

Stratégie d'optimisation énergétique au sein d'une station d'épuration. Cas du Siaap

■ S. AZIMI¹, V. ROCHER¹

Mots-clés : station d'épuration, optimisation énergétique, comptage électrique, indicateurs
Keywords: wastewater treatment plant, energy optimization, electric metering, indicators

Introduction

La réglementation encadrant le traitement des eaux a largement évolué ces deux dernières décennies. L'application de la directive sur les eaux résiduaires urbaines [DERU, 1991], la directive cadre sur l'eau [DCE, 2000] et, plus récemment, le plan national d'action sur l'assainissement 2012-2018, ont conduit à un accroissement significatif des exigences quant à la qualité des eaux rendues au milieu naturel. Ainsi, l'obligation de moyen imposée par la DERU pour atteindre les rendements d'élimination (70 % de l'azote et 80 % du phosphore) s'est transformée en obligation de résultat par la DCE pour atteindre le bon état écologique des masses d'eau. Les seuils de concentration très faible à atteindre dans le milieu naturel (par exemple 0,5 mg/L en orthophosphate, 0,2 mg/L en phosphore, 0,5 mg/L en ammonium ou encore 0,3 mg/L en nitrites) imposent des valeurs encore plus basses pour les rejets des usines de traitement. Dans cet objectif, les principales agglomérations françaises ont conduit une politique de construction et de modernisation des ouvrages d'assainissement. Des technologies performantes pour le traitement physico-chimique et biologique des eaux résiduaires et des sous-produits ont été intégrées dans les usines d'épuration des principales agglomérations françaises (décantation lamellaire physico-chimique, biofiltres, bioréacteurs à membranes, sécheurs thermiques, etc.). Si ces technologies intensives permettent de maintenir une haute qualité de traitement, leur fonctionnement génère une consommation énergétique de plus en plus importante.

Parallèlement à cela, la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (validée le 13 août 2015 par le Conseil constitutionnel) dessine, pour le milieu du siècle, les grands objectifs du nouveau modèle énergétique français. Plus sobre et plus durable, le système prévoit une réduction de 40 % des émissions de gaz à effet de serre (2030) ; une diminution de 20 % de la consommation énergétique (2030) ; une baisse de 30 % de la part fossiles (2050) ; la promotion des renouvelables pour atteindre 32 % de la consommation d'énergie et 40 % de la production d'électricité.

Dans ce contexte de hautes performances à faible coût énergétique, les grands industriels, et notamment les constructeurs et exploitants de stations d'épuration, ont mis au cœur de leurs préoccupations les problématiques liées à la dépense énergétique [MÜLLER *et al.*, 2006 ; FRIEDRICH *et al.*, 2009 ; CHUDOBA *et al.*, 2011]. En région parisienne, le Syndicat interdépartemental pour l'assainissement de l'agglomération parisienne (Siaap), en charge du transport et du traitement des eaux usées générées par 8,5 millions de Franciliens (2,5 millions de mètres cubes par jour), a mis en place depuis plus de 10 ans des actions de comptage et d'optimisation de ses consommations énergétiques. Les objectifs visés sont d'abaisser les consommations et les coûts liés à l'achat d'énergie et, de fait, de réduire les autres impacts environnementaux associés. Cette démarche repose sur les exigences de la norme ISO 50001 relative à la gestion de l'énergie sans toutefois rechercher l'obtention de la certification. Pour ce faire, une cartographie énergétique doit être effectuée afin de cibler les consommateurs les plus importants. Puis, pour chacun d'eux, des plans d'actions sont définis et suivis (indicateurs) afin d'en réduire la consommation énergétique.

¹ Siaap – Direction de la recherche et développement – 82, avenue Kléber, – 92700 Colombes.

L'objectif de cet article est de présenter la démarche mise en œuvre au Siaap dans le cadre de l'optimisation énergétique. Dans un premier temps, les principaux consommateurs ont été identifiés grâce à une observation à différentes échelles. L'échelle macroscopique (ensemble des usines du Siaap) a permis de cibler la source énergétique la plus utilisée. Puis, à l'échelle du site (usine) et des filières (composées d'un ou plusieurs ateliers de traitement successifs), les principaux consommateurs ont été identifiés. Dans un second temps, à partir d'exemples de mise en œuvre au Siaap, une méthodologie d'optimisation est présentée, prenant en considération les niveaux filières, ateliers et équipements. Cette approche est complétée par la définition d'indicateurs de suivi pertinents et adaptés.

1. Les échelles d'observation

Trois échelles d'observation peuvent être distinguées afin de connaître l'état des consommations énergétiques. Cette approche par niveau a le double objectif de :

- donner la cartographie des consommations à différentes échelles ;
- et de cibler les consommateurs les plus importants afin de pouvoir hiérarchiser les actions d'optimisation.

1.1. Échelle macroscopique

1.1.1. Les usines du Siaap

Les 2,5 millions de m³ d'eau usée générés chaque jour sur le bassin versant du Siaap sont acheminés vers des usines d'épuration qui disposent de filières de traitement complètes (figure 1).

Les stations sont réparties d'amont en aval de l'agglomération parisienne et traitent des débits compris entre 50 000 et 1 700 000 m³ par jour. Différentes

technologies sont utilisées pour le traitement des eaux et des boues. La station Seine aval (SAV) associe une filière de traitement biologique classique et une filière de biofiltration pour traiter les eaux ; et la file boue comprend un traitement thermique à haute pression. Les usines Seine Grésillons (SEG), Seine centre (SEC) et Marne aval (MAV) utilisent le procédé de biofiltration pour le traitement des eaux. Pour le traitement des boues, SEC et MAV incinèrent les boues déshydratées et SEG utilise le séchage thermique. L'usine Seine amont (SAM) utilise un traitement par boues activées pour les eaux et différentes filières pour les boues (séchage, incinération, pyrolyse). Enfin, la station Seine Morée (SEM), mise en route fin 2013, utilise la filtration membranaire pour le traitement des eaux.

1.1.2. Énergies importées pour l'ensemble des usines

L'approche macroscopique consiste à regarder, pour chaque type d'énergie importée (électricité, gaz naturel, fioul), les consommations à l'échelle du Siaap. Ce travail a été réalisé entre 2010 à 2014 en y associant les dépenses générées (figure 2).

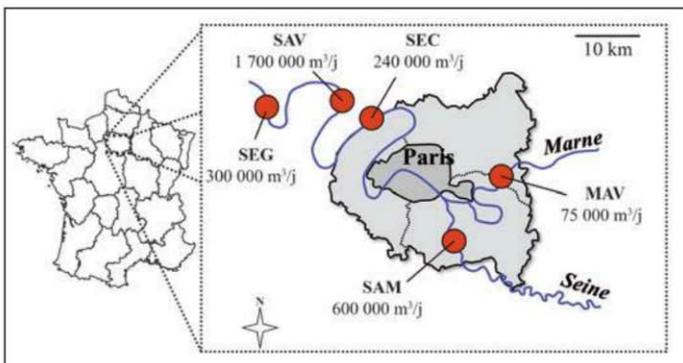
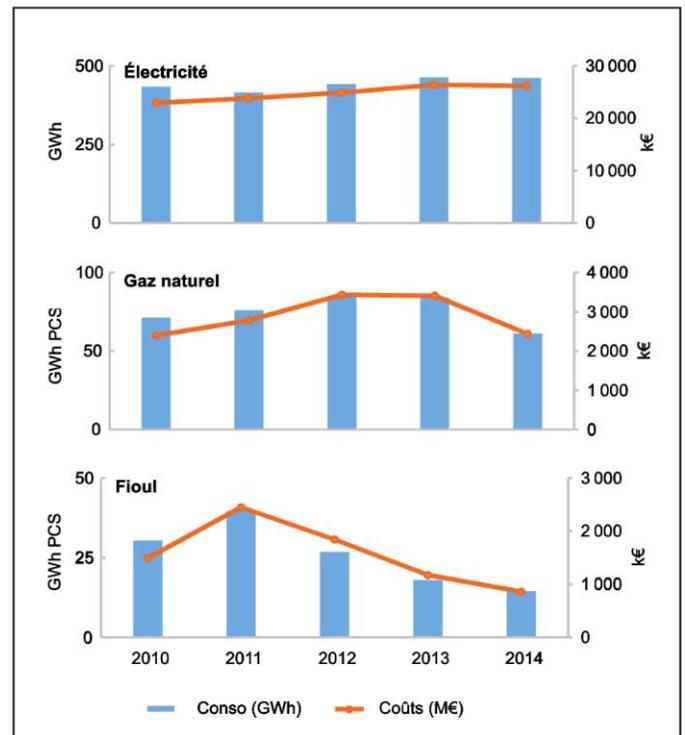


