



INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY  
UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION



INTERNATIONAL CENTRE FOR THEORETICAL PHYSICS  
34100 TRIESTE (ITALY) - P.O.B. 586 - MIRAMARE - STRADA COSTIERA 11 - TELEPHONES: 224281/2 3 4/5 6  
CABLE: CENTRATOM - TELEX 460392 - I

SMR/112 - 18

IV<sup>o</sup> SEMINAIRE SUR L'ENERGIE SOLAIRE

(10 - 21 septembre 1984)

DESSALEMENT PAR OSMOSE INVERSE  
ASSOCIEE A L'ENERGIE EOLIENNE

A. MAUREL  
C.E.A., C.E.N.C.  
Service Chimie Appl.  
B.P. 1  
13115 St Paul-lez-Durance  
France

DESSALEMENT PAR OSMOSE INVERSE  
ASSOCIEE A L'ENERGIE EOLIENNE

par

A. MAUREL - A. PHILIPPE - C. VANDENBORRE

CEA - CEN CADARACHE

et

J.M. NOEL - SOCIETE AEROWATT

## 1 - ENERGIE EOLIENNE ET EAU DOUCE

Il existe de nombreuses îles ou des régions isolées en bordure de mer qui ne peuvent se développer favorablement par suite du manque d'eau douce. Ce sont souvent par contre des régions fortement ventées disposant de cette énergie toujours renouvelée, l'énergie éolienne qu'il est possible d'utiliser pour produire l'eau douce nécessaire à la vie.

Parmi les différents procédés de dessalement actuellement opérationnels le procédé d'osmose inverse apparu il y a quelques années est celui qui est susceptible de s'adapter le mieux avec l'énergie éolienne et ceci pour plusieurs raisons :

- c'est un procédé simple qui peut être considéré en première approche comme une filtration sous pression,
- c'est un procédé modulaire qui permet d'obtenir des installations de n'importe quelle capacité,
- c'est enfin un procédé dont la consommation d'énergie est à des valeurs très faibles.

## 2 - PRINCIPE DE L'OSMOSE INVERSE (fig. 1)

### - Osmose

Soit un récipient divisé en deux compartiments par une membrane à perméabilité sélective\*. L'un contient de l'eau pure, l'autre de l'eau salée. Il s'établit entre les deux côtés de la membrane une différence de pression. L'eau pure diffuse alors vers l'eau salée.

Un équilibre est atteint lorsque la pression du côté de la solution concentrée devient telle qu'elle s'oppose au passage de l'eau pure. La dénivellation qui s'établit alors mesure ce qu'on appelle la pression osmotique ( $\bar{\omega}$ ).

\* Ces membranes ont la propriété de laisser passer l'eau pure et de constituer une barrière pour les sels dissous.

### - Osmose inverse

Si l'on maintient au-dessus de l'eau salée une pression supérieure à la pression osmotique, la diffusion a lieu en sens inverse, ce qui a pour effet d'extraire de l'eau pure de la solution salée.

La pression osmotique est proportionnelle à la teneur en sels dissous, soit de l'ordre de 0,7 bar pour une salinité de 1 gramme par litre.

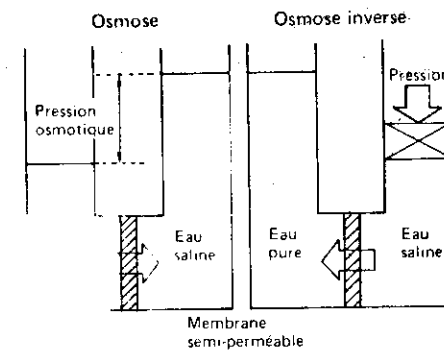


FIG. 1 - PRINCIPE DE L'OSMOSE INVERSE

## 3 - ETAT DE LA TECHNIQUE D'OSMOSE INVERSE

L'osmose inverse est actuellement un procédé de dessalement qui s'est pratiquement imposé pour le dessalement des eaux saumâtres et qui commence à concurrencer sérieusement les techniques de distillation pour le dessalement de l'eau de mer principalement dans le domaine des faibles capacités ( $\leq 1000 \text{ m}^3/\text{jour}$ ).

### 3.1. - Les membranes

#### a) Membranes en acétate de cellulose.

Les membranes en diacétate de cellulose qui sont les plus anciennes peuvent être considérées comme les membranes de la première génération mais elles sont encore utilisées. Nous citerons en particulier la SFEC qui réalise de telles membranes pour l'unité de dessalement de l'île d'HOUATT ( $50 \text{ m}^3/\text{jour}$ ) ainsi que pour les unités qui équipent les sous-marins.

Ces membranes se caractérisent par une structure anisotrope ou asymétrique qui a été mise au point vers 1960 par LOEB et SOURIRAJAN à l'Université de Californie.

Une telle membrane, examinée en section transversale au microscope électronique, est formée de 2 couches superposées :

- une peau très fine (de 0,1 à 1,5  $\mu\text{m}$ ) d'épaisseur homogène et de structure extrêmement fine.
- une sous-couche de 100 à 200  $\mu\text{m}$  et de texture beaucoup plus poreuse.

Les propriétés de séparation de la membrane (perméabilité, sélectivité) dépendent uniquement de la structure de la peau.

L'inconvénient majeur de ces membranes est leur fragilité :

- . zone de pH de fonctionnement limitée (4,5 à 6),
- . dégradation par les bactéries,
- . température de travail inférieure à 30°C.

Toutefois exploitée normalement, la durée de vie d'une membrane en acétate de cellulose est de l'ordre de 2 ans.

#### b) Membranes en polyamides aromatiques.

Ce type de membranes est actuellement commercialisé uniquement sous forme de fibres creuses par la Société DUPONT de NEMOURS.

Deux types sont actuellement disponibles, appelés respectivement B9 et B10.

Les membranes B9 ont un taux de rejet de l'ordre de 92 % et sont utilisées principalement pour le dessalement des eaux saumâtres.

Les membranes du type B10 ont un taux de rejet par rapport aux sels, supérieur à 98,5 % et sont utilisées pour le dessalement de l'eau de mer en un seul étage.

Elles se présentent sous la forme de fibres creuses ayant un diamètre extérieur de l'ordre de 100 microns et un diamètre intérieur de l'ordre de 40 microns.

Les principales caractéristiques de ces membranes sont les suivantes :

- elles peuvent travailler dans une gamme de pH comprise entre 4 et 11,
- elles peuvent supporter des températures de l'ordre de 35°C sans risque de dégradation,
- elles ne sont pas dégradées par les bactéries,
- elles sont toutefois extrêmement sensibles aux oxydants et en particulier au chlore.

Utilisées correctement ces membranes ont une durée de vie comprise entre 3 et 5 ans.

#### c) Membranes composites en poly (éther-urée) ou poly (éther-amide).

Les membranes composites sont relativement récentes. Ce sont des membranes asymétriques dont la couche active et le support poreux sont de nature chimique différente.

Pour le dessalement de l'eau de mer, ce type de membrane est actuellement commercialisé par la Société UOP sous la dénomination NS100 ou PA300, par la société DDS\* sous la dénomination HR.

Par rapport aux autres membranes elles présentent les caractéristiques suivantes :

- 1°) . leur perméabilité à l'eau est relativement élevée,
- 2°) . elles peuvent être stockées à sec,
- 3°) . elles sont stables dans une gamme de pH élevé (2 à 11),
- 4°) . elles peuvent fonctionner à des températures relativement élevées (60°C en continu par exemple pour la membrane HR 98 de DDS),
- 5°) . elles sont très sensibles au chlore.

