

Valorisation énergétique des effluents de station d'épuration par cycle ORC

Luca ZANATTA^{1,2*}, Fabien DELALEUX¹, Jean-Félix DURASTANTI¹

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

²Syndicat 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 ses stations d'épuration. Une solution novatrice considérée est l'installation d'un cycle de Rankine organique (ORC) sur site, en utilisant l'énergie solaire thermique comme source chaude et les effluents en sortie de station d'épuration comme source froide. La réglementation imposant une température maximale de rejet dans le milieu naturel de 25°C, le cycle est donc contraint par la puissance disponible au condenseur. La sélection du fluide de travail et les conditions opératoires ont été adaptées à cette contrainte dans le but de maximiser la puissance fournie par la turbine. Des puissances de l'ordre de 70 kW sont réalisables et il est possible de doubler cette valeur lorsque la température des effluents diminue de 5 °C.

Nomenclature

| | | | |
|-----------------------|---|-----------------------------|-------------|
| C_p | Capacité calorifique, J.kg ⁻¹ .K ⁻¹ | Δ | Différence |
| h | Enthalpie, kJ/kg | <i>Indices et exposants</i> | |
| \dot{m} | Débit volumique, kg.s ⁻¹ | <i>cond</i> | condenseur |
| Q | Puissance thermique, kW | <i>eva</i> | évaporateur |
| T | Température, °C | <i>opt</i> | optimal |
| <i>Symboles grecs</i> | | <i>tur</i> | turbine |

1. Introduction

La France a adopté en août 2015 la loi de transition énergétique pour la croissance verte (loi n°2015-992 du 17 août 2015) afin d'énoncer les grands objectifs nationaux en termes d'énergie 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 maître 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'inscrit 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) 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]. En termes de pistes de valorisation énergétique pour les stations d'épuration, les solutions sont encore limitées. La principale solution est la méthanisation des boues afin de produire du biogaz [3], qui a déjà fait ses preuves sur de nombreux sites mais n'est adaptée que pour des stations à grande échelle, typiquement supérieure à 50 000 Equivalents 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 énergétique des stations mais elles sont encore peu implantées en France.

Un cycle de Rankine organique (ORC) utilise un fluide organique comme fluide de travail. Ce cycle permet de produire de l'électricité à partir de sources de chaleur à basse température – entre 90 °C et 370 °C – telles que la chaleur résiduelle, le solaire thermique, la biomasse ou la géothermie [4]. Ce procédé est en plein essor en Europe depuis le début des années 2000, notamment dans le cas de la valorisation de la chaleur fatale issue des industries métallurgiques ou des verreries. De nombreux fluides de travail sont envisageables suivant leur type et leurs propriétés thermiques. La recherche d'un optimum de performance du cycle passe donc par la recherche du fluide de travail et des conditions opératoires les mieux adaptées à notre système.

Ce projet consiste à adapter l'ORC dans le cas particulier des stations d'épuration de petite capacité, typiquement entre 2 500 EH et 15 000 EH, afin d'apporter une solution novatrice dans les procédés de valorisation des ressources des stations d'épuration. L'objectif est d'évaluer le potentiel de production d'électricité en utilisant des concentrateurs solaires de type miroirs de Fresnel comme source chaude et les effluents en sortie de STEP comme source froide. La particularité des STEP est que le rejet des effluents est fortement contraint et réglementé. Le débit est régi par la capacité épuratoire du site et la température est réglementée par des arrêtés environnementaux lors du rejet des eaux épurées dans le milieu naturel. De ce fait, l'optimum ne peut se calculer qu'en prenant en considération la puissance de condensation du cycle. La STEP de Lardy-Janville, d'une capacité de 12 680 EH et traitant une charge hydraulique de l'ordre de 2 370 m³/j, est prise comme site pilote.