Figure 1. Stations d'épuration du Siaap



PCS : pouvoir calorifique supérieur.

Figure 2. Consommations d'énergies importées (électricité, gaz naturel et fioul) à l'échelle du Siaap de 2010 à 2014



Derrière cette fontaine, la plus grande entreprise publique d'eau en France

at.coules.mots

Eau de Paris - Service communication - Crédits photos : de la Chevasnerie / Target / Grunberg - Avril 2016
*Catégorie Distribution d'eau - Étude Inference Opérations - Viséo Conseil - mai à juillet 2015 - Plus d'infos sur : www.escd.fr.

L'INTÉRÊT GÉNÉRAL est au cœur des préoccupations d'**Eau de Paris**. Nous développons des **SAVOIR-FAIRE** reconnus dans la qualité de l'eau, la **PROTECTION DES RESSOURCES**, la gestion des **RÉSEAUX** ou encore la relation avec nos **USAGERS**. Nous investissons avec **RESPONSABILITÉ** pour les générations actuelles et futures et innovons pour la **VILLE DURABLE**. C'est dans cette recherche continue de la **PERFORMANCE** que nous, entreprise publique, mettons nos **EXPERTISES** à votre service.



**Qualité Sécurité
Environnement**

Une triple certification



www.eaudeparis.fr

tél. : 0974 506 507

Appel non surtaxé

Sans tranchée, la ville est plus belle !



Pose et réhabilitation de vos réseaux enterrés :
**Optez pour les techniques
sans tranchée !**

www.fstt.org
contact@fstt.org



Il est à noter que ces apports énergétiques ne représentent pas la totalité des consommations des usines. La quantité totale consommée comprend également l'énergie produite en interne (biogaz, turbines, panneaux photovoltaïques, etc.).

Afin de permettre une comparaison, les valeurs de consommation d'énergies autres que l'énergie électrique ont été converties en wattheure (Wh) en prenant en compte le pouvoir calorifique supérieur (Wh PCS). Pour le gaz naturel, le facteur de conversion utilisé est égal à 11,4543 kWh PCS/Nm³. Pour le fioul, la détermination du pouvoir calorifique inférieur (PCI) repose sur la relation 9,92 kWh PCI/l à laquelle a été appliqué le facteur de conversion : kWh PCS = 1,1 kWh PCI [JANCOVICI, 2010].

La consommation électrique est comprise entre 416 et 465 GWh/an entre 2010 et 2014. Le travail d'optimisation, mené depuis plusieurs années et ressenti en 2011 (416 GWh/an), a été masqué, les années suivantes, par la mise en route de nouvelles installations. Ainsi, le traitement complémentaire de l'azote (SAV, 2012), l'extension de l'usine Seine Grésillons (SEG, 2013) et la nouvelle usine de traitement membranaire (SEM, 2013), ouvrages essentiels pour l'atteinte des objectifs réglementaires, obligent le Siaap à s'approvisionner en électricité à hauteur de 465 GWh/an, une valeur stable ces deux dernières années. Les coûts liés à cette consommation suivent la même tendance et sont stables à hauteur de 26 M€. Entre 2010 et 2014, la consommation de gaz naturel sur l'ensemble des usines a été comprise entre 61 et 85 GWh PCS/an ; 2014 étant l'année de consommation la plus basse. Les fortes augmentations constatées en 2012 (traitement des boues de SAM) et 2013 (traitement des boues de SEG) ont été compensées, en 2014, par une optimisation significative des consommations sur SAV et SEG. Le suivi des coûts liés à l'achat de gaz naturel, compris entre 2,4 et 3,4 M€ de 2010 à 2014, permet de voir une augmentation significative du prix de cette ressource. En 2014, pour un même montant dépensé qu'en 2010 (2,4 M€), la quantité de gaz naturel importée a été de 15 % moindre.

Le fioul, principalement utilisé pour le fonctionnement des groupes électrogènes et l'incinération de SAV, SEC et SAM est en nette diminution ces

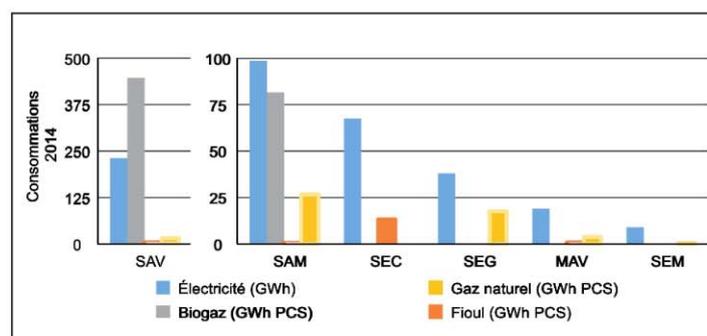
3 dernières années. Les quantités utilisées ont diminué de 40 GWh PCS en 2011 à 14 GWh PCS en 2014. Globalement, la baisse de consommation est liée aux efforts consentis par tous les sites, avec notamment une baisse de plus de 90 % sur SAV et SAM. La dépense liée à l'achat de fioul est de 857 k€, soit la valeur la moins élevée des 5 années écoulées.

Ainsi, il apparaît très nettement que parmi les énergies importées, la source électrique est largement majoritaire par rapport aux autres sources utilisées. Les achats de gaz naturel et de fioul sont, respectivement, de 5 à 8 fois et de 10 à 30 fois moins élevés que ceux d'électricité. De ce fait, si des priorités doivent être données dans la recherche de voies d'optimisation de la consommation et de la réduction des coûts, il est important de cibler en premier lieu la source électrique et de bien connaître les principaux consommateurs.

1.1.3. Part des énergies consommées par chacune des usines du Siaap

Afin de compléter la cartographie énergétique, pour l'année 2014, la quantité d'électricité importée par chacune des six usines a été reportée sur la figure 3. Cette représentation a également été complétée, pour chaque usine, par l'ensemble des autres sources d'énergie utilisées (biogaz, fioul, gaz naturel). La totalité de ces consommations a permis de procéder au traitement des effluents et des boues associées.

Dans le cas du biogaz, c'est la quantité consommée (hors torchère) qui a été prise en compte selon le facteur de conversion 6,42647 kWh PCI/m³ (kWh PCS = 1,1 kWh PCI) [JANCOVICI, 2010].



