
4.4 CON	CLUSIONS	65

5.	CONCLUSION GENERALE	. 67
6.	REFERENCES	. 69

Annexe 1. D'UNE INSTALL	Tableau de repartition des depenses energetiques dans les differents files, postes et sous-post         ation	'ES 70
ANNEXE 2.	SCHEMAS DETAILLES DE LA STATION D'EPURATION DE LA FEYSSINE	71
ANNEXE 3.	SCHEMAS DETAILLES DE LA STATION D'EPURATION DE BOURG EN BRESSE	73
ANNEXE 4.	REPARTITION DES DEBITS DES EAUX RESIDUAIRES EN ENTREE DES INSTALLATIONS	79
ANNEXE 5.	BILAN DE FONCTIONNEMENT DES DECANTEURS PRIMAIRES DE LA FEYSSINE	31
ANNEXE 6.	REPARTITION DES FLUX EN ENTREE ET SORTIE DU DECANTEUR PRIMAIRE DE LA FEYSSINE	33
ANNEXE 7.	ANALYSE DES BOUES ALIMENTANT LES DIGESTEURS	34
ANNEXE 8.	MESURE DES PERFORMANCES D'AERATION ET DES EMISSIONS DE PROTOXYDE D'AZOTE – BOURG EN BRESSE 8	36
ANNEXE 9.	FRACTIONNEMENT DES EAUX USEES	37

#### 1 CONTEXTE ET OBJECTIFS

La réduction des dépenses énergétiques des systèmes d'assainissement est devenue un enjeu majeur ces dernières années en lien avec la maîtrise de leurs coûts d'exploitation et la réduction de leurs potentiels impacts environnementaux. A l'instar de la loi de transition énergétique pour la croissance verte, et comme indiqué dans l'arrêté du 21 juillet 2015 relatif aux systèmes d'assainissement collectif, l'exploitation de ces systèmes doit minimiser leur consommation énergétique.

L'étude menée par Irstea et l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse (RMC) de 2013 à 2017, visant à établir un état des lieux national des dépenses globales (électricité et autres énergies primaires achetées) des filières de traitement intensif des eaux usées, a montré que les stations d'épuration à boues activées françaises consommaient en moyenne 3 kWh par kg de DBO<sub>5</sub> traitée. Ce ratio apparaît relativement élevé comparativement à ceux de la littérature : par exemple en Allemagne, un ratio moyen de 1.37 kWh/kg DBO<sub>5</sub> est annoncé (Haberkern et al., 2008). Cette différence s'explique pour partie par le faible taux de charge des stations françaises (50% en moyenne d'après Stricker *et al.*, 2018). A l'aide de cet état des lieux, chaque installation a la possibilité de situer ses dépenses énergétiques par rapport à celle du parc français, et d'initier une optimisation énergétique, le cas échéant.

D'après la littérature, les mesures mises en œuvre pour atteindre de faibles ratios de consommation énergétique relèvent globalement de l'optimisation des procédés pour réduire les consommations énergétiques, notamment celles liées aux postes les plus consommateurs des filières (aération, relevage, séchage...). Une meilleure valorisation du biogaz produit par les installations équipées de digesteurs anaérobies est aussi l'un des critères de définition des éco-stations (AESN et Conseil régional Île-de-France, 2010), même si l'état des lieux réalisé par l'Agence de l'Eau RMC en 2012 a montré que l'objectif principal dans le choix d'installer un digesteur restait la réduction des volumes de boues produites et que les critères énergétiques étaient jusqu'à récemment secondaires (AERMC, 2012). Ce dernier objectif est cependant réévalué depuis la possibilité ouverte d'injecter le biométhane produit dans les réseaux de gaz.

Enfin d'autres initiatives hors process (installation de panneaux photovoltaïques, d'éoliennes, de microturbines, récupération de la chaleur des eaux usées) participent également à la réduction de la facture énergétique des installations.

L'une des difficultés rencontrées pour réduire les dépenses énergétiques des stations est liée au fait que les procédés sont souvent optimisés de manière unitaire, sans tenir compte de l'impact de choix de conception, de dimensionnement ou de fonctionnement sur les performances globales de la station, notamment ses performances environnementales. L'impact de la filière boues sur la filière eau, et vice-versa, est cependant largement connu : par exemple un meilleur rendement des décanteurs primaires qui alimentent les digesteurs induit une production de biogaz plus importante mais peut impacter négativement la dénitrification dans l'étage biologique (par déficit de matière organique) et les coûts d'aération via la charge supplémentaire vers l'étage biologique liée aux retours en tête du traitement des boues. Pour pallier cette difficulté et étudier différents scénarios de manière holistique, les outils de modélisation du fonctionnement des installations apparaissent comme particulièrement adaptés.

Dans ce contexte, l'objectif principal du projet « Analyse des gains énergétiques potentiels et effectifs de stations d'épuration *a priori* économes en énergie » était d'identifier les pistes de réduction des dépenses énergétiques d'installations couplant un étage biologique à boues activées et un digesteur anaérobie et de quantifier les gains potentiels. Ce projet a été construit dans le cadre de l'appel à projets de 2014 de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse (AERMC) intitulé « Réduire l'impact énergétique des systèmes d'assainissement : Récupération / Production de l'Energie ».

La démarche retenue au cours du projet est synthétisée sur la Figure 1.



Figure 1. Démarche du projet

Cette démarche est adaptée des travaux du groupe IWA concernant le développement de modèles numériques pour les boues activées (Rieger *et al.*, 2012) et repose sur une analyse poussée des données de fonctionnement des installations. Des campagnes de mesure spécifiques ont été réalisées lorsque les données d'autosurveillance et d'exploitation ne suffisaient pas à alimenter les modèles. Une attention particulière a été portée à l'analyse des dépenses énergétiques des deux installations, en utilisant notamment les outils développés par Stricker *et al.* (2017) dans le cadre de l'étude sur l'état de l'art des dépenses énergétiques des stations d'épuration françaises.

Le projet a comporté 3 étapes principales qui constituent les trois principaux chapitres de ce rapport :

- Un état des lieux des équipements et des pratiques permettant de limiter la consommation énergétique des stations d'épuration : après une courte synthèse bibliographique mettant en exergue les installations économes en énergie en fonction du choix des filières et de leur configuration, les équipements identifiés suite à des entretiens avec les équipementiers de la profession comme potentiellement performants sont présentés. Les innovations technologiques proposées sont discutées.
- Une analyse poussée de deux installations couplant boues activées et digestion anaérobie : les mesures réalisées et les données d'autosurveillance des installations sont synthétisées, de même que l'analyse de leurs performances et des dépenses énergétiques associées, afin identifier les optimisations potentielles. Ces données validées sont indispensables pour mener à bien la dernière étape du projet : l'élaboration de modèles de fonctionnement incluant les différentes étapes de traitement et les coûts énergétiques associés.
- La simulation du fonctionnement de ces installations, et l'analyse de scenarios visant à optimiser leur bilan énergétique.

Les stations d'épuration retenues dans le cadre du projet sont celle de La Feyssine, dimensionnée en prenant en compte des critères d'éco-performance, d'après le constructeur, et celle de Bourg-en-Bresse, de conception plus ancienne qui ne prenait pas en compte ce type de critères. Les mesures *in situ* et le développement des modèles ont été réalisés par les équipes d'Irstea Lyon-Villeurbanne et Antony dont les activités portent sur le traitement des eaux résiduaires. L'équipe d'Antony a également réalisé les entretiens avec les équipementiers, dont les enseignements sont présentés dans le chapitre 3 de ce rapport. Un comité de pilotage du projet comprenant l'Agence de l'Eau RMC, Irstea, un représentant du Grand Lyon et les exploitants des deux stations retenues pour l'étude a été constitué et s'est réuni régulièrement tout au long du projet.

Les résultats présentés ci-après ont été obtenus notamment dans le cadre du projet de Guillermo Baquerizo, chercheur accueilli à Irstea Lyon-Villeurbanne de 2014 à 2017, et de différents stages :

- Justine FIAT (avril septembre 2015) ingénieur Polytech Nantes
- Agathe FOURNIER (septembre 2015 janvier 2016) Master INSA Toulouse
- Roger SAMSO (mai 2015 décembre 2016) post-doctorant
- William DAVY (février 2016 juillet 2016) ingénieur CPE Lyon
- Oscar AVELLANEDA (février 2016 juillet 2016) ingénieur INSA Toulouse
- Kimberly SOLON (avril 2019 août 2019) post-doctorante de l'Université de Gand (Belgique)

### 2 ETAT DES LIEUX DES EQUIPEMENTS ET DES PRATIQUES PERMETTANT DE LIMITER LA CONSOMMATION ENERGETIQUE DES STATIONS D'EPURATION

#### 2.1 OBJECTIFS

Plusieurs articles récents proposent un état des lieux des dépenses énergétiques pour le traitement des eaux résiduaires. Celui issu du projet européen ENERWATER (http://www.enerwater.eu/) conforte les résultats obtenus par Irstea (Stricker *et al.*, 2018). Les principaux facteurs qui déterminent la consommation énergétique d'une station d'épuration sont les suivants (Longo *et al.* 2016) :

- le choix de la filière de traitement et sa configuration (présence d'un traitement primaire, nombre de files...) et le choix des équipements ;
- la taille de l'installation et son taux de charge ;
- la dilution des effluents.

Le procédé secondaire notamment a un impact significatif sur l'énergie consommée, comme présenté sur la Figure 2. Sur cette figure sont reportées les consommations spécifiques obtenues dans l'état de l'art français pour les boues activées, les bioréacteurs à membranes (MBR) et les biofiltres (Stricker *et al.*, 2018). La courbe proposée par Longo *et al.* (2016) est également indiquée (tout procédé secondaire confondu).



Figure 2. Consommation spécifique d'énergie en fonction du procédé secondaire (Stricker *et al.*, 2018) et comparaison avec Longo *et al.* (2016)

Les résultats de Stricker et al. (2018) sont concordants avec ceux de la littérature, indiquant une nette diminution de la consommation spécifique avec la charge reçue par l'installation. A charge reçue donnée, les procédés à boues activées sont moins énergivores que les procédés plus récents (BRM) ou à biomasse fixée (biofiltres). La forte dispersion des résultats est notable, indiquant que d'autres paramètres que le type de procédé secondaire et la charge reçue fixent la consommation énergétique d'une station d'épuration (la dilution des effluents, les conditions opératoires...).

Les indicateurs globaux de consommation énergétique sont intéressants pour comparer les installations entre elles, cependant un diagnostic énergétique plus poussé doit être réalisé si l'on souhaite identifier les gains potentiels. Ce diagnostic doit permettre de décomposer les consommations par poste et sous-poste, de manière à identifier les surconsommations par comparaison avec les données usuelles ou issues de la

littérature (Stricker *et al.*, 2017). Dans le cadre de cette étude, les auteurs ont mis en évidence, sur la base d'analyse de données, la répartition de ces consommations sur les différents postes et équipements installés :

- la consommation énergétique liée au poste agitation et aération représente de 60 à 90 % de la consommation de l'ensemble de la file eau. La part consacrée à l'aération est de 20 à 80 %, tandis que la part consacrée à l'agitation, bien que généralement inférieure, peut s'élever jusqu'à 66% ;
- la part consacrée au pompage pour le relevage (en entrée ou en sortie de station) et la recirculation des eaux représente respectivement 5 – 18 % et 2 – 12 % de la consommation énergétique globale de la file eau ;
- l'ordre de grandeur (en excluant le séchage thermique) associée à la file boue reste limitée au regard de la file eau (4 – 12 % de la consommation énergétique globale des installations étudiées).

Cette répartition, bien que très hétérogène d'un site à l'autre, met en évidence que l'optimisation énergétique passe notamment par la maitrise de l'efficacité énergétique des équipements de ces postes les plus consommateurs. Aussi, l'objectif est de proposer un état des lieux des principales technologies proposées sur le marché de l'équipement des installations de traitement et de valorisation des eaux usées. Le choix a été fait de se focaliser sur les grandes catégories d'équipements équipant la file eau des stations de traitement et de valorisation des eaux, en lien avec les postes les plus consommateurs identifiés ci-dessus. Cette étude a permis de faire un recensement des différentes solutions techniques proposées par les équipementiers, notamment pour l'optimisation énergétique des installations. En ressort également des recommandations relatives aux bonnes pratiques d'utilisation et de conception des installations en vue de limiter la consommation énergétique des installations.

#### 2.2 METHODOLOGIE MISE EN ŒUVRE

Cette étude s'est principalement concentrée sur les équipements de la file eau, qui, en l'absence de séchage thermique, représente généralement la part la plus importante de la consommation énergétique des installations de traitement et de valorisation des eaux résiduaires, à savoir : (i) les systèmes d'alimentation en air (surpresseurs / compresseurs, aérateurs), (ii) les pompes, (iii) les systèmes d'aération et (iv) les agitateurs.

Cet état des lieux de procédés économes d'énergie s'appuie sur des contacts avec les fournisseurs d'équipements installés sur les stations d'épuration, qui ont été auditionnés afin d'établir un panorama des équipements proposés et des innovations technologiques associées, ainsi que des pratiques permettant de limiter/optimiser la consommation énergétique des stations de traitement des eaux résiduaires. Cet état des lieux est complété par un recensement des différentes technologies proposées et l'analyse de documents obtenus auprès des équipementiers.

#### 2.3 PERFORMANCES DES MOTEURS DES EQUIPEMENTS

#### 2.3.1 CARACTERISTIQUES DES MOTEURS

Sur l'ensemble des équipements étudiées dans le cadre de ce rapport, les moteurs les équipant sont principalement de deux types :

- <u>Moteurs asynchrones :</u> Ce type de moteurs est constitué d'un stator fixe dans lequel le moteur tourne.
   Ces équipements nécessitent des démarreurs progressifs et/ou des variateurs de vitesse afin de permettre des démarrages moins abrupts et limiter le courant de démarrage. C'est la catégorie de moteurs la plus installée du fait de leur fiabilité et de leur robustesse. Cependant, le nombre de démarrages par heure de ce type de moteurs doit être limité (de l'ordre de 6 démarrages par heure) afin de ne pas les endommager ;
- <u>Moteurs synchrones à aimants permanents :</u> Ce type de moteur fonctionne selon le même principe que les moteurs asynchrones à la différence près qu'il n'y a pas de glissement entre le stator et le

rotor du fait de l'utilisation d'aimants. Cette absence de frottement permet de limiter les pertes et ainsi d'augmenter le rendement du moteur. Ce type de moteur ne peut être dissocié de l'installation d'un variateur de vitesse pour son fonctionnement. De plus, il est préférable de maintenir la rotation des aimants à la fréquence la plus basse lors des plages de non fonctionnement de l'équipement afin de limiter l'usure du moteur, entrainant une consommation continue en dehors des plages de fonctionnement des équipements (de l'ordre de 2 à 3% de la puissance nominale du moteur).

#### 2.3.2 MISE EN PLACE DE VARIATEURS DE VITESSE

Les variateurs de vitesses permettent de régler la vitesse et le couple d'un moteur en faisant varier sa fréquence et sa tension. L'installation de tels équipements permet ainsi d'adapter le régime de fonctionnement des équipements aux besoins du procédé et permettre une plus grande flexibilité.

A noter cependant que l'intégration d'un variateur de vitesse permet de limiter la consommation énergétique globale des équipements mais induit une perte de rendement énergétique du couple moteur / variateur de vitesse. Ces pertes de rendement sont d'autant plus fortes que la puissance nominale du moteur est faible. De plus, le variateur de vitesse entraine une consommation énergétique pour son fonctionnement propre (de l'ordre de 2 à 3%).

#### 2.3.3 CLASSES D'EFFICACITE ENERGETIQUE

L'évolution des différentes réglementations a permis de considérablement améliorer l'efficacité énergétique des moteurs proposés sur le marché européen. Au niveau international, la norme IEC 60034-30 (2014) définit les classes de rendement de l'ensemble des moteurs. Cette norme propose ainsi quatre classes de rendement, définissant les rendements minimums des moteurs à leur puissance nominale et en fonction de leur fréquence de fonctionnement et du nombre de pôles. Les classes actuelles sont (du rendement le plus faible au rendement le plus élevé) définies ci-dessous et illustrées par la Figure 3 :

- IE1 = Rendement standard ;
- IE2 = Haut rendement ;
- IE3 = Rendement « premium » ;
- IE4 = Rendement « super premium ».



Figure 3. Classes de rendement des moteurs selon CEI 60034-30-1 - Source : Brunner et al., 2018

A la lecture de la Figure 3, il apparait que, pour chacune des classes IE, le rendement des moteurs est fortement dépendant de la puissance nominale installée. Aussi, les gains de rendement énergétique induits par le remplacement des moteurs est d'autant plus important que la puissance nominale installée est faible. De plus, le passage de moteurs de classe IE1 à IE2 induit des gains de performances plus importants que pour le passage vers les classes supérieures.

A noter que certains fournisseurs proposent déjà des moteurs répondant à une nouvelle classe de rendement IE5, permettant d'atteindre des performances encore supérieures.

Depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2017, l'ensemble des moteurs de puissance comprises entre 0,75 et 375 kW doivent répondre à la classe de rendement IE3, au minimum, ou à la classe de rendement IE2 sous condition d'être équipés d'un variateur de vitesse. A noter que cette obligation ne s'applique pas aux moteurs immergés. Cependant, divers fournisseurs de pompes et d'agitateurs immergés proposent des équipements sur lesquels on retrouve des moteurs de classe IE3, voire IE4.

Dans le cas de remplacement d'équipements, des gains énergétiques conséquents peuvent être envisagés, en lien avec ces évolutions réglementaires imposant l'installation de moteurs plus efficaces. Ces gains énergétiques sont d'autant plus forts que la puissance nominale du moteur est faible et que l'augmentation de classe énergétique est importante.

#### 2.3.4 MAINTENANCE DES MOTEURS

La maintenance des moteurs est essentielle afin de rallonger leur durée de vie mais également afin de limiter la perte d'efficacité de ces derniers au cours du temps.

Différentes opérations de maintenance peuvent être mises en place : contrôle des pièces mécaniques, graissage des roulements, rembobinage (remplacement des enroulements), remplacement des pièces d'usure, ... A noter cependant qu'il est préférable de ne pas dépasser un rembobinage par moteur, ces derniers entrainant une perte du rendement du moteur de l'ordre de 1 à 5%.

#### 2.4 PERFORMANCES DES SYSTEMES DE POMPAGE ET DE PRODUCTION D'AIR

#### CONSOMMATION ENERGETIQUE DES SYSTEMES DE POMPAGE ET DE PRODUCTION D'AIR 2.4.1

La puissance totale consommée par les équipements de pompage et de production d'air est fonction de différents paramètres liés au débit généré, au type de fluide transporté, et aux rendements des différents éléments le constituant, tel que présenté dans l'équation suivante :

 $\mathsf{P} = \frac{\mathsf{Q} \mathrel{x} \mathrel{\Delta} \mathsf{P} \mathrel{x} \mathrel{\rho} \mathrel{x} \mathsf{g}}{\eta_\mathsf{P} + \eta_\mathsf{Transmission} + \eta_\mathsf{Moteur} + \eta_\mathsf{Variateur}}$ 

Avec : P = Puissance électrique consommée (W) / Q = Débit volumique de fluide ( $m^3/s$ ) /  $\Delta P$  = Différence de pression entre l'amont et l'aval et pertes de charges associées à l'écoulement du fluide (m) / ρ = Densité du fluide transporté (kg/m<sup>3</sup>) /  $\eta_P$  = Rendement de la pompe ou du compresseur – surpresseur correspondant à la puissance utile donnée au fluide rapportée à la puissance absorbée à l'arbre (-) / n<sub>Transmission</sub> = Rendement entre la puissance apporté à l'arbre et la puissance du moteur (W) /  $\eta_{Moteur}$  = Rendement énergétique du moteur (-) / η<sub>Variateur =</sub> Rendement énergétique du variateur si équipé (-).

#### COURBES DE FONCTIONNEMENT DES SYSTEMES DE POMPAGE ET DE PRODUCTION D'AIR 242

Chaque équipement de type pompe / surpresseur / compresseur dispose d'un diagramme de fonctionnement propre, comme illustré sur la Figure 4, incluant :

Une courbe de pression - débit (ou profil de charge) : La courbe pression - débit définit la pression que l'équipement peut contrer pour un débit donné. Cette courbe est fonction des caractéristiques propres de la pompe et de sa vitesse de fonctionnement ;

- <u>Une courbe de rendement :</u> La courbe de rendement représente l'évolution du rendement de la pompe / surpresseur / compresseur en fonction du débit de fluide généré. Cette courbe de rendement est dépendante uniquement des caractéristiques de la pompe ;
- <u>Une courbe du système :</u> La courbe du système représente l'évolution de la pression à vaincre au sein du système en fonction du débit généré. Cette courbe est fonction de la pression statique (différence de pression hydrostatique) et dynamique (liées aux pertes de charges régulières [frottement dans les canalisations] et singulières [coudes, vannes, ...] dans le réseau de distribution) en aval de l'équipement.



