

# Production d'électricité par valorisation énergétique des effluents de station d'épuration

Luca ZANATTA<sup>1,2\*</sup>, Fabien DELALEUX<sup>1</sup>, Jean-Félix DURASTANTI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centre d'Etudes et de Recherche en Thermique, Environnement et Systèmes  
Université Paris-Est Créteil – 77567 Lieusaint

<sup>2</sup>Syndicat Intercommunal d'Aménagement, de Rivières et du Cycle de l'Eau  
58-60 Rue Fernand Laguide, 91100 Corbeil-Essonnes

\*(auteur correspondant : luca.zanatta@u-pec.fr)

**Résumé** - Dans le cadre de la transition énergétique, le SIARCE, syndicat de gestion des eaux, a fait appel au CERTES pour étudier des solutions de valorisation énergétique de stations d'épuration. Une analyse des ressources disponibles sur les sites a été réalisée afin de recenser et de quantifier les potentiels énergétiques disponibles. Une solution novatrice est envisagée, la production d'électricité par cycle ORC grâce à la ressource solaire et aux effluents en sortie de station d'épuration. Une première étude a permis de déterminer que la solution est viable par rapport à la consommation du site et que des approfondissements sont envisageables.

## Nomenclature

$A$	surface utile, m <sup>2</sup>	$\Delta$	Différence
$C_p$	Capacité calorifique, J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	<i>Indices et exposants</i>	
$H$	durée d'ensoleillement, h	<i>éch</i>	échangeur
$\dot{V}$	débit volumique, m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>	<i>in</i>	input
$Q$	Puissance thermique, kW	<i>opt</i>	optique
$T$	Température, K	<i>pàc</i>	pompe à chaleur
$W$	Energie électrique, kWh	<i>s</i>	solaire
<i>Symboles grecs</i>		<i>tur</i>	turbine
$\eta$	rendement		

## 1. Introduction

La France a adopté en aout 2015 la loi de transition énergétique pour la croissance verte (loi n°2015-992 du 17 aout 2015) afin d'énoncer les grands objectifs nationaux comme la réduction des émissions de gaz à effet de serre de 40 % à l'horizon 2030, la baisse de la part d'énergie fossiles de 30 % dans le mix énergétique français ou encore la favorisation de l'économie circulaire. C'est dans cet optique que le Syndicat Intercommunal d'Aménagement, de Rivières et du Cycle de l'Eau (SIARCE), en tant que maitre d'ouvrage du réseau d'eau et d'assainissement de près de 70 communes et de 11 stations d'épuration (STEP) en Essonne, a mis en place depuis 2017 un schéma directeur syndical des énergies renouvelables et des ressources réutilisables. Ce plan s'inclut dans une volonté de valoriser le potentiel de production d'énergie renouvelable à partir des ressources dont la collectivité territoriale dispose, et permet de fixer les moyens de mise en œuvre de tels projets. Parmi ces moyens, le SIARCE a décidé de développer les projets de recherche autour de l'optimisation énergétique et la valorisation des ressources de ses stations d'épuration et a donc fait appel au Centre d'Etudes et de

Recherche en Thermique, Environnement et Systèmes (CERTES), basé à l'université de Paris-Est Créteil, afin de traiter ces questions.

Actuellement, les stations d'épuration représentent la majeure partie de la consommation énergétique et des émissions de gaz à effet de serre du service de l'eau et de l'assainissement [1]. Des études ont permis de rendre un état des lieux de la consommation des stations d'épuration sur le territoire français [2]. La figure 1 montre la consommation des stations d'épuration rapportée à la charge organique éliminée par jour pour les principales méthodes de traitement des eaux. Sur la figure 1, deux stations appartenant au SIARCE, celles de Lardy-Janville et Vert-le-Grand, objets de notre étude ont été ajoutées pour comparaison.

