De l'eau douce grÃ¢ce Ã des voiles

D'Ã©normes ressources d'eau inexploitÃ©es rÃ©sident dans l'atmosphÃ¨re, particuliÃ¨rement dans les mers chaudes des tropiques. Yves CHARRON, ingÃ©nieur consultant, a conÃ§u un systÃ¨me de rÃ©cupÃ©ration Ã partir de voiles Ã©quipÃ©es d venturis et de condenseurs. H2o avril 2019.

DE L'EAU DOUCE GRÃ‚CE Ã€ DES VOILES

Production d'eau douce Ã l'aide d'une voile dans les mers tropicales

D'Ã©normes ressources d'eau, encore inexploitÃ©es, rÃ©sident dans l'atmosphÃ¨re, tout particuliÃ¨rement, dans les mers chaudes des tropiques. Peut-on imaginer exploiter un jour ces ressources ?

Yves CHARRON

ingÃ©nieur consultant

image d'ouvertureÂ susan-lu4esm

H2o - avril 2019

Les ressources terrestres en eau s'amenuisent d'annÃ©e en annÃ©e avec l'augmentation de la population mondiale, l'amÃ©lioration de l'hygiÃ¨ne et du confort ainsi qu'avec le dÃ©veloppement constant de l'industrie et de l'agriculture. Divers moyens ont Ã©tÃ© mis en œuvre, de par le monde, pour capter la vapeur d'eau dans les zones arides Ã l'aide de filets ou de parois refroidies, les gouttelettes en suspension dans l'air ou encore en faisant condenser la vapeur d'eau contenue dans l'air traversant les pales d'une Ã©olienne, lequel est refroidi par un cycle frigorifique actionnÃ© par l'Ã©olienne. Toutefois, ces diffÃ©rents moyens produisent trÃ¨s peu d'eau, quelques centaines de litres par jour. NÃ©anmoins, d'Ã©normes ressources d'eau, encore inexploitÃ©es, rÃ©sident dans l'atmosphÃ¨re, tout particuliÃ¨rement, dans les mers chaudes des tropiques. Toutefois, ces ressources ne sont accessibles que sous certaines conditions : l'air doit Ãªtre proche de son point de saturation en eau, prÃ©senter une tempÃ©rature Ã©levÃ©e (taux de vapeur d'eau Ã©levÃ©) et se dÃ©p Ã grande vitesse. Ce dernier point est particuliÃ¨rement important tant pour permettre la production d'un grand dÃ©bit d'eau (par l'intermÃ©diaire d'un grand dÃ©bit d'air) que pour faciliter le fonctionnement d'Ã©quipements reposant sur l'effet venturi (refroidissement de l'air suite Ã son accÃ©lÃ©ration). Un refroidissement de l'air humide peut Ã©galement Ãªtre rÃ©alisÃ© Ã l'a de condenseurs. Ces Ã©quipements seraient installÃ©s en mer et montÃ©s Ã l'intÃ©rieur d'une sorte de voile fixÃ©e Ã un poi d'ancrage pour son positionnement automatique face au vent. La voile serait montÃ©e sur des rÃ©servoirs de stockage d'eau douce faisant office de flotteurs, l'Ã©vacuation de l'eau se faisant Ã l'aide de pipelines flexibles ou de tankers.

Une masse d'air traversant une section de 10 000 m2 avec une humiditÃ© relative de 100 %, une tempÃ©rature de 30 Â°C, une vitesse de 10 m/s et refroidie de 10 Â°C permettrait la condensation d'environ 1 200 kg/s (soit 1 200 litres par seconde) de vapeur d'eau. Ã€ raison d'une consommation d'eau par personne de 100 litres par jour, c'est environ 1 million de personnes que l'on pourrait ainsi approvisionner en eau au moyen d'une seule voile.

Â

SUMMARY

Production of fresh water using a sail in tropical seas

Land resources in water are shrinking from year to year with the increase of the world population, improved hygiene and comfort as well as the constant development of industry and agriculture. Various means have been implemented around the world to capture water vapour in arid zones using cooled nets or walls, droplets suspended in the air or by condensing the water vapour contained in the air passing through the blades of a wind turbine, the air being cooled by a cooling cycle operated by the wind turbine. However, these different means produce very little water, a few hundred litres a day. Nevertheless, huge water resources, still unused, reside in the atmosphere, especially in the warm seas of the tropics. However, these resources are only accessible under certain conditions: the air must be close to its saturation point in water, present a high temperature (high fraction of water vapour) and move at a high speed. This last point is particularly important both to allow the production of a large water flow (through a large air flow) and to facilitate the operation of equipment based on the venturi effect (cooling of the air following its acceleration). Cooling of moist air can also be achieved by means of condensers. All these equipment would be installed at sea and mounted inside a kind of sail attached to an anchor point for its automatic positioning in the wind. The sail would be mounted on freshwater storage tanks acting as floats, the evacuation of water being done using flexible pipelines or tankers.

