

Outil d'aide à la décision pour la valorisation de la chaleur fatale industrielle : vers une industrie plus éco-efficace et résiliente

Decision support tool for the valorization of industrial waste heat: towards a more eco-efficient and resilient industry

Mohamed Amine BEN TAHER*, Manal AATIK, Alaa Hamadi, Bulent Baris

Capgemini Engineering - Technology & Engineering Center

4 Avenue Didier Daurat - 31700 Blagnac, FRANCE

*(auteur correspondant : mohamed-amine.ben-taher@capgemini.com)

Résumé - L'industrie rejette une part importante de l'énergie consommée sous forme de chaleur fatale, contribuant à la surconsommation énergétique et aux émissions de gaz à effet de serre. Dans ce contexte, un outil d'aide à la décision a été développé visant à identifier des solutions techniques pour récupérer et valoriser cette chaleur, dans une optique de durabilité et d'efficacité énergétique. Basé sur la méthodologie 3E (Énergétique, Exergétique, Environnementale), cet outil permet de simuler des processus tels que le cycle organique de Rankine, d'analyser les impacts environnementaux et de quantifier la production d'hydrogène.

Abstract - The industry releases a significant portion of the energy consumed as waste heat, contributing to energy overconsumption and greenhouse gas emissions. In this context, a decision-support tool has been developed to identify technical solutions for recovering and utilizing this heat, with a focus on sustainability and energy efficiency. Based on the 3E methodology (Energetic, Exergetic, Environmental), this tool enables the simulation of processes such as the Organic Rankine Cycle, the analysis of environmental impacts, and the quantification of hydrogen production.

Nomenclature

C_p	Capacité thermique massique, J/kg·K	\dot{m}	Débit massique, kg/s
F	Constante de Faraday, C/mol	N	Nombre de cellules d'électrolyse
h	Enthalpie spécifique, kJ/kg	P	Puissance, kW
I	Intensité électrique, A	Q	Flux thermique, kW
J	Densité de courant, A/m ²	U	Tension électrique, V

1. Introduction

Les industries consomment environ 20 % de l'énergie totale mondiale et rejettent près d'un tiers de cette énergie sous forme de chaleur fatale. Cette chaleur, définie comme une énergie dissipée involontairement dans l'environnement, représente un potentiel important pour améliorer l'efficacité énergétique des installations industrielles tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre [1].

La récupération et la valorisation de la chaleur fatale constituent un levier stratégique pour réaliser des économies d'énergie significatives et répondre aux enjeux de durabilité. En effet, une grande partie de la chaleur produite par les procédés industriels est souvent perdue dans

l'environnement, alors qu'elle pourrait être récupérée et réutilisée pour alimenter divers besoins énergétiques, tels que le chauffage, la production d'électricité ou encore des procédés thermiques spécifiques [2]. En intégrant des systèmes de récupération de chaleur, les industries peuvent réduire leur consommation énergétique globale et diminuer leur empreinte carbone, contribuant ainsi à une meilleure utilisation des ressources disponibles tout en répondant aux exigences environnementales croissantes [3].

Parmi les technologies existantes pour valoriser cette chaleur, le cycle organique de Rankine (ORC) se démarque par sa grande flexibilité et son adaptabilité à différents contextes industriels. L'ORC est particulièrement performant pour exploiter des sources de chaleur à basse température (50 - 300 °C), ce qui en fait une solution idéale pour de nombreuses applications industrielles. En outre, cette technologie présente des coûts compétitifs par rapport à d'autres systèmes de récupération de chaleur, notamment grâce à ses faibles exigences en matière de maintenance et à sa robustesse opérationnelle [4].

