



giz Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



Ministère de l'Agriculture
des Ressources Hydrauliques
et de la Pêche



La contribution du dessalement dans la mobilisation des ressources en eau en Tunisie

Projet IRESA-GIZ

« Le développement du secteur agricole en Tunisie par les technologies de dessalement de l'eau utilisant les énergies renouvelables »

Jeudi 25 mai 2017 Gammart

Préparée par: Fethi Kamel

Directeur Central Conseiller à la DG – SONEDE – Tunisie

Expert en traitement et dessalement des eaux- Email: kamel.fethi@gmail.com

Tomates produites par l'eau dessalée



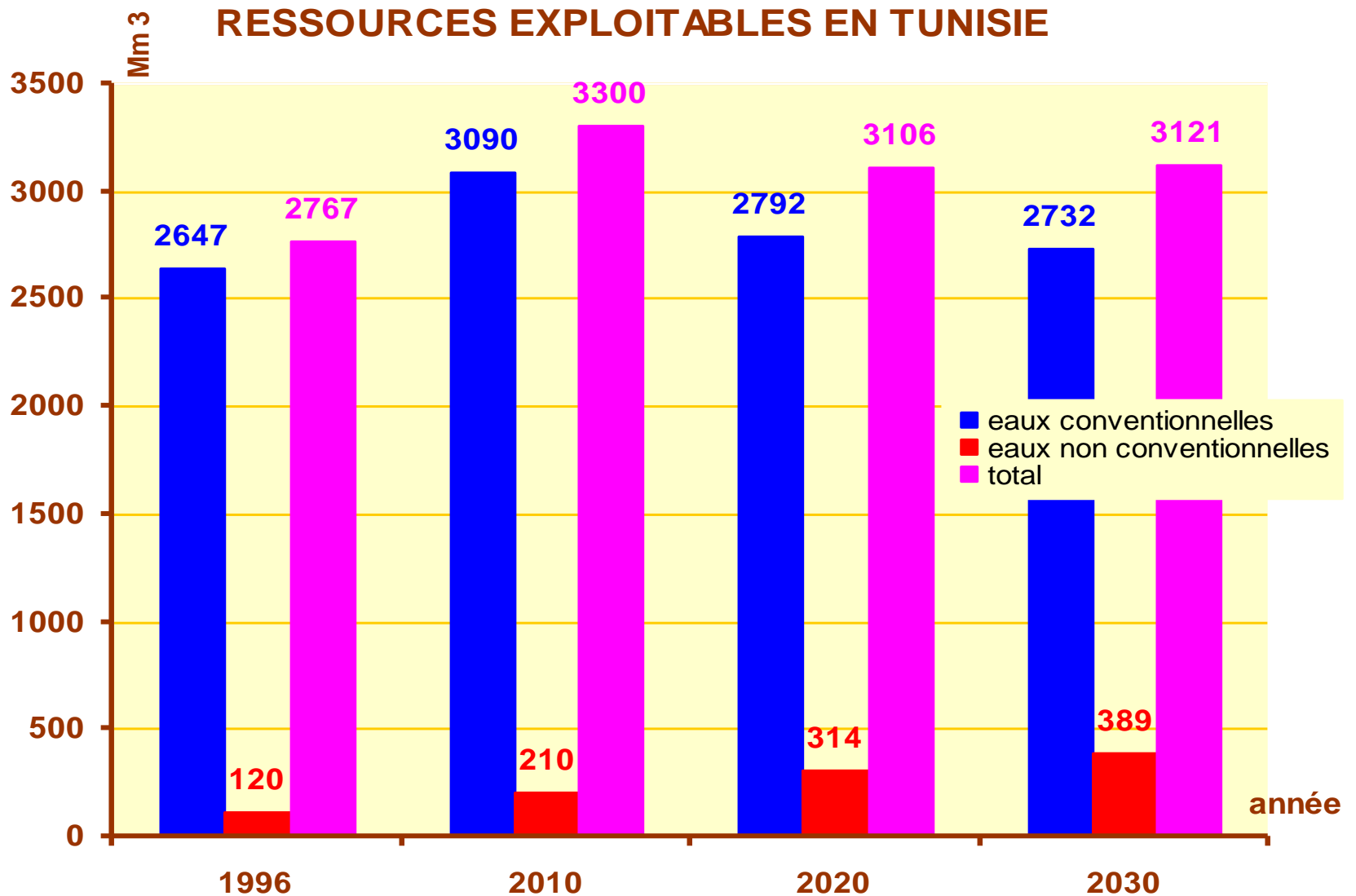
Introduction

- ✓ Les ressources en eau dans en Tunisie surtout dans le Centre et le Sud Tunisien sont limitées,
- ✓ L'utilisation des ressources non conventionnelles (dessalement) et les énergies renouvelables est primordiale y compris en agriculture (pour les cultures à haute valeur ajoutée)
- ✓ Un programme ambitieux de dessalement est lancé et il est en cours de réalisation en Tunisie.
- ✓ Les unités de dessalement à conception optimisée peuvent constituer une solution pour l'agriculture.

Les ressources en eau en Tunisie

- ✓ Les ressources en eau en Tunisie sont inventoriées et bien définies.
- ✓ Le potentiel en Tunisie: **4840 Mm³** (Eau de surface: **2700 Mm³** – Souterraine: **2140 Mm³**).
- ✓ Les ressources disponibles sont: **4640 Mm³**
- ✓ En 2014, Le volume par habitant/an est **440 m³** (contre un minimum considéré par ONU 1000 m³).
- ✓ En 2014, environ **93%** des ressources sont mobilisées.

Les ressources exploitable en Tunisie



Classification des eaux selon la salinité

Le tableau suivant illustre la classification des eaux salées (selon FAO, 1992):

Classe	Résidu sec g/l	Conductivité mS/cm	Type
Non salée	<0.5	<0.7	eau potable
Peu salée	0.5 – 1.5	0.7 - 2	eau potable irrigation
Moyennement salée	1.5 - 7	2 - 10	eau drainage I
Salée	7 - 15	10 - 25	eau drainage II
Très salée	15 - 35	25 – 45	-
Saumures	> 35	>45	eau de mer

Ressources en eau selon la salinité

La répartition géographique en Mm³ des ressources en **eau souterraine** en Tunisie selon la salinité est la suivante:

Région (Mm ³)	Salinité < 1.5 g/l	Salinité 1.5 – 3 g/l	Salinité 3 – 5 g/l	Salinité > 5 g/l	Total
Nord	211	205	119	23	558
Centre	167	191	88	35	481
Sud	3	500	281	75	859
Total	381	896	488	133	1898
Pourcentage	20.1%	47.2%	25.7%	7%	100%

Les orientations futures

- ✓ La poursuite du programme de mobilisation des ressources en eau
- ✓ Gestion intégrée des ressources en eau.
- ✓ Gestion de la demande
- ✓ Développement des ressources en eau non conventionnelles.
- ✓ Protection et sauvegarde des ressources en eau.

Les orientations futures

Développement des ressources en eau non conventionnelles

- ✓ Augmentation du taux de réutilisation des eaux usées.
- ✓ Evaluation de la recharge artificielle aux moyens des eaux épurées traitées dans certaines nappes.
- ✓ Encouragement du recyclage des eaux usées dans le domaines de l'industrie.
- ✓ Développement du programme de dessalement des eaux saumâtres et de mer.

Les techniques de dessalement: choix RO

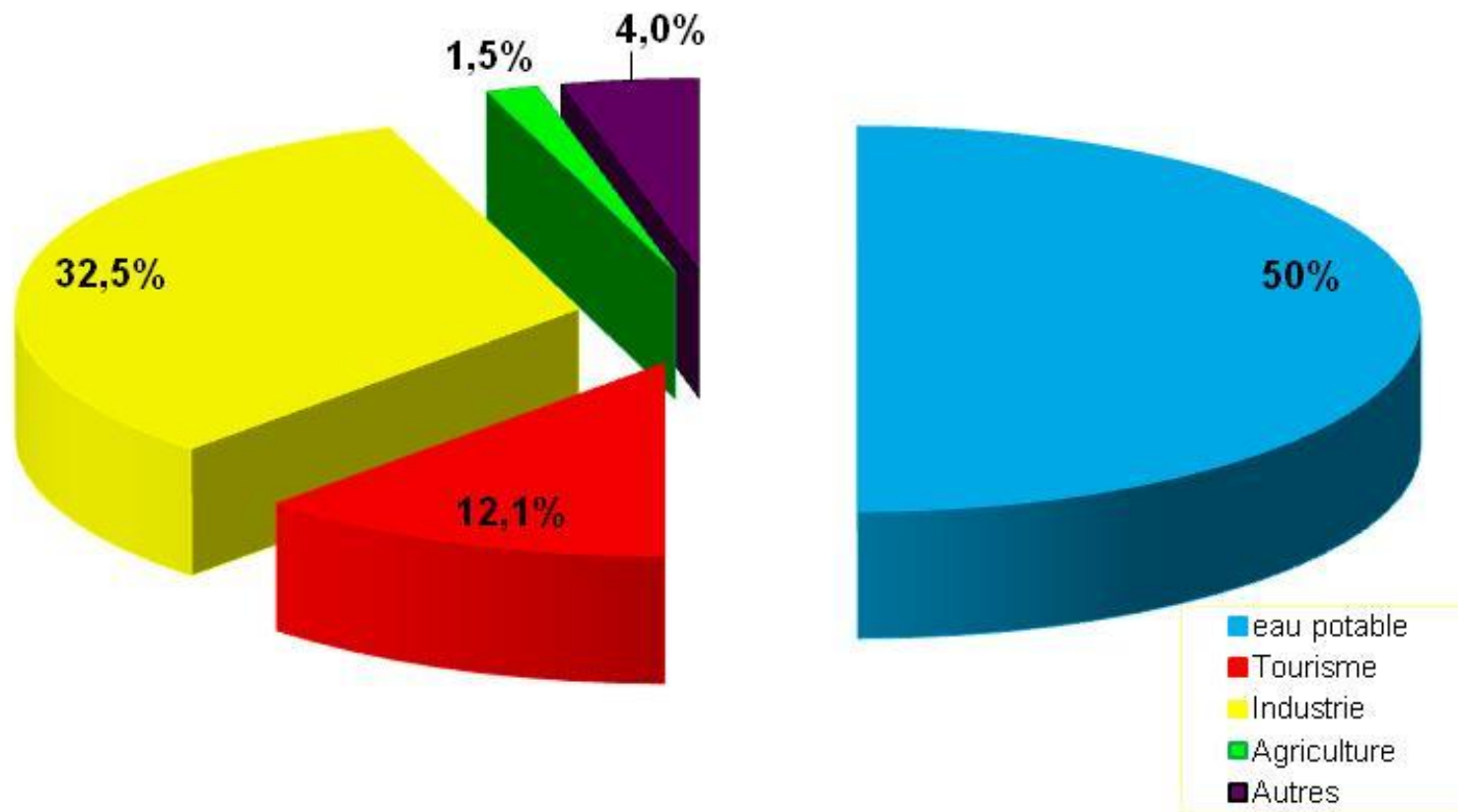
- Les techniques thermiques (faisant intervenir un changement de phase)
 - ✓ La distillation MSF
 - ✓ La distillation MED
 - ✓ La compression de vapeur
 - ✓ La congélation
- Les techniques membranaires
 - ✓ L'électrodialyse
 - ✓ L'osmose inverse
- Les procédés chimiques
 - ✓ Les résines

Le dessalement en Tunisie

- ✓ La capacité de production en Tunisie des eaux dessalées en juin 2016 est de **200 000 m³/j.**
- ✓ Le nombre des unités de dessalement fin 2016 s'élève à **110.**
- ✓ La majorité des unités de dessalement destinées à l'eau potable est localisée dans le Sud Tunisien.
- ✓ L'eau potable accapare à lui seul **50%** de la capacité de production

