UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

FACULTE DES SCIENCES ET SCIENCES DE L'INGENIEUR

N° d'ordre :
N° de série :

DEPARTEMENT d'Hydraulique et de Génie civile

MEMOIRE

Présenté pour obtention du diplôme de

MAGISTER

Spécialité : Hydraulique
Option : Aménagement Hydraulique en Zones Arides

Par: SAGGAI Sofiane

THEME

Réduction de l'évaporation des plans d'eau par les films monomoléculaires en zones arides.

Soutenu publiquement le : 17 Décembre 2008

Devant le jury composé de

Président :	**Mr. MESSAITFA A.**	Professeur	(univ. Ouargla)
Examinateur :	**Mr. HAMDI AISSA B.**	Maître de conférences	(univ. Ouargla)
Examinateur :	**Mr. SEGNI L.**	Maître de conférences	(univ. Ouargla)
Encadreur :	**Mr. BOUTOUTAOU D.**	Maître de conférences	(univ. Ouargla)
Co-Encadreur:	**Mr. SAKER M L.**	Maître assistant chargé de cours	(univ. Ouargla)
Invité	**: Mr. AMMARI A.**	Maître assistant chargé de cours	(ENSH Blida)

Année universitaire 2007/2008

Remerciements

Je remercie tout d'abord le bon ***DIEU*** qui m'a donné le courage et la patience pour terminer ce modeste travail, je remercie ma famille et mon épouse.

Ce travail ne serait jamais vu la lumière sans la contribution efficace de tous ceux qui m'ont aidé de prés ou de loin, par leur appui en acquisition de documents et de matériels nécessaires, en accès à l'information ou par leur soutien moral et encouragements. A tous, je suis redevable et reconnaissant.

Néanmoins, dans ce chemin de reconnaissance, il y a des personnes qu'il faut citer.

Tout d'abord mon encadreur Mr BOUTOUTAOU Djamel et mon co-encadreur Mr SAKER Med Lakhder pour avoir consacré une partie de leur temps pour m'encadrer et pour leur patience.

Ma vive gratitude pour Mr MESITFA Amor pour m'avoir honoré en présidant ce membre de jury.

Mes remerciements également à Mr HAMDI AISSA et Mr SEGNI, maîtres de conférences à l'université de Ouargla qui ont accepté d'examiner ce modeste travail

C'est un honneur pour moi d'avoir Mr AMMARI Abdelhadi maître assistant chargé de cours à l'ENSH et ancien collègue de classe à l'université de Ouargla comme invité.

J'adresse mes remerciements à un homme, malgré son absence a marqué une présence permanente dans ce chemin de connaissance, un homme qui m'a toujours soutenu et encouragé, un grand merci à Mr MEZZA Nouredine.

Il serait ingrat de ma part de ne peut remercier le personnel de l'ITEDAS de Hassi Benabdella et à leur tête le premier responsable Mr GOUSMI.

Je suis également reconnaissant envers le personnel de la station météorologique de l'aéroport de Ouargla et à leur tête Mr NASRELLAH

Mes remerciements vont aussi à Mr KRIKEUR Abdelwahed maître de conférences à l'université d'Ouargla, et Melle BENSALEM Naima ancienne laborantine à SAIDAL Alger qui m'ont aidé à avoir le matériel nécessaire pour l'expérimentation.

Je n'oublierai pas d'adresser mes plus profonds et chaleureux remerciements à mes enseignants à l'université de Ouargla, à mes collègues d'Air Algérie, et à tous mes amis.

TABLE DES FIGURES

Figure	Titre	Page
Figure II.1	Evaporomètre Piche	31
Figure II.2	Evaporomètre Wild	32
Figure II.3	Evaporomètre à surface poreuse	33
Figure II.4	Cartes des époques des maxima et des minima mensuels de l'évaporation en Algérie	34
Figure II.5	Cartes de l'évapotranspiration annuelle (mm) en Algérie	35
Figure II.6	Carte de distribution de l'évaporation mensuelle en pourcentage selon régions géographiques	36
Figure II.7	Carte de l'évaporation moyenne annuelle (mm) des plans d'eau en Algérie	37
Figure III.1	La résistance à l'évaporation en fonction de la pression de surface	45
Figure III.2	La réduction à l'évaporation en fonction de la température	46
Figure IV.1	Crochet de mesure	53
Figure IV.2	Héliographe	54

TABLE DES GRAPHES

Graphe	Titre	Page
Graphe II.1	Comparaison des évaporations calculée et mesurée au barrage Foum El Gherza	29
Graphe IV.1	Corrélation Bac1/Bac4	56
Graphe IV.2	Corrélation Bac2/Bac4	57
Graphe IV.3	Corrélation Bac3/Bac4	57
Graphe IV.4	Résistance spécifique à l'évaporation (sec/cm) et Taux d'étalement initial en fonction du nombre des atomes de carbone	58
Graphe IV.5	Pertes par évaporation en fonction des décades	62
Graphe IV.6	Perte par évaporation/température moyenne en fonction des décades	63
Graphe IV.7	Perte par évaporation/humidité relative en fonction des décades	63
Graphe IV.8	Réduction de l'évaporation (Alimentation chaque 03 jours)	64
Graphe IV.9	Réduction de l'évaporation (cas 1)	65
Graphe IV.10	Réduction de l'évaporation (cas 2)	65
Graphe IV.11	Réduction de l'évaporation (cas 3)	66
Graphe IV.12	Réduction mensuelle de l'évaporation 'Bac1'	66
Graphe IV.13	Réduction mensuelle de l'évaporation 'Bac2'	67
Graphe IV.14	Réduction mensuelle de l'évaporation'Bac1'	67
Graphe IV.15	Comparaison mensuelle des taux de réduction	68
Graphe IV.16	Réduction décadaire de l'évaporation 'Bac1' (a)	69
Graphe IV.17	Taux de réduction de l'évaporation par décade 'Bac1' (b)	70
Graphe IV.18	Taux de réduction de l'évaporation par décade 'Bac2(a)	71
Graphe IV.19	Taux de réduction de l'évaporation par décade 'Bac2(b)	71

Graphe IV.20	**Taux de réduction de l'évaporation par décade 'Bac3'(a)**	**72**
Graphe IV.21	**Taux de réduction de l'évaporation par décade 'Bac3'(b)**	**73**
Graphe IV.22	**Comparaison des taux de la réduction par décade (a)**	**74**
Graphe IV.23	**Comparaison des taux de la réduction par décade (b)**	**75**

TABLE DES PHOTOS

Photo	Titre	Page
Photo IV.1	Composantes d'un abri météorologique	49
Photo IV.2	Les thermomètres sol	50
Photo IV.3	Pluviomètre	51
Photo IV.4	Anémomètre	51
Photo IV.5	Bac class A	52
Photo IV.6	Bacs enterré type Colorado	53
Photo IV.7	Bacs type Colorado	55

INTRODUCTION

De toutes les ressources renouvelables de la planète, l'eau douce est celle dont le manque est le plus implacable pour l'humanité.

Difficile à purifier, couteuse à transporter et impossible à remplacer, elle est essentielle à la production des aliments, au développement économique et à la vie elle-même. Cependant, sa disponibilité n'a pas toujours reçu l'attention qu'elle mérite dans les discussions globales sur l'utilisation durable des ressources naturelles, surtout dans un contexte de population mondiale croissante. Sur une planète dont plus des deux tiers sont recouverts d'eau, l'illusion de l'abondance a caché la réalité que douce et pure est, et surtout sera, un bien de plus en plus rare.

Dans les zones arides caractérisées par une température de l'air souvent élevée pendant les saisons sèches, une forte insolation presque continue durant toute l'année et une présence considérable de vents secs (grande vitesse) surtout durant l'automne et le printemps, l'eau est l'élément vital le plus rare et le peu qui existe est soumis à des fortes pertes par évaporation, des pertes qui sont de l'ordre de 2 à 3m/an et même 4m/an dans les zones hyper arides.

Au Maroc, par exemple, un milliard de m3 d'eau sur les 13 milliards de m3 stockés dans les 90 barrages s'évapore chaque année. Sur l'oued Ziz (Maroc), un barrage classique retient un grand volume d'eau dont une partie (20 à 25%) est perdue par évaporation. L'évaporation des eaux du barrage Monsour Eddahbi s'élève à 40 millions de m3/an (Lahlou A., 2000). Durant la période 1946-1950, l'évaporation moyenne annuelle dans la station de Gafsa (près de chott El Djerid) a été de 2858 mm (Mamou A., 1990). Rognon P. (2000) donne les valeurs 10% du débit du Nil se transforme en vapeur dans le lac Nasse. L'évaporation annuelle relevée près des chotts Melhrir et Merouane sur bac Colorado durant la période 1953- 1956 était entre 2250 mm (1953) et 4500 mm (1955) (Daix, 1956).

Une étude faite en Algérie entre 1992 et 2002 pour 39 grands barrages sur les 52 grands barrages que compte l'Algérie a montré que les volumes d'eau perdus par évaporation dans les lacs de barrages sont beaucoup plus supérieurs à ceux perdus par l'envasement et représente la moitie du volume consommé par l'irrigation, l'alimentation en eau potable et l'industrie, ce qui est considérable. En moyenne, le volume perdu s'élève à 250 millions de m3 pour une superficie de 350 km2 des 39 grands barrages étudiés, soit une

perte de 6,5% de leur capacité totale. Cependant, l'ampleur de ce phénomène est beaucoup plus visible dans le barrage de Djorf El Torbba (Bechar) où nous remarquons que les valeurs de l'évaporation du barrage sont les plus élevées de l'Algérie, compte tenu de la situation géographique de l'ouvrage (zone saharienne), et le volume évaporé dépasse même la quantité d'eau destinée à l'AEP et à l'irrigation (REMINI(b), 2005).

D'après les exemples cités ci-dessus, nous pouvons dire que l'eau dans les zones arides est, au même temps, rare et indispensable, d'où la nécessité de chercher un moyen pour préserver et conserver le peu qui existe dans les lacs (sebkhas et chotts) et les barrages. Parmi les méthodes utilisées, nous citons la réduction de l'évaporation qui est à l'origine des pertes d'eau de surface, dans cette méthode nous utilisons plusieurs techniques telles que la réduction de l'effet de l'énergie solaire disponible, le stockage des eaux dans le sable, les films monomoléculaires et autres.

La technique la plus utilisée un peu partout dans plusieurs pays du monde tels que l'Australie, les Etats-Unis, et une partie de l'ex l'U.R.S.S et qui a donné des résultats remarquables est la réduction de l'évaporation par les films monomoléculaires qui sont à base d'alcools ou d'huiles.

Pour connaitre l'efficacité et la rentabilité de ces films monomoléculaires à base d'alcools (Hexadecanol et Octadecanol) dans nos zones arides, nous avons fait cette étude qui est structurée dans sa partie théorique comme suit :

- Présentation des caractéristiques géographiques, hydrologiques et climat du Sahara,
- Citation de différentes méthodes de détermination de l'évaporation des plans d'eau et
- Un chapitre qui porte sur la réduction de l'évaporation des plans d'eau.

Dans sa partie pratique l'étude est partagée en trois volets : présentation du site, matériels et méthodes de travail et enfin la discussion des résultats obtenus.

Résumé

Dans cette étude, nous avons présenté une des techniques utilisée pour la conservation des eaux superficielles dans les zones arides caractérisées par des températures élevées (jusqu'à 50°C en été), humidité relative très faible et des fois nulle et des faibles précipitations (moins de 200 mm/an).

Cette technique est la réduction de l'évaporation en utilisant une substance chimique capable de former une couche mince sur le plan d'eau.

L'expérience que nous avons fait dans un milieu naturel et sous des conditions naturelles est basée sur l'utilisation des bacs d'évaporation de type Colorado, ces bacs de 50 cm de profondeur et 1m^2 de surface sont enterrées partiellement , 40 cm dans le sol et 10 cm au-dessus du niveau naturel du sol, prés d'une station météorologique typique, nous les avons remplis d'eau puis nous avons mis les substances chimiques qui sont deux alcools Hexadecanol ($C_{16}H_{34}O$) et Octadecanol ($C_{18}H_{38}O$) dans leur état solide comme mentionné ci-après :

- Le premier bac : l'Hexadecanol
- Le deuxième bac : mélange Hexadecanol/ Octadecanol
- Le troisième bac : Octadecanol
- Le quatrième bac : aucune substance chimique n'a été mise, et le bac est considéré comme bac témoin.

Nous avons relevé les pertes par évaporation dans les quatre bacs pendant presque quatre mois et les résultats obtenus sont :

1. Le taux de la réduction de l'évaporation, en utilisant les deux alcools choisis, est remarqué dans les trois bacs.
2. Le taux de la réduction de l'évaporation, pour des périodes différentes de l'alimentation en alcool, est le meilleur dans le premier bac alimenté par l'Hexadecanol.
3. La couche mince ou bien le film à base d'Octadecanol, pour une alimentation de longue durée et contrairement à un film à base d'Hexadecanol, disparut et ces pertes par évaporation sont identiques à celles dans le quatrième bac non alimenté.

