

Production d'eau potable par osmose inverse purement solaire : retours de terrain et performances

Drinking water production by solar reverse osmosis: returns and performances from field operation

■ D. VILLESSOT¹*, M. VERGNET², D. VALLON³, T. GAREL², J. CHESNEAU³

¹ DV Consulting – Carrières-sur-Seine

² Mascara-NT – Gellainville

³ Suez Eau France – Paris La Défense

Mots-clés :

Gestion des
ressources en eau
Dessalement
Eau de mer
Osmose inverse
Énergie photovoltaïque

RÉSUMÉ

Des travaux de recherche et développement ont abouti à une preuve de concept pour le procédé innovant Osmosun. Le couplage d'une unité industrielle de dessalement d'eau de mer par osmose inverse à une source d'énergie renouvelable solaire sans batterie, jamais décrit dans la littérature, a été intégré dans le projet Demos, soutenu par le Programme des investissements d'avenir (PIA 2). Deux unités industrielles de dessalement d'eaux de mer par osmose inverse solarisée ont été mises en œuvre et testées pendant plusieurs mois afin de démontrer leur opérationnalité et d'établir leurs performances énergétiques et leurs capacités de production d'eau potable. La première a été mise en œuvre sur la plateforme dédiée aux innovations des techniques de dessalement d'eau de mer de Ghantoot (Abou Dhabi, Emirats arabes unis), sous le contrôle de Masdar. La seconde a été installée sur le site de l'usine de production d'eau potable pour Bora Bora (Polynésie française), en complément aux deux unités d'osmose inverse conventionnelles. Du fait des conditions climatiques locales, les gisements solaires, bien que comparables en énergie globale disponible, sont très différents du fait de la régularité de l'un (Ghantoot) et de la grande variabilité de l'autre (Bora Bora) situé en zone de climat tropical. Les réglages sur sites de l'hydraulique, du pilotage et des automatismes du procédé Osmosun ont permis d'optimiser les quantités et qualités des eaux potables produites et de garantir les performances opérationnelles des unités installées, y compris la protection mécanique des membranes. Enfin, une alimentation énergétique hybride par de l'énergie solaire couplée à l'énergie du réseau électrique de distribution a permis un mode de fonctionnement totalement innovant. Une telle configuration est à la base d'une optimisation économique des équipements de traitement, lorsque le réseau est disponible. Ainsi redéfini, le procédé Osmosun doit permettre de proposer de meilleures conditions techniques et économiques pour l'alimentation en eau potable des populations insulaires habitant des zones arides.

Keywords:

Water resources
management
Seawater desalination
Reverse osmosis
Solar energy

ABSTRACT

Research and development has established a proof of concept for the coupling of an industrial seawater desalination unit with solar energy cells, without batteries. This new concept, Osmosun, has yet to be described in literature. It was the core purpose of Demos, an innovation project partly funded by the French "Programme des Investissements d'Avenir" (PIA 2). This paper reports the results and performances of two Osmosun industrial units for solar seawater desalination after several months of operation, in order to demonstrate their energy and performance potentials for drinking water production. The first unit was tested in Ghantoot (Abou Dhabi, UAE) on the platform dedicated to enhancement of seawater desalination processes, under the control of Masdar. The second one, was installed on the site of the Bora Bora (French Polynesie) drinking water works, nearby two conventional reverse osmosis units operated by the Polynésienne des Eaux staff. The total solar energy at both Ghantoot and Bora Bora was almost the same, but it was rather steady at Ghantoot and fluctuated a lot at Bora Bora. The operating conditions of the Osmosun process were adjusted on each site in order to protect the membranes against the pressure changes due to energy fluctuations, as well as to obtain optimized qualitative and quantitative conditions for the production of drinking water according to local standards. Finally, hybridation of DC/AC energy sources was tested and may allow a better return on capital investments when the electric grid is available. As such, the OSMOSUN process can offer affordable technical and economic conditions for the drinking water supply of populations located in both insular and arid zones.

Introduction

Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres est un marché en croissance forte de chiffre d'affaires, de 10 à 15% par an. Aujourd'hui, 18000 installations de des-

salement produisent chaque année 21 milliards de m³ d'eau potable. La moitié de ces installations ont des capacités inférieures à 1000 m³/j [IDA, 2017-2018]. Cependant les techniques actuelles, thermiques ou utilisant un procédé d'osmose inverse, alimentée par de l'énergie produite avec du pétrole et à fort impact énergétique, ne sont pas « durables ». Pour 1 m³ d'eau produite il faut brûler 1 à 2 litres de gazole, ce qui entraîne une émission

* Auteur correspondant – Courriel : daniel.villessot@dv-consulting.fr

Étude présentée au 97^e congrès de l'Association scientifique et technique pour l'eau et l'environnement (Astee) organisé à Marseille en 2018

de 2 à 3 kg de CO₂. Ainsi dans le monde, le dessalement conduit chaque année à l'émission de 80 millions de tonnes de CO₂ et, si rien n'est fait, à plusieurs centaines de millions de tonnes en 2040 [HARROP, 2018].

Face à cette problématique, nous sommes confrontés à un double défi : l'alimentation en eau potable de populations résidant dans des zones isolées littorales ou à ressource en eaux saumâtres, d'une part, et aux moyens locaux disponibles, d'autre part.

Pour répondre au premier défi, une unité de dessalement d'eau de mer ou d'eaux saumâtres, par un procédé d'osmose inverse à faible impact énergétique, a été conçue et développée par Mascara-NT. Elle est alimentée directement, donc sans batterie. L'énergie solaire photovoltaïque est aujourd'hui la moins chère des énergies renouvelables (7 à 10 cts €/kWh). Les très faibles consommations spécifiques du procédé Osmosun associées au très faible coût de l'énergie permettraient d'atteindre des coûts de production d'eau dessalée de 1 à 1,50 €/m³.

Le second défi est de prendre en compte les réalités humaines, économiques, techniques et logistiques de ces petites collectivités, souvent isolées, pour rendre possible l'appropriation et la prise en charge des équipements de production d'eau potable, grâce à une conception et à des équipements robustes (dans l'esprit de la conception de l'Hydropompe Vergnet). De plus, ont été particulièrement étudiées l'automatisme et la régulation du couplage osmose inverse – solaire, une exploitation facilitée et une première maintenance conçue en « plug and play ». Et surtout, au-delà des investissements souvent aidés, le procédé Osmosun permet d'atteindre de très faibles coûts récurrents d'exploitation dus à la production d'énergie par des panneaux photovoltaïques solaires garantis 25 ans.

Après avoir précisé les technologies mises en œuvre dans le cœur du procédé Osmosun, nous relaterons les résultats obtenus lors des essais en vraie grandeur menés dans le cadre du projet Demos référencé et partiellement financé dans le cadre de l'appel à projets du Programme des investissements d'avenir 2 (PIA 2) de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe).