Dans ce contexte, ce travail présente le développement d'un outil numérique d'aide à la décision, nommé SIM4ECO-INDUS, conçu en Python. Cet outil est capable de modéliser et simuler le fonctionnement des cycles ORC afin d'évaluer leurs performances dans des conditions industrielles variées. Il permet également d'identifier les fluides de travail les plus adaptés pour maximiser les performances des ORC et d'évaluer le potentiel de production d'hydrogène à l'aide d'électrolyseurs. Par ailleurs, il offre aux industries une vision claire et exploitable des solutions viables pour optimiser leurs processus énergétiques.

Ce développement constitue une aide précieuse pour les industriels, en facilitant l'intégration efficace de systèmes ORC dans leurs installations et en promouvant une gestion énergétique plus durable et économique. La plateforme SIM4ECO-INDUS propose ainsi une solution numérique innovante pour guider les industriels dans la valorisation de la chaleur fatale. Cet article détaille les caractéristiques de l'outil, les principes méthodologiques qui ont été adoptés ainsi que les résultats d'études de cas appliquées.

2. Principe et architecture de la plateforme

2.1. Principe général

La plateforme SIM4ECO-INDUS a été conçue pour modéliser et simuler des cycles de récupération de chaleur, notamment le cycle organique de Rankine (ORC). Elle s'appuie sur des principes thermodynamiques pour convertir la chaleur fatale en électricité ou en énergie mécanique, en utilisant des fluides organiques à bas point d'ébullition. Ce cadre méthodologique permet d'optimiser les performances énergétiques et environnementales des installations industrielles, tout en tenant compte des spécificités des sources de chaleur disponibles.

2.1.1. Cycle de récupération de chaleur : Fonctionnement du cycle ORC

Le cycle ORC repose sur quatre étapes principales, chacune correspondant à une transformation thermodynamique définie (figure 1 et 2) [5] :

- **Chauffage** (Transformation isobare) (4-1) : le fluide est introduit à haute pression dans un évaporateur, où il est chauffé à pression constante jusqu'à devenir vapeur.
- **Expansion** (Transformation isentropique) (1-2) : la vapeur haute pression se détend dans une turbine, convertissant l'énergie thermique en énergie mécanique

- **Condensation** (Transformation isobare) (2-3) : la vapeur se condense à pression constante, rejetant la chaleur dans une source froide.
- **Pompage** (Transformation isentropique) (3-4) : le fluide est comprimé à haute pression avant d'être réchauffé.

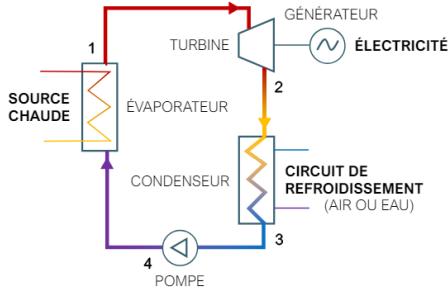


Figure 1 : Composants du cycle ORC

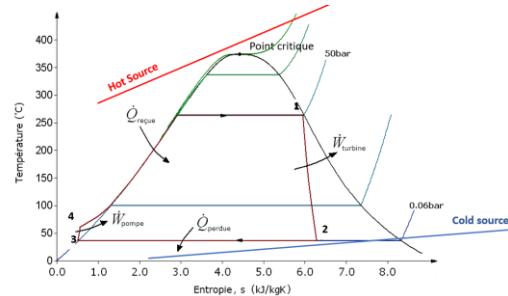


Figure 2 : Diagramme Température – Entropie

Pour évaluer les performances du cycle de récupération de chaleur ainsi que le gain potentiel après la valorisation, un bilan énergétique détaillé a été intégré dans la plateforme développée. Le tableau 1 présente un aperçu des puissances absorbées et dissipées par le cycle, exprimées en kilowatts (kW), en respectant les principes thermodynamiques fondamentaux.