Mots clés : Evaporation, Films monomoléculaires, Plans d'eau.

Summary

In this study, we presented one of the techniques used for the conservation of superficial water in the dry zones characterized by high temperatures (until 50°C in summer), very weak relative humidity and weak precipitation (less than 200 mm / year).

This technique is the reduction of the evaporation by using a chemical substance capable of forming a thin layer on water surface.

The experience that we made in a natural environment and under natural conditions is based on the use of the tubs of evaporation of type Colorado, these tubs 50 cms deep and $1m^2$ of surface are partially buried, 40 cms in the ground and 10 cms over the natural level of the ground, meadows of a typical meteorological station, we filled them with water then we put chemical substances which are two alcohols Hexadecanol ($C_{16}H_{34}O$) and Octadecanol ($C_{18}H_{38}O$) in their solid state as mentioned below:

- The first tub: Hexadecanol
- The second tub: mix Hexadecanol/Octadecanol
- The third tub: Octadecanol
- The fourth tub chemical substance was put, and the tub is considered as tub witness.

We raised the losses by evaporation in four tubs during almost four months and the obtained results are:

1. The rate of the reduction of the evaporation, by using both chosen alcohols, is remarked in three tubs.

2. The rate of the reduction of the evaporation, for periods different from the supply in alcohol, is the best in the first tub fed by Hexadecanol.

3. The thin layer either the film on base of Octadecanol, for a long-term supply and contrary on a film on base of Hexadecanol, disappeared and these losses by evaporation are identical to those in the fourth tub not fed.

Key words: Evaporation, monomolecular films, stretchs of water

CHAPITRE I
CARACTERISTIQUES GEOGRAPHIQUES, HYDROLOGIQUES ET CLIMAT DU SAHARA

Le Sahara, ce grand musée ouvert dans la nature, est un milieu énigme qui cache entre ses océans de dunes, ses plateaux rocheux et son sous-sol à différentes profondeurs des mystères et des richesses que nous n'avons pas à nos jours découvert la plupart. Des études faites dans différentes disciplines n'ont pas pu répondre à des questions persistantes concernant ce petit monde dans lequel vie une minorité de peuplement. Dans ce présent chapitre il sera traité les caractéristiques physico-géographiques du Sahara plus particulièrement la situation géographique, le relief, les sols, la flore.

1- Situation géographique

Malgré quelques divergences dans la définition et les limites des déserts, géographes et biologistes s'accordent pour considérer comme désertiques un certain nombre de régions que l'on peut, en première approximation, caractériser par une pluviosité moyenne annuelle inférieure à 200 mm (Wikipédia, 2008). Les déserts couvrent 50 millions de km2, soit le tiers environ de la surface des continents (Encarta, 2005).
Dans l'ensemble, les déserts se répartissent en deux vastes zones dont l'une dans les régions tropicales et subtropicales de l'hémisphère Nord et l'autre dans les régions similaires de l'hémisphère Sud. Celle-ci comprend les diserts de Chili, de l'Afrique du Sud avec le désert du Kalahari et du Namib, de l'Australie, de la zone Nord, les déserts du Sud-ouest des Etats-Unis et du Mexique (Arizona et Utah) et surtout l'immense domaine désertique saharo-asiatique allant de la cote de Mauritanie et prend en écharpe tout le Nord de l'Afrique et le Sud-ouest de l'Asie jusqu'à la région de l'Indus ou Sind. Le saharo-asiatique se poursuit par une autre bande désertique plus septentrionale qui s'étend de la Caspienne à la Mongolie, à travers le Turkestan et le Tibet (OZENDA 1983) (SHAHER 1990)

Le Sahara de l'Afrique du Nord, qui est une partie de l'immense domaine désertique saharo-asiatique et qui contient en plus du grand Sahara, le Sahara de la Libye et celui de l'Égypte, est le plus grand désert du monde (Annexe I). Il s'étend de l'océan Atlantique à l'ouest jusqu'à la mer Rouge à l'Est et de les monts de l'Atlas et la Méditerranée au Nord jusqu'au Sahel et la vallée du Niger au Sud. D'une largeur de 1500 km e longueur de

5200 km d'Est en Ouest, le Sahara couvre près de 9 millions de km2, dont 200.000 km2 sont occupés par des oasis plus ou moins fertiles.

En Algérie le Sahara, qui est une partie du grand Sahara, couvre plus des trois quarts de la superficie du pays. Il est limité au Nord par la série de l'Atlas saharien et par les frontières du pays à l'Est, à l'Ouest et au Sud (Encarta, 2006) (SHAHER 1990)

2- Relief

Les grandes variations journalières et annuelles de température, l'érosion éolienne et hydrique, la dispersion du couvert végétal et le développement géologique sont les facteurs essentiels influençant sur la formation des reliefs au Sahara (SHAHER 1990). Au Sahara ces facteurs ont permis l'apparition de différentes formes de relief telle que :

- Les dunes de sable ou erg: ils sont rarement isolés sauf dans le désert égyptien. Elles se groupent fréquemment en massifs appelés ergs ou arg en arabe. Les grands massifs dunaires s'allongent dans le sens des vents dominants (Nord-est) et occupent les dépressions qui entourent les montagnes et les plateaux. Ces dunes sont plaquées sur un relief d'érosion fluvial. Les masses de sable qui se déposent dans les oueds à la fin de la période pluviale ont été ultérieurement découpées en terrasses pouvant atteindre plusieurs mètres de hauteur. Les chaînes de dunes s'alignent le long de ces terrasses, elles-mêmes dirigées comme les anciens bras. La force du vent modèle ensuite la dune et donne les différents types de dune dont les dunes en dômes, les dunes en chaînes, les dunes inversées, les dunes longitudinales, le Berkhane, le Sif, et le Ghourd (Encarta, 2006).

Les bras des dunes sont séparés par des couloirs: Feidji, lorsqu'ils sont creusés dans le sable, Gassi, si le plancher est un reg. La plupart d'entre eux sont jalonnés de sites néolithiques situés souvent à la base des dunes. La beauté des paysages qu'offre les dunes est indéniablement l'un des attraits majeurs de la fréquentation touristique au Sahara (Grands Ergs oriental et occidental, dunes de Mauritanie) (HOSNI 2000)

- Les regs : Ils dérivent d'une plaine alluviale dont les matériaux ont été déposés dans l'eau comme les alluvions ordinaires, puis triés par le vent. Les éléments fins ont disparu de la surface et n'ont été conservés qu'en profondeur, sous une couche de graviers et de sable grossiers. Plus de la moitié de la région saharienne est constituée de regs. Les rares montagnes, correspondant à des bombements de la couverture sédimentaire surmontée par des reliefs d'origine volcanique, déterminent les points culminants. Le plus élevé de ces massifs est le Tibesti dans, le Nord du Tchad, qui culmine au mont Emi Koussi à 3415 m. Quant au Hoggar, il culmine avec le Tahat à 2918 m. En revanche, à l'Ouest du

Sahara aucun sommet n'atteint 1000 m d'altitude. Les plateaux gréseux qui entourent le Hoggar prennent le nom de Tassili (HOSNI 2000)

- Le Hamada : Dans les paysages désertiques, au sens large, synonyme de plateau désertique; au sens étroit, plateau constitué par la terminaison d'une mince série sédimentaire tertiaire de formation continentale. Le calcaire de cette formation se termine par une croûte qui se comporte comme une roche dure et donne, sur sa bordure, des festonnements avec des buttes témoins (SHAHER 1990)

- Le désert de terre glaise et de gravier (Serir) : Il résulte de l'action de corrosion exercée par le vent chargé de sable et la nature de la roche affectée. Ses stries parallèles et un net poli se remarquent dans un matériau cohérent et homogène. Des affleurements comme les cailloux, des regs alvéolés ou façonnés en facettes sont affectés par le polissage du vent. Ainsi, se développent les Dreikanters des Serirs sahariens à partir des dragées de quartz. Aussi, les vents de sable donnent-ils aux buttes résiduelles, découpées dans des couvertures gréseuses, la silhouette de rochers champignons. Selon leur direction, les vents creusent également des sillons parallèles dans les roches meubles, argiles ou limons accumulés dans les cuvettes (HOSNI 2000)

- Les dépressions fermées, qui constituent l'un des traits les plus austères des paysages sahariens. Les garaas sont des dépressions fermées peu salées à régime hydraulique, superficiel sous la dépendance des crues des oueds environnants. La topographie des garaas présente une nette uniformité à platitude.

Les sebkhas présentent, outre une très grande platitude, une abondance de sels solubles, chlorures et sulfates concentrés à la surface interdisant toute végétation. Dans les franges des chotts, moins salés, apparaissent des touffes d'herbes halophiles. Souvent, des argiles durcies par un ciment constitué d'une multitude de microcristaux amassés en une dense poussière transparente en surface, naissent des mirages grâce à la réflexion de la lumière. Certaines dépressions fermées se trouvant nettement au-dessous du niveau de la mer ont pu se transformer en lagunes d'eau jaunâtre. Les grandes sebkhas présentent l'exemple d'un ennoyage permanent au quaternaire moyen (chotts Djerid, Fedjedj et Rharsa dans le sud tunisien) (HOSNI 2000)

3- Sol et végétation

3.1- sol

Le sol est pour la plante le réservoir d'eau et de sels minéraux dans lequel elle puise en permanence pour sa croissance et sa survie (DUBOST, 1992). Il est le produit d'altération des roches par différents agents atmosphériques (pluies, gel, vent) ou

biologiques (racines, micro-organismes) (OZENDA 1983). La texture d'un sol dépend du calibre des particules (sable, limon et argile) et selon les proportions de ces particules on peut définir les textures argileuses, argilo-limoneuses, limono-argileuses, argilo-sableuses, limoneuses, limono-sableuses, sablo-limoneuses et sableuses. La texture d'un sol détermine sa productivité. D'ordinaire, les sols sableux, qui caractérisent le Sahara, ne peuvent pas stocker suffisamment d'eau pour une alimentation correcte des plantes. Ils perdent une grande partie de leurs sels minéraux, qui migrent dans le sous-sol (Encarta, 2006).

Dans les régions sahariennes, la roche mère le plus souvent est gréseux du crétacé, parfois alternée avec des bandes argileuses à des profondeurs variables, de même que par des néoformations gypso-salin observées surtout dans les dépressions. Les eaux d'irrigation, les roches parentales plus ou moins salées, la très forte évaporation et la concentration des sels dans le temps sont à l'origine de l'accumulation des sels qui constituent les traits caractéristiques des sols dans les zones arides (KHADRAOUI, 2006) (HALITIM, 1988).

3.2- Couvert végétal

Malgré de sévères contraintes physiques et écologiques, et qu'il s'agisse de faune et de flore, la vie se défend contre la mort avec ténacité et une ingéniosité admirable au Sahara. Ainsi, de l'Atlantique à la mer rouge, a-t-on recensé 1300 espèces végétales, le plus souvent de taille réduite, pour mieux s'adapter à la sécheresse. Ce sont les régions montagneuses qui sont floristiquement les plus intéressantes. Ainsi, sur 150.000 km2 au Hoggar, on n'observe pas moins de 370 espèces végétales (HOSNI 2000) (GAUTIER, 1946).

Ces espèces végétales peuvent être regroupées en deux groupes essentiels:

- Les espèces végétales temporaires: Elles se repartissent en plantes annuelles et plantes géophytes. Les plantes annuelles apparaissent brusquement après les pluies et se développent avec une rapidité surprenante, effectuant tout leur cycle vital, jusqu'à la floraison et la fructification, avant que le sol ne se soit desséché. La longueur du cycle végétatif est très variable d'une espèce à l'autre, mais elle dure généralement d'un à quatre mois. Elle est souvent beaucoup plus courte. On a observé le développement complet, de la germination jusqu'à la fructification, en 8 à 15 jours pour des espèces des genres Boerhavia et Tribulus. Dans ces conditions les plantes restent naines et peuvent fleurir alors qu'elles n'ont qu'une ou deux feuilles. On trouve souvent des exemplaires de 1 à 2 cm de haut, à peine des plantules, qui ont déjà formé leurs fruits ; de telles plantes ont été appelées éphémérophytes.