1. Matériels et méthodes

Le procédé Osmosun est né d'un constat à deux niveaux : d'une part, les contextes spécifiques aux marchés de l'alimentation en eau potable des collectivités où il est habituel de voir fonctionner les unités conventionnelles de dessalement d'eau de mer par osmose inverse à puissance quasi constante, sans arrêts fréquents ; d'autre part, le couplage à des énergies renouvelables,

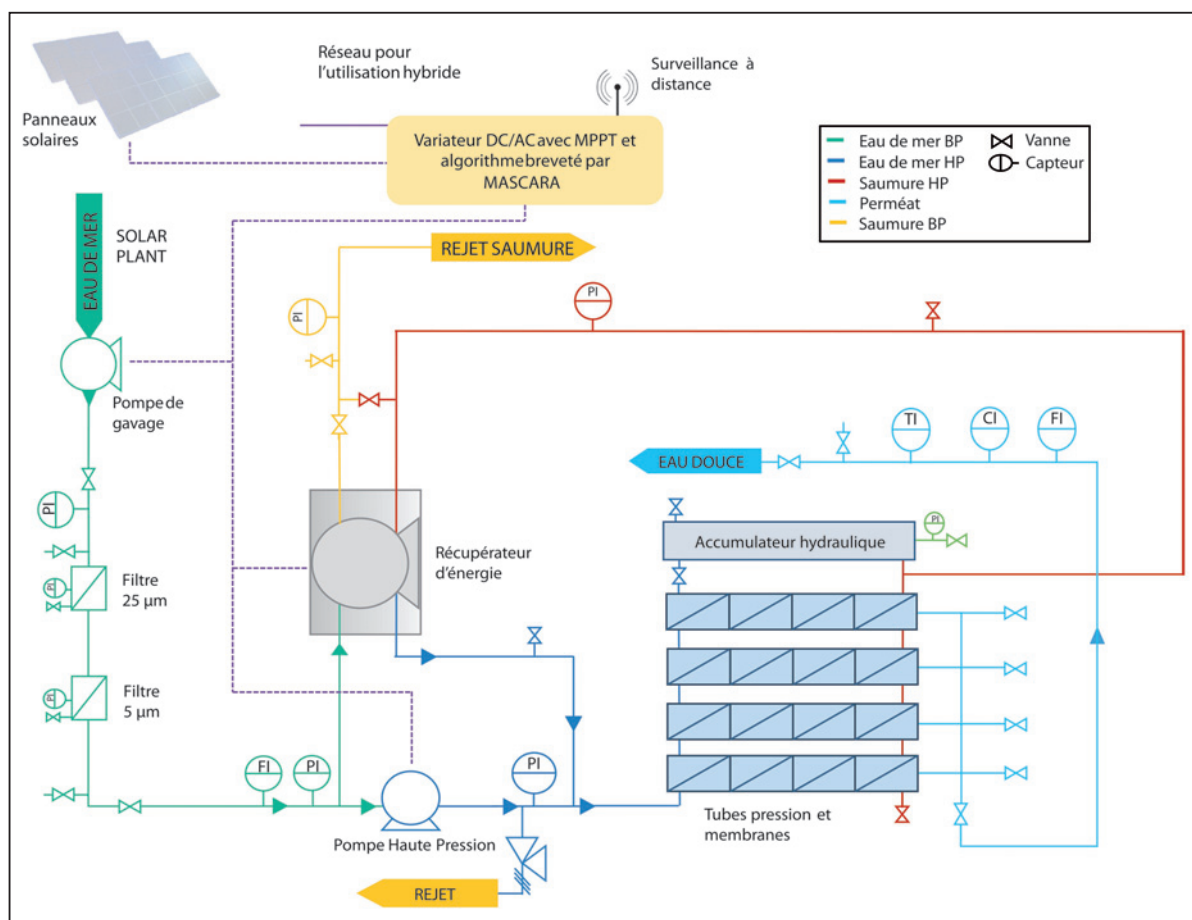
variables dans le temps et en intensité, a imposé un stockage par batteries pour garantir une puissance d'alimentation constante. Une analyse bibliographique a permis de constater que, pour tous les projets expérimentaux réalisés et publiés, les coûts élevés et les impacts environnementaux rédhibitoires du stockage électrique n'ont pas permis le développement industriel du dessalement par énergie renouvelable.

Le concept de fonctionnement du procédé Osmosun repose sur un nouveau principe, breveté [BREVET, 2016], de gestion simultanée et intelligente de tous les paramètres opérationnels de gestion du processus d'osmose inverse, en fonction de la puissance solaire captée. Un ensemble intelligent de composants hydrauliques et de paramètres de fonctionnement, en particulier de la pression d'alimentation d'eau de mer sur les membranes, est maître de la gestion régulée en temps réel du procédé. Selon la puissance solaire instantanée captée, tous les paramètres sont immédiatement optimisés pour assurer les meilleures performances énergétiques, mais aussi garantir la qualité de l'eau produite et la durée de vie maximale des membranes (figure 1).

La production d'eau douce varie avec la puissance solaire incidente et se trouve fortement affectée par des passages nuageux au-dessus du champ des panneaux photovoltaïques.

La preuve de concept du procédé Osmosun a été menée dans les ateliers de Mascara-NT ; les essais qui y ont été réalisés ont permis d'établir, sur une unité prototype alimentée en eau de mer synthétique à 35 g/L, et en énergie par un simulateur de source énergétique solaire, les principaux constituants et caractéristiques du procédé Osmosun. Le procédé innovant et les choix industriels de Mascara ont permis d'atteindre des consommations spécifiques au procédé d'osmose inverse de 2 à 2,5 kWh/m³, les plus basses connues à ce jour pour de l'eau de mer à 35 g/L, surtout pour des installations de petite capacité [IDA, 2017-2018]. Sans pouvoir rentrer ici dans les détails des technologies mises en œuvre pour des raisons de confidentialité industrielle, il peut être toutefois précisé les principales caractéristiques suivantes :

- **Pour ce qui est de l'hydraulique**, les variations de la puissance solaire pouvant être brutales, voire quasi instantanées, et représenter jusqu'à 90 % de baisse de puissance en quelques secondes, le lissage des variations de pression de fonctionnement est nécessaire pour préserver les membranes. Le dispositif de stockage hydraulique, de lissage et d'amortissement, breveté par Mascara, est logé dans un tube de pression ; il permet de garantir des rampes de variations de la pres-



MPPT : suivi du point de puissance maximale ; BP : basse pression ; HP : haute pression ; PI : indicateur de pression (manomètre) ; FI : indicateur de flux (débitmètre).

Figure 1. Implantation détaillée du procédé Osmosun

sion de fonctionnement inférieures à 0,5 bar/seconde et de favoriser ainsi la longévité des membranes ainsi que la conformité aux exigences des fournisseurs. Après chaque arrêt, en l'absence de toute énergie, par le seul effet de la pression osmotique, les membranes sont régénérées après rejet des saumures et immersion dans de l'eau douce.

Les essais sur bancs hydraulique et mécanique réalisés par l'Institut européen des membranes (IEM) dans le cadre du projet Demos [DERATANI *et al.*, 2017] ont permis de constater que le contrôle des variations de pression et l'immersion dans l'eau douce permettent de conserver l'intégrité des membranes [BEN HALIMA *et al.*, 2018], et les essais encore en cours permettent de constater une augmentation significative, non encore quantifiée, de leur durée de vie. Sur les sites industriels, il faut rappeler que le renouvellement des membranes représente l'élément principal du coût de la maintenance des unités conventionnelles d'osmose inverse.

