

Alambic à Fort Coefficient de Performance, pour la Distillation d'Eau de Mer à Partir d'Energies Basse Température (solaire, co-génération ...)

Jean-Paul Domen

(Société 3MW, Le bois tranché, F-49320 VAUCHRETIEN)
Téléphone/télécopie : 33-2 41 54 19 31, Email : jeanpaul.domen @wanadoo.fr

Résumé - Nous présentons un alambic permettant de distiller de l'eau de mer en utilisant uniquement de la chaleur à basse température (inférieure à 100° C). En outre cet appareil fonctionne sans électricité, et ne comporte aucun organe de haute technologie (du type pompe à vide ou asservissement électronique ou même simplement pompe de circulation d'eau). Il peut être installé partout, il faut juste lui adjoindre un « château d'eau » situé légèrement au dessus de lui (un mètre suffit), ce réservoir pouvant être rempli par traction animale, à partir de la mer. La circulation de l'eau de mer à l'intérieur de l'appareil se fait par gravité et thermosiphon. La récupération de l'eau distillée, ainsi que l'évacuation de la saumure, se font elles aussi par gravité. L'alambic se présente sous la forme d'un échangeur de chaleur à contre-courant dans lequel la chaleur qui s'échange est la chaleur latente d'évaporation de l'eau, l'échange se produit par évaporation **sans ébullition**, puis diffusion de vapeur et enfin condensation sur paroi froide. Les prototypes expérimentés jusqu'à ce jour ont permis d'atteindre un coefficient de performance de 5, et aucun obstacle théorique ne s'oppose à l'amélioration de cette valeur. Le coût de fabrication de l'appareil, nous permet d'envisager un prix du mètre cube produit de l'ordre de 2 à 4 € pour des installations utilisant comme source de chaleur l'eau de refroidissement d'un moteur thermique (groupe électrogène par exemple), ou bien l'énergie solaire, et ce pour des installations de très petit débit (de l'ordre du mètre cube par jour)... La conception de l'appareil est modulaire. L'appareil peut aussi être utilisé pour distiller des eaux de rejet. Son volume équivaut à sa production journalière.

Abstract - We present a still allowing distilling sea water by using only heat at low temperature (lower than 100° C). Moreover this apparatus functions without electricity, and does not comprise any body of high technology (vacuum pump type or electronic control or even simply circulating pump of water). It can be installed everywhere, it is necessary to just to associate a " water tower him " located slightly at the top of him (one meter is enough), this tank which can be filled by animal haulage, starting from the sea. The circulation of sea water inside the apparatus is done by gravity and thermosiphon. The recovery of distilled water, as well as the evacuation of the brine, is also done they by gravity. The still is appeared as an exchanger of heat at counter-current in which the heat which exchange is the latent heat of evaporation of water, the exchange occurs by evaporation **without boiling**, then vapour diffusion and finally condensation on cold wall. The prototypes tested so far made it possible to reach a coefficient of performance of 5, and no theoretical obstacle is opposed to the improvement of this value. The manufacturing cost of the apparatus, enables us to consider a price of the cubic meter produced about 2 to 4 € for installations using like heat source cooling water of a thermal engine (power generating unit for example), or solar energy, and this for installation of very small flow (of the order of the cubic meter per day)... The design of the apparatus is modular. The apparatus can also be used to distil water of rejection. Its volume is equivalent to its day labourer production.

Mots-clés : Désalinisation, distillation, échangeur thermique, contre-courant, diffusion de vapeur,

1. INTRODUCTION

Pour distiller de l'eau de mer, on distinguait jusqu'à présent deux méthodes : Tout d'abord la méthode « naturelle » qui consiste à produire de la vapeur puis à la condenser (en général sur une paroi froide) avec perte définitive de la chaleur latente de condensation. Cela porte la consommation d'énergie nécessaire à la distillation à une valeur de l'ordre de 700 kWh/mètre cube, mais ne nécessite qu'un matériel très simple et très rustique, facile d'entretien, fonctionnant avec uniquement une source de chaleur et une source froide (en général l'air extérieur), et sans aucun organe mécanique : **l'alambic**.