Les plantes sahariennes annuelles présentent généralement une structure anatomique identique à celle des exemplaires poussant sous les climats humides. Elles ne présentent pas de modifications physiologiques notables et que leur bilan hydrique est le même que celui des plantes annuelles des pays tempérés. Leur adaptation porte donc uniquement sur une réduction de la longueur du cycle. Ces plantes annuelles constituent souvent après les périodes de pluie un tapis continu recouvrant le sol, désigné en langage local sous le nom d'Acheb et qui fournit un apport important pour la nourriture des animaux domestiques. On peut rapprocher du cas des plantes annuelles celui des géophytes, espèces qui persistent, non plus par des grains, mais par des organes souterrains passant à l'état de vie ralentie. Plusieurs Liliacées bulbeuses sont dans ce cas. A Beni-Abbès, après une période pluvieuse, on peut observer en 1953 sur le plateau qui porte le terrain d'aviation un développement particulièrement exubérant d'Urginea noctiflora dont les feuilles caractéristiques, enroulées en tire-bouchon, étaient apparues par milliers en quelques jours avec la soudaineté d'un Acheb. D'autres espèces persistent par un rhizome charnu, c'est le cas par exemple des Ombellifères du genre Ferula.

Les plantes reviviscentes sont des végétaux capables de passer tout entiers à l'état de ralentie par dessiccation de tous leurs tissus et même de leur contenu cellulaire (cas notamment des Mousses et des Lichens), sont relativement rares dans les déserts. (OZENDA 1983)

- Les végétaux permanents: L'adaptation met ici en jeu, à coté des phénomènes physiologiques encore mal connu, un ensemble d'adaptations morphologiques et anatomiques qui consistent surtout en un accroissement du système absorbant et en une réduction de la surface évaporante. D'une manière générale les végétaux désertiques présentent une hypertrophie considérable du système radical qui atteint souvent un volume plusieurs fois supérieur à celui des parties aériennes. La rhizosphère (volume de sol exploité par les racines) peut atteindre plusieurs mètres cubes. La longueur des racines est également étonnante: de petites graminées de quelques centimètres peuvent avoir des racines dépassant le mètre. Ces racines sont fréquemment spécialisées vers un mode particulier d'absorption : ainsi chez les plantes des sables elles forment un réseau horizontal courant à peu de distance de la surface et pouvant utiliser à la fois l'eau de pluie et celle des condensations lorsqu'il s'en produit; d'autres fois, lorsque la nappe phréatique est à une profondeur accessible, les racines s'enfoncent à plusieurs mètres à la rencontre de l'eau. L'émission de vapeur d'eau se produit à travers l'épiderme, surtout celui des feuilles. La paroi externe de cet épiderme est épaisse par une cuticule faite d'un dépôt de substances cireuses peu perméables, de sort que seule une partie de la transpiration se fait à travers cette paroi, une plus grande quantité de vapeur d'eau sortant

à travers des pores microscopiques qui interrompent la continuité de l'épiderme et que l'on appelle stomates. Ces stomates, situés surtout à la face inférieure des feuilles, sont des orifices bordés par deux cellules spécialisées qui, suivant leur teneur en eau, sont plus ou moins bombées et règlent le degré d'ouverture du stomate. Il en résulte que l'intensité de la transpiration est d'autant plus grande que les stomates sont plus nombreux et la cuticule plus minces. En outre, elle augmente avec la température, la sécheresse et l'agitation de l'air, suivant en cela les lois du phénomène physique de l'évaporation. Les adaptations des plantes désertiques portent sur :

- La réduction de la surface foliaire en diminuant la grandeur et le nombre des feuilles. Beaucoup d'espèces sahariennes présentent des feuilles de petite taille, souvent même réduites à une sorte d'écaille comme dans le genre des Tamaris.
- La diminution de la vitesse d'évaporation, dans ce cas les feuilles sont enroulées en prenant la forme d'un cylindre creux et les stomates se trouvent sur l'épiderme supérieur, pour les plantes, leur forme générale est modifiée de manière à réduire l'échauffement, et
- La constitution de réserves d'eau à l'intérieur des tissus, qui donne naissance aux plantes grasses ou encore appelées plantes succulentes. Ces plantes ne sont guère représentées au Sahara que par quelques espèces qui accumulent l'eau dans leurs feuilles. (OZENDA 1983)

4- Réseau hydrographique et ressources en eau au Sahara

4.1- Réseau hydrographique

Pour les régions arides d'Afrique du Nord, parler du réseau hydrographique ramène à parler d'oued qui est un cours d'eau dont l'écoulement est temporaire. Les oueds peuvent se transformer rapidement en torrent lorsque surviennent les pluies rares mais violentes dans ces régions. Le ruissellement n'est freiné ni par les arbres ni par les herbes, et n'atteint pas la mer, mais se diverse dans des dépressions intérieures, comparables aux Chotts ou au lac. Ils sont les vestiges des anciens réseaux hydrographiques qui couvrent les régions arides avant le début de la désertification il y a quelques quatre à cinq mille ans (Encarta, 2006) (OZENDA, 1983)

D'après Dubief, les causes initiales de la dégradation hydrographique saharienne sont d'une part la situation climatique très particulière du Sahara, à la frontière de deux climats différents, le sens général des déplacements des masses d'air et la péjoration actuelle du climat; d'autre part, la continentalité accusée de cette immense région, non compensée par un relief suffisant (DUBIEF, 1953). Le processus de désertification étant déclenché, il s'ensuit des phénomènes de « déversement » irréversibles; ceux-ci

accentuent le démembrement du réseau hydrographique et accélèrent la disparition des basses vallées qui peuvent alors être recouvertes par des amas considérables de sable. A ces actions s'ajoutent les pertes par évaporation et par absorption dans les alluvions des vallées qui peuvent arriver à régler les débits des ruissellements accidentels. Les phénomènes karstiques, enfin, accentuent le démembrement en de nombreuses régions sahariennes.

4.2- Ressources en eau

Les ressources en eau des régions arides ou semi-arides proviennent des eaux de surface ou des eaux souterraines. Le déficit hydrique qui règne dans ces régions la majeure partie de l'année, fait que les eaux de surface y sont rares, souvent de qualité variable et très influencées par l'ampleur du ruissellement. L'écoulement de base des oueds, interconnecté aux nappes souterraines, se caractérise par des eaux de qualité médiocre ainsi que par des apports de petites crues à eau saumâtre. Les gueltas constituaient jadis des étapes de repos pour les caravanes (HOSNI 2000). Les eaux souterraines appartiennent à un bassin hydrogéologique complexe dont les éléments principaux sont constitués par trois ensembles aquifères superposés. Les grés du continental intercalaire, d'abord, contiennent une nappe puissante dont le volume est considérable et le niveau piézoélectrique toujours très supérieur au niveau du sol. Les calcaires marins du Sénonien et de l'Eocène, ensuite, abritent une nappe plus modeste mais qui forme une bonne réserve capable de procurer des jaillissements importants. Les sables argileux du continental terminal, enfin, renferment plusieurs niveaux aquifères de valeur inégale mais dont les ressources alimentent bien des palmeraies. Bien que séparées par des étages imperméables, les eaux de ces nappes captives percolent souvent à travers des toits fissurés. Les nappes phréatiques largement étalées dans les formations du Continental terminal, à quelques mètres de la surface du sol, reçoivent ainsi une partie des eaux captives sous-jacentes en même temps qu'un apport du drainage des palmeraies et une contribution des ruissellements superficiels (NESSON, 1978).

A part les écoulements de surface, très appréciable surtout à la périphérie du bassin et qui alimentent la totalité des formations aquifères postérieures au Crétacé inférieur, l'ensemble des nappes du complexe hydraulique terminal, les eaux superficielles au Sahara sont rares et existent sous forme de lacs (cas de Temacine), de barrages et de Sebkha. Pour réaliser toute action visant à assurer une gestion intégrée des ressources en eau au sein du bassin hydrographique du Sahara algérien qui englobe 17 wilayas et qui se subdivisent en quatre sous unités: Chott Mélrhir, Sahara septentrional, Hoggar-Tassili et Saoura-Tindouf. Par le décret exécutif n°96-283 du 26 août 1996, gouvernement algérien crée l'agence de bassin hydrographique « Sahara » ''A.B.H.S'' (KHADRAOUI, 2006)

5- Climat

5.1- Evolution du climat saharien

Le climat du Sahara n'a pas toujours été tel qu'il se présente de nos jours. Il a subi des oscillations se traduisant en définitive par un assèchement progressif. De même que les régions tempérées ont subi au cours du quaternaire une alternance de périodes glacières et de périodes chaudes et sèches, le Sahara comme les autres régions tropicales d'ailleurs, a dû présenter une alternance de périodes humides (pluviaux) et de périodes sèches (inter-pluviaux). Les preuves de l'existence au Sahara d'anciennes périodes humides peuvent se résumer comme suit :

- Existence de grands systèmes hydrographiques qui ne peuvent avoir correspondu qu'à des fleuves importants.
- En de nombreux points au Sahara des squelettes d'animaux aujourd'hui disparu dans cette région et dont la présence à l'état fossile témoigne d'un climat nettement humide, existent.
- Existence de restes d'activité humaine, en particulier des silex taillé et des gravures rupestres, dans des régions qui sont aujourd'hui totalement inhabitées.
- L'étude de pollens contenus dans des échantillons de sols prélevés dans des gisements néolithiques du Sahara central a permis de reconnaître des pollens d'arbres méditerranés aujourd'hui disparus de cette région .

De l'ensemble de ces faits on peut conclure avec certitude que le Sahara a du connaître au cours du Quaternaire ancien un climat analogue à celui qui règne actuellement dans la partie septentrionale de l'Afrique noire, sans atteindre vraisemblablement le degré d'humidité des régions équatoriales, et au Quartenaire récent un climat de type méditerranéen (OZENDA, 1983).

5.2- Historique des observations au Sahara

C'est en 1819 que furent effectuées à Mourzouk les premières observations quotidiennes s'étendant sur plusieurs mois. Depuis, un réseau de stations météorologiques s'implantait peu à peu au Sahara, au fur et à mesure de la pénétration militaire européenne dans les états africains. Toutefois, au Sahara algérien les premières observations quotidiennes régulières débutèrent à Biskra dans les années quarante du 19ème siècle. Pour assurer la coordination et la surveillance, il fut décidé en 1873 de créer un Service météorologique algérien (S.M.A) qui devient Institut de Météorologie et de Physique du Globe de L'Algérie (I.M.P.G.A) en 1931. La vérification des observations et leur publication

restèrent cependant de la compétence du Bureau Central Météorologique de Paris (B.C.M) qui en assume la charge depuis 1878 (DUBIEF, 1959)

5.3- Conditions et critères climatiques au Sahara

Ce sont les conditions et les critères climatiques qui définissent le domaine aride. Ce dernier correspond aux régions du globe caractérisées par un bilan hydrique déficitaire, résultant essentiellement de l'insuffisance des précipitations, qui au Sahara d'après DUBIEF(1953), n'apparaissent pas à tout moment de l'année mais se regroupent en saisons pluvieuses assez bien caractérisées et qui sont généralement en relation avec des perturbations soudano-sahariennes ou sahariennes associées à des puissantes invasions d'air humide provenant des régions maritimes voisines. Les pluies sont souvent fines dans le Sahara septentrional, mais peuvent devenir diluviennes dans le Sahara central où elles endommagent parfois des oasis. En plus de l'insuffisance des précipitations, il faut noter les prélèvements importants de l'évaporation et de l'évapotranspiration. Son intensité est fortement renforcée par les vents et notamment ceux qui sont chauds comme le sirocco (TOUTAIN, 1979).

Le Sahara se caractérise par la présence de hautes pressions subtropicales séparées des basses pressions équatoriales par le front intertropical. Le balancement saisonnier de cette ceinture anticyclonique engendre les types de temps rencontrés. La sécheresse est causée par les hautes pressions. Au centre du Sahara, les températures sont très élevées durant toute la journée (jusqu'à 50°). L'amplitude entre le jour et la nuit est très importante (de 15° à 30°). Plus élevées l'été qu'en hiver, les températures présentent une moyenne de 30°C en juillet et 12°C en janvier. Les records mondiaux de haute température de l'air proviennent des régions voisines du tropique (Timimoun avec 54,4°, Death Valley au Sud-Ouest des Etats-Unis avec 56,6°). Ces hautes températures ne sont pas d'ailleurs des cas isolés, mais elles durent longtemps. Dubief rapporte que la durée moyenne des températures supérieures à 40°C en juillet passe de 1h 10' à Touggourt à plus de 10h à Aoulef (DUBIEF, 1959). Le sable peut atteindre 80°C en surface, en période chaude, tandis que les températures négatives sont fréquentes durant les nuits claires d'hiver (-18° enregistrés au Tibesti).

Pour l'insolation, les radiations solaires sont très importantes au Sahara car l'atmosphère présente une grande pureté durant toute l'année (TOUTAIN, 1979).

Les tempêtes de sable se produisent lorsqu'une dépression atlantique se rapproche de l'Afrique du Nord. Les alizés qui s'échappent des anticyclones en direction de l'Équateur, sont des vents modérés et réguliers lorsque la pression est stable. L'alizé sec qui souffle du Nord-est et se transforme en vent venant du Sud provoquant une élévation

de température, est le Chehili du Sahara du Nord ou Sirocco. Le vent devient violent et un mur de sable qui peut cacher le soleil. Le vent de sable peut affecter des régions étendues ou rester très localisé. Il se déplace dans le même sens que les dépressions à une vitesse de 30 à 50 Km/heure. Quand l'alizé reprend enfin une orientation régulière, le sable tombe et le ciel s'éclaircit. (HOSNI 2000).