#### 3.2. - Modules d'osmose inverse

Si la membrane est l'élément essentiel d'une unité d'osmose inverse, le dispositif de support et de mise en oeuvre appelé module est un élément très important. En effet, de la technologie utilisée va dépendre :

- le choix et l'importance du prétraitement de l'eau,
- la compacité de l'installation et par la même sont coût,
- la possibilité ou l'impossibilité pour l'exploitant de changer les membranes.

Les trois principaux types de modules utilisés en dessalement sont les suivants :

- module fibres creuses,
- module spirales
- module plan.

\* La membrane DDS HR est un copolymère amide/imide.

### a) Modules fibres creuses (fig.2)

Ce type de module utilise des membranes qui se présentent sous forme de capillaires de diamètre compris entre quelques  $\mu\text{m}$  et quelques  $\text{mm}$ .

Le principal constructeur est la firme Du Pont qui produit des fibres d'un diamètre extérieur d'environ 80 microns, pratiquement comme un cheveu humain. Sous l'action de la pression à l'extérieur des fibres, l'eau pénètre à l'intérieur. Les extrémités des fibres sont rassemblées à l'une des extrémités du module par un plateau en plastique epoxy. Le perméat sort à l'extrémité des fibres, qui n'ont d'ailleurs pas besoin de support physique.

#### - Avantages

- Appareil compact.

#### - Inconvénients

- Extrêmement sensible au colmatage.
- Le changement de membrane nécessite aussi le remplacement du support.

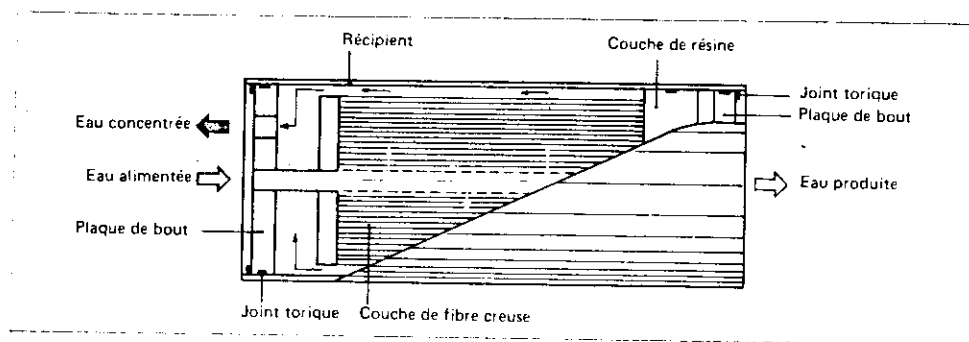


FIG. 2 : MEMBRANES FIBRES CREUSES

### b) Modules SPIRALE (fig. 3)

Dans ce type de module, la membrane semi-perméable est enroulée en spirale autour d'un support souple. Le perméat est filtré vers le centre du tube et collecté dans un tuyau. Les principaux fabricants de ce système sont UOP (United Oil Products, Fluid Division), HYDRAUNAUTICS et FILMTEC.

#### - Avantages

- Appareil compact  
(moins que les fibres creuses)

#### - Inconvénients

- Exige un prétraitement soigneux  
(moins que les fibres creuses)
- Difficile à nettoyer.
- Le changement des membranes se fait par changement de cartouches.

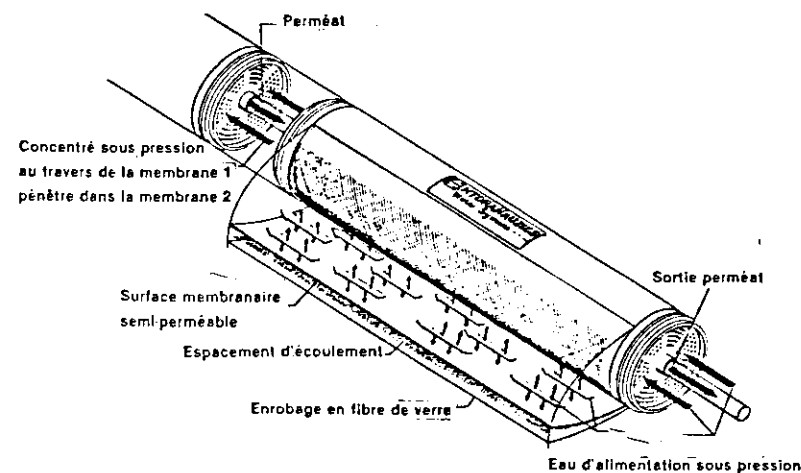


FIG. 3 : MODULE SPIRALE

### c) Module Plan (Fig. 4)

Les modules de cette conception utilisent des membranes planes supportées par des plaques poreuses au travers desquelles passe le perméat.

Les fabricants principaux sont la Société Danoise DDS et la Société Allemande GKSS.

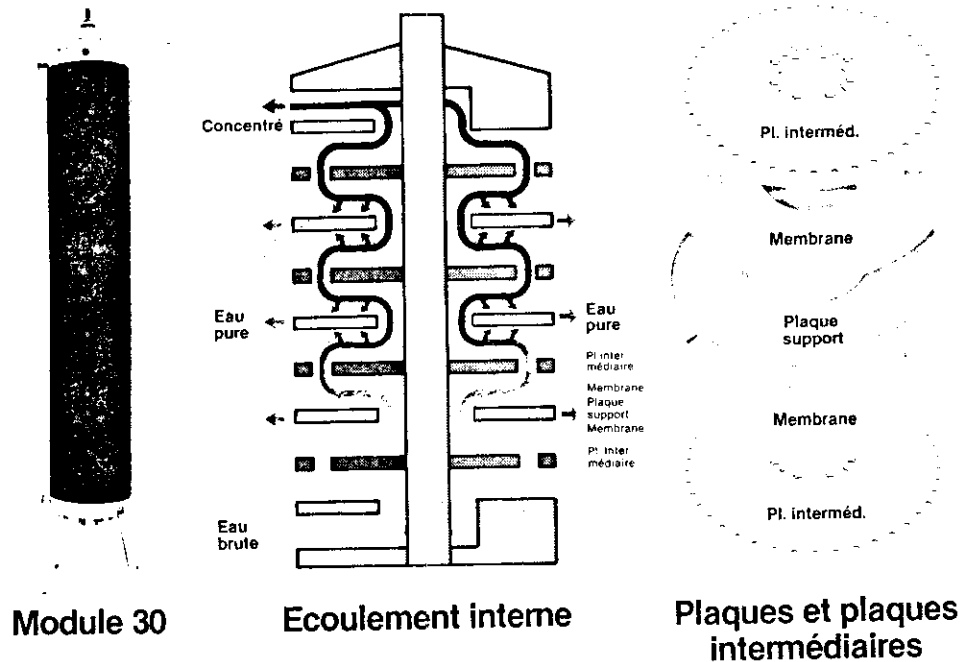


FIG. 4 : MODULE PLAN DDS

### - Avantages

- Membranes faciles à placer.
- Pas d'arrêt de production pour une rupture de membrane.
- Changement de membranes possible (seulement les membranes défectueuses).
- Ne demande qu'un faible prétraitement.

### - Inconvénients

- Demande assez d'espace.
- Coût élevé.

Le choix du type de module doit se faire principalement en fonction des caractéristiques physiques de l'eau à traiter (turbidité, matières en suspension, ...) et de la taille de l'installation.

