



HAL
open science

ETUDE D'UN SYSTEME DE CLIMATISATION AVEC RECUPERATION DE CHALEUR POUR LE DESSALEMENT SOU MIS A DIFFERENTS CLIMATS

Paul Byrne, Wissam Morjane, Mostafa Dahbani, Thierry Maré

► To cite this version:

Paul Byrne, Wissam Morjane, Mostafa Dahbani, Thierry Maré. ETUDE D'UN SYSTEME DE CLIMATISATION AVEC RECUPERATION DE CHALEUR POUR LE DESSALEMENT SOUMIS A DIFFERENTS CLIMATS. Colloque IREEC2, 17 - 20 mars 2023, Hammamet, Tunisie, Mar 2023, Hammamet (Tunisie), Tunisia. <hal-04722591>

HAL Id: hal-04722591

<https://hal.science/hal-04722591v1>

Submitted on 5 Oct 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

ETUDE D'UN SYSTEME DE CLIMATISATION AVEC RECUPERATION DE CHALEUR POUR LE DESSALEMENT SOUMIS A DIFFERENTS CLIMATS

PAUL BYRNE, WISSAM MORJANE, MOSTAFA DAHBANI, THIERRY MARÉ
Laboratoire Génie Civil Génie Mécanique LGCGM, Université Rennes, Rennes, 35000, France
paul.byrne@univ-rennes.fr

RESUME

En raison du changement climatique et de la croissance de la population mondiale, le nombre de systèmes de climatisation augmente considérablement. En particulier dans les centres-villes, les condenseurs extérieurs rejettent de la chaleur et participent à l'effet d'îlot de chaleur urbain. Afin de réduire ce phénomène, une unité de récupération de chaleur pour le dessalement est couplée à la climatisation. La technique de dessalement est la distillation membranaire qui opère avec un gradient de pression de vapeur à travers une membrane microporeuse et hydrophobe. Le gradient de pression est généré par un gradient de température entre un canal d'eau salée chauffée par le condenseur de la climatisation et un canal d'eau froide. Plusieurs climats sont comparés : Ostende, Marseille, Barcelone et Dakar. Des résultats expérimentaux valident le modèle numérique développé dans l'environnement EES. Les coefficients de performance (COP) et les consommations énergétiques spécifiques thermiques et électriques (SEC) sont comparés en régime permanent à l'aide d'EES et en simulations transitoires à l'aide d'une cosimulation TRNSYS-EES, qui permet de coupler la production d'eau douce à la demande de refroidissement d'un hôtel. Le climat le plus favorable à la production d'eau douce est celui de Dakar car les besoins annuels sont les plus importants et la puissance maximale est plus faible que pour les autres climats.

Mots clés : climatisation, récupération de chaleur, dessalement

1. INTRODUCTION

L'augmentation de la population mondiale s'accompagne d'un accroissement des consommations d'énergie et d'eau. Environ 2,5 milliards d'individus risquent de souffrir du manque d'eau en 2050, la demande en eau augmentant de 55% [1]. De plus en plus de systèmes de climatisation sont installés dans les pays du sud. Dans le monde, il existe environ 4 milliards d'installation de froid, représentant environ 17 % de la consommation mondiale d'électricité [2]. La chaleur rejetée par les climatiseurs est généralement perdue et participe au phénomène de réchauffement des centres des grandes villes, appelé îlot de chaleur urbain. D'après de précédents résultats de recherche, la récupération de chaleur des climatiseurs pour produire de l'eau distillée semble être une idée intéressante [3-5].