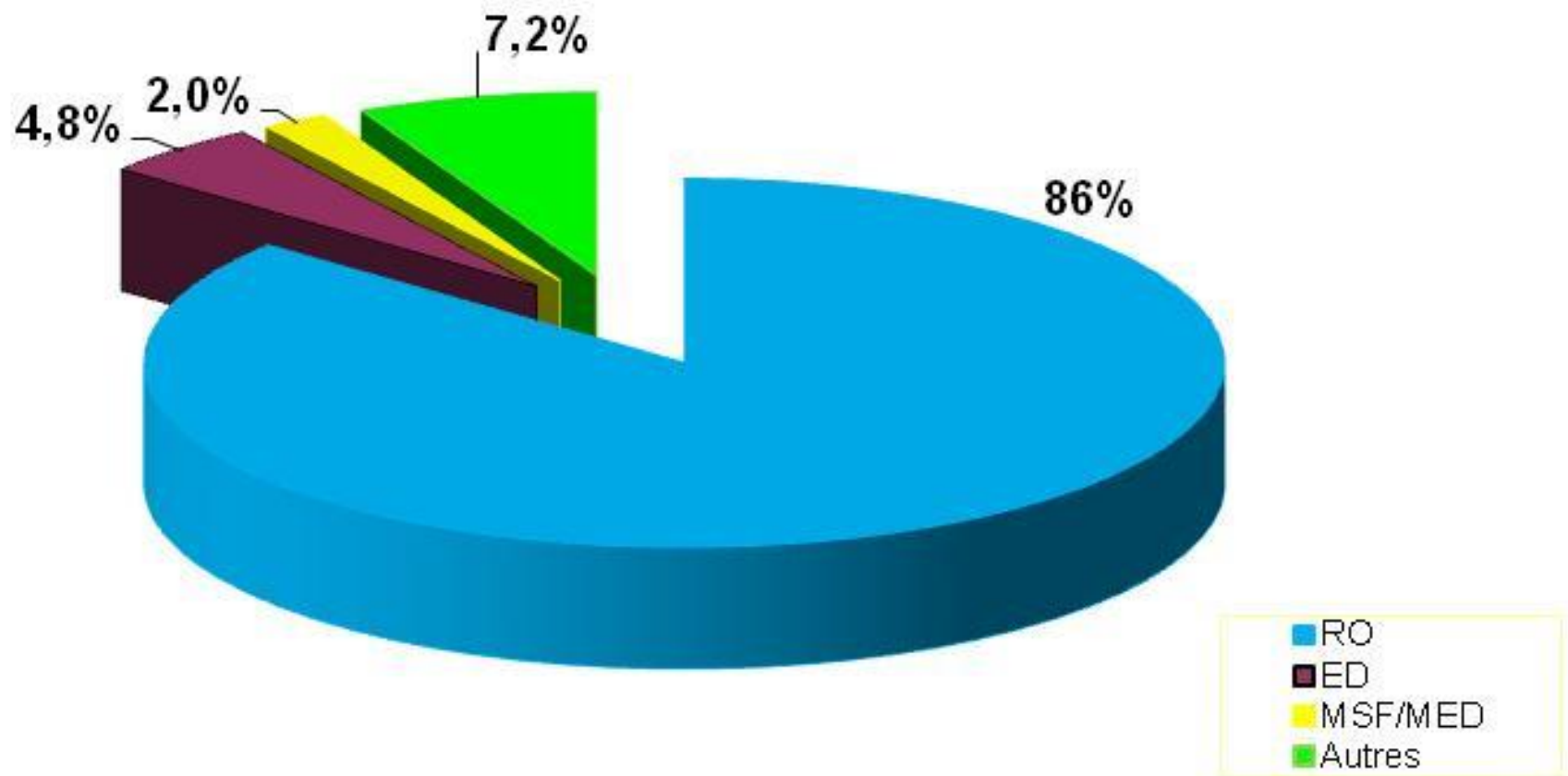
La capacité de production des eaux dessalées par usage

Production d'eau douce en Tunisie par secteur 2016



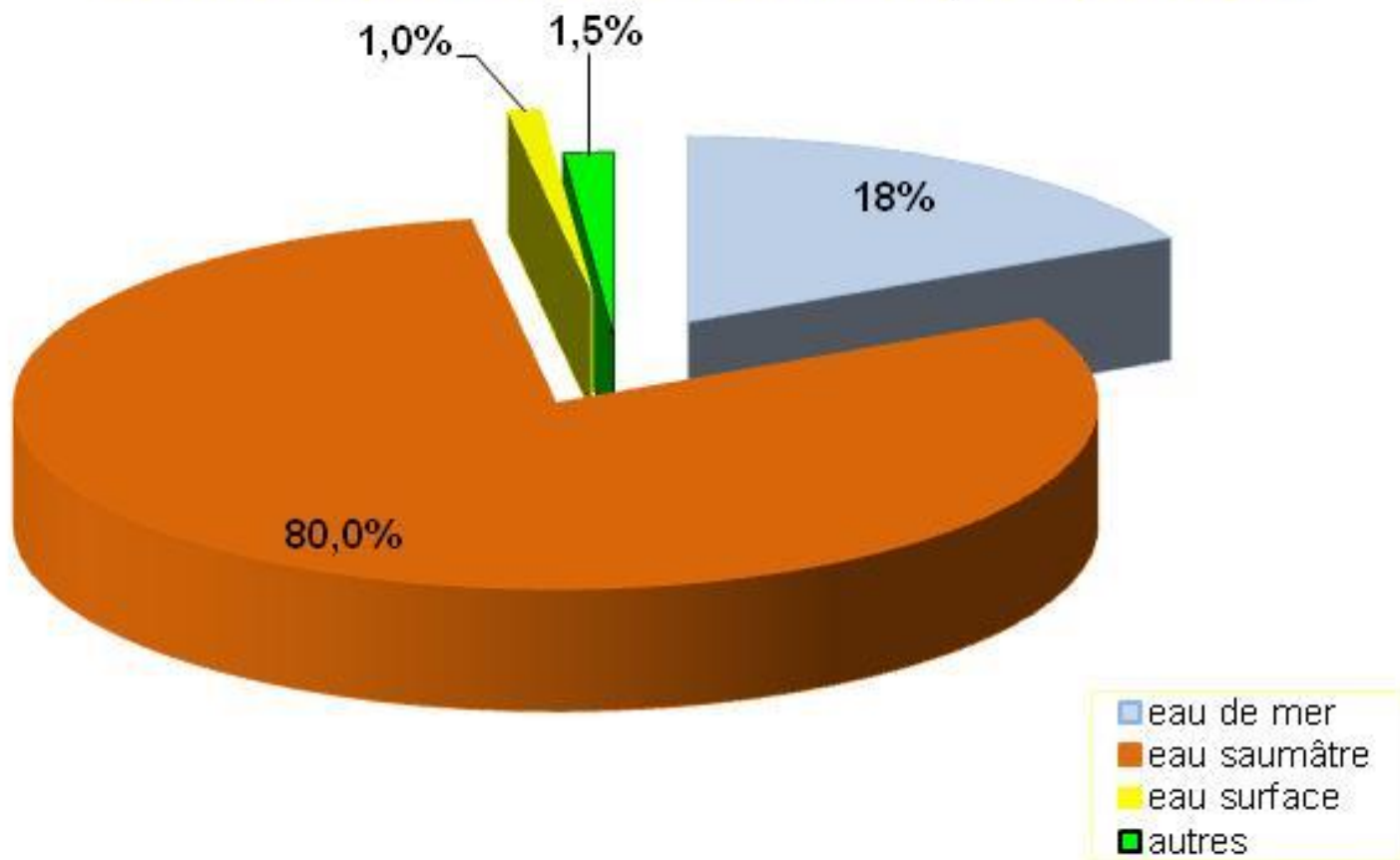
La capacité de production des eaux dessalées par technique

Production d'eau douce en Tunisie par procédé 2016



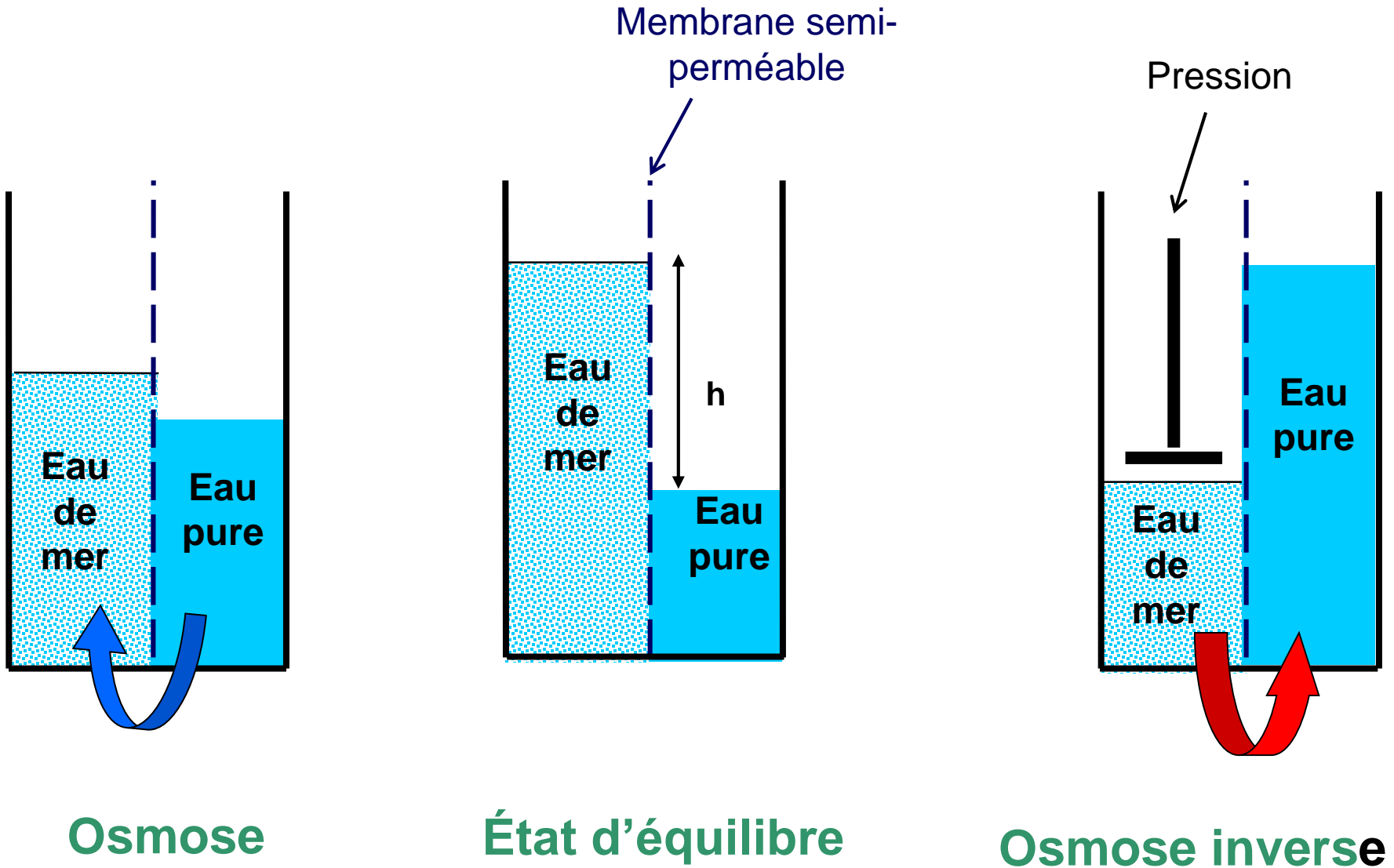
La capacité de production des eaux dessalées par origine