Désignation	Bilan	Description
$\dot{Q}_{\text{évac}}$	$\dot{m} (h_1 - h_4)$	(1) Puissance fournie à l'évaporateur
\dot{Q}_{cond}	$\dot{m} (h_2 - h_3)$	(2) Puissance rejetée par le condenseur
\dot{W}_p	$\dot{m} (h_4 - h_3)/\eta_p$	(3) Puissance consommée par la pompe
\dot{W}_t	$\dot{m} \eta_t (h_1 - h_2)$	(4) Puissance produite par la turbine
\dot{W}_{cy}	$\dot{W}_t - \dot{W}_p$	(5) Puissance nette du cycle
\dot{W}_e	$\eta_g \times \dot{W}_t$	(6) Puissance électrique générée

Tableau 1 : Équations fondamentales et bilan énergétique des systèmes ORC [6]

où \dot{m} est le débit massique en (kg/s) et $\sum_{i=0}^4 h_i$ sont les enthalpies aux états respectifs en (kJ/kg); Les rendements de la pompe (η_p), de la turbine (η_t), et du générateur (η_g) sont respectivement considérés pour simuler un cycle réel, ce qui permet de prendre en compte les pertes d'efficacité dues aux irréversibilités thermodynamiques.

2.1.2. Fluides organiques : Sélection et critères de performance

Les fluides caloporteurs organiques jouent un rôle central dans les cycles ORC en assurant le transfert de chaleur d'une source à basse ou moyenne température vers le cycle thermodynamique, influençant ainsi l'efficacité, la récupération énergétique et la rentabilité [7].

Leur sélection repose sur des critères thermodynamiques, environnementaux et économiques. Des paramètres tels que la courbe de saturation et la plage de températures impactent la conception et l'adaptation des cycles aux sources disponibles, garantissant ainsi une efficacité optimale. Le tableau 2 résume les principaux critères de sélection optimaux.

Critères	Description
Sureté	Non toxique, non corrosif, non inflammable (classe ASHRAE)
Stabilité	Stable à haute température pour éviter la décomposition chimique
Pression	Fonctionne à des pressions adaptées sans équipement coûteux
Disponibilité & Coût	Disponible sur le marché à un coût raisonnable
Respect de l'environnement	Conforme aux réglementations de la destruction de la couche d'ozone (ODP) et le réchauffement climatique (GWP)

Tableau 2 : Critères de sélection des fluides organiques

2.1.3. Analyse des performances des électrolyseurs et production d'hydrogène

La plateforme SIM4ECO-INDUS inclut un module entièrement développé et implémenté, permettant d'analyser les performances des électrolyseurs dans le cadre de la valorisation énergétique. Ce module exploite l'électricité produite par le cycle ORC pour quantifier la production d'hydrogène à l'aide de technologies d'électrolyse éprouvées et avancées, telles que l'électrolyse alcaline (ALK) et les membranes échangeuses de protons (PEM).

L'outil offre une simulation complète pour estimer la quantité d'hydrogène produite en fonction des conditions opérationnelles du cycle ORC et des caractéristiques spécifiques des électrolyseurs. Chaque type d'électrolyseur (ALK et PEM) est modélisé à l'aide de relations mathématiques distinctes décrivant leur fonctionnement et leur rendement.

Les modèles empiriques d'un électrolyseur alcalin, largement documentés dans la littérature, ont été utilisés pour élaborer le modèle théorique [8]. La tension de fonctionnement d'une cellule d'électrolyse, U_E , dépend de la température de fonctionnement T_E et de la surface active de la cellule A_E (Eq.7).

$$U_E = U_{rev} + \frac{r_1 + r_2 \cdot T_E}{A_E} \cdot I_E + (s_1 + s_2 \cdot T_E + s_3 \cdot T_E^2) \cdot \log \left(\frac{t_1 + t_2/T_E + t_3/T_E^2}{A_E} \cdot I_E + 1 \right) \quad (7)$$

