

Disponibilité industrielle des AHT pour la production de vapeur surchauffée par valorisation de chaleur fatale.

Industrial availability of AHT for the production of superheated steam from waste heat.

Anouk MULLER^{1*}

¹Université Grenoble Alpes, CEA-LITEN, DTCH

F-38000 Grenoble

*(auteur correspondant : anouk.muller@cea.fr)

Résumé - La technologie AHT, distincte des pompes à chaleur à absorption classiques, souffre d'un déploiement lent et est méconnue des industriels. Sur la base d'un cas d'étude issu de l'industrie pétrochimique, plusieurs fournisseurs d'AHT ont été identifiés et consultés. L'analyse des données fournies par ces fournisseurs a permis de synthétiser quelques éléments sur les performances des AHT et d'étudier leur capacité à répondre au besoin de vapeur industrielle à 180°C en valorisant une source de chaleur fatale de 80°C à 100°C.

Abstract - AHT technology, which differs from conventional absorption heat pumps, has been slow to take off and is little known to manufacturers. Based on a case study from the petrochemical industry, several AHT suppliers were identified and consulted. Analysis of the data provided by these suppliers enabled us to summarise a number of points regarding the performance of AHTs and to study their ability to meet the need for industrial superheated steam at 180°C by using a source of waste heat at 80°C to 100°C.

Nomenclature

Q Puissance thermique, MW
 W Puissance électrique, MW

1. Introduction

En 2017, l'ADEME évaluait le gisement national de chaleur fatale industrielle à 109,5 TWh [1]. Cette chaleur, émise par divers équipements et procédés, est dissipée dans l'environnement sans être exploitée, parfois même avec un coût de refroidissement important. Pourtant, elle constitue une ressource énergétique considérable qui, si elle est correctement récupérée et réutilisée, peut réduire les besoins en énergie primaire, diminuer les émissions de gaz à effet de serre et générer des économies substantielles pour les entreprises. La mise en œuvre de solutions technologiques adaptées pour capter et valoriser cette chaleur fatale est donc un enjeu majeur pour l'industrie moderne, en quête d'une plus grande durabilité et de compétitivité.

Lorsque la température des effluents captés s'avère trop basse pour répondre aux besoins de chaleur identifiés, la stratégie de valorisation peut s'orienter vers une remontée du niveau thermique. A cet effet, l'Absorption Heat Transformer (AHT, ou pompe à chaleur à absorption de type 2) se distingue par sa capacité à rehausser la température de la chaleur fatale au prix

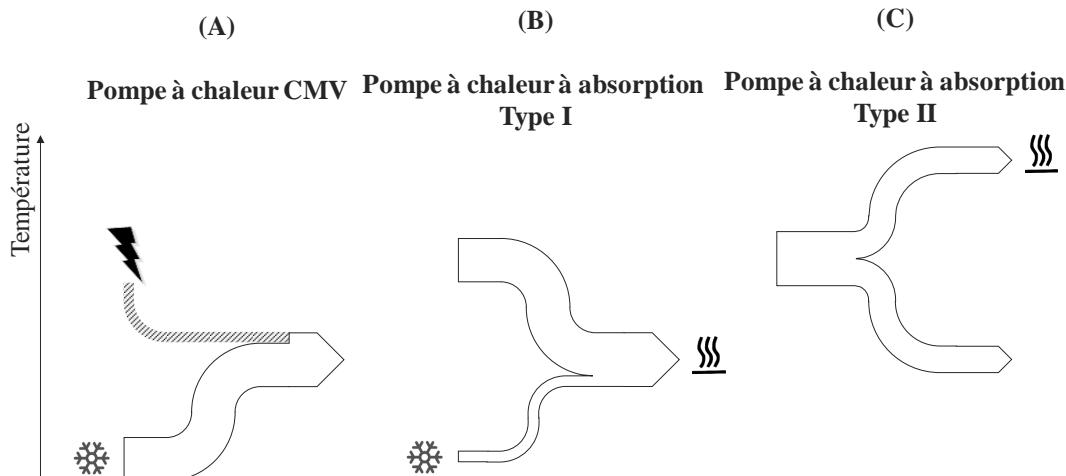
d'une consommation électrique minimale [2], offrant ainsi une alternative encore méconnue aux pompes à chaleur à compression mécanique de vapeur (PAC-CMV) ou la recompression mécanique de vapeur (RMV).