En somme, le Sahara est un désert qui se trouve au Nord de l'Afrique, son relief est un mosaïque qui se subdivise à des ensembles : reg, erg, hamada et sebkha. Ce désert est caractérisé par une grande sécheresse entraînant la pauvreté extrême de la végétation, quant aux sols, ils sont minéraux, et peu évolués. Le climat de cet étendu est chaud (Les températures diurnes sont très élevées, pouvant dépasser 50°C), ensoleillé (L'insolation est de plus de trois mille heures par an) et aride (des taux d'humidité faibles et parfois nuls et de faibles précipitations avec fortes évaporations).

CHAPITRE II
METHODES DE DETERMINATION DE L'EVAPORATION DES PLANS D'EAU

La terre est appelée la planète bleu ou planète de l'eau. L'eau couvre les trois quarts de sa surface. La terre contient différents types d'eau regroupant les océans avec plus de 97% du total d'eau (POSTEL, 1992), les 3% restant (36 millions de Km^3), plus des ¾ constituent les glaciers très peu accessibles, le ¼ restant comprend essentiellement des eaux souterraines (inférieurs à 1% de l'eau totale de globe) et une faible partie sous forme d'eaux de surface contenues dans les lacs et les rivières(soit 0.01% de l'eau de la planète) (REMINI(a), 2005). A l'échelle continentale, d'après Katia LAVAL (2006), les pluies proviennent pour deux tiers de l'évaporation des continents et d'un tiers de l'advection.

L'eau s'évapore des océans pour former des nuages qui se déplacent vers les continents et se transforment partiellement en précipitations qui alimentent les rivières et les nappes aquifères dont un notable volume retourne à son point de départ, les océans, pour boucler ce que l'on appelle ''Le cycle hydrologique'' qui est un processus basé sur l'énergie thermique provenant du soleil. Ce cycle peut être perturbé par l'homme par la construction de réservoirs, le transport de l'eau pour des besoins industriels, le captage des eaux phréatiques, l'irrigation, le drainage, la correction des cours d'eau, l'utilisation agricole des sols, l'urbanisation, les pluies provoquées, etc. Chaque année, le cycle de l'eau planétaire mobilise une quantité de l'ordre de 500.000 milliards de mètres cubes (MARGAT, 1997).

1-Notion de l'évaporation :

Le phénomène continu du cycle de l'eau peut se schématiser en trois phases: les précipitations, le ruissellement de surface et l'écoulement souterrain, et l'évaporation. Il est intéressant de noter que dans chacune des phases on retrouve respectivement un transport d'eau, un emmagasinement temporaire et parfois un changement d'état. Il s'ensuit que l'estimation des quantités d'eau passant par chacune des étapes du cycle hydrologique peut se faire à l'aide d'une équation appelée "hydrologique" qui est le bilan des quantités d'eau entrant et sortant d'un système défini dans l'espace et dans le temps. L'évaporation débute par le mouvement des molécules d'eau. A l'intérieur d'une masse d'eau liquide, les molécules vibrent et circulent de manière désordonnée et ce mouvement est lié à la température. Plus, elle est élevée, plus le mouvement est amplifié et plus l'énergie associée est suffisante pour permettre à certaines molécules de s'échapper et d'entrer dans l'atmosphère (MUSY(b),2004). Donc, l'évaporation peut s'expliquer

comme un phénomène de diffusion. Elle est le passage de l'eau liquide à la vapeur d'eau, d'où une consommation de l'énergie, comme un phénomène énergétique car elle nécessite de l'énergie solaire qui est la source de la température et comme un phénomène climatique (RIOU, 1975).

1.1-Evaporation de différentes surfaces :

1.1.1-Evaporation à partir des surfaces humides naturelles

Le taux d'évaporation d'une surface humide quelconque (eau, neige, glace, sol humide) n'est pas seulement fonction du pouvoir évaporant de l'atmosphère, mais aussi des paramètres caractérisant les disponibilités en eau et l'aptitude de cette surface humide à alimenter l'évaporation.

1.1.2- Evaporation de neige et de glace

Assez mal connu, l'évaporation de la neige ou de la glace, qui est un phénomène de sublimation, s'accompagne de l'évaporation de l'eau liquide souvent mélangée à l'eau solide. On estime toutefois qu'en règle générale, les quantités évaporées à partir d'une surface couverte de neige sont assez faibles puisque la neige fond à zéro degré et qu'à cette température, la pression de vapeur saturante est faible. Le taux d'évaporation d'un mélange neige ou glace et eau est plus forte (REMENIERAS,1999)

1.1.3- Evaporation à partir d'un sol nu

L'évaporation à la surface des sols et la transpiration des végétaux conditionnent le plus souvent le ''déficit d'écoulement'' d'un bassin. À l'exception des terrains particulièrement poreux ou fissurés, l'évaporation ne peut avoir lieu qu'à partir de la surface d'un sol humide ou de voisinage immédiat de celle-ci. Elle tend à diminuer l'humidité de cette couche en provoquant un mouvement ascendant de l'eau emmagasinée dans les couches sous-jacentes, L'évaporation des sols nus, en l'absence de réalimentation en eau des couches plus profonds, provoque une diminution de l'humidité dans les couches superficielles et enfin leur assèchement à peu prés total (REMENIERAS,1959). Les facteurs influençant l'évaporation à partir d'un sol nu sont :

- **Teneur en eau du sol** : Elle conditionne les processus d'évaporation. Plus le sol est sec et plus les flux évaporés seront faibles
- **Capillarité** : Les remontées capillaires permettent d'amener de l'eau jusqu'au front d'évaporation.
- **Couleur du sol et albédo**: Les sols de couleur claire présentant des valeurs d'albédo élevées vont absorber moins de rayonnement que des sols foncés. Toutefois, dans le cas où la quantité d'eau n'est pas un facteur limitant, les écarts entre l'évaporation d'un sol

clair et celui d'un sol foncé ne sont généralement que de l'ordre de quelque pour cent, l'avantage étant donné au sol foncé (MUSY(b),2004).

L'évaporation des sols est intimement liée à l'infiltration des eaux de pluie et d'irrigation. La mesure de ce genre d'évaporation s'applique également à la mesure de l'évaporation d'un sol couvert de végétation, autrement dit à la mesure de la transpiration des plantes (REMENIERAS,1959). Les mesures d'évaporation sont effectuées par :

- Des ''Parcelles d'essai'' spécialement choisies et aménagées pour permettre l'établissement d'un bilan hydrologique (REMENIERAS,1999). De ''Lysimètre'' qui est une cuve étanche enterrée, à parois verticales, ouverte à sa partie supérieure.
- Des châssis vitrés verrières: Les châssis vitrés ont été parfois utilisés pour la mesure de l'évaporation du sol qu'il était essentiel de ne pas remanier (REMENIERAS,1959).

1.1.4- Evaporation des nappes d'eau libre

Comme pour la pluie, l'évaporation se définit par l'épaisseur, exprimée en millimètres, de la couche d'eau évaporée dans l'unité de temps que l'on considère : jour, mois, année (DUBIEF, 1949). La détermination de sa valeur est difficile pour une grande étendue, plusieurs méthodes sont été utilisées pour sa mesure.

2- Relation entre l'évaporation et les facteurs intervenant dans son processus

Les facteurs intervenant dans le processus d'évaporation sont nombreux et on peut les divisés en deux catégories principales, l'une comprend les facteurs météorologiques et l'autre les facteurs physiques.

2.1- Relation entre l'évaporation et les facteurs météorologiques

2.1.1-Quantité de chaleur disponible:

La quantité d'eau pouvant être évaporée à partir d'une surface dépend de la quantité de chaleur provenant du soleil. Cette quantité de chaleur varie, d'une part, selon les conditions géographiques (gradient de latitude), et d'autre part, selon l'élévation de la surface liquide par rapport au niveau de la mer (gradient altimétrique). Les échanges de chaleur entre l'atmosphère, la surface du sol et la surface des lacs et des océans qui sont les agents de l'évaporation, s'effectuent par convection et conduction. Cette énergie échangée est, en tous points, compensée par un transfert d'eau qui s'évapore à un endroit pour se condenser à un autre et retomber sous forme de précipitations. Ces échanges de chaleur entretiennent le cycle de l'eau. Les mouvements horizontaux et verticaux qui brassent l'atmosphère mettent en jeu des échanges et des transformations d'énergie. L'une

des causes fondamentales de cette agitation réside dans la distribution des températures à la surface terrestre ainsi qu'au sein de l'atmosphère elle-même. L'évaporation est donc fonction des rapports énergétiques entre l'atmosphère et le plan d'eau évaporant(MUSY(b),2004).

a) Rayonnement solaire (RS)

Le rayonnement solaire est l'élément moteur des conditions météorologiques et climatiques, et par voie de conséquence, du cycle hydrologique. Son action intéresse l'atmosphère, l'hydrosphère et la lithosphère, par émission, convection, absorption, réflexion, transmission, diffraction ou diffusion. L'émission solaire se situe essentiellement dans une bande de longueur d'onde allant de 0,25 à 5 mm.

b) Rayonnement atmosphérique (RA)

Etant donné les températures régnant dans les différentes couches atmosphériques qui émettent un rayonnement de grandes longueurs d'onde, comprises entre 5 et 100 m (infrarouge). Cette émission est due essentiellement à la vapeur d'eau, au gaz carbonique ainsi qu'à l'ozone.

c) Rayonnement terrestre (RT)

Le rayonnement terrestre, encore appelé rayonnement propre, est absorbé en quasi-totalité par l'atmosphère. En présence d'une couverture nuageuse, il est réfléchi.

d) Notion de rayonnement net (RN)

Le rayonnement net est défini comme la quantité d'énergie radiative disponible à la surface de la terre et pouvant être transformée en d'autres formes d'énergie par les divers mécanismes physiques ou biologiques de la surface. On exprime généralement le bilan des échanges radiatifs à la surface du sol par le rayonnement net RN défini comme la résultante des trois types de rayonnements. Le rayonnement net est défini par l'expression suivant :

$$RN = (RS + RA) \cdot (1 - \alpha) - RT \quad \text{.....(II.1)}$$

RS : rayonnement solaire direct et diffus atteignant le sol [Wm-2],

RA : rayonnement atmosphérique dirigé vers le sol [Wm-2],

RT : rayonnement terrestre [Wm-2], a : albédo de la surface.

Le terme $(RS + RA) \cdot (1 - \alpha)$ représente la fraction du rayonnement incident global Ri absorbée par la surface terrestre. De manière simplifiée, on considère généralement le rayonnement terrestre comme négligeable dans le calcul du rayonnement net.

e) Formulation du bilan énergétique

Le bilan d'énergie au travers la surface du sol ou de la mer et, plus généralement, au travers la surface évaporante, exprime que la somme des densités de flux de chaleur est nulle au niveau de cette surface :

$$RN + \phi C + \phi S + \phi L = 0 \quad \text{.....(II.2)}$$

RN : rayonnement net à la surface de la terre.

ØC : flux de chaleur dans le sol rendant respectivement compte du transport de chaleur par conduction dans le sol ainsi que du transfert d'eau sous la forme de vapeur.

ØS : flux de chaleur sensible dû à la convection thermique au voisinage de la surface évaporante. Ce flux de chaleur n'affecte donc qu'une hauteur restreinte de l'atmosphère.

ØL : flux de chaleur latente ou flux de vapeur à l'interface sol -atmosphère dû à la vaporisation lorsqu'il n'y a pas d'accumulation de vapeur au sein du couvert végétal ou au sein de la tranche d'eau qui recouvre le sol.

Cette équation traduit simplement le fait que le flux d'énergie perdu par la surface de la terre au cours de l'évaporation soit égal au flux apporté par rayonnement, diminué du flux d'énergie perdue par convection dans l'air et dans le sol (MUSY(b),2004).

2.1.2- Température de l'air et de l'eau

La température étant étroitement reliée au taux de radiation, lui-même directement corrélé à l'évaporation, il s'ensuit qu'une certaine relation existe entre l'évaporation et la température de la surface évaporante. Le taux d'évaporation est donc, pour un même déficit hygrométrique de l'air, une fonction croissante de la température de l'eau ou de la surface évaporante. Comme la température de l'eau varie dans le même sens que la température de l'air. Il est plus facile de mesurer cette dernière. On utilise ainsi dans les formules de calcul de l'évaporation la température de l'air plutôt que celle de l'eau. Au voisinage du sol, la température de l'air est fortement influencée par la nature de la surface terrestre et par l'importance de l'ensoleillement. A la base de la troposphère, la température de l'air suit un cycle quotidien appelé variation ou cycle diurne, avec un minimum et un maximum observable au cours d'une journée. Les facteurs influant sur ces variations de la température atmosphérique dans le temps sont en fait nombreux. Il y a la latitude, l'altitude, le relief, le type de surface ou de végétation, la proximité de la mer, les masses d'air dominantes et le degré d'urbanisation et de pollution, etc. De tels éléments agissent sur les amplitudes thermiques du jour, du mois ou de l'année. (REMENIERAS,1999) (OMM,1994).