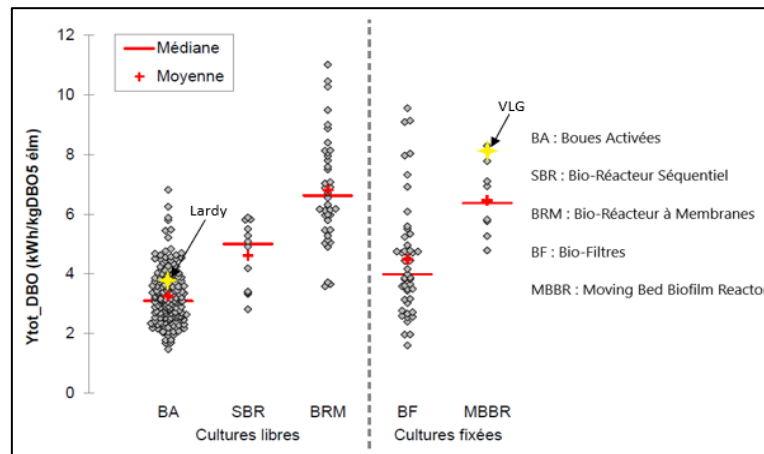


Figure 1 : Diagramme de dispersion de la consommation énergétique rapportée à la quantité de charge organique éliminée en fonction du procédé de traitement des eaux

Les consommations énergétiques peuvent significativement varier suivant le procédé de traitement et sont souvent très dispersées au sein d'un même procédé, mis à part pour la méthode des Boues Activées qui est la plus répandue en France. A partir de cette étude, il est possible de définir un objectif d'optimisation pour les STEP étudiées visant à ramener les consommations énergétiques au niveau de la moyenne nationale au minimum.

Actuellement, les pistes de valorisation énergétique pour les stations d'épuration sont encore limitées. La principale solution est la méthanisation des boues afin de produire du biogaz. La méthode a déjà fait ses preuves sur de nombreux sites à travers le monde mais n'est adaptée que pour des stations à grande échelle, typiquement supérieure à 50 000 Equivalent Habitants (EH), où la quantité de boues produite est suffisante pour rentabiliser une telle installation. D'autres procédés existent, comme l'installation de serre solaire pour le séchage des boues, qui permettent de réduire la consommation électrique des stations mais elles sont encore peu implantées en France et ne sont pas encore totalement adaptées aux particularités de chaque site.

Dans notre cas, les stations de Lardy-Janville et Vert-le-Grand sont des STEP de petite et moyenne capacité, 12 680 EH et 3 970 EH respectivement, où les pistes de valorisation mentionnées précédemment ne sont pas envisageables. L'objectif de notre étude est donc dans un premier temps d'analyser le potentiel de valorisation énergétique des stations d'épuration et dans un second temps de proposer des solutions adaptées qui utilisent les ressources disponibles sur site.

## 2. Quantification des ressources disponibles

Tout au long du traitement des eaux, deux ressources principales entrent en jeu : l'eau traitée et les boues produites grâce à ce traitement. Concernant les boues d'épuration, la piste de valorisation principale reste la méthanisation qui n'est pas adaptée pour les stations étudiées. Notre étude va donc s'intéresser aux effluents de la station, ainsi qu'à l'ensoleillement présent sur site, ressource qui additionnée à la surface disponible sur site peut être valorisée.

### 2.1. Etude des effluents en sortie de station

De grandes quantités d'eau transitent au sein d'une station d'épuration tout au long de l'année avec des compositions différentes suivant les étapes de traitement. Les eaux en sortie de station sont celles qui présentent la plus faible quantité de matière chimique et organique, qui pourrait endommager rapidement une quelconque installation, c'est pourquoi elles sont l'objet de notre analyse de potentiel.

L'objectif de cette analyse est d'étudier le potentiel de récupération de chaleur issu des effluents en sortie de station. Les figures 2 et 3 montrent l'évolution du débit des effluents pour les deux stations qui nous intéressent. Le débit est considéré comme le paramètre clé lorsqu'on veut connaître la viabilité des installations de récupération de chaleur [3] car il est directement proportionnel à la quantité de chaleur récupérable.