- **Pour ce qui est de l'interface solaire**, le courant continu (DC) est produit par le générateur photovoltaïque qui offre 25 ans de garantie pour les panneaux

solaires avec des baisses maxima de rendement de 15%. Il alimente simultanément quatre à cinq convertisseurs DC/AC à fréquences variables, différentes pour chaque convertisseur.

Des développements récents menés par Mascara-NT ont permis d'assurer le fonctionnement d'une unité Osmosun en courant alternatif (AC) couplé au réseau électrique ou à un groupe électrogène ; l'étage de puissance conçu pour l'alimentation solaire permet, par commutation automatique, l'alimentation en courant alternatif. La gestion du procédé garantit les mêmes avantages de flexibilité totale, de faibles consommations spécifiques, d'automatisme et de longévité des membranes tout en utilisant au maximum la puissance solaire disponible.

Dans de telles conditions, la production journalière d'eau douce peut être augmentée jusqu'à trois fois la production nominale solaire par un fonctionnement 20 ou 24 h/24 au lieu de 8 à 9 heures en solaire. Cette possibilité a été validée en site réel à Bora Bora (§ 2.2.4).

- **Pour ce qui est du procédé d'osmose inverse lui-même**, Osmosun est caractérisé par un fonctionnement

à faible taux de conversion (*recovery*, 25 à 30%) qui permet une réduction de 20% des consommations spécifiques et des rejets de saumures à seulement 45 g/L en moyenne contre 90 g/L pour les procédés conventionnels. Ces faibles concentrations des saumures permettent de limiter les éventuels chocs osmotiques sur les écosystèmes des milieux récepteurs, par simple effet de dilution avec une hydraulique des rejets bien maîtrisée.

- **Pour ce qui est des autres composants**, les choix se sont portés naturellement sur des composants offrant des caractéristiques de robustesse et de maintenabilité conformes aux objectifs décrits en introduction : des pompes volumétriques permettent des gains de rendement de 20 à 30% par rapport aux pompes centrifuges, des interventions de maintenance avec utilisation de kits très simples, et seulement toutes les 8000 heures au lieu des 500 heures sur les anciennes générations de pompes haute pression et de récupérateurs d'énergie ; les raccordements sont en acier inoxydable duplex et super-duplex.

Pour le captage de l'eau de mer, Mascara privilégie chaque fois que cela est possible l'utilisation de puits maritimes, ou *beachwell*, pour bénéficier de la filtration par les terrains naturels. La qualité de cette filtration permet de réduire, voire d'éviter, les prétraitements d'eau de mer, véritable contrainte économique et technique d'exploitation. Les membranes sont protégées par une batterie de filtres à cartouches.

2. Résultats et discussion

2.1. Résultats des essais menés à Ghantoot (Masdar, Abou Dhabi, Émirats arabes unis)

Il n'est pas nécessaire de rappeler que 95% de l'eau potable des pays du Golfe ont pour origine le dessalement d'eau de mer. Si le gaz et le pétrole sont aujourd'hui des ressources énergétiques et financières pour ces États, des financements importants sont consacrés au futur des énergies renouvelables. C'est pourquoi la société Masdar, l'Institut Masdar avec le soutien de la société des eaux d'Abou Dhabi (Adwea), d'une part, et de ILF Consulting Engineers, de PwC et d'un panel d'experts, d'autre part, ont mis à la disposition de sociétés sélectionnées une plateforme d'essais située à Ghantoot (Abou Dhabi). Ce site est dédié à des travaux d'amélioration des performances opérationnelles et énergétiques d'unités de dessalement d'eau de mer. Le procédé Osmosun de Mascara-NT a été testé sur site aux côtés d'unités de Suez, Veolia/Sidem, Abengoa et Trevi Systems.

Dans le cadre d'engagements contractuels avec chaque société, dans un esprit de partenariat plutôt que de

client-fournisseur, des indicateurs de performance ont été définis ; des objectifs à atteindre ont également été fixés pour que Masdar puisse aider, en cas de succès, à la promotion de ces technologies dans le cadre de nouvelles réalisations.

Dans ce contexte contractuel et partenarial, une unité Osmosun 7 (capacité de 40 m³/jour à 35 g/L) a été installée ; alimentée en eau de mer à partir d'un *beachwell*, elle a fonctionné de septembre 2016 à décembre 2017. La machine et le champ solaire ont été dimensionnés pour produire 30 m³/jour dans les conditions des Émirats : la salinité de l'eau d'alimentation peut aller jusqu'à 50 g/L et sur un espace limité pour le positionnement du champ solaire. Les panneaux solaires ont été positionnés sur le container climatisé dans lequel est installée l'unité d'osmose inverse Osmosun, ainsi que les modules de régulation, de contrôle-commande et la télégestion (*figure 2*). L'irradiance journalière est souvent comparable à celle du 19 mars 2017 (*figure 3*) ; elle a permis d'observer dans ces conditions remarquables, un fonctionnement sans incident majeur. Les opérations de maintenance ont été limitées au nettoyage régulier (poussière et sable) des panneaux photovoltaïques, après correction des quelques défauts d'étanchéité des circuits de pression.



Figure 2. Osmosun 7 à Ghantoot

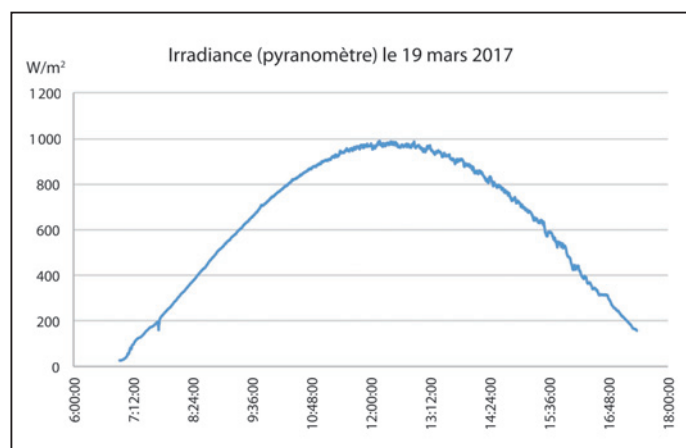


Figure 3. Irradiance journalière à Ghantoot

Conformément au cahier des charges signé par les partenaires, pendant les 16 mois d'exploitation, des essais de performances, appelés « *completion tests* », ont été réalisés par ILF Consulting et les résultats sont globalisés au regard des garanties données par Mascara-NT (tableau I).

Une consommation spécifique de 3,23 kWh/m³ pour une eau de mer à 46 g/L, incluant la consommation de la pompe du *beachwell* a été mesurée ; elle correspond à 2,5 kWh/m³ pour une eau de mer de salinité 35 g/L. Les sels dissous totaux (TDS, *total dissolved salt*) moyens du perméat ont été mesurés à 651 mg/L, inférieurs à la garantie donnée à 1 000 mg/L. Le taux de disponibilité, calculé à 105 %, correspond au fait qu'Osmosun a pu produire avec une irradiance solaire inférieure à 275 W/m². Pour 6 mois, d'avril à septembre, la machine a fonctionné pendant 160 jours (arrêts pour maintenance, période orageuse) hors tests, et a produit 32 m³/jour en moyenne, avec une grande stabilité de la production sur la période, grâce à une irradiance et à un profil d'ensoleillement favorables.

