

# Les économies d'énergie électrique en dessalement d'eau de mer par osmose inverse : possibilités et limites

Guénaëlle Cartier, GLS  
Pierre Corsin, Fluid Consult

## ABSTRACT

### Reducing electrical consumption for sea water desalination by reverse osmosis: possibilities and limits.

*The electrical energy cost of SWRO plants is the main part of the operation expenses (OPEX). It results in the necessity to optimize the electrical consumption at each step of the process, in terms of design and operation. This aim has been well understood by all partners, membrane and electromechanical manufacturers, plant engineerings and operators, since the electrical consumption for the production of one m<sup>3</sup> of fresh water at present time is three times less than the first SWRO plants consumption.*

*If technologies are available to reduce the energy cost, it is advisable to make a proper choice taking into account in each case the technical, economical and environmental conditions, which are eminently variable from site to site.*

Les dépenses en énergie électrique des usines de dessalement d'eau de mer par osmose inverse représentent la part la plus importante (plus de 50 % en général) du coût de production. Il en découle la nécessité d'optimiser les consommations électriques à toutes les étapes du process, et ceci tant au niveau de la conception, que de celui de l'exploitation. Cet objectif a été bien compris par tous les intervenants, fabricants de membranes, constructeurs d'équipements électro-mécaniques, assembleurs et exploitants, puisque cela s'est traduit à ce jour par une réduction d'un facteur de plus de trois de la consommation électrique ramenée au m<sup>3</sup> produit par rapport à celle des premières usines construites dans les années 1970.

Si les technologies existent pour réduire la facture énergétique, il convient d'effectuer des choix appropriés à chaque cas en prenant en compte les données technico-économiques et environnementales spécifiques et éminemment variables d'un site à l'autre.

La consommation électrique d'une usine de dessalement d'eau de mer par osmose inverse dépend essentiellement :

- des caractéristiques physico-chimiques de l'eau de mer (salinité, température, ...);
- du mode de captage (prises ouvertes, puits côtiers);
- des prétraitements nécessaires pour rendre l'eau de mer apte à l'alimentation des membranes afin de les protéger contre le colmatage;
- des caractéristiques requises pour l'eau traitée en fonction de sa destination et des règlements sanitaires en vigueur localement;
- du choix des modules d'osmose inverse et de leur arrangement dans les corps de pression;
- de l'architecture du système d'osmose inverse (nombre de files, nombre d'étages, nombre de passes);

- du choix des équipements électro-mécaniques (pompes, moteurs électriques, systèmes de récupération de l'énergie hydraulique du concentrat);

- de l'implantation de l'usine de dessalement par rapport aux points de captage de l'eau de mer et des points de distribution de l'eau traitée, mais aussi de celle des équipements de process les uns par rapport aux autres.

Mais elle dépend aussi des besoins de tous les postes auxiliaires au process proprement dit : transformateurs, éclairage, ventilation, climatisation...

### Paramètres de dimensionnement du système membranaire - influence sur la consommation électrique

En fonction des caractéristiques de l'eau de mer et de celles exigées pour l'eau traitée, il est déterminé :

- le modèle des modules membranaires. Il

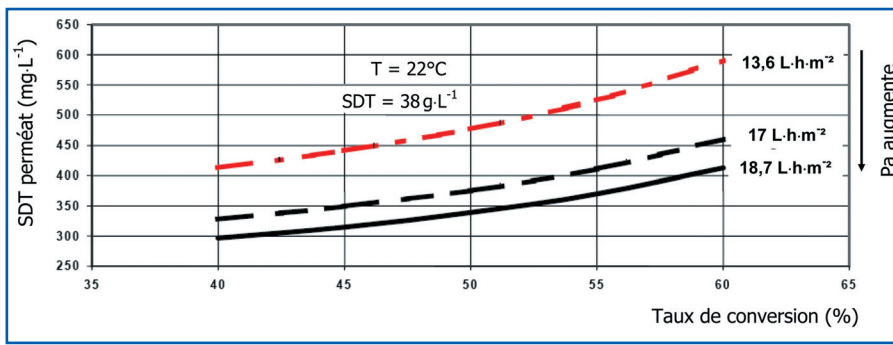


Figure 1: Influence du flux sur la qualité du perméat et sur la pression d'alimentation en fonction de différents taux de conversion.

est choisi soit des membranes à perméabilité ( $L \cdot h^{-1} \cdot m^2 \cdot bar$ ) élevée favorisant la production, soit des membranes à fort taux de rejet des sels pour obtenir la qualité requise pour le perméat. La consommation électrique diminue quand la perméabilité augmente (pression d'alimentation moindre), elle augmente quand le taux de rejets des sels augmente;