Production d'eau douce en Tunisie par origine 2016

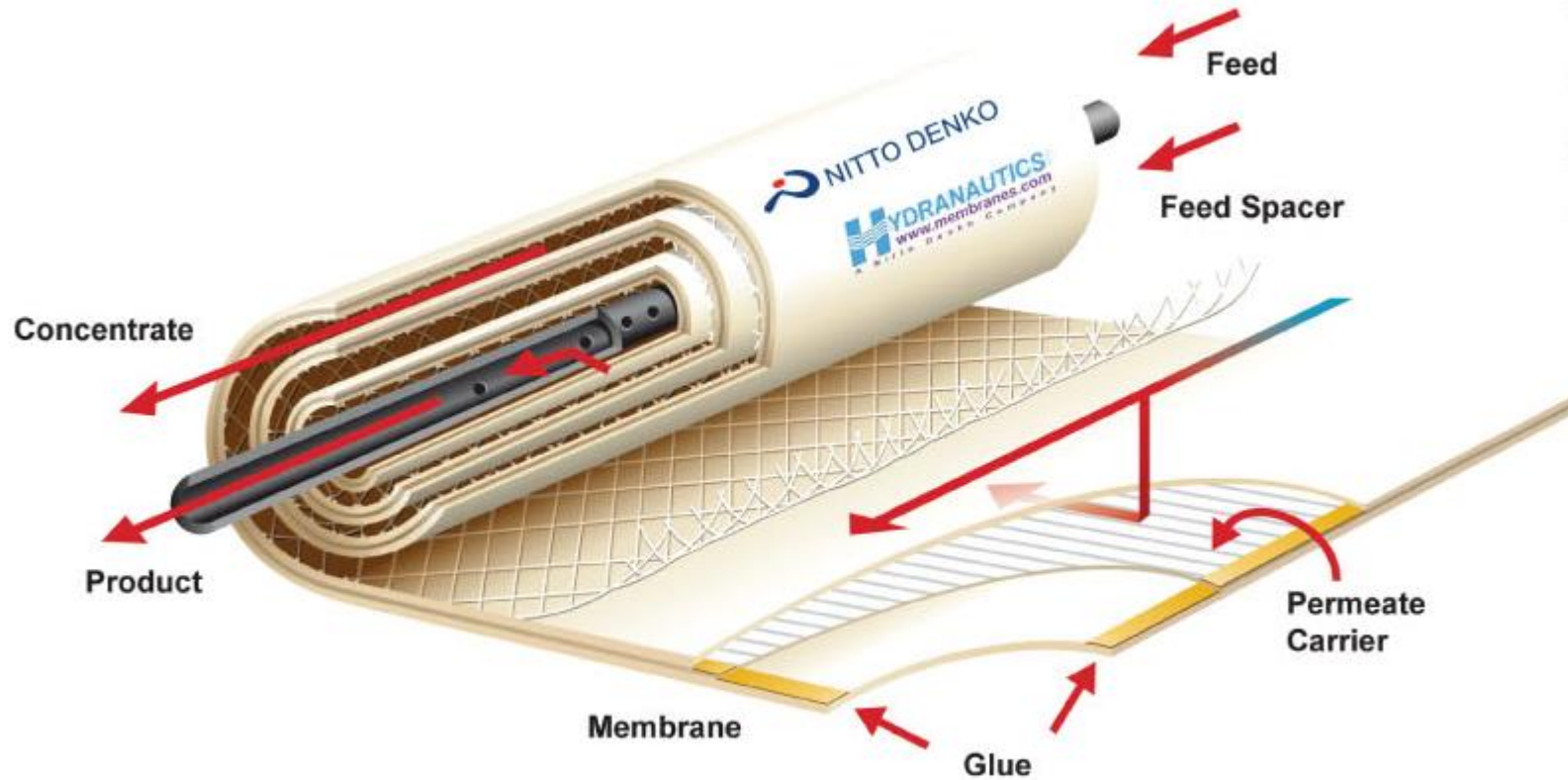


Les principes de l'osmose inverse

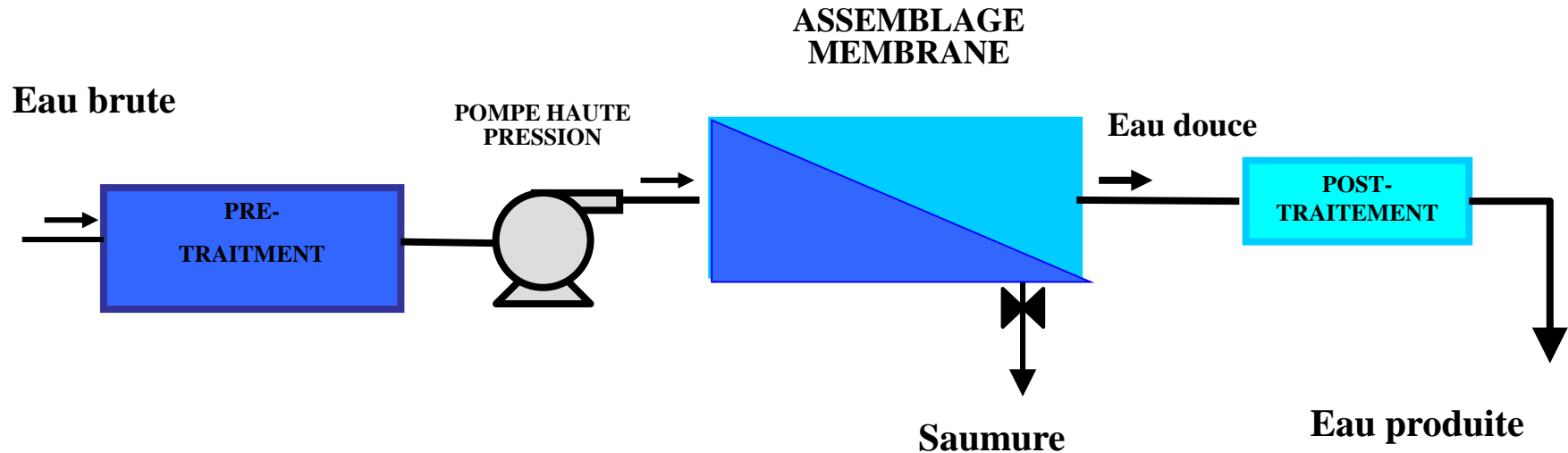
Principe d'osmose inverse



Configuration d'un module d'osmose inverse



Principe d'une station d'osmose inverse



Les stations de dessalement à la Sonede

Désignation	Station Gabès	Station Djerba	Station Zarzis	Station Kerkennah	Station Bengardène	Total
Capacité nominale (m ³)	30 000	20 000	15 000	3300	1800	70 100
Capacité maximale (m ³)	34 000	20 000	15 000	3300	2000	74 300
Taux de conversion	74 %	75 %	75 %	75 %	70	75 %
Salinité eau brute	3,2 g/l	6 g/l	6 g/l	3.7 g/l	14g/l	-
Salinité eau osmosée	300 mg/l	300 mg/l	500 mg/l	300 mg/l	300mg/l	-
Nombre lignes	04	05	03	4	3	16
Nombre des modules	1584	756+162	756	144	100	3 502
Date de mise en service	Juin 1995	Août 99+08/07	Janvier 00	En 1983	Juin 13	-

Station de dessalement de Bengardène

- La construction d'une station de dessalement de Capacité 1800 m³/j, en utilisant l'énergie provenant des cellules photovoltaïques (210 Kwc)
- La construction d'un étang d'évaporation sur 11,9 ha

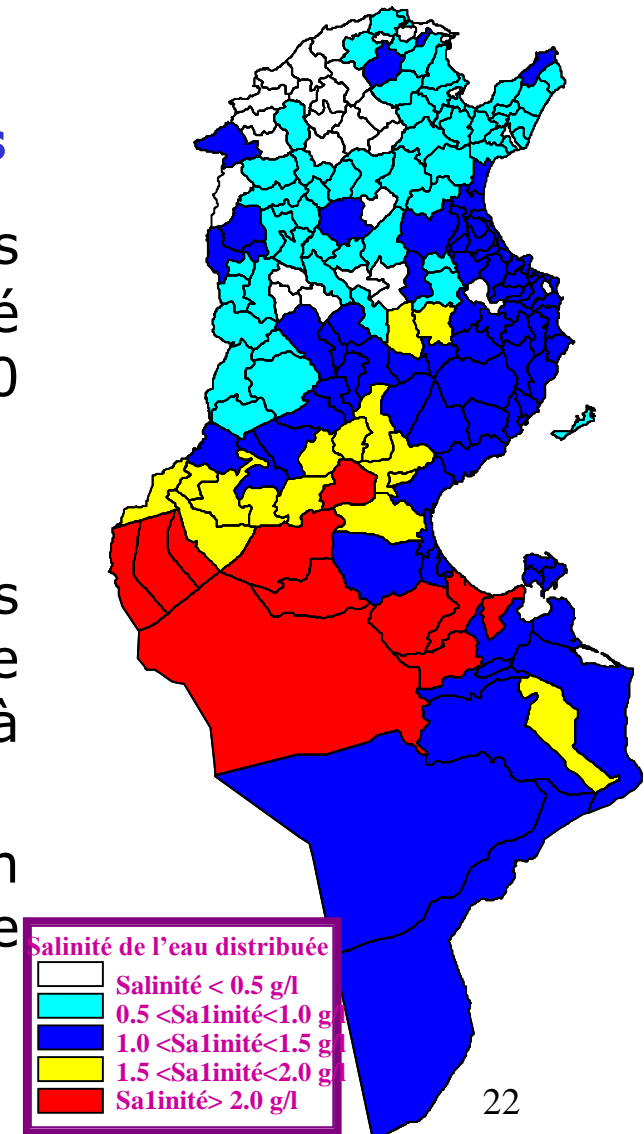


Perspectives du dessalement en Tunisie

Programme d'amélioration de la qualité d'eau

Réalisation du programme en 2 phases

- la première phase concerne les régions ayant plus que 2 g/l de salinité et une population supérieure à 4000 habitants.
- Mise en service en 2016 et début 2017
- La deuxième phase porte sur les régions ayant entre 1.5 g/l et 2.0 g/l de salinité et une population supérieure à 4000 habitants.
- Etude achevée, encours de préparation des appels d'offres et démarrage de certains travaux (forages).