A mass of air passing through a 10,000 m2 section with a relative humidity of 100%, a temperature of 30Â° C, a speed of 10 m/s and cooled by 10Â° C would allow the condensation of about 1,200 kg/s (ie 1,200 litres per second) of water vapour. With a, per capita, water consumption of 100 litres per day, approximately 1 million people could be supplied with fresh water by means of a single sail.

Rappel sur les propriÃ©tÃ©s de l'air

L'air sec est composÃ© principalement d'azote (71 %), de dioxygÃ¨ne (28 %), de gaz rares (dont argon, 0,93 %) ainsi que des traces de dioxyde de carbone, de mÃ©thane et de dihydrogÃ¨ne. La quantitÃ© de vapeur d'eau transportÃ©e par l'air humide est dÃ©terminÃ©e par la pression saturante dÃ©pendante de la tempÃ©rature de l'air (Table 1 et Figure 1).

Table 1 - Pourcentage de vapeur d'eau en fonction de la tempÃ©rature de l'airÂ

Â TempÃ©rature de l'air (Â°C)
Â 0Â
10Â
15Â
20Â

25Â
30Â
35Â
40Â

Â Volume de vapeur d'eau (%) dans l'air
0,6Â
1,2Â
1,7Â
2,3Â
3,2Â
4,2Â
5,6Â
7,4Â

Â

Figure 1 (Ã gauche) - Pression partielle de l'eau en fonction de la tempÃ©rature.Â

Figure 2 (Ã droite)Â -Â Masse d'eau condensable en kg/s en fonction du degrÃ© de refroidissement et pour trois tempÃ©ratur
d'air.

Â

La fraction de vapeur contenue dans l'air augmente avec la tempÃ©rature selon une fonction quadratique (croissance supÃ©rieure Ã une fonction linÃ©aire - Figure 1). Pour un mÃªme degrÃ© de refroidissement, la fraction condensÃ©e est peu dÃ©pendante de la tempÃ©rature. Ainsi, pour une tempÃ©rature de 30 Â°C et un refroidissement de 10 Â°C, la fraction condensÃ©e est de 45 %. Ã€ 1 % prÃ¨s ce pourcentage est le mÃªme pour une tempÃ©rature 5 Â°C plus Ã©levÃ©e ou plus ba
(Table 2).

Table 2 - Eau condensÃ©e pour plusieurs degrÃ©s de refroidissement et plusieurs tempÃ©ratures initiales

(A : 35 Â°CÂ - B : 30 Â°C - C : 25 Â°C)

Â Refroidissement en Â°CÂ
5Â
10Â
15Â
20Â
25Â

Â AÂ - Eau condensÃ©e en kg/seconde
1 084Â
1 995Â

2 615Â
3 119Â
3 449Â

Â AÂ - Eau condensÃ©e en pourcentage
24,2Â
43,7Â
58,4Â
69,7Â
78,8Â

Â BÂ - Eau condensÃ©e en kg/seconde
871Â
1 531Â
2 036Â
2 415Â
2 698Â

Â BÂ - Eau condensÃ©e en pourcentage
25,7Â
45,2Â
60,0Â
71,2Â
79,6Â

Â CÂ - Eau condensÃ©e en kg/seconde
660Â
1 164Â
1 543Â
1 826Â
2 034Â

Â CÂ - Eau condensÃ©e en pourcentage
26,2Â
46,2Â
61,2Â
72,5Â
80,7Â

Rappel sur les mers tropicales

Dans la zone Ã©quatoriale, la tempÃ©rature Ã la surface de l'eau se situe gÃ©nÃ©ralement entre 28 et 32 Â°C. Cette tempÃ©r est relativement constante au cours d'une journÃ©e ainsi qu'au cours de l'annÃ©e. Dans cette zone, point de rencontre des alizÃ©s, la vitesse du vent est trÃ¨s faible (le fameux "Pot au noir" que cherchent Ã Ã©viter tous les marins). Dans la zone intertropicale, la tempÃ©rature Ã la surface de l'eau est voisine de 30 Â°C tandis que les alizÃ©s prÃ©sentent une vitesse moyenne de 5 Ã 6 m/s. Dans les zones tropicales, la tempÃ©rature Ã la surface de l'eau est en moyenne de 30 Â°C avec quelques variations saisonniÃ¨res tandis que, dans certaines rÃ©gions, la vitesse du vent peut dÃ©passer les 10 m/s. Il convient de noter deux points : d'une part, que l'air est gÃ©nÃ©ralement Ã une tempÃ©rature plus Ã©levÃ©e que celle Ã la su de l'eau. On considÃ©rera nÃ©anmoins, Ã titre conservatif, une tempÃ©rature moyenne d'air de 30 Â°C ; d'autre part, que la vitesse du vent augmente avec l'altitude (de faÃ§on importante au-delÃ de 100 mÃ¨tres). On considÃ©rera nÃ©anmoins, Ã titre trÃ¨s conservatif, une vitesse moyenne de 10 m/s.