Consommation électrique exprimée en MWh ; consommation de gaz naturel, fioul, biogaz exprimée en MWh PCS ; SAV : Seine aval, 1 500 000 m³/j ; SAM : Seine amont, 600 000 m³/j ; SEC : Seine centre, 240 000 m³/j ; SEG : Seine Grésillons, 300 000 m³/j ; MAV : Marne aval, 75 000 m³/j ; SEM : Seine Morée, 15 000 m³/j.

Figure 3. Consommations d'énergie d'origines différentes (électrique, gaz naturel, fioul, biogaz) par usine d'épuration en 2014

La quantité d'électricité importée la plus élevée est sur le site SAV avec près de 230 GWh durant l'année 2014. Les quantités importées sur les autres usines sont respectivement de 98 ; 67 ; 38 ; 19 et 8,9 GWh pour SAM, SEC, SEG, MAV et SEM. Cette distribution de l'importation de l'énergie électrique est similaire à la distribution des débits traités par les usines. SAV a traité la majorité des eaux du Siaap (65 % des effluents), SAM près de 20 %, SEC de l'ordre de 9 % ; SEG, MAV et SEM ont traité respectivement 4, 2 et 0,3 % des eaux. Cette similarité des distributions montre que l'énergie électrique importée est principalement utilisée dans les filières de traitement des eaux sur toutes les usines. Les autres sources d'énergie alimentent principalement la filière de traitement des boues. Ainsi, les sites SAV et SAM utilisent l'énergie produite par le biogaz (issu des procédés de digestion). Cette source représente 447 GWh PCS pour SAV et 81 GWh PCS pour SAM. Le fioul est majoritairement utilisé sur le site SEC (12 GWh PCS) pour permettre le fonctionnement de l'atelier d'incinération. Enfin, le gaz naturel est consommé de manière prépondérante sur SAM (26,6 GWh PCS) et SEG (17,6 GWh PCS) pour le fonctionnement des filières de traitement thermique des boues.

Au regard de la quantité totale d'énergie utilisée pour le traitement complet des effluents (boues incluses), la part d'électricité importée représente respective-

ment 33 %, 48 %, 84 %, 68 %, 82 % et 94 % pour SAV, SAM, SEC, SEG, MAV et SEM. Sur les sites SAV et SAM, la faible part d'électricité importée (inférieure à 50 %) est principalement liée à l'utilisation, au sein des procédés de traitement, du biogaz produit par l'étape de digestion. Cela est le cas de la majorité des stations d'épuration utilisant le biogaz produit sur place [WETT *et al.*, 2007]. Cette source permet d'obtenir 65 % de l'énergie nécessaire au fonctionnement des installations du site SAV et permet de mettre en exergue le travail mené depuis plusieurs années pour optimiser la consommation énergétique et limiter l'achat d'énergies non renouvelables.

1.2. À l'échelle du site Seine aval

Après les constats effectués grâce à l'approche macroscopique, il est nécessaire de changer d'échelle d'observation afin de pouvoir orienter les actions d'optimisation. Ainsi, le niveau d'observation qui suit est celui du site. Nous nous sommes focalisés sur la description du site SAV qui est l'installation nécessitant le plus d'énergie, cela du fait des débits traités (578 Mm³ en 2014). De plus, sur ce site, la présence de comptages au niveau des différents ateliers permet d'avoir une vision claire des différents consommateurs.

Afin de clarifier la description, une clé de lecture a été définie pour décrire les différentes étapes de traitement. L'usine a été découpée en filières de traitement et chaque filière de traitement est composée

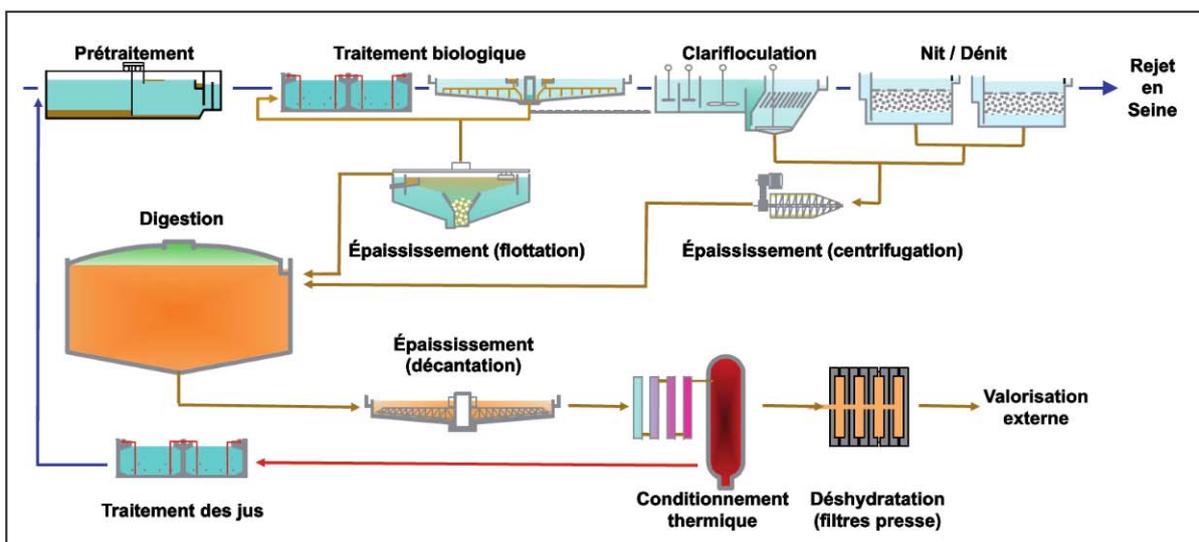


Figure 4. Schéma simplifié des étapes de traitement des eaux et des boues de la station Seine aval

d'un ou plusieurs ateliers. Enfin, les ateliers comportent plusieurs équipements.

1.2.1. Description des installations

En fonctionnement normal, l'usine SAV effectue un traitement complet du carbone, de l'azote et du phosphore. Les seuils de rejets sont imposés par un arrêté préfectoral reprenant, entre autres seuils, ceux imposés par la DERU (rendement d'abattement annuel de 70 % en azote global et 80 % en phosphore total). Les étapes de traitement classiques sont représentées de manière simplifiée sur la figure 4.

Le traitement des eaux est découpé en quatre filières principales, chacune étant composée de sous-ensembles (ateliers). Ainsi, après un prétraitement (dégrillage, dessablage et déshuilage), les effluents subissent un traitement biologique (décanteur primaire, bassins d'aération et clarificateurs secondaires). Cette filière de traitement permet l'abattement de la matière organique et d'une partie des matières en suspensions. À la suite de cela, une déphosphatation physico-chimique est réalisée sur la filière de clarification. Enfin, un traitement complet de l'azote est effectué sur la filière de nitrification – dénitrification (Nit/Dénit) avant le rejet en Seine.