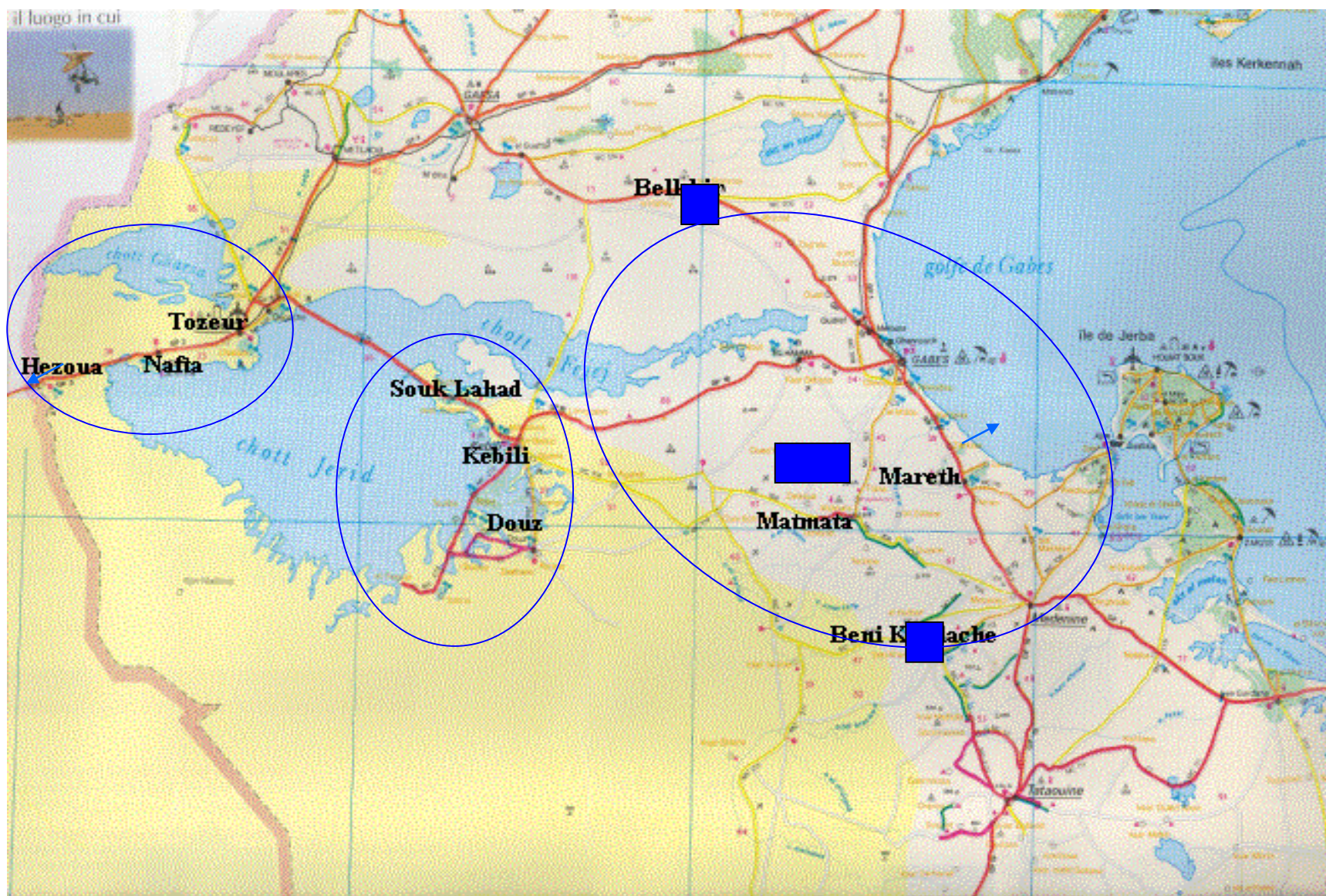


Programme d'amélioration de la qualité d'eau

Projets de la première phase (Mai 2017)

Gouvernorat	Site de la station	Capacité m ³ /jour	Technologie	Nombre lignes	% avancement
Tozeur	Tozeur	6000	OI	3*2000	100%
	Nafta	4000	OI	2*2000	99%
	Hezoua	800	OI	1*800	99%
Kébili	Kébili	6000	OI	3*2000	100%
	Souk Lahad	4000	OI	2*2000	100%
	Douz	4000	OI	2*2000	100%
Gabès	Matmata	4000	OI	2*2000	100%
	Mareth	5000	OI	2*2500	100%
Médenine	Béni Khédache	800	OI	1*800	98%
Gafsa	Belkhir	1600	EDR	2*800	100%
Total		36200			

Programme d'amélioration de la qualité d'eau: Première phase



Station de dessalement de Matmata 4000m³/j



Etang d'évaporation Station de dessalement de Matmata 4000m³/j



Station de dessalement de Belkhir 1600m³/j



Station de dessalement de Belkhir 1600m³/j



Programme d'amélioration de la qualité d'eau: Deuxième phase

Gouvernorat	Site de la station	Capacité m ³ /jour	Technologie	Nombre lignes
Tozeur	Dégueche	2000	OI	2*1000
Kébili	Kébili extension	2000	OI	2*1000
Sidi Bouzid	El Meknassi- Mazouna-Bouzian	3000	OI	2*1500
Médenine	Ben Guerdane	9000	OI	3*3000
Gafsa	Gafsa Mdhila-Gtar-	9000	OI	3*3000
	Metlaoui Redayef-Moulares	6000	OI	2*3000
Total		31000		

Programme de dessalement d'eau de mer: station de dessalement de Djerba

- **Objectif** : renforcement des ressources en eau et l'amélioration de la qualité des eaux distribuées.
- **Mode de réalisation** : Clé en main.
- **Consistance du projet** :
 - * Prise d'eau de mer, station de dessalement et rejet saumure.
 - * Station de dessalement 50 000 m³/j extensible à 75 000 m³/j par la technique d'Osмосe inverse
 - * Stockage des eaux produites après mélange avec les eaux saumâtres.
 - * Déferrisation des eaux saumâtres de mélange.
 - * Raccordement de la station de dessalement au réseau de distribution.
- **Avancement des travaux**: Octobre 2014, avancement 70%

Programme de dessalement d'eau de mer: Site station de dessalement de Djerba



Les filtres à sable à pression

Station de dessalement d'eau de mer de Djerba



Station de dessalement d'eau de mer de Djerba



Programme de dessalement d'eau de mer: station de dessalement de Sousse

- ❑ **Objectif:** renforcement des ressources en eau et l'amélioration de la qualité des eaux distribuées pour le Sahel.
- ❑ **Capacité:** 50 000 m³/j extensible à 100 000 m³/j qui sera réalisée en deux phases.
- ❑ **Mode de réalisation :** Par clé en main.
- ❑ **Consistance du projet:**
 - Prise d'eau de mer, station de dessalement et rejet saumure.
 - Station de dessalement 100 000 m³/j par la technique de l'Osмосe Inverse
 - Raccordement de la station de dessalement au réseau de répartition du Sahel.
- ❑ **Avancement du projet:** AO lancé en avril 2017
- ❑ **Financement :** budget de l'Etat
- ❑ **Début travaux:** Deuxième semestre 2017.

Programme de dessalement d'eau de mer: station de dessalement de Sfax

- ❑ **Objectif:** renforcement des ressources en eau et l'amélioration de la qualité des eaux distribuées pour le Grand Sfax.
- ❑ **Capacité:** 200 000 m³/j qui sera réalisée en deux phases.
- ❑ **Mode de réalisation :** Par clé en main.
- ❑ **Consistance du projet:**
 - Prise d'eau de mer, station de dessalement et rejet saumure.
 - Station de dessalement 200 000 m³/j par la technique de l'Osmose Inverse
 - Raccordement de la station de dessalement au réseau de répartition du Grand Sfax .
- ❑ **Avancement du projet:** Etude par un consultant japonais achevé
- ❑ **Financement** japonais JICA
- ❑ **Lancement appel d'offres:** début 2018.

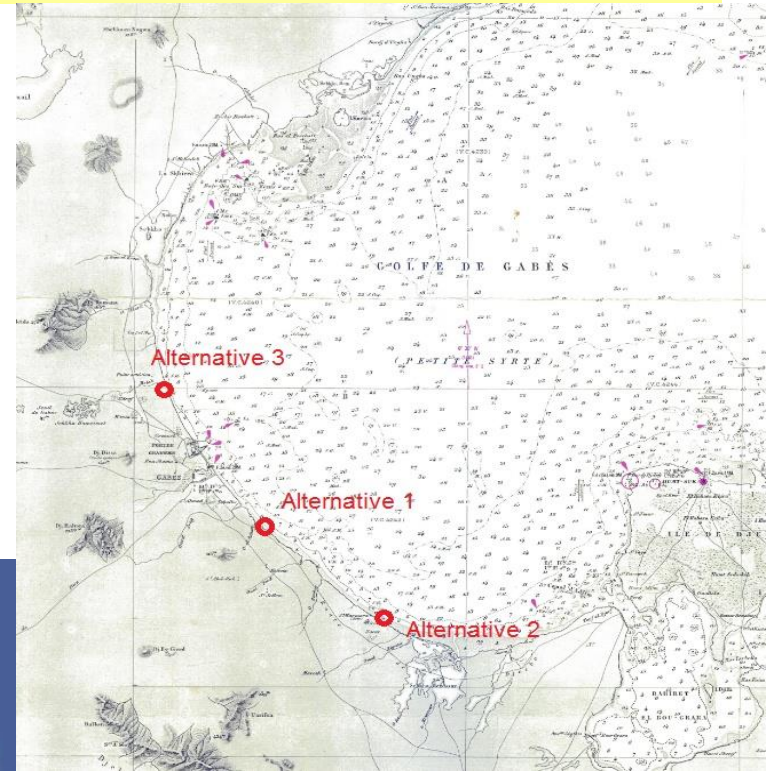
Programme de dessalement d'eau de mer: station de dessalement de Kerkennah

- ❑ **Objectif** : renforcement des ressources en eau et l'amélioration de la qualité des eaux distribuées dans les îles de Kerkennah.
- ❑ Mode de réalisation : clé en main.
- ❑ **Consistance du projet** :
 - Prise d'eau de mer, station de dessalement et rejet saumure.
 - Station de dessalement 6 000 m³/j par la technique de l'osmose inverse.
 - Raccordement de la station de dessalement au réseau de distribution .
- ❑ **Avancement du projet**: financement Fonds Koweitiens.
- ❑ Lancement d'Appel d'offres: avant fin 2017.

Programme de dessalement d'eau de mer: station de dessalement de Zarrat

- ❑ **Objectif:** renforcement des ressources en eau et l'amélioration de la qualité des eaux distribuées pour les gouvernorats de Gabès et Médenine jusqu'à l'échéance 2030.
- ❑ Mode de réalisation : EPC .
- ❑ Consistance du projet :
 - Prise d'eau de mer, station de dessalement et rejet saumure.
 - Station de dessalement 100 000 m³/j par la technique de l'Osмосe Inverse
 - Raccordement de la station de dessalement au réseau de distribution.
- ❑ Avancement du projet: financement KFW.
- ❑ Lancement Appel d'offres: avant fin 2017

Station de dessalement Zarrat 100000 m³/j sites étudiés



- Trois sites ont été identifiés:**
Site N°1 = La zone de la plage de Kettana
Site N°2 = La zone de la plage de Zarat
Site N°3 = La zone de la plage de Methouia

Station de dessalement Zarrat 100000 m³/j caractérisation du projet

- ✓ Production d'eau: 1ère Phase: 50.000 m³/j
- ✓ 2ème Phase: 100.000 m³/j
- ✓ Procédé de dessalement: Osmose inverse
- ✓ Taux de conversion du système: 45 %
- ✓ Nombre d'étages: 1
- ✓ Nombre de passes: 1
- ✓ Nombre d'unités par phase: 2
- ✓ Salinité de l'eau au point de livraison 400ppm
- ✓ Type de prise d'eau de mer: Émissaire sous-marin (2.130m)

Le dessalement en Agriculture

Station de dessalement Gounet

- ✓ La capacité de la station: $200\text{m}^3/\text{j}$.
- ✓ Mise en service : juin 2016.
- ✓ Coût du projet : 300 milles dinars
- ✓ Financement : projet Accbat.
- ✓ Salinité de l'eau brute : 4.5 g/l
- ✓ Salinité de l'eau produite: 150 mg/l
- ✓ Taux de conversion : 73%
- ✓ Consommation d'énergie: $0.8\text{ kwh}/\text{m}^3$
- ✓ utilisation: périmètre irrigué Gounet