Cependant, il existe peu de retours d'expérience documentés sur l'intégration d'AHT dans un contexte industriel. Un état des lieux est pourtant indispensable pour soutenir les industriels dans leurs choix technologiques. Dans ce contexte, une étude de cas issu du secteur pétrochimique a été menée pour évaluer la faisabilité technique de l'intégration d'un AHT sur un site industriel existant. L'ambition est de répondre à un besoin interne en vapeur surchauffée, vecteur énergétique essentiel pour de nombreux processus industriels, en valorisant des effluents de vapeur polluée en sortie de process. Plus largement, cette étude a permis d'évaluer la disponibilité sur le marché actuel d'AHT en mesure de répondre au besoin industriel de production de vapeur surchauffée (180°C) à partir d'effluents à moyenne température (80 à 100°C).

2. Introduction à la technologie AHT

Cette étude se penche sur la technologie de la pompe à chaleur à absorption de type II, également appelée AHT pour Absorption Heat Transformer.

Comme la PAC à absorption de type 1 (Figure 1 (B)), l'AHT (Figure 1 (C)) utilise deux niveaux de chaleur : une source chaude et un rejet tiède. Les deux machines se distinguent par leur effet : la PAC de type 1 permet de créer un effet froid à une température inférieure à la température de rejet, tandis que la PAC de type 2 permet de produire un effet chaud à une température supérieure à la température de source.



La Figure 2 représente de façon simplifiée le fonctionnement classique d'un AHT.

1. Evaporateur : la chaleur fatale fait évaporer le fluide frigorigène.
2. Absorbeur : la vapeur rentre en contact avec l'absorbant (solution pauvre). Il s'ensuit une réaction d'absorption, exothermique, qui produit l'effet utile chaud. Le produit de cette réaction est la solution riche.
3. Générateur : la chaleur fatale permet de séparer des deux composants du fluide riche par évaporation du fluide frigorigène.

4. Condenseur : la vapeur est condensée par l'eau de refroidissement, puis pompée jusqu'à l'évaporateur
5. La solution pauvre est éventuellement purgée de ses gaz et pompée dans l'absorbeur

