

III.1. Azote

Dans les eaux, l'azote peut se trouver sous forme minérale (ammoniacal, nitrate) ou organique. Sa présence organique ou ammoniacal se traduit par une consommation d'oxygène dans le milieu naturel et altère les conditions de vie.

L'élimination de l'azote fait partie des étapes essentielles du traitement des eaux usées. Il existe d'ailleurs des normes réglementaires liées aux concentrations de l'azote en sortie de station dans de nombreux pays. De ce fait, pour respecter ces concentrations, il faut contrôler la nitrification et la dénitrification de manière optimale.

En assainissement, le cycle de l'azote passe par les différents stades d'évolution biogéochimique du composé. Il aboutit à la formation d'azote gazeux (diazote N_2) en commençant par l'azote organique, et en passant par : l'ammoniac, le nitrite, le nitrate.

Dans les stations d'épuration, plusieurs formes d'azote sont présentes :

- Nitrites et nitrates: l'azote oxydé
- les formes non oxydées: l'azote Kjeldhal comprenant l'azote organique et l'azote ammoniacal (NH_4^+)
- L'azote organique ammonifiable
- L'azote organique réfractaire

a)- l'azote total Kjeldahl (TKN)

L'azote total Kjeldahl (TKN) est la somme de l'azote organique, de l'ammoniac (NH_3) et de l'ammonium (NH_4^+) dans l'analyse chimique du sol, de l'eau et des eaux usées. Pour calculer l'azote total (TN), les concentrations de nitrate-N et de nitrite-N sont déterminées et ajoutées à l'azote total Kjeldahl.

b)- Azote ammoniacal

La présence d'azote ammoniacal (NH_4) dans une eau traduit un processus de dégradation incomplète de la matière organique.

c)- L'azote organique ammonifiable

C'est la forme la plus répandue et de l'azote ammoniacal ($\text{NH}_4\text{-H}$). Effectivement, c'est celle présente dans les urines.

L'azote organique est dit ammonifiable lorsqu'il peut être transformé par hydrolyse enzymatique en azote ammoniacal.

d)- L'azote organique réfractaire

L'azote réfractaire soluble est l'élément non biodégradable dans l'azote.

Par ailleurs, les ordres de grandeur de cet azote pour une eau urbaine standard sont compris entre 1,5 à 2,5 mg/litre. L'azote dur ou réfractaire particulaire affiche les mêmes concentrations mais celui-ci sera piégé dans les boues.

II.1.1. Nitrates et nitrites

Les nitrates (NO_3^-) et les nitrites (NO_2^-) sont des ions présents de façon naturelle dans l'environnement. Ils sont le résultat d'une nitrification de l'ion ammonium (NH_4^+), présent dans l'eau et le sol, qui est oxydé en nitrites par les bactéries du genre *Nitrosomonas*, puis en nitrates par les bactéries du genre *Nitrobacter*. Les nitrates sont très solubles dans l'eau; ils migrent donc aisément dans la nappe phréatique lorsque les niveaux excèdent les besoins de la végétation. La toxicité des nitrates résulte de leur réduction en nitrites et de la formation de méthémoglobine d'une part et de leur contribution possible à la synthèse endogène de composés N-nitrosés d'autre part.

Les concentrations de nitrates et de nitrites dans l'eau peuvent être exprimées sous forme de nitrates (ou nitrites) ou sous forme d'azote. Un milligramme de nitrates par litre (mg/l de NO_3) équivaut à 0,226 mg de nitrates, sous forme d'azote, par litre (mg-N/l). Dans le cas des nitrites, un mg/l équivaut à 0,304 mg-N/l

a)- Sources

La présence de nitrates dans l'eau de consommation est principalement attribuable aux activités humaines. L'utilisation de fertilisants synthétiques et de fumiers, associée aux cultures et à l'élevage intensifs, favorise l'apparition de nitrates dans l'eau. Les installations septiques déficientes, de même que la décomposition de la matière végétale et animale, peuvent aussi être une source de nitrates dans l'eau. Le risque de contamination est plus important si le sol recouvrant la nappe d'eau est vulnérable (ex : sablonneux) et si la nappe est peu profonde (puits de surface).

b)- Concentrations dans l'eau potable

La concentration de nitrates dans l'eau potable peut être classée selon quatre catégories : inférieure à 0,2 mg-N/l (aucune influence humaine), entre 0,21 et 3,0 mg-N/l, (influence possible des activités humaines), entre 3,1 et 10 mg-N/l, (influence très nette des activités humaines mais sans impact apparent sur la santé), supérieure à 10 mg-N/l (impact majeur des activités humaines et effets possibles sur la santé).