Figure 4. Courbes caractéristiques de fonctionnement de pompes / surpresseurs / compresseurs pour un fonctionnement (a) sans différence de pression hydrostatique entre l'amont et l'aval et (b) avec différence de pression hydrostatique entre l'amont et l'aval – Cas des pompes de relevage et des systèmes de production d'air

L'intersection entre la courbe du système et la courbe de pression - débit définit le point de fonctionnement de la pompe. Un rendement de la pompe / surpresseur / compresseur est associé à ce point de fonctionnement. Lors du dimensionnement de ces équipements, l'objectif est de proposer des modèles permettant de satisfaire aux critères de débits tout en permettant d'avoir un rendement maximal.

La variation de vitesse (dans le cas des équipements équipés de variateur) va induire une modification des courbes pression – débit tel qu'illustré sur la Figure 5.



Figure 5. Courbes caractéristiques de fonctionnement de pompes / surpresseur / compresseur pour une variation de vitesse de 40 à 100%

Cette variation de vitesse va induire une modification des points de fonctionnement, et donc de l'efficacité de l'équipement associé. Pour un équipement sélectionné et afin pour disposer d'un rendement maximal pour son point de fonctionnement, la variation de vitesse va donc induire une diminution du rendement de la pompe et donc de l'efficacité énergétique de l'équipement dans les plages de fonctionnement à vitesse réduite.

#### 2.4.3 OPTIMISATION ENERGETIQUE DES EQUIPEMENTS DE POMPAGE ET DE PRODUCTION D'AIR

Au regard des fonctionnements caractéristiques des systèmes de pompage et de production d'air, des recommandations communes en terme d'optimisation énergétique peuvent être proposées.

#### 2.4.3.1 REDUIRE LA CHARGE EN AVAL DES EQUIPEMENTS DE POMPAGE ET DE PRODUCTION D'AIR

Le profil hydraulique et aéraulique de l'installation doit être optimisé afin de limiter les charges en aval des équipements de pompage ou de production d'air. Cette réduction de la charge en aval peut s'effectuer en jouant sur différents paramètres lors du dimensionnement des installations :

- <u>Augmenter le diamètre des canalisations :</u> les pertes de charges régulières dues au frottement des fluides au niveau des parois des canalisations sont proportionnelles aux diamètres de ces dernières à la puissance 5. Aussi, pour un même débit de fluide, le fait de doubler le diamètre des canalisations a pour effet de réduire les pertes de charges régulières de 97% ;
- Limiter les pressions statiques liées aux colonnes d'eau à vaincre en aval des équipements : Dans le cas des pompes de relevage, il est primordial de veiller à réduire le plus possible la différence de niveau entre le poste de relevage et l'entrée de l'installation. Ce critère doit être pris en compte lors du choix d'implantation des installations et des postes associés ;
- <u>Préférer des canalisations avec des rugosités réduites :</u> L'installation de canalisations avec des rugosités internes les plus faibles possibles permet de limiter les pertes de charges singulières par frottement ;
- <u>Optimiser le profil hydraulique et aéraulique des installations :</u> en limitant le plus possible les pertes de charges singulières créées par les différents obstacles pouvant être présents sur la canalisation (débitmètres intrusifs, vannes, coudes, ...).

Pour le cas des systèmes de pompage, des gains énergétiques important peuvent être générés en limitant la charge en aval des pompes par l'optimisation du profil hydraulique de l'installation. Pour les systèmes de production d'air, la charge en aval de l'équipement est principalement liée à la pression hydrostatique de la colonne d'eau correspondant à l'immersion des diffuseurs et à la perte de charge générée par les diffuseurs.

### 2.4.3.2 EVITER LE SURDIMENSIONNEMENT ET PRISE EN COMPTE DU FONCTIONNEMENT EN SOUS-CHARGE DANS LE DIMENSIONNEMENT DES EQUIPEMENTS

Les installations sont généralement dimensionnées pour subvenir aux différentes pointes de charges organiques et hydrauliques, sur la base de la semaine la plus chargée. Les équipements sont alors dimensionnés afin de subvenir à ces pointes de charge (en terme de débit et de demande en oxygène au sein des procédés biologiques aérobies), aboutissant généralement à un surdimensionnement de ces derniers. Ce surdimensionnement induit une réduction des performances énergétiques des procédés, en plus de coûts d'investissements plus importants.

Dans un objectif d'efficacité énergétique, les évolutions de charges doivent être prises en compte dans le choix et le dimensionnement des équipements afin de proposer les solutions les plus efficaces, notamment pour les périodes de fonctionnement en sous-charge :

 Installation de variateurs de vitesse permettant de faire évoluer le débit généré par les équipements suivant les besoins du procédé et des variations de charge : L'installation de variateurs de vitesses permet de faire fonctionner les équipements sur de larges gammes de débits. Aussi, cette solution permet d'envisager des gains d'énergie importants. A noter cependant que, bien que cette solution permette de limiter considérablement les dépenses d'énergie au cours de la vie de l'installation, cette configuration n'est pas la solution permettant de maximiser l'efficacité énergétique, en lien avec le fonctionnement en dehors du point de fonctionnement optimal de l'équipement. Le fonctionnement d'un équipement sur une plage comprise entre 50 et 100 % de sa vitesse nominale n'aura que peu d'impact sur son rendement. En deçà, des pertes de rendement important peuvent apparaitre pouvant nuire à l'efficacité énergétique du procédé, malgré les réductions de consommation énergétique associées ;

 Multiplication des équipements : afin de permettre le fonctionnement aux conditions optimisées énergétiquement pour différentes conditions de débits : Afin de pouvoir modifier le débit, les combinaisons de plusieurs équipements de caractéristiques équivalentes peut être employées. Suivant le nombre d'équipements en fonctionnement, le débit peut alors être ajusté au besoin du procédé. Cette solution technique permet de faire fonctionner individuellement les équipements à leur rendement optimal, pour une efficacité énergétique maximisée. Cependant, cette solution ne permet pas de travailler sur l'ensemble d'une gamme de débit et ne permet donc qu'une réduction des consommations énergétiques limitée en comparaison d'un système équipé de variateurs de fréquence.

De plus, lors du dimensionnement des équipements de pompage ou de production d'air, les données fournies aux équipementiers se limitent régulièrement au profil de charge (couple pression – débit) de l'installation. Généralement, des marges importantes sont prises sur ces deux paramètres au dimensionnement impliquant (i) un surdimensionnement de l'équipement et (ii) des conditions de fonctionnement réelles de la machine différentes de celles pour lesquels le dimensionnement a été réalisé. Les performances énergétiques de ces équipements se retrouvent impactées, les performances optimales étant obtenues pour les caractéristiques nominales de l'équipement choisi.

#### 2.4.3.3 REDUIRE LES FUITES

Les fuites sur réseaux d'air et de liquide des installations constituent une perte directe d'énergie en lien avec la réduction du débit utile généré par les systèmes de pompage et de production d'air. Des contrôles réguliers doivent être effectués au niveau de l'ensemble des canalisations et notamment des zones de raccordements.

### 2.4.4 SYSTEMES DE PRODUCTION D'AIR : TECHNOLOGIES EXISTANTES ET PISTES D'OPTIMISATION SPECIFIQUES

#### 2.4.4.1 TECHNOLOGIES EXISTANTES

Différentes technologies sont présentes sur le marché. On peut classer ces technologies en deux catégories :

- Les machines volumétriques : Le principe de fonctionnement de ces équipements est basé sur la compression d'un volume d'air fixe par tour d'arbre. Du fait de ce fonctionnement spécifique, le débit généré pour une vitesse spécifique de rotation de l'arbre est très peu affecté par la pression au refoulement, et donc peu soumis aux fluctuations en aval.

On distingue parmi les machines volumétriques les surpresseurs à lobes et les compresseurs à vis, avec des rendements respectifs de l'ordre de 70 et 80%. Les compresseurs à vis sont plus adaptés aux fortes pressions au refoulement avec une pression maximale admissible de 3,5 bar (en comparaison d'une pression maximale admissible de 1,0 bar pour les surpresseurs à lobes). La technologie de compresseurs à vis est donc adaptée aux configurations à fortes hauteurs d'eau. A noter qu'une technologie hybride basée sur le couplage des technologies à lobes et à vis est également proposée, permettant un gain annoncé de rendement au regard des technologies à lobes classiques ;

- Les machines centrifuges : Le principe est basé sur la rotation de roues composées d'hélices à fortes vitesses permettant l'entrainement de l'air. En comparaison des machines volumétriques, le débit

refoulé par les machines centrifuges est beaucoup plus tributaire de la pression au refoulement. Aussi, des fluctuations de ce paramètre peuvent entrainer des pertes importantes de débit.

La catégorie des machines centrifuges est constituée des turbocompresseurs et des surpresseurs centrifuges multiétagés. Les turbocompresseurs fonctionnent à des vitesses de rotation très élevées permettant de réaliser la compression en un seul étage. Les rendements des turbocompresseurs sont très élevés (rendement maximal de l'ordre de 85%). A noter cependant que ces derniers, bien qu'équipés systématiquement de variateurs de vitesses, voient leur rendement chuter avec la diminution de leur vitesse de rotation. Les plages de variations de fonctionnement se trouvent plus limitées que pour les machines volumétriques (entre 40 et 100 % de leur vitesse nominale). Les pressions aux refoulement sont limitées à 1,4 bar.

Les surpresseurs centrifuges multiétagés fonctionnent à des vitesses de rotations moins élevées impliquant l'intégration de plusieurs étages de compression en série afin de satisfaire aux pressions au refoulement de l'ordre de 1,0 bar.

## 2.4.4.2 INNOVATIONS TECHNOLOGIQUES RECENTES IMPLIQUANT UN IMPACT POTENTIEL SUR LES PERFORMANCES ENERGETIQUES

Parmi ces équipements, différentes innovations technologiques ont permis d'améliorer les performances énergétiques des systèmes de distribution de l'air :

- <u>Entrainement de l'arbre des machines :</u> En fonction des types de machines, différentes techniques de transmission peuvent être proposées. Parmi ces différentes technologies, on distingue :
  - Entrainement par courroie poulie : L'arbre du compresseur / surpresseur est entrainé par l'arbre du moteur au moyen d'une courroie. Ce type d'entrainement équipe systématiquement les surpresseurs à lobes des équipementiers rencontrés et certaines références de compresseurs à vis. L'usure progressive et la perte de tension des courroies entrainent progressivement une perte de rendement global. Un contrôle régulier, l'ajustement de la tension et le remplacement dès que nécessaire de ces pièces est primordial afin de ne pas limiter la perte d'efficacité de ces équipements. A noter que certaines références sont équipées de systèmes permettant d'ajuster la tension de la courroie au cours du temps afin de limiter la perte de tension au cours du temps.
  - Entrainement par engrenages : Cette technologie repose sur l'entrainement de l'arbre. Cette méthode de transmission est minoritaire sur les machines proposées sur le marché. Cette technique de transmission peut voir également son rendement diminuer au cours du temps en lien avec le vieillissement mécanique des engrenages. Aussi, un contrôle et un entretien régulier doit être effectuer sur les pièces sensibles afin de limiter cette éventuelle perte de rendement ;
  - Entrainement direct à par des moteurs à aimants : Cette technologie est basée sur l'utilisation de moteurs à aimants entrainant directement l'arbre des machines. Cette technologie d'entrainement est installée de façon systématique sur les turbocompresseurs. Certaines références de compresseurs à vis sont également équipées de cette technologie. De plus, la présence de moteurs à aimants couplé à un variateur de vitesse permet le fonctionnement de l'équipement sur une large plage. Cette technologie permet de limiter au maximum les pertes de rendement liées à la transmission, de limiter les opérations de maintenance sur la transmission mais également présente une meilleure stabilité des performances dans le temps.
- <u>Modifications des systèmes approvisionnement en air permettant de limiter la température de prise</u> <u>d'air :</u> L'optimisation des systèmes de prise d'air depuis l'extérieur des couvercles acoustiques permet de limiter la température de prise d'air des machines volumétriques et ainsi d'optimiser leur rendement (optimisation des rendements annoncée de l'ordre de 6%) ;

<u>Silencieux</u>: L'ajout d'un silencieux de refoulement sans matériau absorptif en sortie de système de production d'air peut générer trois impacts sur les performances du système de production d'air : (i) élimination des matériaux isolants généralement utilisés (laine de verre) pouvant entrainer le décrochement de particules induisant le colmatage des membranes de diffusion d'air, (ii) augmentation de la perte de charge de 0,05 mbar et (iii) protection de la machine et maintien de ses performances sur le long terme. L'impact (potentiellement négligeable) de l'ajout d'une telle technologie sur la consommation énergétique sur le long terme reste à évaluer.

## 2.4.4.3 AUTRES ELEMENTS IMPACTANT LA CONSOMMATION ENERGETIQUE ASSOCIES AUX SYSTEMES DE PRODUCTION D'AIR

Les éléments suivants constituent également des points importants pouvant impacter la consommation énergétique des équipements des production d'air :

<u>Colmatage des systèmes des diffuseurs d'air</u>: La dérive des pertes de charge liées à l'encrassement et au colmatage progressifs des diffuseurs d'air entraine une dégradation du rendement du système de production d'air (déplacement du point de fonctionnement et modification du rendement associé – cf. Figure 5). Ces augmentations peuvent être suivies par contrôle de la pression sur le système d'air des systèmes de production d'air. Des opérations de maintenance préventives (nettoyage des surfaces des diffuseurs / nettoyage à l'acide) doivent être mises en place de façon régulière afin de limiter ce phénomène. Dans le cas d'une augmentation significative et irréversible des pertes de charges des diffuseurs, le remplacement des systèmes de diffusion doit être envisagé.

De nouvelles références de diffuseurs équipés de revêtements spécifiques en surface (type polytétrafluoroéthylène – PTFE), et annoncé comme étant moins soumis aux phénomènes de colmatage et d'encrassement, sont actuellement proposées sur le marché. Cependant, le manque de retour d'expérience ne permet de quantifier précisément à ce jour les gains obtenus en terme de limitation de l'évolution de la perte de charges dans le temps.

- Température à l'aspiration : La température dans les locaux accueillant les systèmes de production d'air doit être maitrisée le plus possible afin de limiter l'évolution de la température à l'aspiration. En effet, la variation de 10°C de la température à l'aspiration peut induire une augmentation de la consommation énergétique de 2 à 3% afin de palier à la diminution de la masse d'oxygène aspiré avec la température. La ventilation des locaux accueillant les systèmes de productions d'air doit donc être optimisées afin de limiter les élévations de température aux points de prélèvements de l'air ;
- Expression du débit d'air dans les conditions normales de température et de pression : L'expression du débit d'air dans les conditions normales de température et de pression (0°C / 1013h Pa) est nécessaire à l'étape du dimensionnement afin de ne pas générer de biais supplémentaire au dimensionnement du système de production d'air.

De par leurs rendements élevés, les compresseurs à vis et les turbocompresseurs constituent les systèmes de production d'air présentant la meilleure efficacité énergétique. L'intégration d'un système à entrainement direct permet de limiter les pertes de rendements liés aux systèmes de transmission. L'intégration d'un variateur de fréquence pour ajuster la production d'air sur de larges gammes de débits en fonction des besoins des procédés constitue également un élément essentiel dans un objectif d'optimisation énergétique de l'aération des réacteurs biologiques de traitement des eaux.

## 2.4.5 SYSTEMES DE POMPAGE : TECHNOLOGIES EXISTANTES ET PISTES D'OPTIMISATION SPECIFIQUES

Les pompes équipant les installations sont généralement du type pompes centrifuges. Différentes gammes de pompes sont proposées sur le marché afin de répondre aux différentes conditions opératoires et aux différents cas de figure rencontrés sur les installations de traitement (relevage, recirculation, ...).

En complément des éléments d'optimisation présentés au paragraphe 0, les points suivants peuvent constituer des pistes d'optimisation complémentaires :

- <u>Limitation du colmatage dans le temps des pompes :</u> Le colmatage des pompes va induire une diminution progressive de leurs performances (estimées à 25%). Aussi, des opérations de contrôle et d'entretien doivent être mises en place afin de limiter le plus possible ce colmatage au cours du temps. Certaines références de pompes disposent d'un système d'auto-nettoyage permettant de détecter les éventuels blocages et de modifier la position de l'hélice afin d'extraire automatique les débris éventuels qui peuvent s'introduire dans les pompes (Technology Adaptive N proposée par Xylem Flygt);</u>
- <u>Choix des matériaux constituant les éléments mécaniques des pompes :</u> Une attention particulière doit être portée sur le choix des matériaux des équipements des pompes (turbines notamment) afin de limiter les phénomènes de corrosion et d'abrasion qui vont dégrader progressivement les performances des pompes. Aussi, une caractérisation précise des eaux usées transportées doit être effectuée afin de choisir les matériaux les plus adaptés à chacune des configurations ;
- <u>Correction des pompes surdimensionnées par la modification du diamètre des turbines des pompes centrifuges :</u> Dans le cas d'un surdimensionnement de pompe avéré, la modification du diamètre du rotor de la pompe permet d'optimiser le point de fonctionnement de la pompe et ainsi réduire son débit (modification de la courbe pression débit de la pompe). Cette technique constitue généralement la solution la plus économique pour faire face au surdimensionnement et permet d'engendrer des gains énergétiques significatifs (limitation de dépense énergétique de l'ordre de 60% dans le cas d'une réduction de débit de l'ordre de 20%).</u>

#### 2.5 SYSTEMES D'AGITATION

Les systèmes d'agitation se divisent en trois catégories principales : (i) les agitateurs à grandes pales à écoulement axial (ii) les agitateurs rapides à écoulement axial et (iii) les agitateurs hyperboloïdes générant des écoulements radiaux.

#### 2.5.1 AGITATEURS LENTS A GRANDES PALES

Les agitateurs lents à grandes pales (Figure 6) sont principalement installés dans les chenaux d'aération afin de créer une circulation horizontale de liquide.





Figure 6. Agitateurs lents à grandes pales

Ces systèmes sont généralement dimensionnés afin de générer une vitesse de liquide de l'ordre de 0,3 m/s en tout point du bassin en présence d'aération (au débit nominal de fourniture en air, correspondant aux besoins maximaux en oxygène lors de la pointe de charge). Cet objectif de vitesse est défini afin de garantir : (i) l'absence de décantation des particules solides de la liqueur mixte et (ii) des performances optimales de transfert d'oxygène. Cependant, le dimensionnement retenu et adapté aux conditions d'aération induit des

surdimensionnements conséquents des agitateurs lors des périodes de non aération, générant des vitesses de circulation pouvant être bien supérieures aux 0,3 m/s nécessaires. De plus, avec la mise en place des systèmes de régulation des apports en oxygène par la modification des débits d'air injectés afin de satisfaire aux besoins du procédé, l'ajustement des conditions d'agitation aux conditions d'aération apparait comme un des points d'optimisation à mettre en œuvre sur les installations équipées de ce type d'équipement. Cet ajustement peut être envisagé par la mise en place de variateurs de vitesse sur les moteurs des agitateurs afin d'ajuster leur poussée ou par l'arrêt d'agitateurs lorsque les bassins sont équipés de plusieurs équipements à capacité différente. Cependant, l'impact sur l'intégrité mécanique de cette dernière solution reste à évaluer.

Le paramètre généralement utilisé pour qualifier les systèmes d'agitation est le rapport entre la puissance totale des agitateurs sur le volume du liquide à déplacer (W/m<sup>3</sup>). L'ordre de grandeur de ce paramètre tend à augmenter (de 2 W/m<sup>3</sup> à près de 3 - 4 W/m<sup>3</sup> actuellement), en lien avec l'augmentation des exigences en termes de vitesse de circulation de liquide (0,3 m/s en tout point du bassin en présence d'aération fin d'optimiser les performances de transfert d'oxygène) et des hauteurs d'eau dans les bassins. Cependant, ce paramètre ne permet pas de qualifier l'efficacité énergétique de l'agitateur car ne prend pas en compte son profil hydraulique. Le ratio entre la poussée totale rapportée à la puissance totale installée des agitateurs (N/m<sup>3</sup>) semble plus adapté à définir cette efficacité énergétique. Cependant, il faut noter que la poussée fournie par les équipementiers est mesurée dans des conditions idéales (boucle de circulation / circuit fermé) en termes d'efficacité pour les agitateurs. Ce paramètre est diminué de 20 à 30% lors de son installation in situ, suivant la configuration du bassin, du positionnement des agitateurs au sein de celui-ci et des conditions d'aération induites au sein du réacteur biologique. A noter que ces paramètres ne traduisent pas le transfert de la puissance électrique ou de la poussée en vitesse de circulation de liquide.

L'efficacité énergétique des agitateurs augmente avec la taille des pales permettant de traduire une meilleure transmission des forces aux fluides en lien avec la surface couverte par les agitateurs. Pour une taille de pale donnée, cette efficacité énergétique tend à diminuer avec l'augmentation de la puissance installée.

La surface totale couverte par les agitateurs sur une section du chenal orthogonale au sens de l'écoulement permettrait d'augmenter l'efficacité des agitateurs. Il est recommandé d'avoir une surface balayée comprise entre 15 et 30%. Aussi, le regroupement des agitateurs sur une même section du chenal peut potentiellement présenter un intérêt d'un point de vue énergétique en comparaison d'une répartition sur plusieurs sections. L'évaluation de l'impact de ce paramètre sur l'efficacité énergétique des agitateurs reste à évaluer.

