



HAL
open science

COMPARAISON ENERGETIQUE ET EXERGETIQUE DE SYSTEMES DE DESSALEMENT

Paul Byrne, Ahmadou Tidiane Diaby, Yemna Sarray, Redouane Ghouali,
Patrick Loulergue, Béatrice Balannec, Thierry Maré, Ousmane Sow

► **To cite this version:**

Paul Byrne, Ahmadou Tidiane Diaby, Yemna Sarray, Redouane Ghouali, Patrick Loulergue, et al.. COMPARAISON ENERGETIQUE ET EXERGETIQUE DE SYSTEMES DE DESSALEMENT. First International Refrigeration Energy and Environment Colloquium, Mar 2016, Hammamet, Tunisie. hal-01314187

HAL Id: hal-01314187

<https://hal.science/hal-01314187>

Submitted on 10 May 2016

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.

COMPARAISON ENERGETIQUE ET EXERGETIQUE DE SYSTEMES DE DESSALEMENT

Paul Byrne^a, Ahmadou Tidiane Diaby^{a, b}, Yemna Sarray^c, Redouane Ghouali^a, Patrick Loulergue^d, Béatrice Balanec^d, Thierry Maré^a, Ousmane Sow^b

^aLaboratoire LGCGM, INSA de Rennes et Université de Rennes1, France

^bLaboratoire d'Energétique Appliquée, Ecole Supérieure Polytechnique de Dakar, Sénégal

^cEcole Nationale d'Ingénieurs de Gabès, Tunisie

^dInstitut des Sciences Chimiques de Rennes (UMR CNRS 6226), Université de Rennes1, France
paul.byrne@univ-rennes1.fr

RESUME

Dans certaines zones du monde, l'eau potable n'est pas une ressource abondante et est produite par des systèmes de dessalement. Par ailleurs, les ressources en énergie doivent être rationalisées. Les performances des systèmes de dessalement sont difficiles à comparer car les technologies peuvent être très différentes et faire appel à des procédés thermiques, électriques ou mécaniques, membranaires ou non. L'exergie correspond à l'énergie mécanique potentiellement produite par une quantité de chaleur, une quantité d'énergie chimique ou électrique. L'énergie mécanique est considérée comme une forme pure d'exergie. Cette étude émane d'une étude bibliographique menée dans le cadre d'un projet de couplage d'une machine frigorifique avec un système de dessalement. Cet article présente les quantités d'exergie consommée et les indices de comparaison usuels (GOR, Gained Output Ratio et PR, Performance Ratio) pour différents systèmes de dessalement testés dans notre laboratoire ou dont les données ont été récoltées dans la littérature. Les systèmes étudiés dans cet article sont des installations d'osmose inverse, de distillation membranaire, de distillation multiple-effet et un distillateur solaire. Les résultats montrent que la distillation membranaire présente des caractéristiques intéressantes, notamment dans le cadre d'un couplage avec une source de chaleur à basse température.

Mots-Clés : *dessalement, osmose inverse, distillation membranaire, distillation multiple-effet, distillateur solaire*

1. INTRODUCTION

La croissance démographique et l'augmentation des activités humaines entraîne la diminution des ressources en eau disponibles par leurs utilisations pour l'agriculture, l'industrie et par la diminution de la qualité des ressources par les effets de la pollution. Le rapport sur les perspectives de l'environnement à l'horizon 2050 de l'OCDE prévoit une augmentation de l'utilisation de l'eau douce d'environ 3500 à 5500 km³ entre l'année 2000 et l'année 2500 [1]. Le stress hydrique s'intensifiera, surtout dans les zones côtières. La figure 1 disponible sur le site de l'OCDE [2] présente les zones les plus touchées par ce niveau de stress exprimé en taux d'exploitation de l'eau. Cet indice correspond au rapport entre les besoins en eau et les ressources disponibles. Il est possible d'observer que tous les continents sont touchés par ce phénomène de stress hydrique.