- la surface membranaire à mettre en œuvre. Plus le flux ( $L \cdot h^{-1} \cdot m^2$ ) choisi est important, plus la consommation électrique est élevée. Le choix de la valeur du flux a une importance sur le montant des investissements, mais également sur la qualité du perméat car à un faible flux correspond une faible pression d'alimentation, et donc un passage en sels plus important. Il faut également noter que l'augmentation du flux a une répercussion directe sur la durée de vie des membranes et sur le cycle entre deux nettoyages chimiques;

- le taux de conversion (débit perméat  $\times$  100 : débit d'alimentation). Plus sa valeur est élevée, plus faible est le débit d'alimentation, mais cette diminution ne compense pas l'augmentation de la pression d'alimentation et donc de la consommation électrique étant donnée l'augmentation du taux de concentration des sels et donc de la pression osmotique. La figure 1 illustre l'influence du taux de conversion et du flux sur la qualité du perméat et sur la pression d'alimentation;

- la température de dimensionnement. Plus celle-ci augmente plus la viscosité de l'eau diminue, entraînant l'augmentation de la perméabilité des membranes et donc la diminution des besoins en énergie électrique. Par contre le passage en sels augmente avec la température, ainsi que les risques de compactage des membranes pour des températures de l'eau supérieures à 25 °C.

Le tableau 1 récapitule l'influence des différents paramètres sur la consommation électrique. Il est donc nécessaire de rechercher une optimisation de la consommation élec-

trique, et ceci dans le respect des autres exigences technico-économiques (qualité perméat, durée de vie des membranes, montant des investissements, coût d'exploitation). La figure 2 illustre la recherche d'un optimum entre la surface membranaire à mettre en œuvre et la consommation électrique.

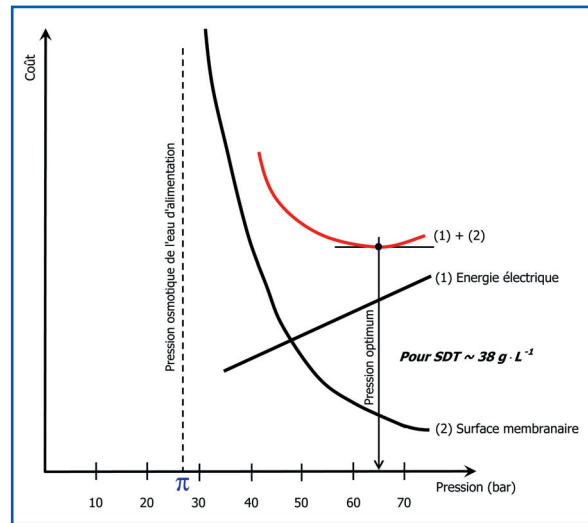


Figure 2: Recherche de la pression d'alimentation optimum en fonction de la surface membranaire à mettre en œuvre et de la consommation électrique.

### Récupération de l'énergie hydraulique du concentrat

À la sortie du système membranaire il subsiste une énergie hydraulique résiduelle importante qui dépend essentiellement du

facteur de conversion et des pertes de charge dans les circuits alimentation-concentrat du système.

Pour une unité produisant  $100 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  avec un facteur de conversion de 45 %, une pression d'alimentation de 70 bar et une perte de charge dans les circuits alimentation-concentrat de 2 bar, la puissance résiduelle du concentrat se calcule à l'aide de la relation 1 :

$$PR = \left( \frac{Q_p}{Y} - Q_p \right) \cdot (P_a - \Delta p_{ac}) : 36 \quad (1)$$

avec :

PR = puissance résiduelle (kW)

$Q_p$  = débit perméat ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )

$P_a$  = pression d'alimentation (bar)

$\Delta p_{ac}$  = pertes de charge dans les circuits alimentation-concentrat (bar)

Y = facteur de conversion (débit perméat : débit alimentation)

La résolution de la relation 1 pour l'exemple choisi donne une puissance résiduelle de 230 kW soit 53 % de la puissance fournie au système d'osmose inverse (432 kW). Il convient donc, pour réduire au maximum les dépenses énergétiques, de récupérer cette énergie hydraulique résiduelle. Cette récupération peut être effectuée par :

- turbo-pompe (figure 3) placée en série avec la pompe haute-pression;
- turbine Pelton (figure 4) accouplée au moteur (à double sortie d'arbre) de la pompe haute-pression;

Tableau 1 : Influence des paramètres de dimensionnement du système membranaire sur la consommation électrique