En conclusion et fort de ces résultats, Masdar a souhaité prolonger sa collaboration avec Mascara-NT lorsque des financements seront nécessaires pour finaliser des projets correspondant à des besoins avérés et conformes aux stratégies de la société. Plusieurs projets sont actuellement en cours d'études et devraient aboutir prochainement.

Les essais réalisés à Ghantoot avec les sociétés partenaires ont fait l'objet d'un rapport publié par Masdar [MASDAR, 2018].

2.2. Résultats des essais à Bora Bora

La Société polynésienne des eaux, SPE/« Vaitehi », filiale de Suez, rassemble et fédère des petites entités pour l'exploitation des ouvrages et services pour l'eau et l'assainissement spécifiques à chacun de ces immenses territoires de la Polynésie française. Les services pour l'alimentation en eau potable et l'assainissement, caractérisés par des

difficultés liées à l'éloignement et aux particularités logistiques, sont gérés dans le cadre de contrats de délégation de service public ou de prestations de services.

À Bora Bora, l'engagement personnel du maire, M. Gaston Tong Sang, depuis juillet 1989, a permis de traiter les sujets environnementaux en anticipation de la pression des quelque 20 000 touristes chaque année. Les ressources en eau douce nécessaire pour l'alimentation en eau potable des populations sédentaires et touristiques de Bora Bora sont aujourd'hui complétées, depuis plusieurs années, par des unités d'osmose inverse d'eau de mer, alimentées par de l'électricité thermique carbonée.

Un enjeu stratégique pour l'île de Bora Bora, comme pour les 45 *motus* habités et non équipés de la Polynésie française, est bien d'avoir recours, dans des conditions économiques et environnementales maîtrisées, à une production d'eau potable par dessalement d'eau de mer grâce à la mise en œuvre de technologies utilisant des énergies renouvelables. Cet enjeu stratégique a été reconnu par le gouvernement français qui s'est engagé, dans le cadre d'un plan pluriannuel, à accompagner les territoires pour assurer ces services à l'ensemble des populations. Compte tenu de son implantation et des résultats actuellement obtenus et reconnus par les élus locaux, la SPE s'est, elle aussi, engagée pour atteindre ces objectifs et met en œuvre des programmes d'équipements et d'investissements nécessaires.

2.2.1. La collaboration Société polynésienne des eaux (SPE) et Mascara-NT (MNT)

Soucieuse de s'inscrire dans les programmes de développement durable déjà engagés, notamment à Bora Bora, la SPE a souhaité accompagner les solutions proposées par la société Mascara-NT à travers son procédé Osmosun. Les garanties de concept du procédé Osmosun, les performances industrielles (énergie consommée, durée de vie des membranes, taux de conversion optimal, influence de la variabilité de la fourniture d'énergie sur le process dans son ensemble) et écono-

Paramètres de performances garantis	Unité	Valeur limite	Valeur obtenue
Production nette de perméat selon l'irradiance disponible ^a	m ³ /j	30	29,162
Qualité du perméat (TDS) ^b	mg/L	< 1 000	651
Consommation énergétique globale de l'unité/m ³ de perméat ^c	kWh/m ³	< 3,8	3,23
Disponibilité de l'unité	%	> 83	105
Teneur en bore	B mg/L	< 2,4	1,4

^a Ou capacité nominale de production sous irradiance 275 W/m²; ^b Sels dissous totaux (TDS) : 42 g/L; ^c Pompes de forage et de gavage de l'unité d'osmose inverse.

Tableau I. « *Completion* » tests signés par Masdar

miques (coût global du m³ d'eau produit) doivent être confirmées sur des sites en vraie grandeur. De plus, la taille des installations qui correspondent aux besoins de ces territoires (30, 80 ou 300 m³/jour produits), et les disponibilités variables de ressources humaines techniquement compétentes sur des sites très dispersés, imposent une conception garantissant une disponibilité maximale des unités de production et des outils de suivis d'exploitation et de maintenance téléopérables à distance, par voie satellitaire. Ils ont été testés avec un appui local compétent à Bora Bora dans le cadre du projet Demos (PIA 2). Les modalités de ces essais ont été précisées dans le cadre d'un accord de collaboration entre les deux entreprises pour :

- la mise en place d'un démonstrateur de la technologie Osmosun 13 (80 m³/j) à Bora Bora, sur la base des spécifications de Mascara-NT, son installation sur site, le raccordement aux installations existantes gérées par la SPE, son exploitation, sa maintenance, et la réalisation d'un programme de tests de validation des performances de l'unité ;
- le développement du marché de telles unités sur les territoires du Pacifique, en collaboration avec les équipes de Suez.

Dans ce cadre, une unité Osmosun 13 a été transportée et installée à Bora Bora dans l'usine de Anaau. La prise d'eau de mer et les prétraitements de l'usine ont été uti-

lisés, et un programme d'essais de performances a été conduit en trois périodes successives.

2.2.2. Les premiers essais

Le site de Bora Bora, doté d'un fort ensoleillement, a été choisi pour héberger Osmosun 13 pour plusieurs raisons qui font de lui un lieu tout à fait adapté par son insularité, ayant un vrai besoin en eau douce en complément des ressources naturelles. Apparemment quasi identique à celle de Ghantoot (Émirats arabes unis), la production photovoltaïque, caractérisée par la production annuelle pour 1 kWc installé, est voisine à Bora Bora (1 669 kWh/an) de celle mesurée à Abou Dhabi (1 671 kWh/an ; source : logiciel PVSo). Ces données de base ont servi pour concevoir et programmer l'Osmosun 13 avec les mêmes caractéristiques fonctionnelles et opérationnelles que celles de l'Osmosun 7 de Ghantoot.

Mis en fonctionnement fin avril 2017, nous avons rapidement constaté de fortes variations de la puissance solaire disponible, avec de nombreux passages nuageux qui avaient un fort impact sur la quantité et la qualité de l'eau douce produite. Les pyranomètres installés sur chaque unité de démonstration ont permis de mesurer en continu l'irradiance en W/m² sur le champ solaire, et de comparer les très fortes et rapides variations de puissance captée à Bora Bora (figure 4) au cas quasi régulier de Ghantoot (figure 3).