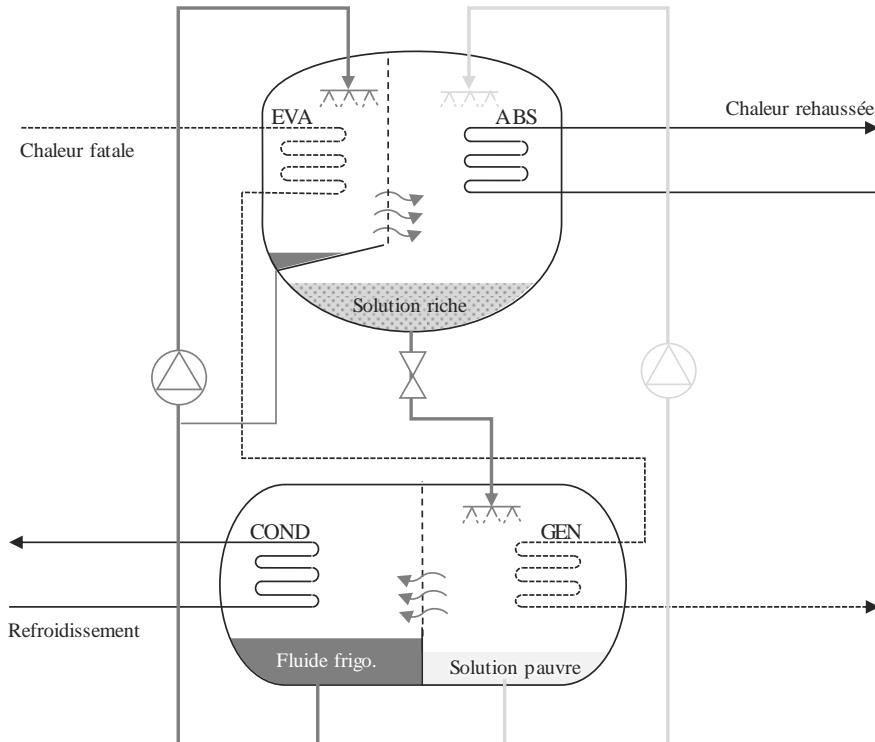


Figure 2 : Schéma de fonctionnement d'un AHT. Représentation CEA.

3. Acteurs actuels et aspects différenciant de leur offre technique

Un panorama des fournisseurs actuels d'AHT a été dressé, avec l'objectif d'identifier les acteurs capables de proposer une réponse technique répondant aux contraintes suivantes :

- Valorisation de chaleur fatale disponible sur un flux pollué entre 80 et 100°C
- Objectif : production de vapeur surchauffée à 180°C pour 4,5 barG afin d'alimenter un réseau de vapeur existant
- Refroidissement par réseau d'eau en régime 22/25°C

Les acteurs ayant contribué aux installations identifiées entre 1981 et 2013 [2], notamment Hitachi, GEA et Tokyo Sanyo Electric Co. Ltd. ont cessé de proposer les AHT dans leur portfolio. Depuis 2013, les installations industrielles recensées sont fournies par deux groupes, Ebara-ERSC et Thermax Ltd, qui ont été rejoints sur le marché de l'AHT par trois acteurs : Shuangliang, World Energy, Hope Deepblue.

On constate que l'expertise AHT est présente en Asie, particulièrement en Chine. L'offre se concentre sur le couple eau/bromure de lithium. La seule offre identifiée d'AHT utilisant le couple ammoniac/eau concerne la société allemande ago GmbH, les températures atteignables ne correspondant pas à l'objectif du projet.

Deux caractéristiques différencient techniquement les offres reçues : la capacité de travailler directement sur un flux de chaleur pollué et l'architecture (simple ou bi-étagée) du cycle.

Le Tableau 1 ci-dessous récapitule les fournisseurs actuels identifiés et les points différenciant de leur offre.

	Intégration amont	Cycle	Remarque
Thermax	Indirecte	Simple	
Shuangliang	Indirecte	Simple	
World Energy	Directe	Simple	
Ebara-ERSC	Indirecte	Bi-étagée	
Hope Deepblue	Indirecte	Simple	Limitation en température par défaut de certification DESP

Tableau 1 : *Synthèse des offres techniques*

Dans le cadre de l'étude, les fournisseurs ont été consultés sur plusieurs hypothèses d'intégration prenant en compte leurs contraintes d'intégration amont. En particulier, plusieurs hypothèses de puissance ont été testées, allant d'une unité pilote (0,5 MW chaud) à une hypothèse maximaliste (18 MW de chaleur fatale disponible en entrée).

4. Intégration énergétique

4.1. Périmètre 1 - AHT seul

Le périmètre 1 tel que représenté à la Figure 3 ne contient que l'AHT. Il s'agit de répondre à la question : "Une machine AHT seule peut-elle répondre au besoin exprimé ?".

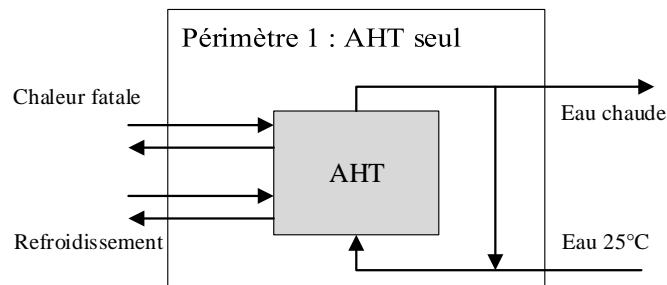


Figure 3 : Périmètre 1

En théorie, la température en sortie d'AHT peut atteindre des températures supérieures à 165°C. En pratique, dépasser cette température pose des risques importants. En effet, à des températures élevées, la solution de bromure de lithium utilisée dans les AHT devient très corrosive, et les inhibiteurs usuels tolèrent mal les hautes températures. De plus, le risque de cristallisation augmente avec l'élévation des températures de travail [2].