2. Caractérisation des effluents en sortie de station d'épuration

La fonction première d'une station d'épuration est d'éliminer les polluants chimiques et organiques présents dans les eaux résiduaires afin de rejeter dans le milieu naturel une eau sans danger pour la biodiversité. Néanmoins, du fait des grandes quantités d'eau transitant en leur sein, les STEP peuvent aussi être considérées comme des sources d'énergie renouvelable non négligeable. C'est pourquoi il est intéressant d'étudier le potentiel énergétique des eaux épurées, présentant la plus faible concentration en matières chimique et organique.

2.1. Débit des effluents en sortie de STEP

Le débit est considéré comme le paramètre clé lorsqu'on veut connaître le potentiel de récupération de chaleur car il est directement proportionnel à la quantité de chaleur récupérable [5]. Dans le cas des STEP de petites capacités, il est important de caractériser ce paramètre puisqu'il est variable suivant l'heure de la journée ou la saison.

Le débit est mesuré de façon continue à l'aide d'une sonde placée au niveau du canal de sortie de l'eau épurée. La figure 1 montre l'évolution du débit des effluents en sortie de STEP au cours d'une année. La moyenne de débit est de 70 m³/h et est plutôt stable au cours du temps, les écarts ponctuels représentent les périodes de fortes pluies ou d'étiages.

Outre l'évolution des débits au cours de l'année, il est également important de prendre en compte la variation du débit au cours d'une journée. A partir de la figure 2, 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.

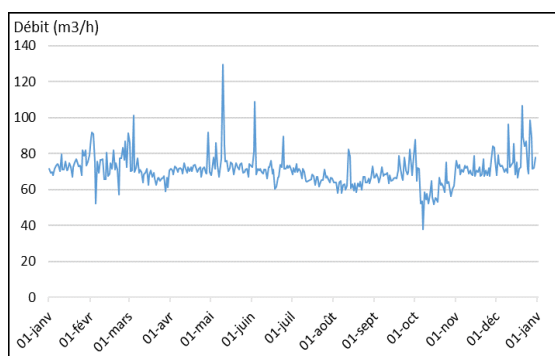


Figure 1 : Evolution du débit journalier de la STEP de Lardy au cours d'une année

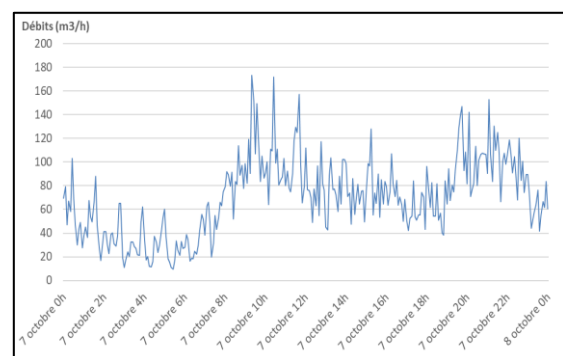


Figure 2 : Evolution du débit horaire de la STEP de Lardy au cours d'une journée

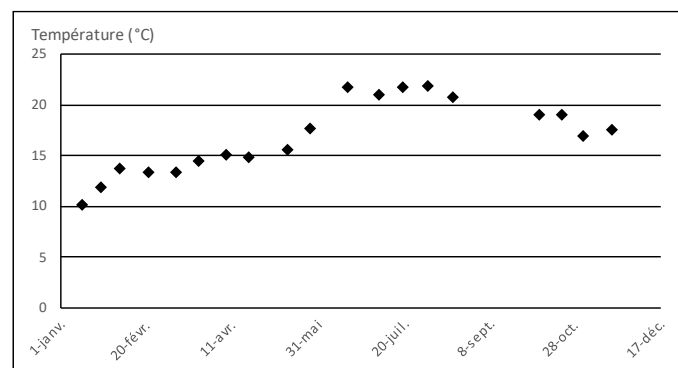


Figure 3 : Evolution de la température des effluents de la STEP de Lardy-Janville au cours de l'année

2.2. Température des effluents en sortie de STEP

Le second paramètre important dans l'analyse des effluents est la température de rejet. Sa mesure est effectuée de manière ponctuelle, deux fois par mois, à l'aide d'échantillons prélevés dans le canal de rejet des eaux épurées.