Etant donné le prix de l'énergie, il a semblé utile de mettre au point une seconde méthode de distillation, et pour cela de réaliser des appareils divisant par un certain nombre (appelé coefficient de performance) l'énergie thermique nécessaire à la distillation d'un mètre cube d'eau. Jusqu'à présent, ces appareils fonctionnent en évaporation sous vide, avec une suite de chambres échangeant la chaleur latente et ils constituent des systèmes complexes ne pouvant être réalisés qu'en environnement industriel. Ils représentent un coût d'investissement lourd, et nécessitent des compétences techniques pour leur utilisation. Cependant ils permettent d'obtenir un prix du mètre-cube d'eau très inférieur à celui de la distillation naturelle, dès lors que, dans les deux cas, on prend en compte le prix de l'énergie nécessaire à cette distillation. Ces appareils conviennent très bien pour alimenter des agglomérations importantes (de l'ordre du demi-million d'habitants). Ils sont nombreux dans les pays du Golfe Arabo-Persique.

Pour alimenter des petites communautés (famille, hôtel, village...), nous avons développé le concept d'**alambic à fort coefficient de performance (COP)**, d'une utilisation aussi simple qu'une cuisinière à gaz ou un chauffe-eau, qui permet cependant de produire de l'eau à un prix comparable à celui des systèmes industriels. Il est construit comme un échangeur à contre-courant dont le principal vecteur de la chaleur échangée est la vapeur qui **diffuse sans ébullition** d'une paroi chaude humide vers une paroi froide, **à travers une lame d'air saturé**.

Bien entendu les flux de vapeur obtenus par diffusion sont bien inférieurs à ceux obtenus par la distillation sous vide, mais en contrepartie le fait que l'on opère sous pression atmosphérique permet une utilisation de matériaux à la fois bien meilleur marché que les aciers inoxydables, nécessaires pour encaisser les écarts de pression des systèmes à évaporation sous vide, et cependant résistant à l'agressivité chimique de l'eau de mer à forte température (en l'occurrence du polypropylène). Et le fait qu'il y ait évaporation sans ébullition, permet de disposer les surfaces libres des éléments de l'échangeur à une distance très petite les unes des autres. On arrive ainsi à obtenir plus de 120 m² de surface d'échange par mètre cube d'appareil.

En outre pour s'affranchir de tout organe mobile, la circulation de l'eau à distiller (utilisée par ailleurs comme fluide caloporteur) est obtenue par thermosiphon en abaissant la chaudière sous le niveau de l'appareil, ce qui permet de n'avoir à régler que la puissance de chauffe de l'appareil, de la même façon que l'on règle un brûleur sous une casserole.

2. PRESENTATION DE L'APPAREIL

Notre alambic a l'aspect d'une batterie d'accumulateurs, c'est à dire qu'il est constitué d'une alternance d'éléments d'échange thermique creux et plats, successivement chauds et froids, les éléments de même nature étant reliés entre eux par deux tuyaux situés en diagonale. De la sorte, les 4 coins de l'empilement sont des tuyaux distributeurs d'eau de mer. La circulation de l'eau s'organise de la façon suivante dans l'appareil: A la sortie de la chaudière, l'eau monte vers l'entrée haute des plaques chaudes, entre la sortie basse de ces plaques chaudes et l'entrée basse des plaques froides, on ajoute une quantité d'eau venant d'un réservoir, qui sert de source froide. Ensuite l'eau monte dans les plaques froides et la sortie haute des plaques froides est reliée à la chaudière. Le débit d'eau froide introduit en bas de l'appareil, provoque le débordement d'une quantité égale d'eau chaude, prélevée en sortie de chaudière, que l'on étale sur les plaques chaudes, tapissées d'un matériau mouillable (du papier filtre).