L'hydraulique des réacteurs a un impact direct sur les puissances d'agitation installées mais également sur la performance énergétique des agitateurs. Différentes voies permettent d'envisager une meilleure prise en compte de ces aspects, à savoir :

- La prise en compte des aspects d'optimisation énergétique des systèmes d'agitation lors de la définition de la géométrie des réacteurs mais également lors des choix d'implantation des systèmes de diffusion. En effet, les équipementiers sont généralement consultés alors qu'un certain nombre de choix de conception des installations a été fait, ne leur permettant pas toujours de proposer des solutions les plus optimisées d'un point de vue énergétique ;
- L'utilisation des outils de modélisation de type mécanique des fluides numérique pour orienter les choix de conception et l'optimisation des équipements en fonction des différents paramètres de conception et d'opération des installations. Ces outils permettent de simuler l'impact du profil hydraulique des installations sur les écoulements générés par les agitateurs et les performances associées. De plus, le recours à ces outils permettrait également de préciser les choix de gestion des conditions d'opération des systèmes d'agitation.

Les principales évolutions technologiques visant à l'optimisation énergétique des systèmes d'agitateurs à grandes pales sont principalement de deux ordres :

- L'intégration de moteurs asynchrones équivalents aux IE4 aux références d'agitateurs, permettant d'augmenter directement les performances énergétiques des systèmes d'agitation ;
- L'intégration de variateur de vitesse aux moteurs des agitateurs : L'intégration de tels équipements permet de générer directement la variation de vitesse des agitateurs afin de modifier la poussée des équipements installés en fonction des besoins du procédé, comme spécifié ci-dessus. Le fournisseur d'équipement peut proposer des recommandations spécifiques à la configuration en terme de vitesse de rotation recommandée en fonction des débit d'air injecté dans les réacteurs ;
- Le développement d'agitateurs innovants proposant un montage inversé des agitateurs lents à grandes pales classiques, la potence étant positionné dans le sens de sortie du flux. Le profil de la potence spécifique est défini afin de limiter les composantes radiales des vitesses générées par les agitateurs. De plus, ce design spécifique bénéficie du fait que les écoulements dans la zone de pompage ne sont plus perturbés par la présence de la potence. Les gains d'efficacité de ce type d'agitateurs sont évalués à 10% par les fournisseurs, mais restent à confirmer.

La consommation énergétique liée aux agitateurs lents à grandes pales installés dans les chenaux d'aération peut être limitée à l'étape des choix de conception en intégrant cet objectif d'optimisation au niveau de la conception géométrique des bassins et du couplage avec les systèmes d'aération. Cette étape de conception peut bénéficier des outils numériques permettant de réaliser des études hydrauliques précises.

De plus, le remplacement des anciennes générations d'agitateurs par des modèles récents intégrants des moteurs présentant des performances énergétiques supérieures (IE3 voire IE4) peut représenter des gains d'efficacité énergétique significatifs.

Finalement, les efforts les plus importants doivent être portés l'intégration de stratégie d'adaptation des puissances d'agitation aux conditions opératoires, pouvant induire les gains énergétiques les plus significatifs.

#### 2.5.2 AGITATEURS RAPIDES

Les agitateurs rapides se caractérisent par des tailles de pales réduites par rapports aux agitateurs lents à grandes pales mais également par des vitesses de rotation plus rapides. Ils sont généralement utilisés pour générer l'agitation dans les différents bassins des installations autres que les chenaux d'aération. La puissance installée rapportée au volume du bassin tend à diminuer (5-6 W/m3 en comparaison de 10-12 W/m<sup>3</sup> auparavant), en lien avec de meilleurs choix de positionnement et des retours d'expérience.

La configuration des bassins pour lesquels il est demandé d'installer ce type d'agitateurs ne permet généralement pas d'optimiser leur fonctionnement (géométries atypiques, rapport hauteur/surface très élevé). Aussi, pour pouvoir réaliser une optimisation de ce poste, les géométries des bassins devraient être définies en intégrant les recommandations des équipementiers.

Au même titre que pour les agitateurs lents à grandes pales, les choix de conception peuvent s'appuyer sur des simulations numériques utilisant des logiciels de mécanique des fluides numérique.

#### 2.5.3 AGITATEURS HYPERBOLOÏDES

La principale innovation technologique de ces dernières années dans le domaine de l'agitation réside dans l'installation d'agitateurs hyperboloïdes permettant de générer des écoulements radiaux au niveau des radiers des installations de traitement des eaux (Figure 7).







Source : http://www.biotrade.fr

Figure 7. Agitateurs hyperboloïdes

Le fonctionnement de ces équipements à des faibles vitesses de rotation permet de limiter l'impact de l'agitation sur la déstructuration des flocs biologiques au sein des procédés à boues activées. Les gains énergétiques associés à l'installation de tels équipements sont évaluées de 10 à 15% par le constructeur, en comparaison des technologiques classiques type agitateur rapide. De plus, les écoulements générés par de tels équipements dans le cas d'un dimensionnement approprié permettent de garantir une répartition homogène des vitesses le long du radier des ouvrages.

#### 2.6 SYSTEMES D'AERATION

# 2.6.1 PRESENTATION DES PARAMETRES CARACTERISTIQUES DES PERFORMANCES DES SYSTEMES D'AERATION

Ces systèmes d'aération sont dimensionnés afin de satisfaire aux besoins en oxygène lors des pointes de charge, définis par l'apport horaire en fonctionnement (AH', exprimé en  $kg_{02}$  par heure). Ce paramètre est rapporté aux conditions de référence en eau claire (AH, exprimé en  $kg_{02}$  par heure) par l'application d'un coefficient global de transfert dépendant principalement du coefficient alpha et de la concentration d'oxygène dissous d'équilibre souhaitée lors de la pointe de charge.

Le coefficient alpha ( $\alpha$ ) représente le rapport entre le coefficient de transfert en fonctionnement et celui en eau claire, permettant de quantifier l'impact des conditions de fonctionnement sur le transfert d'oxygène. Sa valeur est dépendante du type de système d'aération mis en place mais également des propriétés du fluide vers lequel est transféré l'oxygène.

La performance énergétique des systèmes d'aération est définie par l'apport spécifique brut en eau claire ou en conditions de fonctionnement (respectivement ASB et ASB', exprimés en  $kg_{02}/kWh$ ). L'ensemble des puissances consommées par les équipements impliqués dans les apports en oxygène sont pris en compte dans le calcul de ce paramètre (soit le système de production d'air et les systèmes d'agitation dans le cas d'un couplage aération/brassage dans les chenaux d'aération).

L'ensemble de ces paramètres de dimensionnement doivent être exprimés lors du dimensionnement dans les conditions normales de pression et de température (20°C et 1013 hPa) et pour une concentration en oxygène dissous nulle.

Ces performances de transfert sont généralement vérifiées en eau claire avant la mise en route des installations. Ces mesures sont réalisées dans les conditions nominales de fonctionnement. Cependant, ces

vérifications pourraient être complétées afin de quantifier précisément les performances de transfert pour des conditions de fonctionnement plus étendues, dans la perspective d'une optimisation future notamment de stratégies de régulation des apports en oxygène associées aux systèmes d'agitation. Cette mesure des performances de transfert est définie par la norme européenne NF EN 12255-15.

#### 2.6.2 PRESENTATION DES DIFFERENTES TECHNOLOGIES D'AERATION

Les systèmes d'aération se divisent en quatre principales catégories d'équipements : (i) les systèmes d'aération de surface, (ii) les turbines immergées, (iii) les systèmes d'insufflation d'air grosses et moyennes bulles et (iv) les systèmes d'insufflation d'air fines bulles. Le Tableau 1 présente ces différentes technologies.

Les systèmes d'aération fines bulles offrent les meilleures performances de transfert en eau claire. Cependant, ces performances peuvent être fortement impactées par les conditions de fonctionnement (installation à fortes charges, fortes concentration en matières en suspension, …) en comparaison d'autres systèmes d'aération, comme l'illustre les gammes des coefficients alpha ci-dessous. Aussi, dans certains cas spécifiques, l'installation de systèmes de diffusions fines bulles peut s'avérer moins efficace d'un point de vue énergétique, en comparaison d'autres systèmes d'aération moins affectées. Une meilleure évaluation du coefficient alpha doit être intégrée lors du dimensionnement afin d'éviter le surdimensionnement des systèmes d'aération, mais également de définir les systèmes les plus efficients énergétiquement.

Les performances de ces systèmes sont relativement bien connues pour des boues activées fonctionnant à très faible charge. Le développement de filière de traitement fonctionnant dans des conditions différentes (fortes charges pour capter le carbone, fortes concentrations en azote pour le traitement des retours des files boues...) nécessitera une phase d'évaluation des performances d'aération (en pilote, puis sur site).

Comme indiqué dans le Tableau 1, ces différents systèmes d'aération peuvent fonctionner à l'aide de stratégies de régulation des apports en oxygène spécifiques à chacun d'entre eux.

#### Tableau 1. Principaux types de systèmes d'aération : performances, avantages et inconvénients

Type de système		ASB (kg <sub>o2</sub> /kWh)	Facteur alpha (-)	Avantages	Inconvénients	Intégration dans une stratégie régulation des apports en oxygène
	Brosses			- Maintenance aisée - Durée de vie des équipements		Mico en alogo do motours hi vitoscos
Aération de surface	Turbines	1,4 - 1,8	0,8 - 1,0	- Performances faiblement impactées par les conditions de charges	- Adapté uniquement aux faibles hauteurs d'eau (inférieures à 3,5 m)	ou de variateurs de fréquence sur les moteurs
	lentes			<ul> <li>Performances stables dans le temps</li> </ul>		
Turbines immergées	Systèmes avec rotor	Mangue de		- Facilité d'installation et	- Performances limitées en eau claire	
avec insufflation d'air	Systèmes avec turbine hyperboloïde	1,0 - 1,6	données issue d'installations	d'entretien - Colmatage limité	<ul> <li>Impact des conditions de fonctionnement sur les performances reste à évaluer</li> </ul>	Modification du débit d'air insufflé (système de production d'air)
Insufflation			5 0,8 – 0,9 <sub>5</sub>	- Pas d'évolution des pertes de	- Performances limitées en eau claire	
d'air grosses et moyennes		0,8 – 1,5		charges - Adapté aux conditions de forte	<ul> <li>Pas adapté au syncopage de l'aération</li> </ul>	Modification du débit d'air insufflé (système de production d'air)
bulles				charge et boues concentrées	<ul> <li>Infiltration des boues dans le réseau d'air</li> </ul>	
Insufflation			0,3 – 0,8		- Vieillissement des diffuseurs	
d'air fines bulles		2,4 - 3,5		<ul> <li>Performances de transfert élevées</li> <li>Adapté aux fortes hauteurs d'eau</li> </ul>	<ul> <li>Performances fortement impactées par les conditions de fonctionnement (âge de boues, concentration en MES,)</li> </ul>	Modification du débit d'air insufflé (système de production d'air)

#### 2.6.3 GESTION DU SYSTEME DE PRODUCTION D'AIR A L'AIDE DE DONNEES CAPTEURS

Différentes méthodes de régulation peuvent être mises en œuvre pour réguler les apports en oxygène au sein des bassins aérobies de traitement des eaux, sur la base de données plus issues de capteurs de mesure en continu.

- Régulation à l'aide de mesures O<sub>2</sub>

La régulation du débit d'air doit s'appuyer à minima sur la mesure des concentrations en oxygène dissous afin de garantir des conditions aérobies dans les bassins d'aération tout en limitant cette concentration dans le bassin. L'intégration d'une valeur de consigne de l'ordre de 1,5 - 2,0 mg/L permet de limiter les apports en oxygène trop importants. Cette méthode de régulation doit constituer la méthode de régulation à intégrer *a minima* pour un objectif d'optimisation énergétique des systèmes d'approvisionnement en air.

- Asservissement et régulation à l'aide de mesures du potentiel Redox avec ou sans O2

La mesure du potentiel redox permet de réaliser un suivi indirect des étapes du traitement de l'azote, des points d'inflexion de ce potentiel redox apparaissant lors de la fin des étapes de nitrification et de dénitrification. Aussi, le démarrage et l'arrêt des systèmes de production d'air peuvent être asservis à cette mesure afin d'apporter l'oxygène lorsque que cela est nécessaire au traitement.

La technologie INFLEX repose sur une analyse dynamique des variations de l'oxygène dissous et du potentiel Redox pour repérer les points caractéristiques de fin de nitrification et de dénitrification. Cette méthode repose sur (i) une gestion de la phase aérée par une analyse dynamique de la concentration en oxygène dissous dans le bassin afin de limiter les apports en oxygène trop importants et (ii) une gestion des phases non aérées sur la base de la dynamique du potentiel Redox. Les gains énergétiques moyens mesurées sur des stations équipées de cette technologie sont compris entre 3 et 21%.



#### Figure 8. Evolutions des signaux oxygène et Redox et corrélation avec les espèces azotées - Source : Lefebvre et al. (2016)

#### Régulation par mesure directe des formes de l'azote

Les récents développements de capteurs en continu pour la mesure des formes de l'azote ( $NH_4$ ,  $NO_3$  ou  $NO_x$ ) ont permis de développer des algorithmes de régulation des apports en oxygène en fonction des besoins. Les temps d'aération et de non-aération ainsi que les débits d'air à injecter peuvent être ajustés aux concentrations des différentes espèces à traiter au sein des bassins biologiques aérés. Ces capteurs apparaissent à ce jour comme fiable sous condition d'entretien et de vérification régulière de leur étalonnage. Les gains énergétiques potentiels peuvent s'élever à 15% en comparaison d'une méthode de régulation classique. A noter qu'en plus des gains énergétiques, ces technologies peuvent également

permettre de fiabiliser le traitement en réduisant les concentrations de ces formes de l'azote dans l'effluent de sortie. Les différents constructeurs ont proposé des procédés dédiés pour réguler l'aération à partir de la mesure des formes de l'azote (Greenbass<sup>™</sup> pour Suez, Amonit<sup>®</sup> pour Veolia et Ammonair<sup>®</sup> pour SAUR).

- Régulation par mesure directe de la demande en oxygène

La technologie ALPHAMETER proposée par INVENT propose quant à elle une régulation fine des apports en oxygène à la mesure directe de la demande en oxygène de la biologique et du coefficient alpha (paramètre comparant le coefficient de transfert d'oxygène en fonctionnement et en eau claire). Cette mesure repose sur le couplage d'une mesure de l'oxygène dissous dans le bassin aéré et de la concentration en oxygène gazeux dans le gaz issu du bassin, équipé d'un collecteur.



Figure 9. Système de collecte de gaz composant l'ALPHAMETER- Source : INVENT

Différentes stratégies de régulation de l'aération peuvent être mises en œuvre pour optimiser l'injection d'air. Ces méthodes de régulation reposent sur une caractérisation directe des besoins de la biologie. Les gains énergétiques potentiels liés à la mise en place de ces méthodes peuvent s'élever jusqu'à 15%. Ces gains peuvent être plus ou moins importants suivant les stratégies déjà mises en places sur les installations de traitement. De plus, les gains énergétiques seront d'autant plus élevés que les moyens de régulation du débit seront forts (multiplication des équipements, variation de vitesse). A noter cependant que l'intégration de méthodes de régulations basées sur des capteurs performants implique d'apporter une attention particulière à la fiabilisation des capteurs par des actions de contrôle et de nettoyages réguliers, induisant un coût de personnel non négligeable.

#### 2.7 CONCLUSIONS

Les technologies les plus récentes proposées pour les principaux équipements consommant de l'électricité intégrés dans la file eau des stations d'épuration ont été analysées afin de dégager des pistes d'optimisation.

De manière générale, l'efficacité des moteurs a significativement évolué ces dernières années. Le remplacement des moteurs d'ancienne génération pourrait conduire à des gains énergétiques d'autant plus significatifs que la puissance nominale du moteur est faible.

Pour l'aération, poste le plus consommateur des stations biologiques, différents éléments peuvent permettre de réduire les consommations énergétiques : le choix du système le plus adapté au moment du dimensionnement, la possibilité d'un apport en oxygène flexible, pour l'adapter aux conditions de fonctionnement des réacteurs (notamment la sous-charge), grâce à des variateurs de fréquence et/ou des équipements de capacité différentes, et la mise en place de systèmes de régulations adaptés.

Enfin l'analyse des dépenses liées à l'agitation ne doit pas être négligée, les agitateurs fonctionnant très souvent en continu et parfois dans des conditions hydrauliques peu adaptées.

### 3. ANALYSE DES DONNEES DE FONCTIONNEMENT ET DES CONSOMMATIONS ENERGETIQUES DES STATIONS D'EPURATION ETUDIEES

L'analyse poussée du fonctionnement des stations d'épuration de la Feyssine et de Bourg en Bresse a permis d'évaluer leurs performances en incluant les aspects énergétiques. L'objectif était d'une part d'acquérir et de mettre en forme les données nécessaires au développement des modèles de fonctionnement des installations, et d'autre part d'identifier les gains énergétiques potentiels.

La synthèse des résultats obtenus est présentée ici, en tentant dans la mesure du possible de mettre en exergue les points communs et les différences entre les deux sites. Au préalable, les méthodes utilisées pour consolider les résultats et les analyser sont décrites. Les analyses des dépenses énergétiques ont donné lieu au développement de deux programmes sous Python qui sont également présentés.

#### 3.1 METHODOLOGIES EMPLOYEES

#### 3.1.1 ANALYSE DES DONNEES DE FONCTIONNEMENT DES STATIONS D'EPURATION

L'analyse et la consolidation des données de fonctionnement des installations ont été réalisées à l'aide de la procédure proposée par le groupe de travail de l'International Water Association (IWA) « Good Modelling Practice – GMP » (Reiger *et al.*, 2012) et résumée dans l'article publié par Filali *et al.* (2015).

Comme présenté schématiquement sur la Figure 10, la procédure utilisée est composée de six étapes principales décrites dans les paragraphes suivants.

La première étape consiste en la compréhension des procédés mis en œuvre dans la station d'épuration y compris la connaissance des flux appliqués, les dimensions des ouvrages, et aussi de l'emplacement des diverses unités (bassins, pompes, préleveurs, capteurs, etc.). Cette étape est réalisée à partir des documents techniques disponibles et au travers d'échanges avec le personnel exploitant. Les résultats issus de cette étape comprennent donc les schémas explicatifs du fonctionnement de l'installation. Ces schémas permettent de réaliser la première étape de validation des flux, nécessaires pour la modélisation de l'ensemble de la station.

La collecte de données de débit et de concentrations disponibles dans la station (préleveurs, capteurs, campagnes, etc.) est l'objectif de la deuxième étape. Une fois l'ensemble de données récupéré, la troisième étape vise à détecter les données de concentration potentiellement aberrantes selon deux méthodes d'analyse. La première méthode dite « pragmatique » est basée sur la nature même des mesures. Il s'agit plus précisément d'évaluer la cohérence des données sur la base de relations logiques, par exemple, sur un même pas de temps la valeur de mesure de l'azote ammoniacal N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> ne peut être supérieure à la valeur de mesure des NTK (NTK = N-N<sub>organique</sub> + N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>). De la même manière, d'autres relations logiques sont utilisées (P<sub>T</sub> > P-PO<sub>4</sub>, MES > MVS, DCO> DBO<sub>5</sub>,...).

La deuxième méthode dite « statistique » utilise l'évaluation des distributions à l'aide des « boîtes à moustaches » de Tukey. La construction des boîtes à moustaches est basée sur les quartiles, c'est-à-dire les statistiques d'ordre. Ainsi, la médiane et l'écart interquartile ne sont jamais influencés par les valeurs extrêmes. Les frontières haute et basse délimitant les « moustaches » ont été fixées à 1,5 fois l'écart interquartile (Q3 – Q1). Par conséquent, pour une variable suivant une loi normale, la « boîte à moustaches » devrait contenir environ 99,3 % des observations (rejet de 0,7 % des observations). Cependant une valeur qui se trouve dehors des frontières ne peut pas être écartée *a priori*, car cette concentration peut s'expliquer par des conditions exceptionnelles subies par la station. Dans ce cas les ratios caractéristiques (tels que DCO/N, DCO/DBO<sub>5</sub>, MES/MVS, NH<sub>4</sub>/N,...) sont utilisés pour évaluer la mesure, en différentiant les données issues de temps sec et de temps de pluie. Cette différentiation permet une analyse plus fine des données est utile pour expliquer

certaines variations observées des paramètres mesurés. L'ensemble des données de concentrations et des ratios de concentrations de chaque poste de la station sont analysés dans la troisième étape.

La validation des données s'effectue dans la quatrième étape à l'aide des bilans massiques autour de la File Eau et de la File Boue et aussi sur le calcul de l'âge de boue (production de boue), en utilisation le phosphore comme élément traceur. Ensuite, la cinquième étape vise à identifier les sources d'erreur et les potentielles disfonctionnements des capteurs, de l'échantillonnage et des méthodes analytique sur la station. Le recouvrement des bilans est un bon indicateur de la validité des données. Sur la dernière étape, les données sont consolidées en croisant différents bilans afin d'assigner les éventuelles erreurs mises en évidence dans l'étape de fermeture des bilans. Elle nécessite une connaissance experte du procédé de traitement étudié. Lorsque la consolidation des données s'avère impossible, il faut alors envisager la collecte de données supplémentaires ou faire des hypothèses sur ces données afin d'assigner les erreurs dans les jeux de données.