Les fluides frigorigènes actuellement majoritaires dans les installations de climatisation sont les hydrofluorocarbures (HFC). Mais les HFC tels que le R134a sont actuellement remplacés par des fluides ayant un potentiel de réchauffement global (PRG) inférieurs tels que le R32. Les hydrofluorooléfines (HFO) R1234yf, R1234ze(E) et R1234ze(Z) sont d'autres alternatives avec un PRG extrêmement bas. Cependant, la décomposition des HFO conduit à la production de substances participant à l'acidification des eaux. Pour l'instant, les niveaux de concentration ont été jugés négligeables mais risquent de ne plus l'être si leur déploiement se poursuit. Les fluides naturels peuvent donc rester à l'avenir les seules alternatives pour conserver un faible impact environnemental global. Une comparaison des performances est présentée dans un précédent article [5]. Néanmoins, les substances naturelles ont aussi des inconvénients. Les hydrocarbures (propane R290 et isobutane R600a) sont inflammables et explosifs. Malgré une faible température critique, le dioxyde de carbone (R744) montre des performances intéressantes en cycle transcritique. Malgré sa toxicité et son caractère corrosif, l'ammoniac (NH_3 , R717) est le fluide choisi dans cette étude pour ses propriétés thermodynamiques les plus intéressantes. Le caractère corrosif de l'ammoniac n'est pas un frein car l'eau de mer est également corrosive. Le cuivre de certaines canalisations, qui aurait pu être utilisé avec d'autres fluides frigorigènes que l'ammoniac, doit de toute façon être remplacé par de l'acier inoxydable. Le tableau 1 présente quelques propriétés thermodynamiques des fluides étudiés dans ces travaux, notamment la faible température critique du CO_2 et la forte chaleur latente de changement d'état du NH_3 .

Tableau 1 : Quelques propriétés thermophysiques des fluides frigorigènes étudiés

| Fluide frigorigène | Masse molaire (g/mol) | Température critique (°C) | Pression critique (bar) | Volume spécifique à $T_{rosée} = 0\text{ °C}$ (m^3/kg) | Chaleur latente de changement d'état à $T_{rosée} = 0\text{ °C}$ (kJ/kg) | Chaleur latente de changement d'état à $T_{rosée} = 50\text{ °C}$ (kJ/kg) |
|--------------------|-----------------------|---------------------------|-------------------------|--|--|---|
| R134a | 102 | 101 | 40,59 | 0,0693 | 198,6 | 151,8 |
| R32 | 52,02 | 78,1 | 57,84 | 0,04526 | 315,3 | 209,6 |
| R1234yf | 114 | 94,7 | 33,82 | 0,05653 | 163,3 | 122,2 |
| R1234ze(E) | 114 | 109,4 | 36,32 | 0,08389 | 184,2 | 145,1 |
| R1234ze(Z) | 114 | 150,1 | 35,33 | 0,279 | 220,5 | 189 |
| R290 | 44,1 | 96,7 | 42,47 | 0,09651 | 374,7 | 284,3 |
| R600a | 58,12 | 134,7 | 36,4 | 0,2353 | 355 | 298,5 |
| CO ₂ | 44,01 | 30,98 | 73,77 | 0,01024 | 230,9 | état supercritique |
| NH ₃ | 17,03 | 132,3 | 113,3 | 0,2892 | 1262 | 1050 |

Les technologies actuelles de dessalement sont généralement soit des procédés thermiques (distillation multiple effet et multi-flash) soit des procédés membranaires (osmose inverse). La distillation membranaire (MD pour « membrane distillation ») est un procédé à la fois thermique et membranaire qui utilise une membrane hydrophobe et microporeuse. Il existe plusieurs configurations de MD : l'AGMD à intervalle d'air (air gap), la DCMD à contact direct, la SGMD à balayage de gaz (sweeping gas), la VMD à l'aide d'une pompe à vide (vacuum), la PGMD à intervalle comblé par un matériau poreux (permeate gap). La figure 1 présente le principe de fonctionnement de l'AGMD. L'eau de mer chaude circule dans un canal chaud et s'évapore du fait d'un gradient de pression de vapeur créé par un gradient de température entre les deux surfaces de la membrane. La vapeur d'eau traverse la membrane et condense sur la surface froide rafraîchie par de l'eau de mer froide.

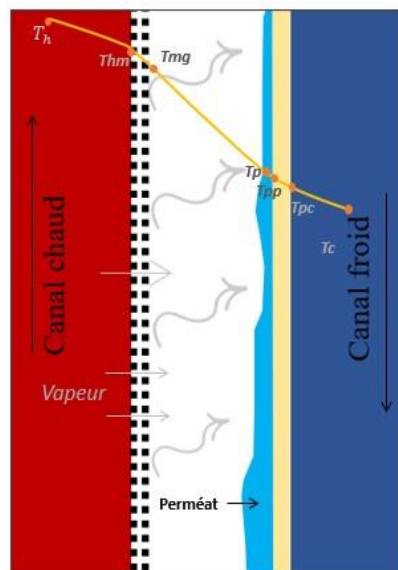


Figure 1 : Principe de fonctionnement de l'AGMD

Malgré une consommation d'énergie spécifique assez élevée en comparaison avec l'osmose inverse ou les autres principaux systèmes de dessalement, les avantages de la distillation membranaire sont nombreux pour l'application visée par notre étude : température d'alimentation faible, pressions faibles, technologie abordable économiquement, simplicité de mise en œuvre... Parmi les techniques de MD, l'AGMD est une des plus simples à mettre en œuvre, montre de bonnes performances et semble moins sensible au phénomène indésirable de mouillage de la membrane, une transformation des propriétés de surface qui laisse traverser de l'eau liquide. Le système Aquastill couple l'AGMD avec des pompes à chaleur (PAC) dans diverses configurations avec des