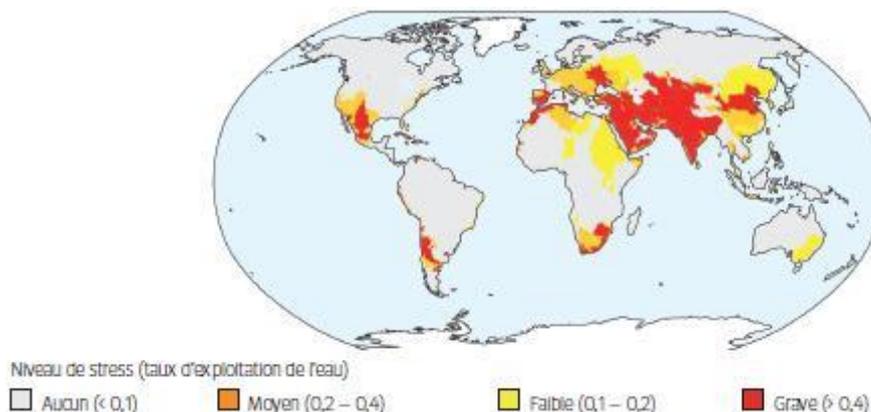


Figure 1 : Niveau de stress hydrique dans le monde, projections en 2050

Pour tenter de résoudre le problème de l'eau, les systèmes de dessalement se développent très rapidement. En 2015, la production d'eau douce par système de dessalement a atteint plus de 86,5 millions de m³, correspondant à une augmentation d'environ 230 % depuis l'année 2000 [3].

La croissance démographique mondiale entraîne parallèlement une augmentation des besoins en énergie, notamment en froid commercial et domestique, en rafraîchissement ou climatisation. Dans ce contexte énergétique et hydrique extrêmement tendu, il semble nécessaire de développer des systèmes de dessalement intégrant une utilisation efficace de l'énergie ou de coupler le dessalement avec de la production d'énergie thermique et l'utilisation d'énergie renouvelable [4]. De récents travaux de revue bibliographique menés dans notre laboratoire ont d'ailleurs établi un lien de corrélation entre l'augmentation des besoins d'eau douce, les besoins de froid éventuels en termes de degrés-jours et la ressource en énergie solaire [4].

Un projet de recherche propose une réponse à cette problématique par le couplage d'une machine frigorifique avec un système de dessalement. L'objectif de cette étude est donc de présenter les performances énergétiques et exergetiques des systèmes de dessalement pour évaluer leur degré de compatibilité pour un couplage avec une machine frigorifique.

2. SYSTEMES DE DESSALEMENT ETUDIES

2.1 Classification

La figure 2 classe les principaux systèmes de dessalement en deux catégories : les procédés à membranes et les procédés de distillation. La distillation membranaire fait partie des deux catégories. Les procédés étudiés au laboratoire (en rouge) sont la distillation membranaire, le distillateur solaire et la distillation multiple effet. Les études réalisées sur ces systèmes sont d'abord présentées en détail. Les performances de tous ces systèmes seront répertoriées dans une comparaison générale avec celles de l'osmose inverse, principe de dessalement utilisé pour 60 % de la production mondiale [4].