Tableau III. 1 : Influence des activités humaines et impact sur la santé de différents niveaux de nitrates dans l'eau

Concentration de nitrates dans l'eau potable (mg-N/l)	< 0,2	0,21 – 3,0	3,1 – 10	> 10
Influence des activités humaines	Non	Possible mais impact mineur	Certaine mais avec impact modéré	Certaine avec impact majeur
Impact sur la santé	Non	Non	Non démontré	Possible

II.2. Phosphore

Les roches contenant du phosphore peuvent être altérées par les conditions géologiques et atmosphériques sur de longues périodes de temps. Elles s'érodent lentement et libèrent ainsi le phosphore qu'elles contiennent dans l'environnement.

Ce phosphore est ensuite absorbé par les animaux et les plantes, qui s'en libèreront soit par déjections, ou, décomposition à leur mort. Le phosphore pénètre directement dans l'eau; les eaux de ruissellement vont contribuer à l'accumulation du phosphore dans les lacs et rivières. Dans les lacs, le phosphore pourra se lier aux sédiments et être libéré dans certains cas, notamment lors de grands vent ou lorsqu'il y a un manque d'oxygène dans les lacs.

Les activités domestiques cumulées de plusieurs résidences ont un impact important sur les plans d'eau. De même, certaines grandes activités anthropiques, telles les exploitations minières et l'agriculture, ajoutent beaucoup de phosphore dans les cours d'eaux. Ce phosphore devient donc disponible pour divers organismes et cause un déséquilibre de l'écosystème, entre autre en causant une eutrophisation accélérée des lacs et une prolifération d'algues bleu-vert (cyanobactéries).

a)- Sources

Il y a plusieurs sources de phosphore d'origine humaine en circulation dans l'eau. Il y a notamment:

- l'engrais, qu'il soit naturel (fumier, compost) ou artificiel;
- les produits nettoyants et;
- les eaux usées provenant d'installations septiques désuètes, non-conformes ou mal entretenues.

III.3. Traitement tertiaire (Élimination de l'azote)

Appelés aussi les traitements complémentaires qui visent à l'élimination de la pollution azotée et phosphatée ainsi que la pollution biologique des eaux usées domestiques.

Les traitements tertiaires permettent d'affiner ou d'améliorer le traitement secondaire, ces derniers visent à améliorer la qualité générale de l'eau afin d'une réutilisation ultérieure dans l'industrie ou l'irrigation.

Ces traitements sont réalisés lorsque le milieu récepteur l'exige.

On y distingue généralement les opérations suivantes:

- la nitrification-dénitrification et déphosphatation biologique ou mixte (biologique et physico-chimique);
- la désinfection bactériologique et virologique.

III.3. 1. L'élimination de l'ammoniaque : la nitrification

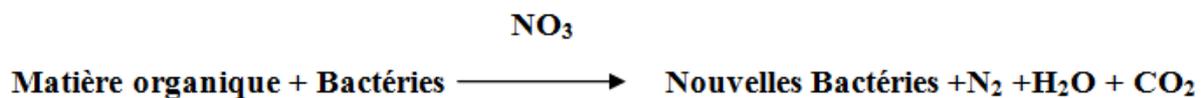
La nitrification est un processus contrôlé par l'action de certains micro-organismes spécifiques, qui conduit à la transformation de l'ammoniaque ou de l'ammonium en nitrate, c'est à dire la conversion biologique de la forme réduite, NH_4^+ , NH_3 en la forme oxydée NO_3^- .

L'élimination de l'ammoniaque n'est possible qu'en présence d'oxygène. La réaction d'oxydation n'est réalisée que par un nombre très limité d'espèces bactériennes strictement aérobies, les bactéries nitrifiantes. L'oxydation de l'ammoniac en nitrates s'effectue en deux étapes :

- NH_3 est d'abord converti en nitrite (NO_2^-) par des bactéries du genre *Nitrosomonas*.
- Les nitrites sont ensuite oxydées en nitrates (NO_3^-) par des bactéries du genre *Nitrobacter*.