membranes spiralées [6-8]. Le procédé montre de bonnes performances techniques et économiques. Diaby et al. ont couplé un réfrigérateur à une unité d'AGMD simple étage plan pour produire du froid et de l'eau douce [9]. Cette étude expérimentale confirme que le couplage d'une thermofrigopompe et d'une unité de distillation membranaire est bien possible même avec des faibles niveaux de températures de fonctionnement qui peuvent correspondre à celle de la source chaude d'un climatiseur.

L'objectif de cette étude simulée est d'analyser l'impact du climat par l'intermédiaire de la température extérieure, des apports externes et de la température d'eau de mer sur les performances énergétiques et de production d'eau distillée de ce système de climatisation couplé à une unité de distillation membranaire.

2. DESCRIPTION DE L'ETUDE

Le système de climatisation et de production d'eau douce est supposé être installé dans un hôtel de 45 chambres situé en bord de mer dans quatre sites : Ostende, Marseille, Barcelone et Dakar. La simulation se base sur un fonctionnement de l'installation pour la climatisation, l'eau douce étant une coproduction. Le logiciel de simulation thermique dynamique est TRNSYS.

2.1 Hôtel

L'hôtel se compose de trois niveaux, un rez-de-chaussée et deux étages. Il contient 45 chambres, une cage d'escaliers et une cage d'ascenseur desservant le RDC et les deux étages. Au RDC, il y a une salle d'accueil, des sanitaires, une salle de réunions, deux bureaux, un local technique, 9 chambres, un couloir et une cage d'ascenseur et une cage d'escaliers pour accéder aux étages. A chacun des deux étages d'organisation similaire, un couloir dessert 18 chambres. Les plans de l'hôtel sont présentés ci-dessous (Figure 2 et 3). Les murs opaques ont un coefficient de déperdition surfacique U de $0,34 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, les vitrages, un coefficient U_w de $1,1 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Le taux de renouvellement d'air par la ventilation simple flux est de 0,6 volume par heure. Les infiltrations comptent pour 0,2 volume par heure. La consigne de chauffage est à $20 \text{ }^\circ\text{C}$ et la consigne de rafraîchissement est à $26 \text{ }^\circ\text{C}$. Les systèmes sont considérés comme parfaits et le logiciel calcule les besoins en chauffage et en rafraîchissement.