Peu soumise aux variations annuelles, la température des effluents en sortie de STEP reste stable au cours de l'année, comme le montre la figure 3. Deux comportements peuvent se distinguer : pendant la période hivernale, la température des effluents oscille autour de 15 °C alors que pendant la période estivale, les valeurs se situent plutôt autour de 20 °C.

2.3. Contrainte liée aux effluents

Dans le cas du traitement des eaux résiduaires, la température de rejet dans le milieu naturel est soumise à une réglementation stricte. D'après l'article 31 de l'arrêté du 2 février 1998, la température des effluents rejetés ne doit pas dépasser 30 °C [6]. Pour s'assurer du bon respect de cette règle, les contrats de délégation de service public abaissent cette limite à 25 °C.

Ce phénomène induit alors une contrainte pour notre projet. En ayant un débit fixé par la capacité de traitement journalière de la STEP et une température régulée par la réglementation, la puissance de condensation est donc limitée par l'équation (1).

$$Q_{cond} = \dot{m} \times C_p \times \Delta T \quad (1)$$

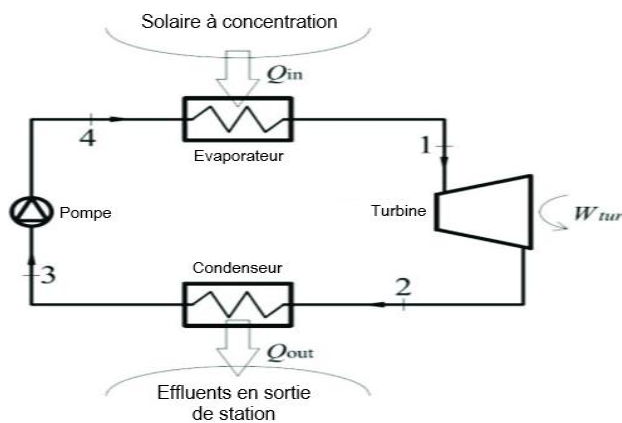
Dans la suite du travail, cette puissance de condensation est définie comme limite du système ORC. La valeur maximale que peut atteindre ce paramètre est de 416 kW, représentant le cas où la température des effluents est de 20 °C et le débit est de 70 m³/h.

3. Production d'énergie par cycle de Rankine organique

3.1. Modélisation du cycle

Le cycle de Rankine organique utilisé pour les simulations numériques de ce projet est composé de 4 éléments principaux : une pompe, une turbine, un évaporateur et un condenseur, comme représenté sur la figure 4. Ce procédé est développé dans de nombreuses applications, notamment à petite échelle [7].

Les simulations sont réalisées sous Python, avec l'utilisation de la base de données CoolProp afin de récupérer les données thermodynamiques des fluides de travail et du cycle. Les équations (2), (3) et (4) permettent de connaître l'état du système et ainsi de mettre en évidence la puissance disponible au niveau de la turbine, qui est le paramètre qui nous intéresse ici.



$$Q_{cond} = \dot{m} \times (h_3 - h_2) \quad (2)$$

$$Q_{tur} = \dot{m} \times (h_1 - h_2) \quad (3)$$

$$Q_{eva} = \dot{m} \times (h_1 - h_4) \quad (4)$$

Figure 4 : Représentation schématique d'un cycle ORC

Dans cette première approche, la source chaude est modélisée par un thermostat fixé à 150 °C qui fournit toujours la quantité d'énergie suffisante pour assurer le bon fonctionnement du système. Quant à la source froide, comme indiqué dans la section 2.3, elle est assurée grâce aux effluents en sortie de STEP à 20 °C, qui imposent une puissance de condensation à l'ORC de 416 kW. Pour chaque échangeur de chaleur, une différence de température d'au moins 10 °C est imposée entre les différents fluides. Le diagramme T-s d'un tel cycle est représenté sur la figure 5. Ainsi, la température et la pression sont régies par les différentes contraintes et hypothèses énoncées. La modélisation a donc pour objectif de déterminer le fluide de travail le plus approprié et d'optimiser son débit afin de maximiser la puissance fournie par la turbine.