Figure 10. Procédure de validation/consolidation des données du groupe GMP (Filali et al., 2015)

#### 3.1.2 ANALYSE DES CONSOMMATIONS ENERGETIQUES DES INSTALLATIONS

Les données énergétiques recueillies au cours du projet ont fait l'objet d'une attention particulière, avec une analyse en trois étapes :

 La comparaison de la dépense énergétique globale mesurée à celle du parc français des stations d'épuration, à l'aide du logiciel « Energie step » développé à l'issue de l'état de l'art (Stricker *et al.*, 2018);

- Un diagnostic énergétique poussé, basé sur un protocole adapté des travaux menés par Irstea dans le cadre de ce même projet (Stricker et Husson, 2015), qui comporte les étapes suivantes :
  - Liste des moteurs et de leurs spécifications techniques (marque, modèle, puissance installée, coefficient alpha, fréquence fixe/variable/variable-fixé) ;
  - Mesures ponctuelles de la puissance consommée par les équipements les plus consommateurs;
  - Collecte du temps de marche de chaque moteur (en heures/jour) pendant les jours où le bilan est fait ;
  - o Relevé du compteur EDF de la station pour les jours choisis pour le bilan ;
  - Calcul de la consommation énergétique journalière de chaque moteur (et de chaque poste).

La consommation énergétique journalière de chaque moteur est obtenue à l'aide des relations suivantes :

Puissance absorbée/active [KW] = Puissance installée [KW] \*  $\cos \alpha_{P}$  [-]

Énergie consommé [KW.h/jour] = Puissance absorbée [KW] \* Temps de Marche [heures/jour]

La puissance absorbée/active n'est pas toujours disponible pour l'ensemble des moteurs. Les données manquantes ont été soit estimées, soit mesurées :

- L'estimation a été faite à partir de la puissance nominale donnée par le constructeur (puissance consommée par un moteur à 100% de charge et à 50Hz). Pour ce faire, la puissance réellement consommée correspond à la puissance nominale multipliée par un coefficient déterminé à l'aide d'une relation linéaire entre l'intensité mesurée et l'intensité nominale. Ce coefficient le coefficient α<sub>P</sub> a été estimé en utilisant des données des travaux réalisés à Irstea Bordeaux (Stricker et Husson, 2015). La valeur de 0.7 a été retenue.
- La mesure de la puissance absorbée/nominale sur site a été limitée à certains moteurs afin de déterminer leur coefficient α<sub>P</sub>. Les moteurs choisis ont été ceux identifiés comme les plus consommateurs en énergie.

Initialement, la consommation énergétique globale des installations (somme de l'énergie consommée par chacun des moteurs) a été comparée pour au moins deux jours avec le relevé du compteur EDF afin de valider le protocole et les hypothèses faites (liste complète de tous les moteurs, récupération des temps de marche, validation des estimations de puissances absorbées/actives, validation des coefficients  $\alpha$ ). Lorsque l'erreur entre le compteur EDF et la consommation calculée est inférieure à 5 %, le protocole a été considéré comme valide et ensuite un bilan sur une année a été fait pour analyser la consommation énergétique par poste et sous-poste afin caractériser la consommation énergétique des stations. Ces caractérisations ont nécessité de nombreux échanges avec les exploitants des stations d'épuration, afin notamment d'assigner les erreurs observées. Lorsque des compteurs divisionnaires sont disponibles par secteur d'activité, il est intéressant de faire cette même démarche de comparaison (EDF/ calculs) ce qui permet de détecter des hypothèses retenues non satisfaisantes si l'écart est supérieur à 10 %.

L'analyse est réalisée pour une année minimum, avec chaque jour la récupération du temps de fonctionnement de l'ensemble des moteurs (407 moteurs identifiés à La Feyssine et 227 à Bourg en Bresse). Afin d'analyser ces données de manière systématique, un programme a été développé sous Python : il permet d'assigner les consommations aux différents postes et de représenter les résultats sous forme graphique. La répartition initiale a un peu évolué depuis l'état des lieux publié en 2017 ; le nouveau tableau de répartition est fourni en annexe 1.

Les dépenses énergétiques ont donc été réparties par postes, et reliées aux facteurs de fonctionnement des installations (débits pompés, charges traitées...). Cette analyse a nécessité le développement d'outils de traitement de données dédiés (sous Python également) qui sont présentés dans le paragraphe 0.







#### 3.2 PRESENTATION DES SITES ET DES DONNEES ANALYSEES

#### 3.2.1 DESCRIPTIF DES STATIONS D'EPURATION

Suite à l'étude de différents documents descriptifs des stations (y compris les mémoires techniques), de nombreuses visites et des échanges réguliers avec le personnel exploitant, un synoptique détaillé des installations a été élaboré en identifiant les trois principaux étages : les prétraitements, la file eau et la file boue (figures en annexes 2 et 3). Ces schémas ont été conçus pour présenter l'emplacement exact des débitmètres et des préleveurs ainsi que les lignes de débits d'intérêt consignés dans les fichiers d'auto-surveillance. Des schémas simplifiés sont présentés dans les paragraphes suivants, afin de mettre en exergue les principales caractéristiques des installations.

Les paramètres de dimensionnement des installations sont rapportés dans les Tableaux 2 et 3 et sur les Figures 11 et 12.

Dovomètro	Taille	Mise en service	Charges de dimensionnement							
Parametre	EH	Année	DCO kg/j	DBO₅ kg/j	MES kg/j	NTK kg/j	P kg/j	Q <sub>nominal</sub> m <sup>3</sup> /j	Q <sub>max</sub> m <sup>3</sup> /h	
La Feyssine	300 000	2012	49 000	18 000	32 000	3900	-	91000	6000	
Bourg en Bresse <sup>1</sup>	104 000	2000	15 650	5188	7847	1318	383	43200	3500	

#### Tableau 2. Descriptif des installations – Paramètres de dimensionnement

<sup>1</sup> Les charges de dimensionnement pour le site de Bourg en Bresse ont été recalculées en considérant 315 jours de temps sec et 50 jours de temps de pluie, comme indiqué dans le cahier des charges, ce qui porte la capacité de l'installation à 104000 EH (pour 120000 indiqués dans les documents descriptifs)

#### Tableau 3. Descriptif des installations – Niveaux de rejet

Paramètre Niveau de rejet <sup>1</sup>											
	DC	0	DBO	D₅	М	ES	NTK	(	$N-NH_4$	N <sub>tot</sub>	P <sub>tot</sub>
	mg/L	%	mg/L	%	mg/L	%	mg/L	%	mg/L	mg/L	mg/L
La Feyssine <sup>2</sup>	120	82	19,4	92	20	94	6,2	86	3,2		-
Bourg en Bresse	90		25		30					10	1

<sup>1</sup> Moyennes 24h

<sup>2</sup> Concentration ou rendement

Les dimensions des bassins schématisés sur la Figure 12 et la Figure 13 sont rapportées dans le Tableau 4.

#### Tableau 4. Dimensions des réacteurs

		La Feyssine		E	Bourg en Bresse		
Réacteur	Nombre	Surface unitaire m <sup>2</sup>	Volume unitaire m <sup>3</sup>	Nombre	Surface unitaire m <sup>2</sup>	Volume unitaire m <sup>3</sup>	
Décanteur primaire lamellaire	3	161.3	-	-	-	-	
Zone de contact	-	-	-	2	35	230	
Zone anaérobie	-	-	-	2	308	2000	
Zone anoxique	3	-	3667	-	-	-	
Zone aérobie	3	-	7833	2	1757	11420	
Décanteur secondaire	6	1296	5184	2	2100	8620	
Digesteurs	1		3800	1		1000 (D2) <sup>1</sup>	
				1		3000 (D3)	

<sup>1</sup> Lors de la période analysée, le digesteur 2 de la station d'épuration de Bourg en Bresse a très peu fonctionné. L'analyse de son fonctionnement et sa modélisation ne sont donc pas inclus dans la suite de ce rapport.







Figure 13. Schéma simplifié de la station d'épuration de Bourg en Bresse

Les deux installations étudiées couplent un étage de traitement par boues activées en aération prolongée avec une digestion anaérobie des boues produites. Leurs principales différences sont les suivantes :

- Les niveaux de rejet sont plus contraignants à La Feyssine qu'à Bourg en Bresse pour la pollution carbonée. Par contre, pour l'azote et le phosphore, et en lien avec la sensibilité du milieu récepteur, les niveaux de rejet sont plus contraignants à Bourg en Bresse. Un traitement tertiaire a donc été installé sur cette station (clarifloculateur fonctionnant en traversier, sans ajout de réactif);
- La station d'épuration de La Feyssine comporte des zones anoxiques, et celle de Bourg en Bresse des zones anaérobies, en plus de chenaux d'aération séquencée. Un traitement chimique du phosphore est également réalisé à Bourg en Bresse;
- Le digesteur de La Feyssine est alimenté avec un mélange de boues primaires et secondaires, alors que seules des boues secondaires sont produites à Bourg en Bresse (pas de décanteur primaire) ;
- La station d'épuration de La Feyssine comporte un sécheur.

#### 3.2.2 DONNEES ANALYSEES

L'analyse des données a consisté en une consolidation des données d'exploitation sur au moins un an de mesures, y/c les dépenses énergétiques. Des campagnes spécifiques ont permis de collecter des données pour

la modélisation, notamment pour caractériser les influents et les boues produites, et modéliser les files boues des installations. Les campagnes réalisées et leurs objectifs sont indiqués dans la Figure 14.



Figure 14. Campagnes de mesures spécifiques réalisées dans le cadre du projet

Les campagnes de mesure réalisées visaient à une meilleure caractérisation :

- Des eaux résiduaires, notamment en termes de biodégradabilité ;
- Des boues alimentant les digesteurs, y/c leur pourvoir méthanogène ;
- Du fonctionnement du décanteur primaire de La Feyssine ;
- Des retours en tête de la file boues vers la file eau (variabilité et charges supplémentaires apportées) ;
- Du fonctionnement des réacteurs biologiques : à noter qu'une campagne de mesure sur La Feyssine, incluant les mesures de transfert d'oxygène et d'émissions de protoxyde d'azote, a dû être annulée pour cause de dysfonctionnement ;
- Du fonctionnement des digesteurs.

Pour le site de La Feyssine, les données ont été analysées sur une période de plus de deux ans (de 01/01/2013 à 31/08/2015 soit 973 jours). Les données de 2014 ont ensuite été sélectionnées pour le diagnostic énergétique poussé et pour la modélisation.

Pour le site de Bourg en Bresse, les données d'une année ont été analysées (juillet 2015 – juin 2016). Quelques analyses ont été poursuivies sur le digesteur jusqu'en octobre 2016, pour obtenir une période de validation du biogaz produit, le débitmètre ayant été ré-étalonné en avril 2016.

#### 3.3 ANALYSE DU FONCTIONNEMENT DES INSTALLATIONS – FILES EAU

#### 3.3.1 DISTRIBUTION DES DEBITS EN ENTREE DE LA STATION

Les évolutions des débits des eaux résiduaires en entrée des installations sont représentées sur la Figure 15 pour La Feyssine et sur la Figure 16 pour Bourg en Bresse. Les courbes de distribution des débits pour les deux sites sont disponibles en annexe 3. Les résultats sont synthétisés dans le Tableau 5. A noter que ces deux sites sont alimentés par des eaux transitant dans des réseaux unitaires.



Figure 15. Evolution du débit des ERU – La Feyssine





Tableau 5. Distribution des débits en entrée des installations (débit l	ERU	)
---	-----	---

Paramètre	Débit journalier moyen	Débit journalier minimum	Débit journalier maximum	Débit journalier Percentile 95 <sup>1</sup>	Charge hydraulique moyenne <sup>2</sup>
Unité	m³/j	m³/j	m³/j	m³/j	%
La Feyssine 01/2013 – 08/2015 (31 mois)	38975	21774	144008	76035	43
La Feyssine Année 2014 (12 mois)	39781	23047	144008	75667	44
Bourg en Bresse 07/2015 - 06/2016 (12 mois)	28983	11456	86114	63510	67

<sup>1</sup>Calculé sur les débits en entrée des installations (après le by-pass)

<sup>2</sup> Calculé à partir du débit de référence (maximal admissible)

Les sites diffèrent dans leur taux de charge hydraulique, en lien avec l'âge des installations, et dans leurs coefficients de pointe (3,6 pour La Feyssine et 3,0 pour Bourg en Bresse).

Pour La Feyssine, l'évolution des débits est cyclique, avec une baisse notable pendant les mois d'été. Les débits reçus par l'installation peuvent atteindre 144 000 m<sup>3</sup>/j alors que la station a été dimensionnée pour 91000 m<sup>3</sup>/j au maximum. Le dépassement du débit maximal admissible provient d'une difficulté à fixer en pratique un débit horaire maximum (6000 m<sup>3</sup>/h) et un du volume journalier maximal admissible (91000 m<sup>3</sup>/j et non 6000 m<sup>3</sup>/h x 24 h = 144000 m<sup>3</sup>/j).

Pour Bourg en Bresse, on note une augmentation graduelle au cours de la période analysée est observée, avec une valeur moyenne de 19706 m<sup>3</sup>/j de juillet à août 2015, 36024 m<sup>3</sup>/j de janvier à mars 2016, et 40701 m<sup>3</sup>/j d'avril à juin 2016. Cette augmentation du débit est liée aux raccordements supplémentaires sur la période. Aucun impact significatif n'a cependant été noté sur les caractéristiques des eaux résiduaires.

#### 3.3.2 ANALYSE DES CARACTERISTIQUES DES EAUX RESIDUAIRES

#### 3.3.2.1 RATIOS CARACTERISTIQUES

La procédure d'analyse des données présentée au paragraphe 0 a été appliquée aux données d'autosurveillance et de supervision des stations d'épuration sur les périodes étudiées. Les ratios caractéristiques obtenus, après élimination des valeurs aberrantes, sont rapportés dans le Tableau 6. Les valeurs moyennes des ratios sont comparées aux valeurs usuelles d'une eau résiduaire urbaine.

Moyenne des ratios usuels	DCO <sub>TOT</sub> /DBO₅	MES/DCO <sub>TOT</sub>	DCO <sub>TOT</sub> /NTK	N-NH₄/NTK	DCO <sub>TOT</sub> /P <sub>TOT</sub>
La Feyssine	2,49	0,44	10,3	0,76	80,4
Bourg en Bresse	2,75	0,44	10,9	0,58	95,1
Valeurs usuelles	2,45	0,50	10,0	0,70	70

Tableau 6. Ratios caractéristiques moyens des eaux résiduaires en entrée des stations d'épuration

Les eaux résiduaires reçues par les stations étudiées ont des caractéristiques urbaines. Le rapport  $DCO_{TOT}/P_{TOT}$  élevé indique une concentration en phosphore relativement faible dans l'effluent d'entrée (en moyenne 6,3 et 5,1 mgP/L). Néanmoins, une étude récente a montré que les teneurs en phosphore des grandes stations d'épuration sont généralement plus faibles que la moyenne (Stricker et Héduit, 2010).

Les résultats obtenus à Bourg en Bresse (notamment le ratio DCO/DBO<sub>5</sub>) traduisent une part d'effluents industriels plus importante qu'à La Feyssine.

#### 3.3.2.2 BIODEGRADABILITE DES EAUX RESIDUAIRES AVANT ET APRES DECANTATION

La biodégradabilité des eaux résiduaires est une donnée indispensable en entrée des modèles des réacteurs biologiques des files eau. Les campagnes de mesure ont donc inclus des tests de DBO ultime, qui permet d'estimer la part de DCO biodégradable d'un échantillon (Gillot et Choubert, 2010). Les résultats présentés sur la Figure 17 ont été obtenus sur des échantillons ponctuels collectés en entrée des réacteurs biologiques (incluant les retours en tête) et sur les eaux résiduaires brutes de La Feyssine.



Figure 17. Fraction de DCO biodégradable

A La Feyssine, la décantation primaire n'a pas d'impact significatif sur la fraction de DCO biodégradable. Celle-ci peut être considérée comme constante et égale à 0,75, résultat typique d'une eau résiduaire urbaine (Gillot et Choubert, 2010). Le fait que la décantation primaire

A Bourg en Bresse, si on exclut une valeur très faible obtenue pour une eau très diluée (DCO = 134 mg/L), la fraction de DCO biodégradable est une fonction linéaire décroissante de la DCO brute. Cet impact est très certainement lié au flux des retours en tête, qui apporte de la matière organique peu biodégradable. Lorsque les retours peu impactant, correspondant à une DCO de l'ordre de 300 – 400 mg/L, la fraction biodégradable de la matière organique (0,7 – 0,8) est proche de celle obtenue à La Feyssine.

#### 3.3.3 CHARGES JOURNALIERES

#### 3.3.3.1 CHARGES JOURNALIERES RAMENEES A L'EQUIVALENT HABITANT

La distribution des charges ramenées à l'équivalent habitant est présentée sur la figure 9. L'équivalent habitant pour les différentes charges a été défini selon la note Cemagref-ONEMA (Tableau 7). Seul l'équivalent habitant pour le phosphore (initialement à 2,1 g/j/hab) a été diminué selon les récentes valeurs recensées par Stricker et Héduit (2010).

#### Tableau 7. Valeurs de l'équivalent habitant employées (en g/j/hab)

DCO <sub>TOT</sub>	DBO₅	MES	NTK	P <sub>TOT</sub>
145	60	73	15	1,7


Figure 18. Charges journalières ramenées à l'équivalent habitant (a) La Feyssine – (b) Bourg en Bresse

Au percentile 50, la charge en entrée des stations, exprimée en DBO<sub>5</sub>, équivaut à 114 600 équivalent-habitants à La Feyssine et à 77600 à Bourg en Bresse. Ces résultats indiquent des taux de charge organique médians de l'ordre de 38 et 73 %, respectivement.

Au percentile 95, les charges reçues par les installations représentent 234 340 équivalent-habitants à La Feyssine et à 128 690 à Bourg en Bresse.

## 3.3.3.2 CHARGES MASSIQUE DES INSTALLATIONS – AGE DE BOUES

Les charges massiques des installations, moyennées sur un âge de boues, sont rapportées dans le Tableau 8. Les âges de boues sont également indiqués.

	Charge massique kg DBO₅/kg MVS/j		Age de boues j	Concentration e biolo	en MES (réacteurs giques) ;/L
	Moyenne	Moyenne Gamme		Moyenne	Gamme
La Feyssine	0,09	0,04 - 0.24	19,6	3,0	1,5 - 5,6 <sup>1</sup>
Bourg en Bresse	0,08	0,05 – 0,09	15,5	3,6	3,1-4,3

#### Tableau 8. Charges massiques et âges de boues

<sup>1</sup> Les valeurs minimales correspondent à des périodes de mise hors service des bassins ; elles n'ont pas été considérées dans les calculs de charge massique et d'âge de boues

Les charges massiques et âges de boues correspondants sont compatibles avec un traitement poussé de l'azote ammoniacal dans les conditions de température de fonctionnement des installations.

La charge massique apparemment plus élevée à La Feyssine qu'à Bourg en Bresse provient de la prise en compte des retours de la filière boues dans le calcul réalisé à partir des données en sortie des décanteurs primaires. Les valeurs maximales mesurées sur ce site semblent correspondre aux jours où les retours en têtes provenant de la file boues après digestion sont relativement chargés en MES. En considérant les charges en entrée de la station d'épuration (ERU) et en utilisant le taux de capture mesuré *in situ* en décantation primaire (cf. annexe X), la charge massique obtenue sans considérer les retours en tête serait en moyenne de 0,08 kg DBO<sub>5</sub>/kg MVS/j, avec une valeur maximale de 0,15 kg DBO<sub>5</sub>/kg MVS/j.

La comparaison des deux sites ne montre pas la cohérence habituelle (plus la charge massique est faible, plus l'âge de boues est élevé). Ceci est dû au fait que la production spécifique de boues est nettement plus faible à La Feyssine (0,7 kg MES/kg DBO<sub>5,élim</sub>) qu'à Bourg en Bresse (1,4 kg MES/kg DBO<sub>5,élim</sub>), en lien avec la décantation primaire à La Feyssine et l'ajout de chlorure ferrique à Bourg en Bresse.

### 3.3.4 RENDEMENTS DE DEPOLLUTION DES INSTALLATIONS

Les rendements de dépollution des installations ont été calculés comme suit :

$$R(\%) = 100 - 100 \times \frac{[X]_{sortie}}{[X]_{entrée}}$$

Avec [X] = concentration de l'élément considéré en entrée et en sortie de station (mg/L).

Les performances observées pour la période analysée sont reportées sur le Tableau 9 et le Tableau 10. Les intervalles de fluctuation correspondent à l'écart type (moyenne ± écart type).