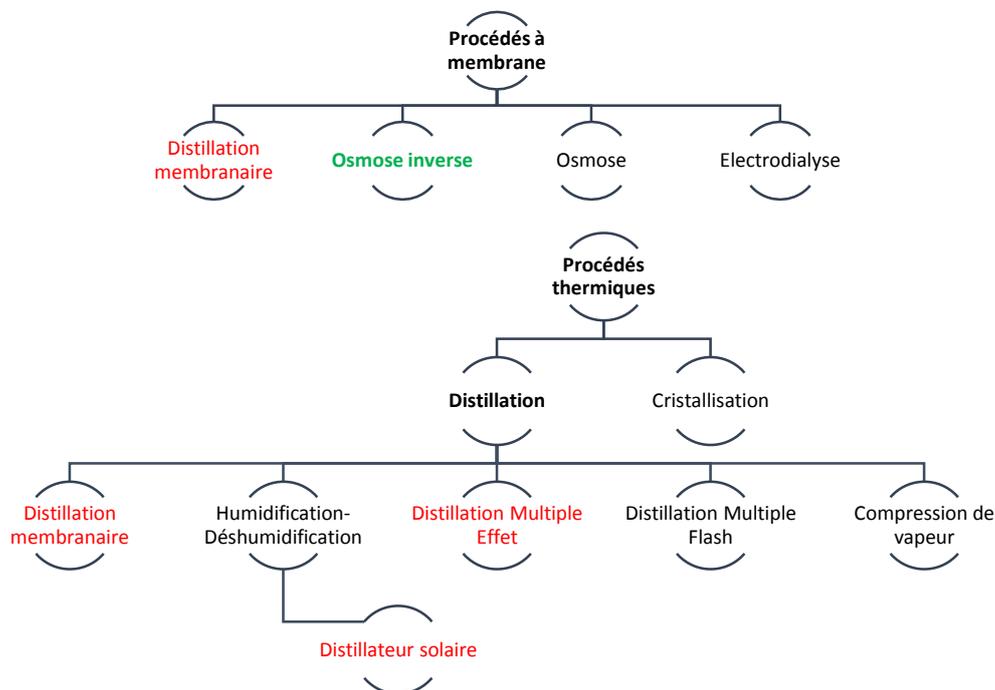


Figure 2 : Principaux procédés de dessalement

2.2 Indices de performance

Les indices de performance des systèmes de dessalement sont basés sur les quantités d'énergies consommées et sur la quantité d'eau douce produite. Les quantités d'énergies peuvent être de différentes

formes : chimique, thermique, mécanique et électrique [5]. Le GOR, le PR et la performance exergetique sont les indices de performance étudiés.

2.2.1 Gained Output Ratio (GOR)

Le GOR est un indice sans dimension qui ne s'applique qu'aux systèmes thermiques. Il correspond au rapport de la quantité de chaleur nécessaire à l'évaporation de l'eau douce produite sur la quantité de chaleur consommée (équation (1)). Le GOR ne prend pas en compte la quantité d'énergie électrique consommée par d'éventuels équipements électriques auxiliaires présents dans le système [6].

$$GOR = \frac{\Delta h_{vap} \cdot m_{prod}}{Q_{conso}} \quad (1)$$

2.2.2 Performance Ratio (PR)

Le PR est un ratio de performance qui peut prendre plusieurs définitions dans la littérature [6]. Dans la présente étude, il est défini dans l'équation (2) comme le rapport de la masse d'eau distillée produite sur la consommation d'énergie thermique ou électrique, suivant le procédé, en kg/MJ_{th} ou en kg/MJ_{el}.

$$PR = \frac{m_{prod}}{Q_{conso}} \quad (2)$$

2.2.3 Performance exergetique

Les différents procédés de distillation consomment différentes formes d'énergie. Pour comparer ces systèmes sur une même base, les quantités de chaleur éventuellement utilisées sont converties en quantité d'exergie équivalente. L'équation (3) utilise la température de l'environnement T_0 et la moyenne logarithmique de la température de la source de chaleur \bar{T}_{source} si celle-ci est variable. Le rapport de la consommation d'exergie sur le volume d'eau produite est défini par l'ExR, pour Exergy Ratio (équation (4)).

$$Ex = Q \left| \left(1 - \frac{T_0}{\bar{T}_{source}} \right) \right| \quad (3)$$

$$ExR = \frac{m_{prod}}{Ex_{conso}} \quad (4)$$

3. RESULTATS ET ANALYSE

3.1 Distillation membranaire

Les expériences de distillation membranaire ont été réalisées à l'ISCR (Institut des Sciences Chimiques de Rennes). Le pilote utilisé est une unité de type air gap membrane distillation (AGMD) (figure 3). Le dispositif comprend un bac d'eau de mer synthétique chauffée par une résistance électrique, une cassette rectangulaire à membranes qui s'insère dans un boîtier métallique où circule de l'eau froide provenant du réseau d'eau réfrigérée du bâtiment, à environ 16 °C. Entre les membranes de la cassette et le boîtier se situe de part et d'autre un air gap (lame d'air) dont l'épaisseur est définie par l'épaisseur d'un spacer (ou espaceur) à filaments croisés en polypropylène (PP) de 1,04 mm. En partie basse de l'air gap, le boîtier dispose d'une sortie pour le perméat. Le perméat s'écoule dans un béccher posé sur une balance ayant une incertitude de lecture de 0,1 g. La cassette a une épaisseur de 15 mm, une hauteur de 23,5 cm et une largeur de 41,5 cm. (surface d'une membranaire d'environ 0.0975 m²). Les deux membranes en PTFE de porosité 80% et de taille de pores 0,2 μm sont soudées sur la structure rigide en PP de la cassette.