2.1.3- Humidité relative et spécifique de l'air

Le déficit de saturation (différence entre la pression de vapeur saturante et la pression de vapeur actuelle) peut aussi être exprimé d'une autre manière recourant à la notion d'humidité relative Hr. Cette dernière s'exprime par la relation suivante :

$$H_r = \frac{e_a}{e_s} \cdot 100 \ [\%] \qquad \text{.....(II.3)}$$

ea : pression de vapeur d'eau effective ou actuelle,

es : pression de vapeur d'eau à saturation.

L'humidité relative est donc le rapport entre la quantité d'eau contenue dans une masse d'air et la quantité maximale d'eau que peut contenir cette masse d'air. Ainsi, lorsqu'une masse d'air se refroidit, elle garde la même quantité d'eau. Par contre, la valeur de sa quantité maximale diminue avec la température. Cette diminution implique qu'à un certain moment, l'air devient saturé car Hr = 100%. On nomme la température pour laquelle la pression de vapeur saturante est égale à la pression de vapeur actuelle la température du point de rosée. On exprime parfois l'humidité de l'air en kg d'eau par kg d'air humide (humidité spécifique) ou encore en gramme d'eau par m^3 d'air humide (humidité absolue) (MUSY(b),2004).

2.1.4- Pression atmosphérique

La pression atmosphérique représente le poids d'une colonne d'air par unité de surface considérée. Elle constitue un indicateur de la variation des types de masse d'air passant au -dessus d'un point donné et intervient dans le calcul des humidités spécifique et absolue. Plus la pression totale au-dessus d'un liquide est élevée, plus grande est sa tension de vapeur; mais cet effet reste négligeable pour des pressions totales inférieures à 106 Pa (ou 10 bars) (MUSY(b) ,2004). On admet généralement que l'évaporation augmente lorsque la pression barométrique décroît: cette dernière intervient dans certaines formules, sous forme logarithmique car, pour la plupart des auteurs, son influence est très faible.(REMENIERAS,1999).

2.1.5- Vent

Le vent joue un rôle essentiel sur les processus d'évaporation car c'est lui qui assure le remplacement de la surface évaporante, l'air saturé par de l'air plus sec. En effet, l'air au voisinage de la surface évaporante va se saturer plus ou moins rapidement et par conséquent stopper le processus d'évaporation. Un verre d'eau placé dans une enceinte fermée à l'abri de tout mouvement de l'air ne pourrait évaporer son contenu bien longtemps même dans une atmosphère extrêmement sèche. Le vent, par le bais de sa vitesse mais aussi de sa structure verticale et de ses turbulences, joue un rôle

prépondérant dans le processus d'évaporation. Les turbulences permettent entre autre l'ascension de l'air humide, tandis que l'air sec descend et se charge d'humidité (MUSY(b),2004) (REMENIERAS, 1999).

2.2- Relation entre l'évaporation et les facteurs physiques pour une nappe d'eau libre

Les facteurs physiques intervenant dans le processus d'évaporation des nappes d'eau libre sont :

2.2.1- Profondeur :

La profondeur de la surface d'eau libre joue un rôle essentiel sur la capacité de cette dernière à emmagasiner de l'énergie. D'une manière générale, la différence essentielle entre une surface d'eau libre peu profonde et une surface d'eau libre profonde réside dans la sensibilité de la première aux variations climatiques saisonnières. Il s'ensuit qu'une surface d'eau libre peu profonde sera sensible aux variations météorologiques selon la saison, tandis qu'une surface d'eau libre profonde, de par son inertie thermique, présentera une réponse évaporative nettement différente. Cependant, les volumes totaux évaporés peuvent être sensiblement les mêmes dans les deux cas. (MUSY(b),2004) (REMENIERAS,1959)

2.2.2- Etendue :

L'étendue de la surface d'eau libre joue un rôle important sur les quantités évaporées puisque l'évaporation, à vitesse du vent égale, est proportionnelle à la surface évaporante ainsi qu'à l'humidité relative (MUSY(b),2004) (REMENIERAS,1999)

2.2.3- Salinité :

Une augmentation de la teneur en sel de 1% environ diminue l'évaporation de 1% suite à la diminution de pression de vapeur dans l'eau salée. Un constat similaire peut être dressé pour d'autres substances en solution puisque la dissolution d'un produit entraîne une diminution de la pression de vapeur. Cette baisse de pression est directement proportionnelle à la concentration de la substance en solution (MUSY(b),2004).

L'évaporation, passage de l'eau d'un état liquide à un état gazeux et une des phases du cycle de l'eau, est un phénomène à la fois de diffusion, énergétique et climatique. Elle se réalise à partir de la neige et de la glace et c'est la plus faible, à partir des sols nus qui est fonction de la teneur en eau du sol, de sa capillarité et de sa couleur et albédo et elle est, dans ce cas, la cause de l'assèchement à peu prés total des couches superficielles et à partir des nappes d'eau libre qui est fonction en plus des éléments

météorologiques tels que : l'insolation (quantité de chaleur), la température de l'air et de l'eau, l'humidité, la pression atmosphérique et le vent ; des éléments physiques tels que : la profondeur et l'étendue de la surface aquatique et la salinité de ses eaux.

3- Méthodes de détermination de l'évaporation des plans d'eau

Le calcul de l'évaporation des nappes d'eau superficielles fait appel à plusieurs méthodes.

3.1- Méthode du bilan hydrique des étendues d'eau (cas d'une retenue).

Le principe de cette méthode est basé sur l'égalité de la recette et de la dépense du volume d'eau dans la retenue, tout en tenant compte de la variation du stockage.

Cette méthode appartient à la loi de conservation de la quantité d'eau dans une retenue ou des étendues d'eau.

Selon BOUTOUTAOU(1995), Si l'on désigne par VE, le volume d'eau évaporé, l'équation du bilan hydrique de la retenue donne:

$$\mathbf{VE = Vp + Vs + VST - Vqs - Vqst \pm \Delta} \quad \text{……..}\mathbf{(II.5)}$$

Où :

Entrées (recette)	Sorties (dépense)
Vp - volume de pluie, tombant sur la retenue, m	Vqs - volume d'eau évacué par l'exutoire, m3
	Vs - volume d'eau des débits souterrains sortant de la retenue
Vqst - volume d'eau superficiels reçus par la retenue, m3	VE - volume d'eau évaporé de la surface de retenue, m3
VST - volume d'eau des débits souterrains reçus par la retenue, m3.	

± ΔV - stockage ou des stockage subi par la retenue, m3.

Mais, l'estimation de l'évaporation par cette méthode du bilan est très peu employée du fait de l'imprécision et de la difficulté d'effectuer des mesures de la plupart des composants de l'équation.

3.2- Méthode du bilan énergétique

La méthode du bilan énergétique s'utilise pour estimer l'évaporation des océans, des lacs et des réservoirs ainsi que pour estimer l'évapotranspiration des surfaces émergées. Cette méthode se basée sur l'évaluation de tous les apports et de toutes les pertes en énergie thermique ainsi que des modifications de l'énergie stockée, la différence obtenue étant l'énergie servant à l'évaporation. Appliquée à l'estimation de l'évaporation depuis un lac ou un réservoir, cette méthode exige de nombreuses observations in situ du rayonnement solaire incident et du rayonnement de grande longueur d'onde, de la température de l'air et de la surface de l'eau, de la tension de vapeur d'eau dans l'air, de l'énergie thermique stockée dans la masse d'eau et de l'énergie nette fournie au réservoir par les apports liquides.

La méthode du bilan énergétique est d'une application difficile en raison de la complexité des mesures sur le terrain nécessaires. Toutefois, dans l'état actuel des choses, elle fournit de meilleurs résultats pour un éventail de conditions plus étendu que toute autre méthode. Pour un lac ou un réservoir, le bilan énergétique de base peut être exprimé de la façon suivante :

$$Qx = Rs - Rsr + Ra - Rar - Rbs - QE - Qh + Qv - Qw + Qb \quad \text{.....(II.6)}$$

où:

Qx : désigne la variation de l'énergie stockée dans la masse d'eau,

Rs : le rayonnement solaire incident sur la surface de l'eau,

Rsr : le rayonnement solaire réfléchi,

Ra : le rayonnement incident de grandes longueurs d'onde provenant de l'atmosphère,

Rar : le rayonnement réfléchi de grandes longueurs d'onde,

Rbs : le rayonnement de grandes longueurs d'onde émis par la masse d'eau,

QE : l'énergie consommée par l'évaporation,

Qh : l'énergie transmise par convection par la masse d'eau sous forme de chaleur sensible,

Qv : l'énergie nette transmise par advection (par transport liquide) dans la masse d'eau,

Qw : l'énergie transmise par advection par l'eau évaporée et

Qb : l'échange d'énergie entre la masse d'eau du réservoir et le fond de ce dernier. (OMM1994)

3.3- Méthodes aérodynamiques

Les méthodes aérodynamiques procèdent de la théorie selon laquelle le transport de vapeur depuis une surface d'eau est essentiellement un processus de turbulence, liée à certains phénomènes météorologiques. Un grand nombre d'équations d'aérodynamique, théoriques et empiriques, ont été établies pour exprimer cette relation. Certaines sont des

expressions mathématiques complexes qui exigent la mise en œuvre d'importants moyens météorologiques, tandis que d'autres sont simples et ne demandent que des mesures du vent et de la tension de la vapeur de l'eau. Il existe encore une autre méthode dite de la «corrélation tourbillonnaire» (du «transfert turbulent» ou du «flux turbulent»), qui est basée sur la mesure du flux vertical dans l'atmosphère. Un grand nombre des équations d'aérodynamique utilisées pour calculer l'évaporation ont été mises à l'épreuve lors des recherches effectuées sur le lac Hefner (Etats- Unis d'Amérique) et sur les grands réservoirs de Rybinsk, Kouïbychev et Tsymlyansk (Communauté d'Etats indépendants).

Equation, issue des recherches sur le lac Hefner , est :

$$E = N\,u\,(e_o - e_a) \quad \text{.....} \quad \textbf{(II.7)}$$

E est l'évaporation, en centimètres par jour,

N est un coefficient,

u est la vitesse du vent en m s^{-1} au-dessus de la surface de l'eau,

e_o est la tension de vapeur saturante en hPa correspondant à la température superficielle de l'eau,

e_a est la tension de vapeur de l'air en hPa.

Equation, employée pour les trois grands réservoirs de la CEI est la suivante :

$$E_o = 0{,}14\,n\,(1 + 0{,}72u_{200})\,(e_o - e_{200}) \quad \text{.....} \quad \textbf{(II.8)}$$

E_o est l'évaporation depuis une masse d'eau en mm $mois^{-1}$,

e_o la valeur moyenne de la tension de vapeur maximale de l'eau en hPa, calculée d'après la température superficielle de l'eau,

e_{200} la valeur moyenne de la tension de vapeur d'eau dans l'air à 200 cm au-dessus de l'eau en hPa,

u_{200} la vitesse moyenne du vent mesurée à 200 cm au-dessus de l'eau en m s^{-1}, n le nombre de jours de l'intervalle de temps qui est habituellement le mois.

Les valeurs e_o, e_{200} et u_{200} sont les moyennes mensuelles pour l'ensemble des points d'observation au-dessus de l'étendue d'eau. Si on ne peut pas disposer de ces données, on peut estimer leurs valeurs à partir des observations aux stations météorologiques les plus proches de l'étendue d'eau.

Les deux équations simples n'exigent que la mesure de la vitesse du vent, de la température de l'eau et de la tension de vapeur dans l'air(OMM1994)

- Valeur du coefficient N

La valeur du coefficient N résulte de la combinaison d'un grand nombre de variables qui entrent dans des équations d'aérodynamique plus complexes. Parmi ces variables on peut mentionner les éléments relatifs à la structure des vents, à la taille du lac, à la rugosité de la surface de l'eau, à la stabilité de l'atmosphère, à la pression barométrique, à la masse volumique et à la viscosité cinématique de l'air. L'expérience a toutefois montré que si u, e_o, et e_a sont déterminées à partir de mesures effectuées près du centre du lac et si e_a est mesurée dans la couche de vapeur qui recouvre le lac, N est relativement constant pour des réservoirs de dimensions extrêmement variables. Si e_a est déterminée d'après des observations effectuées sur la rive et hors de la couche de vapeur qui recouvre le lac, la valeur de N dépend alors de la superficie du lac. Harbeck a donné l'expression :

$$N = (0.291)/ A^{0.05}$$

A est la superficie de l'étendue d'eau en mètres carrés. L'erreur type d'estimation de cette régression est de 16 pour cent, et cette relation ne devrait ainsi pas être appliquée pour déterminer la valeur de N pour un lac donné. Cette relation devrait plutôt servir à prévenir des erreurs grossières lorsque d'autres méthodes sont utilisées pour déterminer la valeur de N.