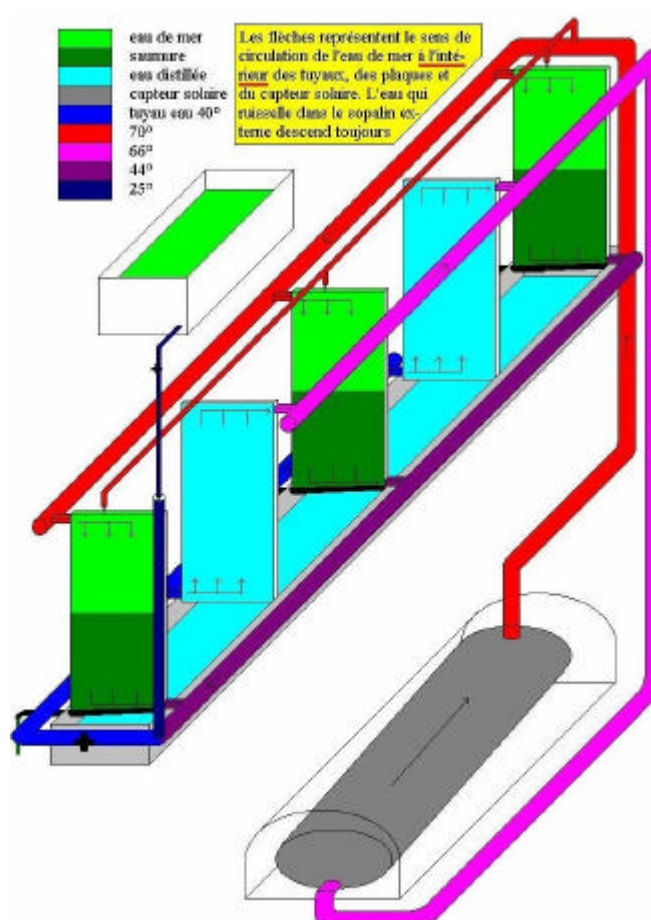


Fig.1 :

Cette eau étalée fournira la vapeur nécessaire à l'échange par diffusion (et donc à la distillation) entre les plaques, et la fraction non évaporée en bas des plaques permettra d'évacuer le sel hors de l'appareil sous forme de saumure.

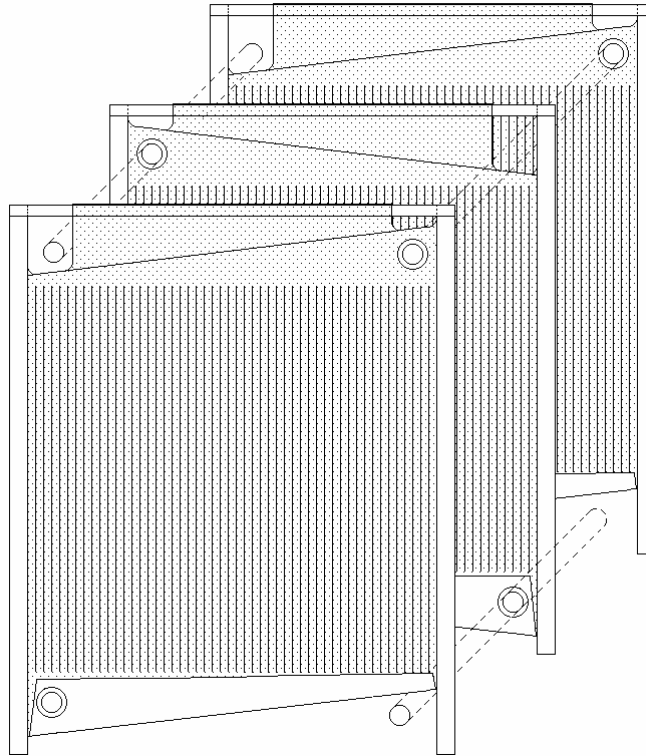


Fig.2 : Trois éléments simples en polypropylène 75 microns tapissée de papier filtre (représenté par le pointillé) perspective éclatée montrant les tuyaux de distribution d'eau