### 4 - CONSOMMATION D'ENERGIE DU PROCEDE D'OSMOSE INVERSE (fig. 5).

L'osmose inverse est actuellement le procédé qui permet de dessaler de l'eau de mer avec la consommation énergétique la plus faible.

La consommation énergétique d'une unité d'osmose inverse est donnée par la relation suivante :

$$W = \frac{P}{36,7 \cdot Y \cdot \eta_p} - W_{\text{turb.}}$$

W : consommation énergétique en kWh/m<sup>3</sup>,

P : pression de fonctionnement en bar,

Y : taux de conversion en %,

$\eta_p$  : rendement du groupe électropompe,

$W_{\text{turb.}}$  : énergie récupérée par turbine en kWh/m<sup>3</sup>.

#### 4.1. - Taux de conversion

Rappelons que le taux de conversion Y est le rapport entre la quantité d'eau douce produite et la quantité d'eau de mer entrant dans l'installation :

$$Y = \frac{\text{Quantité eau douce produite}}{\text{Quantité eau de mer nécessaire}} \times 100$$

Le choix de la valeur de ce paramètre résulte des considérations suivantes :

a) . Du point de vue énergétique on a intérêt à avoir le taux de conversion le plus élevé possible ; la consommation d'énergie est en effet inversement proportionnelle au taux de conversion. Nous verrons au paragraphe suivant que ceci n'est plus vrai si l'on a un système de récupération d'énergie.

b) . Du point de vue entartrage soit par  $\text{CaCO}_3$ , soit par  $\text{CaSO}_4$  on doit avoir le taux de conversion le plus faible possible. En particulier si l'on veut éviter des dépôts de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  le taux de conversion doit être inférieur à 69 % et ceci en supposant que les concentrations sont uniformes. Or, en fait, elles sont toujours plus élevées par suite du phénomène de polarisation.

c) . Du point de vue colmatage (fouling) on a intérêt à avoir des vitesses de balayage les plus élevées possibles de manière à éviter les zones mortes ou les zones à faible vitesse.

d). Du point de vue importance du prétraitement et coût d'investissement il est évident que le taux de conversion doit être le plus élevé possible de manière à réduire la taille et par la même le coût des appareils (filtres à sable par exemple), ainsi que la consommation de réactifs chimiques pendant l'exploitation.

De l'ensemble de ces considérations il résulte que le taux de conversion est compris en 10 et 35 % dans le cas de l'eau de mer :

- la valeur de 10 % est adoptée pour les petites unités ayant un prétraitement sommaire (plates formes off-shore).

- la valeur de 30 - 35 % est adoptée pour des installations de capacité importante ayant un prétraitement complet (coagulation, floculation) et où l'on cherche à minimiser les coûts d'investissement.

#### 4.2. - Choix du type de pompe haute pression

Après les modules, la pompe haute pression est un des éléments les plus importants d'une unité d'osmose inverse. En particulier la consommation d'énergie dépend directement de son rendement.

Les différents types de pompes disponibles sur le marché sont les suivantes:

- . **Pompes volumétriques à pistons** : ces pompes sont très utilisées pour les petites unités. Elles ont en effet un très bon rendement et leur prix est peu élevé. Elles sont toutefois d'un entretien relativement coûteux et produisent des pulsations qui sont parfois gênantes.

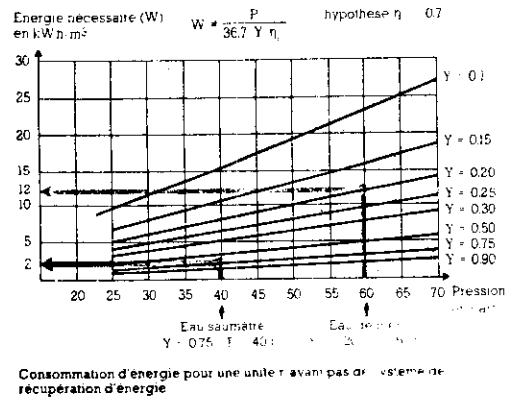
- . **Pompes centrifuges multiétages** : l'obtention de pression relativement élevées (40 - 60 bars) avec des pompes centrifuges tournant à des vitesses normales (1500 - 3000 tours/min) nécessite de mettre en série un nombre élevé d'étages (de 10 à 50 suivant la taille) ce qui se traduit par une certaine complexité et des rendements relativement faibles.

- . **Pompes centrifuges monoétagées à grande vitesse** : ce type de pompe tend à se développer de plus en plus en raison des facilités de mise en œuvre et de maintenance. Les vitesses de rotation sont comprises entre 10000 et 20.000 tours/min.

#### 4.3. - Récupération d'énergie sur les rejets de saumure

La saumure qui quitte une unité d'osmose inverse a, à la perte de charge près, la même pression que l'eau d'alimentation. Dans la mesure où le taux de conversion est relativement faible, ce qui veut dire qu'il y a relativement beaucoup d'eau qui sort du côté rejet, il est tentant d'essayer de récupérer l'énergie de cette eau à haute pression au moyen d'une turbine par exemple. Si en première approximation, on néglige les pertes de charge et si l'on suppose que le rendement de la pompe d'osmose et le rendement de la turbine sont égaux à 70 %, l'énergie récupérée en valeur relative est égale à :

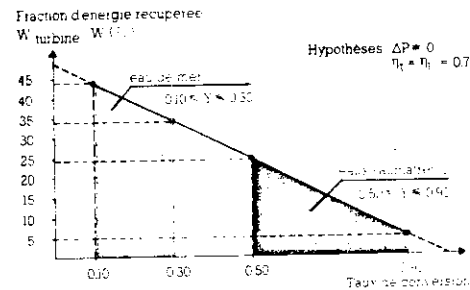
- 25 % dans le cas des eaux saumâtres avec un taux de conversion de 50 %,
- 35 % dans le cas de l'eau de mer avec un taux de conversion de 25 %.



Récupération d'énergie en fonction du taux de conversion

$$\frac{W_{\text{turbine}}}{W} = \frac{P - \Delta P}{P} \cdot \eta_t \cdot \eta_p \cdot (1 - Y)$$

P = pression de l'eau de mer à l'entrée de l'osmoseur  
 $\Delta P$  = perte de charge de l'osmoseur  
 $P - \Delta P$  = pression de la saumure à la sortie de l'osmoseur  
 $\eta_t$  = rendement de la turbine  
 $\eta_p$  = rendement du groupe de pompage  
 $Y$  = taux de conversion



A noter: que les valeurs d'énergie indiquées ci-dessus correspondent uniquement à l'énergie du procédé de dessalement. Il convient d'ajouter l'énergie de pompage nécessaire pour monter l'eau du niveau de la mer jusqu'à l'installation ainsi que l'énergie requise pour le prétraitement.

FIG. 5 : CONSOMMATION D'ENERGIE DU PROCEDE D'OSMOSE INVERSE

Du point de vue technologique deux solutions sont actuellement envisageables :

### 1°) - Turbines PELTON

C'est ce type de turbine qui a été développé pour les petites unités destinées à être associées à l'énergie éolienne. La puissance récupérée est de l'ordre du kilowatt, avec des rendements de l'ordre de 70 %.

### 2°) - Pompes Turbines intégrées GUINARD

Le principe des machines développées par GUINARD est de récupérer l'énergie de rejet dans une turbine hydraulique de haut rendement, transmise mécaniquement à la pompe par l'intermédiaire d'un arbre commun. Actuellement ce type de machine est développé principalement pour les débits élevés (300 m<sup>3</sup>/h).