III.3. 2. L'élimination des nitrates : la dénitrification

Dans le cas de l'élimination biologique des nitrates, la dénitrification, la réaction nécessite l'oxydation concomitante d'une molécule organique ou minérale qui fournira l'énergie nécessaire à la réduction des nitrates en azote N_2 .



III.3.3. Elimination du phosphore : La déphosphatation

L'élimination du phosphore, ou "déphosphatation", peut être réalisée par deux voies:

Voie chimique: (pour les petites installations) Il s'agit d'une précipitation des phosphates par des sels de fer ou d'aluminium (le sulfate d'aluminium ou le chlorure ferrique) , ou encore par de la chaux; on obtient alors des précipités insolubles de phosphates métalliques.

Voie biologique: La déphosphatation biologique consiste à provoquer l'accumulation du phosphore dans les cultures bactériennes des boues. Les mécanismes de la déphosphatation biologique sont relativement complexes et leur rendement variable. Dans les grosses installations d'épuration, ce procédé est souvent couplé à une déphosphatation physicochimique, pour atteindre les niveaux de rejets requis.

III.3.4. La désinfection

La désinfection vise à réduire la concentration des germes pathogènes dans les effluents avant rejet dans l'environnement. Contrairement aux normes de désinfection pour la production d'eau potable qui spécifie l'absence totale de coliformes, les normes de rejets pour les eaux résiduaires urbaines varient suivant la nature du milieu récepteur.

III.3.4. 1. La chloration

Le chlore est un agent oxydant fort qui réagit facilement avec plusieurs substances organiques et inorganiques trouvées dans les eaux usées. Il est particulièrement efficace pour détruire les bactéries, mais moins efficace contre les virus.

Le chlore est utilisé sous les formes suivantes: chlore gazeux, hypochlorite de sodium (eau de javel NaClO) et bioxyde de chlore (ClO_2).

III.3.4. 2. L'ozonation

C'est le seul procédé vraiment efficace contre les virus, l'ozone est un gaz instable que l'on doit générer sur place, dans les stations d'épuration, au moyen d'une décharge électrique produite dans de l'air ou de l'oxygène. L'opération consiste à transformer l'oxygène sous forme « O_2 » en oxygène sous forme « O_3 ».

L'ozonation ne nécessite aucun transport de produits chimiques et est plus sécuritaire pour le personnel de la station d'épuration que la chloration

III.3.4. 2. Le rayonnement ultraviolet

Il consiste à faire passer les eaux dans un canal ouvert muni de lampes à rayons ultraviolets.

Les principaux avantages de cette technologie sont l'absence de formation de produits secondaires indésirables, de même que la simplicité et la sécurité d'exploitation comparativement aux méthodes chimiques.



Figure III.1 : rayonnement ultraviolet

Problèmes du fluor

II.4. Fluoruration et défluoruration

La **fluoruration** de l'eau est l'ajustement contrôlé de fluor sous forme d'ions fluorure (F^-) dans le système de distribution d'eau potable afin de réduire les cas de carie dentaire. L'eau fluorée contient du fluorure à un niveau qui est efficace pour prévenir les caries ; cela peut se produire naturellement ou en ajoutant du fluorure. Par analogie, on parle également de "**défluoruration**".

On considère généralement qu'une faible teneur en fluor de l'eau d'alimentation (**0,4 à 1 mg·L⁻¹** suivant le climat du pays considéré) est favorable à la formation de l'émail dentaire et protège les dents contre la carie. En revanche, un excès de fluor entraîne la destruction de cet émail et provoque un ensemble de troubles à caractère endémique que l'on groupe sous le nom de « fluoroses ». Ceci apparaît suivant les individus pour des teneurs très variables. Il faut rejeter ou **traiter les eaux** dès qu'elles contiennent **plus de 1 à 1,5 mg·L⁻¹ de F⁻**.

III.4.1. Fluoruration

Ce traitement ne tend pas encore à être généralisé, car il n'est pas sans risque et soulève par ailleurs des oppositions. On peut utiliser les produits suivants :

- Hexafluorosilicate de sodium : Na_2SiF_6 , le plus souvent ;
- Acide hexafluorosilicique (est l'additif le plus couramment utilisé): H_2SiF_6 ;
- Fluorure de sodium : NaF .

Un tel traitement doit être accompagné de toutes les précautions utiles concernant la protection du personnel de l'installation et l'éventualité d'un surdosage accidentel.