3. LES PERFORMANCES MESUREES

On a obtenu des écarts de température entre plaques de l'ordre du sixième de l'écart de température entre le haut et le bas des plaques, ce qui correspond environ à un COP de 5. En effet une partie de l'échange thermique entre les plaques se fait hors distillation (rayonnement, conduction...) cependant c'est bien la distillation qui est le principal vecteur d'échange de chaleur, pour autant qu'on opère à des températures suffisamment fortes (supérieures à 60°C)

Les débits distillés sont de l'ordre de 200 g/h (5 litres/jour) par m² de surface d'échange. Et comme un mètre cube d'échangeur contient 120m² de surface d'échange, cela nous donne une production quotidienne de l'ordre de grandeur du volume de l'échangeur.

4. ETUDE THEORIQUE

Toute cette étude concerne un échangeur bouclé sur lui-même, donc avec des débits en sens opposés, égaux de part et d'autre, ce qui dans le cas d'un échangeur parfaitement isolé conduit à un écart dT de température constant tout au long de ses parois. Et, dans le cas d'un échangeur classique, à une évolution linéaire des températures tout au long des plaques. Le but de ce chapitre est de présenter la théorie quantitative de l'échangeur à diffusion de vapeur et notamment de définir la notion de Critère Intrinsèque d'Efficacité (Cie) qui permettra de déterminer les performances que l'on peut attendre d'un appareil, et de comparer entre eux divers appareils. Une fois cette notion définie on pourra alors calculer les performances d'un appareil donné en fonction des divers paramètres qui le caractérisent. Ces paramètres sont de deux natures :

1) les paramètres de construction, c'est à dire :

- l'épaisseur moyenne d'eau dans les plaques (e),
- la forme des alvéoles (plane ou en lunule, selon qu'elles sont rigides ou souples)
- l'épaisseur moyenne de la lame d'air entre deux plaques (a),

- La hauteur des plaques (h)
- Le nombre (n) et la largeur (l) des plaques

Tous ces paramètres sont figés à la construction de l'appareil.

2) les paramètres d'utilisation, c'est à dire :

- La vitesse de l'eau dans les plaques (v)
- L'écart de température entre les plaques chaudes et les plaques froides (dT)
- le rapport entre la puissance de la chaudière et la surface d'échange. (P/S)
- La plage de température d'utilisation entre le haut (T1) et le bas (T3) des plaques chaudes

La surface d'échange S n'est autre que le produit de la hauteur par la largeur des plaques et par deux fois le nombre de plaques chaudes (en effet les plaques échangent sur leurs deux faces).

Nous allons maintenant nous attacher à montrer qu'en fait tous ces paramètres sont liés entre eux et que les performances d'un alambic à échangeur par diffusion de vapeur sont caractérisés par le seul Critère Intrinsèque d'Efficacité (Cie). Pour une température donnée T1 en haut des plaques, ce critère passe par un maximum pour une certaine valeur de la température T3 en bas des plaques. Alors que dans le cas d'un échangeur classique sa variation en fonction de T3 serait monotone

5. RAPPEL CONCERNANT UN ECHANGEUR A CONTRE COURANT CLASSIQUE.

Par échangeur à contre-courant classique, on entend un échangeur dont la conductivité thermique (Q/dT, en W/K) des parois ne dépend pas de la température du fluide qui circule à l'intérieur de ses éléments. C'est le cas pour une paroi solide entre deux fluides en mouvement opposé, à travers laquelle la chaleur transite par conduction. Un tel échangeur ne peut fonctionner qu'en restant à l'intérieur de limites de températures déterminées par la tenue des matériaux d'une part, et/ou les températures des sources chaudes et froides d'autre part. Il existe donc une valeur maximale de (T1 - T3). C'est bien entendu pour cette valeur que la puissance échangée sera maximale. Cette puissance maximale échangeable sera évidemment proportionnelle à dT : $Q_{max} = k.S dT$, k étant la conductivité des plaques (qui ne dépend pas de la température dans le cas d'un échangeur classique). Le Coefficient de Performance de l'appareil est, pour sa part, inversement proportionnel à dT. : $COP = (T1 - T3)/dT$.