Où les paramètres du modèle empirique sont : $r_1 = 7.331e-5 \Omega \cdot m^2$; $r_2 = -1.107e-7 \Omega \cdot m^2 \cdot ^\circ C^{-1}$; $s_1 = 1.586 e-1 \text{ V}$; $s_2 = 1.378e-3 \text{ V}^\circ C^{-1}$; $s_3 = -1.606e-5 \text{ V}^\circ C^{-2}$; $t_1 = 1.599e-2 \text{ A}^{-1} \cdot m^2$; $t_2 = -1.302 \text{ A}^{-1} \cdot m^2 \cdot ^\circ C$; $t_3 = 421.3 \text{ A}^{-1} \cdot m^2 \cdot ^\circ C^2$

Le courant traversant l'électrolyseur est calculé comme suit (Eq.8) :

$$I_E = \frac{\eta_g \cdot P_{ORC}}{U_E \cdot N_{EC}} \quad (8)$$

où P_{ORC} représente la puissance issue du cycle ORC et N_{EC} le nombre de cellules connectées.

Le taux de production d'hydrogène, $\dot{n}_{E,H2}$, est basé sur la quantité de courant traversant l'électrolyseur ainsi que sur son efficacité de Faraday E_F (Eq.9)

$$\dot{n}_{E,H2} = E_F \cdot \frac{N_{EC} \cdot I_E}{2 \cdot F} \quad (9)$$

Le modèle mathématique pour l'électrolyseur PEM repose sur la densité J , la tension de cellule U_{cell} , et la surface de la cellule A_{cell} [9]. La puissance électrique est exprimée par :

$$P_{PEM} = \eta_i \cdot P_{ORC} = J \cdot U_{cell} \cdot A_{cell} \quad (10)$$

La tension de la cellule U_{cell} est composée du potentiel réversible V_0 , de la surtension ohmique V_{ohm} , et de la surtension d'activation $V_{act,i}$

$$U_{cell} = V_0 + V_{ohm} + V_{act,i} \quad (11)$$

Le débit molaire d'hydrogène est estimé comme suit (Eq. 12), avec F la constante de Faraday

$$\dot{n}_{E,H2} = \frac{J}{2 \cdot F} \quad (12)$$

2.2. Approche et architecture de la plateforme

2.2.1. Hypothèses de calcul

Le modèle ORC étudié (figure 2) est basé sur une configuration simplifiée comportant une pompe et une turbine isentropiques. Les principales hypothèses sont les suivantes :

- Régime permanent : les conditions opératoires (température, pression, débit) sont supposées constantes dans le temps.
- Fluide de travail incompressible en phase liquide : en phase liquide uniquement (lors du pompage), le fluide est supposé incompressible afin de simplifier le calcul de l'énergie mécanique fournie. Cette hypothèse ne s'applique pas lors des changements de phase.
- Configuration simplifiée : le modèle intègre un évaporateur classique (transformation du fluide en vapeur saturée) et un condenseur (retour à l'état liquide), sans prise en compte de sous-refroidissement ou de surchauffe avancée.

2.2.2. Approche d'analyse

L'évaluation des performances repose sur l'analyse 3E (énergétique, exergétique et environnementale). Cette approche garantit une optimisation énergétique tout en assurant la viabilité environnementale.

- Énergétique : Détermine l'efficacité de conversion de l'énergie thermique en travail utile.
- Exergétique : Identifie les pertes irréversibles et optimise les performances du cycle.
- Environnementale : Évalue l'impact des fluides de travail via les indicateurs ODP (potentiel de destruction de l'ozone) et GWP (potentiel de réchauffement global).

2.2.3. Architecture de la plateforme

La modélisation et l'analyse des cycles de récupération de chaleur fatale reposent sur un ensemble d'outils logiciels :

- Python : Langage principal pour le développement et la simulation.
- CoolProp : Bibliothèque thermodynamique pour le calcul des propriétés des fluides.
- Dash & Plotly : Visualisation interactive et dynamique des résultats.
- Pandas & Numpy : Traitement et manipulation des données.

2.2.4. Fonctionnalités de la plateforme

SIM4ECO-INDUS propose une interface intuitive pour évaluer simultanément l'efficacité énergétique, les impacts environnementaux et les performances exergétiques des processus industriels.