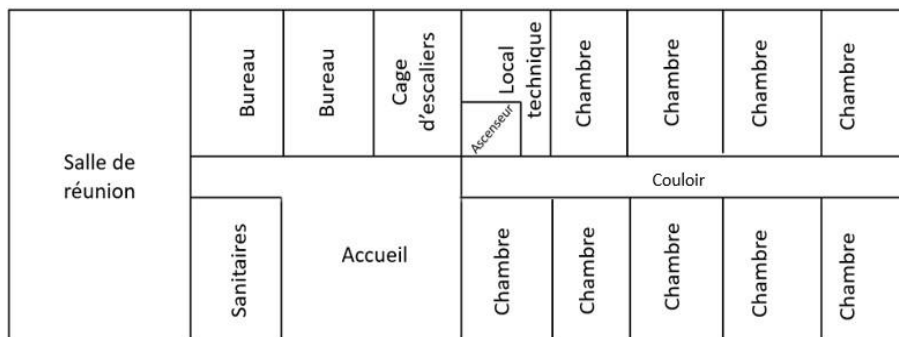


Figure 2 : Plan du rez-de-chaussée

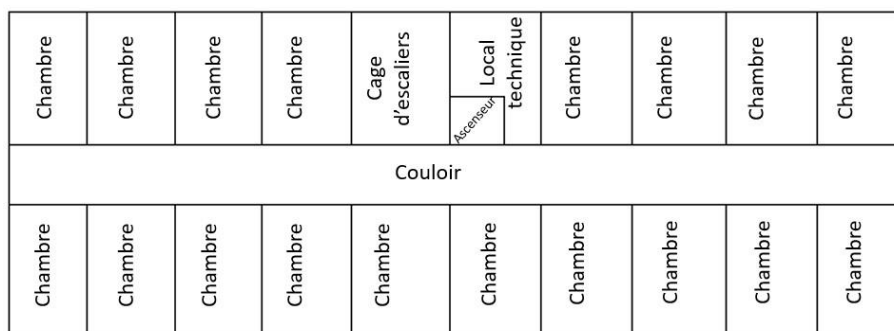


Figure 3 : Plan du premier et du deuxième étage

2.2 Climats

Les quatre climats sélectionnés sont ceux d'Ostende (Belgique), Marseille (France), Barcelone (Espagne) et Dakar (Sénégal). Les températures extérieures mensuelles sont présentées sur la figure 4. L'évolution de la température de la mer est supposée décrire une sinusoïde. Les valeurs des températures moyennes et des amplitudes de variation sont respectivement de 12,4, 18,8, 18,9 et 24,0, et 10,5, 12,2, 12,7 et 8,1 pour les quatre sites. Le climat de la ville d'Ostende, bordée par la Mer du Nord, est le plus froid. La ville de Dakar est bien plus au sud et est bordée par l'Océan Atlantique. Les climats de Marseille et de Barcelone sont très proches ; même si l'hiver semble légèrement plus doux à Barcelone, la température de la Mer Méditerranée dans ces deux sites est similaire.

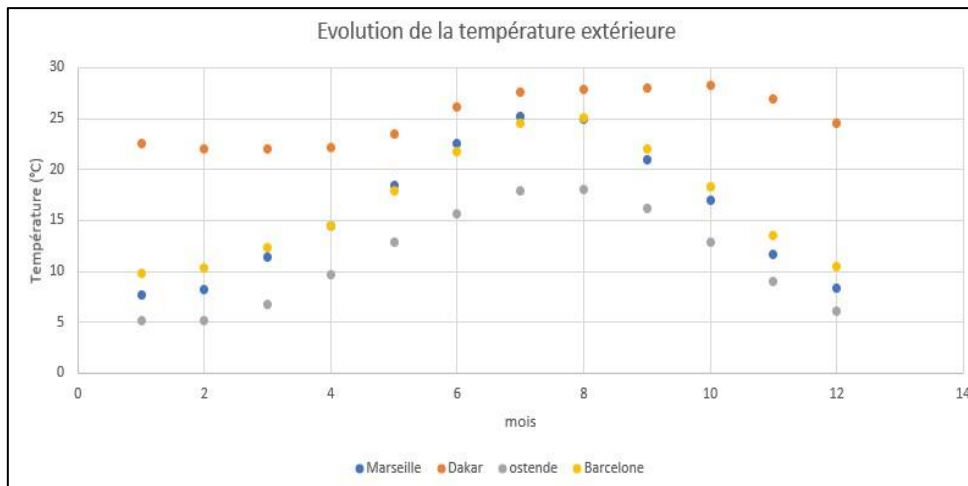


Figure 4 : Evolution des températures mensuelles

2.3 Modèle numérique TRNSYS

Les besoins de rafraîchissement sont générés par le type 56, modèle de bâtiment multizone, dans le logiciel TRNSYS (Figure 5). Ce modèle numérique est alimenté par des données météorologiques et transmet son résultat de calcul au type 66. Ce module appelle le logiciel EES dans lequel est programmé le modèle de climatiseur avec dessalement. L'évolution de la température de l'eau de mer est modélisée avec l'outil « calculatrice ». Sur la droite du studio de simulation se trouvent les sorties graphiques ou numériques représentées par des écrans ou des imprimantes.