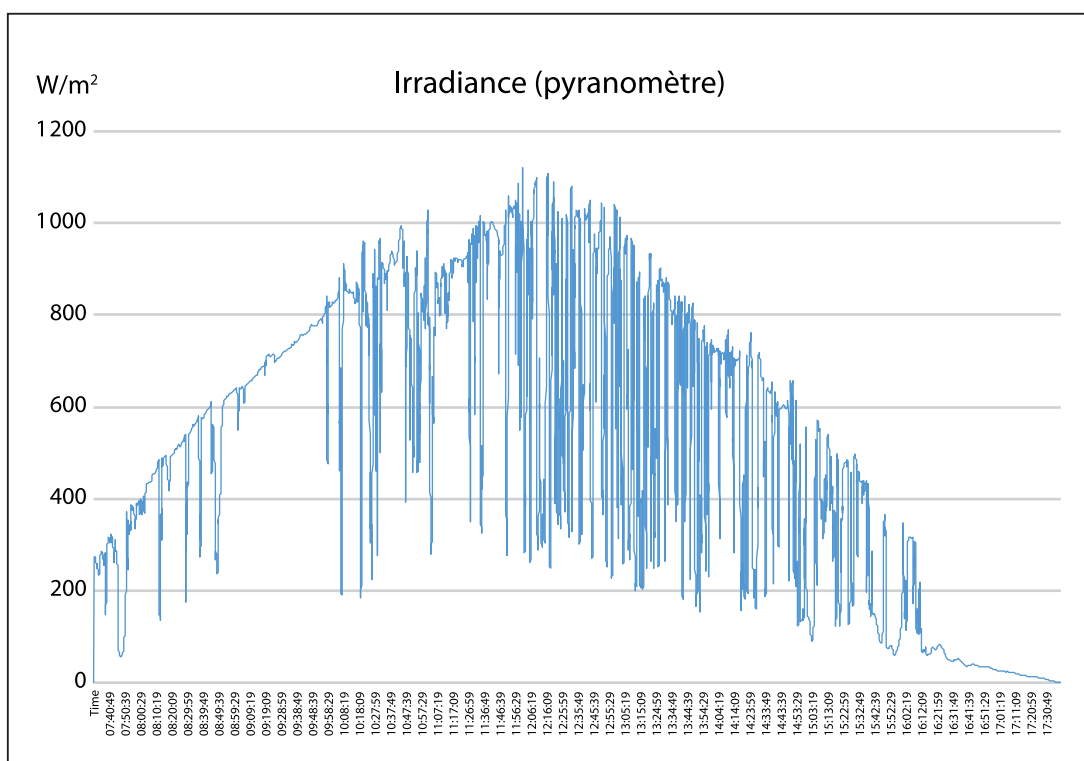


Figure 4. Irradiance mesurée à Bora Bora (18 avril 2018)

L'unité Osmosun 13, telle que programmée et installée en avril 2017 sur les bases acquises à Ghantoot, ne pouvait gérer de telles variations rapides d'ensoleillement et tant la production en quantité qu'en qualité de l'eau douce, que la durée de vie des organes hydrauliques, membranes y compris, étaient en péril. Un important travail a été effectué pour ajuster le programme informatique et les automatismes d'Osmosun au contexte de Bora Bora, et par la suite le rendre adaptable, selon les caractéristiques du gisement solaire, pour mieux optimiser les temporisations de redémarrage et les seuils de marche-arrêt des pompes de gavage.

Dès que le fonctionnement quotidien de l'unité a été stabilisé, les performances en matière de quantité et de qualité de production ont été consignées dans une main courante tenue par les personnels de SPE. À ce stade, plusieurs paramètres et conditions de fonction-

nement ont pu être relevés :

- la capacité nominale de production, dimensionnée pour produire 80 m³/j sur 8 heures d'ensoleillement, a été ramenée à 68 m³/j pour prendre en considération l'ombre du mont Otemanu sur le champ des panneaux solaires installés, provoquant l'arrêt de la production vers 15 h 30;
- la période de temps pendant laquelle se sont déroulés les essais correspond en fait à une période de mauvaises conditions météorologiques; les mesures d'irradiance rapportées à la station météorologique de Tahiti, Faaa, sont très inférieures à la moyenne journalière de 540 W/m²;
- la salinité de l'eau osmosée (ou perméat), mesurée par sa conductivité (µS/cm) est elle aussi très sensible aux variations de l'irradiance comme le montrent les figures 5a et 5b rapprochées. Les pics de salinité mesurée

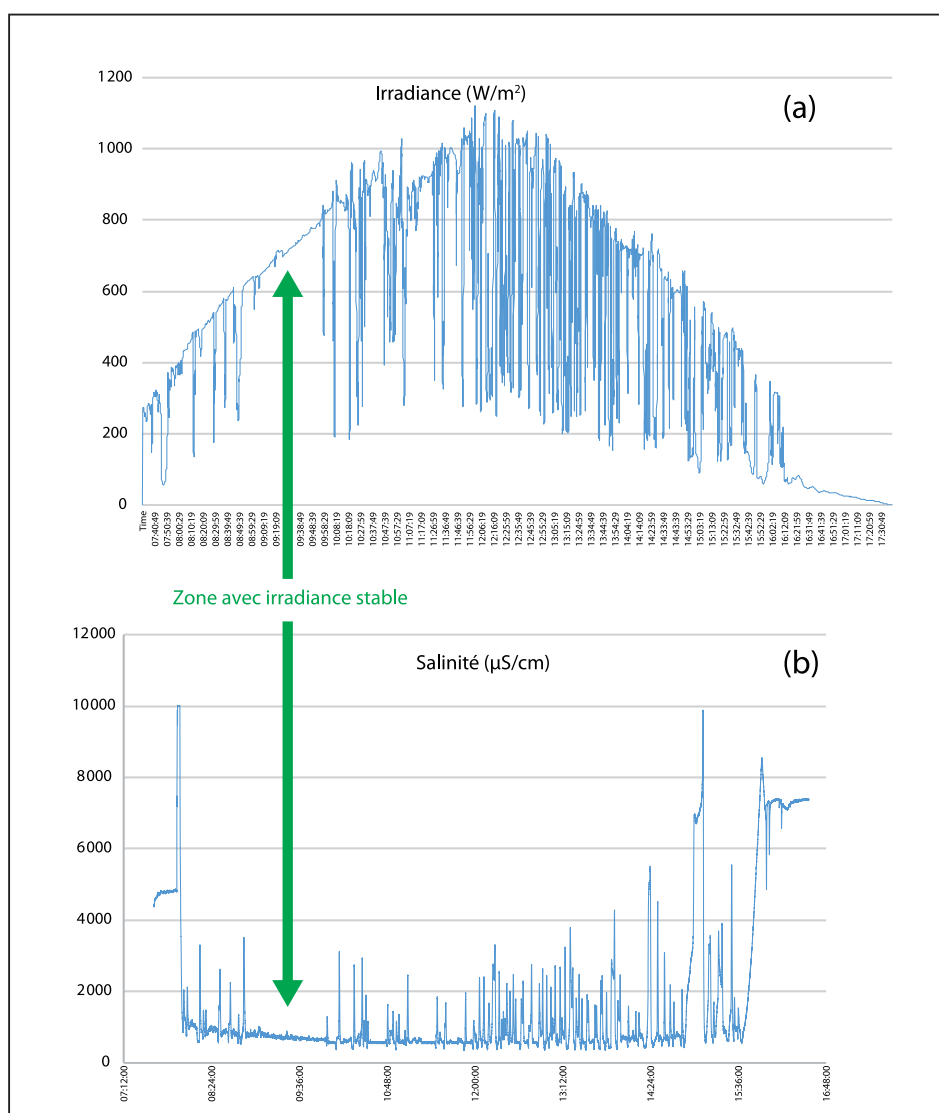


Figure 5. Conséquences de la variabilité de l'irradiance (a) sur la conductivité du perméat (b)

pour l'eau produite correspondent aux redémarrages d'Osmosun, et il est donc nécessaire d'éviter des arrêts trop fréquents, ou de rejeter le perméat trop salé lors de ces phases de fonctionnement.