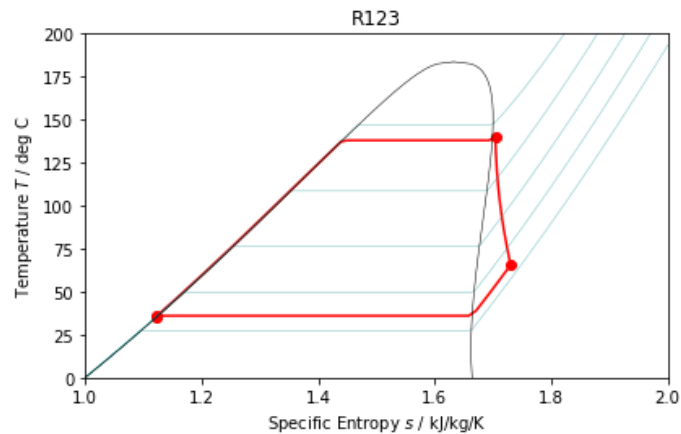


Figure 5 : Diagramme T-s d'un cycle ORC pour le fluide de travail R123

3.2. Choix du fluide de travail

La sélection du fluide de travail est un choix fondamental afin d'optimiser l'ORC. Adapter le fluide aux conditions opératoires souhaitées, permet d'optimiser le rendement du cycle. De nombreuses études se sont intéressées à cette question [8] [9] [10] [11] ; il en découle 4 critères principaux pour la sélection du fluide de travail : (i) le critère de performance regroupe le type de fluide – humide, isentropique ou sec – ainsi que ses propriétés thermodynamiques, (ii) le critère environnemental permet de sélectionner des fluides peu dangereux en termes de toxicité et d'inflammabilité et avec un faible impact environnemental décrit par le potentiel de réchauffement climatique (GWP) et le potentiel de déplétion de la couche d'ozone (ODP), (iii) le critère technico-économique, porté par la masse volumique ou encore les propriétés de transport telles que la conductivité thermique ou la viscosité, influence le dimensionnement de l'installation, (iv) les limites de fonctionnement décrites par la température de solidification du fluide et sa compatibilité avec les matériaux utilisés permettent de s'assurer du bon fonctionnement du procédé.

Dans le cadre de notre étude, les critères de sélection se sont focalisés sur le couple pression / température critique qui doit être proche de la température de la source chaude pour une pression ne dépassant pas les 40 bar, le caractère sec ou isentropique du fluide afin de ne pas avoir recours à une forte surchauffe du fluide, un ODP nul et un GWP le plus faible possible afin de respecter le protocole de Montréal de 1987 interdisant l'utilisation des fluides à ODP non-nul et les normes européennes de 2012 interdisant l'utilisation de fluide avec un GWP supérieur à 150.

Au total, 9 fluides de travail présentant des propriétés adéquates ont été sélectionnés. 6 d'entre eux sont des hydrocarbures, le R123 est un Hydrofluorocarbure (HFC) et les deux derniers sont des Hydrofluoroethers (HFE), fluides conçus pour remplacer les HFC dans de telles installations [12]. Leurs propriétés sont résumées dans le tableau 1. En complément des différents critères, l'enthalpie de condensation à 1 bar est explicitée afin de pouvoir comparer les fluides suivant l'énergie de condensation qui sera mise en jeu dans le cycle.

| Working fluid | Type* | Critical temperature | Critical pressure | Boiling point at 1 bar | Δh_{cond} at 1 bar | ODP | GWP |
|---------------|-------|----------------------|-------------------|------------------------|----------------------------|------|-----|
| | | °C | bar | °C | kJ/kg | | |
| Isobutane | D | 135 | 36,4 | -11,7 | 365,2 | 0 | 20 |
| Isobutène | D | 144 | 39,7 | -7,1 | 391,7 | nd | nd |
| Butane | D | 152 | 37,9 | -0,9 | 385,8 | 0 | 11 |
| Neopentane | D | 160 | 31,6 | 9,4 | 315,8 | 0 | 20 |
| Isopentane | D | 187 | 33,7 | 27,5 | 343,4 | 0 | 0 |
| Pentane | D | 196 | 33,6 | 35,5 | 357,8 | 0 | 11 |
| R123 | I | 183 | 36,6 | 27,8 | 170,2 | 0,02 | 77 |
| R1234ze(Z) | I | 153,65 | 39,7 | 9,6 | 215,2 | 0 | 6 |
| Novec649 | D | 168,66 | 18,7 | 48,9 | 88 | nd | nd |