### 5. ENERGIE FOURNIE PAR LE VENT

La puissance maximale que l'on peut extraire du vent par un dispositif de surface S est donnée par la loi de BETZ

$$P = 0,37 S V^3$$

P en Watt, S en m<sup>2</sup>, V en m/s.

Pour une hélice de diamètre D, la limite de BETZ est égale à (fig. 6) :

$$P = 0,29 D^2 V^3$$

D étant le diamètre de l'hélice en mètre.

Pour les aérogénérateurs actuellement commercialisés, le rendement en énergie électrique varie entre 30 et 50 % de la limite de BETZ.

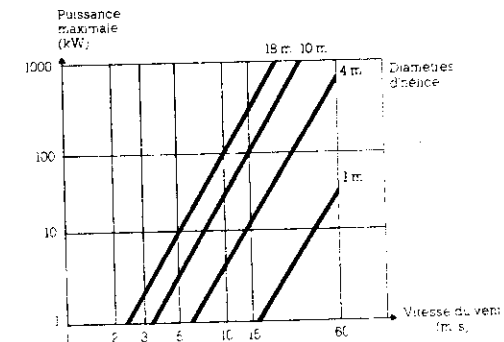


FIG. 6 : PUISSANCES MAXIMALES (limite de BETZ) POUR DIFFERENTS DIAMETRES D'HELICE.

La capacité de production d'eau douce obtenue par une unité d'osmose inverse va donc dépendre du type d'aérogénérateur et en particulier du diamètre de l'hélice, du spectre des vitesses de vent disponibles sur le site, de la taille de l'unité de dessalement et enfin du système de couplage aérogénérateur/unité de dessalement choisi.

## 6 - DIFFERENTS SYSTEMES DE COUPLAGE AEROGENERATEURS/UNITE DE DESSALEMENT PAR OSMOSE INVERSE

Le dessalement de l'eau de mer par association d'un aérogénérateur type AEROWATT avec une unité d'osmose inverse peut être effectué, à priori, suivant différents systèmes (fig. 7) :

- fonctionnement au fil du vent (couplage direct),
- fonctionnement avec stockage d'énergie (soit système à courant continu, soit système à courant alternatif avec onduleur).

Nos travaux sont basés sur une fourniture d'énergie électrique alternative (380 Volts - triphasé) par un aérogénérateur type AEROWATT.

L'aérogénérateur est caractérisé par sa puissance nominale  $P_n$  pour une vitesse de vent  $V_n$  ainsi que par la vitesse de vent de début de production  $V_1$  (fig.8).

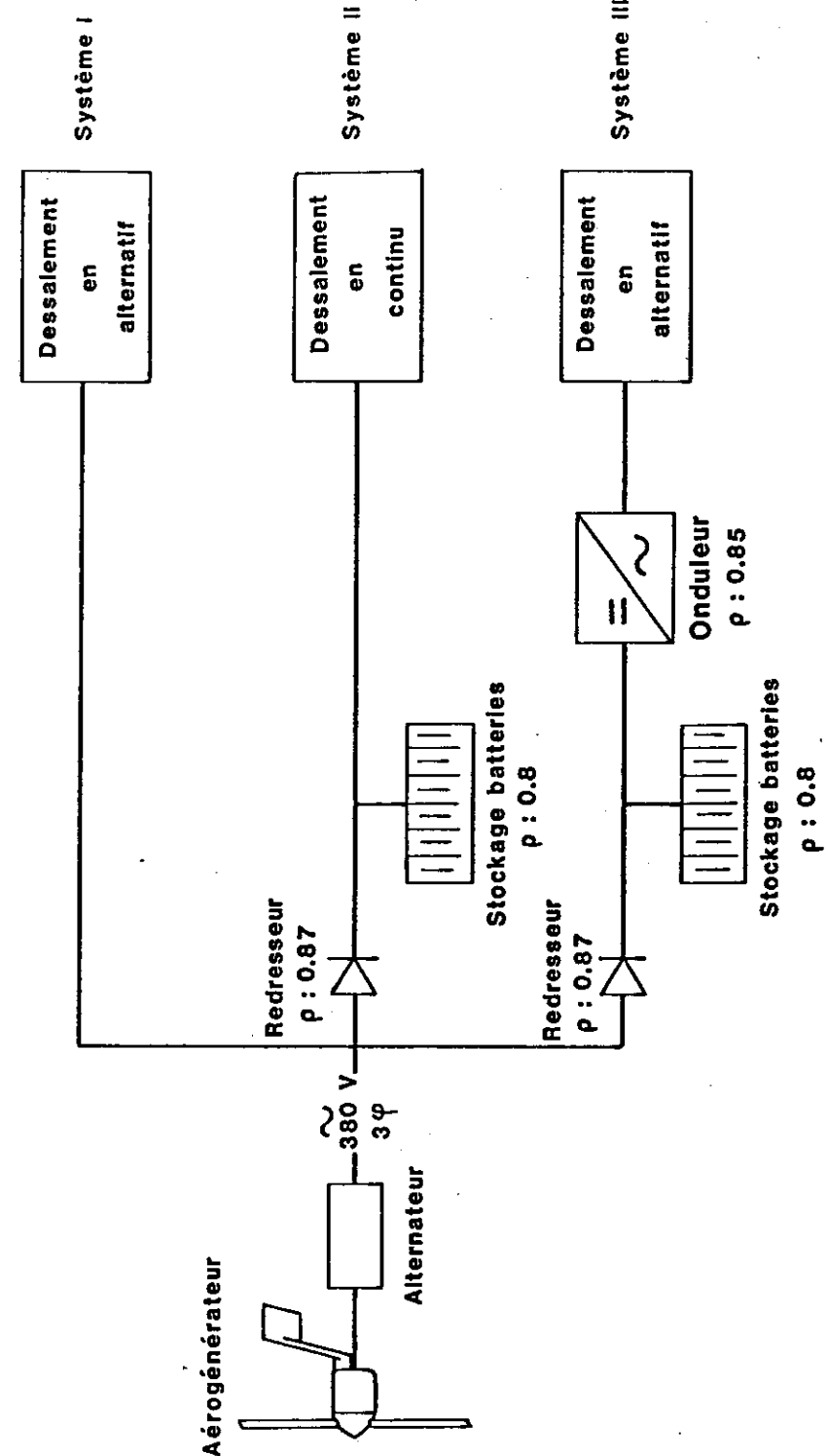
### 6.1. - Couplage direct

Ce système de couplage le plus simple, consiste à utiliser l'énergie délivrée aux bornes de l'aérogénérateur sous forme de 380 V alternatif directement dans le récepteur, en l'occurrence l'unité de dessalement.

#### a) Avantages du couplage direct

A priori, le fonctionnement au fil du vent par couplage direct de l'aérogénérateur avec l'unité de dessalement présente plusieurs avantages :

- grande simplicité,
- rendement optimal,
- utilisation de matériel standard,
- investissement minimal.





## b) Inconvénients du couplage direct

L'expérimentation que nous avons faite soit au PLANIER, soit au PACIFIQUE, soit à FARAMAN nous a montré les inconvénients du système en particulier dans le cas de certains sites où le vent fluctue par rapport à la vitesse nominale  $V_n$ .

- Nombre élevé des démarrages-arrêts lors des périodes transitoires où le vent souffle aux environs de  $V_n$  ou en rafales. Ces démarrages provoquent des "coups de bélier" dans l'unité de dessalement, fatiguant le matériel et diminuant de manière sensible sa longévité (problème des modules d'osmose inverse en particulier).