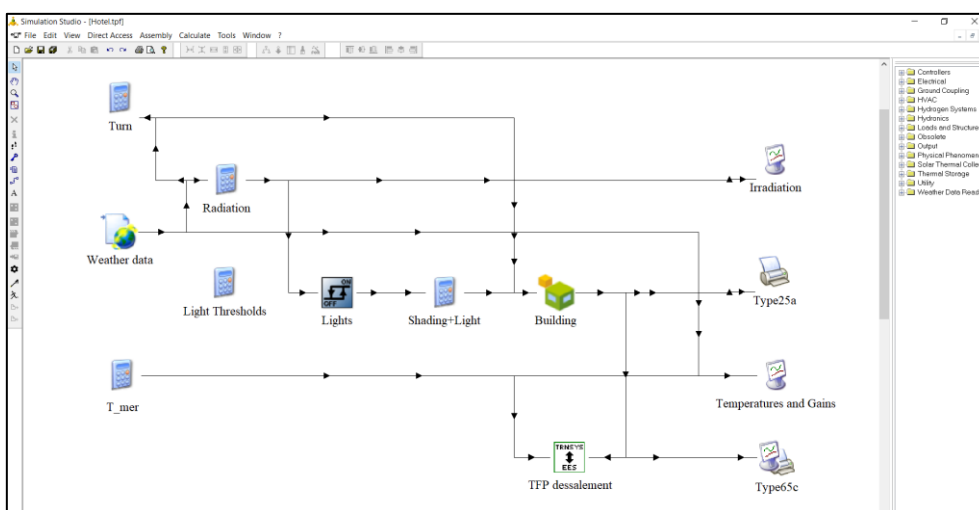


Figure 5 : Modélisation dans le studio de simulation TRNSYS

2.4 Modèle de l'unité de dessalement dans EES

Les équations de transfert de chaleur et de masse sont décrites en détail dans l'article de Dahbani et al. [10]. L'équation principale du transfert est dérivée de la loi de Fick dans laquelle le gradient de pression de vapeur ΔP_v génère un flux de perméat J_v (équation 1). La perméabilité K de la membrane est définie par l'équation 2 en fonction de la porosité ε et la tortuosité τ , du facteur de diffusion de la vapeur dans l'air D_{va} , de la masse molaire de la vapeur M_v , des pressions totale P_t et partielle moyenne d'air $P_{a,moy}$, des épaisseurs de membrane δ_m et de l'air gap δ_a , ainsi que de la température moyenne de la membrane T_m .

$$J_v = K \cdot \Delta P_v \quad (1)$$

$$K = \frac{\varepsilon \cdot D_{va} \cdot M_v \cdot P_t}{(\tau \cdot \delta_m + \delta_a) \cdot P_{a,moy} \cdot R \cdot (T_m + 273,15)} \quad (2)$$

Le tableau 2 rassemble les paramètres des simulations. Les caractéristiques de la cellule sont celles d'une publication sur l'unité spiralee d'Aquastill utilisant des membranes en PTFE [7]. La température d'entrée du canal froid est égale à celle de l'eau de mer. La température d'entrée du canal chaud est fixée à une valeur constante de 80 °C.

Tableau 2 : Paramètres de simulation et de la membrane

| Grandeur | Valeur | Unité |
|-------------------------------------|--------|----------------|
| Salinité | 35 | g/l |
| Température d'entrée canal chaud | 80 | °C |
| Débit canal froid | 163 | l/min |
| Longueur de la cellule | 64,75 | m |
| Largeur de la cellule | 0,4 | m |
| Epaisseur de la membrane δ_m | 0,12 | mm |
| Epaisseur de l'air gap δ_a | 1 | mm |
| Surface de la membrane | 25,9 | m ² |
| Porosité de la membrane | 85 | % |
| Tortuosité des pores | 1,5 | - |

L'installation de climatisation fonctionne avec de l'ammoniac. Pour une température de condensation de 80 °C, une température d'évaporation de 0 °C pour une boucle d'eau glacée pour la climatisation de régime 12 °C / 7 °C et en considérant un rendement isentropique à la compression égal à 0,8, le COP est de 1,938 (équation 3). Les pertes électromécaniques du compresseur sont négligées. La puissance mécanique est supposée égale à la puissance électrique absorbée. Le GOR (Gained Output Ratio) est le rapport de la chaleur latente nécessaire pour évaporer la production de perméat divisée par la chaleur récupérée au condenseur (équation 4). La consommation d'énergie thermique spécifique STEC est la chaleur récupérée par mètre cube d'eau distillée produite (équation 5). La consommation d'énergie électrique spécifique SEEC correspond ici au surplus d'électricité consommée par rapport à un fonctionnement normal du climatiseur, se condensant avec l'air extérieur comme source chaude (équation 6).

$$COP = \frac{\dot{Q}_{ev}}{W_{mec}} \quad (3)$$

$$GOR = \frac{\dot{m}_w \cdot \Delta h}{\dot{Q}_{cd}} \quad (4)$$

$$STEC = \frac{\dot{Q}_{ev}}{V_{eau}} \quad (5)$$

$$SEEC = \frac{W_{mec,avec\ dessalement} - W_{mec,normal}}{V_{eau}} \quad (6)$$

3. RESULTATS ET DISCUSSION

Cette section présente les résultats de simulation sous forme de graphiques des évolutions temporelles des températures et des besoins de l'hôtel, associées à celles de la production d'eau douce, pour les quatre climats puis un tableau récapitulatif de comparaison des besoins de rafraîchissement et des productions.