Paramètre	Consommation électrique	Autres effets
Sels Dissous Totaux ↗	↗	Qualité perméat ↘
Température ↗	↗	Durée vie membranes ↘ - Passage sels ↗
Perméabilité membranaire ↗	↗	Passage en sels ↗ - Production ↗
Taux de rejet en sels ↗	↗	Surface membranaire ↗ - Investissements ↗
Surface membranaire ↗	↗	Passage en sels ↗ - Investissements ↗ -
		Durée vie membranes ↗ -
		Cycle entre deux nettoyages chimiques ↗
Taux de conversion ↗	↗	Passage en sels ↗ - Investissements équipements amont ↘ - Débit d'alimentation ↘

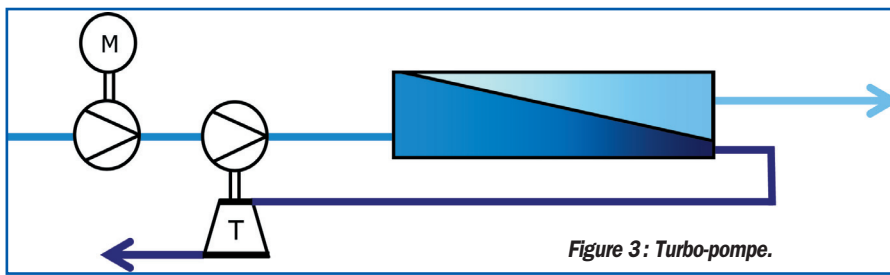


Figure 3: Turbo-pompe.

Plus on augmente la capacité des groupes électropompes, plus on atteindra des rendements élevés tant au niveau des pompes que de celui des moteurs électriques, et donc

• échangeurs d'énergie rotatif (figure 5) ou linéaire (figure 6).

Si les deux premiers transforment une énergie hydraulique en énergie mécanique, puis de nouveau en énergie hydraulique, les échangeurs de pression transfèrent directement l'énergie résiduelle du concentrat à l'eau d'alimentation via une pompe de surpression qui compense les pertes de charge

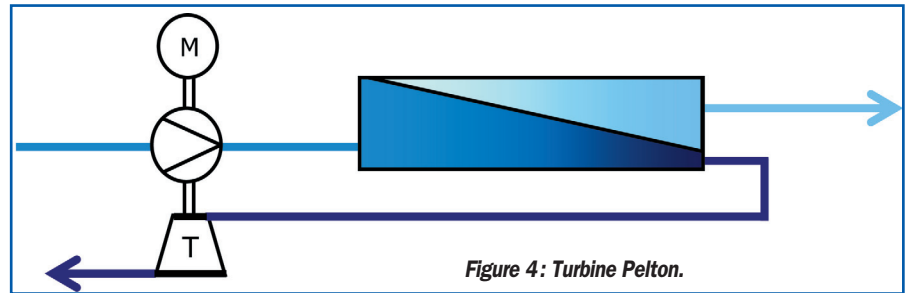


Figure 4: Turbine Pelton.

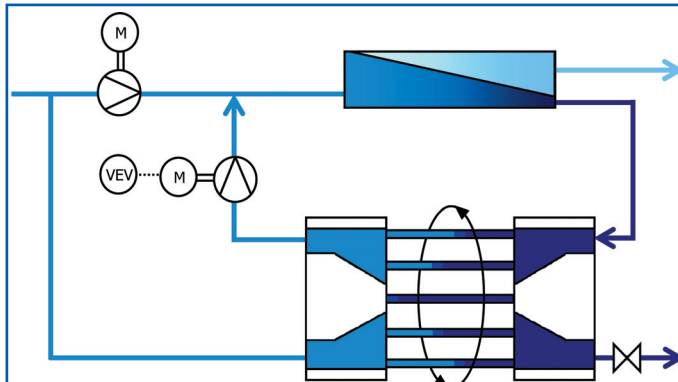


Figure 5: Échangeur d'énergie rotatif.

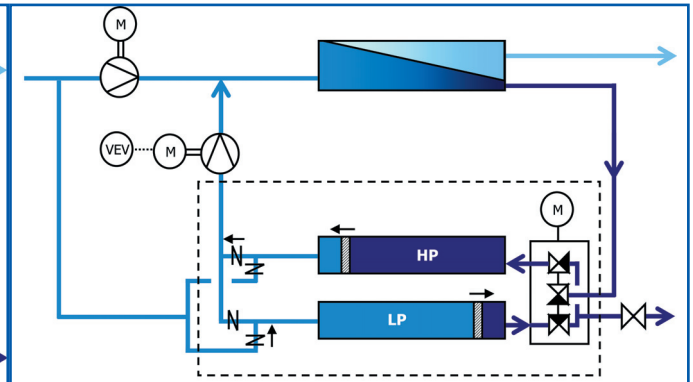


Figure 6: Échangeur d'énergie linéaire.

dans les modules, dans les tuyauteries de liaison et dans les échangeurs d'énergie.