*D : dry, I : isentropic

Tableau 1 : *Propriétés des fluides de travail*

3.3. Résultats et discussion

Des simulations numériques ont été effectuées pour chacun des fluides de travail dans le but de calculer la puissance produite à la turbine et la puissance de condensation. Afin de comparer ces deux valeurs pour chaque fluide, le débit est fixé à 1 kg/s. Les résultats sont consignés dans le tableau 2.

A partir de ces résultats, deux tendances peuvent être mises en valeur. D'un côté les hydrocarbures présentent de bonnes puissances produites au détriment d'une puissance de condensation plus élevée, voire supérieure à la limite de 416 kW dans le cas de l'isopentane et du pentane. Concernant le HFC et les HFO, des puissances plus faibles pour la turbine et le condenseur mettent en lumière une capacité d'optimisation du cycle en modifiant le débit des fluides de travail.

| Working fluid | Isobutane | Isobutène | Butane | Neopentane | Isopentane | Pentane | R123 | R1234ze(Z) | Novec649 |
|---------------|-----------|-----------|--------|------------|------------|---------|-------|------------|----------|
| Q_{tur} | kW 44,1 | 53,9 | 61,6 | 61,3 | 74,3 | 73,7 | 34,9 | 33,4 | 16,2 |
| Q_{cond} | kW 353,2 | 378,3 | 399,4 | 379,4 | 426,1 | 439,2 | 189,1 | 213,5 | 142,4 |

Tableau 2 : *Puissance au niveau de la turbine et du condenseur pour les différents fluides de travail à un débit de 1 kg/s*

La seconde série de simulations a pour objectif d'optimiser les paramètres de cycle afin de maximiser la puissance de sortie du système. Pour ce faire, le débit des fluides a été adapté afin d'obtenir une puissance de condensation la plus proche possible de la limite fixée. Les valeurs de débit optimal ainsi que la puissance au niveau de la turbine qui en résulte pour chaque fluide sont consignées dans le tableau 3. A partir de ces données il est possible de comparer la performance des fluides entre eux. Le R123 est celui qui présente la plus grande puissance fournie par la turbine, suivi de l'isopentane et du pentane. Pour les HFE, le R1234ze(Z) présente aussi un meilleur potentiel que le Novec649, bien que plus faible que le R123.

Ces résultats confirment que les HFC sont les fluides les plus adaptés aux procédés basses températures. Avec l'émergence des normes interdisant ce genre de fluide, il est important de retrouver des solutions de remplacement. L'isopentane peut faire office de bon substitut, de même pour le R1234ze(Z), ils possèdent les propriétés thermodynamiques adéquates et leur performance n'est pas très éloignée du R123.

| Working fluid | | Isobutane | Isobutène | Butane | Neopentane | Isopentane | Pentane | R123 | R1234ze(Z) | Novec649 |
|-----------------|------|-----------|-----------|--------|------------|------------|---------|------|------------|----------|
| \dot{m}_{opt} | kg/s | 1,2 | 1,1 | 1,0 | 1,1 | 1,0 | 0,9 | 2,2 | 2,0 | 2,9 |
| $Q_{tur,opt}$ | kW | 52,0 | 59,4 | 64,3 | 67,3 | 72,7 | 69,9 | 76,9 | 65,2 | 47,4 |

Tableau 3 : *Débit et puissance à la turbine optimaux pour les différents fluides de travail*

Les scénarios étudiés précédemment reposent tous sur le cas le plus contraignant où les eaux épurées sont à 20 °C en entrée d'échangeur de chaleur, cas typique de la période estivale. Lorsque la température des effluents baisse, la puissance disponible pour la condensation augmente. La figure 6 montre l'évolution de la puissance fournie par la turbine lorsque la température de la source froide diminue de 5 °C. Dans ce cas, la puissance augmente et double même lorsque la diminution de 5 °C est atteinte.