La quantitÃ© de vapeur d'eau traversant une section perpendiculaire Ã l'Ã©coulement est dÃ©terminÃ©e par les caractÃ©ristiq de l'air et l'aire de la section. Ã€ titre d'exemple, considÃ©rons une section de 10 000 m2 (pour conserver une certaine analogie avec la surface balayÃ©e par les pales d'une grande Ã©olienne), une tempÃ©rature de 30 Â°C et un vent de 10 m/s (36 km/h). La masse d'air traversant, par seconde, cette section est de 127.6 tonnes dont 3 390 kg de vapeur d'eau. Si cette quantitÃ© d'eau pouvait Ãªtre intÃ©gralement captÃ©e lors de la traversÃ©e de cette section, la production d'eau serait gigantesque. Elle s'Ã©lÃ¨verait, par an, Ã 105 millions de tonnes ou encore 105 milliards de tonnes si l'on disposait de 1 000 capteurs de mÃªme nature.

La consommation moyenne d'eau par jour d'un individu est de 100 litres, soit, par an, 36 milliards de tonnes pour 1 milliard d'individus. Un rendement de capteur de 34 % serait alors suffisant pour produire la quantitÃ© d'eau requise. L'abaissement d'une dizaine de degrÃ©s d'un air Ã 30 Â°C saturÃ© en vapeur d'eau, se dÃ©plaÃ§ant Ã 10 m/s permettrait d'atteindre ce niveau de rendement, le passage de 30 Ã 20 Â°C correspond Ã une condensation d'environ 45 % de la vapeur d'eau.

Les informations annuelles ci-dessus illustrent les moyens qu'il convient de mettre en place tant du point de vue du stockage que du transport maritime ou terrestre. Si l'air n'est pas saturÃ© en vapeur d'eau ou sa tempÃ©rature est infÃ©rieure Ã 30 Â°C ou sa vitesse est infÃ©rieure Ã 10 m/s, il faudra refroidir l'air dans des conditions plus sÃ©vÃ¨res ou il faudra plus de capteurs. L'exemple ci-dessus illustre nÃ©anmoins ce qu'il est possible d'obtenir dans une mer tropicale oÃ¹ l'humiditÃ© relative est gÃ©nÃ©ralement voisine de 100 %, la tempÃ©rature de l'air lÃ©gÃ¨rement supÃ©rieure Ã 30 Â°C et les vents parfo trÃ¨s supÃ©rieurs Ã 10 m/s.

Captation de la vapeur d'eau : Les moyens Ã mettre en œuvreÂ

La captation de la vapeur d'eau s'effectue Ã l'aide d'un Ã©quipement appelÃ© Voile en ce sens qu'elle se positionne toujours face au vent. Elle prÃ©sente sur sa surface des orifices dÃ©bouchant sur des Ã©quipements refroidissant l'air. Ces Ã©quipements sont de trois types : des venturis, des condenseurs ou des Ã©quipements hybrides faisant fonction de venturi et de condenseur.

Voile Ã©quipÃ©e d'un ensemble de venturisÂ -Â Un venturi est composÃ© de l'amont vers l'aval, d'un tube (ou canal ou tuyÃ¨re convergent, d'un col (aire minimale du venturi) et d'un tube divergent. Dans cette configuration, le gaz (air) est tout d'abord fortement accÃ©lÃ©rÃ© atteignant sa vitesse maximum au niveau du col puis dÃ©cÃ©lÃ©rÃ© retrouvant en sortie sensiblement les conditions amont de tempÃ©rature et de pression. Au niveau du col, la forte augmentation de vitesse engendre une diminution de pression et, s'agissant d'un fluide compressible, d'un refroidissement du gaz. Sur un plan Ã©nergÃ©tique, en amont, l'Ã©nergie Ã©lastique (rapport pression/masse volumique) est partiellement transformÃ©e en Ã©ner cinÃ©tique (demi-produit de la vitesse au carrÃ©) et l'inverse en aval. Lorsque l'Ã©nergie totale amont est Ã©gale Ã l'Ã©nergie totale aval on dit qu'il y a conservation de l'Ã©nergie. Pour que le refroidissement soit significatif il est nÃ©cessaire d'atteindre une vitesse de l'ordre du tiers ou de la moitiÃ© de la vitesse du son (100 Ã 150 m/s). Lorsque la dÃ©tente (amont - refroidissement) et la compression (aval -Â rÃ©chauffement) d'un gaz se font sans Ã©change de chaleur avec l'extÃ©rieur on parle de dÃ©tente et de compression adiabatiques.

Figure 3 - Chute de tempÃ©rature en fonction du rapport Aire venturi / Aire d'entrÃ©e - Te 35 et 25 Â°C

La vitesse requise au niveau du col est plus facilement atteinte avec une vitesse Ã©levÃ©e Ã l'entrÃ©e du venturi. Ainsi, l'aire de passage au niveau du col devra Ãªtre deux fois plus petite pour une vitesse d'entrÃ©e de 10 m/s que pour une vitesse de 20 m/s engendrant des pertes de charge considÃ©rablement plus Ã©levÃ©es dans le premier cas que dans le second. De faÃ§on similaire, Ã col identique, le taux de refroidissement sera plus Ã©levÃ© avec une vitesse Ã©levÃ©e qu'avec une vitesse faible Ã l'entrÃ©e du venturi.