La température atteignable en sortie d'AHT dépend de la température de sortie de la chaleur fatale et de la température de refroidissement, et du cycle mis en oeuvre. Dans le cas d'une utilisation directe du flux de chaleur (100°C/80°C), l'AHT à cycle simple peut produire de l'eau chaude saturante à environ 139°C. Dans le cas d'une utilisation indirecte, qui implique un transfert de la chaleur fatale sur un medium intermédiaire et donc une baisse de la température sous forme de pincement à l'échangeur fixée à 10K (90°C/75°C), l'AHT à cycle simple peut produire à environ 133°C, tandis que l'AHT à cycle bi-étageé permet d'atteindre une température de sortie de 163°C.

Les AHT sont conçus pour produire de l'eau surchauffée. Il n'y a actuellement pas d'offre pour une production de vapeur par l'AHT.

L'intégration énergétique de l'AHT est contrainte par les faibles différences de températures acceptables aux échangeurs. La température à laquelle le flux de chaleur fatale est refroidi par l'AHT doit être aussi élevée que possible pour maximiser la température de production ; elle ne peut être inférieure à environ 70°C. L'AHT ne permet donc pas de valoriser un flux de chaleur fatale sur une large plage de température. Cela signifie qu'il est particulièrement adapté pour valoriser l'énergie latente issue de la condensation d'effluents gazeux, mais ne permet pas de valoriser l'énergie issue du refroidissement jusqu'à température ambiante d'effluents liquides. De même, au niveau de la production, la température d'entrée de l'eau d'alimentation est maintenue à environ 10K de la température de production visée. Cela implique a minima un mélange en sortie d'AHT, avec un débit de recirculation conséquent.

Le COP thermique de l'AHT est défini comme suit :

$$COP_{th,AHT} = \frac{Q_{rehaussée}}{Q_{chaleur fatale, utile}} \quad (1)$$

La consultation a permis de confirmer l'hypothèse classique d'un $COP_{th,AHT}$ entre 0,45 et 0,5 pour un cycle simple et 0,3 pour les cycles bi-étage. Cela signifie que les systèmes de récupération de chaleur fatale impliquant un AHT permettent de valoriser jusqu'à 50% de la chaleur fatale sur la plage de travail.

La consommation électrique des AHT est réputée faible car les consommateurs se limitent à deux (parfois trois) pompes. Cet aspect a été confirmé par l'étude. En effet, l'ordre de grandeur de la consommation électrique d'un AHT simple est estimé à une dizaine de $kW_{électrique}/MW_{chaud}$, plusieurs dizaines de $kW_{électrique}/MW_{chaud}$ pour un AHT bi-étage (Figure 4).

Le CAPEX d'un AHT simple (Figure 5) peut être approché par l'équation (2) :