Le tableau 2 donne les caractéristiques des différents systèmes de récupération de l'énergie du concentrat.

### Optimisation du rendement des groupes électro-pompes basse et haute pression

Le rendement des pompes centrifuges est fonction de leur vitesse spécifique donnée par la relation suivante:

$$Ns = N \cdot Q^{0,5} \cdot H^{-0,75} \quad (2)$$

où :

Ns = vitesse spécifique (tr.min<sup>-1</sup>)

N = vitesse de rotation (tr.min<sup>-1</sup>)

Q = débit (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>)

H = hauteur manométrique (m)

Il est à noter que le rendement augmente avec la vitesse spécifique.

Pour une pression donnée la relation 2 montre que la vitesse spécifique, et donc le rendement, augmentent avec la vitesse de rotation et la racine carrée du débit.

une consommation électrique rapportée au m<sup>3</sup> produit en diminution (tableau 3).

Pour atteindre ce but pour une capacité de production donnée, deux solutions sont possibles:

- si chaque file possède un système de mise en pression indépendant, il doit être envisagé de diminuer le nombre de files pour augmenter la capacité de leurs pompes HP;
- si le système de mise en pression est commun à toutes les files, il peut être prévu un nombre de pompes inférieur au nombre de

**Tableau 2 : Caractéristiques des différents systèmes de récupération de l'énergie hydraulique du concentrat**

Système de récupération de l'énergie	Type	Gamme débits (m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )	Gamme rendements (%)	Particularités
Turbo-pompes	Centrifuge (Francis)	10 – 2 700	50 – 70	Le rendement est tributaire des variations du facteur de conversion
Turbines Pelton	A jet	15 – 1 200	84 – 89	
Echangeurs de pression rotatifs	Isobarique	Débit unitaire : 5 – 89 Possibilités de placer plusieurs dizaines d'échangeurs en parallèle	94 – 95	Le débit de la pompe HP est égal au débit du perméat, d'où réduction de la taille du groupe et de la puissance installée - Le rendement est très peu affecté par les variations du facteur de conversion - Nécessité d'avoir une pompe de surpression pour injecter l'eau pressurisée par les échangeurs dans le circuit d'alimentation des modules OI
Echangeurs de pression linéaires	Isobarique	Débit unitaire : 45 – 280 Possibilités de placer plusieurs dizaines d'échangeurs en parallèle	94 – 97	

**Tableau 3 : Influence de la capacité des pompes HP sur la consommation en énergie électrique ramenée au m<sup>3</sup> produit**

Débit de production	m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	25	45	90	180	400
Facteur de conversion (Y)	%	45	45	45	45	45
Débit pompe HP	m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	55,6	100	200	400	889
Pression refoulement (Pr)	bar	70	70	70	70	70
Rendement typique pompe (η <sub>p</sub> )	%	65	74	78	81	84
Puissance absorbée à l'arbre	kW	166	278	499	960	2 057
Puissance nominale du moteur	kW	200	315	560	1 120	2 200
Rendement typique moteur (η <sub>m</sub> )	%	93	94,5	96,5	97,2	97,5
Énergie consommée par m <sup>3</sup> produit <sup>(1)</sup> (Ea)	kWh·m <sup>-3</sup>	7,16	6,54	5,75	5,49	5,28

92 %.

### Cas des usines à double passe

Dans certaines circonstances (eau de mer très saline, température élevée, exigences spécifiques concernant l'eau traitée), il n'est pas possible d'obtenir en une seule passe les qualités requises pour l'eau traitée, ce qui nécessite de prévoir une deuxième passe utilisant des membranes basse-pression.

Les modules membranaires (en configuration spiralée) placés dans des corps de pression sont alimentés en série, c'est-à-dire que le deuxième module reçoit le concentrat du premier module et ainsi de suite, ce qui fait que l'eau d'alimentation de chaque module devient de plus en plus concentrée au fur et à mesure de son avancée dans le corps de pression, ce qui entraîne une dégradation de la qualité du perméat.

À partir de ce constat, il peut être envisagé d'utiliser le perméat des premiers modules de la première passe (1 ou 2) en aménageant deux sorties de perméat, une à chaque extrémité des corps de pression (figure 7), le perméat sortant du côté du module de tête étant directement mélangé au perméat de la 2<sup>ème</sup> passe, et donc seul le perméat de la deuxième sortie est traité par la deuxième passe qui ne traite alors que 75 à 90 % du perméat de la première passe, ce qui induit des économies d'énergie au niveau des pompes de reprise.