La station de dessalement Gounet 200 m³/j



La station de dessalement Gounet



La station de dessalement Gounet



La station de dessalement Gounet



La station de dessalement Gounet



Les stations de dessalement

Cinquième Saison à El Hamma Gabès

La station de dessalement Cinquième Saison



La station de dessalement Cinquième Saison



La station de dessalement Cinquième Saison



La station de dessalement Cinquième Saison



La station de dessalement Cinquième Saison



Le dessalement et l'énergie photovoltaïque

Station de dessalement Bengardène

- ✓ Mise en service : Juin 2013
- ✓ Capacité : 1800 m³/j
- ✓ Source en eau brute : Eaux saumâtres de l'Oligocène à 14 g/l , riches en fer et de température 45 °C.
- ✓ Procédé de dessalement : Osmose inverse membranaire
- ✓ Composantes :
 - une unité d'osmose inverse de capacité 1800 m³/j
 - un bassin d'évaporation des saumures de 12 ha
 - un système photovoltaïque de 210 kwc

Lignes d'osmose inverse



Le système photovoltaïque



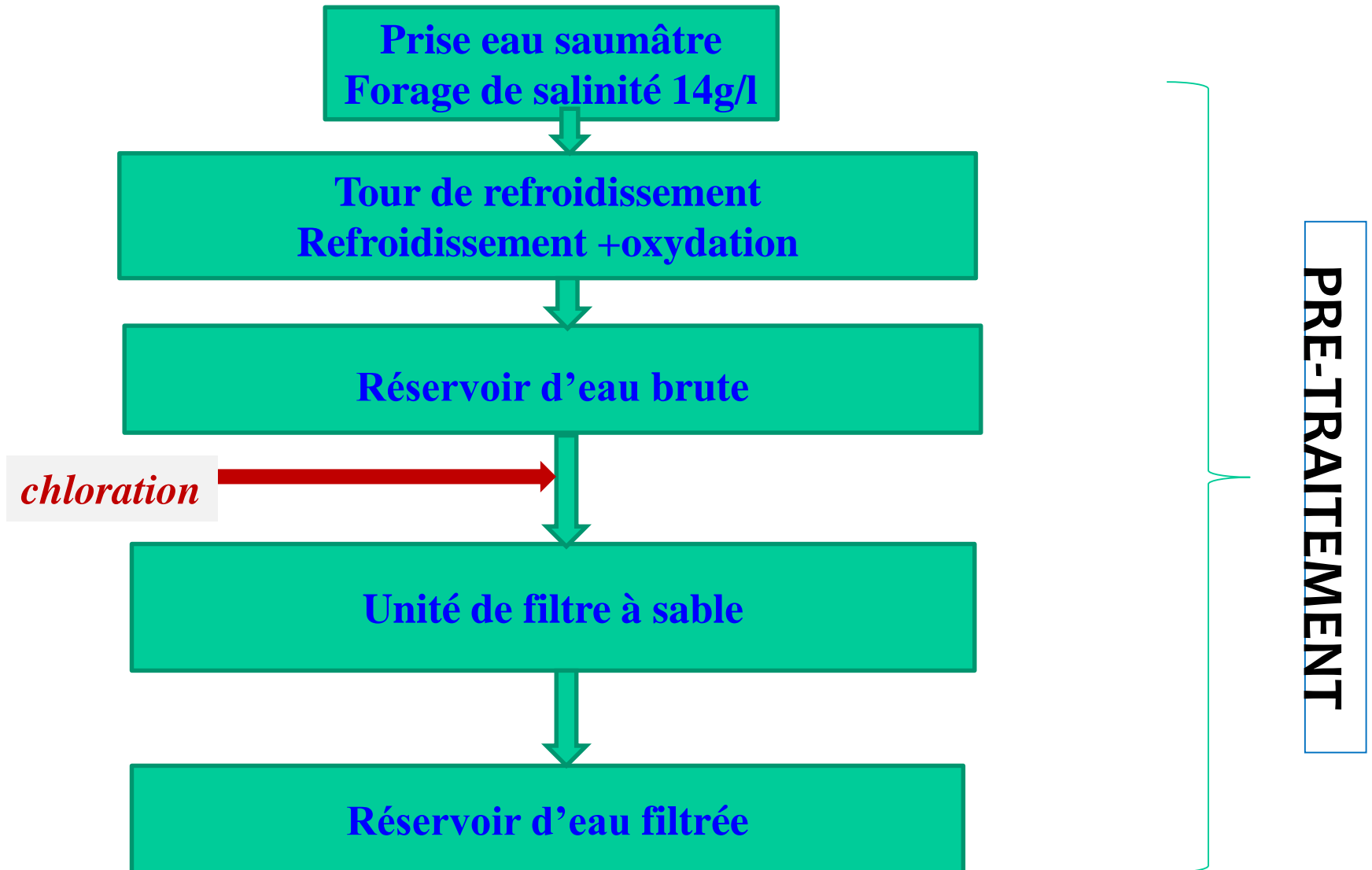
Le système de refroidissement

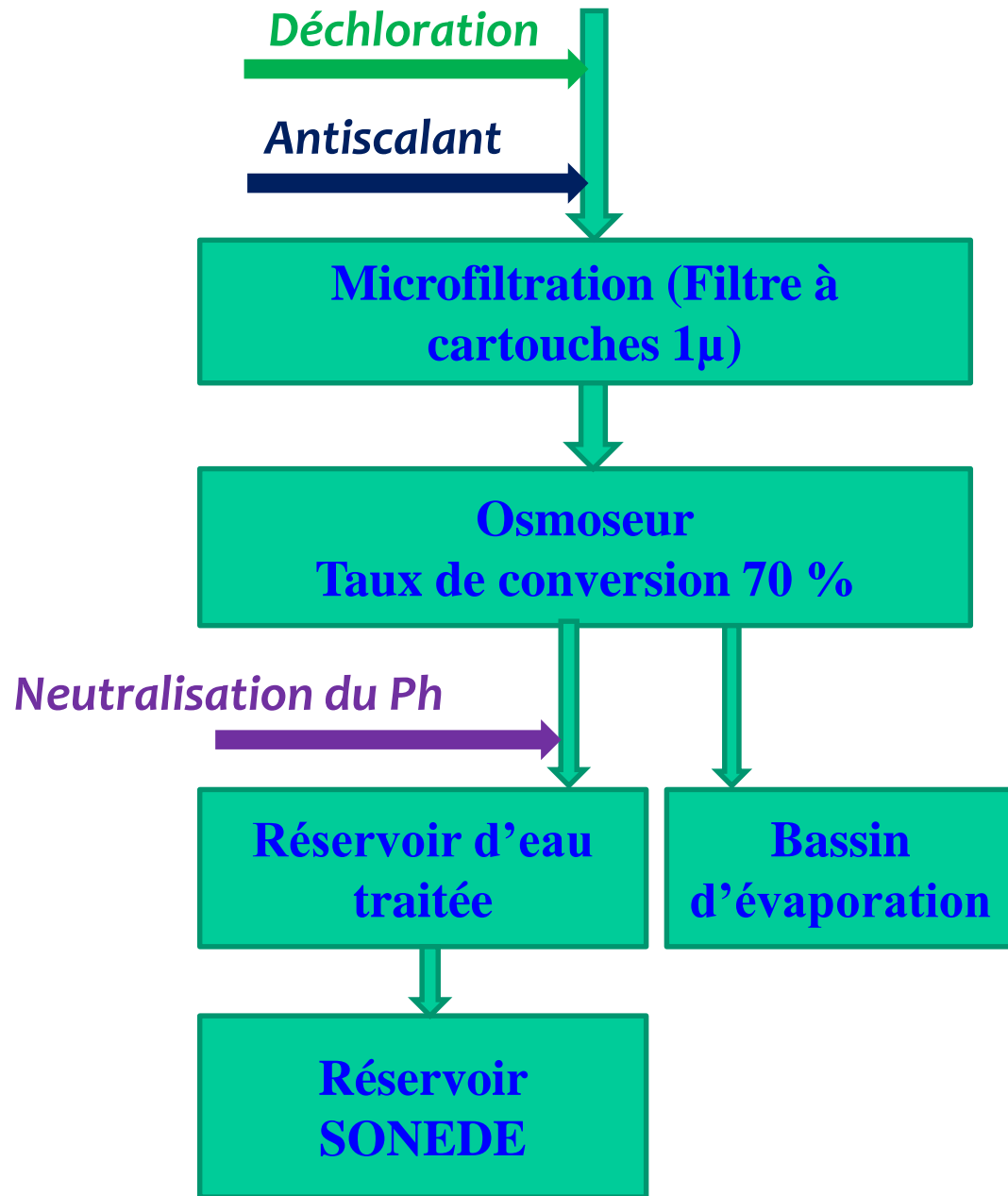


L'étang d'évaporation



Etapes de traitement





OSMOS
INVERS

POST-TRAITEMENT

Le système photovoltaïque

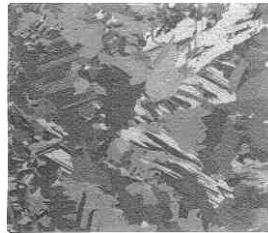
Le système photovoltaïque installé à la station de dessalement de Ben Guerdane est d'une puissance nominale cumulée de **210 kWc**. Ce système est composé de **14 lignes** dont chaque ligne contient **63 modules** de marque **conergy power plus 240 P**

En admettant la pleine production de la station, la consommation totale d'énergie serait proche de 12000 kwh

*-Si le système photovoltaïque fonctionne en pleine puissance qui est de 210 kw et avec 10 heures d'ensoleillement, l'énergie totale produite serait de l'ordre de 2100kwh/j ce qui correspond à environ **17,5 %** des besoins de la station.*

La pompe de Forage	92 kW
La pompe d'eau brute	18,5kw
La pompe d'eau filtrée	18,5 kW
La pompe HP	132kw
Pompe Booster	30 kW
La pompe de transfert	22kw

