



Frédéric Elie on
ResearchGate

Unité de dessalement d'eau de mer pour le Parc de la Méditerranée à Six-Fours (La Coudoulière)

Frédéric Elie
27 février 2012

CopyrightFrance.com

La reproduction des articles, images ou graphiques de ce site, pour usage collectif, y compris dans le cadre des études scolaires et supérieures, est INTERDITE. Seuls sont autorisés les extraits, pour exemple ou illustration, à la seule condition de mentionner clairement l'auteur et la référence de l'article.

*« Si vous ne dites rien à votre brouillon, votre brouillon ne vous dira rien ! »
Jacques Breuneval, mathématicien, professeur à l'université Aix-Marseille I, 1980*

Abstract : Dans la commune de Six-Fours (Var), une petite unité de dessalement de l'eau de mer permet la fourniture d'eau douce pour l'arrosage et l'irrigation des 7 hectares d'espace vert du parc de la Méditerranée, située sur la baie de Sanary. La technique employée est celle de l'osmose inverse; ses principes sont présentés succinctement dans ce petit article...

SOMMAIRE

- 1 – Présentation
- 2 – Osmose et osmose inverse
- 3 – Aspects théoriques et quantitatifs

1 – Présentation

La surface des espaces verts du Parc de la Méditerranée de Six-Fours (Var) représente 7 hectares (quartier de La Coudoulière).

Les besoins en eau sont de 50 m³/jour pendant la saison estivale (mai à septembre). À ce compte-là on utilise de l'eau de mer dessalée.

L'eau destinée au dessalement ne provient pas directement de la mer: un puits a été réalisé sur la plage des Roches Brunes. L'eau pompée à partir de ce puits est une eau saumâtre, d'une concentration en sel dissout (NaCl) de 9,76 g/L.

Ce puits permet:

- d'obtenir une préfiltration naturelle: en effet, l'eau pompée directement de la mer demande d'être filtrée (algues, macro-déchets, etc.);
- d'avoir des rejets relativement peu concentrés en sels (en moyenne 8 g/L) et donc sans impacts néfastes pour le milieu marin.

Vient ensuite le traitement de l'eau de mer pompée depuis le puits. Ce traitement exploite la technique de l'osmose inverse qui est présentée ci-après.

2 – Osmose et osmose inverse

Description du phénomène d'osmose:

Si deux solutions aqueuses ayant des concentrations en sel différentes sont séparées par une membrane semi-perméable (c'est-à-dire laissant passer l'une des solutions dans un sens et pas l'autre),

alors c'est la solution la moins concentrée en sel qui migre vers la solution la plus concentrée (fig.1)⁽¹⁾.

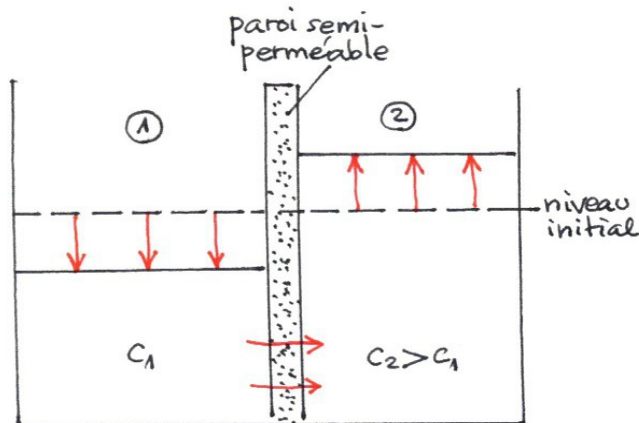


Figure 1 – principe de l'osmose: le milieu (1) a une concentration en sel dissout $c_1 = [\text{NaCl}]_1$ plus faible que celle du milieu (2) $c_2 = [\text{NaCl}]_2$: $c_1 < c_2$; La solution aqueuse (1) migre vers le milieu (2) de telle sorte que le gradient de concentration entre les deux milieux s'annule.

Le transfert est activé sous l'effet d'une pression: la **pression osmotique**. La loi de Van't Hoff établit que la pression osmotique est directement liée à la concentration molaire du milieu (2). Nous démontrerons cette loi au paragraphe 3.