Ces phénomènes sont nouveaux et n'ont pas été rapportés ou publiés, pour les unités de dessalement d'eau de mer par osmose inverse conventionnelle, fonctionnant avec une source d'énergie constante dans le temps (réseaux électriques de puissance). Les travaux de DERATANI *et al.* [2017] réalisés dans le cadre du projet Demos ont permis d'analyser et de comprendre ces phénomènes pour trouver les meilleures solutions palliatives. Les principales conclusions sont reprises ci-après.

Les membranes d'osmose inverse sont des matériaux composites, généralement constitués de trois couches : une couche supérieure, très fine, qui correspond à la couche active de filtration, les autres couches ne servent que de support (couche polysulfone) ou de renfort mécanique pour le textile non tissé. La couche active est réalisée à base de polysulfone, avec des formulations propres à chaque fabricant. Comme elle est spécialement conçue pour favoriser la « solubilisation » de l'eau, cette dernière va passer préférentiellement aux autres solutés. C'est ce phénomène de convection qui va entraîner les grandes sélectivités des membranes d'osmose inverse. Le transfert du solvant (eau) et des solutés (sels) se fait selon un mécanisme de solution-diffusion. Ce mécanisme implique une « solubilisation » dans la couche active, sur la face amont, accompagnée d'une diffusion au travers du matériau pour ressortir sur la face aval. La « solubilisation » et la diffusion se font par les volumes libres qui sont les espaces interchaînes de polymères. Le transfert ne dépend donc pas de la taille des molécules (pas d'effet stérique comme pour les membranes comportant des pores), mais de l'affinité des composants pour le matériau (mécanisme dit de « solubilisation »). La diffusion est, pour sa part, liée à la différence de concentration entre les faces de la couche active. Plus ce gradient est élevé, plus le passage sera important. Le coefficient de diffusion dans la membrane dépend de la taille et de la charge du soluté considéré. Dans le cas du dessalement, la pression osmotique de l'eau de mer vient contrecarrer le passage de l'eau. La pression efficace correspond à la différence entre la pression appliquée et la pression osmotique de l'eau de mer. Pour avoir un flux de perméat, il faut donc appliquer une pression supérieure à la pression osmotique, soit dans le cas de l'eau de mer environ 28 bars. Un passage de sels peut cependant avoir lieu par le mécanisme de solution-diffusion. Au-delà de la pression minimale, le transfert au travers de la membrane est

forcé par la pression appliquée. Ainsi, deux phénomènes peuvent être clairement observés :

- la diminution de la conductivité du perméat avec l'augmentation de pression (augmentation de la rétention en sel avec une valeur limite un peu supérieure à 35 bars) ;
- l'augmentation brutale de la conductivité lors de la reprise de fonctionnement de la pompe de gavage après un arrêt.

En conclusion, cette première phase d'étude a permis de révéler et de mieux apprécier les impacts des caractéristiques du gisement solaire du fait de sa grande variabilité jusqu'alors ignorée, tant dans la littérature que lors des essais réalisés à Ghantoot. L'énergie solaire captée sous ces conditions climatiques, comparable à celle des Émirats arabes unis, présente, lors des passages nuageux, des variations d'intensité qui doivent impérativement être prises en compte dans la conception et la programmation du procédé Osmosun. Une analyse fine du gisement solaire est impérative avant le développement de tout nouveau projet d'implantation ; elle doit être menée de concert avec les analyses de site pour l'implantation des panneaux solaires et, bien sûr, avec les analyses d'eau de mer à traiter, d'une part, et des conditions de rejet des saumures, enfin. Un cahier des charges, décrivant les paramètres spécifiques à ces installations solaires, doit être préparé dans chaque cas particulier pour permettre la garantie des performances de ces installations utilisant des technologies très innovantes.

2.2.3. Seconde phase d'études de performances

Après avoir revisité les caractéristiques du gisement solaire propres au site de Bora Bora, les seuils énergétiques d'arrêt et de démarrage des pompes ont été revus pour diminuer au minimum les arrêts-redémarrages de la pompe de gavage et optimiser tout à la fois les quantité et qualité de l'eau produite. Il s'est agi, principalement, de l'implantation d'une vanne trois voies asservie à une mesure en ligne de la conductivité permettant un réglage fin de la qualité de l'eau produite, et surtout d'une redéfinition de la programmation informatique des automatismes du procédé Osmosun. Le programme ainsi revisité est devenu paramétrable, ce qui facilite les réglages et ajustements toujours nécessaires sur site. La gestion des alarmes et la supervision ont aussi été revues pour faciliter l'exploitation et le suivi de gestion télétransmis. La durée de fonctionnement sous ce régime solaire a pu être ainsi améliorée et une projection annuelle a permis d'estimer que plusieurs jours de fonctionnement solaire (environ 10 fois 8 h) ont été gagnés.

Ces modifications apportées aux programmes et automatismes de l'unité Osmosun, la quantité d'eau produite est plus importante du fait d'un fonctionnement plus long à basse puissance : la machine s'arrêtait à environ 22 kW lors de la phase 1, contre environ 16 kW désormais. De ce fait, dans des conditions d'irradiance solaire comparable, les arrêts de production étant moins nombreux, la qualité du perméat est mieux maîtrisée comme le montrent la *figure 6* et les résultats synthétisés *tableau II*.

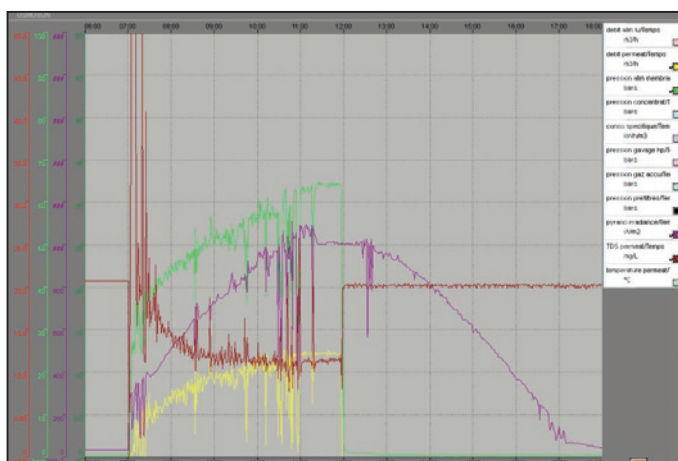


Figure 6. Variations de l'irradiance (violet), de la salinité (marron), de la pression membranaire (vert)

Pour ce qui est des autres paramètres de qualité de l'eau produite, le plus contraignant est le taux de chlorures. Selon la réglementation polynésienne, non revue au regard de la directive européenne 98/83 CE sur l'eau potable⁴, la valeur limite des chlorures est fixée à

⁴ Communication personnelle (Direction générale de santé)

200 mg/L, alors qu'il ne s'agit que d'une référence de qualité fixée à 250 mg/L pour la réglementation française, et d'une recommandation gustative pour l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et la directive européenne. Force est de constater (*figure 7*) que, même à proximité du régime nominal, le taux de chlorure est supérieur à la norme polynésienne. Ce taux est toutefois améliorable en mettant en œuvre soit des membranes retenant mieux le sel (HRLE de DOW, par exemple), soit un second étage de membranes. C'est le cas sur les unités industrielles en place sur l'usine d'Anaau. Cette modification serait d'autant plus nécessaire lorsqu'on travaille à bas régime de puissance captée (entre 20 et 25 kW), la concentration des chlorures se situant alors entre 325 et 450 mg/L.