3.1 Evolution des températures et besoins de l'hôtel

Les figures 6 à 9 présentent à gauche les résultats de simulation des températures dans trois zones thermiques de l'hôtel (accueil, sanitaires et salle de réunion). A droite sont les nuages de points de production horaire d'eau douce qui dépend directement des besoins de rafraîchissement. Comme attendu, les besoins de rafraîchissement à Ostende sont moins importants que sur les autres sites car les températures extérieures sont beaucoup plus faibles. La production d'eau douce est donc aussi plus faible. Les climats de Marseille et Barcelone sont très proches. Les productions de froid et d'eau douce sont donc similaires. Le climat à Dakar est un climat tropical aride avec une longue saison sèche d'octobre à juin et une courte saison des pluies de juillet à septembre. La latitude de la ville de Dakar étant beaucoup plus basse que les autres sites, les saisons sont différentes à celles de l'Europe, les besoins de froid les plus importants sont décalés vers la fin de l'année. En début d'année, les besoins sont aussi relativement élevés. Au global, les besoins de froid sont assez constants tout au long de l'année et la production associée montre le même profil.

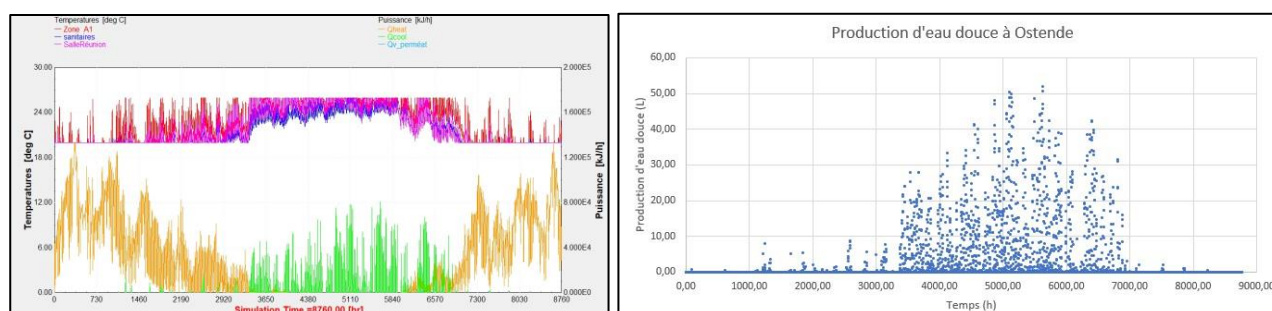


Figure 6 : Températures de trois zones thermiques, besoins de chauffage et de rafraîchissement (gauche) et production d'eau douce (droite) à Ostende

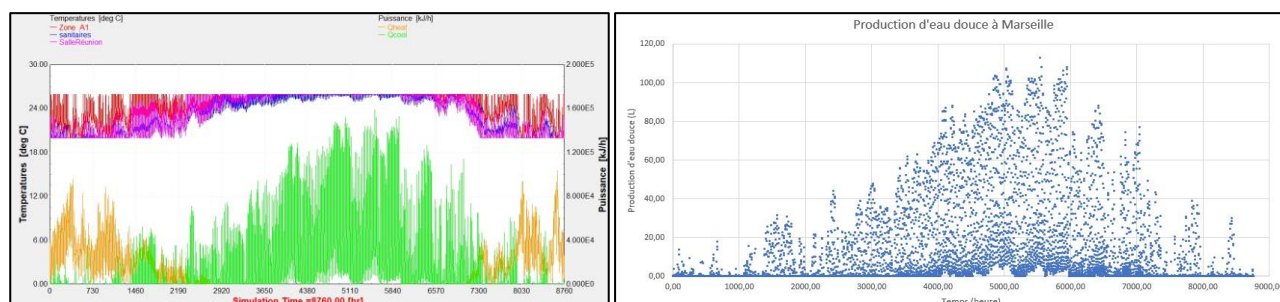


Figure 7 : Températures de trois zones thermiques, besoins de chauffage et de rafraîchissement (gauche) et production d'eau douce (droite) à Marseille