III.4.2. Élimination du fluor (Défluoruration)

Dans certaines eaux naturelles, on trouve plus de $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ de fluor. On cherche à ramener cette concentration aux environs de $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; **La norme algérienne a été fixée à $1,5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$** . Les procédés employés sont les suivants :

- **Filtration sur alumine activée**

C'est le procédé le plus utilisé. La capacité de rétention peut être très variable : suivant la teneur initiale en fluor, le pH et la salinité globale de l'eau, la granulométrie du matériau et les conditions opératoires, on peut fixer 0,3 à 4,5 g d'ion F^- par litre de produit.

- **Coagulation-floculation**

Le traitement au sulfate d'aluminium constitue un autre mode d'utilisation de l'affinité du fluor pour l'alumine, mais la demande en coagulant est très élevée (50 à 150 mg·L⁻¹ pour 1 mg·L⁻¹ de F⁻, à éliminer) ; il ne peut donc être appliqué qu'à des eaux brutes nécessitant une décantation et présentant une faible teneur en fluorures.

- **Adoucissement de l'eau à la chaux**

Cette méthode peut être employée, mais à pH > 10 et à condition que l'eau présente une teneur suffisante en magnésium, car c'est la magnésie qui adsorbe le fluor. On estime qu'il faut environ 50 mg·L⁻¹ de magnésium pour éliminer 1 mg·L⁻¹ de fluor.

- **Utilisation du phosphate tricalcique**

On a envisagé l'utilisation :

- Soit de produits naturels : cendre d'os (noir animal) ou poudre d'os ;
- Soit de l'apatite synthétique, que l'on peut fabriquer au sein de l'eau par un mélange soigneusement contrôlé de chaux et d'acide phosphorique.

III.5. Déminéralisation des eaux

Dans de nombreux cas, la présence excessive de sels dissous dans les eaux naturelles prohibe leur emploi :

- Comme eaux potables, pour des raisons de santé ;
- Comme eaux de fabrication, les sels présents induisant des nuisances graves telles que la corrosion et l'entartrage.

On doit donc les "dessaler" avant utilisation.

III.5.1. Classification des eaux

Les eaux saumâtres, qui proviennent habituellement des nappes d'eau souterraines, contiennent le plus souvent de 2000 à 10 000 mg/L de matières dissoutes.

La salinité totale d'une eau de mer varie, la proportion entre les éléments les plus abondants demeure pratiquement constante. Par contre, dans les eaux saumâtres, les proportions de sels de magnésium et de sulfates sont plus importantes.

Le classement eaux en fonction des quantités de matières dissoutes qu'elles contiennent est donné dans le tableau 7.1.

Rappelons que la salinité de diverses mers du globe a été déjà présentée au chapitre 1 (tableau 1.3), ainsi que des concentrations des principaux ions présents dans une eau de mer d'une salinité totale de 36,4 g/L (Tableau 1.4).

Tableau III.2 : Classification des eaux selon la salinité

Type d'eau	Salinité (mg/l)
Eau douce	< 500
Eau légèrement saumâtre	1000 - 5000
Eau modérément saumâtre	5000 - 15000
Eau très saumâtre	15000 - 35000
Eau de mer	35000 - 42000

III.5.2. Méthodes de dessalement des eaux de mer

On peut classer les méthodes de dessalement des eaux de mer en fonction des procédés utilisés pour ce faire, soit:

- a) Les procédés qui utilisent des membranes (**osmose inverse** et **électrodialyse**);
- b) Les procédés qui font intervenir les changements de phase (**distillation** et **congélation**) ;
- c) Les procédés qui agissent sur les liaisons chimiques (**échanges d'ions** et **extraction par solvant sélectif**).

Les procédés **d'osmose**, et plus récemment de **nanofiltration**, sont venus concurrencer progressivement les procédés plus anciens tels que: distillation, électrodialyse, échange d'ions, pour des raisons essentiellement économiques et de facilité de mise en oeuvre (automatisme simple, dépense énergétique faible...).

III.5.2.1. Osmose inverse Membranes de dessalement

Pour ces membranes, l'eau est la phase transférée préférentiellement par filtration, sous l'effet d'un gradient de pression. Elles ont été souvent décrites comme membranes de filtration ou membrane permselective (à perméation sélective) et classées en fonction de leur taille de pores ou de celle des solutés et particules qu'elles arrêtent.