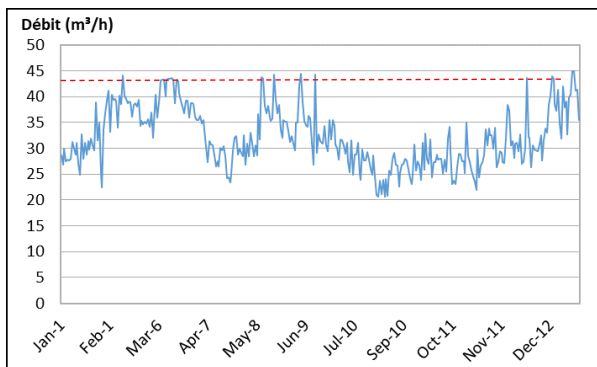


Figure 2 : Evolution du débit journalier de la STEP de Vert-le-Grand au cours d'une année

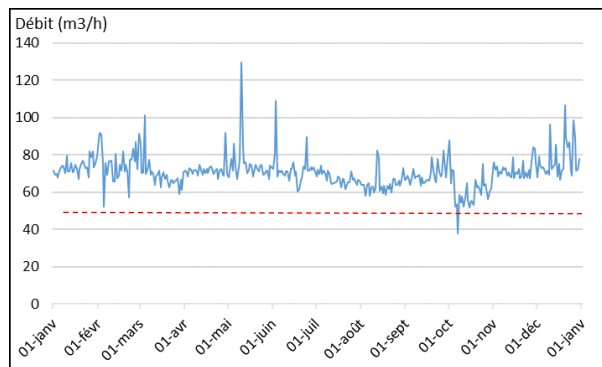


Figure 3 : Evolution du débit journalier de la STEP de Lardy au cours d'une année

A partir de la référence [3], une valeur limite fixée à  $43 \text{ m}^3/\text{h}$  est prise comme seuil minimal de rentabilité économique. Au regard de cette limite, la STEP de Vert-le-Grand présente des débits insuffisants pour envisager la récupération de chaleur, avec des valeurs ne dépassant  $43 \text{ m}^3/\text{h}$  que très rarement au cours de l'année. De son côté, la station de Lardy-Janville présente des débits supérieurs à la limite avec une moyenne annuelle de  $70 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Outre l'évolution des débits au cours de l'année, il est important de prendre aussi en compte la variation du débit au cours d'une journée lorsqu'on veut envisager la récupération de chaleur. A partir de la figure 4, on observe qu'il existe deux tendances au cours d'une journée. La première, qui s'étend de 8 h à 21 h, présente des débits importants avec des pics aux alentours de 9 h et 20 h lorsque l'activité humaine est la plus forte. La seconde, qui est en lien avec la faible activité humaine donne des débits beaucoup plus faibles, inférieurs au seuil limite défini. Cela démontre l'intermittence de cette source, contrainte qui doit être prise en compte pour sa valorisation.

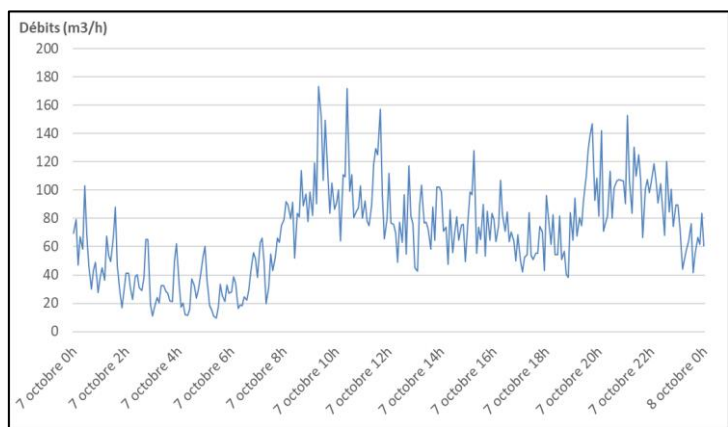


Figure 4 : Evolution du débit horaire de la STEP de Lardy-Janville au cours d'une journée