- Complexité de l'armoire électrique de commande et de contrôle de l'unité de dessalement : condensateurs pour assurer le démarrage, résistances pour éviter les battements ...

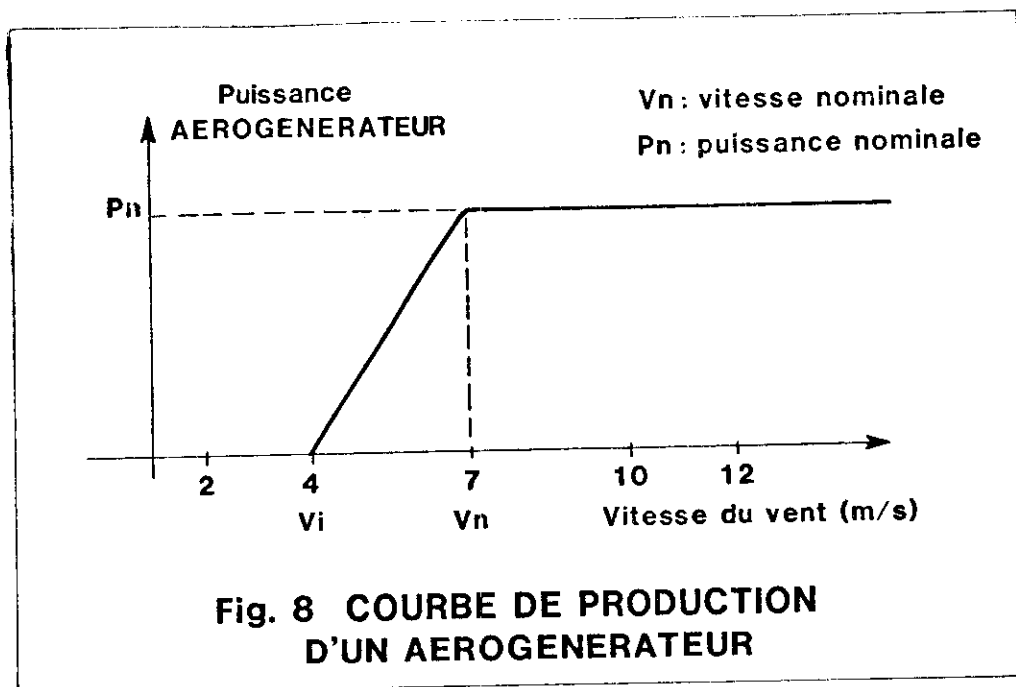
- Fonctionnement de l'unité de dessalement uniquement lorsque  $V > V_n$ .  
Il en résulte que l'énergie fournie par l'aérogénérateur pour  $V_i < V \leq V_n$  est inutilisée.

- Nécessité d'associer une unité de dessalement de puissance identique (et même légèrement inférieure) à la puissance de l'aérogénérateur. La diminution du rendement du groupe électropompe ou de la turbine PELTON au cours du temps peut entraîner une impossibilité de couplage.

## 6.2. - Couplage batterie - courant continu

Ce schéma est simple et très utilisé dans la technique des énergies renouvelables. Il consiste à redresser le courant alternatif en sortie d'aérogénérateur et d'alimenter l'unité de dessalement en courant continu :

- soit directement si  $V > V_n$  avec un rendement de 0,87 (rendement de l'ensemble transformateur + redresseur),
- soit indirectement par l'intermédiaire d'un stockage d'énergie sur batteries si  $V_i \leq V \leq V_n$ . Dans ce cas, le rendement du système ne sera que de 0,69 par suite des pertes dues au stockage (rendement du redresseur égal à 0,87 et rendement de la batterie égal à 0,80).



### a) Avantages du système

- Récupération quasi complète de l'énergie produite par l'aérogénérateur en particulier pour  $V_i \leq V \leq V_n$ .
- Réduction du nombre de démarrages-arrêts d'où augmentation de la fiabilité du matériel.
- Simplification de l'armoire électrique de commande et de contrôle.
- Possibilité de faire fonctionner une unité de dessalement de puissance différente de celle de l'aérogénérateur.

### b) Inconvénients du système

- Coût élevé des moteurs à courant continu. Pour des puissances de l'ordre de 3 à 4 kW un moteur à courant continu coûte 5 à 6 fois plus cher qu'un moteur à courant alternatif.
- Coût relativement élevé du stockage d'énergie sur batteries d'accumulateurs ( $\approx 1000$  Francs/kWh).
- Rendement énergétique du système relativement faible du aux pertes dans le redresseur et le stockage.
- Difficultés à l'heure actuelle pour disposer d'un groupe électropompe immergé à courant continu fiable et d'un prix correct. Cette difficulté peut être résolue dans le cas où une pompe immergée est absolument nécessaire par une solution hybride : utilisation d'un onduleur pour alimenter un groupe électropompe classique fonctionnant en 380 V alternatif.

### 6.3 - Couplage batterie-onduleur - courant alternatif

Ce type de couplage consiste à redresser l'énergie alternative fournie par l'aérogénérateur, puis à alimenter l'unité de dessalement en 380 V alternatif par l'intermédiaire d'un onduleur :

- soit directement si  $V > V_n$  avec un rendement global de 0,73 (rendement transformateur-redresseur 0,87 - rendement onduleur 0,85),
- soit indirectement en utilisant l'énergie stockée avec un rendement global de 0,59 (rendement batterie 0,8 X 0,73  $\approx$  0,59).

### a) Avantages du système

Outre les avantages identiques à ceux décrits dans le couplage batterie-courant continu, nous avons l'emploi de matériel standard fonctionnant en courant alternatif 380 Volts.

### b) Inconvénients

- rendement énergétique faible,
- investissement identique à celui du couplage batterie-courant continu.

## 7 - PERFORMANCES ATTENDUES DES DIFFERENTS SYSTEMES EN FONCTION DU SITE

Pour une installation de dessalement de capacité horaire donnée, la quantité d'eau douce produite pendant une certaine période va dépendre :

- 1°) du système de couplage aérogénérateur/unité de dessalement choisi.
- 2°) des caractéristiques du gisement éolien du site.

En effet, dans l'état actuel de la technique :

- le fonctionnement au fil du vent ne permet une production d'eau douce que si  $V \geq V_n$ ,
- le fonctionnement avec stockage d'énergie permet une production d'eau douce dès que l'on a  $V \geq V_i$  et ceci au prorata de la quantité d'énergie fournie par l'aérogénérateur.

Pour un site donné, l'histogramme en % du temps annuel des vents aux différentes vitesses peut être découpé en 3 tronçons :

- $V < V_i$  : production énergétique nulle,
- $V_i < V < V_n$  : production énergétique inférieure à  $P_n$ ,
- $V \geq V_n$  : production énergétique égale à  $P_n$ .

( $P_n$  étant la production énergétique nominale).

### 7.1. - Cas d'un site où l'on aurait en permanence $V > V_n$

- Dans ce cas le couplage direct ayant par définition un rendement de 100 %, la production d'eau douce est maximale.

- le couplage batterie-courant continu ayant un rendement de 87 % pour  $V \geq V_n$ , la production d'eau sera égale à 87 % de celle obtenue par couplage direct.

- le couplage batterie onduleur ayant un rendement de 73 % pour  $V \geq V_n$ , la production d'eau sera égale à 73 % de celle obtenue par couplage direct.