Paramètre	Rendement (%)	Concentration entrée (mg/L)	Concentration sortie (mg/L)	Niveaux de rejet (mg/L)	Niveaux de rejet (%)	Nombre de dépassements <sup>1</sup>
DCO <sub>TOT</sub>	94 ± 5	500 ± 168	26 ± 15	120	82	0
DBO₅	97 ± 2	203 ± 69	5 ± 3	19,4	92	0
MES	96 ± 6	227 ± 100	7 ± 11	20	94	9
NTK	92 ± 8	48 ± 13	3,5 ± 2,4	6,2	86	0
N-NH <sub>4</sub>	-	34 ± 10	1,6 ± 1,5	3,2	-	0
N-NO₃	-	-	3,0 ± 1,0		-	
N-NO <sub>2</sub>	-	-	0,2 ± 0,2		-	
NGL	$85 \pm 9^2$	-	6,6 ± 2,7		-	
P <sub>TOT</sub>	62 ± 22	6,3 ± 1,7	2,3 ± 1,2	-	-	-

Tableau 9. Performances de la station d'épuration de La Feyssine de janvier 2013 et aout 2015

<sup>1</sup> Nombre de dépassements pour des débits d'entrée inferieurs au débit nominal

<sup>2</sup> Rendement de NGL calculé en considérant les concentrations en nitrates et nitrites nulles dans les ERU

#### Tableau 10. Performances de la station d'épuration de Bourg en Bresse de juillet 2015 à juin 2016

Paramètre	Rendement (%)	Concentration entrée (mg/L)	Concentration sortie (mg/L)	Niveaux de rejet (mg/L)	Niveaux de rejet (%)	Nombre de dépassements <sup>1</sup>
DCO <sub>TOT</sub>	94 ± 4	485 ± 185	24 ± 8	90	-	0
DBO₅	98 ± 2	184 ± 79	3 ± 1	25	-	0
MES	97 ± 3	215 ± 79	5 ± 3	30	-	0
NTK	92 ± 6	46 ± 17	3,1 ± 1,4	-	-	-
N-NH <sub>4</sub>	-	27 ± 10	1,9 ± 1,3	-	-	-
N-NO <sub>3</sub>	-	0,4 ± 0,2	2,0 ± 1,5	-		-
N-NO <sub>2</sub>	-	0,1 ± 0,2	0,2 ± 0,2	-		-
N <sub>tot</sub>	87 ± 8	46 ± 17	5,3 ± 2,4	10		4
P <sub>TOT</sub>	90 ± 6	5,1 ± 2,2	0,4 ± 0,2	1	-	0
P-PO <sub>4</sub>		2,4 ± 1,1	0,3 ± 0,2			-

Pour les deux sites, les concentrations moyennes de l'effluent sont bien en dessous des niveaux de rejet exigés. Il est intéressant de noter que les concentrations en entrée de ces deux sites sont similaires. La mise en place d'un traitement tertiaire à Bourg en Bresse permet de pousser l'élimination des matières en suspension après les clarificateurs, et donc, en couplage avec un ajout de chlorure ferrique dans le bassin biologique, d'obtenir un abattement du phosphore poussé.

Pour La Feyssine, le nombre de dépassements de la valeur seuil (niveau de rejet) est de 9 sur 973 prélèvements pour les MES. Ces dépassements sont en lien avec les conditions d'exploitation (changement de réacteur biologique, notamment), et n'ont pas eu d'incidence sur la conformité de l'installation. Aucun dépassement n'est observé sur les autres paramètres lorsque la station reçoit un débit inferieur au débit de référence ou nominal. Par conséquent, les installations sont très performantes sur l'ensemble des paramètres considérés et fiables en termes de qualité épuratoire. L'abattement obtenu sur le paramètre phosphore (60%) est significativement supérieur à la simple assimilation de la biomasse traitant la matière organique (de l'ordre de 25 %). En raison de la sous-charge, la zone anoxique fonctionne certainement en zone anaérobie, permettant le développement d'une biomasse de déphosphatation biologique. Le modèle retenu pour représenter le fonctionnement de cette installation devra donc inclure cette possibilité.

A Bourg en Bresse, les 4 dépassements sur le paramètre azote global repérés sur la période correspondent soit à des charges hydrauliques élevées conduisant à des performances de nitrification moindre, soit à une dénitrification moindre, mettant en évidence le fait que la capacité d'oxygénation est globalement suffisante mais ne permettrait pas, en l'état, d'augmenter significativement la charge reçue par l'installation.

#### 3.3.5 ZOOM SUR LE FONCTIONNEMENT DES DECANTEURS PRIMAIRES DE LA FEYSSINE

Des mesures spécifiques ont été réalisées pour caractériser la décantation primaire sur le site de La Feyssine. L'objectif était notamment de relier le taux de capture des décanteurs aux caractéristiques des eaux en entrée, en plus d'estimer les flux de retours en tête. Les données obtenues sont décrites en annexe 5. Une synthèse graphique est présentée sur la Figure 19.



Figure 19. Taux de capture de l'étape de décantation primaire en fonction des MES en entrée

Les taux de capture calculés au pas de temps horaire présentent une allure « classique », avec une augmentation du taux de capture avec l'augmentation de la concentration en MES à l'entrée du décanteur. La

courbe obtenue peut être modélisée à l'aide d'une équation à deux paramètres (Da Silva et al., 2014), sous la forme suivante :

$$Taux \ de \ capture = 0.95 - \frac{75.6}{[MES_{IN}]}$$

L'utilisation de cette équation pour les données obtenues au pas de temps journalier fournit des résultats intéressants, avec une erreur entre valeur mesurée et valeur estimée en moyenne de 4% pour les données de la campagne de mesure (de -6 à 13 %) et de 3% pour les données d'autosurveillance (de -29 à 29 %).

#### 3.3.6 ZOOM SUR LE FONCTIONNEMENT DES REACTEURS BIOLOGIQUES DE BOURG EN BRESSE

En boues activées, le fonctionnement des réacteurs aérés et les dépenses énergétiques associées sont particulièrement dépendants des conditions d'aération. Une caractérisation fine des performances d'aération des systèmes a donc été réalisée pendant la campagne de mesure de juin 2016, de même que la mesure des émissions de protoxyde d'azote ( $N_2O$ ). Une campagne similaire avait été prévue à La Feyssine en novembre 2015 mais n'a pu être réalisée à cause de problèmes techniques survenus après l'installation du matériel.

Le transfert d'oxygène et les émissions de N<sub>2</sub>O ont été mesurés par bilans gazeux sur l'installation, suivant un plan d'échantillonnage présenté en annexe 6. Les résultats obtenus sont résumés dans le Tableau 11, de même que les mesures de puissance et d'émission de N<sub>2</sub>O.

Mesure	File A	File B
Puissance des surpresseurs kW	220	222
Débit d'air insufflé Nm <sup>3</sup> /h	6385	6376
Puissance des agitateurs	Avec aération : 10,5	Avec aération : 9,7
kW	Sans aération : 10,8	Sans aération : 9,6
Rendement d'oxygénation %/m	3,4	3,0
Vitesse de circulation dans les chenaux	Avec aération : 0,20 Sans aération : 0,30	Avec aération : 0,36 Sans aération : 0,29
m/s		
Facteur d'émission de N <sub>2</sub> O N-N <sub>2</sub> O / NTK entrant - %	0,002 – 0,009	0,001 - 0,003

#### Tableau 11. Caractérisation des réacteurs aérées de Bourg en Bresse

Les conditions d'alimentation en air sont équivalentes sur les deux files (sous condition de répartition et vieillissement des diffuseurs équivalents), les puissances des surpresseurs et les débits d'air insufflées n'étant pas significativement différents.

En termes d'agitation, la mesure sur la file B donne une valeur de vitesse de circulation supérieure à celle de la file A, en accord avec les puissances mesurées. Cependant cette différence ne se traduit pas par un meilleur transfert d'oxygène sur la file B, celui-ci étant même plus faible que sur la file A.

Les facteurs d'émissions de  $N_2O$  obtenus sur les deux files sont similaires, et très faibles, ce qui corrobore les résultats obtenus sur d'autres bassins d'aération fonctionnant à très faible charge (Filali et al., 2016). Ils ne seront donc pas considérés dans les modèles.

## 3.4 ANALYSE DU FONCTIONNEMENT DES INSTALLATIONS – FILES BOUES

Les campagnes de mesure spécifiques réalisées sur les deux sites avaient notamment pour objectif de mieux caractériser les performances des différents ouvrages constituant les files boues, pour estimer les retours en tête des installations, et également la typologie des boues produites alimentant les digesteurs. Les performances des ouvrages de déshydratation des boues sont présentées dans un premier temps, puis les performances des digesteurs sont analysées, au regard des caractéristiques des boues les alimentant, notamment.

## 3.4.1 PERFORMANCES DES OUVRAGES DE DESHYDRATATION DES BOUES

La caractérisation des performances des ouvrages de déshydratation des boues est complexe, dans la mesure où la constitution d'échantillons représentatifs l'est également. Les taux de capture présentés ci-après ont donc été déduits de mesures *in situ* couplées à des analyses des bilans matière sur les différents ouvrages, de manière à valider les données. Les tableaux de résultats ci-après fournissent quelques éléments pour le calcul des flux de retours en tête.

#### 3.4.1.1 TAUX DE CAPTURE

Les performances des procédés d'épaississement, de déshydratation et de séchage des boues sont présentées dans le Tableau 12. Les résultats montrent des taux de capture relativement constants, qui pourront être utilisés comme valeur moyenne dans les modèles.

#### Tableau 12. Performances des procédés d'épaississement/déshydratation/séchage des boues

Ouvrage	Concentration entrée g/L	Concentration sortie boues g/L	Concentration sortie retours mg/L	Taux de capture %
La Feyssine Epaississeur boues primaires (Epaississeur statique)	9,6 ± 9,7	52 ± 13	238 ± 188	91 ± 7
La Feyssine Centrifugation boues secondaires	5,0 ± 0,9	49 ± 8	288 ± 122	94 ± 2
La Feyssine Centrifugation boues digérées	29 ± 4	214 ± 17	1340 ± 344	95 ± 1
La Feyssine Séchage	214 ± 17	85 ± 3 % (Siccité)		
Bourg en Bresse Epaississeur boues secondaires (GDD)	3,6 ± 0,2	54 ± 7	497 ± 201	87 ± 4
Bourg en Bresse Centrifugation boues digérées	37 ± 2	195 ± 4	2405 ± 1283	94 ± 4

#### 3.4.4.2 RETOURS EN TETE DES FILES BOUES

Les résultats des campagnes de mesure ont permis d'estimer les flux des retours en tête du traitement des boues vers le traitement des eaux, et les caractéristiques de ces retours. La Figure 20 montre les flux obtenus en entrée du décanteur primaire de La Feyssine. Les données brutes sont disponibles en annexe 6.



Figure 20. Répartition des flux en entrée du décanteur primaire (a) Débit, DCO et MES et (b) TKN et P<sub>tot</sub> – La Feyssine

La majorité du flux hydraulique provient des eaux résiduaires (91 %), alors que les flux massiques des retours en tête, particulièrement concentrés pour celui provenant du traitement des boues avant digestion, représentent environ 30 % de la charge en DCO, 38 % de celle en MES, 24 % de l'azote et 33 % du phosphore total. Ces fractions s'expliquent également par le faible taux de charge de la station.

Pour le site de Bourg en Bresse, les ordres de grandeur des flux des retours du traitement des boues représentent sensiblement la même charge relative, comme présenté sur la Figure 21. Ils représentent 20 % de la charge en DCO, 30 % de celle en MES, 20 % de l'azote et 43 % du phosphore total.



Figure 21. Répartition des flux en entrée des bassins biologiques (a) Débit, DCO et MES et (b) TKN et P<sub>TOT</sub> – Bourg en Bresse

En ce qui concerne l'azote ammoniacal et les ortho-phosphates provenant des retours en tête, ils représentent en moyenne 18 % et 26 % de la charge en entrée du décanteur primaire pour La Feyssine, et 17 et 31 % à Bourg en Bresse. Cette dernière valeur s'explique par la zone anaérobie de la file eaux, qui permet une déphosphatation biologique, mais aussi un relargage des ortho-phosphates dans la file boues lorsque les conditions le permettent (aucune précaution n'étant prise pour que ce relargage n'ait pas lieu).

#### 3.4.2.1 CARACTERISATION DES BOUES EN ENTREE ET SORTIE LES DIGESTEURS

Une attention particulière a été porté à la caractérisation des boues en entrée et sortie des digesteurs, requise pour la modélisation de ces ouvrages. Les données brutes sont disponibles en annexe 7. Des mesures de potentiel méthanogène ont par ailleurs été réalisées. Elles sont comparées aux données de la bibliographie sur la Figure 22.



Figure 22. Potentiels méthanogènes mesurés sur les boues alimentant les digesteurs

Les potentiels méthanogènes mesurés indiquent des valeurs dans les gammes basses des données de la littérature pour le site de La Feyssine, en lien peut être avec le fait que ces boues résident dans des bâches de stockage avant alimentation sur une période relativement longue (> 2 jours) et où une première fermentation a pu avoir lieu et à la souscharge de l'installation conduisant à des boues biologiques relativement stabilisées. Le pourcentage de MV des échantillons utilisés pour ces tests est de 72% pour les boues primaires de La Feyssine et de 78 % pour les boues biologiques des deux sites.

Les résultats de BMP obtenus à Bourg en Bresse sont relativement plus élevés que les données bibliographiques.

Les figures suivantes synthétisent les données qui sont utilisées en modélisation, sous forme schématique, pour présenter les bilans autour de ces digesteurs. Les flux de DCO dans l'alimentation et dans les boues digérées sont calculés à l'aide des ratios DCO/MVS déterminés lors des campagnes de mesure (cf. annexe 7). Le flux de DCO du biogaz est déterminé en supposant un ratio de 0.35 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg COD.

La Figure 23 synthétise les données collectées à La Feyssine.



#### Figure 23. Bilan matière autour du digesteur de La Feyssine

Les données collectées permettant de réaliser les bilans de fonctionnement des digesteurs montrent une grande variabilité de l'alimentation, alors qu'il est généralement conseillé d'alimenter un digesteur de manière continue sans à-coups. Ceci est due à au fonctionnement du sécheur en amont du digesteur. En effet, le sécheur étant significativement sous chargé, il fonctionne en discontinu. Par ailleurs, la bâche de stockage qui suit le digesteur n'est pas très grande, ce qui ne permet pas de stocker les boues digérées. L'alimentation du digesteur est donc adaptée à la capacité de stockage et d'alimentation du sécheur lorsqu'il est en fonctionnement, ce qui induit des variations sans doute peu favorables aux performances de l'ouvrage.

Les flux de MES et de MVS provenant des boues primaires et des boues biologiques sont similaires.

Le bilan DCO boucle à 12%, ce qui est acceptable compte tenu des variations observées.

La Figure 24 synthétise les données collectées en entrée et sortie du digesteur D3 de Bourg en Bresse. Sur cette installation, les mesures de MS et MV étant peu fréquentes, des interpolations ont été réalisées de manière à obtenir suffisamment de données de flux pour analyser les performances du digesteur et réaliser la simulation de son fonctionnement.



Figure 24. Bilan matière autour du digesteur de Bourg en Bresse

L'alimentation du digesteur se fait de manière plus continue qu'à la Feyssine.

Une incertitude existe sur le débit de production de biogaz. Un défaut du débitmètre a en effet été constaté ; celui-ci a été étalonné de nouveau en avril 2016. Les données précédentes ont été corrigées en conséquence, en utilisant les valeurs mesurées d'avril à novembre 2016. Le bilan DCO boucle à - 16%, ce qui est acceptable compte tenu des incertitudes sur la mesure avant avril 2016.

# 3.4.2.2 RENDEMENTS DES DIGESTEURS

Les performances de fonctionnement des digesteurs de La Feyssine et de Bourg en Bresse (D3) sont résumées dans le Tableau 13. Les valeurs ont été moyennées sur un temps de séjour hydraulique dans le réacteur.

## Tableau 13. Caractérisation du fonctionnement du digesteur

Paramètre	Unité	La Feyssine	Bourg en Bresse
Temps de séjour hydraulique	j	23	27
Charge à traiter	kg MV / m <sup>3</sup> /j	2,4 ± 0,6	1,6 ± 0,3
Température	*	35,5 ± 1,6	32,0 ± 3,8
[gamme]	Ĩ,	[30,7 – 40,2]	[26,9 – 39,9]
Ratio MV/MS des boues en entrée du digesteur	%	78	78

Performance MES	élimination	%	39 ± 10	30 ± 6
Performance MVS	élimination	%	46 ± 9	39 ± 7
Production Biogaz		Nm <sup>3</sup> biogaz / t MVS <sub>introduite</sub>	389 ± 141	198 ± 35
Production Biogaz		$Nm^3$ biogaz / t MVS <sub>élim</sub> 834 ± 391		520 ± 102
Production Biométhane		Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / t MVS <sub>introduite</sub>	232 ± 280	127 ± 22
Production Biométhane		Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / t MVS <sub>élim</sub>	499 ± 224	333 ± 65

Les productions de biogaz sont dans la gamme basse des valeurs rapportées par Camacho et Prévot (2015) pour des boues mixtes (de 800 à 1100  $\text{Nm}^3$  biogaz / t  $\text{MVS}_{\text{élim}}$ ), et également pour les boues d'aération prolongée de Bourg en Bresse.

### 3.4.2.3 ANALYSE DES PRODUCTIONS DE BIOMETHANE

Les productions spécifiques de biométhane, calculées à partir des moyennes des flux d'alimentation et de la production de méthane sur un temps de séjour des réacteurs, sont rapportées dans la Figure 25. Les potentiels méthanogènes (BMP) obtenus sont également rapportés sur cette figure.



Figure 25. Production spécifique de biométhane rapportée à la charge en MV

Les productions de biogaz sont très variables à La Feyssine, en lien avec la variabilité de l'intrant.

Pour les deux sites, les valeurs médianes (211 et 128  $Nm^3$  CH<sub>4</sub>/kg MV) sont, de manière évidente, inférieures aux résultats des tests méthanogènes, qui sont réalisés dans des conditions parfaitement contrôlées.

La variation importante de température à Bourg en Bresse explique pour partie le fort écart observé sur ce site. Pour une charge similaire  $(1,5 \pm 0,2 \text{ kg VSin/m}^3/\text{j})$ , l'impact de la température sur la production de biogaz et sur l'abattement des MV est représenté sur la Figure 26.



Figure 26. Impact de la température sur les performances du digesteur – Bourg en Bresse

De 29 à 35 °C, la production de biogaz est relativement peu impactée par la température (- 4 %) alors que le rendement d'élimination des MV augmente de 21 %. Ce résultat pourrait être relié au fait que l'augmentation de la température certes améliore la production de méthane, mais elle réduit le transfert de ce biogaz de la phase liquide à la phase gaz. Les résultats de simulation pourraient apporter des indications supplémentaires sur les hypothèses à retenir.

## 3.4.2.2 UTILISATION DU BIOGAZ PRODUIT

A La Feyssine, le volume du gazomètre étant limité pour des questions de sécurité (zone urbaine près de l'autoroute), le biogaz produit était au moment de l'analyse des données pour partie utilisé pour le chauffage du digesteur, par la chaudière du séchage des boues, et pour partie brûlé en torchère. La répartition des utilisations pour l'année 2014 est illustrée sur la Figure 27.

A Bourg en Bresse, le biogaz est utilisé pour les chaudières des digesteurs et celle des bâtiments. La part non utilisée est brûlée en torchère. En raison de débitmètres défaillants, notamment sur les chaudières, il est difficile d'établir un bilan précis sur l'utilisation du biogaz. Les données de la Figure 27 ont été obtenues pour deux mois aux températures contrastées (26b : juillet 2015, et 26c : novembre 2015). Les températures moyennes dans le digesteur pour ces deux mois étaient de 38 et 33 °C.





A La Feyssine, la majorité du biogaz est utilisé pour le chauffage des sécheurs et du digesteur. 26 % du biogaz est brûlé en torchère, en moyenne sur l'année 2014. Le poste « Autre » comprend le biogaz utilisé pour le brassage du digesteur, le biogaz éventuellement stocké et les erreurs de mesure (débitmètres).

A Bourg en Bresse, la répartition montre que la majorité du biogaz est utilisée pour chauffer le digesteur 3, puis les bâtiments. La partie brûlée en torchère est significative durant les mois les plus chauds.

## 3.5 ANALYSE DES DEPENSES ENERGETIQUES DES INSTALLATIONS

## 3.5.1 VALIDATION PREALABLE DES DONNEES

Le protocole tel que proposé par Stricker et al. (2017) consiste en une première étape de validation du calcul de l'électricité consommée sur quelques jours, et par mois. Les résultats obtenus par mois sont présentés sur la Figure 28.



Figure 28. Comparaison de l'électricité mensuelle consommée (relevé EDF *versus* calcul par les temps de marche des moteurs – TDM) (a) La Feyssine et (b) Bourg en Bresse

Le calcul de l'électricité mensuelle consommée à partir du relevé des temps de marche des moteurs fournit un résultat proche de celui indiqué par le fournisseur d'énergie (erreur moyenne de 3% à La Feyssine et de 7 % à Bourg en Bresse).

A La Feyssine, on note une légère diminution de la consommation énergétique durant les mois estivaux.

A Bourg en Bresse, la consommation augmente, en lien avec l'augmentation graduelle de la charge reçue par l'installation sur la période analysée.

#### 3.5.2 TYPES D'ENERGIE UTILISEE

Les énergies totales dépensées et achetées sont rapportées dans le Tableau 14. La répartition de l'énergie totale consommée par type d'énergie utilisée est décrite au préalable.