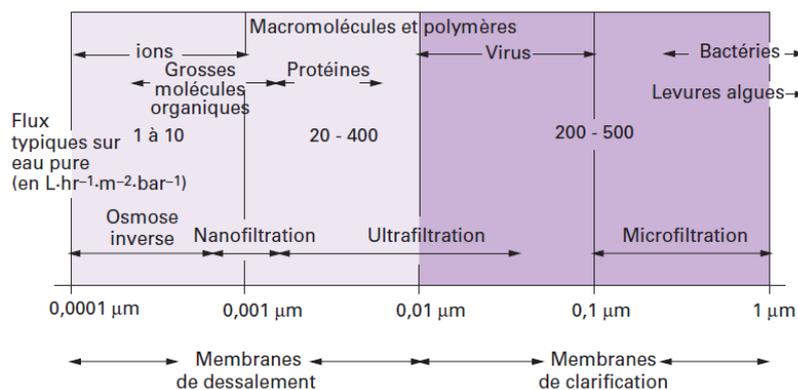


Figure.III.2: Types de filtration membranaire

Mécanisme

Si l'on sépare une **solution saline concentrée** (Compartiment A) d'une **solution plus diluée** (Compartiment B) par une telle **membrane** dite aussi **permsélective** (ou semi perméable) (figure 7.2.a), **la différence de potentiel chimique** tend à faire passer l'eau du compartiment à bas potentiel B, vers celui à potentiel plus élevé A, pour diluer celui-ci (osmose directe ou naturelle). À l'équilibre, la différence de pression ainsi créée est appelée **pression osmotique du système**

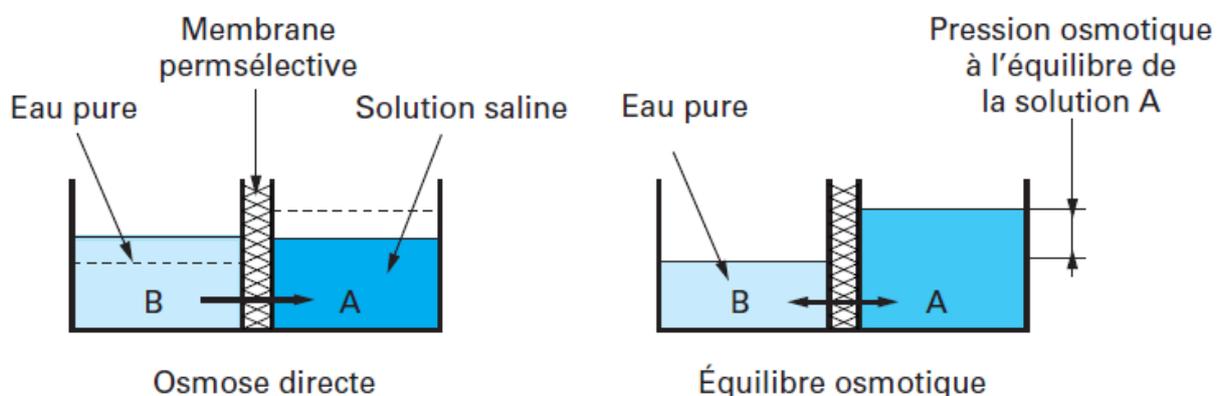


Figure .III.3: Phénomène osmotique

Si l'on veut empêcher cette diffusion, il faut exercer une pression sur le fluide « salé », égale à **la pression osmotique** et si l'on veut « **inverser** » le sens d'écoulement de l'eau, la pression doit être supérieure à pression osmotique.

Une **membrane** d'Osmose inverse (OI) idéale ne **permet** que **le passage de l'eau rejetant tous les solutés**, à l'exception de quelques molécules organiques très voisines de l'eau (faible masse molaire et polarité forte).

La pression osmotique d'une solution croît avec la concentration de celle-ci.