Le principe de l'AGMD fonctionnant avec de l'eau de mer est schématisé sur la figure 4. Sur ce schéma, l'eau de mer est pompée depuis un réservoir, passe dans le canal froid, un échangeur récupérateur, un échangeur réchauffeur, le canal chaud, l'autre côté de l'échangeur récupérateur et retourne au réservoir. L'installation avec échangeur récupérateur n'a pas encore été réalisée. Pour les présents calculs, on suppose un échangeur d'efficacité 80 %. L'énergie consommée pour chauffer l'eau de mer est donc divisée par 5.



Figure 3 : Photographie de l'installation de distillation membranaire

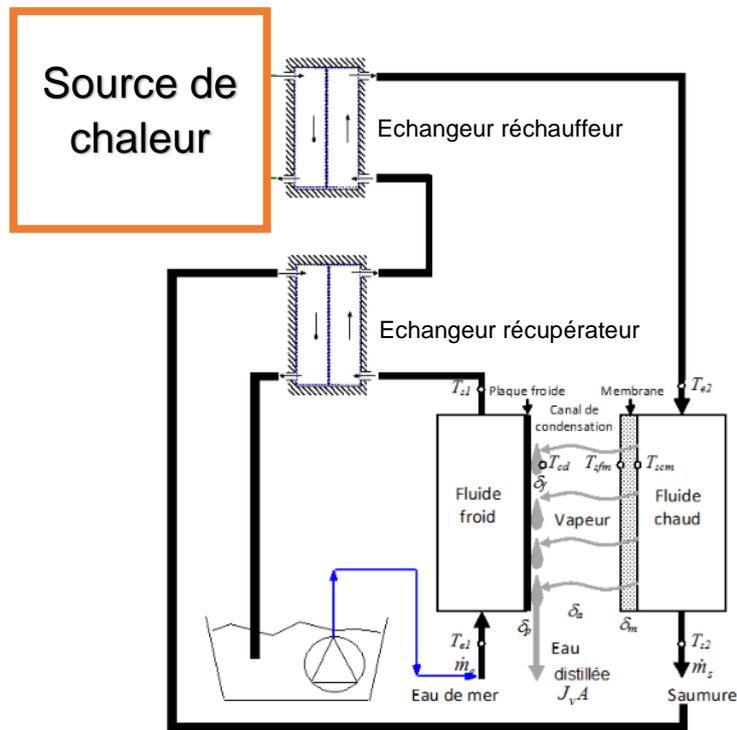


Figure 4 : Principe de l'installation d'AGMD

La figure 5 présente les résultats de mesure de perméat sur le pilote (figure 5a) avec deux débits de circulation des fluides chaud et froid de 2 et 5 l/min. Ces valeurs de débit sont les valeurs minimale et maximale mesurables sur l'installation. L'évolution est cohérente avec les résultats de la littérature [7]. Lorsque l'écart de température augmente, le gradient de pression de vapeur augmente également. Le débit a également une influence dans le sens où lorsque le débit du fluide chaud augmente, le nombre de Reynolds et la turbulence de l'écoulement augmentent en améliorant le coefficient de transfert thermique dans la couche limite. La membrane sera donc moins sujette à la polarisation de température et à la polarisation de concentration. D'autres essais ont montré que la variation du débit du fluide froid a un effet négligeable sur le flux de perméat.

Lorsque l'on augmente la température, la quantité d'énergie thermique consommée pour chauffer l'eau de mer augmente proportionnellement. La variation du flux de perméat étant davantage de type exponentiel, le GOR s'améliore lorsque l'écart de température augmente. Un débit élevé est par contre pénalisant en termes de consommation d'énergie thermique pour chauffer la solution d'eau de mer.

Le PR augmente au fur et à mesure que l'écart de température augmente de la même manière que pour le GOR. L'influence de la variation de la chaleur latente de vaporisation calculée en fonction de la température d'entre du fluide chaud est négligeable. Le débit de perméat augmente plus fortement que la consommation d'énergie. Les valeurs relevées sont assez similaires à celles d'une étude numérique précédente [8] qui donnaient un minimum d'énergie thermique spécifique de $1458 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{m}^3$ soit un PR de 0,19.