A La Feyssine, plus de la moitié de l'énergie consommée (38844 kWh/j en moyenne) sur l'installation est de l'énergie électrique (22629 kWh/j en moyenne). Environ 26% provient du biogaz produit et le reste correspond à du gaz naturel acheté (Figure 29). Le biogaz est utilisé pour le chauffage du digesteur, par la chaudière du séchage des boues et par la torchère. Cette dernière quantité n'a été pas comptabilisée dans le calcul d'énergie consommée totale. La chaleur des condensats des sécheurs est également utilisée pour chauffer le digesteur,

et participe à environ 5% de l'énergie totale utilisée. La conversion en équivalent électrique de l'énergie solaire produite par les panneaux photovoltaïques ne représente que 0,0037% de la consommation énergétique de la station pour les journées considérées pour réaliser le bilan. La station achète donc environ 70 % de l'énergie qu'elle consomme.



Figure 29. Répartition de l'énergie totale consommée par type d'énergie utilisée

Le biogaz produit par le digesteur couvre environ 3 fois sa demande énergétique.

A Bourg en Bresse, moyennant les bémols indiqués au paragraphe 0, et en négligeant l'apport de fuel requis ponctuellement, la station achète environ 70 % à 80 % de l'énergie qu'elle consomme.

## 3.5.3 CONSOMMATION ENERGETIQUE GLOBALE DES INSTALLATIONS

Les données de fonctionnement couplées aux données de consommations énergétiques ont été synthétisées et comparées aux résultats obtenus pour le parc français dans l'étude réalisée par Irstea intitulée « Consommation énergétique du traitement intensif des eaux usées en France : état des lieux et facteurs de variation », à l'aide de l'application web dédiée, développée à l'issue du projet (<u>https://energie-step-diagnostic.irstea.fr</u>). Les résultats sont présentés dans le Tableau 14. Pour rappel, le logiciel fournit une estimation de l'énergie primaire consommée sur le site (totale achetée). L'énergie totale consommée (totale achetée + produite **et** utilisée *in situ*) a également été déterminée lors de l'analyse des consommations par postes sur les deux sites.

#### Tableau 14. Consommation énergétique des deux stations d'épuration étudiées

Paramètre		La Feyssine	Bourg en Bresse
Energie mesurée – données d'autosurveillance	Energie primaire consommée (totale achetée) kWh/j	27040	13432
	Energie primaire consommée (totale achetée) kWh/kg DBO <sub>5, éliminée</sub>	3,9	3,0
	Energie totale consommée (achetée + produite et utilisée <i>in situ</i> ) kWh/j	38844 (dont 31 % produit <i>in</i> <i>situ</i> )	17773 (dont 24 % produit <i>in</i> <i>situ</i> )
Energie estimée - Logiciel Energie_step	Energie primaire consommée kWh/j	22621 (avec sécheur) 31122 (sans sécheur)	13025
	Energie primaire consommée kWh/kg DBO <sub>5, élim</sub>	4,3 (avec sécheur) 3,3 (sans sécheur)	3,2
	Energie primaire consommée kWh/kg DCO <sub>élim</sub>	1,9 (avec sécheur) 1,5 (sans sécheur)	1,3

La consommation spécifique de 3,9 kWh/kg DBO<sub>5</sub> éliminée mesurée à La Feyssine traduit une installation plutôt énergivore, ce qui s'explique par deux paramètres principaux : le taux de charge organique relativement faible (40%) et la présence de sécheurs. Les données journalières indiquent en moyenne une consommation d'énergie primaire de 19822 kWh/j lorsque les sécheurs sont à l'arrêt et de 29198 kWh/j lorsqu'ils fonctionnent (+ 47%).

A Bourg en Bresse, l'estimation de l'énergie primaire dépensée correspond à celle mesurée, indiquant une installation dont la dépense énergétique est conforme à celle du parc français des boues activées.

#### 3.5.4 CONSOMMATION ENERGETIQUE PAR POSTES

La répartition des consommations par postes permet une meilleure interprétation des données de dépenses énergétiques. Celle-ci a été réalisée en utilisant un code Python développé à l'issue du projet « Consommation énergétique du traitement intensif des eaux usées en France : état des lieux et facteurs de variation ». Ce code permet de répartir les différentes consommations dans les files considérées (eau, boues, air, divers), les postes et sous-postes associés.

#### Pour La Feyssine, cette répartition est illustrée sur la Figure 30.



#### Figure 30. Répartition de la consommation énergétique globale par file et par poste - La Feyssine

La répartition de la consommation énergétique pour l'année 2014 montre que les 5 postes dont la consommation spécifique est la plus impactante sur la consommation totale de l'installation sont :

- Pour la file eau : l'aération biologique et le relevage
- Pour la file boues : le séchage thermique et la digestion
- Pour la file air : le chauffage

Le poste le plus consommateur est le séchage thermique sur la période étudiée. En moyenne, la part de la consommation énergétique de la file boues est multipliée par 3 lorsque le séchage est en fonctionnement (Figure 31).



Figure 31. Décomposition relative de la consommation énergétique totale en fonction de l'utilisation des sécheurs

Pour la station de Bourg en Bresse, la décomposition par file et par postes est présentée sur la Figure 32.



#### Figure 32. Répartition de la consommation énergétique globale par file et par poste – Bourg en Bresse

De manière classique pour ce type d'installation de boues activées en aération prolongée, les postes les plus énergivores sont, pour la file eau, le traitement secondaire et le relevage, et pour la file boues le digesteur. En proportion, la file boues représente plus que les valeurs indiquées par Stricker et al. (2018), sans doute en lien avec les difficultés à maintenir une température suffisante dans les digesteurs mal isolés thermiquement. Pour la file boues, les dépenses liées au chauffage des digesteurs masquent quasiment l'ensemble des autres dépenses.

#### 3.6 CONCLUSIONS

L'analyse et la consolidation des données est un préalable long mais indispensable au développement des modèles de fonctionnement des installations, de manière à boucler les bilans matière avant d'utiliser les données dans les modèles.

L'analyse des données a montré des sites qui globalement respectent les niveaux de rejet imposés, avec des fonctionnements qui diffèrent en lien avec la charge traitée et les choix de conception.

D'un point de vue énergétique, les principales conclusions sont les suivantes :

- Le fonctionnement des sécheurs induit un coût très préjudiciable à l'énergie spécifique consommée.
  C'est d'autant plus vrai que le taux de charge faible à La Feyssine induit un fonctionnement non continu des sécheurs, avec des redémarrages fréquents nécessitant une montée en température énergivore ;
- Sur les files eau, le poste aération est le plus consommateur d'énergie, même si globalement aucun défaut n'a été constaté lors des mesures ;
- De manière évidente, le maintien en température des digesteurs mal isolés de Bourg en Bresse induit une surconsommation du poste « boues » par rapport aux données usuelles.

Ces différents résultats ont permis par ailleurs d'esquisser les scenarios qu'il serait intéressant d'analyser d'un point de vue modélisation. Les principaux scénarios envisageables sont reportés dans le

Tableau 15.

## Tableau 15. Scenarios envisageables

	Scenario	Objectif			
La Feyssine	Augmentation de la charge d'entrée à la station	Rendement énergétique de l'installation			
		Flux des retours en tête			
	Amélioration/augmentation du taux de capture des décanteurs primaires	Rendement énergétique de l'installation			
		Performances de traitement de la file eau (notamment la dénitrification)			
	Possibilité de réinjection du biogaz dans le réseau	Consommation supplémentaire de gaz naturel			
Bourg en Bresse	Maintien de la température des digesteurs à 35 °C	Production de biogaz			
	Augmentation de la charge à l'entrée	Production de biogaz			
	des digesteurs (boues secondaires de stations extérieures)	Flux des retours en tête			
	Ajout d'un décanteur primaire	Production de biogaz			
		Flux de retours en tête			
		Performances de traitement de la file eau (notamment la dénitrification)			
	Ajout d'un micro-décanteur pour piéger le phosphore des retours en tête	Performances de traitement de la file eau (notamment la déphosphatation)			

# 4. MODELISATION DU FONCTIONNEMENT DES INSTALLATIONS

Le développement d'un modèle de fonctionnement qui permette d'étudier les questions posées par l'analyse des données a suivi la procédure schématisée sur la Figure 33. Ces étapes suivent le protocole défini dans le guide de modélisation de l'IWA (Rieger *et al.,* 2012). Les principaux résultats obtenus sont ensuite présentés en suivant les trois étapes définies.

Plusieurs logiciels de simulation ont été utilisés en fonction des objectifs recherchés : WEST (DHI), Simba# (IFAK), et MATLAB.



Figure 33. Procédure de développement du modèle complet d'une station d'épuration couplant un étage biologique par boues activées et un digesteur

## 4.1 CHOIX DES MODELES

## 4.1.1 MODELES BIOCINETIQUES

Les caractéristiques des modèles biocinétiques choisis sont présentées dans le Tableau 16.

Les deux installations sont similaires d'un point de vue performances de traitement de la file eau, un modèle permettant de représenter les processus d'abattement de la matière organique, de l'azote et du phosphore, par voie biologique et physico-chimique, a été retenu. Il s'agit de l'ASM2d (Activate sludge model n°2 ; Henze *et al.*, 2000). Celui-ci a été légèrement modifié pour réaliser un fractionnement de la matière organique qui soit compatible avec le fractionnement de la matière organique en digestion anaérobie (facilitant ainsi l'interfaçage des modèles) et intégrant une fraction inerte des matières en suspension non prise en compte dans la publication initiale.

Pour la digestion anaérobie, une version modifiée du modèle ADM1 (Anaerobic digestion model n°1 ; Batstone *et al.*, 2002) a été retenu. Il fait consensus dans la communauté scientifique, et permet de représenter les principales étapes de la méthanisation. Les modifications apportées par rapport au modèle original portent notamment sur le devenir du phosphore, non inclus dans le premier ADM1.

Modèle	ASM2d	ADM1
Processus principaux modélisés	Hydrolyse de la matière organique	Hydrolyse matière organique
	Dégradation matière organique Nitrification Denitrification	Dégradation matière organique : Acidogène, acétogène, méthanogène
	Stockage de phosphore par bactéries hétérotrophes (PAO)	
	Précipitation chimique des ortho- phosphates	
Nb de processus	21	19
Bb de variables d'état	19	27
Nb de paramètres cinétiques	45	36
Nb de paramètres stochiométriques	22	40

# Tableau 16. Modèles biocinétiques retenus pour représenter le fonctionnement des boues activées et des digesteurs anaérobies

# 4.1.2 MODELES DE FRACTIONNEMENT

Les variables d'état utilisées dans les modèles ne correspondent pas directement aux variables composites mesurées en routine sur les stations d'épuration. Un fractionnement est donc nécessaire ; il se base les mesures réalisées pour caractériser les effluents et les boues alimentant les digesteurs, notamment en termes de biodégradabilité. Le fractionnement est généralement ajusté lors du calage des paramètres du modèle.

# 4.1.2.1 FRACTIONNEMENT DES EAUX RESIDUAIRES

Les variables d'état des modèles et leur lien avec les variables composites mesurées sur site sont explicitées en annexe 9.

Les résultats expérimentaux présentés dans le Tableau 17 montrent que le fractionnement de la DCO est similaire à celui d'une eau résiduaire classique pour La Feyssine. Pour Bourg en Bresse, la fraction de DCO particulaire obtenue est relativement élevée, sans doute en lien avec les retours en tête du traitement des boues.

#### Tableau 17. Fractionnement expérimental de la DCO des eaux résiduaires en entrée de l'étage biologique

		Soluble	Particulaire		
Fractions	Inerte	Biodégradable	Biodégradable	Inerte	
La Feyssine	5,6%	17,5%	59%	17,9%	
Bourg en Bresse	4,3%	11,9%	54,2%	29,6%	
Gillot et Choubert (2010) <sup>*</sup>	4[2-6]%	20[4-35]%	58[35-75]%	15[9-21]%	

\* Mesures réalisées sur 26 eaux résiduaires. Moyenne et gamme de variation.

Les fractions solubles et particulaires de l'azote et du phosphore sont déduites des ratios caractéristiques des eaux résiduaires (cf. paragraphe 0).

## 4.1.2.2 FRACTIONNEMENT DES BOUES ALIMENTANT LES DIGESTEURS

De la même manière que pour les eaux résiduaires, la DCO des boues alimentant les digesteurs doit être répartie sur les différentes variables d'état du modèle retenu. Cette répartition est représentée sur la Figure 34.



Figure 34. Fractionnement de la DCO en entrée des boues alimentant les digesteurs

Les résultats expérimentaux obtenus, notamment à partir des tests de potentiel méthanogène pour estimer la fraction de DCO biodégradable et les ratios caractéristiques des boues sont présentés dans le Tableau 18.

#### Tableau 18. Fractionnement expérimental de la DCO des boues alimentant les digesteurs

-		-									
	f <sub>d</sub>	S <sub>ac</sub>	S <sub>pro</sub>	S <sub>bu</sub>	S <sub>va</sub>	S <sub>su</sub> +S <sub>aa</sub> +S <sub>fa</sub>	S	X <sub>pr</sub>	X <sub>li</sub>	$X_{ch}$	X
Echantillons		% of total COD									
Boues primaires La Feyssine	0,64	2,7	3,1	2,7	3,9	0,7	10,4	14,3	19,9	16,3	25,9
Boues secondaires La Feyssine	0,36	0,6	0,7	0,5	0,7	2,6	18,2	16,4	3,3	11,3	45,6
Boues secondaires Bourg en Bresse	0,60	0,02	0,05	0,02	-	0,08	0,25	21,8	4,4	14,6	58,7

La DCO soluble obtenues à Bourg en Bresse est négligeable ; ce n'est pas le cas à La Feyssine, potentiellement en lien avec le temps de séjour des boues dans les bâches de stockage.

Les fractions particulaires sont similaires sur l'ensemble des boues, et proches des résultats de la bibliographie.

#### 4.1.3 MODELES DE SEPARATION DE PHASES

Les ouvrages de séparation des boues (décanteurs) et de déshydratation ont été simulés de manière simplifiée à l'aide de séparateurs idéaux, en fixant un taux de capture des matières en suspension selon les résultats des campagnes de mesures (Tableau 12). Les formes solubles des variables sont conservées, comme mesuré expérimentalement. Ces taux de capture sont fixes, sauf pour la décantation primaire dont les performances dépendent de la concentration des MES en entrée des ouvrages (cf. paragraphe 0).

#### 4.1.4 MODELES D'ENERGIE

Les indicateurs énergétiques usuels tels que décrits au paragraphe 0 sont des indicateurs globaux, qui peuvent être utilisés dans les modèles de la même manière qu'avec les données expérimentales, une fois que la performance globale d'une installation est simulée.

Pour aller plus loin dans l'analyse, des indicateurs par postes et/ou sous postes ont été déduits des répartitions décrites au paragraphe 0, à l'aide de régressions linéaires multiples. Un second programme sous Python a été élaboré de manière à relier les consommations par postes/sous-postes aux données de fonctionnement. Le programme permet d'identifier les variables influentes, et fournit l'équation associée. Les résultats obtenus sur le site de La Feyssine sont rapportés dans le Tableau 19.

Tableau 19	. Equations permettant d'estimer	les consommations éne	ergétiques des pri	ncipaux postes de la	station
d'épuratio	n de La Feyssine				

Poste	Consommation journalière moyenne ± écart type kWh/j	Equation énergie consommée kWh/j	Variables explicatives
Relevage	1583 ± 618	178 + 0,035 Q <sub>ERU</sub>	Q <sub>ERU</sub> = débit des ERU (m <sup>3</sup> /j)
Prétraitements	892 ± 51	892	
Décantation primaire	143 ± 20	143	
Traitement secondaire	11063 ± 952	0,13 Q <sub>ERU</sub> + 104,4 [N-NH4] + 1026,4 [MES] <sub>BA</sub>	Q <sub>ERU</sub> = débit des ERU (m <sup>3</sup> /j) [NTK] concentration en N-NH4 dans les ERU (mg/L) [MES]BA concentration en MES dans les bassins biologiques (g/L)
Epaississement boues primaires	215 ± 86	215	
Déshydratation boues biologiques	430 ± 260	62 + 0,46 Q <sub>ALIM,Cent,BB</sub>	Q <sub>ALIM,Cent,BB</sub> = débit d'alimentation des centrifugeuses des boues biologiques (m <sup>3</sup> /j)
Digestion	4524 ± 1846	1,8 Q <sub>ALIM, Sec</sub> + 195,9 x (35 – T)	Q <sub>ALIM,Sec</sub> = débit d'alimentation du digesteur (m <sup>3</sup> /j) T = température de fonctionnement du digesteur (°C)
Déshydratation boues digérées	734 ± 444	151 + 3,12 Q <sub>ALIM,Cent,BD</sub>	Q <sub>ALIM,Cent,BD</sub> = débit d'alimentation des centrifugeuses des boues digérées (m <sup>3</sup> /j)
Séchage	14777 ± 10262	3,1 Φ <sub>MES</sub>	$\Phi_{MES}$ = flux de MES traité (kg/j)

Pour les postes consommant une faible proportion de l'énergie, la moyenne des consommations journalières est utilisée comme approximation.

L'estimation de l'énergie consommée par les ouvrages de déshydratation mécanique nécessite de connaitre leur débit d'alimentation.

Pour le traitement secondaire, le débit et la concentration en ammonium sont requis, de même que la concentration en MES dans les bassins ; cette équation est cohérente avec l'impact des conditions de fonctionnement sur les performances d'aération du système : charge et concentration des boues sont des paramètres importants de la consommation énergétique liée à l'apport d'oxygène.

L'énergie consommée par le digesteur est fonction de son débit d'alimentation et de la différence entre la température des boues alimentant et sa température de fonctionnement. Ce résultat traduit les deux postes de consommation de l'étape de digestion : alimentation du digesteur et maintien en température.

Enfin, l'énergie consommée par les sécheurs est directement proportionnelle au flux de matière séchée.

L'utilisation de ces équations permet d'estimer 88 % de l'énergie totale consommée par l'installation. Il faudrait y ajouter un pourcentage pour représenter la consommation liée à la ventilation et au traitement de l'air (7% du total ici), et les postes « Divers » (chauffage des bâtiments, autres).

Une approche similaire a été menée avec les données énergétiques de Bourg en Bresse mais s'est heurtée à plusieurs difficultés liées au manque de données et à leur qualité (débit de biogaz, notamment). Comme présenté dans le Tableau 20, les équations obtenues ont une forme similaire, avec des coefficients à adapter en fonction du site. Aucune équation testée pour déterminer la consommation du digesteur n'a donné de meilleur résultat que la moyenne. L'isolation thermique de cet ouvrage étant particulièrement défectueuse, la prise en compte de la température extérieure dans l'équation pourrait permettre d'améliorer ce modèle. Cette donnée n'est cependant pas disponible.

Poste	Consommation journalière moyenne ± écart type kWh/j	Equation énergie consommée kWh/j	Variables explicatives
Relevage	2856 ± 1496	175 + 0,091 Q <sub>ERU</sub>	Q <sub>ERU</sub> = débit des ERU (m <sup>3</sup> /j)
Prétraitements	347 ± 34	347	
Traitement secondaire	5930 ± 750	0,03 Q <sub>ERU</sub> + 33,2 [N-NH4] + 11154,6 [MES] <sub>BA</sub>	Q <sub>ERU</sub> = débit des ERU (m <sup>3</sup> /j) [NTK] concentration en N-NH4 dans les ERU (mg/L) [MES]BA concentration en MES dans les bassins biologiques (g/L)
Epaississement boues biologiques (GDD)	315 ± 53 118 + 0,11 Q <sub>ALIM,Cent,BB</sub>		Q <sub>ALIM,Cent,BB</sub> = débit d'alimentation des grilles d'égouttage (m <sup>3</sup> /j)
Digestion	4204 ± 218	4204	
Déshydratation boues digérées	414 ± 282	109,81 + 2,81 Q <sub>ALIM,Cent,BD</sub>	Q <sub>ALIM,Cent,BD</sub> = débit d'alimentation des centrifugeuses des boues digérées (m <sup>3</sup> /j)

Tableau 20. Equations permettant d'estimer les consommations énergétiques des principaux postes de la stationd'épuration de Bourg en Bresse

## 4.2 CALAGE ET VALIDATION DES MODELES

La campagne de mesure de La Feyssine n'ayant pu être réalisée, le modèle complet de fonctionnement de l'installation n'a pas été calé. Néanmoins, les résultats obtenus sur ce site ont permis de développer des modèles relativement simples pour la décantation primaire et l'énergie consommée par postes, et de caler le modèle de digestion.

Le modèle de fonctionnement de la station d'épuration de Bourg en Bresse a lui été calé. Les résultats de ce calage sont présentés ci-dessous.

## 4.2.1 MODELES BIOCINETIQUES

## 4.2.1.1 FILE EAU

Le synoptique de la file eau telle que modélisée à Bourg en Bresse est représenté sur la Figure 35.



Figure 35. Synoptique du modèle de la file eau – Bourg en Bresse

Sur ce synoptique sont modélisés les réacteurs biologiques [zone de contact (C2), bassin anaérobie (Anaerobie), chenal d'aération (Aer 1 à 4)], les séparateurs (clarificateur, Densadeg). Les boues extraites du bassin d'aération sont acheminées vers la grille d'égouttage (GDD), et les boues concentrées obtenues alimentent le modèle de digesteur. Les retours de la file boues après digestion sont représentés par une entrée (Retours BD), dont les caractéristiques sont issues de la modélisation du digesteur et de la déshydratation des boues digérées (cf. paragraphe 0). L'ajout de chlorure ferrique est également considéré comme une entrée du modèle.