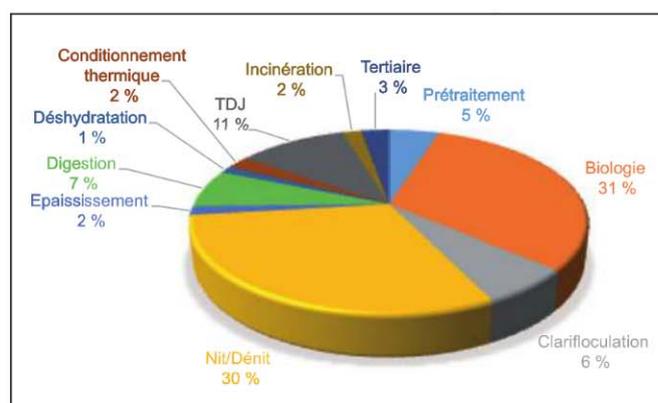
Le traitement des boues comporte six ateliers différents. Le premier atelier est l'épaississement, en sortie des filières biologique et nitrification/dénitrification, reposant sur différentes technologies (flottation, centrifugation). Une fois épaissies, les boues sont introduites dans des digesteurs permettant la production de biogaz. En sortie de digestion, une nouvelle étape d'épaississement par décantation est réalisée avant le conditionnement thermique des boues (20 bars, 200 °C). Les boues sont ensuite déshydratées par filtres presses avant leur évacuation. Les jus du conditionnement thermique et de la déshydratation subissent un traitement biologique (bioréacteur à membranaires) avant leur retour en tête de station. Une étape d'incinération des gaz odorants et des graisses complète la filière.

Pour permettre une analyse énergétique simplifiée et claire, l'ensemble des étapes d'épaississement (avant et après la digestion) a été regroupé. Il est à noter que le découpage actuellement en place ne permet pas d'isoler tous les consommateurs. Ainsi, les

consommations électriques liées à la désodorisation, par exemple, sont englobées dans les ateliers qui en possèdent.

1.2.2. Consommations électriques par atelier

En complément des 230 GWh/an d'électricité achetées par le site, des turbines à gaz (TAG) permettent de produire de l'énergie électrique à partir du biogaz. Cette production supplémentaire de 38,5 GWh/an a été prise en compte dans la décomposition des consommations (figure 5).



Nit/Dénit : filière de nitrification et dénitrification ; TDJ : atelier de traitement des jus issus du conditionnement thermique et de la déshydratation.

Figure 5. Distribution des consommations électriques du site SAV en 2014

Sur le site SAV, plus de 70 % de la consommation électrique est liée au traitement des eaux. En y incluant le traitement des jus (eaux issues du conditionnement thermique des boues et de l'atelier de déshydratation), la part de la consommation électrique dépasse alors les 80 %. Les différents ateliers nécessaires au traitement des boues consomment, quant à eux, de l'ordre de 1 à 7 % de l'énergie électrique du site ; la principale consommation (7 %) étant liée au fonctionnement des digesteurs (compresseurs de brassage).

De manière générale, les trois étapes les plus énergivores mettent en œuvre un procédé de traitement biologique (filière biologique : boue activée, filière nit/dénit : biofiltres, atelier de traitement des jus : bioréacteurs à membranes) ; les filières de traitement biologique et nit/dénit consommant 61 % de l'électricité du site.

1.2.3. Consommations des autres énergies

Plus de la moitié de l'énergie consommée sur le site SAV (66 %) provient d'autres sources que l'électricité

Les projets en cours

- L'élaboration de protocoles de réception des techniques alternatives (noues, bouches d'injection, chaussées réservoirs...)
 - Création de fiches d'exécution et d'outils de contrôle (perméanoue, planche d'essai...).
 - Réalisation d'essais grandeur nature permettant de s'assurer de l'adéquation du test au besoin du chantier.
- Projet de recherche sur l'impact de l'infiltration des eaux pluviales par rapport aux micropolluants présents dans les eaux de ruissellement
 - Détermination de l'impact qualitatif de l'infiltration des eaux de ruissellement de voirie par les techniques alternatives (noues et chaussées réservoirs) de micro-bassins versants (< 1ha) sur la ressource en eau souterraine.
 - Réalisation de mesures et analyses sur sites.
- Projet d'instrumentation de noues d'infiltration pour étudier leur fonctionnement réel et comparer les résultats aux modèles de dimensionnement

Pour bénéficier des conclusions de ces projets, **rejoignez nous !**
(adhésion sur lettre de motivation et cotisation de 350 €/an (2016))

L'ADOPTA, c'est également de la formation :

- Organisation de sessions de formations à la demande d'1/2 journée jusqu'à 3 jours, selon les attentes du demandeur.
- Licence professionnelle EPADE (Eaux Pluviales et Aménagement Durable de l'Espace)

Formation BAC+3 dispensée à l'Université d'Artois (Lens - 62) visant à former des techniciens supérieurs ou assistants ingénieurs capables de répondre à la problématique de la gestion durable des eaux pluviales dans le cadre d'un aménagement durable urbain et rural, nouveau ou existant.

Contact : Adlane SAYEDE
(Université d'Artois)
03.21.79.17.71
adlane.sayede@univ-artois.fr



L'ADOPTA sera présente
au salon Aquacity !

Un village «ADOPTA» avec des exposants
et des conférences sur la thématique
des eaux pluviales.



Vérification de la porosité
d'une grave non traitée



Noue d'infiltration

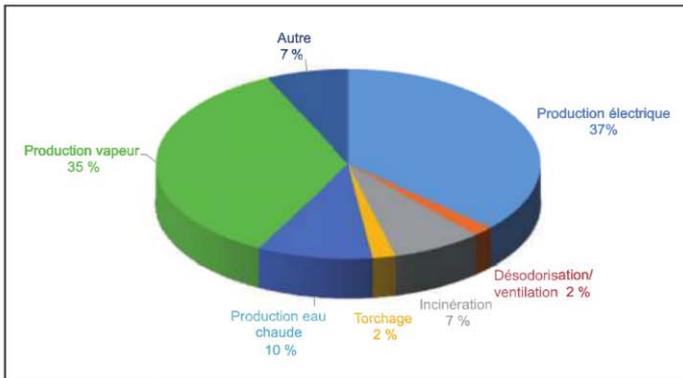


Figure 6. Distribution des consommations énergétiques hors électricité (biogaz, gaz naturel et fioul) du site SAV par type de besoin en 2014

(biogaz, gaz naturel, fioul). La figure 6 présente les différentes utilisations de ces sources d'énergie (hors électricité).

La quantité d'énergie totale du site (hors électricité) dépasse 471 GWh PCS/an ; la part d'énergie consommée étant de 462 GWh PCS/an (dont 447 GWh PCS apportés par le biogaz).

Plus d'un tiers est utilisé pour la production d'électricité par l'intermédiaire des TAG. Un autre tiers (35 %) permet de produire de la vapeur par l'intermédiaire de chaudières afin d'alimenter le conditionnement thermique des boues. La production d'eau chaude permettant le chauffage des locaux consomme de l'ordre de 10 %. L'incinération des gaz de cuisson et des graisses consomme près de 7 % de l'énergie du site. La désodorisation, qui nécessite 2 % de l'énergie du site, ne concerne que le traitement thermique des odeurs d'une partie des installations (atelier de traitement des jus issus du conditionnement thermique et de la déshydratation : TDJ). Enfin, il est important de noter que seulement 2 % du biogaz produit sont envoyés sur les torchères.

1.3. À l'échelle des filières

Une fois la cartographie à l'échelle du site effectuée, il est nécessaire de resserrer le maillage afin de cibler les ateliers et équipements les plus consommateurs et déterminer les leviers d'action permettant une optimisation adaptée et efficace. Le troisième niveau d'observation est donc celui de la filière, composé d'un ou de plusieurs ateliers de traitement. Ainsi, en apportant ce niveau d'observation, il apparaît que sur les deux filières les plus consommatrices d'électricité

(Nit/dénit et biologie), la consommation liée à la production d'air apparaît comme significative. Celle-ci représente de l'ordre de 56 % de la consommation totale pour la filière biologique et 45 % pour la nit/dénit. La part importante des consommations liées à la production d'air a également été signalée pour d'autres usines du Siaap [ROCHER *et al.*, 2012] et dans le monde [RIEGER *et al.*, 2012 ; INGILSDEN, 2002].