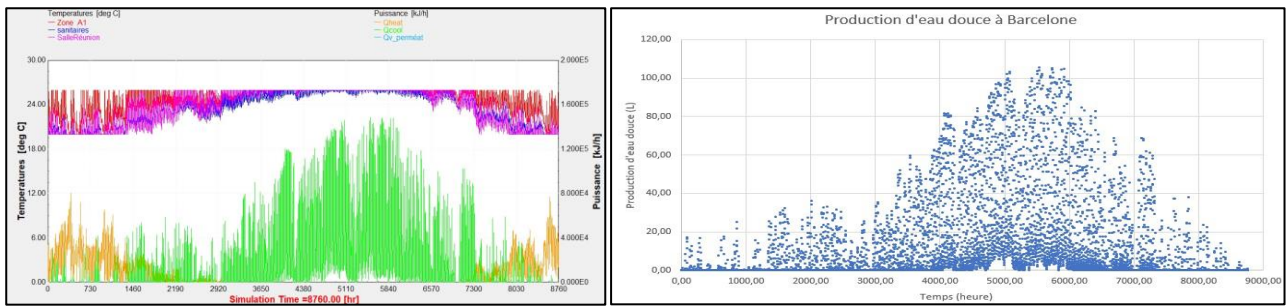


Figure 8 : Températures de trois zones thermiques, besoins de chauffage et de rafraîchissement (gauche) et production d'eau douce (droite) à Barcelone

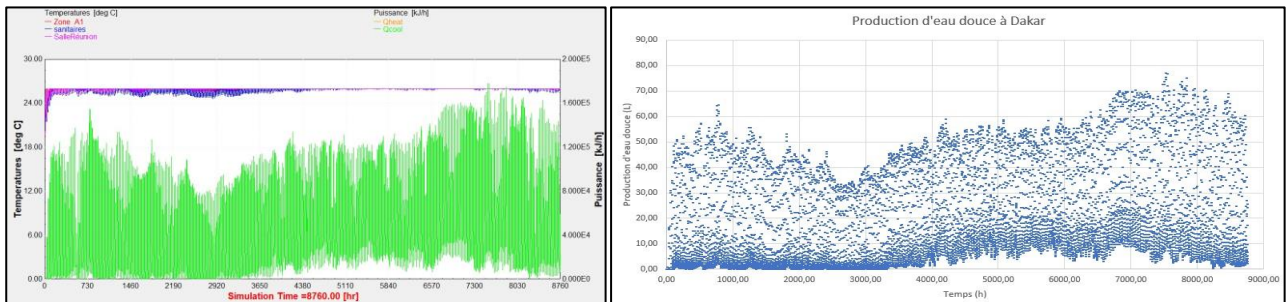


Figure 9 : Températures de trois zones, besoins de chauffage et de rafraîchissement (gauche) et production d'eau douce (droite) à Dakar

3.2 Bilans annuels

Le tableau 3 rassemble les résultats de simulation des besoins de chauffage et de climatisation, les consommations d'énergie spécifique thermique (STEC) et électrique (SEEC) et la production d'eau douce maximale journalière et la production cumulée annuelle. Les valeurs des besoins de froid influencent directement les productions d'eau douce annuelles. Les consommations d'énergie spécifiques permettent aussi de faire le lien avec la température d'eau de mer. Lorsque celle-ci est plus élevée, l'unité de dessalement est moins efficace et produit moins d'eau douce. Les COP des installations sont les mêmes pour tous les climats car les températures d'évaporation et de condensation sont identiques. Si on fait l'hypothèse que la température de condensation d'une installation de climatisation classique, sans système de dessalement, avec condensation sur l'air extérieur est de 40 °C, le COP serait de 4,681. L'écart de COP entraîne une surconsommation de l'installation pour le dessalement. C'est cette surconsommation d'énergie électrique qui rentre dans la SEEC. La production d'eau douce est légèrement plus élevée à Barcelone qu'à Marseille mais les consommations d'énergie spécifiques thermique et électrique sont légèrement à l'avantage du site de Marseille.