Le second paramètre important dans l'analyse des effluents est la température. Une température élevée des effluents permet de récupérer une plus grande quantité de chaleur et donc travailler avec des puissances plus grandes. Plus important, la stabilité de la température au cours de l'année est primordiale afin d'assurer une continuité dans la quantité de chaleur récupérable. La figure 5 présente les relevés de température effectués au niveau des effluents en sortie de station au cours d'une année. La température de l'eau reste très stable même pendant la période hivernale. Les écarts obtenus avec la moyenne de 15 °C sont principalement concentrés sur la période septembre-octobre, où les valeurs tournent autour de 20 °C ce qui n'est en rien une contrainte pour la récupération de chaleur, cela signifie que pour un écart de température fixe au cours de l'année, la chaleur des effluents sera moins bien valorisée sur cette période.

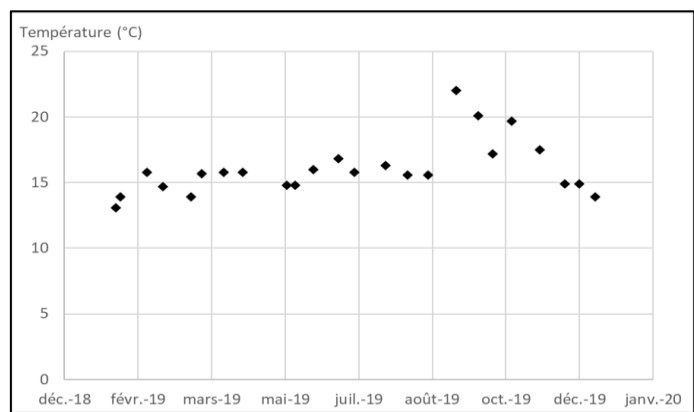


Figure 5 : Evolution de la température des effluents de la STEP de Lardy-Janville au cours de l'année 2019

Dans le cas de la récupération de chaleur au niveau des effluents, les données de débit et de température permettent de caractériser la ressource. Cette étude nous a permis de confirmer la présence d'un potentiel pour la station d'épuration de Lardy-Janville et d'écarter celle de Vert-le-Grand. La possibilité d'utiliser les effluents comme une source mécanique dans le cadre de l'installation de micro-turbine n'a pas été prise en compte parce que cette solution nécessite à la fois des débits très importants et une chute d'eau, deux paramètres qui ne sont pas présents sur les sites étudiés.

## 2.2. Etude de l'ensoleillement des stations d'épuration

Une particularité a été relevé lors de l'identification des sites, c'est la grande surface disponible dans l'enceinte de chaque station d'épuration étudiée, respectivement 1 000 m<sup>2</sup> et 4 000 m<sup>2</sup> pour Vert-le-Grand et Lardy-Janville. Cela a permis de prendre en compte la ressource solaire comme piste de valorisation énergétique, sous forme d'électricité ou de chaleur.

Les données d'ensoleillement des sites ont été étudiées grâce au logiciel PVGIS et rapportées sur la figure 6. La région parisienne étant dans un climat continental, l'ensoleillement qui en résulte est globalement faible avec une moyenne annuelle de l'ordre de 130 W/m<sup>2</sup> et surtout une période hivernale où il ne dépasse pas 70 W/m<sup>2</sup> en moyenne sur la journée.