La quantité : $COP.Q_{max} = k.S(T1 - T3)$ et ne dépend pas de dT. Elle détermine les performances d'un échangeur. Un échangeur sera d'autant plus performant que cette quantité sera plus grande. Si on divise cette quantité par le volume V de l'appareil, on va pouvoir établir la comparaison entre deux échangeurs de volume différents. Nous définissons donc le Critère Intrinsèque d'Efficacité d'un échangeur par la quantité suivante :

$$Cie = COP.Q_{max} / V = k.S(T1 - T3) / V$$

6. CONSIDERATIONS THEORIQUES SUR L'ALAMBIC 3MW.

Ce qui distingue l'alambic 3MW de l'échangeur classique, c'est que la « conductivité thermique » k de ses parois est essentiellement obtenue par la chaleur latente transportée par diffusion de vapeur d'une paroi à l'autre et que cette conductivité par diffusion de vapeur varie dans un rapport supérieur à 10 dans la plage de température que l'appareil peut explorer (de 30°C environ, la limite basse de la source froide, jusqu'à l'ébullition.). Mais, dans le cas de l'alambic 3MW, contrairement à un échangeur classique, la quantité $COP.Q/V$ ne sera pas maximale pour la limite basse de température, car dans cette zone les échanges de chaleur par distillation sont très faibles, mais pour une température T3 à déterminer, et dépendant d'un certain nombre de paramètres.

Afin de pouvoir déterminer de manière précise quelle était la plage de température optimale d'utilisation d'un alambic, nous avons fait réaliser par un laboratoire de thermique (Bertin Technologies), un programme de simulation des échanges thermiques entre deux plaques contiguës, prenant en compte tous les échanges, à savoir conduction à travers l'eau en mouvement dans les plaques (profil laminaire de température, et nombre de Nusselte), conduction à travers les parois, à travers les films d'eau ruisselants, et enfin, conduction, rayonnement et diffusion de vapeur à travers la lame d'air immobile située entre deux plaques. Ce programme nous a permis de tracer l'évolution de la température dans les plaques et de la quantité d'eau distillée à chaque hauteur tout au long de la plaque. Cette information nous étant totalement inaccessible par la mesure. Nous avons pu vérifier la validité du calcul par les mesures de températures en entrée et sortie des plaques chaudes et froides d'une part et de la quantité d'eau distillée, d'autre part. L'ensemble de ces mesures est reliée à la puissance de chauffe que nous pouvons mesurer et faire varier facilement puisque nous chauffons à l'aide d'un thermo-plongeur électrique.

7. LES RESULTATS

Les résultats de cette simulation nous permettent d'accéder à la «conductivité de distillation», par diffusion locale dans la couche d'air séparant les plaques chaudes et froides, à chaque température et de la sorte, vérifier que cette conductivité k n'est pas constante. Dès lors et sachant que cette conductivité diminue avec la température, nous avons pu faire apparaître la plage optimale des températures de fonctionnement de l'appareil et calculer le gain correspondant en terme de prix de revient de l'eau produite.

La forme des canaux permettant d'obtenir le meilleur critère d'efficacité (Cie) est la forme plane, mais c'est aussi la forme la plus chère à réaliser, elle aboutit donc à un prix de revient de l'eau plus important. En effet la forme « en lunule » des canaux est obtenue avec un film souple tapissé de papier filtre, plié en deux (plastique à l'intérieur), et soudé suivant des droites parallèles, Ce qui met le prix de revient du m^2 d'échangeur à 3€ pour une durée de vie de deux ans environ c'est à dire à amortir sur une production de $3,5 m^3$. (Voir figure 2)

Le pas des plaques est le paramètre le plus influent. En effet le critère d'efficacité Cie est inversement proportionnel au carré de ce pas, ce qui s'explique bien : si on divise le pas d'empilement par deux, on multiplie par deux la surface d'échange dans un volume donné et on multiplie par deux les gradients et donc les flux de vapeur distillée.