### Optimisation des dispositifs de régulation débit-pression

Les caractéristiques hydrauliques de l'alimentation des osmoseurs sont éminemment variables, et dépendent essentiellement des variations de la température de l'eau d'alimentation, du taux de conversion, de l'âge des membranes et de leur degré d'encrassement notamment.

Les pompes sont dimensionnées pour fonc-

files afin d'augmenter leur capacité.

La diminution du nombre de files entraîne :

- une diminution de la souplesse au niveau de l'exploitation lorsque les besoins en eau sont variables, en fonction des saisons par exemple ;

- une diminution du taux de disponibilité, un incident sur une file entraînant un manque de production plus important.

En général, la capacité de production moyenne d'une file se situe aux environs de 10.000 m<sup>3</sup>·j<sup>-1</sup>. À ce jour, la capacité unitaire maximum connue d'une file est de 25.100 m<sup>3</sup>·j<sup>-1</sup> (usine de Hamma - Algérie - 200.000 m<sup>3</sup>·j<sup>-1</sup>).

Les systèmes de mise en pression centralisés entraînent :

- une augmentation des investissements de l'ordre de 10 % par rapport aux systèmes dédiés à chacune des files. Cette augmentation peut être ou non amortie, et ceci en fonction de la durée du cycle de vie retenu et du coût de l'énergie électrique ;

- une diminution du nombre de fournisseurs capables de fournir des pompes de débits importants ;

- une augmentation des risques d'arrêt total de la production en cas d'incidents sur le collecteur de distribution de l'eau sous-pression aux différentes files.

L'amélioration du rendement énergétique peut également être obtenue au niveau du choix des moteurs électriques par :

- l'adoption de moteurs électriques de classe de rendement supérieur et ceci pour des puissances inférieures à 90 kW (pompes basse-pression). Il existe trois classes, Eff3 - Eff2 et Eff1, dans un ordre croissant de leur rendement. Pour un moteur de 11 kW le passage de la classe Eff2 (standard) à la classe Eff1, permet de passer le rendement de 88,5 % à 91 % ;

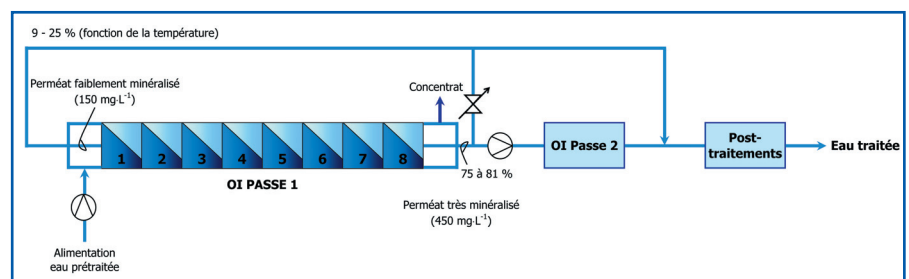
- le remplacement des moteurs asynchrones par des moteurs synchrones à aimants permanents. Pour un moteur de 250 kW par exemple, le rendement passe de 94 % à

96,5 %.

En se basant sur la relation 2, on voit que la vitesse spécifique peut être augmentée pour obtenir un meilleur rendement en diminuant la pression de la pompe HP. Ceci peut être possible en augmentant la pression de fonctionnement des pompes basse-pression gavant les pompes HP, c'est-à-dire en répartissant judicieusement les besoins en pression d'alimentation sur les deux étages de pompage.

Lors du choix des pompes, il est privilégié le choix d'appareils à roues non rognées, car la diminution de leur diamètre nominal entraîne une augmentation de l'épaisseur du bord de fuite des aubes, et donc une diminution du rendement hydraulique. On adapte alors le point de fonctionnement au point de rendement maximum (BEP = Best Efficiency Point) en faisant varier la vitesse, mais cette solution n'est pas toujours la panacée car le variateur génère des pertes (rendements compris entre 97 et 98,5 %) et donc ne peut être retenue que si l'amélioration du rendement hydraulique est supérieur aux pertes du variateur.

En ce qui concerne les pompes équipant les puits côtiers il est recommandé, du seul point de vue du bilan énergétique, d'utiliser des groupes électropompes immergés et non à ligne d'arbre, car la transmission moteur-pompe de ces derniers absorbe une énergie non négligeable. Ainsi, pour un groupe de 160 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup> à 30 m, une longueur de transmission de 20 m a un rendement de



**Figure 7 : Système à deux passes avec deux dispositifs de récupération du perméat de la première passe.**



tionner à un point optimum de rendement (BEP) et ceci pour des données bien précises de débit et de pression d'alimentation. Si les conditions d'alimentation sont modifiées, on ne peut que s'éloigner du point de fonctionnement optimum.