Il reste une difficultÃ© thermodynamique majeure Ã surmonter : la cinÃ©tique de la condensation dÃ©crivant le processus faisant passer progressivement l'eau de l'Ã©tat de gaz Ã l'Ã©tat de liquide. La masse d'eau thÃ©oriquement condensable est dÃ©finie par les conditions d'Ã©quilibre (stabilisation). En mode cinÃ©tique, il faut tout d'abord passer par une premiÃ¨re phase de nuclÃ©ation oÃ¹ quelques molÃ©cules d'eau se lient entre elles pour former les premiers nano grains liquides qui, coalesÃ§ant entre eux, forment progressivement des gouttelettes sub puis micromÃ©triques. Ce n'est qu'avec des gouttelettes de quelques dizaines de microns qu'il deviendra possible de les collecter sur les parois d'un canal. Cette cinÃ©tique Ã la condensation requiert, par consÃ©quent, un allongement du col du venturi lÃ oÃ¹ prÃ©cisÃ©ment les pertes de charge sont les plus Ã©levÃ©es.

Il convient de noter qu'Ã ces vitesses d'Ã©coulement relativement Ã©levÃ©es, le transport diphasique (liquide - gaz) s'effectue en mode annulaire, l'eau s'Ã©coulant en partie sur la paroi du canal tandis que l'air constitue le cœur de l'Ã©coulement (transportant l'autre partie liquide en phase dispersÃ©e). Les caractÃ©ristiques d'un Ã©coulement annulaire varient de faÃ§on importante avec la vitesse du gaz. A une vitesse d'Ã©coulement trÃ¨s Ã©levÃ©e (100 m/s), la phase liquide est principalement transportÃ©e sous forme de micro gouttelettes Ã l'intÃ©rieur de la phase gazeuse, la fraction annulaire du liquide Ã©tant faible. Dans ce rÃ©gime, ce sont les forces de cisaillement et d'entraÃ®nement qui prÃ©valent. Ã€ une vitesse d'Ã©coulement relativement faible (10 Ã 20 m/s) la coalescence des gouttelettes est facilitÃ©e permettant un dÃ©pÃ´t pariÃ©tal plus important (prÃ©dominance des forces inertielles). Ã€Â une vitesse intermÃ©diaire, c'est l'ensemble des forces qui interagissent entre elles. Le liquide pariÃ©tal est collectÃ© en aval du col avant que la section divergente (zone de diffusion) ne fasse l'objet d'un rÃ©chauffement significatif (compression du gaz). La collecte de l'eau s'effectue par un systÃ¨me d'aspiration pariÃ©tale ou encore par l'intermÃ©diaire d'une paroi poreuse.

Voile Ã©quipÃ©e d'un ensemble de condenseursÂ -Â Dans le cas prÃ©sent, l'air chaud et humide traverse des Ã©quipements dont les parois sont refroidies par un fluide extÃ©rieur Ã une tempÃ©rature infÃ©rieure Ã celle de l'air. Ils sont appelÃ©s des condenseurs.

Ces Ã©quipements ne prÃ©sentent pas de forte restriction de passage comme dans le cas d'un venturi, leur partie interne (surface d'Ã©change) ne faisant que trÃ¨s partiellement obstacle Ã l'Ã©coulement. Contrairement aux Ã©changeurs de chaleur conÃ§us pour un fluide process oÃ¹ il est possible de maÃ®triser les pertes de charge par la pression amont, dans un systÃ¨me atmosphÃ©rique il n'est pas possible d'intervenir sur ce paramÃ¨tre. Il faut, par consÃ©quent, permettre un bon Ã©change de chaleur entre l'air et les internes d'un condenseur pour maximiser l'abaissement de la tempÃ©rature sans pour autant rÃ©duire le dÃ©bit d'air au niveau de l'entrÃ©e du condenseur. Par consÃ©quent, la quantitÃ© maximum d'eau condensÃ© est un compromis entre, d'une part, l'efficacitÃ© des internes du condenseur qui dÃ©termine la tempÃ©rature de sortie d'air et, d'autre part, les pertes de charge des internes qui dÃ©terminent le dÃ©bit d'air.

Pour le refroidissement de l'air chaud, il est possible d'utiliser l'eau de mer puisÃ©e au niveau de la thermocline se situant,

gÃ©nÃ©ralement, en mer tropicale, entre 100 et 200 mÃ¨tres de profondeur afin de disposer d'une eau Ã une tempÃ©rature d'environ 15 Â°C en vue d'un refroidissement de l'air humide Ã 20 Â°C. Entre 0 et 100 mÃ¨tres de profondeur, la tempÃ©rature de l'eau est voisine de 25 Â°C tandis qu'en dessous de 200 mÃ¨tres elle est infÃ©rieure Ã 10 Â°C. Ce n'est qu'en dessous de 1000 m que la tempÃ©rature est isotherme et voisine de 5 Â°C.