Le calage du modèle a tout d'abord consisté à faire varier le fractionnement des eaux résiduaires et l'apport de chlorure ferrique, pour que la concentration en MES/MVS dans les bassins obtenue par simulation corresponde aux données expérimentales. Les performances du système d'aération et les temps d'aération ont ensuite été ajustés de manière à obtenir les performances de nitrification/dénitrification correctes. Les résultats de ces calages sont présentés sur la Figure 37.



#### Figure 36. Données simulées et modélisées (a) dans le bassin d'aération et (b) en sortie de la station

Cette étape de calage a mis en exergue plusieurs difficultés, notamment en lien avec la qualité des données et la manière dont elles sont stockées (nombre de chiffre significatif non suffisant pour les temps de fonctionnement des aérateurs ou les mesures de MES, notamment). Le relativement faible nombre de données recueillies nécessite également de faire des interpolations pour alimenter le modèle de manière continue. Malgré ces difficultés, la concentration des matières en suspension dans les bassins (et donc l'âge de boues) est prédite avec précision (erreur moyenne de 5%) de même que le ratio MVS/MES. Les concentrations en sortie sont bien prédites en moyenne également (écart de 2 % sur la DCO et de 10 % sur l'azote ammoniacal). Les évolutions dynamiques restent relativement mal décrites, sans doute en lien avec les difficultés mentionnées précédemment.

### 4.2.1.2 FILE BOUES

Le synoptique de la file boues telle que modélisée à Bourg en Bresse est représenté sur la Figure 37.



Figure 37. Synoptique du modèle de la file boues dans MATLAB/SIMULINK- Bourg en Bresse

Pour la file boues, sont considérés le digesteur 3, le stockage des boues digérées et la centrifugation. Les boues biologiques extraites épaissies constituent l'entrée du modèle, et les boues digérées de même que les centrats après centrifugation constituent les sorties de ce modèle.

Le calage du modèle a consisté à modifier la fraction de DCO biodégradable (de 0,60 à 0,45), afin d'obtenir une production de biogaz et un abattement des MES/MVS cohérents avec les données expérimentales. Là encore, la qualité des données a représenté un challenge, notamment la mesure du débit de biogaz qui était erronée jusqu'en avril 2016. Le calage a donc été effectué sur une période différente de celle de l'analyse des données. Les résultats du calage sont présentés sur la Figure 38.



Figure 38. Données simulées et observées en sortie du digesteur (a) MVS et (b) biogaz

La concentration en MVS à la sortie du digesteur est bien estimée, avec une erreur moyenne de 5 %. Le biogaz simulé est un peu surestimé par rapport aux données observées, mais la modification de la fraction biodégradable ayant un impact sur cette valeur et sur le taux d'abattement des MVS, ce dernier a été préféré étant donné les incertitudes sur la mesure du débit de biogaz produit. A noter que la dynamique de production du biogaz est quant à elle parfaitement représentée.

## 4.3 ANALYSE DE DIFFERENTS SCENARIOS A L'AIDE DE LA SIMULATION

Les différents scénarios analysés à l'aide des modèles développés sont présentés dans le Tableau 21, de même que les modèles utilisés. Les résultats obtenus sont ensuite analysés.

#### Tableau 21. Scenarios analysés à l'aide de la modélisation

N°	Station	Description du scenario	Modèles utilisés	Hypothèses de simulation	
1	La Feyssine	Impact de l'augmentation de la charge sur les performances énergétiques du système	Equations énergie	Traitement de la charge nominale, avec la même qualité des eaux traitées	
2	Bourg en Bresse	Impact de la température du digesteur sur la production de biogaz et les retours en tête	Modèle de digestion calé à Bourg en Bresse	Fonctionnement du digesteur à 35 °C, avec les mêmes charges en entrée	
3	Bourg en Bresse	Impact d'une augmentation de la charge du digesteur avec des boues biologiques sur la production de biogaz et les retours en tête	Modèle complet	Ajout de boues biologiques en entrée du digesteur ayant les mêmes caractéristiques que les boues de la station	

## 4.3.1 SCENARIO 1. CONSOMMATION ENERGETIQUE DE LA FEYSSINE A CHARGE NOMINALE

La consommation globale de l'installation estimée à sa charge nominale, avec et sans sécheur, est représentée sur la Figure 39.



Figure 39. Estimation de la consommation énergétique de la station d'épuration de La Feyssine fonctionnant à charge nominale

En situation actuelle, les estimations des dépenses énergétiques avec et sans sécheur montrent que le fonctionnement des sécheurs induit une augmentation de la consommation journalière de près de 40 %.

Un fonctionnement à charge organique nominale (x 2,5 par rapport à la situation actuelle) multiplierait par un facteur 2 l'énergie totale consommée, ce qui permettrait de passer – sans sécheur – d'un ratio spécifique de l'ordre de 3,3 kWh/kg DBO<sub>5 éliminée</sub> à un ratio de 2,8 kWh/kg DBO<sub>5 éliminée</sub>. A noter cependant que cette hypothèse de fonctionnement à charge nominale ne prend pas en compte différentes limitations qui pourraient survenir à cette charge (manque d'oxygène, dysfonctionnements liés au clarificateurs, par exemple).

# 4.3.2 SCENARIO 2. IMPACT DE LA TEMPERATURE DU DIGESTEUR DE BOURG EN BRESSE SUR SES PERFORMANCES

La difficulté à maintenir constante la température du digesteur de Bourg en Bresse limite très certainement la production de biogaz, sans compter la consommation de ce biogaz qui, comme vu précédemment, représente la quasi-totalité du biogaz produit. L'impact de la température de fonctionnement sur les performances du digesteur est représenté sur la Figure 40.



Figure 40. Impact de la température du digesteur sur la production de biogaz et le rendement d'abattement des MVS

Toute chose égale par ailleurs, et en régime permanent, le maintien de la température du digesteur à 35°C permettrait d'améliorer la production de biogaz d'environ 13%, et l'abattement des MVS (de 27 à 29 %) par rapport à la situation actuelle.

Le difficile maintien de la température du digesteur de Bourg en Bresse a donc deux conséquences majeures : la consommation excessive de biogaz pour le chauffage (70 % alors qu'elle devrait être autour de 30%) et une production réduite de biogaz.

# 4.3.3 SCENARIO 3. IMPACT DE LA CHARGE REÇUE PAR LE DIGESTEUR SUR SES PERFORMANCES ET SUR LES RETOURS EN TETE

Les résultats de simulation d'un ajout de boues de caractéristiques similaires à la situation actuelle (boues biologiques d'une autre station d'épuration) en entrée du digesteur sont présentés sur la Figure 41.



Figure 41. Impact d'une augmentation de la charge du digesteur sur ses performances (a) et sur les retours en tête (b)

A température constante, l'augmentation de la charge admise sur le digesteur de 1,5 à 1,8 puis 2,0 kgMV/m<sup>3</sup>/j induit une augmentation de la production de biogaz (+ 14 % et + 34 %). Celle-ci s'accompagne d'une diminution de l'abattement des MVS (de 29 à 28 puis 27%), en lien avec la réduction du temps de séjour des boues dans le réacteur.

Cet ajout de charge n'a que peu d'influence sur les retours en tête : l'augmentation de la charge en orthophophates induite ne représente qu'une augmentation de la concentration en entrée de l'étage biologique de 5,7 à 6,3 puis 6,8 mg/L. D'après les simulations, cette augmentation a un impact négligeable sur la concentration en ortho-phosphates en sortie de la station d'épuration. Ces simulations ont été réalisées en régime permanent et devront être confirmées en régime dynamique.

# 4.4 CONCLUSIONS

Le développement des modèles de fonctionnement des deux sites étudiés a nécessité un travail important de fractionnement de la matière organique des eaux résiduaires et des boues produites. Les hypothèses faites mériteraient d'être étayées sur d'autres sites.

Un modèle complet a été élaboré et calé pour simuler le fonctionnement de la station d'épuration de Bourg en Bresse. Il a permis d'étudier différents scenarios de fonctionnement du digesteur : le maintien de sa température à 35 °C et une augmentation de sa charge (+20 à 40%) n'auraient que peu d'impact sur les retours en tête et donc sur les performances de la file eau.

Les modèles ont également été développés pour le site de La Feyssine, mais le manque de données concernant l'étage biologique sur ce site (caractérisation de l'aération, de l'agitation) rend l'étape de calage délicate. Le modèle développé pour le digesteur pourrait cependant être utilisé pour envisager le scenario de Bourg en Bresse qui consisterait à ajouter un étage primaire, en dupliquant les cinétiques de production de biogaz obtenues à La Feyssine.

Deux principales difficultés pour développer ces modèles peuvent être soulignées :

- Le manque de données en quantité et en qualité suffisantes. Cette remarque est particulièrement vraie sur les mesures des débits de biogaz produit et consommé dans les différents procédés, et sur la caractérisation des retours en tête des stations ;
- Le manque d'exemples de validation de modèles à cette échelle, qui appuie l'importance de poursuivre le travail réalisé.

Par ailleurs, des équations permettant d'estimer les dépenses énergétiques d'un site à partir de ses données de fonctionnement ont été proposées. Elles sont similaires sur les deux sites pour la plupart des étapes de traitement :

- Pour les postes consommant une faible proportion de l'énergie, la moyenne des consommations journalières est utilisée comme approximation ;
- L'estimation de l'énergie consommée par les ouvrages de déshydratation mécanique nécessite de connaitre leur débit d'alimentation ;
- Pour le traitement secondaire, le débit et la concentration en ammonium sont requis, de même que la concentration en MES dans les bassins ; cette équation est cohérente avec l'impact des conditions de fonctionnement sur les performances d'aération du système : charge et concentration des boues sont des paramètres importants de la consommation énergétique liée à l'apport d'oxygène ;
- L'énergie consommée par le digesteur est fonction de son débit d'alimentation et de la différence entre la température des boues alimentant et sa température de fonctionnement. Ce résultat traduit les deux postes de consommation de l'étape de digestion : alimentation du digesteur et maintien en température.
- L'énergie consommée par les sécheurs est directement proportionnelle au flux de matière séchée.

Il s'agira de confronter ces équations sur d'autres installations, et de les insérer dans les modèles biocinétiques.

Ce projet a permis de constituer une base de données conséquente sur le fonctionnement, les dépenses énergétiques, et la modélisation de différents réacteurs à taille réelle, ce qui est rare dans la littérature. Les premiers résultats de simulation sont encourageants. Ces simulations seront poursuivies, notamment dans le cadre de la thèse de Perrine Devos (démarrage octobre 2019) qui portera sur une meilleure caractérisation des retours en tête et de leur traitement.

# 5. CONCLUSION GENERALE

L'objectif du projet « Analyse des gains énergétiques potentiels et effectifs de stations d'épuration *a priori* économes en énergie » était d'identifier les pistes de réduction des dépenses énergétiques d'installations couplant un étage biologique à boues activées et un digesteur anaérobie et de quantifier les gains potentiels. Pour atteindre cet objectif, une méthodologie basée sur l'étude du fonctionnement de deux installations qui diffèrent par leur conception (une « éco-station » et une installation plus ancienne dimensionnée sans prendre en compte de critères d'éco-performances) a été mise en place, avec pour objectif de développer des modèles de fonctionnement permettant de simuler différents scenarios.

En parallèle, les technologies les plus récentes proposées pour les principaux équipements consommant de l'électricité intégrés dans la file eau des stations d'épuration ont été analysées. Les conclusions de cette analyse portent sur les principaux postes de consommation :

- De manière générale, l'efficacité des moteurs a significativement évolué ces dernières années. Le remplacement des moteurs d'ancienne génération pourrait conduire à des gains énergétiques d'autant plus significatifs que la puissance nominale du moteur est faible.
- Pour l'aération, le poste le plus consommateur des stations biologiques aérobies, différents éléments peuvent permettre de réduire les consommations énergétiques : le choix du couple aérateur-système d'alimentation en air le plus adapté au moment du dimensionnement, la possibilité d'un apport en oxygène flexible, pour l'adapter aux conditions de fonctionnement des réacteurs (notamment la souscharge), grâce à des variateurs de fréquence et/ou des équipements de capacité différentes, et la mise en place de systèmes de régulations adaptés.
- L'analyse des dépenses liées à l'agitation ne doit pas être négligée, les agitateurs fonctionnant très souvent en continu et parfois dans des conditions hydrauliques peu adaptées.

L'analyse approfondie des données de fonctionnement et des dépenses énergétiques des deux sites retenus a montré des installations qui globalement respectent les niveaux de rejet imposés, avec des fonctionnements qui diffèrent en lien avec la charge traitée et les choix de conception.

D'un point de vue énergétique, les principales conclusions sont les suivantes :

- Le fonctionnement des sécheurs induit un coût très préjudiciable à l'énergie spécifique consommée.
  C'est d'autant plus vrai que le taux de charge faible à La Feyssine induit un fonctionnement non continu des sécheurs, avec des redémarrages fréquents nécessitant une montée en température énergivore ;
- Sur les files eau, le poste aération est le plus consommateur d'énergie, même si globalement aucun défaut n'a été constaté lors des mesures ;
- De manière évidente, le maintien en température des digesteurs mal isolés de Bourg en Bresse induit une surconsommation du poste « boues » par rapport aux données usuelles.

L'analyse de ces données est un préalable long mais indispensable à l'élaboration de modèles biocinétiques représentant les installations dans leur ensemble, de manière à prendre en compte l'impact des modifications d'un procédé sur les autres éléments de l'installation. L'analyse fine de ces données et la meilleure compréhension du fonctionnement d'une installation associée sont reconnues comme l'un des bénéfices du développement de modèles selon Rieger *et al.* (2012).

Un modèle complet a été élaboré et calé pour simuler le fonctionnement de la station d'épuration de Bourg en Bresse. Il a permis d'étudier différents scenarios de fonctionnement du digesteur : le maintien de sa

température à 35 °C et une augmentation de sa charge (+20 à 40%) n'auraient que peu d'impact sur les retours en tête et donc sur les performances de la file eau.

Les modèles ont également été développés pour le site de La Feyssine, mais le manque de données concernant l'étage biologique sur ce site (caractérisation de l'aération, de l'agitation) rend l'étape de calage délicate. Le modèle développé pour le digesteur pourrait cependant être utilisé pour envisager le scenario de Bourg en Bresse qui consisterait à ajouter un étage primaire, en dupliquant les cinétiques de production de biogaz obtenues à La Feyssine.

Par ailleurs, des équations permettant d'estimer les dépenses énergétiques d'un site à partir de ses données de fonctionnement ont été proposées. Elles sont similaires sur les deux sites pour la plupart des étapes de traitement :

- Pour les postes consommant une faible proportion de l'énergie, la moyenne des consommations journalières est utilisée comme approximation ;
- L'estimation de l'énergie consommée par les ouvrages de déshydratation mécanique nécessite de connaitre leur débit d'alimentation ;
- Pour le traitement secondaire, le débit et la concentration en ammonium sont requis, de même que la concentration en MES dans les bassins ; cette équation est cohérente avec l'impact des conditions de fonctionnement sur les performances d'aération du système : charge et concentration des boues sont des paramètres importants de la consommation énergétique liée à l'apport d'oxygène ;
- L'énergie consommée par le digesteur est fonction de son débit d'alimentation et de la différence entre la température des boues alimentant et sa température de fonctionnement. Ce résultat traduit les deux postes de consommation de l'étape de digestion : alimentation du digesteur et maintien en température.
- L'énergie consommée par les sécheurs est directement proportionnelle au flux de matière séchée.

Il s'agira de confronter ces équations sur d'autres installations, et de les insérer dans les modèles biocinétiques.

Le projet a également permis de constituer une base de données conséquente sur le fonctionnement, les dépenses énergétiques, et la modélisation de différents réacteurs à taille réelle, ce qui est rare dans la littérature. Les premiers résultats de simulation sont encourageants. Ces simulations seront poursuivies, notamment dans le cadre de la thèse de Perrine Devos (démarrage octobre 2019) qui portera sur une meilleure caractérisation des retours en tête et de leur traitement.

# 6. REFERENCES

Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse (AERMC) (2012) «Méthanisation des boues de stations : Règle de l'art et état des lieux sur les bassins Rhône-Méditerranée et Corse». Etude Technique.

Batstone D.J., Keller J., Angelidaki I., Kalyuzhnyi S.V., Pavlostathis S.G., Rozzi A., Sanders W.T., Siegrist H., Vavilin V.A. (2002) Anaerobic Digestion Model No. 1. (ADM1). IWA Scientific and Technical Report No. 13, IWA Publishing, London.

Brunner C. U., Burghardt M., Hanigovszki N., Vezzini A., Nipkow J., Tieben R., Klingel P. (2018) Nouvelles technologies des moteurs, Fiche technique n°29, TOPMOTOR, Novembre 2018

Filali A., Hauduc H., Rieger L., Philippe L., Nauleau F., Gillot S. (2015) Analyse et consolidation de données de fonctionnement des stations d'épuration : une étude de cas. Techniques Sciences Méthodes, Issue 12 (Décembre 2015) : 105 – 135.

Haberkern B., Maier W., Schneider, U. (2008) «Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Klaeranlagen» (Increasing the Energy Efficiency of WWTPs). Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

Henze M., Gujer W., Mino T. and van Loosdrecht M.C.M (2000) Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. IWA publishing.

Lefebvre X., Mauret M., Pocquet M., Sperandio M., Canler J.P. (2016) INFLEX, pour un pilotage optimisé d'un bassin biologique de type boue activée – retours d'expérience, Congrès JIE 2016, Poitiers, 11-13/10/2016, 5p.

NF EN 60034-30 (2009) Machines électriques tournantes - Partie 30 : classes de rendement pour les moteurs à induction triphasés à cage, mono vitesse (Code IE)

Reiger, L., I. Takacs, et al. (2012). Good Modelling Practice: Guidelines for Use of Activated Sludge Models. Scientific and Technical Report No.22, Iwa Publishing.

Stricker A.-E., Héduit A. (2010) Phosphore des eaux usées : état des lieux et perspectives. Rapport pour l'ONEMA. 54 p.