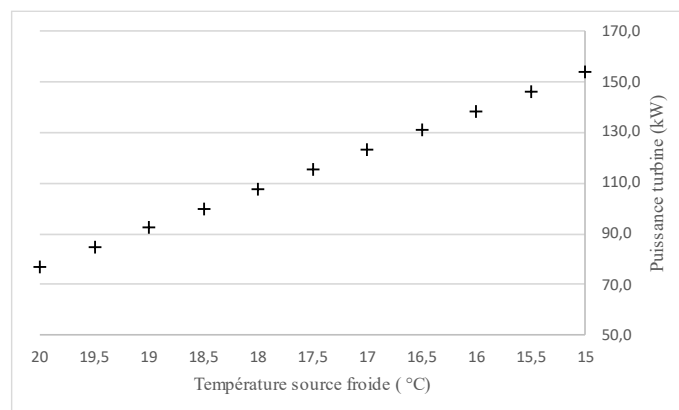


Figure 5 : *Evolution de la puissance au niveau de la turbine en fonction de la température de la source froide*

4. Conclusions et perspectives

Dans le cadre de la valorisation énergétique des stations d'épuration de petite capacité, une solution novatrice est d'installer un cycle ORC en utilisant les effluents en sortie de STEP comme source froide. Du fait des contraintes liées à cette ressource, l'étude de l'optimisation du cycle doit être réalisée en considérant la source froide comme facteur limitant du système.

Premièrement, les critères de sélection du fluide de travail ont été adaptées aux conditions opératoires du système. Il en résulte que 9 fluides sont propices à l'étude de l'optimisation de l'ORC. Ensuite, le débit et la puissance fournie par la turbine optimaux sont calculés dans les conditions imposées par la source froide. Parmi les fluides sélectionnés, le R123, l'Isopentane et le Pentane sont les plus performants. Enfin, le cycle est soumis à l'évolution de la température de la source froide. Dans cette configuration, la puissance au niveau de la turbine augmente linéairement en fonction de la diminution de la température.

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] Y. Gu & al, Energy self-sufficient wastewater treatment plants : feasibilities and challenges, *Energy Procedia* 105 (2017) 3741 – 3751.
- [4] N.B. Desai, S. Bandyopadhyay, Process integration of organic Rankine cycle, *Energy* 34 (2009) 1674-1686.
- [5] 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.
- [6] Article 31 de l'arrêté du 2 février 1998 relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation.
- [7] S. Quoilin, *Sustainable Energy Conversion Through the Use of Organic Rankine Cycles for Waste Heat Recovery and Solar Applications*, PhD Thesis (2011).
- [8] B. F. Tchanche & al, *Fluid selection for a low-temperature solar organic Rankine cycle*, *Applied Thermal Engineering* (2009), 2468-2476.
- [9] J. Vivian, G. Manente, A. Lazzaretto, *A general framework to select working fluid and configuration of ORCs for low-to-medium temperature heat sources*, *Applied Energy* (2015), 727-746.
- [10] D. Li & al, *Selection of organic Rankine cycle working fluids in low-temperature waste heat utilization*, *Journal of Hydrodynamics* (2015), 458-464.
- [11] N. B. Desai, S. Bandyopadhyay, *Thermo-economic analysis and selection of working fluid for solar organic Rankine cycle*, *Applied Thermal Engineering* (2016), 471-481.
- [12] M. Bahrami, F. Pourfayaz, A. Kasaerian, Low global warming potential (GWP) working fluids (WFs) for organic Rankine cycle (ORC) applications, *Energy Reports* (2022), 2976-2988.