En conclusions, les révisions de la programmation des automatismes de fonctionnement de l'unité Osmosun ont été nécessaires pour tirer le meilleur profit de la puissance solaire disponible (*tableau II*). Mais, surtout,

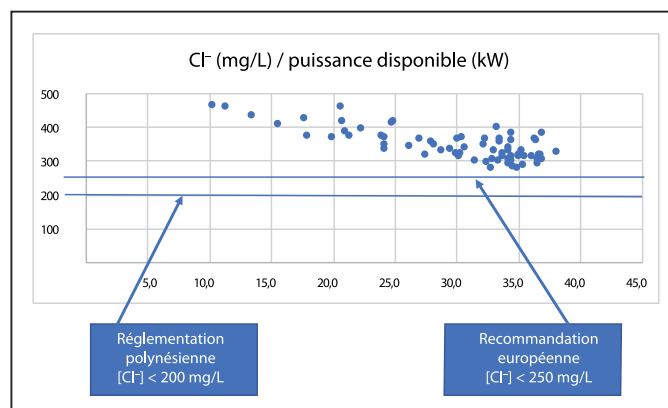


Figure 7. Taux de chlorures (mg/L) selon la puissance solaire disponible (kW)

Paramètres de performances	Unité	Valeur limite		Valeur obtenue	
		Solaire uniquement	Hybride	Solaire uniquement	Hybride
Production nette de perméat selon l'irradiance disponible	m³/j	77 (11 m³/h sur 7 h de fonctionnement)	264 (11 m³/h sur 22 h de fonctionnement)	68 ^d	285
Qualité du perméat (TDS) ^a	mg/L	< 1 000		470	280
Concentration chlorure (Cl⁻)	mg/L	200 ^b 250 ^c		225	206
Consommation énergétique globale de l'unité/m³ de perméat	kWh/m³	< 3,3		2,6	3

^a sels dissous totaux (TDS) eau de mer : 35 g/L ; ^b norme polynésienne ; ^c norme OMS/UE/Fr ; ^d plus bas à cause de l'ensoleillement du site.

Tableau II. Performances de l'Osmosun 13 de Bora Bora

l'irradiance solaire très variable dans la même journée, à certaines périodes de l'année, a conduit à développer un fonctionnement à bas régime plus important. Ces améliorations de la flexibilité et de la productivité de l'unité ont pour conséquence d'augmenter la salinité moyenne du perméat, et du taux de chlorures dépassant la réglementation polynésienne actuelle. Plusieurs solutions peuvent être envisagées, selon leurs coûts respectifs pour respecter les normes de salinité et de chlorures :

- utiliser des membranes HRLE au lieu de ULE en finition dans le tube de pression ;
- mettre en place un deuxième étage de membranes d'osmose inverse, comme c'est le cas sur les unités conventionnelles en place ;
- fonctionner en mode hybride : en AC seul ou AC/DC le régime d'Osmosun est maximal, donc la salinité est minimale. La moyenne de salinité sur la journée sera améliorée comme le montrent les essais décrits ci-dessous.

2.2.4. Études d'hybridation énergétique

Le concept premier du procédé Osmosun est de disposer d'unités de dessalement solaire d'eau de mer par le procédé d'osmose inverse, sans batterie de stockage de l'énergie et sans apport d'énergie externe. Ce concept, en totale symbiose avec les axes du développement durable, nécessite des taux de conversion plus faibles que les unités conventionnelles, et, du fait du nombre d'heures de disponibilité de la puissance solaire (8 h /24 h), des capacités horaires de production plus importantes pour tenir une même production journalière. Un choix qui reste encore et toujours délicat à faire lorsqu'il s'agit d'investir, sauf contraintes environnementales et engagement politique fort. Toutefois, ces apparents surinvestissements peuvent être mieux amortis si l'unité de puissance solaire peut être couplée à une source d'énergie électrique conventionnelle. Elle peut être alors valorisée en ce qu'elle permet d'atténuer l'impact carbone d'une unité de dessalement lorsque la priorité est donnée au fonctionnement solaire, complété, lorsque nécessaire, par des appels au réseau électrique. Elle peut permettre également, en consommant des kWh de nuit du réseau, d'améliorer les rendements des productions énergétiques locales pendant les heures creuses. Ces approches sont à étudier au cas par cas.

Des développements technologiques ont été réalisés par Mascara NT pour rendre compatibles les deux sources énergétiques courant continu avec le solaire (DC) et courant alternatif (AC) avec le réseau, grâce à un basculement automatique du DC prioritaire, vers l'AC. Cette solution permet alors de retrouver une plus

grande stabilité de la puissance disponible et, comme discuté ci-dessus, des salinités de perméat mieux maîtrisées, un fonctionnement 20 h ou 24 h/24, et, pour une même unité d'osmose inverse, une capacité de production presque triplée.

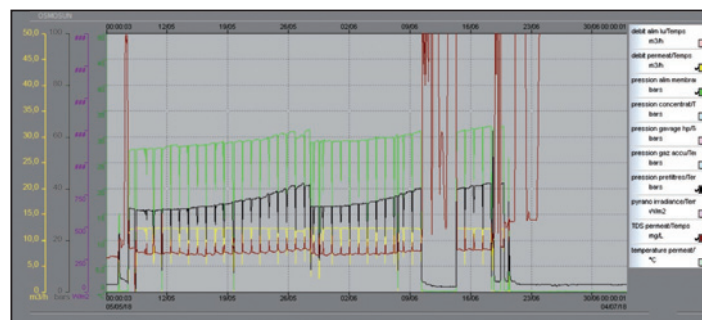
L'unité Osmosun 13 installée à Bora Bora a été, pour la première fois sur site, « hybridée » en quelques jours et la programmation de son fonctionnement revu en conséquence. Les performances attendues ont été obtenues (figure 8 et tableau II).

Divers aménagements hydrauliques sont nécessaires pour exploiter et suivre dans le détail les nouvelles performances de l'unité hybridée :

- installation d'un compteur électrique spécifique à la pompe de gavage pour distinguer les parts énergétiques AC/DC ;
- mise en place d'une régulation PID sur la pompe de puits, qui maintiendra un débit (ou une pression de gavage) suffisante pour ne jamais mettre l'économiseur d'énergie en risque de recyclage de saumure sur l'alimentation des membranes. En tout solaire, la régulation PID étant impossible, la correction de la relation puits/gavage doit être automatique.