$$CAPEX_{AHT} = 93825 + Q_{rehaussée} * 147532 \quad (2)$$

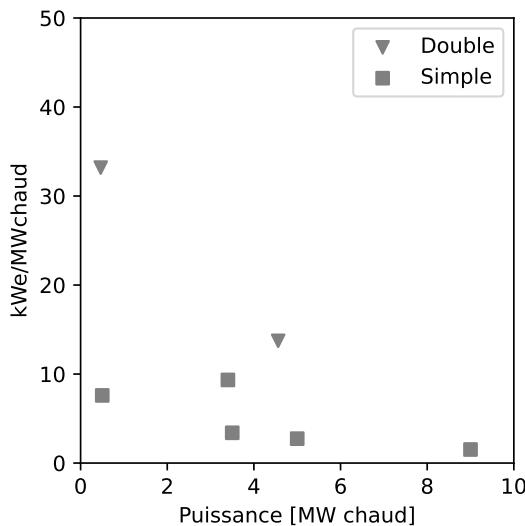


Figure 4 : Consommation électrique

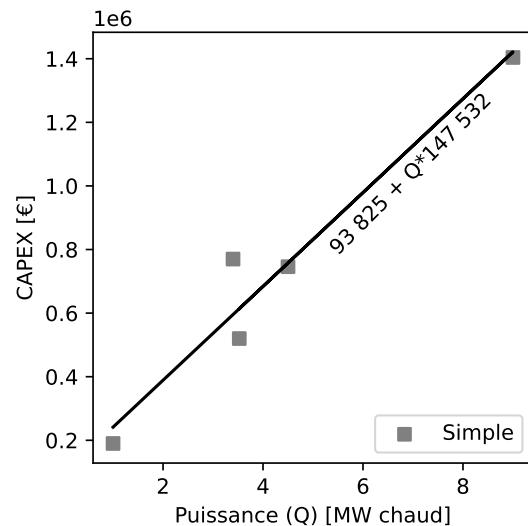


Figure 5 : CAPEX

4.2. Périmètre 2 - Technologies complémentaires

Le périmètre 2 comprend des technologies complémentaires qui sortent du domaine de l'AHT. Deux technologies ont été incluses dans cette étude : la compression mécanique de vapeur

(CMV) et le bouilleur électrique (*e-boiler*). Ces technologies permettent d'atteindre un niveau de qualité de vapeur supérieur, à savoir de la vapeur surchauffée, au prix d'une consommation électrique significative. Le périmètre inclut également le refroidissement par aérocondenseurs des flux "chaleur fatale" et "eau de refroidissement" en sortie d'AHT.

4.2.1. Compression mécanique de vapeur (CMV)

On considère la production de vapeur saturée par flash, puis une compression de cette vapeur par CMV afin d'obtenir une vapeur surchauffée (180°C pour 4,5 barG) (Figure 6).

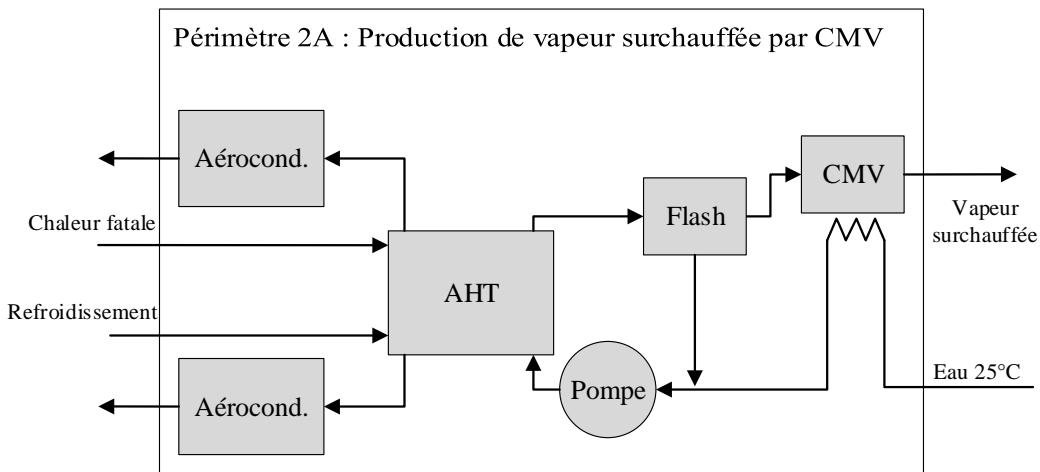


Figure 6 : Périmètre 2A

La production de vapeur par procédé flash est un phénomène thermodynamique où un liquide saturant, préalablement mis sous pression grâce à une pompe, subit une détente rapide, provoquant ainsi une vaporisation instantanée d'une partie du liquide. Un réservoir permet ensuite de séparer la phase vapeur produite de la phase liquide. Il s'agit donc d'un équipement passif, dont la consommation électrique se limite aux auxiliaires, notamment les pompes de circulation. Ce procédé est couramment utilisé dans les systèmes industriels, il est bien connu des fournisseurs d'AHT, qui se tournent naturellement vers lui pour répondre au besoin de vapeur exprimé lors de la consultation. Certains fournisseurs incluent le flash tank dans le calcul de pré-dimensionnement, tout en l'excluant du périmètre de fourniture.