Voile Ã©quipÃ©e d'un ensemble d'Ã©quipements hybrides (venturi - condenseur) - De faÃ§on Ã minimiser le nombre de condenseurs, la surface de la voile est quadrillÃ©e par des zones appelÃ©es des concentrateurs d'air au centre desquels se situe pour chacun d'eux un condenseur.

Les concentrateurs prÃ©sentent une forme conique, canal convergent facilitant l'Ã©coulement vers le condenseur situÃ© en aval. Le rapport de surface entre l'entrÃ©e du condenseur et celle du concentrateur dÃ©termine l'accÃ©lÃ©ration de la vitesse de l'air Ã l'intÃ©rieur du condenseur et l'effet venturi s'y Ã©tablissant. En aval, un diffuseur conique (forme inversÃ©e du concentrateur) permet l'Ã©vacuation de l'air en minimisant les pertes de charge.

Les Ã©quipements hybrides sont dimensionnÃ©s sur la base d'une vitesse de vent de 10 m/s, le refroidissement s'effectuant principalement Ã l'aide des condenseurs permettant ainsi une minimisation des pertes de charge et l'entrÃ©e d'un dÃ©bit maximum d'air. Lorsque la vitesse de l'air augmente de faÃ§on significative (bourrasque), l'effet venturi se produit (Figure 3) et un surplus de refroidissement d'air s'ajoute Ã celui produit par le condenseur augmentant la production d'eau de faÃ§on considÃ©rable : dÃ©bit d'eau condensÃ©e proportionnelle Ã la fois Ã la vitesse du vent et au cumul des deux refroidissements (condenseur et venturi).

Adaptation des Ã©quipements aux conditions atmosphÃ©riques

Direction du vent - La voile se positionne naturellement face au vent lors d'un changement de direction du vent.

IntensitÃ© du vent - Les consÃ©quences d'une variation de l'intensitÃ© du vent sont diffÃ©rentes selon qu'il s'agisse d'un systÃ¨me composÃ© de venturis, de condenseurs ou d'Ã©quipements hybrides.

Dans le paragraphe sur les venturis, il est prÃ©cisÃ© qu'un bon fonctionnement est conditionnÃ© par une vitesse suffisante au niveau du col, par consÃ©quent, Ã l'entrÃ©e d'un venturi. En cas de rÃ©duction de la vitesse du vent, il est nÃ©cessaire d'ajuster la vitesse Ã l'entrÃ©e des venturis en rÃ©duisant le nombre de venturis en opÃ©ration. L'inverse est Ã©galement nÃ©cessaire en cas d'augmentation de la vitesse du vent. Sans cette action, le refroidissement serait ou insuffisant (vitesse trop faible) ou trop important entraÃ®nant un risque de gel au niveau du col (vitesse trop importante). (Voir Figure 3.) Un mode de contrÃ´le (ouverture - fermeture) est donc requis pour les venturis contrairement aux condenseurs opÃ©rant sans effet venturi.

Les Ã©quipements hybrides combinent les deux modes de refroidissement avec une intensitÃ© relative qui varie avec la

vitesse du vent. Il convient, tout d'abord, de prÃ©ciser qu'une vitesse nominale de 10 m/s est insuffisante pour obtenir un effet venturi significatif sans une forte dÃ©gradation des performances du systÃ¨me (diminution du dÃ©bit d'air). Ainsi lorsque la vitesse du vent diminue, la production d'eau reste proportionnelle Ã la vitesse de l'air. En revanche, lorsque la vitesse du vent augmente, l'effet venturi se dÃ©clenche et s'intensifie progressivement, la production d'eau augmentant plus vite que l'augmentation de la vitesse du vent dÃ» au sur refroidissement de l'air. A titre d'exemple, une augmentation de la vitesse de l'air de 10 Ã 20 m/s conduit, dans un premier temps Ã une augmentation de la production d'eau de 100 % tandis que le sur refroidissement du venturi conduit lui Ã une sur production d'eau de 50 % (5 Â°C de sur refroidissement du venturi s'ajoutant au 10 Â°C de refroidissement du condenseur). L'augmentation relative de la production d'eau s'accÃ©lÃ¨re avec une augmentation de la vitesse du vent.

Ainsi, la connaissance de la vitesse moyenne du vent n'est pas suffisante pour dÃ©terminer la production d'eau. Il convient Ã©galement de connaÃ®tre la variabilitÃ© de la vitesse du vent.