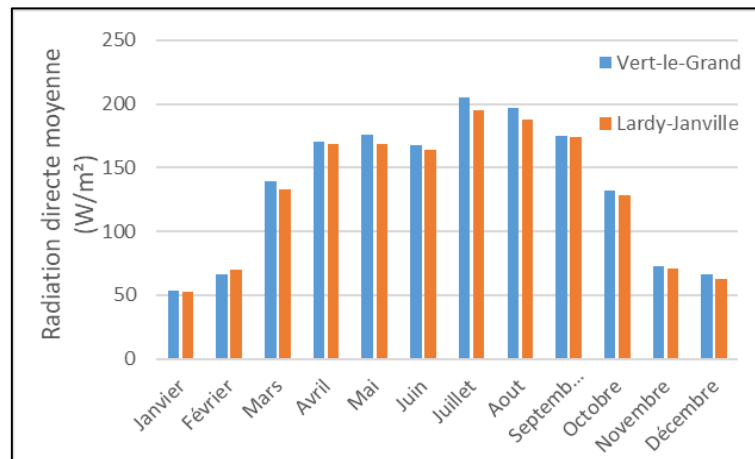


Figure 6 : Ensoleillement mensuel moyen pour les STEP de Vert-le-Grand et de Lardy-Janville

Toute installation solaire est régie par un paramètre appelé rayonnement de seuil, qui permet de marquer la transition entre différents régimes de fonctionnement. Une méthode pour mettre en valeur ce phénomène est la réalisation de courbes de fréquences cumulées [4] comme présenté sur la figure 7. Ces courbes donnent le nombre d'heures pour lesquelles une puissance donnée est atteinte. Dans notre étude, nous avons choisi de fixer une valeur de rayonnement de seuil pour un fonctionnement nominal à 200 W/m<sup>2</sup> atteint au moins 4 h par jour, ainsi les conditions d'ensoleillement ne sont pas satisfaites d'octobre à février.

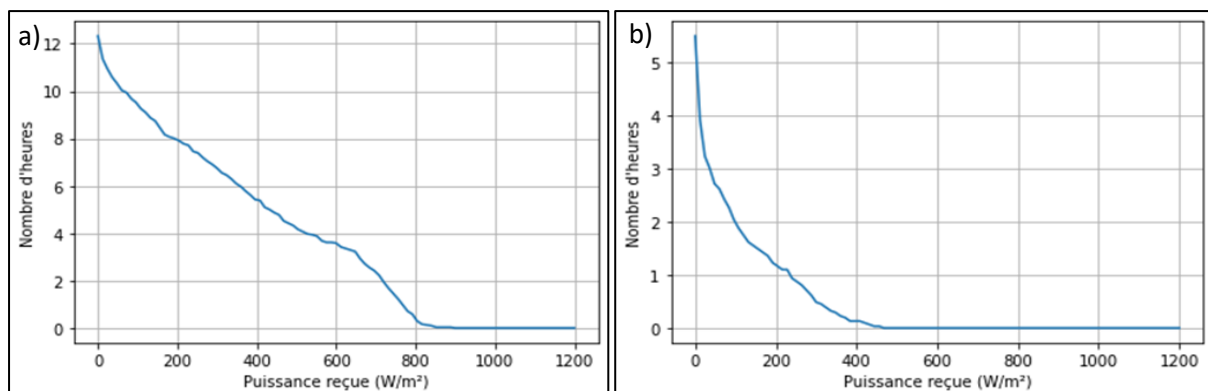


Figure 7 : Courbes de fréquences cumulées de l'ensoleillement de la STEP de Lardy-Janville en a) juillet et en b) décembre

Des pistes de valorisation sont ainsi envisageables sur les périodes où le rayonnement est suffisant, typiquement du mois de mars à septembre.

### 3. Production d'énergie par valorisation des ressources

Après avoir analysé le potentiel de valorisation énergétique des ressources disponibles sur site, notre travail s'est tourné vers la possibilité de développer des systèmes de production d'énergie grâce à ces ressources. Deux solutions ont ainsi été étudiées : la production de chaleur à partir des effluents en sortie de station et la production d'électricité grâce à la ressource solaire.

#### 3.1. Récupération de la chaleur fatale des effluents

Comme expliqué dans la section 2.1, les effluents sont une source de chaleur exploitable dès lors qu'un débit moyen minimal est atteint. Il est possible de récupérer cette chaleur à l'aide d'échangeurs placés dans le canal de sortie des effluents, la puissance disponible étant calculée à l'aide de l'équation (1).

$$Q_{éch} = V \times C_p \times \Delta T \quad (1)$$

Dans le cas de la station d'épuration de Lardy-Janville, la puissance récupérable au niveau des échangeurs est de l'ordre de 180 kW quand on considère un écart de température de 2°C.