L'**osmose inverse** est basée sur la réciproque de ce principe:

Elle consiste à appliquer à l'eau salée une pression importante (celle qui accompagne l'osmose directe), qui nécessite une consommation élevée en énergie (cette pression est de plusieurs bars) pour lui faire traverser la membrane semi-perméable. Au terme de l'opération, seules les molécules d'eau, et non le sel, traversent la membrane, fournissant ainsi de l'eau douce (figure 2).

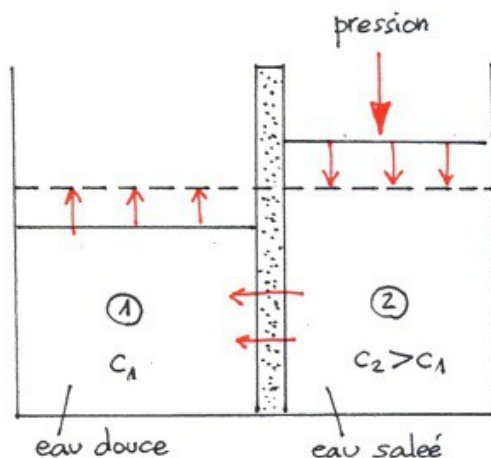


Figure 2 – principe de l'osmose inverse

L'unité de dessalement de Six-Fours est située dans le local à côté du centre aéré des Roches Brunes, en contre-bas du Parc Méditerranée (voir photos).

La figure 3 montre le schéma de principe de fonctionnement de l'unité de dessalement de La Coudoulière.

¹ Ça peut paraître contre-intuitif: on s'attendrait plutôt à ce qui est plus dense, plus « lourd » tende à s'alléger par un transfert vers le moins dense ou le moins « lourd ». En fait, le second principe de la thermodynamique pose que des systèmes tendent à évoluer dans le sens où le potentiel chimique final soit plus petit que celui du système où il était le plus grand.

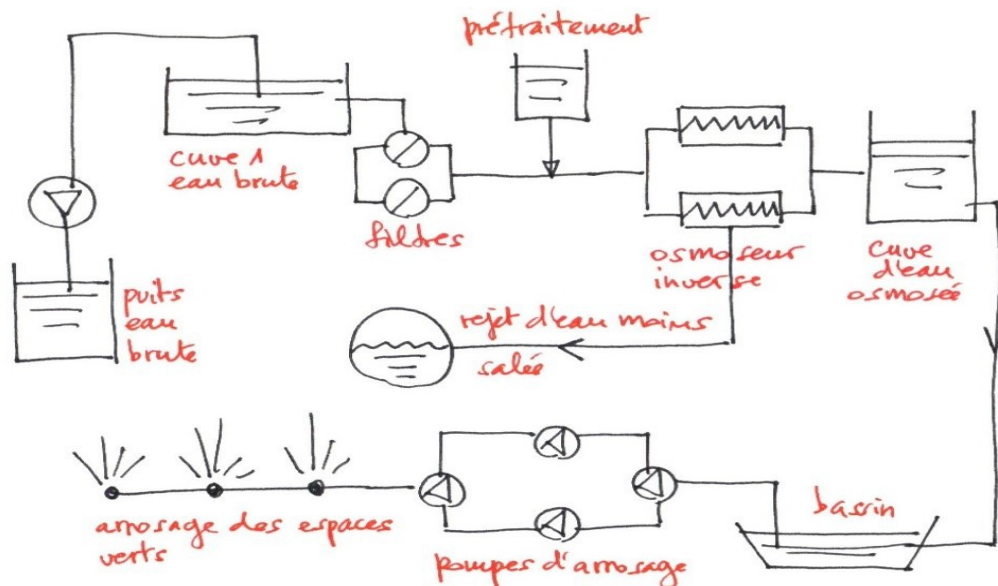


Figure 3 – principe de la station de dessalement et d'arrosage de la Coudoulière

3 – Aspects théoriques et quantitatifs

Soit un récipient constitué de deux compartiments séparés par une membrane semi-perméable, c'est-à-dire qui laisse passer le solvant A mais pas le soluté B (exemple: A est l'eau, B est le sel dissous dans l'eau). Le compartiment n°1 contient la solution A+B (mélange du solvant A et du soluté B), le compartiment n°2 contient seulement le solvant pur A (figure 4).

Au départ, les deux liquides sont au même niveau.