TempÃ©rature de l'air - Les consÃ©quences d'une rÃ©duction de la tempÃ©rature de l'air ambiant ne sont pas non plus les mÃªmes pour les venturis ou pour les condenseurs. Pour les venturis, la rÃ©duction de tempÃ©rature de l'entrÃ©e au col est plus dÃ©pendante de la vitesse du vent que de la tempÃ©rature d'entrÃ©e ne modifiant pas la vitesse au niveau du col ni donc son rendement intrinsÃ¨que. En revanche, les venturis produiront moins de liquide suite Ã une diminution de la tempÃ©rature ambiante et donc des pressions saturantes (entrÃ©e et col). Les condenseurs fonctionneront avec un moins bon rendement pour deux raisons : la pression saturante est plus faible Ã l'entrÃ©e tandis que la pression saturante au niveau du condenseur est inchangÃ©e (dÃ©terminÃ©e par la tempÃ©rature du fluide de refroidissement). L'inverse se produit pour une augmentation de la tempÃ©rature de l'air ambiant.

HumiditÃ© relative - Cas d'une pression partielle de l'eau infÃ©rieure Ã la pression saturante : c'est le cas le plus difficile Ã traiter car il faut tout d'abord abaisser la tempÃ©rature Ã un niveau permettant Ã la pression partielle de l'eau d'atteindre la pression saturante. Cas d'une pression partielle de l'eau supÃ©rieure Ã la pression saturante : c'est le cas d'un brouillard (gouttelettes d'eau en suspension dans l'air), une situation trÃ¨s favorable oÃ¹ il est possible de recueillir Ã la fois l'eau liquide en suspension dans l'air et celle sous forme de vapeur.

Conception gÃ©nÃ©rale du systÃ¨me de production d'eau douce

Le systÃ¨me s'apparente Ã une voile dÃ©doublÃ©e se positionnant automatiquement face au vent (7). Les deux parties de la voile sont sensiblement parallÃ¨les, l'une en amont (1) faisant face au vent et l'autre (2) en aval. Entre ces deux faces, est installÃ©e une batterie (3) de venturis, de condenseurs et / ou de systÃ¨mes hybrides (venturi - condenseur). Figures 4, 5 et 6.

De faÃ§on Ã rÃ©duire le nombre et la taille des condenseurs, la face avant est Ã©quipÃ©e de concentrateurs (4) le centre de chacun dÃ©bouchant sur un condenseur (3). La face aval est Ã©quipÃ©e de diffuseurs (5) s'apparentant Ã des concentrateurs montÃ©s Ã l'envers.

Figure 4 - Voile dÃ©doublÃ©e sur supports flottants (stockage d'eau), systÃ¨me d'amarrage, bouÃ©e de dÃ©chargement.

Vue Ã©clatÃ©e d'un Ã©quipement hybride (venturi - condenseur). Vue en perspective.

L'Ã©nergie requise pour le pompage de l'eau de mer (11) peut Ãªtre fournie par une petite Ã©olienne (12) montÃ©e au centre de la voile (Figure 5). Compte tenu du positionnement de la voile par rapport au vent, l'Ã©olienne est toujours placÃ©e face au vent. Elle peut Ãªtre montÃ©e au centre d'un concentrateur avec des ouÃ¯es latÃ©rales permettant une rÃ©gulation de la vitesse de l'air au niveau des pales. Ã‰quipÃ© d'une Ã©olienne, le systÃ¨me de production est autonome en Ã©nergie. Une partie de l'Ã©nergie produite peut Ãªtre convertie en Ã©nergie Ã©lectrique pour la signalisation maritime du systÃ¨me de production ainsi que pour la communication radio des informations relatives au systÃ¨me : vitesse et direction du vent, tempÃ©rature de l'air (amont et aval) et de l'eau (mer, thermocline, rejet), humiditÃ© relative, hauteur d'eau dans les rÃ©servoirs et paramÃ¨tres liÃ©s Ã l'Ã©olienne.

Figure 5 - Voile sur supports flottants (rÃ©servoirs de stockage d'eau), bouÃ©e de dÃ©chargement, unitÃ© de pompage d'eau de la thermocline et Ã©olienne centrale pour la motorisation de l'unitÃ© de pompage.

Un champ de production d'eau douce sera composÃ© de plusieurs voiles de production. Ces unitÃ©s seront raccordÃ©es par des pipelines flexibles Ã un cluster, lui-mÃªme reliÃ© Ã la terre par une conduite d'eau.

La voile est supportÃ©e en plusieurs points par les rÃ©servoirs de stockage d'eau douce (6) prÃ©sentant une forme profilÃ©e de faÃ§on Ã rÃ©duire la rÃ©sistance au vent. Les rÃ©servoirs de stockage sont soit reliÃ©s Ã terre par l'intermÃ©diaire de pip flexibles soit Ã une bouÃ©e de dÃ©chargement (8) pour le remplissage de tankers de transport d'eau douce.

Dans la mesure oÃ¹ les unitÃ©s de production sont Ã©loignÃ©es de la cÃ´te (quelques dizaines de kilomÃ¨tres) pour permettre l'accÃ¨s Ã la thermocline ainsi qu'Ã des vents de grande intensitÃ©, elles sont installÃ©es en grand nombre, Ã une distance relativement courte les unes des autres, pour une rÃ©duction des coÃ»ts globaux. Dans cette configuration, des pipelines flexibles relient les unitÃ©s Ã un cluster duquel dÃ©bouche une conduite rigide de grand diamÃ¨tre reliÃ©e Ã la cÃ´te. Par analogie avec les Ã©oliennes, on appellera cet ensemble un "champ" (ou une "ferme") de production d'eau douce.