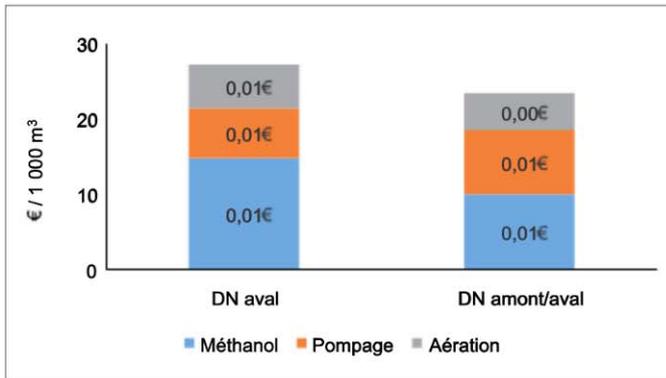
La seconde source de consommation semble être liée au relevage (pompage) qui représenterait de l'ordre de 40 % de la consommation de la filière biologique. Cependant, il reste difficile de cibler uniquement la consommation des équipements liés au pompage du fait de l'absence de comptabilisation spécifique sur l'ensemble des consommateurs.

2. Les niveaux d'intervention

Par l'intermédiaire du comptage, les équipements assurant l'aération (et le pompage) ont été ciblés comme principaux consommateurs d'énergie importée (électrique) pour le traitement des eaux usées. Partant de ce constat, l'objectif est maintenant de présenter une approche méthodologique, applicable aux stations d'épuration, permettant de déterminer des axes d'optimisation adaptés et éprouvés. Cette détermination peut être effectuée à différents niveaux et de manière conjointe. En premier lieu, il est important de regarder au niveau de la filière de traitement afin d'avoir une vision plus large que l'approche uniquement énergétique. Puis, deux autres niveaux seront à considérer afin de définir précisément les leviers d'action : les niveaux ateliers et équipements. Pour chacun de ces niveaux, un exemple de mise en œuvre au Siaap va permettre d'illustrer l'application de la méthodologie d'optimisation.

2.1. Niveau filière

Une comparaison des coûts liés à l'utilisation de différentes filières de traitement est décrite de manière complète par ROCHER et coll. [2012]. L'objectif de ce travail était de montrer les variations de coût (et donc de consommation) en fonction de deux modes de fonctionnement différents de la station SEC (figure 7).



DN aval : la dénitrification est effectuée après l'étape de nitrification avec ajout de substrat carboné (méthanol) ; DN amont/aval : une partie des effluents nitrifiés est renvoyée en tête de l'étape de traitement de la matière organique, seul un affinage est effectué en dénitrification aval à l'aide de substrat carboné (méthanol).

Figure 7. Comparaison des coûts d'exploitation (électricité + réactif) liés à deux filières de traitement différentes : dénitrification aval et dénitrification amont/aval sur la station Seine centre [Rocher et al., 2012]

En dénitrification aval (DN aval), après un traitement complet du carbone (aération), les effluents subissent une étape de nitrification (aération) et une étape de dénitrification (substrat carboné exogène, méthanol). Dans ce cas, seuls trois groupes de pompage sont utilisés pour alimenter chaque étape de traitement (carbone, nitrification, dénitrification). Les coûts liés au pompage sont alors de 6,60 €/1 000 m³ d'eau traités et les coûts liés à l'aération sont de 5,80 €/1 000 m³. Le coût du méthanol s'élève, dans cette configuration, à 14,80 €/1 000 m³. En dénitrification amont/aval (DN amont/aval), une partie des effluents ayant subi la nitrification est renvoyée en tête du traitement du carbone (recirculation). En se référant à ce mode de fonctionnement, les coûts liés à l'aération sont moindres, 4,90 €/1 000 m³, étant donné que le traitement du carbone nécessite moins

d'oxygène. Par contre, les coûts liés au pompage s'élèvent à 8,50 €/1 000 m³ du fait du recours à un groupe de pompage supplémentaire (recirculation) et des volumes d'eau plus importants à pomper (recirculation hydraulique de 60 à 80 %). Le coût du méthanol, en dénitrification, dans ce mode est de 10 €/1 000 m³, car il ne s'agit que d'un affinage et non plus d'un traitement de la totalité des nitrates. Ainsi, au regard des seuls coûts de consommation énergétique, le mode de fonctionnement en dénitrification aval semble le plus avantageux. Dans ce mode, les coûts liés au pompage et à l'aération s'élèvent à 12,40 €/1 000 m³ alors qu'ils sont de 13,40 €/1 000 m³ en fonctionnant dans l'autre mode. Or, en regardant l'ensemble de la filière, il apparaît clairement que le mode de fonctionnement en dénitrification amont/aval présente des avantages avec un coût de fonctionnement de l'ordre de 14 % inférieur.

L'optimisation des coûts d'exploitation est donc une approche intégrée qui nécessite de prendre en compte une filière de traitement de manière globale en y incluant la totalité des intrants, à savoir les fluides (eau, gaz, électricité) et l'ensemble des réactifs. Suite à cela, l'approche atelier doit permettre d'optimiser la consommation énergétique des différentes étapes qui composent une filière.

2.2. Niveau atelier

En se référant à la cartographie énergétique effectuée précédemment, le processus de nitrification, englobé dans la filière de traitement de l'azote, apparaît comme un atelier de traitement consommateur d'énergie, notamment liée à la production d'air. Un travail de diminution de l'aération a été mené sur

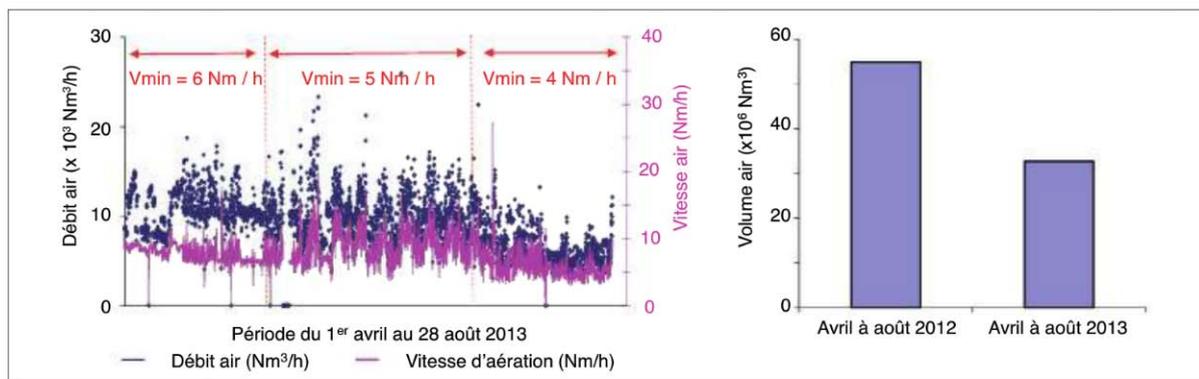


Figure 8. Évolution des débits d'aération, des vitesses de passage en air et de la consigne de vitesse minimale (V_{min}) de l'étage nitrifiant de l'usine Seine Grésillons en 2013 (gauche) et comparaison de la quantité totale d'air injectée sur la même période à un an d'intervalle (droite)