Cette interface offre les fonctionnalités suivantes :

- Identifier les flux de chaleur fatale pour optimiser la récupération d'énergie.
- Configurer et simuler les cycles ORC, en modélisant les processus thermodynamiques et en adaptant les paramètres opérationnels.
- Identifier le fluide optimal, en comparant les performances des conditions d'exploitation.
- Évaluer la production d'hydrogène via des électrolyseurs adaptés.
- Analyser les performances via l'approche 3E, en intégrant des indicateurs énergétiques, exergétiques et environnementaux.
- Visualiser les résultats de manière interactive, avec des graphiques dynamiques.

3. Résultats et discussions

3.1. Validation des modèles : cycle de récupération de chaleur et production d'hydrogène

3.1.1. Modèle du cycle de récupération de chaleur (étude de cas : usine d'aluminium)

Une usine de production d'aluminium utilise des cellules de réduction électrolytique à haute température (940 - 980 °C), consommant environ 10 kWh/kg d'aluminium produit (figure 3). Environ 35 % de cette énergie est dissipée sous forme de chaleur dans les gaz de combustion et l'air de refroidissement de la coque. Ces flux thermiques sont exploités pour alimenter un cycle ORC, convertissant la chaleur récupérée en électricité (figure 4).

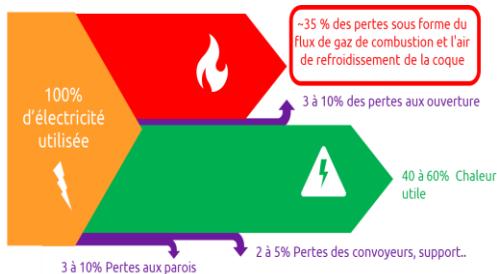


Figure 3 : Bilan thermique des fours d'usine

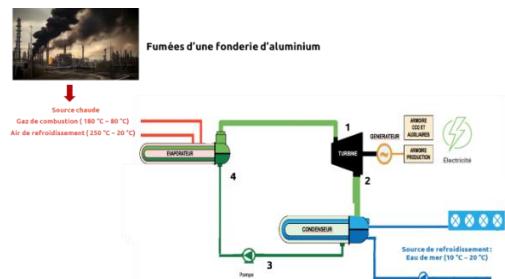


Figure 4 : Cycle de récupération de chaleur

L'outil de simulation a permis de modéliser le système en considérant une chaleur fatale totale absorbée par l'évaporateur de 16 MW, calculée en fonction des capacités thermiques respectives des deux flux : 79 kW/K pour les gaz d'échappement des cellules (H1), refroidis de 180 °C à 80 °C, et 34,51 kW/K pour l'air de refroidissement du pot (H2), dont la température passe de 250 °C à 20 °C [10]. Ces deux sources fournissent chacune environ 7,9 MW de puissance, utilisées comme chaleur d'entrée du cycle ORC. La puissance nette du cycle dépend des rendements adoptés : un rendement isentropique de 0,80 pour la turbine, un rendement hydraulique de 0,80 pour la pompe, et une efficacité pour le générateur de 0,90. La figure 5 compare la puissance nette obtenue par simulation avec les données de référence [10], mettant en évidence une bonne concordance entre les deux jeux de résultats, avec une erreur relative inférieure à 1,8 %. Ces écarts mineurs s'expliquent principalement par l'utilisation de package thermodynamique différentes (CoolProp dans notre modèle contre RefProp dans la référence).