Cependant, la limite rencontrée avec l'utilisation d'un flash tank est que la vapeur produite est saturée et non surchauffée. Sa pression et sa température sont nécessairement inférieures à ceux en sortie d'AHT. L'étape finale de compression peut être effectuée intégrant un compresseur de vapeur. L'augmentation de température rend nécessaire le refroidissement du compresseur, cette chaleur excédentaire pouvant être utilisée pour préchauffer l'eau d'alimentation.

4.2.2. Bouilleur électrique

Actuellement, la vapeur surchauffée nécessaire à l'industrie est généralement produite à l'aide d'un bouilleur alimenté par des énergies fossiles, souvent du gaz. Il est envisageable de remplacer cet équipement par un bouilleur électrique, dans lequel le chauffage puis la vaporisation sont obtenues grâce à des résistances électriques ou des systèmes de chauffage par induction (Figure 5).

Dans ce cas, l'AHT ne contribuera que très partiellement à la consommation énergétique

totale. En effet, l'AHT ne couvre que la préchauffe (chaleur sensible, environ 10% de l'énergie nécessaire), tandis que la vaporisation (chaleur latente) et la surchauffe (chaleur sensible) sont couverts par le bouilleur électrique et représentent environ 90% de l'énergie nécessaire.

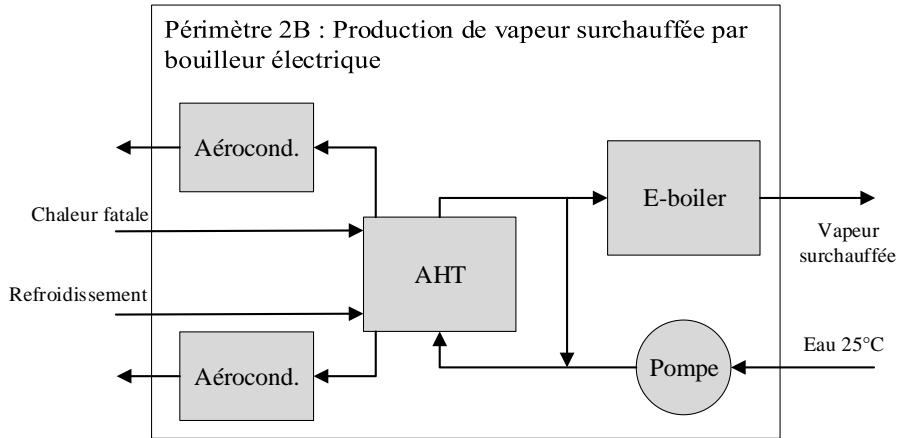


Figure 7 : Périmètre 2B

4.2.3. Grandes caractéristiques

La Figure 8 représente les puissances électriques des systèmes complets. La consommation électrique de l'AHT s'avère négligeable face à celles des auxiliaires. La préchauffe de l'eau d'alimentation d'un bouilleur électrique permet de réduire la contribution électrique d'une tonne/h de vapeur à environ 650 kW, soit 87% du total, avec une puissance pouvant être maximisée. L'utilisation de la CMV en complément de l'AHT se traduit quant à elle par une plus grande efficacité électrique (entre 100 et 200 kW électriques par tonne/h de vapeur produite) ; avec cependant une puissance limitée.