Tableau 3 : Bilan des performances des systèmes pour chaque climat

| Ville | Besoins de chauffage (kWh) | Besoins de climatisation (kWh) | Production maximale d'eau douce (L) | Production annuelle totale d'eau douce (m ³) | STEC (kWh/m ³) | SEEC (kWh/m ³) |
|-----------|----------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|--|----------------------------|----------------------------|
| Ostende | 14793 | 2081 | 51.96 (23 Août) | 15,38 | 205.12 | 40,91 |
| Marseille | 4381 | 12593 | 112.83 (19 Août) | 109,59 | 174.20 | 34,74 |
| Barcelone | 2492 | 11561 | 105.57 (19 Août) | 101,29 | 173.03 | 34,51 |
| Dakar | 0 | 32488 | 77.21 (10 Novembre) | 185,12 | 266.05 | 53,06 |

4. CONCLUSION

Cette étude présente l'influence du climat sur les performances d'un système de climatisation avec récupération de chaleur pour la production d'eau douce par distillation membranaire. Ce système est installé dans un hôtel de 45 chambres. Les climats des villes d'Ostende en Belgique, de Marseille en France, de Barcelone en Espagne et de Dakar au Sénégal ont été sélectionnées pour présenter une variété de cas d'études. Une cosimulation TRNSYS-EES a été utilisée pour calculer les productions d'eau douce et les consommations d'énergie spécifiques thermiques et électriques. Les conclusions principales de cette étude sont les suivantes.

- La production d'eau douce est liée à la demande de rafraîchissement. Des besoins continus toute l'année aboutissent à une plus forte production cumulée d'eau douce.
- Une faible température d'eau de mer a un effet bénéfique sur la production d'eau douce.
- Le climat le plus favorable à la production d'eau douce est celui de Dakar car les besoins annuels sont les plus importants et la puissance maximale est plus faible que pour les autres climats.
- Les consommations d'énergie électrique spécifiques sont élevées en comparaison avec l'osmose inverse (de l'ordre de 3 kWh/m³).

D'autres simulations annuelles doivent affiner ces résultats pour d'autres fluides frigorigènes et d'autres configurations de systèmes. Le projet de recherche actuellement en cours au laboratoire prévoit la construction d'un prototype de système de climatisation avec récupération de chaleur pour le dessalement. Les essais futurs permettront de valider les modèles et de progresser dans la conception du système.

References

- [1] HLPE, L'eau, enjeu pour la sécurité alimentaire mondiale, Rapport du Groupe d'experts de haut niveau sur la sécurité alimentaire et la nutrition du Comité de la sécurité alimentaire mondiale, Rome, 2015.
- [2] Site Internet de l'Association Française du Froid, www.aff.fr, consulté le 15/01/2023
- [3] Byrne P., Fournaison L., Delahaye A., Ait Oumeziane Y., Serres L., Loulergue P., Szymczyk A., Mugnier D., Malaval J.-L., Bourdais R., Gueguen H., Sow O., Orfi J., Mare T., A review on the coupling of cooling, desalination and solar photovoltaic systems, *Renew. Sust. Energ. Rev.* 47 (2015) 703–717.
- [4] Diaby A.T., Byrne P., Loulergue P., Balannec B., Szymczyk A., Mare T., Sow O. Design study of the coupling of an air gap membrane distillation unit to an air conditioner. *Desalination* 420 (2017) 308-317
- [5] Byrne P. Research Summary and Literature Review on Modelling and Simulation of Heat Pumps for Simultaneous Heating and Cooling for Buildings, *Energies* 2022, 15(10), 3529
- [6] Ruiz-Aguirre A., Andres-Manas J.A., Fernandez-Sevilla J.M., Zaragoza G. Experimental characterization and optimization of multi-channel spiral wound air gap membrane distillation modules for seawater desalination, *Separation and Purification Technology* 205 (2018) 212–222
- [7] Bindels M., Nelemans B. Theoretical analysis of heat pump assisted air gap membrane distillation, *Desalination* 518 (2021) 115282
- [8] Bindels M., Nelemans B. Cost reduction of heat pump assisted membrane distillation by using variable electricity prices, *Desalination* 530 (2022) 115669
- [9] Diaby A.T., Byrne P., Loulergue P., Sow O., Mare T. Experimental Study of a Heat Pump for Simultaneous Cooling and Desalination by Membrane Distillation, *Membranes* 2021, 11(10), 725
- [10] Dahbani M., Morjane W., Roussel S., Byrne P., Mare T. Simulation study of a multilayer membrane distillation unit coupled to a heat pump, article soumis à *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, éditions Springer