Energie photovoltaïque



Silicium purifié

Lingot

Wafer

Cellule

Module

Systemes

**Procédé chimique
de purification**

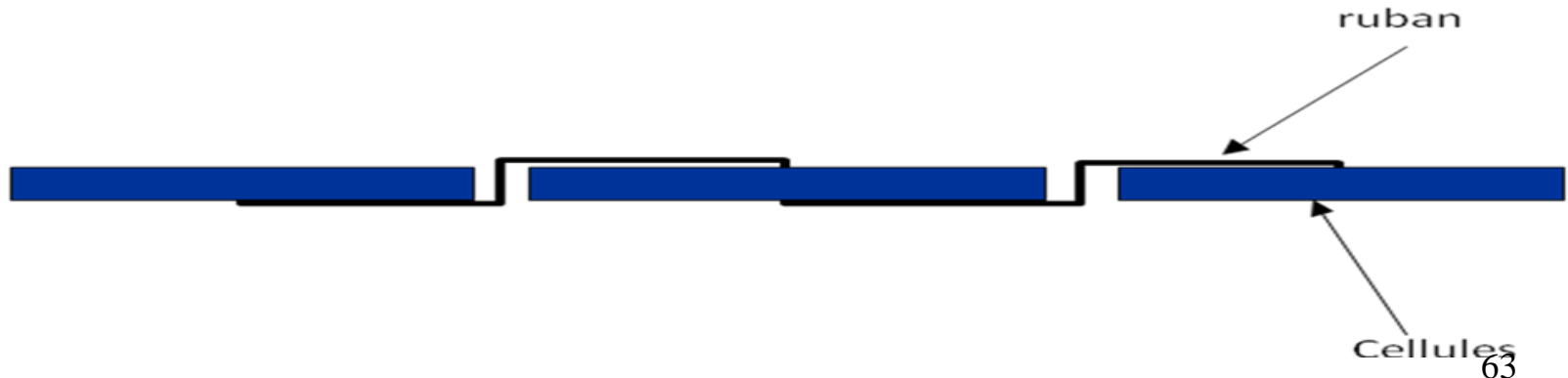
**Moulage
Sciage**

**Traitement
De surface**

Lamination

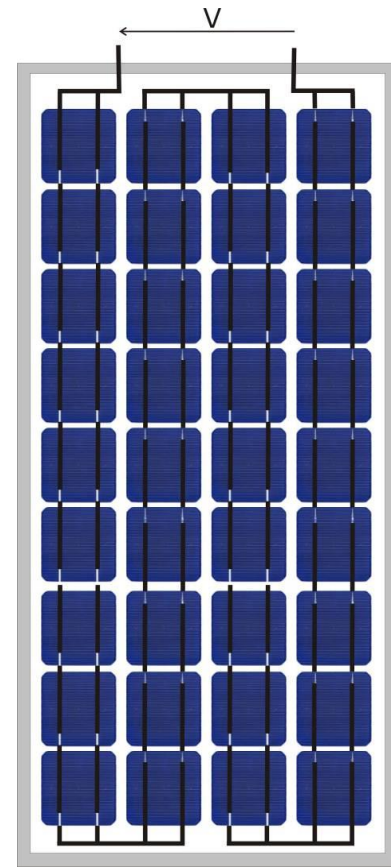
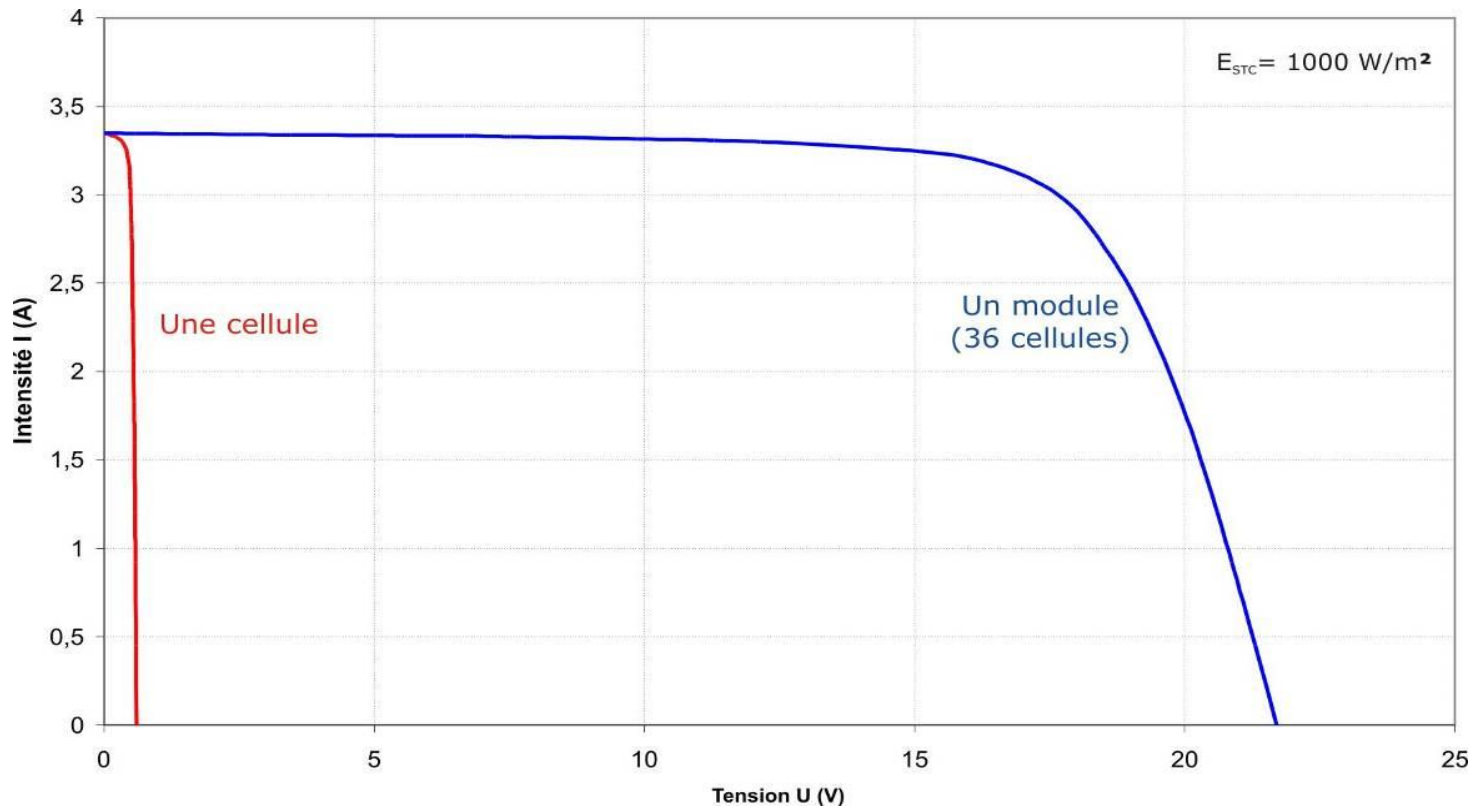
Spécifications du module

- Chaque module comporte 36 cellules de type polycristallines
- Les cellules sont connectées entre elles par de fins rubans métalliques (cuivre étamé), du contact en face avant (-) au contact en face arrière (+)



Montage en série

- La mise en série des cellules permet d'augmenter la tension tout en conservant le courant d'une cellule
- Montage en série des cellules photovoltaïques



Boitier de jonction



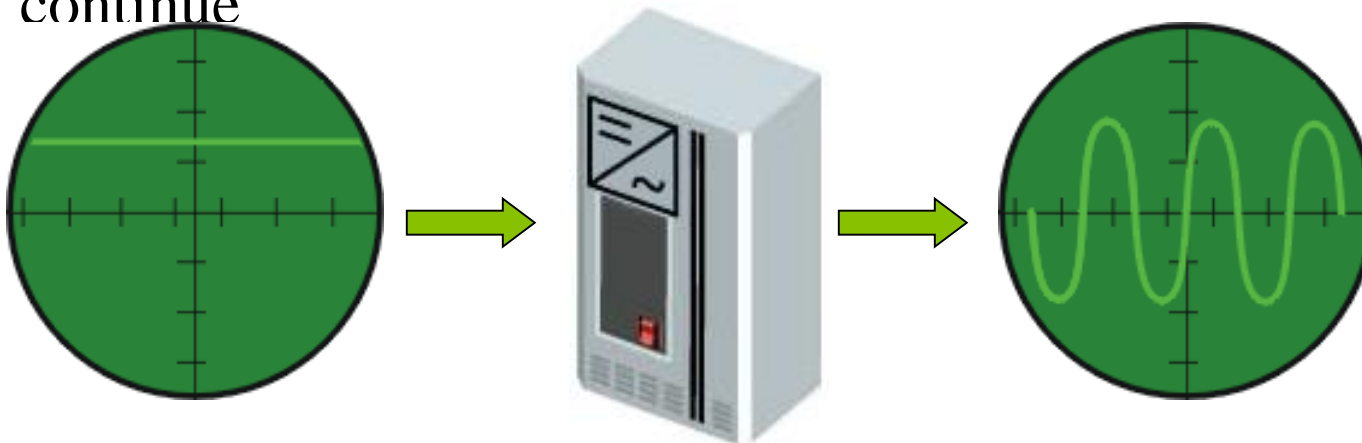
Ces boites sont Situées dans la partie courant continue du circuit électrique, entre les panneaux solaires et l'onduleur, les boites de jonction de chaînes servent à protéger et à mettre en parallèle les différentes chaînes du champ photovoltaïque.

- **La conversion du courant DC en courant AC se produit dans l'armoire de l'onduleur,**

Onduleurs

- **Fonctions:**

- Convertit le courant continu en courant alternatif usuel en phase avec le réseau
- Fait fonctionner les capteurs PV au maximum de leur puissance (MPPT) quelque soient l'ensoleillement et la température
- Se déconnecte en cas d'absence de tension du réseau
- Protection des personnes par contrôle d'isolement du circuit continue



Onduleurs

- Le système utilise en total 14 onduleurs (1 onduleur pour chaque ligne).
- Les onduleurs sont de marque **Conergy IPG 15T**.
- C'est un récepteur d'énergie produite par le générateur photovoltaïque



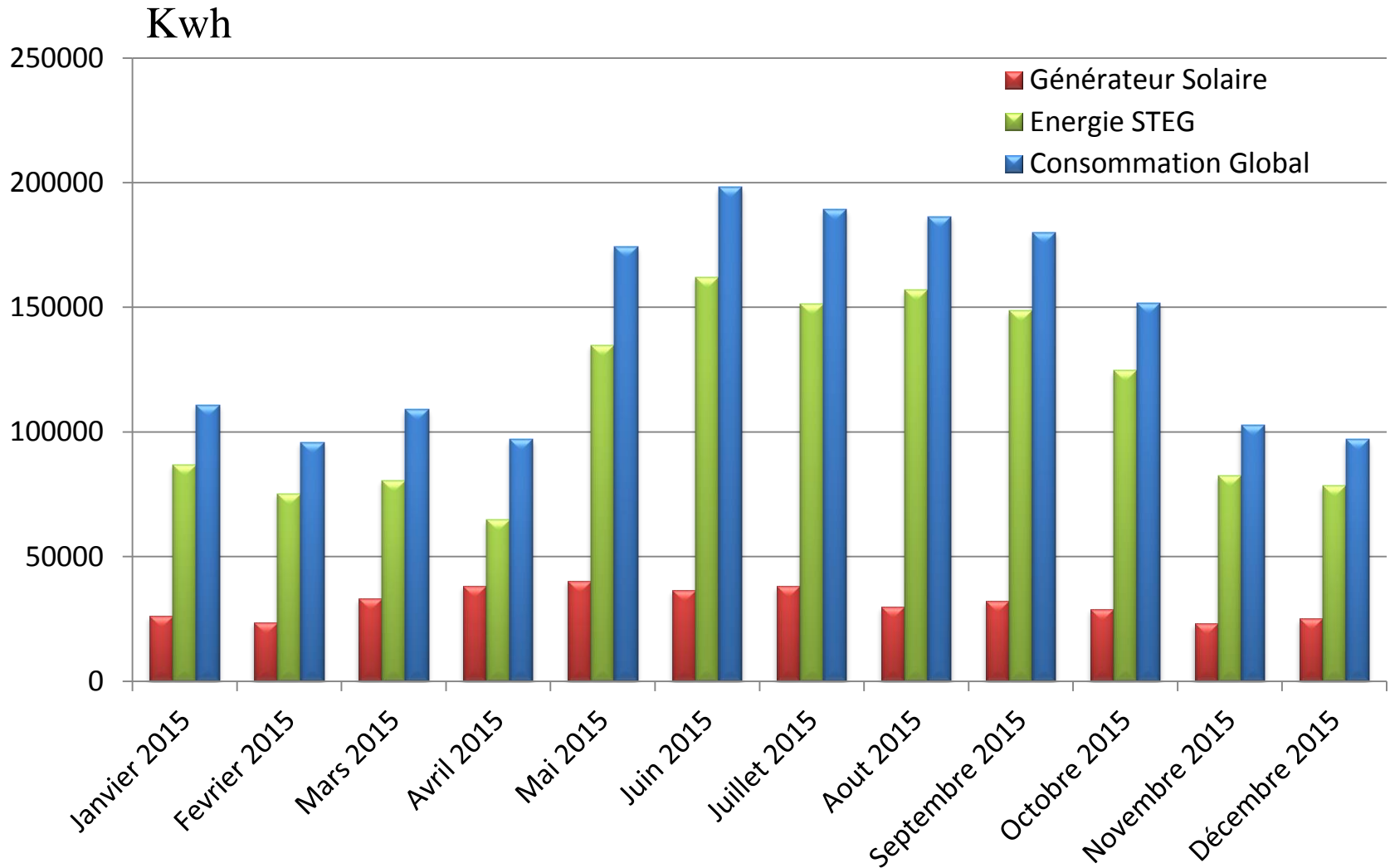
Onduleurs

- **Rendement de l'onduleur**
Le rendement correspond au rapport entre la puissance de sortie et la puissance d'entrée, il est exprimé en pourcentage. La puissance d'entrée délivrée par le champ photovoltaïque dépend du nombre de modules, de la puissance individuelle de chacun d'eux, de l'ensoleillement instantané
- **Rendement = $P_{\text{alternatif}}/P_{\text{continu}}$**