Il apparaît donc, que pour ce site théorique où on a toujours  $V \geq V_n$ , le couplage direct est la solution qui permet avec une installation de dessalement de capacité donnée, d'obtenir la production d'eau maximale.

### 7.2. - Cas d'un site soumis au régime des alizés tel que l'île de HAO (Pacifique)

Dans l'île de HAO, l'histogramme de 1981 donne en pourcentage annuel :

- $V \leq V_i$  pendant 26 % du temps
- $V_i < V < V_n$  pendant 36 % du temps
- $V \geq V_n$  pendant 38 % du temps

Appelons Q la production nominale de l'installation de dessalement (en m<sup>3</sup>/h par exemple).

La comparaison a été faite en prenant pour les différents rendements les valeurs suivantes :

Rendement du redresseur	$\eta_r = 0,87$
Rendement du stockage	$\eta_s = 0,80$
Rendement de l'onduleur	$\eta_o = 0,85$

- Dans le cas d'un couplage direct (système 1) la production annuelle d'eau douce sera égale à :

$$Q_1 \text{ annuel} = Q \cdot 8760 \cdot 0,38 \quad \text{m}^3/\text{an}$$

- Dans le cas d'un couplage avec stockage d'énergie et unité de dessalement fonctionnant en courant continu la production annuelle d'eau sera la somme de 2 termes :

•  $V > V_n$  : dans ce cas la production sera égale à celle du couplage direct minorée par le rendement du redresseur  $\eta_r$  que nous avons pris égal à 0,87 soit :

$$Q \cdot 8760 \cdot 0,38 \cdot 0,87$$

$$Q \cdot 8760 \cdot 0,33$$

•  $V_i < V < V_n$  : dans ce cas la puissance moyenne fournie par l'aérogénérateur est estimée à 66 % de la puissance nominale. De plus le rendement est minoré des rendements successifs du redresseur (0,87) et du stockage batteries (0,80). D'où une production d'eau annuelle égale à :

$$Q \cdot 8760 \cdot 0,66 \cdot 0,36 \cdot 0,87 \cdot 0,80$$

$$Q \cdot 8760 \cdot 0,17$$

La somme totale annuelle sera donc égale à la somme des 2 termes, soit :

$$Q_2 \text{ annuel} = Q \cdot 8760 \cdot 0,50 \quad \text{m}^3/\text{an}$$

Par rapport au couplage direct (système 1) la production du système 2 avec stockage est supérieure d'environ 32 %

$$\frac{Q_2(\text{annuel})}{Q_1(\text{annuel})} = \frac{0,50}{0,38} = 1,32$$

- Dans le cas d'un couplage avec stockage d'énergie et onduleur (système 3) le calcul est identique mais il faut tenir compte en plus du rendement de l'onduleur :

•  $V > V_n$

$$Q \cdot 8760 \cdot 0,38 \cdot \eta_r \cdot \eta_o$$

$$Q \cdot 8760 \cdot 0,28$$

$$V_i < V < V_n$$

$$Q \cdot 8760 \cdot 0,36 \cdot 0,66 \cdot \eta_r \cdot \eta_o$$

D'où une production totale annuelle pour le système 3 égale à :

$$Q_{3(\text{annuel})} = Q \cdot 8760 \cdot 0,42 \quad \text{m}^3/\text{an}$$

Par rapport au couplage direct (système 1) la production du système 3 est supérieure d'environ 10 %

$$\frac{Q_{3(\text{annuel})}}{Q_{1(\text{annuel})}} = \frac{0,42}{0,38} = 1,10$$

### 7.3. - Cas du site de Marignane

Pour Marignane l'histogramme de 1982 donne un pourcentage annuel

- $V \leq V_i$  pendant 55 % du temps
- $V_i < V < V_n$  pendant 18 % du temps
- $V \geq V_n$  pendant 27 % du temps

- Dans le cas du couplage direct la production annuelle d'eau douce sera égale à :

$$Q_{1\text{annuel}} = Q \cdot 8760 \cdot 0,27 \quad \text{m}^3/\text{an}$$

- Dans le cas du couplage avec stockage d'énergie et moteurs courant continu, la production annuelle  $Q_2$  sera égale à la somme des 2 termes :

$$\begin{aligned} \cdot V > V_n & \quad Q \cdot 8760 \cdot 0,27 \cdot 0,87 \\ & \quad Q \cdot 8760 \cdot 0,23 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \cdot V_i < V < V_n & \quad Q \cdot 8760 \cdot 0,66 \cdot 0,18 \cdot 0,87 \cdot 0,8 \\ & \quad Q \cdot 8760 \cdot 0,08 \end{aligned}$$

$$Q_{2\text{annuel}} = Q \cdot 8760 \cdot 0,31 \quad \text{m}^3/\text{an}$$

Par rapport au couplage direct la production avec stockage est supérieure d'environ 15 %.

- Dans le cas d'un couplage avec stockage d'énergie et onduleur la production annuelle  $Q_3$  est égale à :

$$\begin{aligned} \cdot V > V_n & \quad Q = Q \cdot 8760 \cdot 0,27 \cdot \eta_r \cdot \eta_o \\ & \quad = Q \cdot 8760 \cdot 0,20 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \cdot V_i < V < V_n & \quad Q = Q \cdot 8760 \cdot 0,18 \cdot \eta_r \cdot \eta_s \cdot \eta_o \cdot 0,66 \\ & \quad Q \cdot 8760 \cdot 0,07 \end{aligned}$$

$$Q_{3\text{annuel}} = Q \cdot 8760 \cdot 0,27 \quad \text{m}^3/\text{an}$$

Par rapport au couplage direct la production est identique.

Le tableau I récapitule l'influence du site et du système de couplage sur la quantité d'eau douce produite.

## 8 - RESULTATS EXPERIMENTAUX OBTENUS EN COUPLAGE DIRECT

Une expérimentation a été effectuée en 1982 sur l'île du PLANIER au large de Marseille. Ce site a été choisi car il était équipé d'un aérogénérateur AEROWATT 4100 FP7 que le service des Phares et Balises à qui il appartient a bien voulu mettre gracieusement à notre disposition. L'expérimentation s'est poursuivie en 1983 sur le site de FARAMAN en Camargue, site qui présente l'avantage d'être plus facile d'accès.

### 8.1. - Description de l'installation (Fig. 9)

Description de l'aérogénérateur. L'aérogénérateur était du type à hélice bipale tournant autour d'un axe horizontal construit par la société AEROWATT (modèle 4100 FP7) et ayant les caractéristiques suivantes :

Diamètre de l'hélice .....	9,20 m
Hauteur du mât .....	15 m
Puissance pour une vitesse de vent de 7 m/s .....	4 KW
Nature du courant fourni .....	380 Volts-tri

TABEAU I : DESALEMENT DE L'EAU DE MER PAR ENERGIE EOLIENNE  
INFLUENCE DU SITE ET DU SYSTEME DE COUPLAGE SUR LA  
QUANTITE D'EAU DOUCE PRODUITE.

	Site théorique très venté $V > 7 \text{ m/s}$	Site HAO PACIFIQUE [1981]	Site de MARIGNANE [1982]
Système I Couplage direct	I	I	I
Système II Stockage + Courant continu	0,87	1,32	1,15
Système III Stockage + onduleur + Alternatif	0,73	1,10	I

**Remarque :** Les valeurs données dans ce tableau correspondent à des quantités d'eau douce produites annuellement en valeur relative. Par hypothèse le coefficient I a été pris pour le Système I (couplage direct).