Les réglages peuvent s'effectuer soit par vannage au refoulement des pompes, soit par variation de la vitesse de rotation des moteurs d'entraînement.

Dans le premier cas, le point de fonctionnement suit la courbe de la pompe ce qui entraîne des variations importantes du rendement, tandis que dans le second cas le rendement ne varie que très peu avec la vitesse. Une autre possibilité pour faire face aux variations des conditions d'alimentation des membranes est de conserver constant le point de fonctionnement de la pompe en réglant la contre-pression dans le circuit perméat. Ainsi en faisant varier la contre-pression, on diminue ou on augmente la pression efficace dont dépend directement le débit de production, tout en conservant la même pression d'alimentation et ceci de telle façon que la somme de la pression d'alimentation et celle du perméat reste constante.

Ainsi, pour maintenir constant le point de fonctionnement de la pompe d'alimentation en cas de variation de la température T de l'eau, on augmente la contre-pression "perméat" si T diminue et on la diminue si T augmente.

Ce système de régulation est surtout recommandé si la récupération de l'énergie du concentrat fait appel à des turbines, leur rendement étant influencé par le débit et la pression de l'eau les alimentant, ce qui n'est pas le cas des échangeurs d'énergie.

## Conception des réseaux hydrauliques

La conception des réseaux hydrauliques a également un impact non négligeable sur la consommation électrique. Ainsi, il convient de diminuer au maximum les pertes de charge:

- en réduisant les vitesses d'écoulement, les pertes de charge variant avec le carré de la vitesse;
- en limitant les pertes au niveau des singularités, en employant des courbes à grand rayon (3D, 5D) par exemple;
- en raccourcissant la longueur des conduites par une implantation des équipe-

ments la plus compacte possible;

- en utilisant des matériaux à faible rugosité.
- Il convient pour les conduites en acier inoxydable de ne pas opter pour des vitesses trop basses afin de limiter les risques de corrosion par piqûres ( $V$  optimale  $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) surtout s'il est employé des aciers inoxydables à faible PRE, à savoir inférieur à 30,

$$\text{PRE} = \% \text{Cr} + 3,3 \cdot (\% \text{Mo}) + 16 \cdot (\% \text{N}) \quad (3)$$

ou si la qualité des soudures laisse à désirer. Pour les circuits basse-pression on peut utiliser avantageusement des conduites en matériaux synthétiques (PVC, PEHD, SVR,...), insensibles aux corrosions et présentant une faible rugosité.

## Conception de l'alimentation électrique des utilisateurs

Jusqu'à présent, il n'a été question que de la conception du système membranaire, des équipements électromécaniques et des conduites dans la recherche de solutions à faible consommation énergétique. Le comptage de l'énergie électrique étant effectué au primaire des transformateurs, il doit être également considéré les pertes entre le point de délivrance de l'énergie par le réseau public et les bornes des moteurs électriques, à savoir les pertes dans le poste de transformation et le réseau interne de distribution. Dans la recherche des économies d'énergie il faut éviter au niveau des transformateurs leur marche à vide ou à faible puissance. Ceci conduit à prévoir le fractionnement des appareils et l'arrêt d'une ou plusieurs cellules en fonction du nombre de files mis en exploitation. De plus, on évitera de surdimensionner leurs capacités en vue d'une

extension future de la capacité de production, en prévoyant l'emplacement pour des cellules supplémentaires. En ce qui concerne le réseau de distribution, on s'attache à prévoir des longueurs de câbles les plus courtes possible entre les postes de transforma-

tion, les tableaux généraux basse tension (TGBT) et les moteurs électriques, tout en dimensionnant leurs sections pour limiter les pertes par effet Joule et les chutes de tension.

Un paramètre important à considérer dans le bilan énergétique est le  $\cos \Phi$  ou facteur de puissance. Il est rappelé que tous les utilisateurs électriques consomment deux sortes d'énergie:

- une énergie active transformée en énergie mécanique, lumineuse ou calorifique;
- une énergie réactive nécessaire à l'excitation des utilisateurs (moteurs, transformateurs).

En représentation vectorielle, le courant est déphasé par rapport à la tension d'un angle  $\Phi$ , la puissance électrique délivrée en triphasé étant donnée par la relation suivante:

$$P = \sqrt{3} UI \cos \Phi \quad (4)$$

Un mauvais facteur de puissance entraîne pour une puissance à délivrer déterminée:

- une augmentation de l'intensité et donc des pertes par effet joule pour une section de câble donnée;
- un surdimensionnement des transformateurs et des câbles, ou une diminution de la puissance disponible pour l'installation;
- une pénalisation tarifaire si l'énergie réactive consommée dépasse de 40 % ( $\text{tg } \Phi = 0,4$ ) l'énergie active (cas de la France). Dans certains pays les deux énergies sont payantes.