En effet, pour produire de l'eau "pure" à partir d'une solution saline, il faut donc dépasser la pression osmotique de la solution et l'on peut même dire que pour obtenir des débits économiquement intéressants, il faut travailler au moins à deux fois la pression osmotique,

soit pour une eau saumâtre contenant quelques grammes de sel par litre, des pressions allant de 5 à 30 bars et **pour l'eau de mer des pressions allant de 50 à 80 bars.**

Toutefois, on admet que, la filtration à travers une membrane d'osmose inverse, aura lieu lorsque, la pression transmembranaire est supérieure à la pression osmotique de la solution saline ($P_{TMB} > \Pi$)

La pression transmembranaire est donnée par, l'expression suivante :

$$P_{TMB} = \frac{P_{Alimentation} + P_{concentrat}}{2} - P_{Perm\acute{e}at}$$

π : Pression osmotique ;

P_{TMB} : la pression transmembranaire ;

$P_{Alimentation}$: la pression d'alimentation du module de filtration ;

$P_{Concentrat}$: la pression de l'eau de rejet (concentrat) ;

$P_{Permeat}$: la pression de l'eau filtrée (perméat) ;

III.5.2.2. Electrodialyse

L'électrodialyse ne s'applique qu'aux eaux faiblement saumâtres car la capacité de débit des membranes décroît quand la salinité de l'eau à traiter augmente. Elle n'est économique que pour les eaux ayant une salinité inférieure à 3 g.l⁻¹ qu'elle ramène à 0,5 g.l⁻¹. Moins l'eau est saline, plus la consommation de courant s'élève par suite de l'accroissement de résistivité de l'eau déminéralisée. De ce fait, ce procédé n'est guère utilisable pour traiter des eaux de minéralisation inférieure à 0,5 g.l⁻¹. Le procédé d'électrodialyse est adapté à des débits allant jusqu'à quelques milliers de m³.j⁻¹.

7.3.3. Distillation et Evaporation

La distillation qui reste en compétition avec l'osmose inverse d'eau de mer, sert dans de nombreux procédés industriels pour des concentrations diverses.

La distillation est un procédé qui comporte une vaporisation, une condensation et une récupération de la chaleur libérée par la condensation.

Dans les distillateurs modernes, la température de travail oscille entre 95 et 125°C. La salinité de l'eau douce obtenue par ce procédé est toujours nettement inférieure à 100 mg/L. On doit donc reminéraliser cette eau lorsqu'elle est destinée à la consommation

III.5.2.3. Procédés de distillation

Les techniques de dessalement par distillation de l'eau de mer les plus utilisées, est la distillation ou dessalement thermique. L'eau de mer est chauffée jusqu'à évaporation. Seules les molécules d'eau s'échappent, laissant en dépôt les sels et les autres substances. La vapeur d'eau est condensée pour obtenir de l'eau douce. Ce principe de dessalement très simple est utilisé depuis longtemps.

❖ Distillation à simple effet

Un faisceau tubulaire, alimenté par un fluide chauffant est plongé dans l'eau de mer à la partie basse d'une enceinte étanche et sous vide. Le fluide chauffant provoque alors une évaporation de l'eau de mer

La vapeur ainsi formée est condensée sur un faisceau tubulaire, placé dans la partie haute de l'enceinte et dans lequel circule l'eau de mer froide. L'eau distillée et condensée s'écoule du faisceau et est recueillie dans une goutte d'où elle est pompée pour des usages divers. La température d'ébullition de l'eau de mer varie avec la pression donnée, il est important de noter que, pour une pression donnée, il existe un écart entre la température d'ébullition de l'eau pure et celle d'une eau saline.

❖ Distillation à multiples effets

La recherche d'une récupération aussi complète que possible de la chaleur latente de vaporisation, et la distillation sous pression réduite, ont amélioré sensiblement la consommation spécifique dans les appareils à multiples effets.

On utilise la chaleur produite par la condensation de la vapeur dans un premier évaporateur pour alimenter le faisceau de chauffe d'un deuxième évaporateur, puis la chaleur de condensation du deuxième évaporateur pour alimenter un troisième et ainsi de suite.

La déperdition de température d'un effet à l'autre est de 7 à 10 °C. Le nombre d'effets est en général limité à une dizaine.

❖ Distillation solaire

On utilise surtout la distillation solaire pour obtenir de petites quantités d'eau douce. Cette méthode permet d'approvisionner des familles, Des villages et, exceptionnellement, de petites villes.

Chapitre N° 3

L'énergie solaire globale qui atteint le sol dans les régions tropicales et équatoriales est d'environ $58.6 \text{ kJ}/(\text{m}^2.\text{min})$ au cours des heures les plus chaudes de la journée.

Un évaporateur solaire est constitué: d'un bac conçu pour contenir l'eau salée à faire évaporer et pour absorber l'énergie solaire; d'une toiture de verre ou de matière plastique ; de rigoles destinées à recevoir l'eau douce produite