Dans une version extrÃªme, la voile est composÃ©e d'un seul Ã©quipement de refroidissement hybride intÃ©grant les deux fonctions : venturi et condenseur (Figure 6). La partie amont (4) joue Ã la fois le rÃ´le de concentrateur et de tuyÃ¨re de dÃ©tente, la partie centrale, la plus Ã©troite, (3) celui de col de venturi et la partie aval (5) celui de tuyÃ¨re de diffusion. ConsidÃ©rant la mÃ©thode de dimensionnement d'un venturi, la longueur de l'Ã©quipement est de l'ordre de 5 Ã 10 fois le diamÃ¨tre d'entrÃ©e, l'Ã©quipement prenant alors la forme d'un "tunnel flottant" ou d'un "serpent de mer".

Contrairement du systÃ¨me constituÃ© d'une voile comprenant plusieurs unitÃ©s de refroidissement et une Ã©olienne centrale (Figure 5) dans le cas d'un seul Ã©quipement l'installation d'une Ã©olienne n'est pas envisageable. En revanche, le "serpent

de mer" articulÃ©, principalement, de part et d'autre de la partie centrale (10) permet d'envisager la rÃ©cupÃ©ration d'une Ã©nergie significative considÃ©rant la masse relativement importante des sections 3, 4 et 5 et donc des forces inertielles. D'autres formes de rÃ©cupÃ©ration d'Ã©nergie sont envisageables, par exemple, au niveau des flotteurs. L'excÃ©dent d'Ã©nergie est stockÃ© dans des batteries Ã©lectriques.

Figure 6 - UnitÃ© composÃ©e d'un seul Ã©quipement de refroidissement. Selon le mode de dimensionnement d'un venturi, l'Ã©quipement se prÃ©sente sous la forme d'un "tunnel flottant" ou d'un "serpent de mer".

Flottant naturellement, les unitÃ©s de production sont transportÃ©es sur leur lieu de production par des remorqueurs.

Compte tenu des variations saisonniÃ¨res, les unitÃ©s de production d'eau douce peuvent Ãªtre remorquÃ©es d'un tropique Ã l'autre de faÃ§on Ã optimiser la production d'eau par la recherche des vents de grande intensitÃ©, Ã l'extÃ©rieur de la zone intertropicale, tout en bÃ©nÃ©ficiant d'une tempÃ©rature Ã©levÃ©e Ã l'extÃ©rieur de cette zone. Cette stratÃ©gie rÃ©pond Ã© aux besoins en eau qui sont gÃ©nÃ©ralement plus importants pendant les pÃ©riodes chaudes.

Sur le plan structurel, l'unitÃ© de production d'eau doit pouvoir rÃ©sister Ã une houle de grande amplitude comme aux bourrasques de vent que ce soit les Ã©lÃ©ments immergÃ©s (rÃ©servoirs, conduites flexibles) que les Ã©lÃ©ments submergÃ© rÃ©sistance au vent de la voile est dÃ©pendante du type d'Ã©quipement. Ainsi, s'agissant de "simples condenseurs" (sans concentrateur, sans effet venturi) couvrant la totalitÃ© de la voile, la rÃ©sistance au vent est relativement faible. S'agissant de "simples venturis" (sans fonctionnalitÃ© de condenseur), la rÃ©sistance au vent est particuliÃ¨rement Ã©levÃ©e, la faible dimension du col Ã©tant dÃ©terminÃ©e pour une faible intensitÃ© du vent. S'agissant d'Ã©quipements hybrides (condenseur - venturi) avec effet venturi se dÃ©clenchant seulement aux fortes intensitÃ©s du vent, la dimension du col du venturi est plus importante que pour un "simple venturi" et la rÃ©sistance au vent est intermÃ©diaire entre celle de "simples condenseurs" et de "simples venturis". Un exemple structurel est donnÃ© sur la figure 7 avec les Ã©lÃ©ments principaux de la structure (13), les plaques mÃ©talliques (ou matÃ©riau composite) recouvrant la structure (14) ainsi que les Ã©lÃ©ments de protection au vent consistant en des ouÃ¯es (volets) s'ouvrant naturellement par la force du vent (15).

Figure 7 - Exemple de mode structurel d'un concentrateur ou tuyÃ¨re convergente de venturi.

Conclusion

Une surface supportant des Ã©quipements produisant du froid, par effet venturi ou par l'intermÃ©diaire d'un fluide rÃ©frigÃ©rant, et traversÃ©s par un air chaud et humide permet la condensation de la vapeur d'eau contenue dans cet air. La quantitÃ© d'eau traversant la surface est d'autant plus importante que l'air est Ã une tempÃ©rature Ã©levÃ©e, proche de son

point de saturation en vapeur d'eau et animÃ© d'une grande vitesse de dÃ©placement. Ces conditions sont trÃ¨s souvent rencontrÃ©es dans les mers tropicales contrairement Ã la zone Ã©quatoriale oÃ¹ la vitesse du vent est relativement faible. Ã€ cet effet, l'ensemble des Ã©quipements repose sur la surface de la mer Ã l'aide de flotteurs servant de rÃ©servoirs de stockage d'eau douce. Le mode d'ancrage permet au systÃ¨me de se positionner face au vent comme une voile.