Pour limiter au maximum ces inconvénients il convient de redresser le facteur de puissance par une batterie de condensateurs

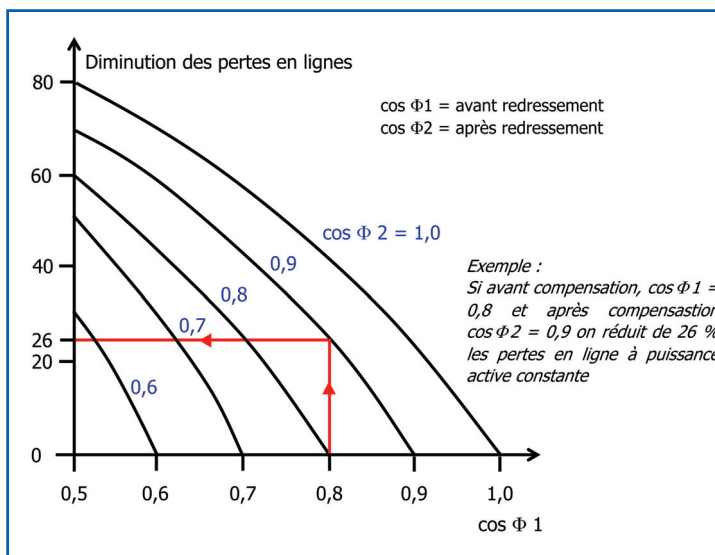


Figure 8 : Diminution des pertes en ligne en fonction du facteur de puissance.

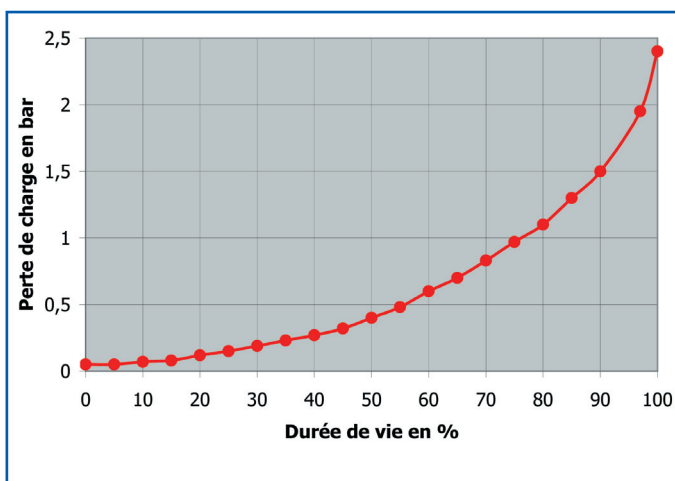


Figure 9 : Évolution de la perte de charge par colmatage d'éléments consommables de microfiltration en fonction de leur durée de vie.

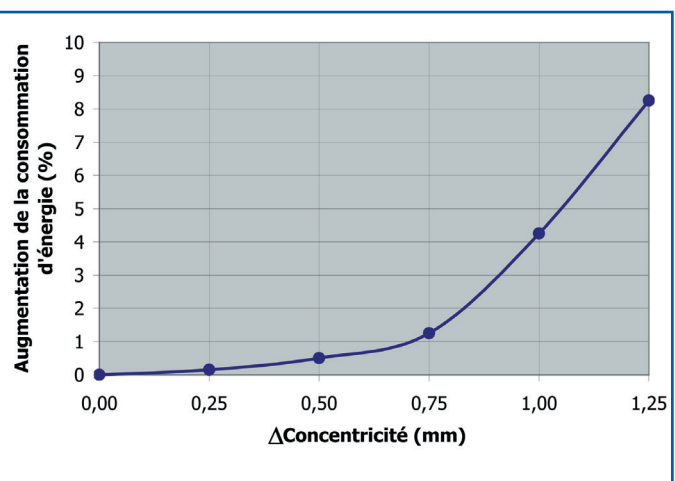


Figure 10 : Conséquence d'un défaut de concentricité entre les arbres des pompes et des moteurs d'entraînement.

(figure 8), surtout au niveau de l'alimentation des moteurs de faible puissance (moteur 4 kW – 1.500 tr.min<sup>-1</sup> – cos Φ = 0,83 / moteur 710 kW – 3.000 tr.min<sup>-1</sup> – cos Φ = 0,92).