Dossier d'approbation STEG

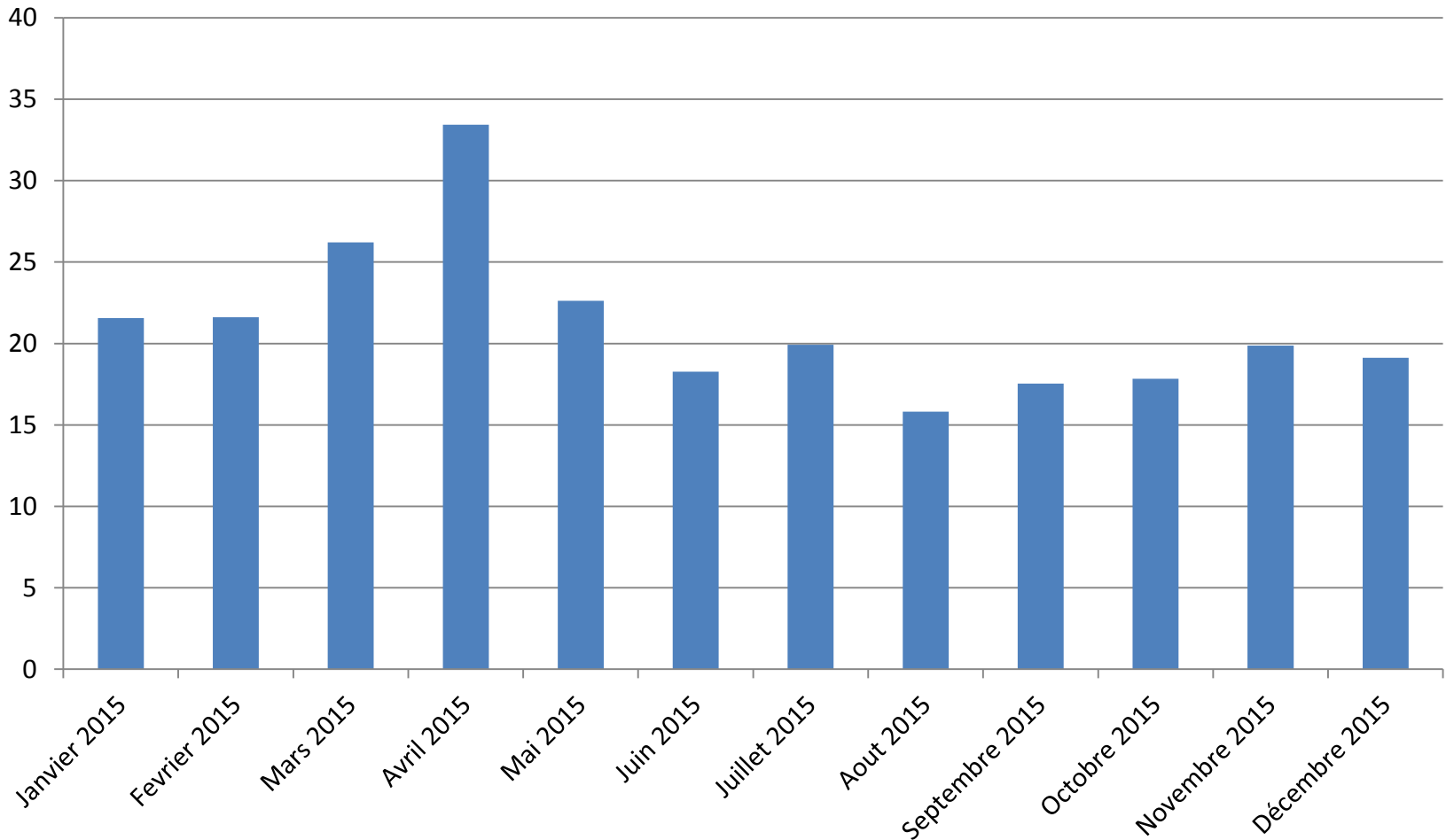
- **Pour bénéficier du raccordement de l'installation au réseau électrique de la STEG, il faut obtenir préalablement l'approbation de la STEG. Cette demande doit contenir un dossier technique à la charge du producteur à transmettre à la STEG qui contient les éléments suivant :**
 - **■ Un schéma électrique de l'installation de production ;**
 - **■ Un descriptif technique d'éventuelles sources autonomes d'électricité**
 - **■ Le schéma de commande et de protection des équipements de l'Installation de Production**
 - **■ Un plan de situation de l'Installation de Production indiquant la limite de propriété et le point de livraison ;**
 - **■ Une demande de réception et de mise en service ;**
 - **■ Un certificat de conformité de l'onduleur**

Bilan énergétique 2015



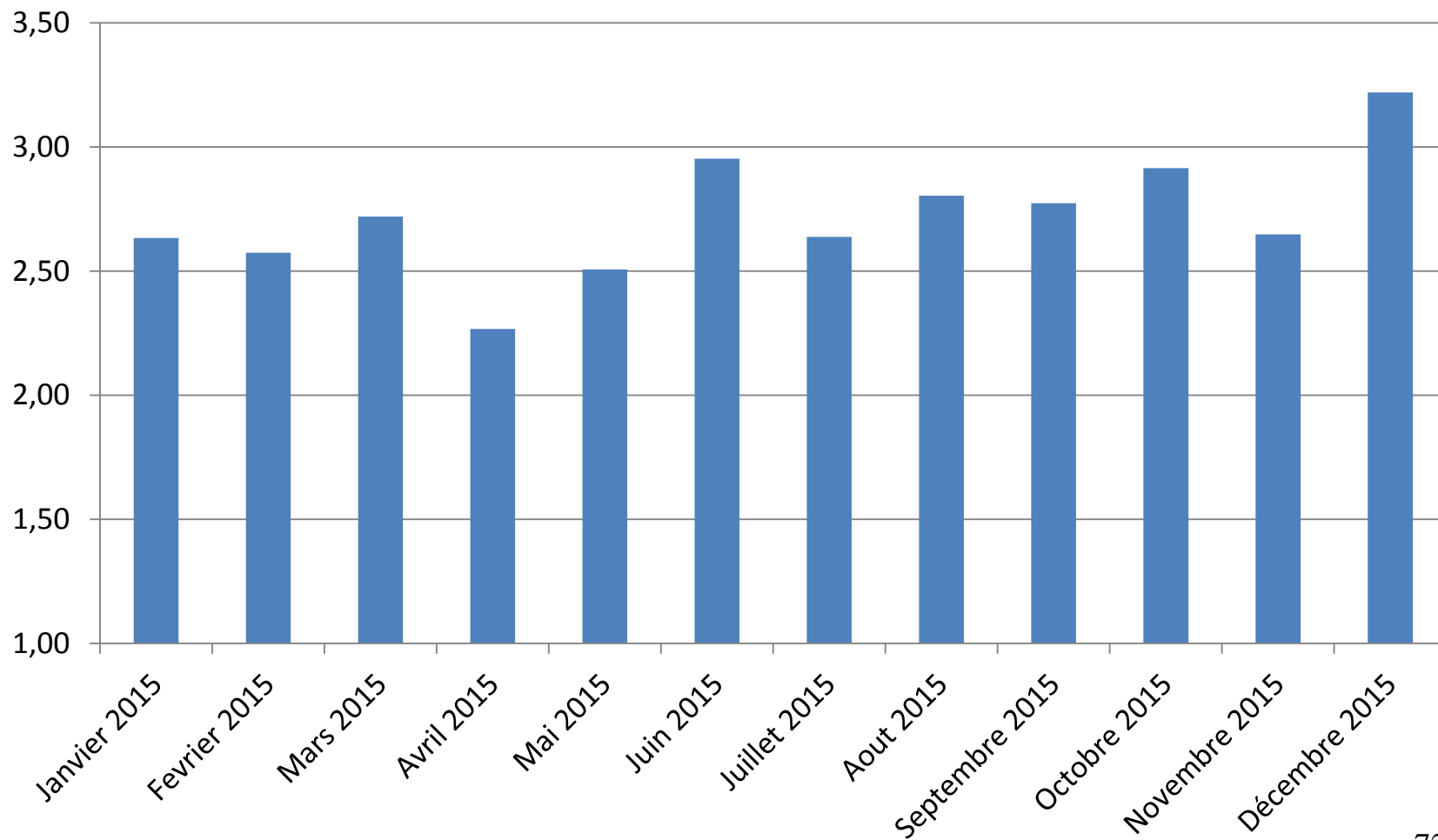
Bilan énergétique 2015

Participation en % de la production photovoltaïque dans la consommation globale de l'installation