Le ratio exergetique est calculé avec une température de référence égale à $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Il diminue fortement lorsque la température de l'eau chaude s'écarte de la température de référence. En fonctionnant à basse température, il y aura donc moins de création d'irréversibilités dans le système mais de par l'analyse du PR, il y aura davantage d'énergie thermique consommée par m^3 d'eau douce produite. Cet effet pourra être contrebalancé par une production de chaleur par le condenseur d'une machine frigorifique dont le COP va augmenter avec la baisse de la température de la source chaude.

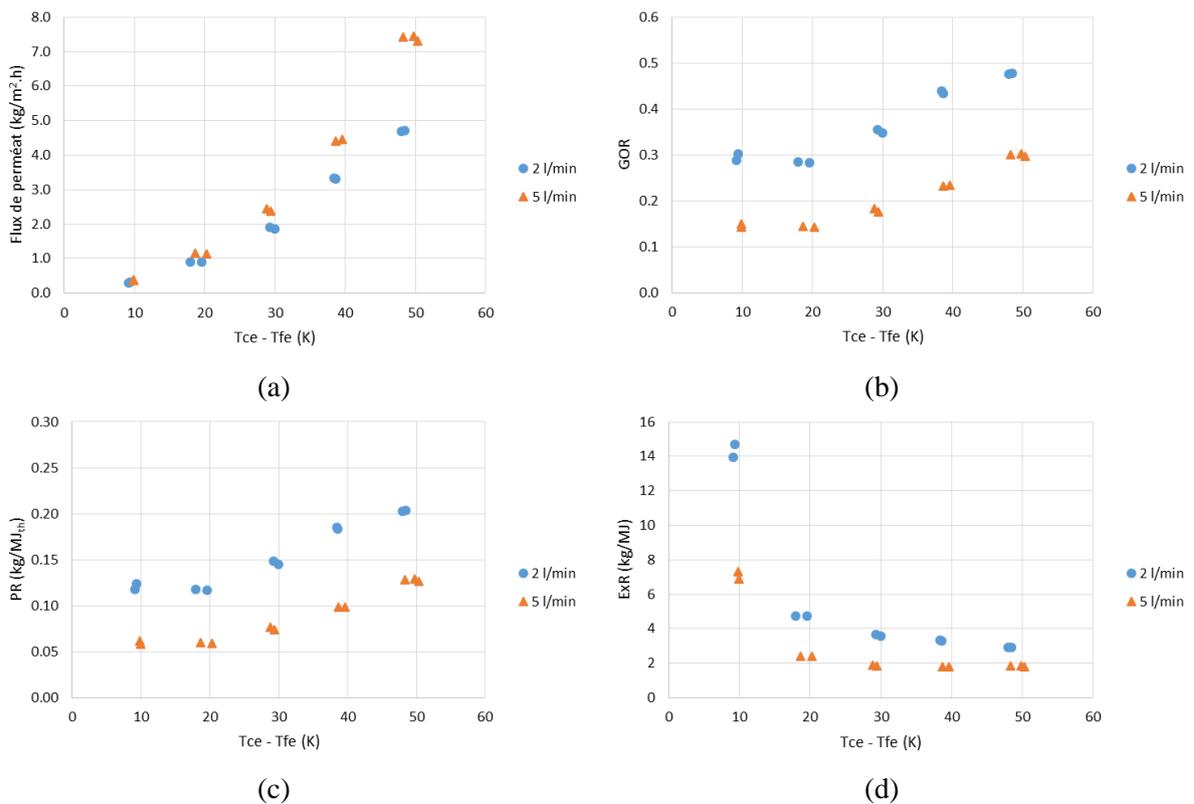


Figure 5 : Evolution du flux de perméat (a), du GOR (b), du PR (c) et du ExR (d) en fonction de l'écart de température de l'eau en entrée des canaux chaud (T_{ce}) et froid (T_{fe})

3.2 Distillateur solaire

Des essais ont été réalisés sur un distillateur solaire (figure 6) composé d'un vitrage incliné posé sur un caisson isolé. Ce caisson a une base de 58 cm de largeur par 48 cm de profondeur. La petite et la grande hauteurs sont de 21,5 et 47 cm. Le vitrage mesure 50 cm par 50 cm, soit une surface de $0,25 \text{ m}^2$. L'inclinaison est de 37° et le coefficient de transmission énergétique τ_E est de 0,82. Les parois intérieures du caisson sont équipées d'un réflecteur. Le distillateur est éclairé par un banc de lampes halogènes produisant un rayonnement constant de $800 \text{ W}/\text{m}^2$. Le rayonnement incident normal au vitrage G est donc de 200 W . 82 % de cette puissance thermique pénètre dans le distillateur et provoque l'évaporation d'une quantité d'eau. L'air s'humidifie puis de la vapeur d'eau se condense au contact du point froid constitué par la surface vitrée. Une gouttière placée en partie basse du vitrage permet de récupérer l'eau distillée.