La valeur de N peut être déterminée lorsque l'évaporation est calculée selon la méthode du bilan hydrologique ou du bilan énergétique, sur une base mensuelle pendant un an ou plus. Au cours de cette période, la valeur de N est calculée chaque mois à partir de la valeur moyenne du produit u (e_o – e_a). En général, N restera constant pour toutes les saisons de l'année. La valeur de N et les pertes dues à l'infiltration peuvent être évaluées pour des lacs et réservoirs de petite superficie si les autres facteurs de l'équation du bilan hydrologique peuvent être déterminés pour des intervalles de courte durée. Les deux hypothèses fondamentales sur lesquelles la méthode est basée sont les suivantes :

- Pendant les périodes où il n'existe ni entrée ni sortie d'eau en surface, la baisse de niveau du réservoir est la conséquence de deux éléments qui sont l'évaporation et l'infiltration; et;
- Lorsque le produit u (e_o – e_a) est égal à zéro, l'évaporation est négligeable. Il est habituellement préférable de limiter l'analyse à des périodes pendant lesquelles il n'y a ni entrée ni sortie d'eau en surface, bien qu'il ne soit pas absolument nécessaire d'agir ainsi. Si les entrées et les sorties d'eau sont mesurées, on peut corriger en conséquence la variation de niveau observée, mais ordinairement même de faibles erreurs dans la mesure des entrées et des sorties peuvent rendre discutable l'exactitude de la variation de niveau corrigée. Les périodes pluvieuses devraient être exclues.

Le début et la fin de chaque période devraient être choisis de telle sorte que les

niveaux du lac soient, à ces instants, connus avec exactitude. Les intervalles pendant lesquels le limnigraphe indique des élévations du niveau attribuables au vent ne doivent pas être choisis comme début ou fin d'une période de calcul, bien qu'ils ne doivent pas être évités pendant la période choisie. Pour chaque période choisie, la variation de niveau Δh est calculée en centimètres par jour, et les valeurs moyennes de la vitesse du vent et de la différence de tension de vapeur sont calculées pour la même période. Les valeurs du produit $u\ (e_o - e_a)$ tracées en fonction de Δh devraient présenter une relation linéaire. La pente de la droite est égale à la valeur de N, et son point d'intersection avec l'axe des x indique le volume d'eau qui s'infiltre depuis le lac. Les valeurs quotidiennes moyennes de u, e_o, et e_a sont déterminées d'après les données sur le vent et la température alors que l'évaporation quotidienne, exprimée en centimètres par jour, est calculée au moyen de l'équation $E = N\ u\ (e_o - e_a)$ (OMM1994).

3.4- Méthode de la corrélation tourbillonnaire

Le flux vertical de chaleur sensible (convection) et celui de vapeur d'eau (évaporation) peuvent être mesurés directement en déterminant sur une base instantanée les propriétés des tourbillons passant par un niveau de mesure particulier. Le flux vertical moyen d'air (sec) est de zéro, mais la composante verticale variable du vent entraîne avec elle d'autres entités. Un déplacement vertical net de chaleur (ou d'humidité) exige que les variations de la température (ou de l'humidité) soient mises en corrélation avec les variations dans le plan vertical de la vitesse du vent. Dans le cas de la mesure de l'évaporation, la méthode de la corrélation tourbillonnaire est basée sur la proportionnalité entre la densité moyenne du flux vertical de vapeur d'eau et la moyenne dans le temps des covariances instantanées de la vitesse verticale du vent et de l'humidité. Cette méthode exige l'utilisation de capteurs perfectionnés et délicats de vitesse du vent et d'humidité et elle ne peut être considérée comme convenable pour des mesures ordinaires sur le terrain. Les méthodes de corrélation tourbillonnaire s'avèrent cependant précieuses en recherche et pour la validation d'autres méthodes directes et indirectes(OMM1994).

3.5- Méthode des bacs d'évaporation

Les bacs d'évaporation ont pour but de se rapprocher le plus possible des conditions présidant à l'évaporation provenant des étendues d'eau naturelles. Il faut donc augmenter le plus possible l'inertie thermique, étant bien entendu qu'on ne parvient jamais à atteindre l'inertie d'un grand réservoir naturel. Il faudrait également que l'état d'humidité de l'atmosphère au contact soit modifié de la même manière que dans la nature, que l'effet du vent soit respecté, etc. Plus le réservoir expérimental sera vaste, mieux les conditions d'équivalence seront remplies (ROCHE, 1963).

Le phénomène de l'évaporation à partir des bacs lui aussi basé sur la loi du bilan hydrique, avec l'absence totale des débits souterrains et des pertes par infiltration qui sont très difficile à estimer.

L'expression simplifiée du bilan hydrique d'un bac pourra se traduire comme suit :

$$E = \Delta H \pm P \qquad \textbf{(II.9)}$$

Où :

E - évaporation, mm;

P - pluie tombant sur le bac, mm;

ΔH - différence de côte du plan d'eau entre deux mesures, mm (BOUTOUTAOU, 1995)

Différents types de bacs sont utilisés avec leurs défauts et leurs qualités tels que :

- **Bac classe A (du Weather Bureau, U.S.A)** : Ce type est constitué d'un cylindre métallique de 121,9 cm de diamètre et de 25,4 cm de hauteur. L'eau dans ce cylindre maintient une épaisseur de 17,5 à 20 cm. Le cylindre est supporté par un caillebotis à 15 cm du sol. Le caillebotis doit permettre une bonne aération sous le bac. Ce bac universellement répandu ne satisfait que très partiellement l'hydrologue car, du fait de sa disposition par rapport au sol, il est très sensible aux variations de température, son inertie thermique étant faible (LABORDE 2000).

- **Bac CGI-3 000 :** C'est un bac d'origine soviétique recommandé par l'O.M.M. Il est de forme cylindrique de 61.8 cm de diamètre (3 000 $cm^{3)}$ à fond conique. De 60 cm de profondeur, il est enterré de façon à ce que sa collerette dépasse de 7,5 cm du sol, le niveau d'eau étant maintenu nu au niveau du sol. Les coefficients bac-lac ainsi déterminés pour un GGI-3000 varient de 0,75 à 1,00. Pour les estimations de l'évaporation mensuelle moyenne, le coefficient d'un bac flottant GGI-3000 est estimé au moyen de l'équation suivante :

$$\alpha = 0.8\ ((e_o - e_{200}\ \beta)/\ (e_o' - e_{200}\ \gamma)) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \textbf{(II.10)}$$

e_o est la tension de vapeur mensuelle moyenne (hPa) estimée d'après la température de l'eau à la surface du lac,

e'_o la tension de vapeur mensuelle moyenne (hPa) estimée d'après la température de l'eau à la surface du bac flottant GGI-3000,

e_{200} la tension de vapeur mensuelle moyenne (hPa) dans l'air à 200 cm au-dessus de la surface de l'eau,

β un facteur de correction pour la superficie du lac,

γ un facteur qui dépend de la distance **l** qui sépare le rivage du bac, dans la direction moyenne du vent (fetch) (LABORDE2000) (OMM2004).

- Bac Colorado et Bac ORSTOM : Le bac Colorado est d'une surface de 3 pieds carrés (0,925 m de côté, 0,855 m2 de section), et d'une profondeur de 1 1/2 à 3 pieds (45,72 à 91,44 cm) est enterré de telle façon que le rebord soit à 4 pouces (10,16 cm) au-dessus du sol. L'eau affleure sensiblement au niveau du sol.

C'est une version à peine modifiée du Colorado qui a été adoptée par le Service Hydrologique de l'ORSTOM a adopté un bac de 1 m2 sur 60 cm de profondeur, donc un bac Colorado modifié. Il est enterré de telle façon que le niveau de l'eau et celui du sol soient à 10 cm du rebord. Il est peint en gris neutre mat. Les mesures sont volumétriques : une pointe fixe retournée, soit soudée dans un angle à l'abri d'une plaque formant pan coupé, soit fixée sur une traverse étroite fixée aux rebords, est calée au niveau normal de l'eau (10 cm sous le rebord).

NB : Lorsque l'on veut passer de l'évaporation mesurée sur un bac à celle d'un réservoir de grandes dimensions, il convient de tenir compte de la différence d'échelle. En général, on admet que l'évaporation sur le réservoir sera celle mesurée sur un bac placé dans les mêmes conditions climatiques, multipliée par un coefficient dit "coefficient de bac".

Les ordres de grandeur de ces coefficients sont :

• pour un bac de classe A de 0,6 à 0,8

• pour un bac ORSTOM de 0,6 à 0,9 (LABORDE, 2000).

4-détermination de l'évaporation des plans d'eau en absence des données de mesure :

4.1- Méthode hydrométéorologique :

La méthode hydrométéorologique est la méthode la plus employée pour la détermination de l'évaporation des étendues d'eau (lacs, retenue, etc.....).

Les formules de ce genre sont élaborées sur la base des données d'observation des stations météorologiques implantées aux sites des retenues et des stations continentales. Ces formules sont simples et faciles à utiliser. Les valeurs numériques de leurs paramètres sont des données standards, toujours disponibles dans les bulletins météorologiques ainsi que dans les Atlas climatologiques de L'ONM.

Ces formules sont scindées en deux groupes :

Le premier comprend les formules reliant l'évaporation à plusieurs paramètres météorologiques telle que la relation entre l'évaporation, la température et l'humidité de l'air ainsi que la relation entre l'évaporation et de déficit de saturation de l'air.

Le deuxième contient des formules basées sur la loi physique de Dalton.

Il faut noter que les formules du deuxième groupe constituent les documents normatifs de plusieurs pays tels que la Russie et les USA.

Pour les conditions climatiques de l'Algérie BOUTOUTAOU (1995) propose une méthode hydrométéorologique établie sur la base des données d'observation disponibles de plusieurs stations météorologiques implantées aux sites des barrages réservoirs algériens et situées dans différents zones géographiques et climatiques (barrage Meffrouche, Gargar, Hamiz, Guenitra, Bakhada, Keddara, Beni Bahdel, barrage Sidi Mohamed Ben Aouda et la station expérimentale d'El Abiod Sidi Cheikh).

La formule proposée est issue de la loi physique de Dalton d'une atmosphère immobile (la vitesse du vent est nulle).

$$dE / dt = [C(es - ez)] / H \quad \textbf{(II.11)}$$

Où :

dE / dt - valeur de l'évaporation dans un intervalle de temps t,

es - tension de vapeur d'eau saturante correspondant à la température dela surface évaporante,

ez - tension de vapeur d'eau au dessus de la surface évaporante à une hauteur z,

C - coefficient correspondant à la vitesse d'évaporation à une pression normale et à un déficit d'humidité de l'air (es – ez) égal à 1.

H - pression atmosphérique.

La loi de Dalton dans les conditions naturelles ($V \neq 0$, V - vitesse du vent) s'exprime par la relation suivante[5]:

$$E = [(es - ea)/ H] * f (v) \quad \textbf{(II.12)}$$

Où :

f(v) - fonction du vent.

Plusieurs auteurs considèrent que l'influence de la pression atmosphérique H sur l'évaporation est très faible. Cette influence est souvent masquée par l'action d'autres éléments météorologiques et elle peut être négligée dans les calculs de l'évaporation.

La fonction du vent s'exprime sous plusieurs formes mathématiques et il n'existe pas un avis commun aux auteurs. Il faut souligner que plusieurs paramètres influent sur la fonction du vent.

La formule de calcul de l'évaporation proposée est la suivante:

$$E = 0{,}233\ n\ (es - ea)\ (1 + 0{,}39\ V) \quad \textbf{(II.13)}$$

Où :

E - évaporation, mm

es - tension de vapeur d'eau saturante à la température de la surface évaporante, mb;

ea - tension de vapeur d'eau dans l'atmosphère, mb; (es -ea) - déficit de saturation dans l'atmosphère, mb;

V - vitesse du vent, m/s;

n - nombre de jours du mois considéré.

La différence entre les valeurs calculées par la formule (II.13) et mesurées au niveau de différents barrage en exploitation ne dépasse pas ± 25 %.L'erreur systématique de calcul n'apparaît pas. Cette différence n'est pas tout à fait homogène (un petit peu élevée en hiver et en automne et faible en printemps et en été) durant l'année (BOUTOUTAOU, 1995).