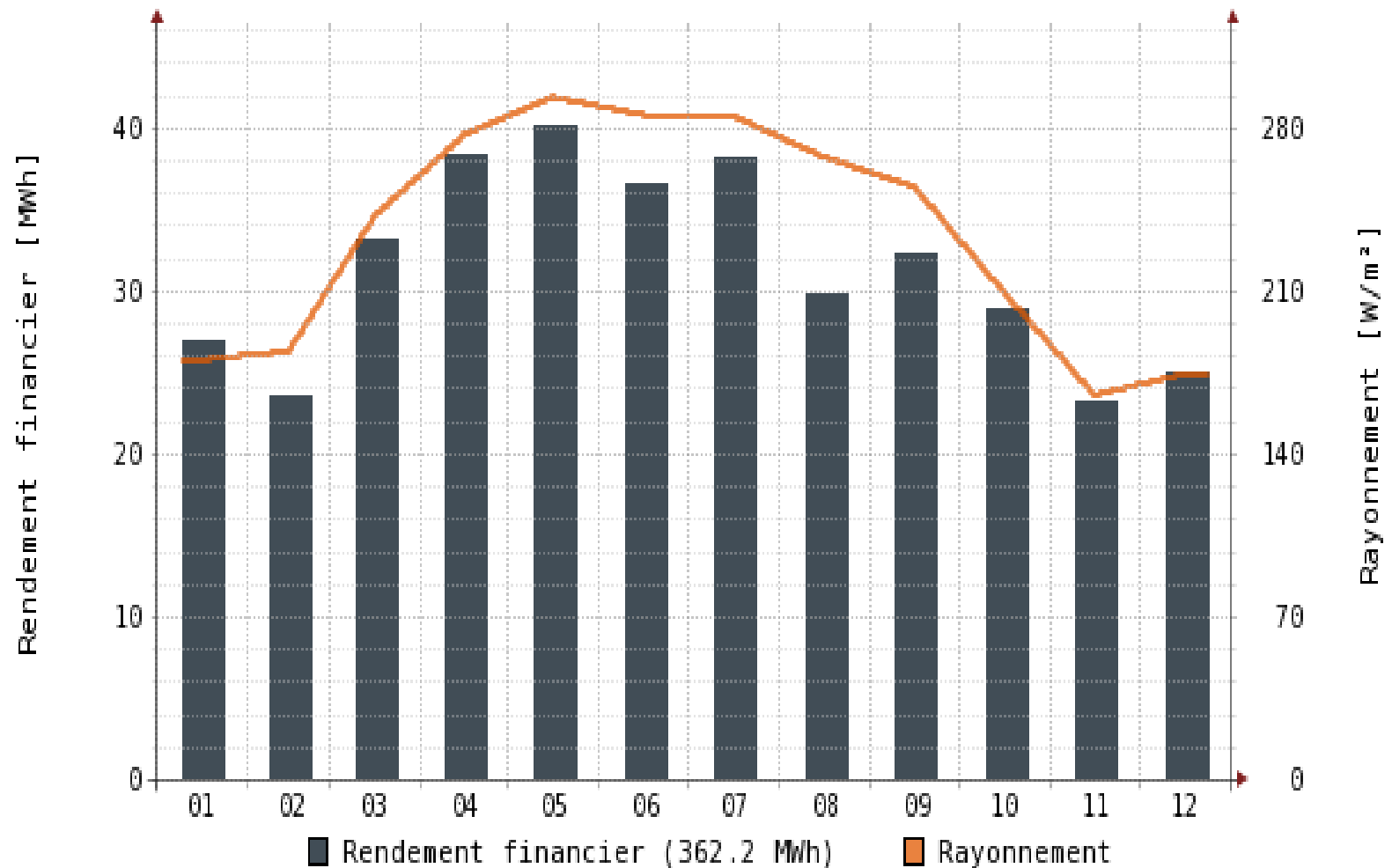
Bilan énergétique 2015

Consommation spécifique de la station de dessalement en
kwh/m³



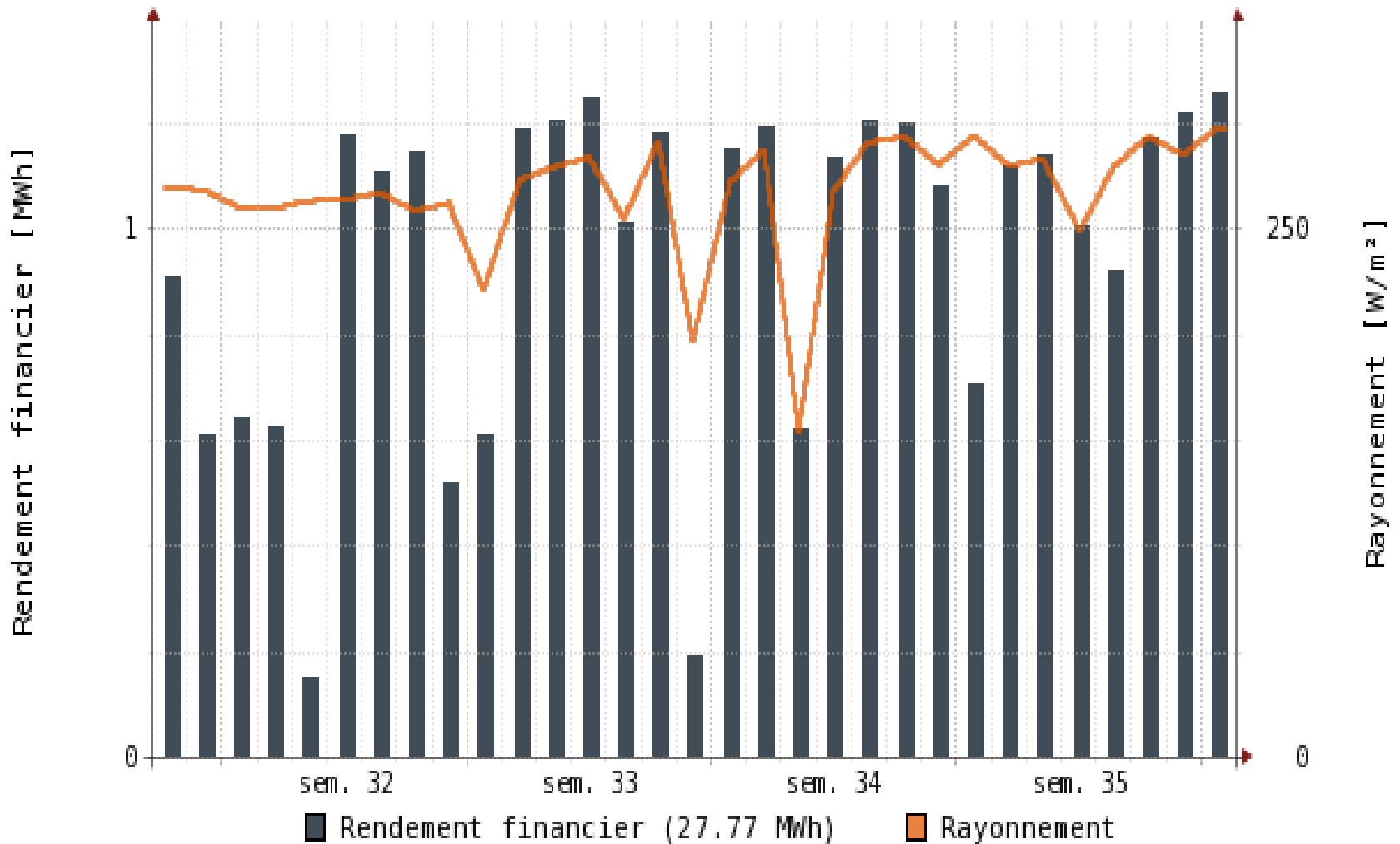
Courbe rendement-rayonnement année 2015

Je, 2015-01-01 - Je, 2015-12-31



Courbe rendement-rayonnement Août 2015

Sa, 2015-08-01 - Lu, 2015-08-31



Le coût de l'énergie et le coût de l'eau produite en dessalement

Le coût de dessalement

- ✓ Le coût de dessalement est un critère important dans le choix de la technologie à choisir et son impact sur l'environnement.
- ✓ Il dépend étroitement des conditions locales techniques et économiques.
- ✓ Le coût de **l'investissement** comporte le coût de l'usine proprement dite et les frais annexes (les études préliminaires, la prise d'eau de mer, les rejets des saumures, le réservoir de stockage d'eau douce et conduites, pièces de rechange, ...)

Le coût de dessalement: partie énergie

- ✓ La salinité de l'eau à traiter: eau saumâtre ou eau de mer (pression osmotique).
- ✓ La salinité désirée de l'eau: industrielle ou domestique (différence de pression osmotique).
- ✓ Facteur de charge: temps de fonctionnement.
- ✓ Degré d'automatisme et de contrôle
- ✓ Sources d'énergie disponible: fuel, gaz, énergie fatale,
- ✓ Taille de l'installation: quantité d'eau produite
- ✓ Conformité aux règles en vigueur (environnement).

Le coût de dessalement: effet de taille pour RO

coût d'investissement en \$/m³/j

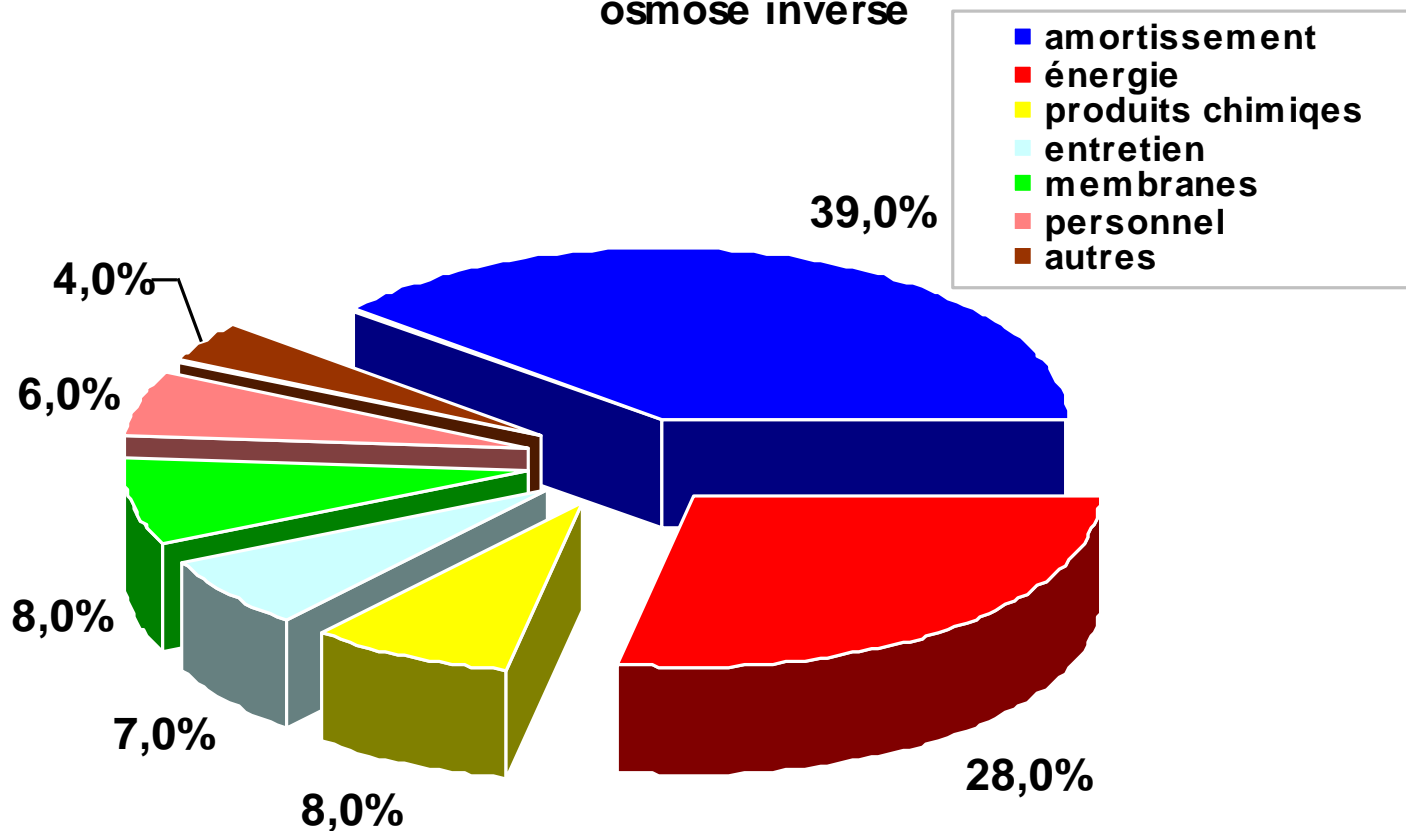
Capacité m ³ /j	Eau de mer	Eau saumâtre
4000	2300	1000
8000	1600	800
15000 (Zarzis)	-	691
20000	1100	600
30000 (Gabès)	-	580
40000	1050	500
60000	1000	450

Le coût de dessalement: coût en \$/m³

Capacité m ³ /j	Eau de mer	Eau saumâtre
4000	1.300	0.700
8000	0.900	0.400
15000 (Zarzis)	-	554
20000	0.700	0.250
30000 (Gabès)	-	246
40000	0.650	0.220
60000	0.600	0.200

Coût d'énergie et le dessalement RO

Prix de revient typique du m3 dessalé d'eau de mer par osmose inverse



Conclusions

- ✓ Le dessalement d'eau de mer et eau saumâtre constitue un **choix important** dans la mobilisation des ressources en eau en Tunisie en particulier dans le Centre et le Sud Tunisien.
- ✓ L'utilisation des eaux dessalées dans le développement **des cultures à haute valeur ajoutée** peut être rentable.
- ✓ La réussite de l'exploitation des stations de dessalement dépend aussi de la formation et de l'encouragement de la recherche et la collaboration avec les universités.



**MERCI POUR VOTRE
ATTENTION**

DES QUESTIONS ?