L'influence du rapport entre l'épaisseur d'eau et le pas des plaques est moins évidente. On aurait pu croire qu'il était intéressant de diminuer la distance des surfaces libres de deux plaques qui se font face afin d'augmenter les gradients de pression de vapeur entre ces deux plaques, mais on s'est rendu compte que la conductivité du canal d'eau était moins bonne que celle de l'air humide par diffusion de vapeur, aux températures où celle-ci est très efficace, on a donc paradoxalement intérêt à diminuer l'épaisseur relative du canal d'eau par rapport à l'épaisseur de la lame d'air.

8. OPTIMISATION DU PRIX DU METRE CUBE D'EAU PRODUIT

Le prix de revient d'un mètre cube d'eau distillé est égal à la somme du coût énergétique (le prix de l'énergie nécessaire à la distillation), et de l'amortissement de l'appareil :

$$Cm^3 = Ce + Ca$$

Le Coût d'amortissement se décompose en deux parties : l'amortissement des parties non consommables (chaudières, tuyaux, isolation thermique, châssis, réserve d'eau, etc...) qui se fait sur 20 ans à raison de 10% par an soit $1/3650^{ème}$ par jour (5% d'amortissement et 5% de frais financiers) et l'amortissement des parties consommables (les éléments d'échange) qui se fait sur la durée de vie de ces éléments (2 ans soit 730 jours, sans frais financiers, soit $1/730^{ème}$ par jour). Le prix d'achat des parties non consommables est fixe, une fois le débit choisi (par exemple un $m^3/jour$) et d'ailleurs il varie très peu avec ce débit. (on l'appellera Paf), tandis que le prix d'achat des éléments dépendra du nombre d'éléments et donc du COP de l'appareil, (on l'appellera Pav). L'amortissement de l'appareil se décomposera donc comme suit :

$$Ca = Paf/3650.Q + Pav/730.Q$$

(Q étant la quantité d'eau distillée chaque jour, c'est à dire le débit de l'appareil, afin d'exprimer l'amortissement par unité de volume produit)

Le nombre d'éléments à utiliser pour obtenir le débit souhaité dépendant du prix de l'énergie, c'est son optimisation que nous allons présenter dans les paragraphes suivants :

Si on veut apprécier le prix du mètre cube d'eau distillée avec un alambic 3MW, on part de la connaissance du Critère intrinsèque d'efficacité :

$$Cie = COP \cdot Q/V \quad (d'ou l'on déduit : V/Q = COP / Cie)$$

On a donc :

$$Cm^3 = Paf/3650.Q + Pav/730.Q + Ce$$

Et

$$Ce = 0,7 Pe/COP$$

où Pe représente le prix de l'énergie en €/MWh. En effet il faut 0,7 MWh (=700 kWh) pour évaporer un mètre cube d'eau.

Donc on exprime le coût du mètre cube distillé de la façon suivante :

$$Cm^3 = 0,7 Pe/COP + Pav/730.Q + Paf/3650.Q$$

La partie variable (P_{av}) du prix d'achat de l'appareil est proportionnelle au volume de l'appareil (c'est à dire au nombre de plaques) $P_{av} = K.V$ (K exprimé en €/mètre cube est égal au prix final du nombre d'éléments nécessaires à avoir un mètre cube de volume d'échangeur.

$$Cm^3 = 0,7 Pe/COP + K.V/Q.730 + Paf/3650.Q$$

$$Cm^3 = 0,7 Pe/COP + K.COP/Cie.730 + Paf/3650.Q$$

Le Cie est une donnée intrinsèque à l'appareil.