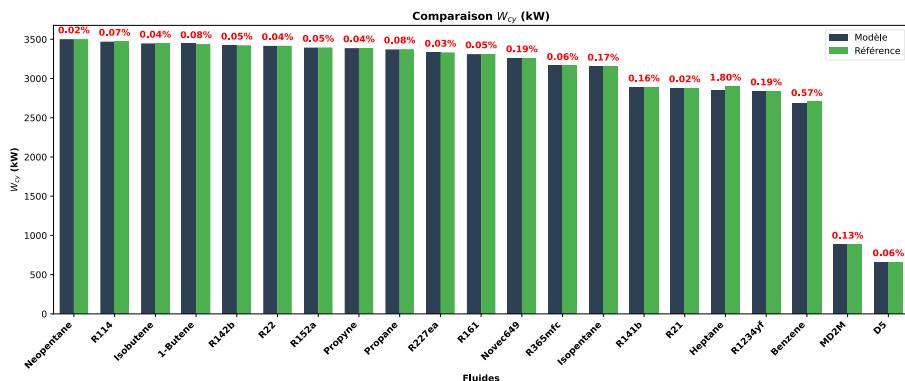


Figure 5 : Comparaison entre les puissances nettes du cycle (Modèle vs Référence)

3.1.2. Validation des modèles de production d'hydrogène

Le modèle alcalin a été confronté à celui de la référence [11], en supposant que l'intégralité de la puissance générée par l'ORC soit dédiée à l'électrolyse alcaline. Les résultats obtenus montrent une forte corrélation (figure 6). Bien que la quantité d'hydrogène produite semble faible, il convient de noter que cette configuration vise avant tout à valider la robustesse du modèle. Pour ce faire, les mêmes conditions que celles de la référence ont été reproduites,

permettant ainsi une comparaison directe. Concernant le modèle PEM, la validation repose sur la courbe (J-V) d'une cellule d'électrolyse, comparée aux données de référence [12], avec une divergence maximale de 5 % pour les densités de courant inférieures à 1000 A/m² (figure 7).

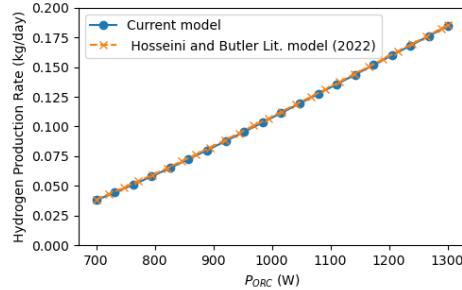


Figure 6 : Validation du modèle Alkaline

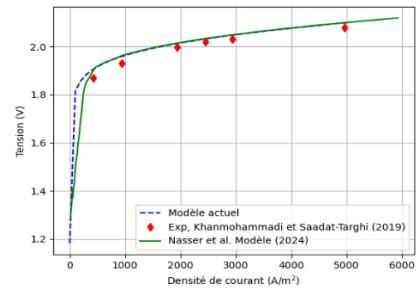


Figure 7 : Validation du modèle PEM

3.2. Simulation d'un cas d'utilisation sur Sim4Eco-Indus

La première étape consiste à identifier les flux de chaleur fatale. L'utilisateur choisit le nombre de flux de chaleur et définit leurs caractéristiques : température (entrée et sortie), débit et chaleur massique (Cp). L'interface calcule automatiquement la quantité totale de chaleur fournie. La valeur de 9068 kW a été calculée en fonction du cas test de l'utilisateur et des paramètres qu'il a définis (figure 8). Dans l'étape suivante, l'utilisateur configure le cycle de récupération ORC. Il sélectionne le fluide de travail, définit la configuration du cycle, choisit un électrolyseur et détermine le pourcentage d'énergie électrique utilisé pour la production d'hydrogène (figure 9). Une fois ces paramètres définis, la simulation peut être lancée.