Des mesures de température ont été effectuées lors d'une mise en régime de l'installation à flux solaire constant (figure 7). La mise en régime de l'installation est assez longue car la quantité d'eau est

d'environ 3 kg, une valeur importante vis-à-vis de la taille du distillateur et du flux incident. La forte différence de température entre les surfaces intérieure et extérieure de l'isolant est une preuve de son efficacité. Les sondes de températures d'air et d'eau sont placées au milieu de la masse d'air humide et au milieu du bassin. Les températures sur les surfaces intérieure et extérieure du vitrage sont également présentées.

La figure 8 présente l'évolution du flux d'eau distillée en sortie de l'installation sur le même essai. Au bout de 5 heures de fonctionnement, le flux d'eau distillée se stabilise entre 54 et 56 g/h. La température de l'eau est de 66,2 °C. A cette température, la chaleur latente de vaporisation est de 2342 kJ/kg. Le GOR est donc de 0,018. Le ratio de performance PR est de 0,076 kg/MJ_{th}. La quantité d'exergie incidente sur le vitrage est définie par l'équation 5 [9]. La température de couleur T_s de la source lumineuse (Philips HalogenA PAR38 100W E27 230V 30D 1CT/15) est de 2800 K. Avec cette hypothèse, le ratio ExR est de 0,088 kg/MJ.

$$Ex_s = G \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_0}{T_s} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_0}{T_s} \right)^4 \right] \quad (5)$$



Figure 6 : Photographie du distillateur solaire et du banc d'éclairage

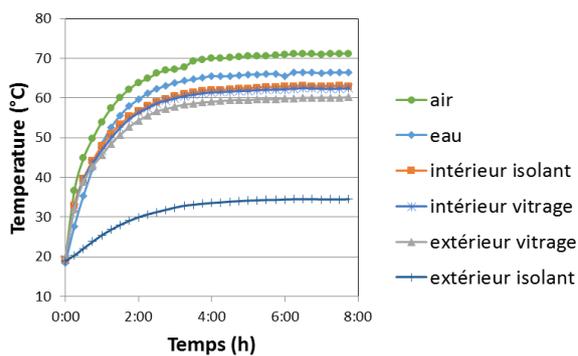


Figure 7 : Mesure de températures dans le distillateur solaire

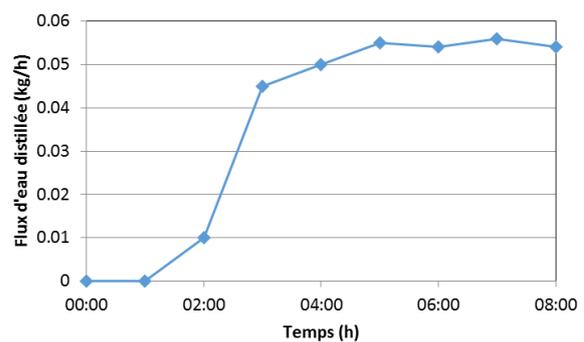


Figure 8 : Flux d'eau distillée produite par le distillateur solaire

3.3 Distillation multiple effet

La distillation multiple effet consiste à vaporiser l'eau d'une solution d'eau de mer dans un ballon à une pression inférieure à la pression atmosphérique à l'aide d'une source de chaleur (premier effet). La vapeur sera condensée à l'aide de l'énergie de vaporisation d'une autre quantité d'eau de mer injectée

dans un deuxième ballon à pression plus basse (deuxième effet). La vapeur créée sert de source d'énergie pour l'effet suivant jusqu'au dernier effet où la vapeur est condensée par l'eau de mer en entrée. Les saumures sont collectées en parties basses de chaque ballon. Le laboratoire a collaboré avec l'université de Dakar sur ce sujet, notamment à l'élaboration d'un prototype avec alimentation par panneaux solaires thermiques. Malheureusement, les contraintes d'étanchéité sur ce genre de système sont davantage de l'ordre de capacités industrielles. Le laboratoire n'a pas trouvé le moyen de régler ce problème dans le budget alloué au projet. Néanmoins, des travaux d'analyse ont été menés sur le système à partir des principes de la thermodynamique [10].