La quantitÃ© d'eau recueillie est d'autant plus grande que la surface de la voile est importante et le degrÃ© de refroidissement important. Dans le cas d'une surface de 10 000 m2 (similaire Ã la surface balayÃ©e par les pales d'une grande Ã©olienne), un air Ã 30 Â°C, saturÃ© en humiditÃ©, animÃ© d'une vitesse de 10 m/s et refroidi de 10 Â°C permet de recueillir 1 200 kg ou litres d'eau par secondeÂ (en rÃ©alitÃ© 1 500 kg/s en appliquant un rendement de 80 %). Cette quantitÃ© devient 1 600 kg/s pour un refroidissement de 15 Â°C en puisant l'eau de refroidissement dans la thermocline Ã plus grande profondeur. Un refroidissement supplÃ©mentaire de 5 Â°C produit par un venturi permet d'accroÃ®tre cette production Ã 1 900 kg/s d'oÃ¹ l'intÃ©rÃªt de combiner les deux technologies afin d'obtenir un froid plus intense. Toutefois, la performance d'un venturi reste extrÃªmement faible pour un vent de l'ordre de 10 m/s. Ce n'est que lorsque le vent atteint une vitesse de 20 m/s que la performance du venturi devient significative. La performance d'un venturi devient prÃ©pondÃ©rance lorsque la vitesse du vent s'accroÃ®t au-delÃ de cette valeur. La variabilitÃ© de la vitesse du vent est un Ã©lÃ©ment dÃ©terminant dans la production d'eau douce.

Ã€ raison d'une consommation moyenne par individu de 100 litres d'eau par jour et d'une production de 1 200 litres par seconde, c'est environ un million de personnes que l'on pourrait ainsi alimenter en eau ou encore un milliard de personnes si l'on disposait de mille voiles. Cette production est considÃ©rablement plus Ã©levÃ©e que les moyens actuellement mis en œuvre dans les zones arides ou dans les montagnes avec des tamis pour recueillir la rosÃ©e du matin ou les gouttelettes en suspension dans un brouillard ou encore les Ã©oliennes actionnant un cycle frigorifique. Ces derniers moyens permettent gÃ©nÃ©ralement l'approvisionnement de seulement quelques dizaines d'individus se limitant Ã une consommation d'eau d'une dizaine de litres par jour.Â

Le rÃ©chauffement climatique est une prÃ©occupation majeure pour tous les habitants de la planÃ¨te. Il convient, toutefois, de noter qu'un rÃ©chauffement global de 2,5 Â°C permettrait une surproduction d'eau de l'ordre de 15 % (Table 2) par rapport Ã une production de 1 200 kg/s (base 30 Â°C).

La production d'eau douce par les pays tropicaux pourrait constituer une source de revenus importante pour ces pays gÃ©nÃ©ralement pauvres prenant en compte la diminution des ressources en eau douce et l'aggravation des conditions climatiques.Â

Sur la base des Ã©quipements dÃ©crits dans ce document c'est le confort (service d'adduction d'eau), l'hygiÃ¨ne et l'agriculture qui connaÃ®traient un dÃ©veloppement considÃ©rable. â–„

Â

L'auteur

Yves Charron a effectuÃ© ses Ã©tudes d'ingÃ©nieur Ã l'ENSEEIHT de Toulouse ainsi qu'Ã l'UniversitÃ© d'Oxford (GB) pour

prÃ©paration de son doctorat en mÃ©caniques fluides (D.Phil). Il a tout d'abord exercÃ© ses activitÃ©s au sein du groupe Dresser (Ã©quipements pÃ©troliers) puis du groupe Total (dÃ©veloppement de champs pÃ©troliers). Il a par la suite effectuÃ© des recherches sur les Ã©coulements diphasiques Ã l'Atomic Energy Authority puis participÃ© Ã des projets pÃ©troliers, parapÃ©troliers ainsi que sur l'efficacitÃ© Ã©nergÃ©tique au sein de l'Institut FranÃ§ais du PÃ©trole (compression et dÃ©tente diphasique, traitement des gaz acides, production de GNL, rÃ©duction de la traÃ®nÃ©e aÃ©rodynamique et systÃ¨mes Ã©olien

Yves Charron

ResSources

Captage de la vapeur d'eau dans les rÃ©gions arides - Tours & filets de NylonÂ

Production d'eau au Sahel - Mur refroidi Â

Six inventions qui rÃ©volutionnent l'accÃ¨s Ã l'eau potable

L'Ã©olienne qui produit de l'eau potable Â

PropriÃ©tÃ©s de l'air Â

HumiditÃ© relative, pression saturante et pression partielle