Description de l'unité de dessalement. L'unité de dessalement comportait les principaux éléments suivants :

- un poste de prétraitement constitué par un électrochlorateur, un décanteur, une filtration sur sable à 2 étages, une colonne de charbon actif et une filtration sur cartouches,
- une pompe haute pression volumétrique à 3 pistons décalés à 120°,
- une unité d'osmose inverse comportant 2 modules fibres creuses,
- une turbine de récupération d'énergie du type Pelton,
- un ensemble de mesure et d'adaptation au fonctionnement d'un aérogénérateur.

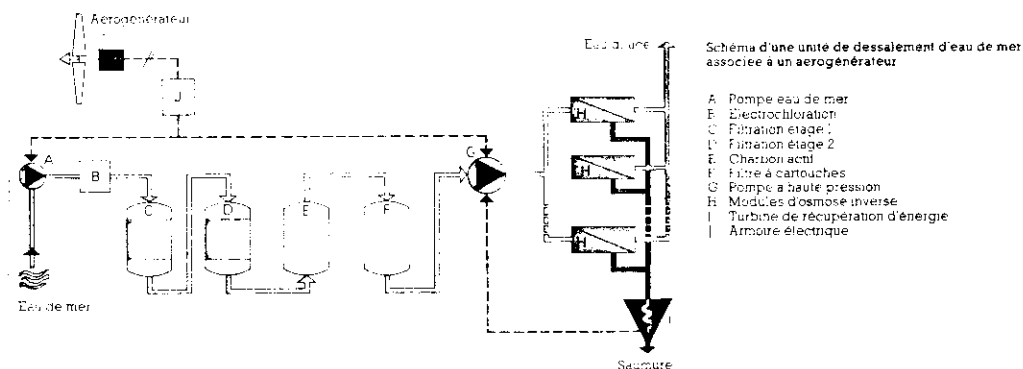


FIG. 9 : SCHEMA HYDRAULIQUE DE L'UNITE D'OSMOSE INVERSE EXPERIMENTEE  
AU PLANIER ET A FARAMAN.

## 8.2. - Résultats obtenus

Les performances obtenues étaient les suivantes :

Débit d'eau de mer pompé ..... 2 m<sup>3</sup>/h  
 Débit d'eau douce produite ..... ~0,5 m<sup>3</sup>/h

Le bilan énergétique est donné dans le tableau ci-dessous.

	WATT	kWh/m <sup>3</sup> *
Pompe prétraitement	600	1,2
Pompe osmose	4.400	8,8
Divers (Armoire électrique + Electrochlorateur)	100	0,2
Turbine PELTON	- 1.200	- 2,4
<b>TOTAL</b>	<b>3.900</b>	<b>7,8</b>

\*basée sur une production de 0,5 m<sup>3</sup>/h.

Il faut noter que les performances que nous indiquons ci-dessus ont été établies lorsque la vitesse du vent était supérieure à 7 m/s et constante. En effet, aux environs de 7 m/s, avec un vent variable on a constaté des chutes de tension assez rapprochées qui provoquaient des arrêts fréquents de l'installation de dessalement (plusieurs à la minute). Ces arrêts-démarrages répétés ne peuvent qu'entraîner une dégradation rapide des différents composants de l'installation.

## 9 - ETAT ACTUEL DE L'EXPERIMENTATION AVEC STOCKAGE D'ENERGIE

Des essais sont actuellement en cours au CEN CADARACHE en vue de tester le système de couplage avec stockage d'énergie et unité de dessalement fonctionnant en courant continu (système II). Seule la pompe immergée est alimentée en courant alternatif par un onduleur FAIVELEY.

### 9.1. - Description de l'installation d'essai

Les principaux éléments de l'installation sont les suivants :

- un parc batteries de 500 Ah prévue pour fonctionner sous 120 Volts,
  - un groupe électrogène de 4 kW destiné à simuler l'énergie fournie par un aérogénérateur,
  - une armoire électrique de commande et de contrôle en courant continu.
- La mise en service de l'unité de dessalement est commandé par un compteur ampère-heuremètre qui comptabilise l'énergie stockée dans le parc batteries.
- un onduleur FAIVELEY de 1200 VA destiné à alimenter en énergie une pompe immergée GRUNDFOS de 2 m<sup>3</sup>/h.
  - une unité de dessalement d'eau de mer ayant une capacité de production de 0,5 m<sup>3</sup>/h et dont les caractéristiques sont voisines de l'unité testée sur l'île du PLANIER sauf en ce qui concerne le module d'osmose inverse. Nous avons choisi en effet de tester un module spirale EDS qui présente, dans le cas de petites unités, plusieurs avantages (voir paragraphe 3).

### 9.2. - Résultats obtenus. Perspectives du système avec stockage.

L'expérimentation en cours à CADARACHE depuis janvier 1984 se déroule normalement sans problème majeur. Ces résultats devraient avoir lieu à partir d'Octobre 1984 sur une île du PACIFIQUE.

Mais dès à présent, il nous a paru intéressant de faire une estimation grossière du prix de revient du m<sup>3</sup> d'eau douce obtenue par dessalement éolien dans le cas d'un site réel. Nous avons choisi le site de TAKAROA au PACIFIQUE car d'une part nous disposons pour ce site de données sur le gisement éolien assez précises et que d'autre part il existe des problèmes importants pour l'alimentation en eau douce des îles du Pacifique.

Le tableau 2 montre que dans ce cas particulier (site de TAKAROA) la solution II (Stockage sur batterie en courant continu) est la solution la plus intéressante du point de vue économique. Le prix de revient du m<sup>3</sup> d'eau douce obtenu est toutefois élevé (43 Francs/m<sup>3</sup>). Il faut toutefois remarquer qu'il est du même ordre de grandeur que celui que l'on obtient avec des procédés de dessalement conventionnels dans cette gamme de capacité.

La part du poste énergie (120.000 Francs d'aérogénérateur + 60.000 Francs de stockage) amorti sur 12 ans à 10 % est de 26.280 Francs/an, soit ramené au m<sup>3</sup> d'eau :

$$\frac{26.280}{2235} = 11,7 \text{ F/m}^3$$

ce qui représente 27 % du coût total de l'eau.

Le prix de l'énergie fournie par l'aérogénérateur et le stockage est égale :

$$\frac{26.280}{17.884} = 1,47 \text{ F/kWh}.$$

On peut donc en conclure que le dessalement éolien est compétitif dès que l'énergie électrique a un coût supérieur à 1,50 Franc /kWh.

Il est important de noter que jusqu'à présent nous n'avons évoqué que le cas du dessalement de l'eau de mer. Or il existe souvent des eaux salines dont la salinité est comprise entre 2 et 5 g/l que l'on appelle eaux saumâtres et qui sont impropres à la consommation humaine. Dans ce cas, la consommation d'énergie de l'osmose inverse est abaissée à environ 1 kWh/m<sup>3</sup>. Il en résulte qu'avec le même aérogénérateur de 4 kW la production horaire d'eau douce sera de l'ordre de 4 m<sup>3</sup>/h. Le tableau 3 qui donne les prix de revient obtenus pour une eau saumâtre à 3 g/l toujours pour le même site (TAKAROA) montre que l'on atteint des coûts beaucoup plus intéressants (8 à 10 Francs/m<sup>3</sup>) soit environ 5 fois plus faibles que pour l'eau de mer.