l'étape de nitrification du site SEG et peut être pris en exemple pour illustrer l'approche atelier. À la suite de l'observation des débits d'air injectés dans les biofiltres (Biolest, Stereau), des modifications de la formule de régulation ont été effectuées (figure 8). Le paramètre de régulation pris en compte a été la vitesse minimale de passage de l'air au sein du milieu filtrant. Initialement à 8 m/h, cette vitesse a été réduite progressivement à 6, 5 puis 4 m/h (pointillés rouges sur la figure 8). Les débits d'air injectés ont sensiblement baissé durant cette période sans que la qualité des effluents au rejet de l'étape de nitrification ait été altérée. Ces modifications n'ont pas eu d'effet, non plus, sur le bon fonctionnement des biofiltres (zone d'anaérobie, qualité des lavages, etc.). La quantité totale d'air injectée en 2013 a diminué de 40 % par rapport à la quantité sur la même période l'année précédente. Afin de s'affranchir des biais liés à la qualité des effluents traités, la consommation énergétique correspondante, calculée sur la base de 0,033 kWh/Nm³ d'air produit, a été rapportée à la quantité d'azote éliminée. Dans ce cas, une diminution significative de près de 0,7 MWh par tonne d'azote éliminée entre les deux périodes a été constatée. Les formules de régulation de l'aération contiennent de nombreux paramètres qui peuvent être affinés au fur et à mesure du fonctionnement des installations. Les modifications doivent prendre en compte les contraintes liées à l'activité biologique, mais également toutes les contraintes spécifiques du site étudié.

2.3. Niveau équipement

Entre autres consommateurs, la production d'air apparaît comme utilisant les équipements centraux dans

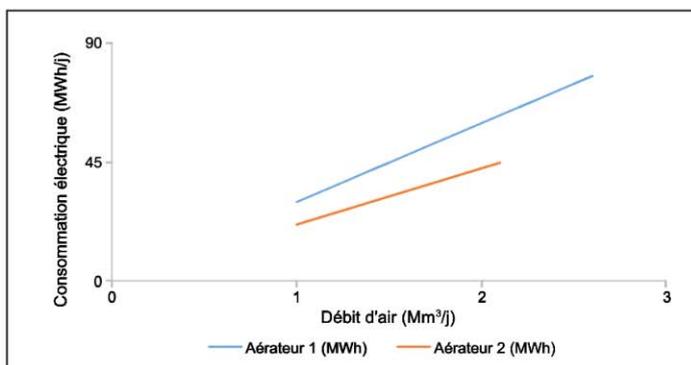


Figure 9. Relation entre la consommation énergétique [MWh] et le débit d'air produit par les aérateurs de l'usine Seine amont

la consommation énergétique. Le choix d'équiper les compresseurs de production d'air de comptage semble donc pertinent. À titre d'exemple, les deux aérateurs de l'usine SAM ont été équipés de comptage électrique et les valeurs obtenues ont été comparées aux débits d'air produit par chaque équipement (figure 9).

Les deux aérateurs du même procédé ne consomment pas la même quantité d'énergie électrique pour leur production d'air. L'aérateur 2 nécessite de 9 à 18 MWh de moins pour produire le même débit d'air. Cette différence, liée à la configuration du réseau et au fonctionnement des machines, aurait pu provoquer, à l'échelle de l'année, une surconsommation de 3 à 6 GWh. Grâce à la mise en place du comptage et à ce constat, des actions ont pu être menées afin de faire une dépense énergétique au plus juste des besoins.

Le troisième niveau pertinent d'intervention dans le cadre de l'optimisation de la consommation énergétique est donc au niveau de l'équipement. Afin de déterminer les leviers d'action, il est nécessaire de définir les équipements les plus énergivores et de les doter de comptage de consommation électrique. Puis, en fonction des constats de consommation, il est possible de définir les leviers d'action en tenant compte des contraintes spécifiques de chaque équipement.

2.4. Méthodologie de suivi des actions d'optimisation

Quel que soit le niveau d'intervention, l'optimisation de la dépense énergétique nécessite donc une mesure des consommations. Une fois ce plan de comptage élaboré et mis en œuvre, le choix d'indicateurs pertinents est alors nécessaire afin de pouvoir connaître, suivre et comparer les consommations. Dans cet objectif, il est essentiel de définir des indicateurs dont le périmètre est parfaitement connu afin de minimiser les erreurs, notamment lors des comparaisons. Outre ce suivi des performances, les actions d'optimisation doivent également être regardées de manière intégrée vis-à-vis de paramètres clés, notamment dans le cas de l'azote, cela afin de ne pas déplacer le problème et générer des émissions polluantes plus importantes.

2.4.1. Choix des indicateurs

- À l'échelle globale (ensemble des usines)

Il est utile, pour les gestionnaires de stations d'épuration, de connaître la consommation énergétique de l'en-



Respirez, c'est un **DiP!** Relevage d'effluent en ligne **D**irect, **I**nnovant et **P**ropre



Eco-Durable



IE3 - IP67



T4 - Eff ++



DIPCUT®



OMNI
DiP®



semble des filières de traitement. La plupart des études sur la consommation énergétique des stations d'épuration sont focalisées sur la consommation électrique [DEVI *et al.*, 2007 ; MERLIN et LISSLO, 2010]. Cependant, il n'apparaît pas judicieux d'utiliser l'indicateur de MWh électrique consommé par mètre cube d'eau traité si le traitement complet de l'eau (boues incluses) nécessite d'autres sources d'énergie. Dans le cas du Siaap par exemple, pour traiter 1 m³ d'eau (et les boues associées), toutes les usines n'utilisent pas les mêmes sources d'énergie. Un indicateur de suivi du fonctionnement global des usines du Siaap peut prendre la forme du MWh énergie (toutes énergies confondues) par mètre cube d'eau traité (tableau I).

À l'exception de l'usine SEM (phase de mise en route sur l'année 2014), le ratio énergétique est globalement du même ordre de grandeur pour l'ensemble des usines du Siaap. Il est compris entre 1,14 et 1,51 kWh PCS/m³ d'eau traité. Ces valeurs sont inférieures au ratio énergétique de 1,69 kWh/m³ déterminé sur une usine de traitement des eaux usées californienne [STOKES et HORVARTH, 2010], mais restent plus élevées que le ratio énergétique de 1,07 kWh/m³ déterminé pour une petite station d'épuration [SINGH *et al.*, 2012].

• À l'échelle du procédé

La détermination de ratios caractéristiques pour suivre le fonctionnement des principaux procédés

d'épuration est également un atout dans un objectif de suivi des actions d'optimisation. En se référant à ce qui précède, un des indicateurs pertinents à l'échelle du procédé est la consommation électrique par quantité d'azote éliminé sur l'étape de nitrification. Il est important que la consommation électrique ne prenne en compte que la production d'air afin de permettre une comparaison sans inclure de biais dans l'interprétation. Cela passe donc par la mise en place de comptage spécifique au niveau des équipements concernés. Ainsi, sur le site SAV, le suivi attentif de la consommation énergétique de la nitrification a permis de maintenir la consommation dans une gamme de 2,2-2,4 MWh/tonne de N-NH₄⁺ éliminé. Dans le même temps, sur le site SEG, cette consommation a été diminuée de 4,4 à 3,7 MWh/tonne de N-NH₄⁺ éliminé. Ce constat montre que l'amélioration de la boucle de régulation constitue un levier efficace pour poursuivre la diminution de la consommation énergétique sur les unités de nitrification.