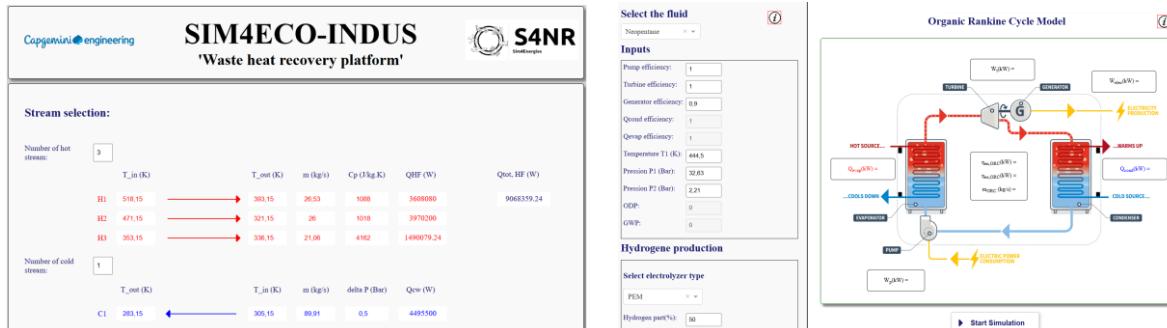


Figure 8 : Identification et quantification des flux de chaleur fatale

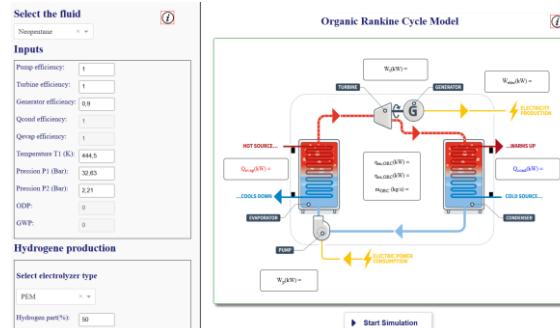


Figure 9 : Configuration du cycle de récupération de chaleur et de l'électrolyseur

Enfin, la troisième étape est dédiée à la présentation des résultats. Une fois la simulation achevée, l'interface permet de visualiser les résultats à différents niveaux. Une section spécifique affiche le graphique du cycle Rankine du fluide, tandis qu'une autre présente les performances thermodynamiques de la simulation (figure 10).

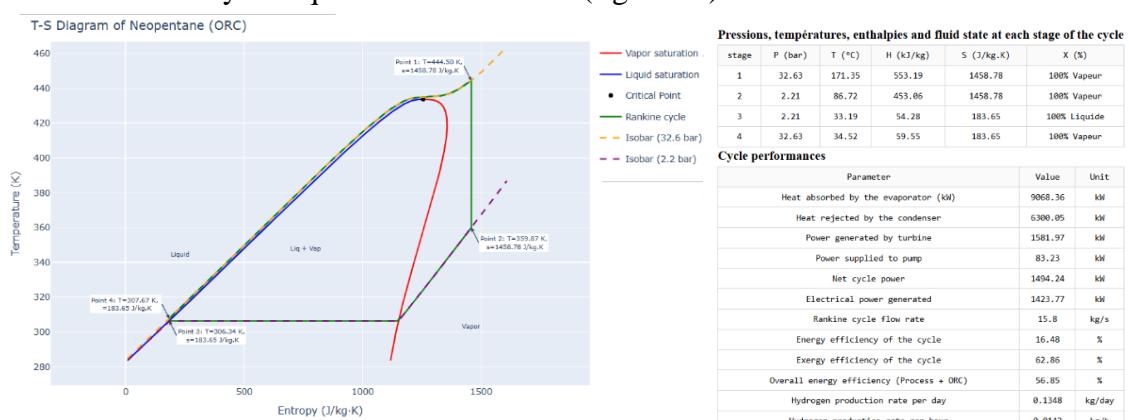


Figure 10 : Visualisation des performances thermodynamiques et du cycle Rankine

Une section historique permet également de visualiser l'ensemble des simulations effectuées sous forme de radar diagramme et de comparer la performance des différents fluides utilisés (figure 11).