Afin de produire de la chaleur à partir de cette énergie, les pompes à chaleur représentent la meilleure solution. Dans ce type d'installation, le coefficient de performance (COP) est défini comme le rapport entre la quantité de chaleur cédée à la source chaude et le travail fourni par le compresseur. Pour des pompes à chaleur haute température utilisées pour le chauffage classique de bâtiment, le COP est en général de 3. On peut alors en déduire une puissance produite par la pompe de 270 kW dans le cas de la STEP de Lardy-Janville à partir de l'équation (2).

$$Q_{pac} = Q_{éch} \times \frac{COP}{COP-1} \quad (2)$$

L'étude des besoins en chaleur sur site et dans sa proximité directe a révélé que la STEP en elle-même n'a aucun besoin en chaleur et le site n'est pas assez proche des premières habitations pour que les pertes de charge due au transport ne deviennent problématiques. Ces contraintes sont le principal frein au développement de systèmes de récupération de chaleur des effluents de station d'épuration. C'est pourquoi la suite de notre travail se concentre sur des méthodes de production d'électricité, utilisable directement sur site.

### 3.2. Production d'électricité par cycle ORC

Les cycles de Rankine organique sont de plus en plus étudiés dans le cas de production d'électricité verte, notamment les installations à petite échelle qui peuvent être développées dans de nombreuses applications [5]. Dans cette section, toutes les ressources sont mises à profit afin d'étudier la viabilité d'un cycle ORC en utilisant la ressource solaire comme source chaude avec des concentrateurs solaires et les effluents en sortie de station comme source froide. Une représentation graphique d'un tel cycle est donnée sur la figure 8.

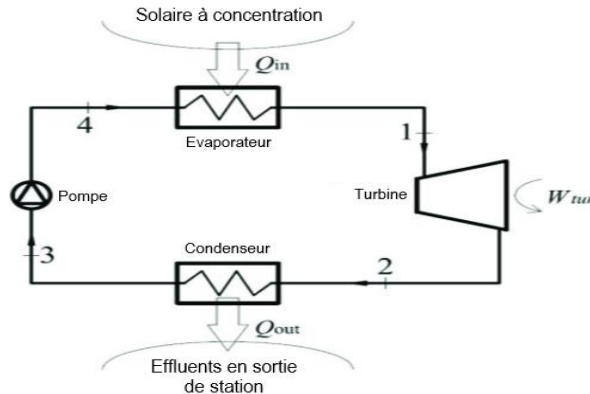


Figure 8 : Représentation schématique d'un cycle ORC

L'intérêt de cette solution est qu'elle repose sur deux ressources abondantes et gratuites. L'originalité étant de considérer les effluents de sortie de STEP comme une source de refroidissement relativement stable et non plus comme source de chaleur basse température. L'étude de l'ensoleillement développée dans la section 2.2 a montré qu'il est possible de faire fonctionner un tel système à sa condition nominale 7 mois dans l'année et le débit et la température sont suffisants pour considérer les effluents comme une bonne source froide.

Afin de montrer la viabilité du cycle ORC, une étude de cas a été réalisée pour la STEP de Lardy-Janville afin de déterminer la production électrique du système de mars à septembre. Le système d'équation est le suivant : à partir de la puissance solaire moyenne mensuelle  $Q_s$ , la puissance thermique  $Q_{in}$  absorbée par les collecteurs est calculée avec l'équation (3), la puissance disponible à la turbine en est déduite grâce à l'équation (4), et enfin la production d'électricité est calculée à partir de l'équation (5).

$$Q_{in} = \eta_{opt} \times A \times Q_s \quad (3)$$

$$Q_{tur} = \eta_{ORC} \times Q_{in} \quad (4)$$

$$W_{tur} = H \times Q_{tur} \quad (5)$$

Cette STEP possède une parcelle de terrain d'environ 5 000 m<sup>2</sup> propice à l'installation des concentrateurs solaires. Avec un taux d'emprise au sol de 75 %, la surface utile prise ici est de 3 500 m<sup>2</sup>. Le rendement optique et le rendement global du cycle ORC ont été obtenus à partir des références [6] et [7] et valent 0,66 et 0,2 respectivement. Les résultats de l'étude sont consignés dans le tableau 1. Sur les 7 mois de fonctionnement, l'installation produit 387 MW.h. Sur la même durée, la station d'épuration consomme environ 290 MW.h.