Pendant la période des essais en régime hybridé (4 mois), nous avons pu observer que :

- en régime stabilisé au débit nominal (12,5 m³/h), la production est de 285 m³/jour hors les débits réservés aux nettoyages et rinçages, y compris le lavage chimique des membranes ;
- le TDS du perméat produit est compris entre 250 et 350 mg/L, soit une conductivité comprise entre 500 et 700 µS/cm pour un objectif proche de 540 µS/cm pour rester sous les 200 mg/L de chlorure et respecter la norme polynésienne. Les membranes, dans chaque tube de pression, sont en configuration suivante : 3 HRLE + 1 XLE. Le TDS du perméat (et donc les chlorures) peuvent être optimisés (remplacement de la XLE



Marron : sels dissous totaux (TDS) perméat (mg/L, lire sur l'échelle W/m²) ; jaune : débit perméat (m³/h) ; noir : pression avant préfiltres (bars, sur l'échelle 20 = 2,0 bars) ; vert : pression alimentation membranes (bars, sur l'échelle 60 = 60 bars).

Figure 8. Performances de l'unité Osmosun installée à Bora Bora

par une HRLE), mais à moyen-long terme la salinité sera, malgré tout, trop élevée pour la norme pour les chlorures. En Polynésie, un second étage est inévitable alors que la conformité est atteinte, si c'est une simple recommandation, comme en Europe ou pour l'OMS.

Conclusions

Les objectifs du projet Demos étaient de mettre en place, de démontrer les performances et de révéler les améliorations possibles pour deux démonstrateurs du procédé Osmosun à Ghantoot (Osmosun 7) et à Bora Bora (Osmosun 13), dans deux environnements sous stress hydrique important. Même si les gisements solaires sont très proches en valeurs quantitatives, la variabilité journalière de l'irradiance mesurée à Bora Bora a nécessité de répondre efficacement à des problèmes inconnus jusqu'alors. Ils ont nécessité des développements de programmation des automatismes de régulation du procédé. Des mises au point ont dû être apportées sur le contrôle-commande et les équipements. Les fréquents arrêts de la pompe de gavage avaient des impacts négatifs, tant sur la quantité que sur la qualité de la production. Ces résultats soulignent l'importance qui doit être accordée à la caractérisation fine du gisement solaire (irradiance globale, mais aussi variabilité journalière et saisonnière), à la création et au positionnement du champ des panneaux photovoltaïques.

Ces améliorations et mises au point apportées sur site, Osmosun a confirmé les performances attendues en matière de production quantitative et qualitative. Nous avons également fait la démonstration des bénéfices techniques et économiques que permet d'obtenir l'hybridation énergétique DC/AC, sans investissement complémentaire, si les caractéristiques et la disponibilité du réseau électrique le permettent.

Pour la première fois, les qualités des eaux douces issues du procédé d'osmose inverse ont pu être améliorées par une meilleure compréhension des phénomènes transitoires sur les membranes. Elles sont soumises à des variations importantes de pression et de flux lorsque la puissance énergétique renouvelable est variable en intensité et dans le temps. Toutefois, tenir la norme polynésienne relative aux chlorures nécessite des choix spécifiques de membranes et/ou la mise en œuvre d'un second étage d'osmose inverse.

L'hybridation avec priorité au solaire a permis à Bora Bora d'augmenter la capacité de production de 68 m³/jour à près de 300 m³/jour et d'utiliser le champ solaire au maximum, même en cas de très faibles puissances disponibles.

Les travaux réalisés ont confirmé l'importance et la fiabilité lorsqu'elle est réalisable, de la solution du *beachwell* en amont d'Osmosun. Des réflexions et des travaux sont encore nécessaires sur ces prétraitements pour les petites à moyennes unités de production, et d'une manière plus générale sur la prise d'eau (ECODESS⁵). Une étude de traitabilité de l'eau de mer est impérative avec des analyses complètes sur des périodes longues et représentatives des saisonnalités pour définir précisément la filière de traitement et les taux de réactifs éventuels pour satisfaire aux conditions de qualité d'eau brute les plus défavorables.

Le dessalement d'eau de mer apparaît comme une solution, un espoir, pour l'alimentation en eau des 3,9 milliards de personnes (47 % de l'humanité — qui seront sous stress hydrique en 2040) [OCDE, 2008]. C'est cette menace qui a conduit à l'adoption le 5 décembre 2015, pendant la COP21 à Paris, de l'initiative climat « Global Clean Water Desalination Alliance H₂O minus CO₂ » avec des objectifs ambitieux de contribution des énergies propres aux consommations énergétiques du dessalement pour les nouvelles réalisations. Le procédé Osmosun s'inscrit parfaitement dans cette démarche et par ses caractéristiques techniques, économiques et environnementales, il est adapté aux cas des approvisionnements en eau potable des collectivités petites et moyennes situées dans les zones arides insulaires. La France s'est affichée comme leader sur ces sujets lors de la COP21 ; si la métropole échappe à ces problèmes de stress hydrique grâce à une gestion bien établie des ressources naturelles souterraines et superficielles, les besoins des territoires ultramarins ne sont pas totalement couverts et leur satisfaction est engagée à court terme (cas de la Polynésie française en particulier), les solutions existent et leur implantation peut aussi servir de guide pour les voisins étrangers.

Remerciements

Ces travaux ont été réalisés grâce à des financements partiels apportés par Masdar pour le démonstrateur installé à Ghantoot (Abou Dhabi, Émirats arabes unis) et par le PIA 3, projet Demos, sous pilotage Ademe, pour le démonstrateur installé à Bora Bora avec l'appui local des personnels de la SPE (Suez). Qu'ils trouvent ici l'expression de nos sincères remerciements.

⁵ ECODESS : ECO DESSALEMENT SOLAIRE, Mascara-NT projet PIA 3, ADEME, en démarrage d'exécution

Bibliographie

BEN HALIMA M., ANTONELLI C., DERATANI A. (2018) : *Rapport d'autopsie des membranes DOW SW30HR LE-400 de l'unité de dessalement de Ghantout OSMOSUN 7*. Institut européen des membranes (IEM).

BREVET (2016) : Osmosun : référence 63529 FR, « Procédé de pilotage d'une installation de dessalement alimentée par une source d'énergie renouvelable et installation associée ».

DERATANI A., GASSARA S., BOUILLONNE J. (2017) : *Rapport sur les performances du dessalement par osmose inverse en cas de fourniture d'énergie intermittente*. Institut européen des membranes (IEM).

IDA (INTERNATIONAL DESALINATION ASSOCIATION) (2017-2018) : *Desalination Yearbook, 2017-2018*. Éd. : Global Water Intelligence.

HARROP P. (2018) : *Desalination: Off-Grid Zero Emission 2018-2028*. Rapport, IDTechEx.

MASDAR (2018) : *Renewable energy water desalination programme*. Rapport. Disponible en ligne : <https://masdar.ae/-/media/corporate/projects/downloads/renewable-energy-desalination-pilot/desal.pdf>

OCDE (ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES) (2008) : *Perspectives de l'environnement de l'OCDE à l'horizon 2030*. Résumé en français, 15 p.

Les Automnales 2019 de l'Astee
sont

POLLDIFF'EAU 2019

Après le succès des 2 précédentes éditions, l'Astee et la FNCCR vous donnent rendez-vous à Lille pour une nouvelle édition.



La politique
« captages », une source
de développement
pour un territoire