### Sources d'économies d'énergie au niveau des conditions d'exploitation

Si des efforts sont développés au niveau de la conception pour atteindre des consommations électriques optimales, il ne faudrait pas qu'ils soient annihilés par des conditions d'exploitation énergivores. Il est dressé ci-dessous une liste de points à considérer pour limiter les consommations électriques.

- Lors du lavage des filtres à média granulaires, il n'est pas souhaitable de prolonger les phases de rinçage final jusqu'à l'obtention d'une turbidité des eaux mises à l'égout équivalente à celle des eaux de rinçage (eau filtrée). Le lavage peut être arrêté dès l'obtention d'une turbidité de 10 NFU environ.
- En plus de préserver la biomasse attachée aux grains qui concourt à la qualité du filtrat, il est réalisé une économie d'eau qui se traduit par des économies d'énergie au niveau des pompages amont (captage eau de mer – reprise) et des pompes de lavage.
- Les pertes en eau résultantes des mises à clair après lavage pour obtenir la turbidité requise peuvent être réduites en ménageant des temps d'arrêt après lavage avant la remise en exploitation (arrêts de l'ordre de 30 minutes) afin de reconstituer la biomasse attachée aux grains. Cette disposition permet de limiter les dépenses énergétiques au niveau des pompages amont.
- Les pertes de charge par colmatage des microfiltres doivent être limitées. Le renouvellement des éléments s'effectue lorsque la perte de charge atteint au maximum 1,5 bar,

ce qui correspond à 90 % de leur durée de vie maximum, il n'est donc pas économique d'allonger le cycle entre deux renouvellements (figure 9).

- L'alignement des pompes et des moteurs électriques les entraînant doit être vérifié périodiquement à l'aide d'appareils permettant un réglage très précis (lignage laser). Tout défaut d'alignement se traduit par une augmentation de l'énergie consommée (figure 10).
- Les pompes doivent faire l'objet d'une maintenance préventive afin de diagnostiquer le plus tôt possible les anomalies pouvant induire des pertes de rendement, à savoir :
  - ✧ usures des garnitures et des roulements (pertes mécaniques),
  - ✧ augmentation des jeux entre roues et volutes induisant des fuites internes (pertes de rendement hydraulique),
  - ✧ dégradation de l'état de surface des pièces internes (roues – volutes – diffuseurs) entraînant une augmentation des pertes par frottement (pertes de rendement hydraulique).
- Les modules membranaires doivent être renouvelés suivant un programme définissant un taux de renouvellement permettant de conserver à peu près constante la perméabilité moyenne de l'ensemble des modules mis en œuvre, et ceci pour conserver une pression d'alimentation constante pour une production donnée, et donc une énergie consommée également constante.
- Le colmatage des membranes par les particules, les dépôts de sels, le biofouling et les matières organiques, entraîne une augmentation de la pression d'alimentation et donc celle de la consommation électrique. Il convient donc de limiter le colmatage en ne poursuivant pas leur exploitation avant de

procéder à un nettoyage chimique.

### Conclusion

L'amélioration du bilan énergétique d'une usine de dessalement a une répercussion directe importante sur le prix de revient du m<sup>3</sup> d'eau produit, mais a également un impact positif sur le réchauffement climatique du fait de la limitation de l'émission de gaz à effet de serre au niveau des centrales de production de l'énergie électrique. Ainsi, pour une usine de dessalement produisant 100.000 m<sup>3</sup>.j<sup>-1</sup>, le passage d'une consommation de 0,6 à 0,5 kWh.m<sup>-3</sup>, permet d'économiser 3.468.000 kWh.an<sup>-1</sup> avec un taux d'utilisation de 95 %, ce qui correspond à une diminution du rejet de CO<sub>2</sub> de 2.700 t.an<sup>-1</sup> sur la base du cycle de vie d'une centrale électrique utilisant le pétrole comme source primaire. Une autre possibilité d'améliorer le bilan carbone des usines de dessalement est de prévoir l'utilisation d'énergies renouvelables, et en particulier l'énergie éolienne qui bénéficie, dans un environnement maritime, de conditions favorables concernant le régime des vents. À ce sujet on peut citer l'usine de dessalement de Sydney (Australie) qui prévoit l'installation de 75 éoliennes, et celle de Perth (Australie) qui prélève 185 GWh.an<sup>-1</sup> sur 272 GWh.an<sup>-1</sup> produits par une ferme éolienne. Dans la recherche d'économies énergétiques, on est souvent amené à envisager l'installation d'équipements de plus en plus sophistiqués, ce qui peut tendre à une diminution de leur fiabilité, et donc à une réduction du taux de disponibilité des usines de dessalement, qui peut au final annuler le bénéfice direct de la réduction de la consommation électrique, sans parler de l'allongement des temps d'amortissement des plus-values d'investissement. ■