		<i>mars</i>	<i>avril</i>	<i>mai</i>	<i>juin</i>	<i>juillet</i>	<i>aout</i>	<i>septembre</i>
$Q_s$	W/m <sup>2</sup>	449.6	562.1	504.2	571.7	533.1	526.4	484.2
$Q_{in}$	kW	1038.6	1298.5	1164.7	1320.6	1231.5	1216.0	1118.5
$Q_{tur}$	kW	207.7	259.7	232.9	264.1	246.3	243.2	223.7
$H$	heures	147	227	231	319	247	222	200
$W_{tur}$	kW.h	30534	58950	53809	84256	60834	53990	44740

Tableau 1 : Résultats de l'étude de cas de la production d'électricité pour la STEP de Lardy-Janville

Précisons qu'il s'agit là de résultats de pré-dimensionnement. Ceux-ci montrent toutefois que la solution semble viable d'un point de vue énergétique en première approximation. Un approfondissement permettra d'obtenir des résultats plus précis quant à la faisabilité de la mise en place d'un tel système.

#### 4. Conclusions et perspectives

Les stations d'épuration de petite et moyenne tailles possèdent des ressources encore peu exploitées actuellement. L'étude des potentiels énergétiques montre qu'il est possible d'envisager des solutions afin d'exploiter ces ressources. Parmi ces solutions, une idée novatrice serait de mettre en place un cycle ORC afin de produire de l'électricité grâce à l'ensoleillement sur site et aux effluents en sortie de STEP. Une première étude a permis de s'assurer de la viabilité d'un tel système.

La suite du travail va consister à approfondir cette étude en développant notamment un modèle numérique qui prendrait en compte les irréversibilités du système, l'intermittence de la ressource solaire ou encore les contraintes de débit et température de la source froide. Grâce à cela, une optimisation poussée du cycle pourra être effectuée afin d'étudier des solutions pour maximiser la production d'électricité comme notamment l'ajout d'un stockage thermique performant pour pallier les problèmes d'intermittence.

Dans le cas où cet approfondissement serait fructueux, une étape de dimensionnement d'un prototype et de déploiement sur site sera envisagée afin de montrer la viabilité de la solution en condition réelle.

#### Références

- [1] ADEME, *Guide méthodologique d'évaluation des émissions de gaz à effet de serre des services de l'eau et de l'assainissement* (2018).
- [2] A. E. Stricker, A. Husson, J. P. Canler, *Consommation énergétique du traitement intensif des eaux usées en France : état des lieux et facteurs de variation* (2017).
- [3] G. Petrucci & al., *Cartographier le potentiel de récupération de chaleur des eaux usées : l'exemple de la Seine-Saint-Denis*, Techniques Sciences Méthodes (2020), 63-70.
- [4] R. Gicquel, *Cumulated frequencies Diagrams*, Energie Solaire : conversion et applications CNRS (1977).
- [5] S. Quoilin, *Sustainable Energy Conversion Through the Use of Organic Rankine Cycles for Waste Heat Recovery and Solar Applications*, PhD Thesis (2011).
- [6] N. B. Desai, S. Bandyopadhyay, *Thermo-economic analysis and selection of working fluid for solar organic Rankine cycle*, Applied Thermal Engineering (2016), 471-481.
- [7] K. Sun & al., *Comprehensive evaluation of concentrated solar collector and Organic Rankine cycle hybrid energy process with considering the effects of different heat transfer fluids*, Energy Reports (2021), 362-384.