Soit x_A la fraction molaire du solvant:

$$x_A = \frac{n_A}{n_A + n_B}$$

(donc $x_A + x_B = 1$), où n_A et n_B sont les nombres de moles du solvant A et du soluté B (cf. [1] pour les définitions employées).

Soit $g_A(T, P)$ l'enthalpie molaire du constituant A pur. On montre que le potentiel chimique μ_{A+B} du mélange A+B est égal à l'enthalpie molaire du constituant pur A, g_A , modifiée par l'entropie de mélange:

$$\mu_{A+B}(T, P) = g_A(T, P) + RT \ln(x_A)$$

pour une pression P et une température T données. Cette relation est valable dans l'hypothèse de solution idéale (pas de réaction chimique).

Or, par hypothèse, le soluté est fortement dissous dans le solvant: $n_B \ll n_A$, soit $x_A \approx 1$, d'où:

$$\ln(x_A) = \ln(1 - x_B) \approx -x_B$$

donc:

$$\mu_{A+B}(T, P) \approx \mu_A(T, P) = g_A(T, P) - RT x_B \quad (1)$$

R est la constante des gaz parfaits.

La relation (1) s'énonce selon la « loi » de la solution diluée idéale:

Le potentiel chimique du solvant (A) diminue en présence du soluté (B) dissous, et cette diminution est proportionnelle à la fraction molaire du soluté (B) dans le mélange (A+B).

On vient de voir le potentiel chimique du solvant μ_A par la relation (1), mais comment déterminer le potentiel chimique du soluté μ_B ?



Pour cela, on part de la **relation de Gibbs-Duhem** (cf. [1]): à température T et pression P constantes, elle s'écrit:

$$n_A d\mu_A + n_B d\mu_B = 0$$

donc:

$$d\mu_B = - \frac{x_A}{x_B} d\mu_A$$

μ_A est donnée par (1) d'où il suit que, à T et P constantes:

$$d\mu_A = -RT dx_B$$

d'où:

$$d\mu_B = RT \frac{x_A}{x_B} dx_B \approx RT \frac{dx_B}{x_B}$$

puisque, par hypothèse, $x_A \approx 1$. La relation précédente s'intègre immédiatement en:

$$\mu_B(T, P, x_B) = \mu_B(T, P, x_B^0) + RT \ln\left(\frac{x_B}{x_B^0}\right)$$

où l'exposant « 0 » désigne un état de référence.

D'après (1) le potentiel chimique du solvant A dans la solution (A+B) est plus petit que son potentiel chimique g_A lorsque A est pur. En conséquence du second principe de la thermodynamique, le solvant A a tendance à migrer à travers la membrane vers le mélange (A+B) afin de rétablir l'équilibre (donc migrer du compartiment 2 vers 1).

Au terme de la migration, le mélange (A+B) monte dans le compartiment 1 et se stabilise pour un excès de pression correspondante égale à Π : Π est la pression osmotique, mesurée par la dénivellation entre les deux liquides 1 et 2.

Cet excès de pression est tel que l'augmentation du potentiel chimique μ_A du compartiment 2 compense la diminution du potentiel chimique de l'espèce A dans la solution (A+B) du compartiment 1, due à la dilution de A avec B:

$$\Delta\mu_A = g_A(T, P_2 + \Pi) - g_A(T, P_2) \approx \Pi \left(\frac{\partial g_A}{\partial P} \right)_T$$

or le volume V d'un mélange est relié à son enthalpie libre G par: $V = \left(\frac{\partial G}{\partial P} \right)_{T, n}$

Comme l'enthalpie libre molaire g_A est définie par $g_A = G(T, P, n)/n$ il vient, pour le volume molaire du solvant A:

$$v_A = \left(\frac{\partial g_A}{\partial P} \right)_T$$

donc:

$$\Delta \mu_A \approx \Pi v_A$$

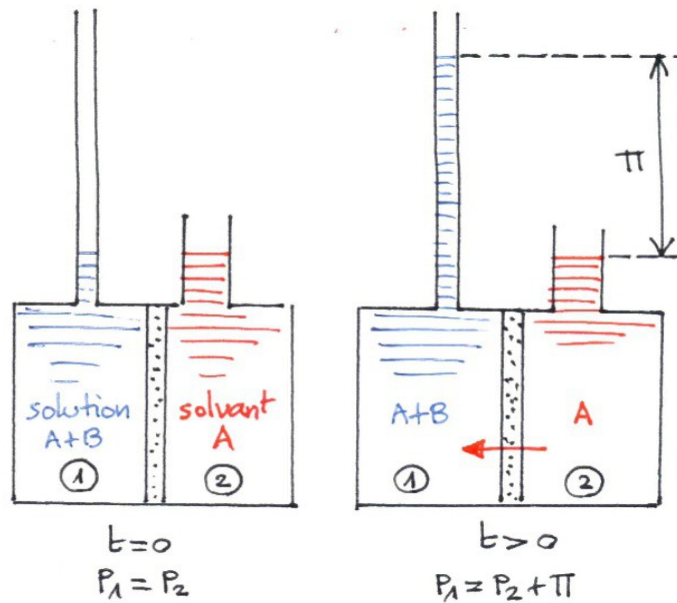


Figure 4 – pression osmotique

à l'équilibre:

$$\Delta \mu_A + RT \ln(x_A) = 0$$

soit:
$$\Pi v_A + RT \ln(x_A) = 0$$

$$\Pi v_A = -RT \ln(x_A) = -RT \ln(1 - x_B) \approx RT x_B$$

or: $x_B = n_B/n$ (où $n = n_A + n_B \approx n_A$ nombre de moles du solvant), d'où:

$$\Pi v_A = RT \frac{n_B}{n}$$

et comme $n v_A \approx V$ volume global de la solution (A+B), il vient la « loi » de Van't Hoff pour l'osmose:

$$\Pi V = n_B RT \quad (2)$$

En conclusion, énoncé de la « loi » de l'osmose (Van't Hoff, 1852-1911):

Tout se passe comme si le soluté B suit la loi des gaz parfaits à l'intérieur de la solution (A+B) de volume V. Mais la pression Π qui intervient dans (2) n'est pas la pression à laquelle la solution est soumise: elle n'intervient qu'en présence d'une paroi semi-perméable qui laisse passer uniquement le solvant A.

(2) s'écrit encore, en introduisant la concentration molaire du soluté $[B] = n_B/V$ (mol/m³):

$$\Pi = RT [B] \quad (2 \text{ bis})$$

Exemple:

$[B] = 0,01$ mol/L à $T = 300$ K (27°C): $\Pi = 0,25$ atm, soit 2,5 m de hauteur d'eau.

Remarque:

Le moteur de la circulation de la sève dans les végétaux est la pression osmotique; c'est un moteur très

puissant, bien plus que la seule pression hydrostatique, puisque des arbres très hauts (plusieurs dizaines de mètres) sont alimentés en sève (par la seule pression hydrostatique, la sève ne pourrait pas monter au-delà de 10 mètres maximum). La réaction d'osmose se produit au niveau des racines des végétaux: le sol, plus pauvre en substances dissoutes que les racines laisse migrer, par osmose, son solvant (eau) à travers les parois des racines, et la pression osmotique, élevée, permet au mélange (la sève) de monter jusqu'au sommet.

Quelques valeurs:

[B] mol/L	Π (atm)	[B] mol/L	Π (atm)
0,02922	0,655	0,098	2,68
0,05843	1,27	0,1923	5,25
0,1315	2,91	0,3701	10,11
0,2739	6,23	0,533	14,65
0,5328	14,21	0,6855	18,8
0,8766	26,80	0,8275	22,7

On voit que les pressions osmotiques sont rapidement élevées. L'osmose inverse nécessite d'appliquer au mélange des pressions du même ordre.

Photos du parc de la Méditerranée (Six-Fours) alimenté par la station de dessalement:

Sur le panneau explicatif du Cap Nègre, La Coudoulière (Six-Fours), établi par l'office du tourisme de la municipalité, on peut lire:

« UNE GEOLOGIE ATYPIQUE SUR CETTE CÔTE CALCAIRE:

Le Cap Nègre a été constitué d'une coulée volcanique de basalte andésitique de l'Oligocène (ère tertiaire) descendue du Roc de l'Aigle en passant par Evenos. Comme le Cap Sicié et l'île du Gaou ⁽²⁾ constitués de schistes, les sols y sont propices au développement naturel du maquis méditerranéen, et ce malgré l'exposition au vent violent du Nord-ouest et aux embruns.