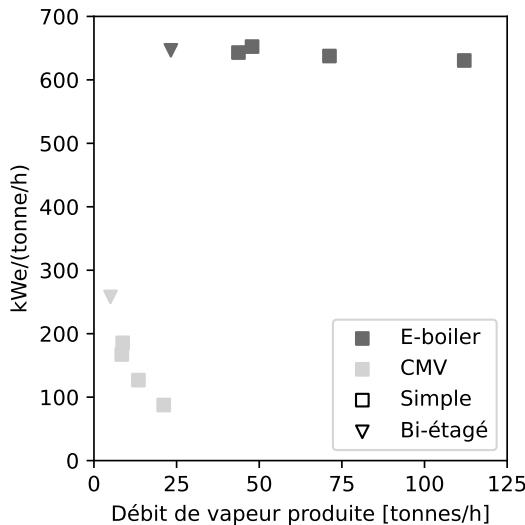


Figure 8 : Puissances énergétiques en jeu dans les périmètres 2A et 2B

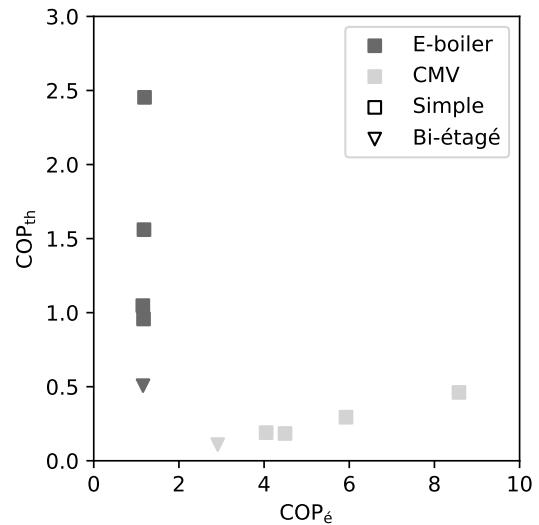


Figure 9 : COP thermiques et électriques pour les périmètres 2A et 2B

Le COP thermique du système est défini comme suit :

$$COP_{th,s} = \frac{Q_{vapeur}}{Q_{chaleur fatale}} \quad (3)$$

Le COP électrique du système est défini comme suit :

$$COP_{é,s} = \frac{Q_{vapeur}}{W_{AHT} + W_{Appoint} + W_{Aéro1} + W_{Aéro2}} \quad (4)$$

Les $COP_{th,s}$ et $COP_{é,s}$ sont représentés à la Figure 9. Le système 2A permet d'atteindre une efficacité électrique supérieure à 3 pour un cycle bi-étagé et entre 4 et 9 pour un cycle simple, avec un $COP_{th,s}$ restreint par le $COP_{th,AHT}$ à 0,5. Le système 2B permet d'augmenter légèrement le $COP_{é,s}$ au dessus de 1. Les $COP_{th,s}$ supérieurs à 0,45 sont alors dus à un apport d'énergie sous forme électrique, transformée en chaleur.

5. Conclusion

L'étude a permis de faire le point sur les fournisseurs actuels. Tous sont asiatiques, certains avec une expérience significative, d'autres arrivés plus récemment sur le marché. Les AHT proposés actuellements mettent en oeuvre le couple $H_2O/LiBr$ et produisent de l'eau surchauffée.

Les AHT peuvent réhausser un flux de chaleur avec une efficacité thermique proche de 50%, avec une consommation électrique propre d'une dizaine de watt par kilowatt de chaleur réhaussée. En considérant un système complété par un compresseur de vapeur, le $COP_{é,s}$ est supérieur à 3 et peut dépasser 6 avec une intégration directe sur le flux de chaleur fatale. En préchauffe de l'eau d'alimentation d'un bouilleur électrique, l'AHT permet de réduire d'environ 10% sa consommation électrique.

L'intégration d'un AHT sur site industriel doit prendre en compte les contraintes technologiques de l'équipement, comme les plages de température limitées et le besoin de refroidissement.

Pour la production de vapeur à haute densité énergétique, le couplage d'un AHT avec des technologies complémentaires (CMV, bouilleurs) est à investiguer avec des études plus précises.

Références

- [1] ADEME, La Chaleur Fatale, *Clés pour Agir*, 2017/09
- [2] Falk Cudok, Niccolò Giannetti, José L. Corrales Ciganda, Jun Aoyama, P. Babu, Alberto Coronas, Tatsuo Fujii, Naoyuki Inoue, Kiyoshi Saito, Seiichi Yamaguchi, Felix Ziegler, Absorption heat transformer - state-of-the-art of industrial applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141 (2021) 110757