2.4.2. Approche intégrée

L'optimisation énergétique nécessite une approche intégrée. En se référant à des référentiels plus globaux que la consommation électrique seule, tels que les émissions de gaz à effet de serre, l'application de leviers d'optimisation peut générer un déplacement des équilibres. Dans le cas de l'azote, par exemple, paramètre clé dans les procédés d'épuration déployés

2014	SAV	SAM	SEC	SEG	MAV	SEM
Ratio énergétique (kWh PCS/m ³)	1,20	1,14	1,00	1,51	1,30	3,64

Tableau I. Ratio de consommation énergétique (électrique, gaz naturel, fioul, biogaz) nécessaire pour traiter un mètre cube d'eau pour les différentes usines du Siaap en 2014



Figure 10. Cloche de prélèvement des émissions gazeuses au-dessus d'un biofiltre nitrifiant de la station SAV (gauche) et laboratoire de terrain permettant l'analyse du protoxyde d'azote (droite)

au Siaap et qui nécessite l'injection de grandes quantités d'air (étape de nitrification), il existe de nombreuses espèces intermédiaires. Une de ces espèces est le protoxyde d'azote (N₂O) qui possède un potentiel de réchauffement climatique de 289 sur 20 ans (potentiel de réchauffement climatique du CO₂ égal à 1) [SOLOMON *et al.*, 2007]. Dans le cadre du programme de recherche Mocopée (www.mocopee.com), l'Institut de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture (Irstea), centre d'Antony (Haut-de-Seine, 92), a mesuré les émissions de cette espèce sur les biofiltres nitrifiants de la station SAV (figure 10).

D'une part, ces travaux mettent en évidence des émissions significatives de protoxyde d'azote lors des étapes de traitement de l'azote [BOLLON *et al.*, 2016]. D'autre part, en ce qui concerne la nitrification, une relation forte apparaît entre les débits d'air injectés et les émissions de protoxyde d'azote ; les facteurs d'émission étant inversement proportionnels au débit d'air [BOLLON *et al.*, 2016].

Ainsi, dans ce cas, la méthodologie d'optimisation de la consommation électrique doit se faire au regard de l'ensemble des contraintes, dans l'objectif de réduire les coûts énergétiques et financiers, sans toutefois avoir un impact négatif sur le plan global.

Conclusions

Dans le cadre de l'optimisation des consommations énergétiques, le Siaap a mis en place une démarche en deux étapes. Dans un premier temps, une cartographie des consommations énergétiques a été effectuée à différentes échelles, permettant de cibler les principaux consommateurs. La consommation électrique a été identifiée comme la principale source

d'énergie achetée par le Siaap (465 GWh/an ; 26 M€/an), le site Seine aval étant le premier consommateur. En se focalisant sur les dépenses électriques de ce site, ce sont les procédés de traitement biologique qui ont été mis au premier rang des consommateurs, représentant de 11 à 31 % des consommations électriques. Enfin, l'observation plus fine a permis de pointer la production d'air comme principale source de consommation électrique.

Dans un second temps, en lien avec les constats de cette cartographie, des exemples de leviers d'action ont été décrits à différentes échelles, permettant une optimisation des coûts d'exploitation et de la consommation d'énergie. Ainsi, la prise en compte de la filière dans son ensemble apparaît comme indispensable afin d'avoir une vision globale des coûts d'exploitation et d'orienter les modes de fonctionnement de manière raisonnée. Les actions doivent également être menées au niveau des ateliers, en se focalisant sur les traitements les plus énergivores en priorité, pour s'étendre sur les autres par la suite. Enfin, un suivi fin au niveau des équipements (les plus importants) permet de cibler les sources de surconsommation pour y apporter des solutions de réduction adaptées. Le suivi des actions nécessite l'élaboration d'indicateurs pertinents dont le contenu doit être parfaitement maîtrisé afin de ne pas induire des erreurs d'interprétation. Cela nécessite également de porter un regard sur l'ensemble du cycle des espèces impactées, notamment pour connaître et maîtriser les espèces intermédiaires.

Remerciements

Les auteurs remercient vivement S. Pommier et S. Amossé pour leur participation à ce travail.

Bibliographie

BOLLON J., FILALI A., FAYOLLE Y., GUERIN S., ROCHER V., GILLOT S. (2016) : « N₂O emission from full-scale nitrifying biofilters ». *Water Research* [Soumis].

CHUDOBA P., SARDET C. PALKO G. GUIBELIN E. (2011) : « Main factors influencing anaerobic digestion of sludge and energy efficiency at several large WWTP in central Europe ». *Journal of Residuals Science and Technology* ; 8(2) : 89-95.

DEVI R., DAHIYA R.P., KUMAR A., SINGH V. (2007) : « Meeting energy requirement of wastewater treatment in rural sector ». *Energy Policy* ; 35 : 3891-7.

FRIEDRICH E., PILLAY S., BUCKLEY C.A. (2009) : « Environmental life cycle assessment for water treatment processes - A South African case study of an urban water cycle ». *Water S.A.* [en ligne] ; 35 : 73-84.

INGILDSEN P. (2002) : *Realising full-scale control in wastewater treatment systems using in situ nutrient sensors* [thèse]. University of Lund, Suède.

JANCOVICI J.M. (2010) : *Bilan Carbone Entreprises - Collectivités - Territoires*, Chapitre 2 : Facteurs associés à la consommation directe d'énergie - version 6.1. Fascicule Ademe, 69 p.

MERLIN G., LISSOLO T. (2010) : « Energy and exergy analysis to evaluate sustainability of small wastewater treatment plants: application to a constructed wetland and a sequencing batch reactor ». *Journal of Water Resour Protection* ; 2 : 997-1009.

MÜLLER E.A., SCHMID F., KOBEL B. (2006). « Activity "Energy in WWTPs" – 10 years of experience in Switzerland [en allemand] ». *Korrespondenz Abwasser* ; 53 : 793-7.

RIEGER L., TAKACS I., SIEGRIST H. (2012) : « Improving removal while reducing energy use at tree swiss WWTP using advanced control ». *Water Environmental Research* ; 84(2) : 170-88.

ROCHER V., PAFFONI C., GONCALVES A., AZIMI S., PAUSS A. (2012) : « Municipal wastewater treatment by

biofiltration: comparisons of various treatment layouts. Part 2 : assessment of the operating costs in optimal conditions ». *Water Science and Technology* ; 65 : 1713-9.

SINGH P., CARLIELL-MARQUET C., KANSAL A. (2012) : « Energy pattern analysis of a wastewater treatment plant ». *Applied Water Science* ; 2(40) : 15 p.

SOLOMON S., QIN D., MANNING M., ALLEY R.B., BERNTSEN T., BINDOFF N.L., et al. (2007) : « Résumé technique ». In : *Changements climatiques 2007 : Les éléments scientifiques. Contribution du groupe de travail I au 4^e Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur les changements climatiques* [Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, États-Unis.

STOKES R.J., HORVATH A. (2010) : « Supply chain environmental effects of wastewater utilities ». *Environmental Research Letter* ; 5 : 7 p.

WETT B., BUCHAUER K., FIMML C. (2007) : « Energy self-sufficiency as a feasible concept for wastewater treatment systems ». *Asian Water*, 22-25.