UNE VEGETATION TRES DEGRADEE PAR L'HOMME:

Le Cap Nègre a de tous temps constitué un poste d'observation idéal (Batterie napoléonienne du Cap Nègre) pour surveiller la baie. Durant la 2^{ème} Guerre mondiale, après avoir envahi la Provence en 1942, les nazis y ont installé des postes de DCA et ont ruiné tout le cap.

Puis entre 1955 et 1960, la végétation a subi des dommages majeurs car ce site, appartenant alors à la Marine, était devenu centre d'essais pour les tanks construits par les chantiers de la méditerranée.

Le Cap Nègre a été racheté à la Marine par la ville de Six-Fours dans les années 1990.

DEUX TYPES DE VEGETATION PERSISTENT SUR LE CAP NEGRE:

1°) Sur la partie haute du Cap Nègre:

Plantes représentant l'écosystème méditerranéen de type « maquis » résiduel: Nerprun Alaterne, Filaires à feuilles étroites, Pistachier lentisque, Pin d'alep, l'arbre penché dans le sens dominant du vent (vent d'ouest et Mistral nord-ouest), Myrte commun, Romarin, Calycetome épineux. Tous ces végétaux ligneux que l'on retrouve plus loin sur les pentes occidentales du massif du Cap Sicié, forment, avant d'accéder aux petites criques en contre-bas, une sorte de plateau buissonnant, à végétation dense, parmi laquelle des cheminements piétonniers permettent de rejoindre la batterie du Cap Nègre et le bord de l'eau.

2°) Sur les pentes jusqu'à la mer:

² Des articles du site fred.elie.free.fr gravitent autour de l'île du Gaou: voir références [2], [3] et [4].

Plantes du bord de mer et des côtes rocheuses, appelées aussi plantes halophiles.

Ces végétaux occupent l'espace compris entre la partie haute et le bord de mer. Zone de pente exposée aux vents dominants, soumise au lessivage du sol (ruissellement des eaux de pluie) et aux piétinements.

On retrouve, comme sur l'île du Gaou, sur la zone sud rocheuse: la Criste marine, le Plantain en alène, le Cinéraire maritime, le Limonium pseudo-minutum, la griffe de sorcière.

Exception faite de la falaise sud dominant la zone de la Coudoulière, très abrupte et non accessible aux piétons, où se maintient une végétation dense avec notamment des figuiers de barbarie, la végétation souffre de nombreuses agressions (vents, sels, lessivage des sols par les orages violents, piétinement) et se dégrade au fil des décennies.

Le limonium commun, appelé saladelle, a totalement disparu de la zone, ainsi que l'armoise maritime (cette dernière est très présente sur l'île du Gaou). L'immortelle maritime, la vipérine d'Italie, la queue de lièvre, et l'euphorbe réveille-matin se font plus rares. L'inule maritime et la passerine, encore bien représentées sur l'île du Gaou, régressent.

QUELQUES MESURES POUR LIMITER LA DEGRADATION DE LA VEGETATION:

Afin de palier la dégradation du relief et la disparition des espèces végétales, la municipalité de Six-Fours en collaboration avec le CFPPA d'Hyères (formation professionnelle agricole) amis en place depuis 1998 un aménagement du site naturel avec formation de « gradines » (espaliers pour retenir la terre et permettre l'infiltration de l'eau).

Quelques replantations ont été effectuées avec des espèces adaptées telles que romarin, atriplex, pistachier, lentisque, coronille, barbe de Jupiter (anthyllis barbajouis) qui doivent à terme constituer un couvert végétal destiné à protéger la terre et permettre la reprise de végétaux de type maquis méditerranéen. »



Bassin du parc de la Méditerranée



Vue sur la corniche du Brusc



Un coin du parc



Vue sur le port de la Coudoulière



Cap Nègre, avec au fond la batterie



Batterie du cap Nègre, au bout du parc de la Méditerranée: le fortin abrite un petit musée

Références:

- [1] Frédéric Élie: Dissolution et solubilité – site fred.elie.free.fr, 3 septembre 2005
- [2] Frédéric Élie: Les îles du Gaou à Six-Fours (Provence) et les posidonies - site fred.elie.free.fr, février 2006
- [3] Frédéric Élie: Hydroseeding et géonattes - site fred.elie.free.fr, octobre 2010
- [4] Frédéric Élie: Voilette ou véllele - site fred.elie.free.fr, mai 2010, avril 2012