Sow et al. [11] a déterminé pour une installation triple effet que les quantités d'énergie solaire et d'énergie électrique nécessaires étaient de 680 et 900 kJ/kg. Les températures des trois effets étaient de 60, 55 et 50 °C. A ces températures, la chaleur latente de vaporisation est d'environ 2370 kJ/kg. En sommant les quantités d'énergie solaire et électrique au dénominateur, le GOR correspondant est donc de 1,50. Le PR est de 0,633 kg/MJ et l'ExR est de 0,651 kg/MJ en utilisant l'équation (5) pour convertir la quantité d'énergie solaire en exergie dans une ambiance à 28 °C.

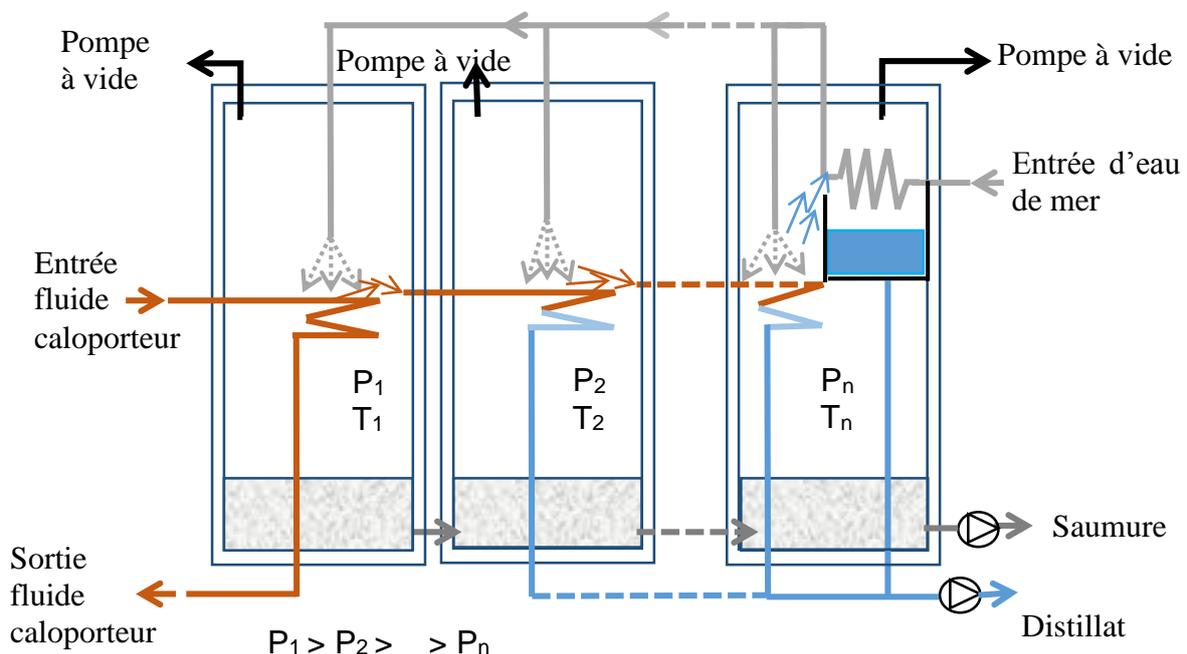


Figure 9 : principe de la distillation à multiple effet

3.4 Synthèse et comparaison avec l'osmose inverse

L'osmose inverse est la technologie la plus utilisée dans le monde, autant en systèmes portatifs qu'en centrale de traitement fixe. Les plus faibles consommations d'énergie annoncées sont de l'ordre de 2 kWh/m³ avec récupérateur de pression [4]. Même la gamme portative de la société SLCE, développée pour la plaisance, [12] présente des quantités d'énergie spécifique entre 4,53 et 33,33 kWh/m³. Les valeurs des indices de performance sont présentées dans le tableau 1. Les valeurs minimales et maximales sont indiquées pour la distillation membranaire et l'osmose inverse dont les études ont porté sur davantage de données. Les résultats montrent que la technique de l'osmose inverse a les meilleures performances surtout avec un équipement au stade commercial. Les résultats de la distillation multiple effet sont des valeurs issues d'une analyse thermique et thermodynamique. Les indices sont beaucoup plus faibles que ceux obtenus avec l'osmose inverse et légèrement supérieurs à ceux de la distillation membranaire en termes de GOR et de PR. Par contre, la distillation membranaire se distingue par un indice ExR maximal élevé. Les irréversibilités du procédé sont donc relativement faibles. Le distillateur solaire testé dans notre laboratoire présente des performances très faibles. Ces calculs ne prennent pas en compte la gratuité de l'énergie solaire ou d'une éventuelle source de chaleur récupérée sur un autre système ou un autre procédé.