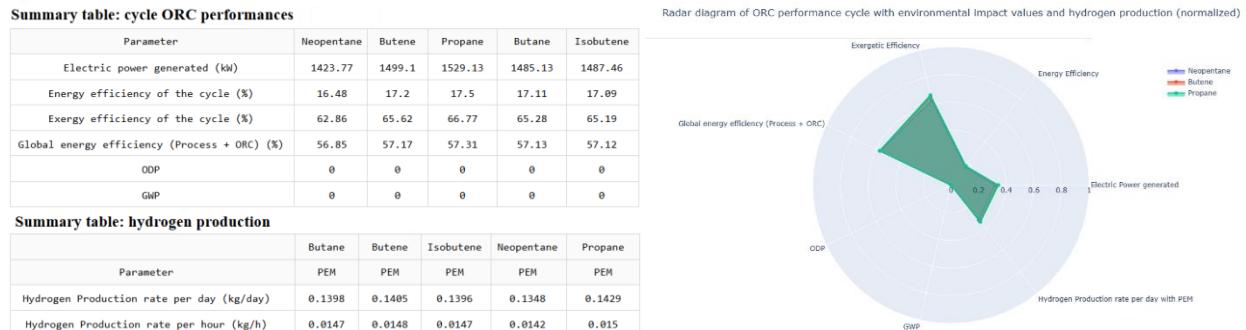


Figure 11 : Rubrique historique et comparaison des résultats de simulation

4. Conclusion

L'interface SIM4ECO-INDUS constitue une solution innovante pour la valorisation de la chaleur fatale industrielle, en intégrant une approche 3E qui optimise simultanément l'efficacité énergétique, l'exergie et l'impact environnemental. Cet outil d'aide à la décision facilite non seulement l'amélioration des performances énergétiques, mais contribue également à la décarbonation et à la résilience des processus industriels. À l'avenir, l'intégration de modèles économiques et d'analyses de cycle de vie permettra d'affiner encore davantage les stratégies d'optimisation, offrant ainsi une approche globale et durable pour l'industrie. De plus, le déploiement de la plateforme sur des secteurs industriels variés permettra d'évaluer son adaptabilité et d'enrichir ses bases de données. Une interface utilisateur encore plus interactive et personnalisable pourrait également améliorer l'expérience des ingénieurs et des décideurs. Enfin, l'ajout de modules d'intelligence artificielle offrirait des recommandations optimisées en temps réel, renforçant ainsi son rôle stratégique dans la transition énergétique.

Références

- [1] ADEME, "Statistiques sur la chaleur fatale industrielle en France," 2022.
- [2] International Energy Agency (IEA), Waste Heat Recovery, 2021.
- [3] European Commission, Industrial Heat Recovery Strategies for Decarbonization, 2022.
- [4] Quoilin, S., Declaye, S., & Lemort, V., Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle systems in waste heat recovery, *Applied Thermal Engineering*, 2013.
- [5] Patel, B., & Kumar, P., Organic Rankine Cycle Technology for Heat Recovery: Thermodynamic and Economic Perspectives. *Energy Conversion and Management*, 2016.
- [6] Smith, I. W., Brown, J., & Wilson, K. P. Thermodynamic Modeling and Performance Evaluation of Organic Rankine Cycles for Waste Heat Recovery, *Journal of Applied Thermodynamics*, 2018.
- [7] Bao, J., & Zhao, L. A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013.
- [8] Ulleberg, Ø. Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2003.
- [9] Ayabadi, M. R. et al. Mathematical modeling and performance assessment of proton exchange membrane (PEM) electrolyzers for hydrogen production: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021.
- [10] Castelli, A et al. Optimization of organic Rankine cycles for waste heat recovery from aluminum production plants. *Frontiers in Energy Research*, 2019.
- [11] S. E. Hosseini et al. Design and analysis of a hybrid concentrated photovoltaic thermal system integrated with an ORC for hydrogen production, *J. Therm. Anal. Calorim*, 2021.
- [12] M. Nasser et H. Hassan, Green hydrogen production mapping via large scale water electrolysis using hybrid solar, wind, and biomass energies systems: 4E evaluation, *Fuel*, 2024.