TYPE DE COUPLAGE		Système I Couplage direct (380 V ~)	Système II Stockage courant continu	Système III Stockage onduleur + alternatif
Temps de fonctionnement de l'unité de dessalement en h.		3328	4471	3753
Production annuelle d'eau douce en m <sup>3</sup> .		1664	2235	1876
Production journalière en m <sup>3</sup>		4,56	6,1	5,14
Investissements en Francs	Aérogénérateur	120000	120000	120000
	Stockage d'énergie	0	60000	60000
	Dessalement	280000	300000	300000
	TOTAL	400000	480000	480000
Frais d'exploitation/an (renouvellement modules-pompes en F/an		27000	27000	27000
Amortissement annuel 12 ans - 10 % (0,146) en Francs/an		58400	70080	70080
Prix de revient de l'eau douce en Francs/m <sup>3</sup>		51	43	52

Hypothèses

- 1°) Caractéristiques du site  
 $0 < V < 4 \text{ m/s}$  = 33 % du temps  
 $5 < V < 6 \text{ m/s}$  = 29 % du temps  
 $V \geq 7 \text{ m/s}$  = 38 % du temps  
 Plus longue période avec  $V \leq 4 \text{ m/s}$  = 105 h
- 2°) Caractéristiques unité de dessalement  
 Capacité de production = 500 l/h  
 Puissance consommée = 4 kW

TABEAU 2 : DESSALEMENT EAU DE MER.  
 ESTIMATION DU COUT\* DU m<sup>3</sup> D'EAU DOUCE PAR DESSALEMENT EOLIEN DANS LE CAS DU SITE DE TAKARAO (PACIFIQUE).

\* Cette estimation ne prend pas en compte les frais d'implantation sur le site.

## 10 - CONCLUSION

En conclusion la situation actuelle du dessalement par osmose inverse associé à l'énergie éolienne peut se résumer comme suit :

1° - Du point de vue technique les différentes expérimentations effectuées soit de systèmes, soit de composants (modules d'osmose inverse par exemple) devraient permettre d'aboutir assez rapidement à des ensembles relativement fiables.

2° - Du point de vue économique les prix de revient prévisionnels sont dès à présent très attractifs dans le cas du dessalement d'eaux saumâtres (3 à 5 g/l). Ces prix de revient sont par contre relativement élevés dans le cas du dessalement d'eau de mer. Que peut-on faire pour les réduire ? Une diminution du coût des composants (dessalement en particulier) n'est guère envisageable. Seule une optimisation du système (taille de l'unité de dessalement, puissance de ou des aérogénérateurs, capacité du stockage d'énergie) devrait permettre des réductions de coûts significatives. Une telle optimisation doit être faite en prenant en compte les caractéristiques du gisement éolien du site envisagé, la quantité d'eau douce souhaitée, ainsi que la répartition de cette quantité dans le temps.

Il faut enfin remarquer qu'à long terme, l'augmentation prévisible du coût des combustibles fossiles (d'un facteur 2 d'ici l'an 2000) va se traduire par une amélioration de la compétitivité de telles techniques par rapport aux techniques conventionnelles.

-----

TYPE DE COUPLAGE		Système I Couplage direct (380 V ~)	Système II Stockage courant continu	Système III Stockage onduleur + alternatif
Temps de fonctionnement de l'unité de dessalement en h.		3328	4471	3753
Production annuelle d'eau douce en m³.		13312	17884	15012
Production journalière en m³		37,8	48,9	41,1
Investissements en Francs	Aérogénérateurs	120000	120000	120000
	Stockage d'énergie	0	60000	60000
	Dessalement	460000	490000	500000
	TOTAL	580000	670000	680000
Frais d'exploitation/an (renouvellement modules-pompes en F/an		50000	50000	50000
Amortissement annuel 12 ans - 10 % (0,146) en Francs/an		84680	97820	99280
Prix de revient de l'eau douce en Francs/m³		10	8	10

Hypothèses

- 1°) Caractéristiques du site
- 0 < V < 4 m/s = 33 % du temps
  - 5 < V < 6 m/s = 29 % du temps
  - V ≥ 7 m/s = 38 % du temps
  - Plus longue période avec V ≤ 4 m/s = 105 h
- 2°) Caractéristiques unité de dessalement
- Capacité de production = 4000 l/h
  - Puissance consommée = 4 kW

TABLEAU 3 : DESSELEMENT EAU SAUMATRE à 3 g/l.  
ESTIMATION DU COUT DU m³ D'EAU DOUCE OBTENUE PAR DESSELEMENT EOLIEN DANS LE CAS DU SITE DE TAKARAO (SPACIFIQUE).

\* Cette estimation ne prend pas en compte les frais d'implantation sur le site.



## SOMMAIRE

- 1 - ENERGIE EOLIENNE ET EAU DOUCE
- 2 - PRINCIPE DE L'OSMOSE INVERSE
- 3 - ETAT DE LA TECHNIQUE D'OSMOSE INVERSE
  - 3.1. Les membranes
  - 3.2. Modules d'osmose inverse
- 4 - CONSOMMATION D'ENERGIE DU PROCEDE D'OSMOSE INVERSE
  - 4.1. Taux de conversion
  - 4.2. Choix du type de pompe haute pression
  - 4.3. Récupération d'énergie sur les rejets de saumure
- 5 - ENERGIE FOURNIE PAR LE VENT
- 6 - DIFFERENTS SYSTEMES DE COUPLAGE AEROGENERATEUR/UNITE DE DESSALEMENT PAR OSMOSE INVERSE.
  - 6.1. Couplage direct
  - 6.2. Couplage batterie - courant continu
  - 6.3. Couplage batterie - onduleur - courant alternatif
- 7 - PERFORMANCES ATTENDUES DES DIFFERENTS SYSTEMES EN FONCTION DU SITE.
  - 7.1. Cas d'un site théorique où l'on aurait en permanence  $V > V_n$
  - 7.2. Cas d'un site soumis au régime des alizés tel que l'île de HAO (Pacifique)
  - 7.3. Cas du site de Marignane
- 8 - RESULTATS EXPERIMENTAUX OBTENUS EN COUPLAGE DIRECT
  - 8.1. Description de l'installation du PLANIER
  - 8.2. Résultats obtenus
- 9 - ETAT ACTUEL DE L'EXPERIMENTATION AVEC STOCKAGE D'ENERGIE
  - 9.1. Description de l'installation d'essai
  - 9.2. Résultats obtenus - Perspectives du système avec stockage
- 10 - CONCLUSION.

## RESUME

Il existe de nombreuses îles ou des régions isolées en bordure de mer qui ne peuvent se développer favorablement par suite du manque d'eau douce. Ce sont souvent par contre des régions fortement ventées disposant de cette énergie toujours renouvelée, l'énergie éolienne qu'il est possible d'utiliser pour dessaler l'eau de mer. Parmi les différentes techniques de dessalement actuellement opérationnelles l'osmose inverse est celle qui est susceptible de s'adapter le mieux avec l'énergie éolienne en particulier grâce à sa faible consommation d'énergie.

Après un rappel sur l'état de la technique d'osmose inverse, ce rapport présente les différents systèmes de couplage d'un aérogénérateur avec une unité d'osmose inverse :

- fonctionnement au fil du vent,
- fonctionnement avec stockage d'énergie.

Les essais effectués des différents systèmes soit sur l'île du PLANIER, soit à FARAMAN, soit à CADARACHE, ainsi que de différents composants (modules d'osmose inverse en particulier) devraient permettre d'aboutir assez rapidement à des ensembles relativement fiables.

MOTS CLES

DESSALEMENT EAU DE MER - OSMOSE INVERSE - ENERGIE EOLIENNE.