Q la quantité produite quotidiennement correspond au besoin de l'utilisateur

Pe dépend de l'énergie utilisée

COP est la quantité à optimiser pour minimiser Cm^3

Le troisième terme de l'addition met clairement en évidence que le coût du mètre cube sera plus faible pour une installation à fort débit, mais ce terme est constant une fois que le débit est choisi, et en particulier il ne dépend pas du COP. En revanche l'optimisation du COP revient à chercher le minimum de la fonction : $a.COP + b/COP$ qui est obtenu pour :

$$a - b/COP^2 = 0, \text{ ou encore, } a.COP = b/COP$$

Soit, en l'occurrence :

$$0,7Pe/COP = K.COP/Cie.730$$

9. APPLICATIONS NUMERIQUES

$Q/V = 1.25$ pour $COP = 6$ soit $COP Q/V = Cie = 7,5$

$K = 10$ €/par plaque et il faut 200 plaques pour avoir un volume d'échange d'un mètre cube, soit 2000 €/mètre cube (marge de distribution égale à 3,3)

1°) $Pe = 60$ €/MWh (cas de l'électricité)

Alors on a : $42/COP = COP.2000/730.7,5 = COP/2,7$

D'où l'on déduit le COP de coût minimum : $COP^2 = 42 \times 2,7 = 113$ soit $COP = 10,6$ et

$$Cm^3 = 8 \text{ €} + Paf/3650 Q$$

2°) Pe de 15 €/MWh (fioul) on a un COP optimal de 5,3 et

$$Cm^3 = 4 \text{ €} + Paf/3650 Q$$

3°) Pour un Pe de 7,5 €/MWh (co-génération) COP optimal de 3,7 et

$$Cm^3 = 2,8 \text{ €} + Paf /3650 Q$$

10. CONCLUSION

L'appareil dont nous avons testé les performances est actuellement évalué dans un organisme officiel pour déterminer la longévité de ses éléments, en outre nous profitons de cette évaluation pour l'essayer à la distillation d'eaux polluées et de rejet, ce qui permettrait d'étendre sa zone d'utilité en dehors du seul littoral.

La détermination et l'optimisation du prix de revient du mètre cube d'eau pour l'utilisateur dépendent du prix de l'énergie à l'endroit où l'appareil est installé, mais il dépend aussi du coût de fabrication, des marges de distribution et de la durée de vie des éléments actifs de l'appareil (c'est à dire, les éléments d'échangeur), on voit par exemple qu'un gain d'un facteur deux sur la durée de vie de l'élément diminue de 40 % le prix du mètre cube produit, de même pour un gain d'un facteur deux sur le prix de l'élément ou sur le Cie de l'appareil. Il y a toujours lieu de choisir en fonction du prix de l'énergie quel est l'investissement optimal pour minimiser le prix de revient de l'eau distillée. En outre, le critère intrinsèque d'efficacité tel qu'il est défini, permet de comparer entre eux tous les systèmes de dessalinisation, tant du point de vue de l'investissement, que du point de vue du coût énergétique.

En tout état de cause l'alambic 3MW permet déjà d'obtenir des coûts du mètre cube d'eau de l'ordre de 3 à 4 € (comparables à la concurrence, et avec un appareil très « rustique » pouvant être utilisé dans un environnement « non industriel » (pays en voie de développement, îles très isolées, catastrophe naturelle, utilisation domestique par la ménagère, etc...) et ce, pour des installations de très petite à moyenne capacité (depuis un jusqu'à cinquante mètres cubes par jour, environ). Ces résultats sont déjà très prometteurs, et en outre nous avons une marge de progression très importante : en diminuant le pas d'empilement des plaques, en industrialisant leur fabrication, et en les faisant fabriquer dans les pays qui en ont besoin, ce qui diminuera et les coûts de fabrication et les marges de distribution, nous devrions pouvoir gagner encore un facteur important sur le coût d'un alambic et partant sur le prix de revient du mètre cube.

NOMENCLATURE

- Ca : coût d'amortissement (€ou \$/m³)
- Cie : Critère intrinsèque d'efficacité (jour⁻¹)
- Cm³ : coût du m³ (€ou \$/m³)
- COP : Coefficient de performances (sans dimension)
- dT T1,T3, : Températures (K)
- Paf : prix d'achat fixe (€ou \$)
- Pav : Prix d'achat variable (€ou \$)
- Pe : Prix de l'énergie (€ou \$/MWh)
- Q débit distillé(m³/jour)
- V : volume de l'échangeur (m³)