4.1.1- Exemple de calcul de l'évaporation des plans d'eau par la méthode hydrométéorologique :

Calcul de la valeur moyenne mensuelle et annuelle de l'évaporation du plan d'eau de la cuvette du barrage Foum El Gherza (Biskra)

Données de base

1. Les données météorologiques nécessaires au calcul de l'évaporation sont empruntées de l'Atlas climatologique (wilaya de Biskra) de L'ONM (Office National de la Météorologie) sont les suivantes :

Tableau II.1: Les données météorologiques nécessaires au calcul de l'évaporation (ONM, 1992)

Mois / caractéristiques	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Température de l'air, ta, °C.	11.7	13.6	16.4	19.8	24.3	30.2	33.4	32.5	28.0	21.7	15.8	12.5
Tension de vapeur, Ca, mb	7.2	7.8	7.5	8.4	1.0	11.7	12.1	13.7	14.6	12.0	9.6	8.0
Vitesse du vent, V m/s	3.6	3.9	4.4	4.4	4.9	4.2	3.5	3.5	3.2	3.2	3.2	3.3

Solution :

La température de la surface évaporante (température de l'eau (t_e), nécessaire pour la détermination de la tension de vapeur d'eau saturante (e_s) ne figure pas dans les Atlas climatologiques. Elle peut être déterminée en fonction de la température de l'air (t_a) et la tension de vapeur d'eau de l'atmosphère (e_a) en utilisant l'abaque donnée en annexe 2, et par conséquent la tension de vapeur d'eau saturante (e_s) par la table donnée en annexe3.

La détermination de la température de l'eau (t_e) et la tension de vapeur d'eau saturante (e_s) est donnée dans le tableau n II.2:

Tableau II.2 : Détermination de la température de l'eau (te) et la tension de vapeur d'eau saturante (es) (ONM, 1992)

Mois / Caractéristiques	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Température de l'air, ta, °C.	11.7	13.6	16.4	19.8	24.3	30.2	33.4	32.5	28.0	21.7	15.8	12.5
Tension de vapeur d'eau , ea, mb.	7.2	7.8	7.5	8.4	10.0	11.7	12.1	13.7	14.6	12.0	9.6	8.0
Température de l'eau, te, °C.	11.1	13.0	14.4	17.6	21.0	25.8	29.4	28.8	24.9	20.4	14.5	12.4
Tension de vapeur saturante es, mb.	13.2	15.0	16.4	20.1	24.9	33.2	41.0	39.6	31.5	24.0	16.5	14.4

L'évaporation de la surface du plan d'eau du barrage Foum El Gherza (Biskra) est donnée par la formule :

$$E = 0{,}233\ n\ (es - ea)\ (1 + 0{,}39\ V);$$

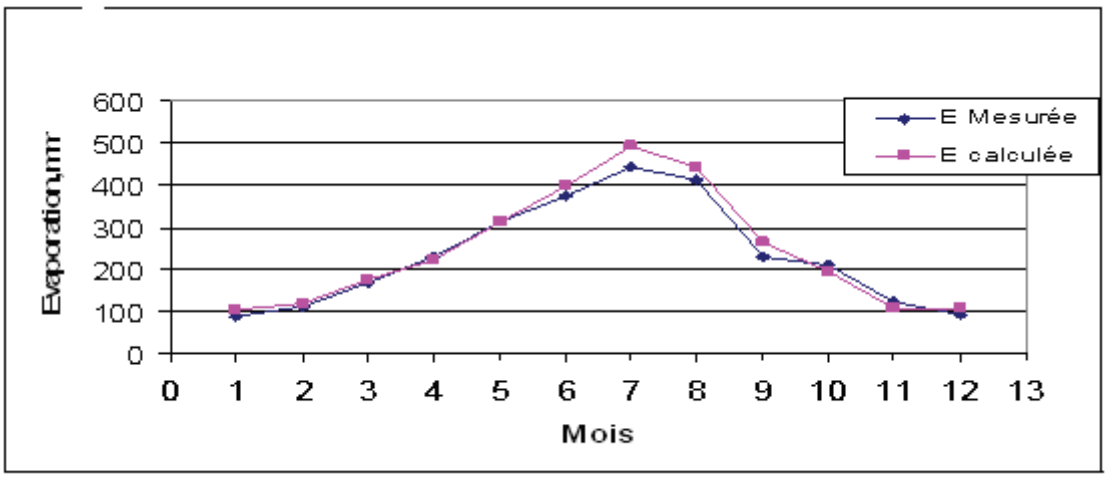
Tableau II.3 : Résultat de calcul de l'évaporation (ONM, 1992)

Mois / caractéristiques	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	année
n	31	28.5	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	---
es, mb	13.2	15.0	16.4	20.1	24.9	33.2	41.0	39.6	31.5	24.0	16.5	14.4	---
ea, mb	7.2	7.8	7.5	8.4	10.0	11.7	12.1	13.7	14.6	12.0	9.6	8.0	---
es - ea, mb	6.0	7.2	8.9	11.7	14.9	21.5	28.9	25.9	16.9	12.0	6.9	6.4	---
V, m/s	3.6	3.9	4.4	4.4	4.9	4.2	3.5	3.5	3.2	3.2	3.2	3.3	---
E ,mm	104	120	174	222	313	396	493	442	265	195	108	106	2938

Il est intéressant de comparer les valeurs de l'évaporation calculées par la formule (II.13), à celles observées au barrage Foum El Gherza.
La comparaison des valeurs calculées et observées de l'évaporation est présentée dans le tableau n°II.4donnée ci-dessous :

Tableau II.4 : Valeurs calculées et observées de l'évaporation est présentée (ONM, 1992)

Mois / caractéristiques	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Année
Evaporation observée, Eobs (barrage Fourm El Gherza)	88	110	170	229	313	375	443	413	230	210	121	92	2794
Evaporation calculée, Ecal (formule (10))	104	120	174	222	313	396	493	442	265	195	108	106	2938
Erreur, $(E_{cal} - E_{ob}) / E_{obs}$ 100 %	18	9	2	-3	0	6	11	7	13	-7	-11	15	5%



Graphe II.1 : Comparaison des évaporations calculée et mesurée au barrage Foum El Gherza

5-Estimation de l'évaporation des nappes d'eau superficielles au Sahara

Dans les zones arides, il y a une forte évaporation puisque l'ensemble des facteurs se trouvent réunis ; une température de l'air souvent élevée pendant les saisons sèches, une forte insolation presque continue durant toute l'année et une présence considérable des vents secs (grandes vitesses), les valeurs enregistrées sont de l'ordre de 2 à 3 m/an (REMINI (a), 2005). En plus de ces facteurs s'joute l'humidité relative qui a des valeurs fréquentes de 10% à 20% ; par fois même, on descend à des chiffres plus bas (2% à Tamanrasset). Dans ces conditions les eaux libres sont rapidement évaporées au désert et les sols humides desséchés (DUBIEF, 1953).

5.1-Aperçu sur la mesure de l'évaporation au Sahara

La mesure de l'évaporation au Sahara, comme pour le reste des paramètres météorologiques débute au 19ème siècle. THEVENET dans son ouvrage ''Essai de climatologie algérienne'' (1896) publie les premiers chiffres de l'évaporation dans les régions algériennes. (DUBIEF 1949). Pour Pierre ROGNON (1996) les nappes d'eau libre permanentes sont rares en régions sèches et leur évaporation, d'après DUBIEF (1953), est très mal connue. Les seules estimations que l'on peut donner, toujours d'après Dubief, sont basées sur des mesures faites avec des évaporomètres Piche. Cet instrument de mesure placé dans des abris météorologiques, très sensibles à l'environnement local, présente des mesures qui sont pour des auteurs sans rapport avec l'évaporation réelle d'une nappe d'eau libre, et pour d'autres acceptables à condition d'admettre que les valeurs trouvées sont sensiblement le double de la valeur réelle de l'évaporation.

L'évaporation au Sahara varie d'un point à un autre ainsi que dans le temps. Pierre ROGNON (1996) dit que dans les régions arides, en particulier dans les oasis, la transpiration des plantes cultivées crée une atmosphère anormalement humide (effet d'oasis) qui diminue l'évaporation souvent de moitié.

5.2-Calcul de l'évaporation des plans d'eau au Sahara

Pour évaluer l'évaporation au Sahara deux sorts de méthodes ont été employées :

* **Méthode indirecte :** C'est une méthode qui sert à calculer l'évaporation à partir des données météorologiques. Plusieurs formules ont été employées, leur abondance prouve leur imprécision. Toutes dérivent de la forme de DALTON :

$$E = (F - f) / P \quad \text{.....(II.14)}$$

F est la tension maxima de la vapeur d'eau à la température de la nappe d'eau superficielle,

f la tension de vapeur existant dans l'air en contact avec cette nappe,

P la pression atmosphérique (DUBIEF, 1949)

Pour Dubief toutes ces formules donnent des résultats pratiques encore plus décevants que ceux obtenus avec les appareils précédents.

Parmi les méthodes indirectes de calcul de l'évaporation des plans d'eau dans les zones arides et semi-arides, on trouve celle de BOUTOUTAOU (1995),

$E=0.403.n.D^{0.73}(1+0.39\ V)$,

Où :

E : Evaporation du plan d'eau ;

n : Nombre de jours du mois considéré (pour les calculs de l'évaporation mensuelle, pour janvier par exemple n=31 jours etc…, pour les calcul journalières de l'évaporation n=1) ;

V : Vitesse du vent en m/s ;

D : Déficit de saturation de l'air en millibar

$$D=0.0632\ (100-H)\ e^{0.0632t}$$

H : Humidité de l'air en % ;

t : Température de l'air en °C.

** **Mesures directes :** Pour ces mesures directes on emploie deux types d'appareils. Les premiers, sont d'emploi plus fréquent chez les météorologistes, tels que :

- **Evaporomètre Piche :** Il est constitué par un tube cylindrique en verre de 25 cm de long et 1,5 cm de diamètre; ce tube gradué est fermé à sa partie supérieure, tendis que son ouverture inférieure est obturée par une feuille circulaire de papier filtre normalisé de 30 mm de diamètre et 0,5 mm d'épaisseur fixée par capillarité et maintenue par un ressort. L'appareil ayant été rempli d'eau distillée, celle-ci est évaporée progressivement par la feuille de papier filtre ; la diminution du niveau de l'eau dans le tube permet de calculer le taux d'évaporation. Cet appareil est installé sous abri (fig.II.1).

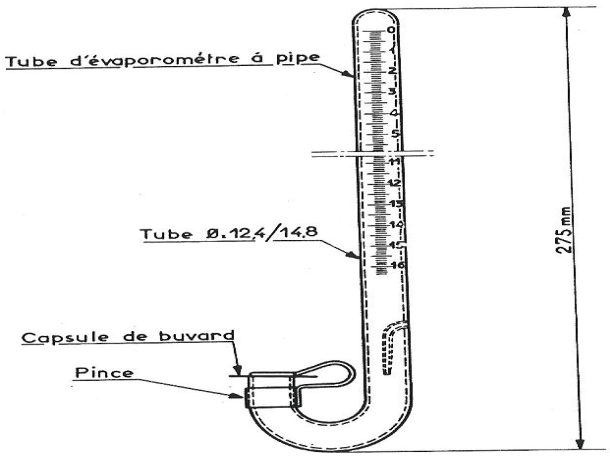


Figure II.1 : Evaporomètre Piche

Dans les régions sahariennes, selon (G et D DUBOST, 1983), l'évaporation

mesurée par l'évaporomètre Piche (Ep) est utilisée pour la détermination de l'ETp en utilisant la formule suivante :

$$ETp_a = n\ Ep \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \textbf{(II.15)}$$

ETp_a est l'évapotranspiration d'origine advective (dû au vent et à la sécheresse de l'air) et elle est toujours supérieure à l'ETp d'origine radiative.

$$n = k\ ((\gamma + \Delta\theta)/(\gamma + \Delta t)) \text{ avec :}$$

γ : constante psychrométrique

- Evaporomètre Wild : Il est constitué par une balance du type « pèse-lettres » dont le plateau supporte un bassin contenant de l'eau (surface : 250 cm2 ; profondeur : 35 cm) ; on enregistre les variations de poids du bassin. Il présente deux inconvénients : le volume d'eau est très faible et le rôle thermique des parois est prépondérant ; le vent peut faire osciller le bassin et fausser les mesures (REMRNIERAS, 1999)(fig.II.2).

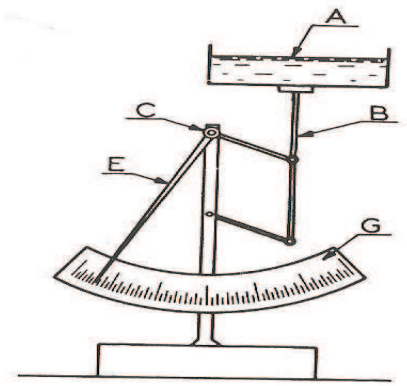


Figure II.2 : Evaporomètre Wild

- **Evaporomètre à surface poreuse :** L'atmomètre Livingston est essentiellement constitué par une sphère creuse de porcelaine poreuse d'environ 5 cm de diamètre et d'un centimètre d'épaisseur; elle est remplie d'eau distillée et communique avec un réservoir de même liquide qui assure en permanence le remplissage parfait de la sphère et permet la mesure du volume évaporé.