Résumé

S. AZIMI, V. ROCHER

Stratégie d'optimisation énergétique au sein d'une station d'épuration. Cas du Siaap

Dans le contexte de la transition énergétique, les grands industriels ont mis au cœur de leur préoccupation les problématiques liées à la dépense énergétique. Le Syndicat interdépartemental pour l'assainissement de l'agglomération parisienne (Siaap), industriel majeur du traitement de l'eau de la région parisienne, a mis en place depuis plusieurs années des actions de comptage et d'optimisation de ses consommations énergétiques afin d'en réduire les coûts et les impacts environnementaux associés. Grâce au comptage installé, une cartographie précise des consommations énergétiques a été réalisée à différentes échelles (macroscopique, site, atelier). L'énergie électrique est apparue comme étant la première source d'énergie impor-

tée par les stations d'épuration, et les procédés de traitement biologique (aération) sont au premier rang des consommateurs. Partant de ce constat, la méthodologie de recherche des leviers d'optimisation des consommations a permis de dégager des solutions adaptées aux usines d'épuration. D'une part, l'optimisation des coûts d'exploitation doit obligatoirement considérer la filière complète de traitement et englober l'ensemble des dépenses. D'autre part, l'amélioration de la boucle de régulation de l'injection d'air constitue un levier efficace pour la diminution de la consommation énergétique. Et, enfin, le suivi du comptage électrique des principaux équipements est indispensable afin de contenir les surconsommations.

Abstract

S. AZIMI, V. ROCHER

Energy optimization of large municipal waste water treatment plant. Case of the Siaap

In the context of the energy transition, large municipal WWTP came to understand the importance of issues related to energy expenditure. One of these major industrial in the Paris conurbation, the Syndicat interdépartemental pour l'assainissement de l'agglomération parisienne (Siaap), has set up for several years actions allowing the optimization of its energy consumption in order to reduce costs but also the associated environmental impacts. Through the installation of energy (electricity, gas, fuel, biogas) meters for sectorial recording, an accurate mapping of energy consumption has been carried out at different scale (macroscopic, site, process). Electrical energy has emerged as the

leading source of imported energy in WWTP while biological treatment processes (air blowing) are at the forefront of consumers. On this basis, the optimization paths to reduce energy consumption were described, requiring action at three levels. First, the optimization of operating costs must consider the complete treatment process, covering all expenses (regent, etc.) to make best operating choices. Second, within processes including air blowing, improvement of the air injection flow rate constitutes an effective means for the reduction of energy consumption. Last, the monitoring of electric counting of main equipment is essential in order to contain excessive consumption.

Contrôler en temps réel le remplissage des bennes à déchets

La gestion et le remplissage des bennes à déchets sont des postes de dépenses où d'importantes économies peuvent être réalisées. En effet la disposition des zones de remplissage des bennes à déchets (boues, déchets d'usinage, gravats, déchets agro-alimentaires) ne permet pas, au sein des sites industriels ou des stations de traitement des eaux, de mesurer en temps réel la masse du chargement contenu dans les bennes.

De plus, même si certains sites possèdent un moyen de pesage, celui-ci est situé généralement à proximité de la sortie et n'indique la masse du chargement qu'au moment du départ, n'offrant pas la possibilité d'optimiser le remplissage.

La maîtrise du remplissage peut être atteinte en utilisant des systèmes de pesage adaptés. Les systèmes de pesage (**PBA400** ou **PSR300**) mis au point par la société AS technologies, ont permis à de grands sites industriels et environnementaux d'automatiser et d'optimiser le remplissage de leurs bennes.

Les responsables environnement des entreprises industrielles souhaitent pouvoir quantifier la masse des déchets confiés à l'entreprise effectuant l'enlèvement de ces déchets (les versions de nos systèmes

de pesage équipés de la liaison M2M apportent le traitement de ces données en temps réel).

Les objectifs recherchés sont :

- **automatiser** le cycle de remplissage des bennes
- **optimiser** le chargement
- **rationaliser** le coût du transport par la réduction du nombre de rotations
- **améliorer** le bilan environnemental (RSE)
- **préserver** le bon état du matériel
- **assurer** la sécurité des opérateurs
- **mettre** à la disposition des **gestionnaires des déchets**, via une liaison **M2M**, des informations sur le remplissage des bennes

En réponse à cette problématique et à la demande de ses clients, la société AS technologies, spécialiste de l'ingénierie de la mesure développe depuis près de quinze ans, des solutions innovantes de pesage de bennes. Le **PBA400** et le **PSR300**, systèmes de pesage AS technologies, autorisent désormais la réalisation de ces objectifs avec un retour rapide sur investissement.

La **location financière** offre également un rendement immédiat : le client préserve sa trésorerie pour son cœur de métier, la charge est répartie sur la durée du contrat et la TVA est lissée sur cette même durée. Il n'y a pas de gestion des immobilisations.



Le PBA400 se décline maintenant en quatre versions :

- PBA400** : version de base
- PBA400A** : version ATEX
- PBA400M** : version en métrologie légale
- PBA400S** : version M2M SIGFOX avec application WEB API

Des grands noms de l'industrie et de l'environnement tels que GTM Environnement, INEOS, Lyonnaise des Eaux, SIAAP, SNCF, SUEZ, Veolia ainsi que de grandes villes ou Métropoles comme Le Havre, Lyon, Marseille,... ont déjà fait confiance à AS technologies.

L'entreprise a également livré plusieurs PBA400 en Suisse et en Belgique et elle poursuit son développement à l'international en nouant un partenariat avec la société Heikki Tallgren basée en Finlande avec pour mission la gestion des ventes sur le nord de l'Europe.

Contact : Alain SANIEZ
 AS technologies
 Tél.: 04 66 81 87 50
 Email : asaniez@as-technologies.fr
www.as-technologies.fr



PBA400

Pesage Benne Amovible

**Système de pesage in situ pour
l'automatisation et l'optimisation
du remplissage des bennes amovibles en temps réel**

(conforme NF R17-108 août 2001)



Pourquoi choisir notre solution de pesage de bennes amovibles ?

Le PBA400 permet :

- la **réduction du coût du transport** par l'optimisation de la masse transportée (pas de sous-charge)
- la circulation des véhicules **sans surcharge**
- l'**automatisation** du cycle de remplissage assurant ainsi une **organisation optimale du travail et la sécurité** des opérateurs
- la réduction de l'**empreinte carbone** liée au transport



Les avantages du PBA400

- sa **faible hauteur (10 cm)** permet de l'installer et de l'utiliser dans des espaces restreints
- il se fixe sur une **simple dalle de béton**
- sa conception modulaire rend sa **réinstallation aisée** sur d'autres sites

Autres versions proposées :

- PBA400M** : version métrologie légale : 20000 kg / 20 kg
- PBA400S** : version avec liaison M2M SIGFOX avec application Web API
- PBA400A** : version ATEX II 1 et 2 GD EEx d ia

Structure du PBA400

Le PBA 400 est composé de :

- 1 châssis peseur en acier peint intégrant un système de guidage pour le positionnement de la benne (suivant NF R17-108)
 - 2 rampes permettant le roulage de la benne
 - 2 butées arrières
 - 4 capteurs 12,5 tonnes
- Dimensions : 4,65 m. x 2,64 m
Hauteur : 10 cm

Caractéristiques techniques

- Portée Nominale : 20 tonnes (*)
- Portée maximale statique : 75 tonnes
- Erreur globale : < à 0,1% P.N.
- Alimentation électrique : 24 Vcc ou 220 Vca
- Sortie analogique : 4 à 20mA ou 0 à 10 V
- Indices de protection : IP 68 (PBA400)
IP 65 (Indicateur)
- Câbles protégés par des gaines anti-rongeurs

* Système de pesage réservé à un USAGE INTERNE



L'indicateur du PBA400 fournit :

- la lecture de la masse contenue dans la benne amovible
- un signal analogique (courant ou tension) proportionnel à la masse contenue
- la connexion à la supervision
- des alarmes en cas de dépassement de la masse
- la protection des paramètres par mots de passe
- l'étanchéité de type IP 65