Tableau 1 : Synthèse des indices de performance des systèmes étudiés.

Système	Description	Type d'énergie	GOR (-)	PR (kg/kJ)	ExR (kg/kJ)
Distillation membranaire	Pilote Univ. Rennes 1	Electrique	0,142-0,477	0,058-0,203	1,77-14,68
Distillateur solaire	Prototype Univ. Rennes 1	Solaire	0,0179	0,076	0,088
Distillation multiple effet	Analytique	Solaire et électrique	1,50	0,633	0,651
Osmose inverse	Gamme commerciale	Electrique	20,35-149,63	8,33-61,27	8,33-61,27

4. CONCLUSION

Cet article présente les études réalisées à ce jour dans le domaine du dessalement au sein de notre laboratoire. Certains résultats sont exploités pour mener une comparaison énergétique et exergetique de quelques systèmes de distillation et d'équipements d'osmose inverse. Un projet en cours dans le laboratoire porte sur le couplage d'une installation de distillation membranaire avec le condenseur d'une machine frigorifique. On peut ainsi se rendre compte de l'importance de la marge de progression pour atteindre de bonnes performances théoriques comme dans le cas de la distillation multiple effet ou de bonnes performances réelles comme dans le cas d'une installation d'osmose inverse. Néanmoins, la valorisation de la chaleur perdue doit permettre d'obtenir des performances globales satisfaisantes dans les systèmes couplés.

Références

1. Perspectives de l'environnement de l'OCDE à l'horizon 2050 : Les conséquences de l'inaction. ISBN 978-92-64-122161 © OECD 2012.
2. <http://www.oecd.org/fr/env/indicateurs-modelisation-perspectives/chapitresurleau-perspectivesdelenvironnementdelocdealhorizon2050lesconsequencesdelinaction.htm>.
3. IDA Desalination Yearbook 2015-2016.
4. P. Byrne, L. Fournaison, A. Delahaye, Y. Ait Oumeziane, L. Serres, P. Loulergue, A. Szymczyk, D. Mugnier, J.-L. Malaval, R. Bourdais, H. Gueguen, O. Sow, J. Orfi, T. Mare. A review on the coupling of cooling, desalination and solar photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 47 (2015) 703–717.
5. A. Pugsley, A. Zacharopoulos, J. Deb Montol, M. Smyth. Global applicability of solar desalination. *Renewable Energy* 88 (2016) 200-219.
6. J. Koschikowski, M. Wieghaus, M. Rommel. Solar thermal-driven desalination plants based on membrane distillation, *Desalination* 156 (2003) 295–304.
7. F. Banat. Membrane distillation for desalination and removal of volatile organic compounds from water, Ph.D. Dissertation, McGill University, Montreal, Canada, 1994.
8. P. Byrne, Y. Ait Oumeziane, L. Serres, J. Miriel. Etude simulée d'un système de distillation membranaire pour le dessalement d'eau de mer couplé à une thermofrigopompe. In: 3ème Colloque International Francophone en Energétique et Mécanique, CIFEM 2014, 3–5 mai 2014, Moroni, Comores.
9. R. Petala. Exergy of undiluted thermal radiations. *Solar Energy* 74 (2003) 469–488.
10. A. Faye, O. Sow, T. Maré, M. Sene, M. Adj. Détermination du rendement exergetique des procédés de dessalement à multiples effets. In : IXème Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois sur la Thermique des Systèmes, CIFQ 2009, 18-20 mai 2009, Lille.
11. O. Sow, M. Siroux, B. Desmet. Energetic and exergetic analysis of a triple-effect distiller driven by solar energy. *Desalination* 174 (2005) 277-286.
12. SLCE, Gammes Aqua-Base®, juillet 2011.