Stricker A.-E., Husson A. (2015) Analyse de la consommation énergétique de la station de traitement des eaux usées de Saverne en 2011-2012 : diagnostic et recommandations. Rapport, Irstea Bordeaux

Stricker A.-E., Husson A., Canler J.-P. (2017) Consommation énergétique du traitement intensif des eaux usées en France : Etat des lieux et facteurs de variation, Rapport final d'étude, 76 p. + Annexes

Stricker, A.E., Husson, A., Pierre, M., Canler, J.P. (2018) Consommation énergétique des filières intensives de traitement des eaux résiduaires urbaines. Journées Information Eaux (23è édition), Poitiers, FRA, 09-11 octobre 2018

# ANNEXE 1. TABLEAU DE REPARTITION DES DEPENSES ENERGETIQUES DANS LES DIFFERENTS FILES, POSTES ET SOUS-POSTES D'UNE INSTALLATION

File	Ftapes	Poste	Sous-poste	Précisions complémentaires
	=	Fau d'entrée		Relevane en tête
		Relevages		Relevages intermédiaires hors celui du bassin tampon et d'orage
		intermédiaires		5
	Postes de Relevage	Relevage sortie		Relevage de sortie
		Poste toutes eaux		Relevage de l'ensemble des retours : file boue, prétraitements et traitements annexes, sanitaires, pluviales des bâtiments.
	Ouvrages hydrauliques	Bassin d'orage Bassin tampon		Pompage de reprise, agitation, lavage, aération
	Pré-traitements	Eau		Dégrillage, dessablage, dégraissage, tamisage, réception stockage et injection des
			Extraction	Pompes d'extraction des boues primaires vers la file boue
	Traitement primaire	Décantation	Séparation	Pont tournant/roulant, pompes d'amorçage, pompes à flottants, brosses ou pompes de nettoyage automatisé, y compris le poste réactifs chimiques pour cet équipement
			Agitation	Agitation de l'ensemble des bassins non aérés: zone de contact, anoxie, anaérobie.
Fau		Bassins non aeres	Recirculations liqueur mixte	Recirculation entre les zones de traitement biologique (aération vers anoxie, anoxie
		Bassins aérés	Aération biologique	Surpresseurs et ventilateurs de capot associés, turbines ou brosses
	Troitement eccondrine		Agitation	Agitation associée à l'aération biologique
	Traitement secondaire		Extraction	Boues biologiques en exces vers la file boue.
				Clarificateur et son degazeur : pont tournant/roulant, pompes d'amorçage, pompes a
			Separation gravitaire	flottants, brosses ou pompes de nettoyage automatise, ou flottateur et ses
		Separation finale		équipements de présurisation ou tamis et ses pompes de lavage
			Séparation membranaire	Aération membranaire, pompage perméat et rétrolavage, pompage de circulation
				(membranes tubulaires), lavage de régénération (injection de réactifs, pompage de
			Recirculation	Recirculation de l'ouvrage de séparation vers les différents bassins biologiques.
		Affinage		Tamisage, filtration sur sable, clarifloculation y compris tous les équipements
	Traitement tertiaire	/ unitago		associés à ce traitement: lavage, extraction des boues, injection de réactifs,
		Désinfection		Désinfection: UV, Chloration
		Micropolluants		Ozonation, Charbon actif, filtration membranaire: nanofiltration et osmose inverse,
		Epaississement	Boues biologiques	Stockage amont, Pompage d'alimentation et fonctionnement des équipements
			Boues primaires	d'épaississement (silo, égouttage dynamique, flottateur, centrifugeuse,) y compris
			Boues mixtes	la préparation et injection de polymères ou floculant (agitateurs, pompes,)
			Boues biologiques	Stockage amont Pompage d'alimentation et fonctionnement des équinements de
		Déshydratation	Boues primaires	deshydratation ( centrifugeuse filtre à hande, filtre à plateaux, presse à vis, ) v
			Boues mixtes	compris la préparation et injection de polymères ou floculant (aditateurs, pompes, )
			Digestat	
		Digestion anaérobie	Digesteur	Stockage amont, Pompage d'alimentation et fonctionnement des digesteurs anaérobies ( agitation, chauffage,).
	Traitement des boues		Préparation	Eventuels prétraitements (thermique, mécanique,) préalable à la digestion.
Boues		Stabilisation	Aérobie	Pompage d'alimentation et fonctionnement : aération, agitation et
		Otabilisation	Chaulage	Stockage, injection et mélange de la chaux
			Solaire	Alimentation (convoyage) et fonctionnement des serres de séchage solaire, y
		Séchage	Thermique	Stockage amont, Alimentation (convoyage), génération de chaleur et fonctionnement
			mernique	des sécheurs, y compris leur traitement de l'air .
		Incinération		Stockage amont, Alimentation (convoyage), combustible éventuel et fonctionnement
				des incinérateurs, y compris leur traitement de l'air.
		Stockage avant		Alimentation et fonctionnement du Stockage final avant évacuation (silo, benne, aire à
		évacuation		boues,)
	Traitements complémentaires	Retours de la file boue		Traitement spécifique mis en place pour traiter les retours de la file boue: sharon,
		Autres		Par exemple, récupération des métaux
		Ventilation		Tous les ventilateurs (entrée d'air neuf, extracteurs d'air vicié,CTA) non associés à
	Renouvellement et Traitement	Désodorisation		une désodorisation, y compris ceux du local surpresseurs.
Air	de l'air		Chimique	Extraction d'air des bâtiements et des ouvrages vers son traitement. Fonctionnement
			Biologique	(injection de réactifs, recirculation, purges,).
			Charbon actif	
	Fluides et Divers	Air de service		Compresseur et circuit de distribution d'air comprimé: ouvertures des vannes,
		Equipements annexes		Divers equipements : palan electrique, portes sectionnelles, moteurs de reprises des
Divers				pataros, autocontrole Preleveurs et autres équipements: débitmetres
	Tasiana da antes da antes da	Eau de service		Surpresseurs pour l'Eau industrielle et son circuit de distribution.
	maitements annexes / apports	Gialsses		manement specifique de graisses issues d'apports exterieurs
	exterieurs	Sables		Arathermen specifique des sables et des matieres de curage: trommel, classificateur,
		Chautrage		Aerourennes, convecteurs,des locaux ou batiments techniques et des bureaux
	Bâtiments	Climatisation		Climatiseurs des locaux techniques (armoires electriques,) et des bureaux
	Latinonio	Autres usages		Eclairage, ventilation (VIVIC) des bureaux, eau chaude sanitaire, informatique,
_				electromenager, instrumentation de laboratoire,
Erreur		1		Différence résiduelle entre la consommation globale mesurée et calculée, et qui reste

### ANNEXE 2. SCHEMAS DETAILLES DE LA STATION D'EPURATION DE LA FEYSSINE



Schéma de la station de La Feyssine : prétraitements



Schéma de la station de La Feyssine : File eau (TC : tranche conditionnelle, TF : tranche ferme, LM : liqueurs mixtes, br : recirculation boue biologique, bext : extraction de boue biologique, b2cent : centrâts d'épaississement boue biologique, b1surnag : surnageant d'épaississement boue primaire, bdcent : centrâts de déshydratation boues digérées, bdcond : condensats séchage boues)



Schéma de la station de La Feyssine : File boues (b1 : boues primaires, b2 : boues biologiques, bd : boues digérées, bdcent : centrats déshydratation boues digérées, bdcond : condensats séchage boues déshydratées)




□ : pompe station

# ANNEXE 4. REPARTITION DES DEBITS DES EAUX RESIDUAIRES EN ENTREE DES INSTALLATIONS

#### La Feyssine

La distribution des débits en entrée de la station a été réalisée pour une période de plus de deux ans (de 01/01/2013 à 31/08/2015 soit **973** jours). En moyenne, l'installation reçoit un débit journalier de 38975 m<sup>3</sup> j<sup>-1</sup>. Une variation cyclique saisonnière de ce débit est observée, avec une valeur minimale de 21774 m<sup>3</sup> j<sup>-1</sup> au mois d'août. Le débit maximal relevé est de 144008 m<sup>3</sup> j<sup>-1</sup> qui correspond au débit maximal accepté par la station. La distribution de ces débits journaliers est reportée sur la figure suivante.

Deux pics sont observés à approximativement 29922 m<sup>3</sup>/j et 52322 m<sup>3</sup>/j qui représentent respectivement les débits moyens de temps sec et pluvieux observés sur cette installation. Un minimum est observé aux alentours de 47000 m<sup>3</sup>/j, ce qui peut être considéré comme le seuil entre les conditions à prédominance de temps sec et pluvieux. L'analyse de la fréquence cumulée indique que 95% du temps, le débit journalier est inférieur à 83000 m<sup>3</sup> j<sup>-1</sup>.

Sur l'ensemble des donnés de débits d'entrée de la station, environ 20% a été assigné au temps de pluie. L'analyse de ces données de temps de pluie montre que, effectivement, les très fortes charges hydrauliques (à partir de 70000 jusqu'à 144000 m<sup>3</sup>/j) sont corrélées à des épisodes de pluies abondantes et nettement supérieures à la moyenne. Par conséquent, ces valeurs sont considérées comme exceptionnelles et sont validées.



Histogramme des débits journaliers – La Feyssine

#### **Bourg en Bresse**

Une analyse croisée de bilans hydrauliques réalisés en différents points de la station (bloc des prétraitements, extraction, sortie de station, retours en tête...) a permis de mettre en évidence une mesure erronée du débit en entrée de station d'épuration, mesuré après les prétraitements ( $Q_{EPT}$ ). Afin de consolider les débits, ces valeurs ont été remplacées par celles obtenues en sortie de station d'épuration ( $Q_{EPT} = Q_{EFF}$ ).



Histogramme des débits journaliers

Deux pics sont observés à approximativement 18600 m<sup>3</sup>/j et 33000 m<sup>3</sup>/j, qui représentent respectivement les débits moyens de temps sec et pluvieux observés sur cette installation. Un minimum est observé aux alentours de 29000 m<sup>3</sup>/j, valeur qui peut être considérée comme le seuil entre les conditions à prédominance de temps sec et pluvieux. L'analyse de la fréquence cumulée indique que 95% du temps, le débit journalier est inférieur à 61228 m<sup>3</sup> j<sup>-1</sup>.

Ces résultats sont basés sur les performances des décanteurs primaires issues :

- Des données d'autosurveillance de l'installation, au pas de temps journalier (avec un échantillonneur proportionnel au temps en sortie de décanteur, proportionnel au débit sur les retours du traitement des boues avant digestion, et des échantillons ponctuels sur les retours du traitement des boues après digestion)
- Des mesures complémentaires réalisées, au pas de temps journalier (avec un échantillonneur proportionnel au débit en sortie de décanteur et sur les retours du traitement des boues après digestion)
- 3. Des mesures complémentaires réalisées, au pas de temps horaire, en entrée et sortie du décanteur primaire, et sur les eaux résiduaires

La figure suivante présente les résultats obtenus au pas de temps horaire. Les mesures réalisées au pas de temps journalier sont également reportées dans le graphique (propositionnels au débit lors de la campagne de mesure, et proportionnels au temps et ponctuels, pour les données d'autosurveillance).



Taux de capture du décanteur primaire – échantillons horaires

Les taux de capture calculés au pas de temps horaire présentent une allure « classique », avec une augmentation du taux de capture avec l'augmentation de la concentration en MES à l'entrée du décanteur. La courbe obtenue peut être modélisée à l'aide d'une équation à deux paramètres (Da Silva et al., 2014), sous la forme suivante :

$$Taux \ de \ capture = 0.95 - \frac{75.6}{[MES_{IN}]}$$

L'utilisation de cette équation pour les données obtenues au pas de temps journalier fournit des résultats intéressants, avec une erreur entre valeur mesurée et valeur estimée en moyenne de 4% pour les données de la campagne de mesure (de -6 à 13 %) et de 3% pour les données d'autosurveillance (de -29 à 29 %).

Une équation similaire a été établie pour déterminer les flux de boues primaires, l'échantillonnage dans ce type de boues étant très difficile à réaliser. Cette fois, les données de sortie du décanteur secondaire sont corrélées aux données des eaux résiduaires urbaines. Comme les concentrations dans les ERU des données d'autosurveillance sont plus nombreuses que celles caractérisant l'entrée du décanteur primaire (avec des échantillons non représentatifs pour la majorité).

$$Taux \ de \ capture = 0.90 - \frac{66.5}{[MES_{ERU}]}$$

Les résultats sont présentés sur la figure suivante.



# ANNEXE 6. REPARTITION DES FLUX EN ENTREE ET SORTIE DU DECANTEUR PRIMAIRE DE LA FEYSSINE

La répartition des flux en entrée et sortie du décanteur primaire issue de la campagne de mesure de mars – mai 2015 – est rapportée dans le tableau suivant. Les pourcentages sont calculés sur le Total entrée décanteur primaire.

		ERU	Retours boues avant digestion	Retours boues après digestion	TOTAL entrée décanteur primaire	Sortie décanteur primaire	Taux de capture
DCO	kg/j	21054	7797	1078	29929	9549	
	%	70%	26%	4%	100%	32%	0,55
MES	kg/j	10689	5613	810	17113	3207	
	%	62%	33%	5%	100%	19%	0,72
TKN	kg/j	1830	307	282	2419	1706	
	%	76%	13%	12%	100%	71%	0,21
N-NH <sub>4</sub>	kg/j	1110	60	190	1359	1207	
	%	82%	4%	14%	100%	89%	
P <sub>TOT</sub>	kg/j	253	80	45	378	193	
	%	67%	21%	12%	100%	51%	0,35
P-PO <sub>4</sub>	kg/j	100	17	18	135	117	
	%	74%	13%	13%	100%	31%	
Q	m³/j	40065	2481	1805	43640	42135	
	%	92%	6%	4%	100%	97%	

Les eaux usées représentent 92% du flux hydraulique en entrée du décanteur primaire et 70% de la charge organique. Les décanteurs primaires retiennent environ 70 % des MES des flux d'entrée, et 55% de la DCO. Les composés azotés et phosphorés étant principalement sous forme soluble, leur taux de capture est plus faible que pour les paramètres de la matière organique.

## ANNEXE 7. ANALYSE DES BOUES ALIMENTANT LES DIGESTEURS

## La Feyssine

Boues Primaires								
Ratio	Moyenne	Médiane	Ecart type	RSD	Nb de valeurs			
Densité	0,97	0,99	0,03	3,4%	4			
MES (g/L)	41,4	41,6	13,4	32%	17			
MVS (g/L)	31,6	31,9	10,3	33%	17			
MS (%)	4,5%	4,7%	1,3%	30%	11			
MV (%MS)	72,2%	70,7%	7,3%	10%	11			
DCO <sub>tot</sub> (gO <sub>2</sub> /L)	56,7	55,8	20,9	37%	13			
DCO <sub>sol</sub> (gO <sub>2</sub> /L)	3,05	2,00	2,28	75%	10			
DCO <sub>part</sub> (g/l)	44	45	19	44%	6			
NTK (g/L)	1,60	1,67	0,42	26%	13			
NH4 (mg/L)	132	131	45	34%	12			
Norg (g/l)	1,42	1,53	0,4	26%	12			
Lipides (g/L)	6,97	6,90	0,70	10%	4			
PT (mg/L)	479	482	119	25%	13			
PO4 (mg/L)	250	250	132	53%	2			
Acét (mg/L)	1679	1967	880,98	52%	4			
Prop (mg/L)	1368	1565	715,98	52%	4			
Butyr (mg/L)	363	315	148,49	41%	4			
Valér (mg/L)	343	332	40,28	12%	4			
Acét (gO <sub>2</sub> /L)	1,79	2,10	0,94	52%	4			
Prop (gO <sub>2</sub> /L)	2,07	2,37	1,08	52%	4			
Butyr (gO <sub>2</sub> /L)	0,66	0,57	0,27	41%	4			
Valér (gO₂/L)	0,70	0,68	0,08	12%	4			

Boues Biologiques							
Ratio	Moyenne	Médiane	Ecart type	RSD	Nb de valeurs		
Densité	0,93	0,94	0,04	4,1%	4		
MES (g/L)	44,0	50,1	19,2	44%	17		
MVS (g/L)	34,8	39,5	15,1	44%	17		
MS (%)	4,2%	4,9%	2,0%	48%	12		
MV (%MS)	78,2%	78,5%	2,1%	2,6%	12		
DCO <sub>tot</sub> (g/l)	53,6	56,3	22,7	42%	15		
DCO <sub>sol</sub> (g/l)	9,96	2,08	23,25	233%	10		
DCO <sub>part</sub> (g/l)	56,8	57,9	22,9	40%	8		
NTK (g/L)	3,34	3,39	1,28	38%	11		
NH4 (mg/L)	206	167	128	62%	11		
Norg (g/l)	3,0	3,3	1,3	43%	9		
Lipides (g/L)	2,81	2,81	0,10	4%	2		
PT (mg/L)	1867	1920	299	16%	11		
PO4 (mg/L)	305	305			1		
Acét (mg/L)	804	874	478,38	60%	4		
Prop (mg/L)	465	524	215,57	46%	4		
Butyr (mg/L)	286	319	132,23	46%	4		
Valér (mg/L)	258	265	50,98	20%	4		
Acét (gO <sub>2</sub> /L)	0,86	0,93	0,51	60%	4		
Prop (gO2/L)	0,70	0,79	0,33	46%	4		
Butyr (gO2/L)	0,52	0,58	0,24	46%	4		
Valér (gO2/L)	0,53	0,54	0,10	20%	4		

Digestat							
Ratio	Moyenne	Médiane	Ecart type	RSD	Nb de valeurs		
MES (g/l)	26,6	25,8	2,1	7,8%	13		
MVS (g/l)	17,4	17,4	1,3	7,4%	13		
MS (%)	0,03	0,03	0,00	7,4%	7		
MV (%MS)	0,64	0,64	0,01	1,3%	7		
DCO <sub>tot</sub> (g/l)	28,2	27,2	3,1	11,0%	10		
DCO <sub>sol</sub> (g/l)	0,99	1,08	0,18	18,4%	5		
DCO <sub>part</sub> (g/l)	24,40	24,21	1,59	6,5%	4		
NTK (g/L)	2,31	2,28	0,23	10,0%	9		
NH4 (mg/l)	745	748	39	5,2%	7		
Norg (g/l)	1,48	1,5	0,2	11,1%	7		
PT (mg/l)	838	872	118	14,0%	9		
PO4 (mg/l)	49	49			1		

## Bourg en Bresse

Date	Mean	Median	ndard devia	RSD	Nb of values
Densité	1,0	1,0	0,0	0%	9
TSS (g/L)	49,0	48,20	3,3	7%	3
VSS (g/L)	36,6	36,6	2,5	7%	2
TS (%)	4,96%	4,95%	0,0	4%	8
VS (%TS)	0,78	0,8	0,0	1%	7
COD <sub>tot</sub> (gO <sub>2</sub> /L)	58	55	6,8	12%	7
CODfilt (gO <sub>2</sub> /L)	0,3	0,3	0,1	27%	5
TKN (g/L)	3,8	3,52	0,7	18%	6
TAN (mg/L)	15	13	6,8	46%	6
N-org (mg/l)	3922	3505	653,2	17%	5
PO4 (mg/L)	35,5	34,7	12,5	35%	6
Ppart (mg/l)	1164	1118	192,3	17%	6
P <sub>tot</sub> (mg/L)	1241	1219	191,6	15%	8
Lipids (g/L)	2	2	0,2	9%	3
Acetate (mg/L)	14	19	8,5	60%	3
Propionate (mg/L)	2	0	3,5	173%	3
Butyrate (mg/L)	7	7	1,4	19%	3
Valeriate (mg/L)	0,0	0,00	0,0	0%	3
Acetate (gO <sub>2</sub> /L)	0,015	0,020	0,0	60%	3
Prop (gO2/L)	0,003	0,000	0,0	173%	3
Butyr (gO2/L)	0,013	0,013	0,0	19%	3
Valér (gO2/L)	0,000	0,000	0,0	0%	3

Paramètre	Mean	Median	ndard devia	RSD	Nb of values
Density	1,0	1,0	0,0	0%	5
TSS (g/L)	35,1	35,1	1,5	4%	2
TS (%)	3,8%	3,8%	0,1%	3%	5
VS (%MS)	73,0%	72,7%	1,6%	2%	5
COD <sub>tot</sub> (gO <sub>2</sub> /L)	40,4	41,5	4,9	12%	5
COD <sub>filt</sub> (gO <sub>2</sub> /L)	1,4	1,1	0,6	46%	5
CODpart (gO2/L)	39	40	5	13%	5
TKN (g/L)	3,2	3,2	0,1	5%	5
TAN (mg/L)	977	942	87	9%	5
N-org (mg/L)	2175	2197	135	6%	5
PO4 (mg/L)	128	111	40	31%	4
P <sub>tot</sub> (mg/L)	1207	1141	194	16%	4

ANNEXE 8. MESURE DES PERFORMANCES D'AERATION ET DES EMISSIONS DE PROTOXYDE D'AZOTE – BOURG EN BRESSE



Protocole d'échantillonnage des mesures de transfert d'oxygène par bilans gazeux et des vitesses de circulation dans les chenaux



Protocole d'échantillonnage des mesures d'émission de N2O dans les chenaux

### ANNEXE 9. FRACTIONNEMENT DES EAUX USEES

#### FRACTIONNEMENT DE LA MATIERE ORGANIQUE

La Figure suivante présente le fractionnement de la DCO adapté au modèle biocinétique utilisé. Celui-ci a été réalisé en pratique sur la base des hypothèses et mesures suivantes :

- La fraction de DCO contenue dans la biomasse est considérée comme négligeable par rapport à celle se développant dans le système ;
- La fraction de DCO soluble inerte (S<sub>1</sub>) a été estimée par la DCO soluble de l'effluent en sortie (S<sub>1</sub> = 0.9\* DCO<sub>s, eff</sub>);
- La fraction de DCO soluble facilement biodégradable regroupant  $S_F$  et  $S_A$  a été estimée à partir de la fraction de DCO soluble en entrée de l'étage biologique mesurée avec un test de coagulation/floculation et filtration à 0,45µm;
- La fraction de DCO regroupant X<sub>s</sub> et S<sub>s</sub> (correspondant à la somme de S<sub>A</sub> et S<sub>F</sub>) a été déterminée avec un test de DBO<sub>ultime</sub>;
- La fraction de DCO inerte particulaire X<sub>I</sub> a été estimée par différence (1-(S<sub>S</sub>+X<sub>S</sub>+S<sub>I</sub>)).

Aucune mesure de la concentration en acides gras volatils n'ayant été réalisée sur les échantillons, la fraction de  $S_A$  a été considérée comme égale à 25 % de la fraction de  $S_S$ .



Schéma du fractionnement de la DCO du modèle ASM2d

#### FRACTIONNEMENT DE L'AZOTE ET LE PHOSPHORE

Le fractionnement de l'azote et du phosphore a été réalisé selon le schéma présenté sur la figure suivante, sur la base des ratios caractéristiques des eaux résiduaires (cf. paragraphe 0).

Azote global	S <sub>NO3</sub>	Nitrate
	S <sub>NO2</sub>	Nitrite
Azote Kjeldahl Azote oxydé (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	S <sub>NH</sub>	Ammonium
	S <sub>ND</sub>	Azote organique soluble
Azote ammoniacal Azote organique	i <sub>nsf</sub> , i <sub>nsi</sub>	Fractions de N dans la matière organique soluble
Azote organique Soluble INSESE INSES	i <sub>nxf</sub> , i <sub>nxi</sub>	Fractions de N dans la matière organique particulaire
	İ <sub>Nbio</sub>	Fractions de N dans la biomasse
	S <sub>PO</sub>	Ortho-phosphate
Phosphore total	i <sub>psf</sub> , i <sub>psi</sub>	Fractions de P dans la matière organique soluble
Phosphore soluble Phosphore particulaire	İ <sub>PXF</sub> , İ <sub>PXI</sub>	Fractions de P dans la matière organique particulaire
Ortho- phosphate organique soluble Phosphate organique organique de fer	İ <sub>Pbio</sub>	Fractions de P dans la biomasse
Seo ipsrSr ipsrS	X <sub>bio</sub>	Biomasse
	X <sub>PP</sub>	Poly-phosphate
	X <sub>MEP</sub>	Phosphate de fer FePO4

Fractionnement de l'azote et du phosphore