Dans l'atmomètre Black Bellani, la sphère est remplacée par un mince disque de porcelaine poreuse noircie de 75 mm de diamètre, la couleur noire de la surface évaporante permet de capter les radiations sur la quasi-totalité du spectre (REMENIERAS, 1959)(fig.II.3).

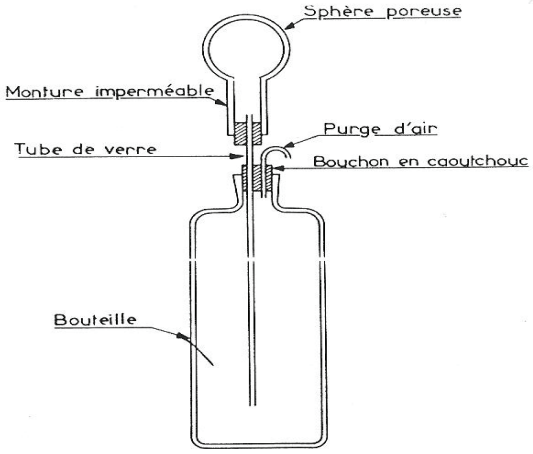


Figure II.3 : Evaporomètre à surface poreuse

Les appareils du deuxième type sont les bacs d'évaporation. Cette méthode est surtout d'usage chez les hydrauliciens. On lui reproche de donner des résultats qui différent suivant les dimensions des bassins employés. En Algérie, le service de la colonisation et de l'Hydraulique, a adopté un bac dit « Colorado » de trois pieds au carré, de 50 cm de profondeur, remplit jusqu'à 5 cm de son bord et enterré à une profondeur telle que la surface de l'eau soit au niveau du sol environnant (DUBIEF 1949). Les bacs Colorado utilisés par l'ANRH ont des sections carrées de 100 cm de coté, d'une profondeur de 60 cm. Depuis 1987 l'ANRH, en plus des bacs Colorado, a commencé à utiliser les bacs classe A. (ANRH, 2002)

6- Cartes de l'évaporation des plans d'eau au Sahara :

6.1-Cartes des époques des maxima et des minima mensuels de l'évaporation en Algérie :

L'évaporation physique possible d'une nappe d'eau libre, ou encore, d'une capacité d'évaporation est théoriquement mal mesurée faute d'une instrumentation précise, donc les cartes de l'évaporation que nous verront nous donnent une idée générale du phénomène. D'après les cartes des époques des maxima et des minima mensuels de l'évaporation, on constate que, dans le Sahara algérien, les maxima se produisent en été (juillet et août) (fig.II.4.a); et les minima se produisent en mois de décembre (fig.II.4.b). (DUBIEF, 1949).

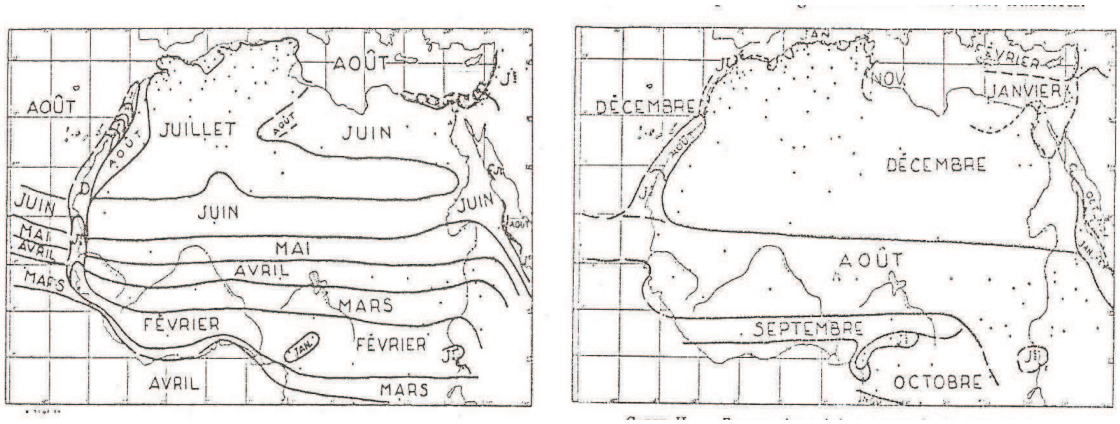


Fig.II.4.a **Fig.II.4.b**

Figure II.4: Cartes des époques des maxima et des minima mensuels de l'évaporation en Algérie (DUBIEF, 1949).

6.2-Carte de l'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle (mm) en Algérie :

L'évapotranspiration potentielle (ETp) est la quantité d'eau qui serait évaporée ou transpirée à partir d'un bassin versant si l'eau disponible pour l'évapotranspiration n'était pas un facteur limitant. Plusieurs formules permettent d'évaluer l'ETp à partir de différentes données météorologiques existantes.

La plus complète et la plus complexe est certainement la formule de Penman basée sur la notion de bilan énergétique (DUBOST, 1992)

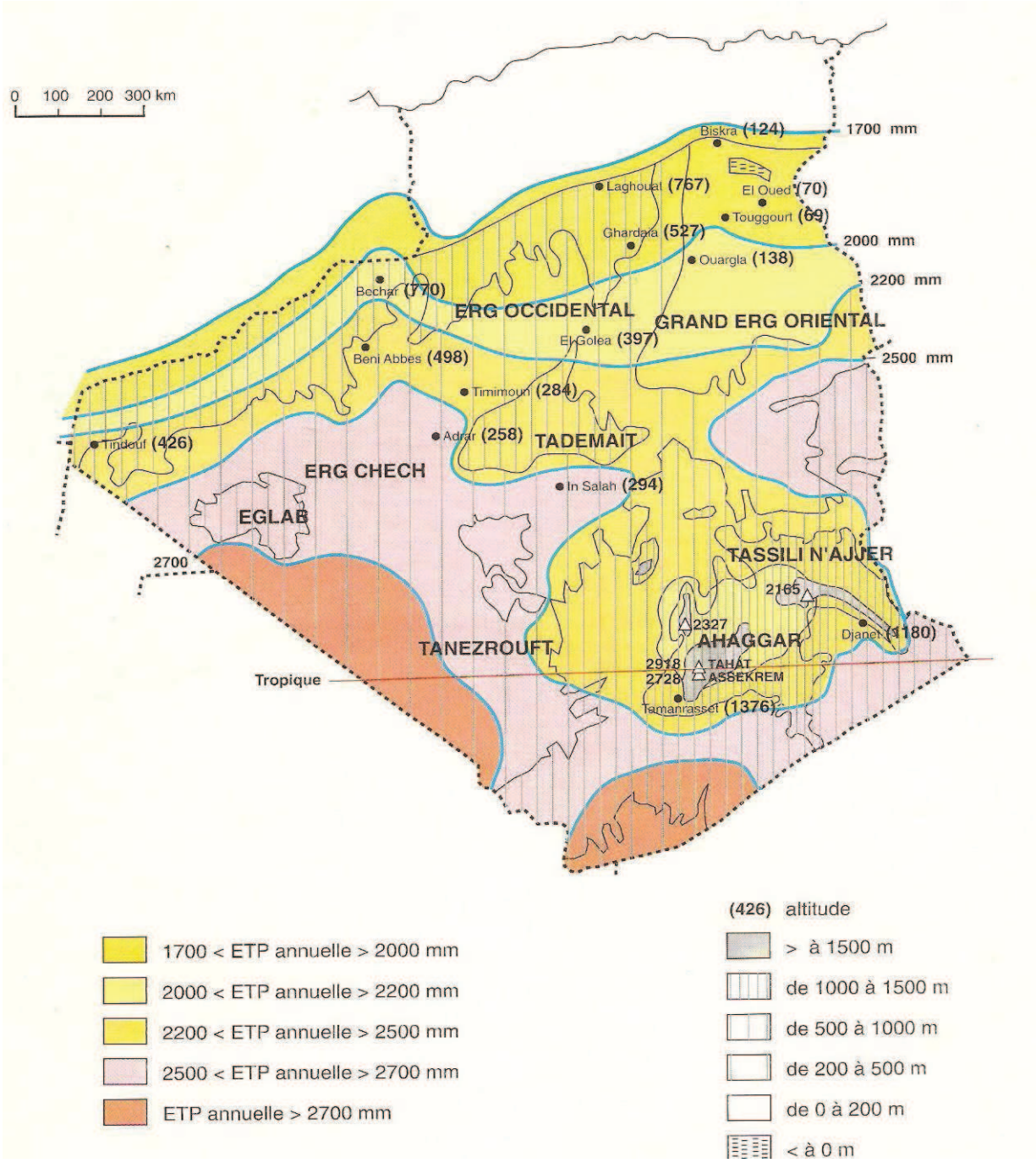


Figure II.5: Cartes de l'évapotranspiration potentielle annuelle sur fond hypsométrique (mm) en Algérie (DUBOST, 1992)

En absence totale des données de l'évaporation ainsi que des données météorologiques, il est possible de la calculer à partir des cartes d'évaporation des plans d'eau.

La carte de l'évapotranspiration établie par l'ANRH ne fournie pas des valeurs de l'évaporation du plan d'eau. Les valeurs tirées de cette carte peuvent conduire à des erreurs aberrantes.

6.3-Carte d'évaporation moyenne annuelle (mm) des plans d'eaux en Algérie:

BOUTOUTAOU (1995) a établi deux cartes, une où on a découpé l'Algérie en quatre régions dont l'évaporation mensuelle est distribuée en pourcentage (Fig. II.6),

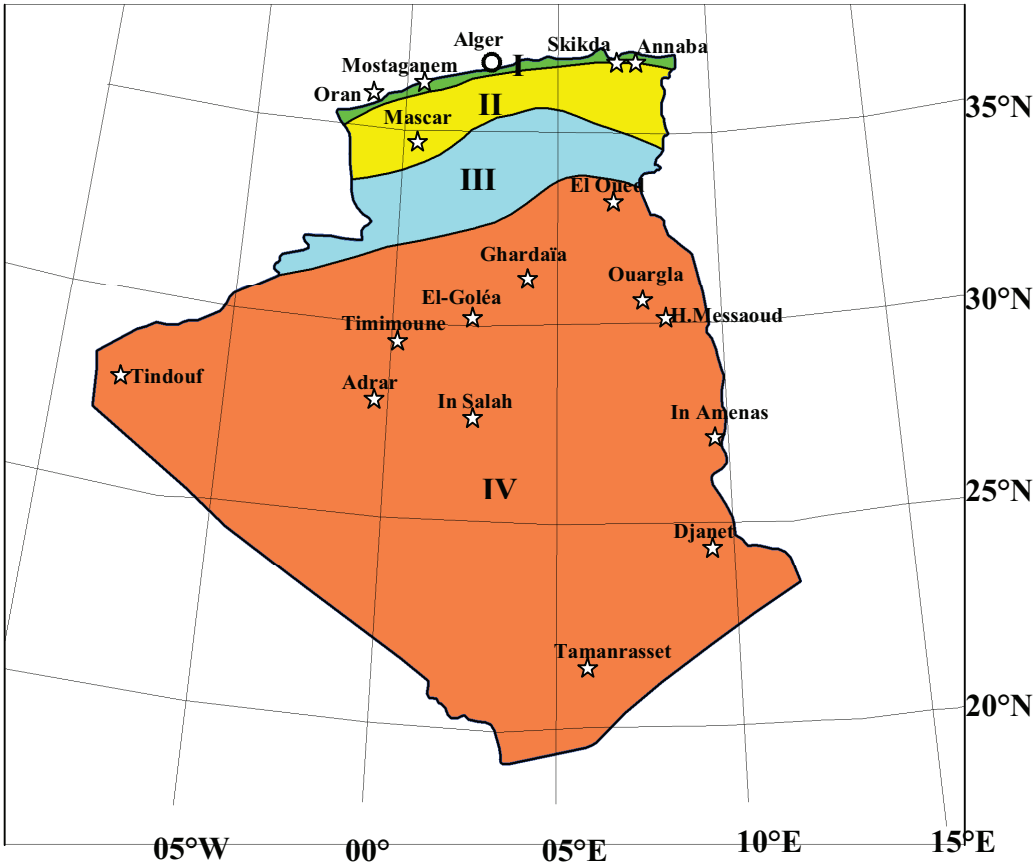


Figure II.6: Carte de distribution de l'évaporation mensuelle en pourcentage selon régions géographiques (BOUTOUTAOU, 1995)

et l'autre de l'évaporation moyenne annuelle (mm) des plans d'eau en Algérie(Fig. II.7), dans cette carte on a tracé les courbes d'égale évaporation des plans d'eau.

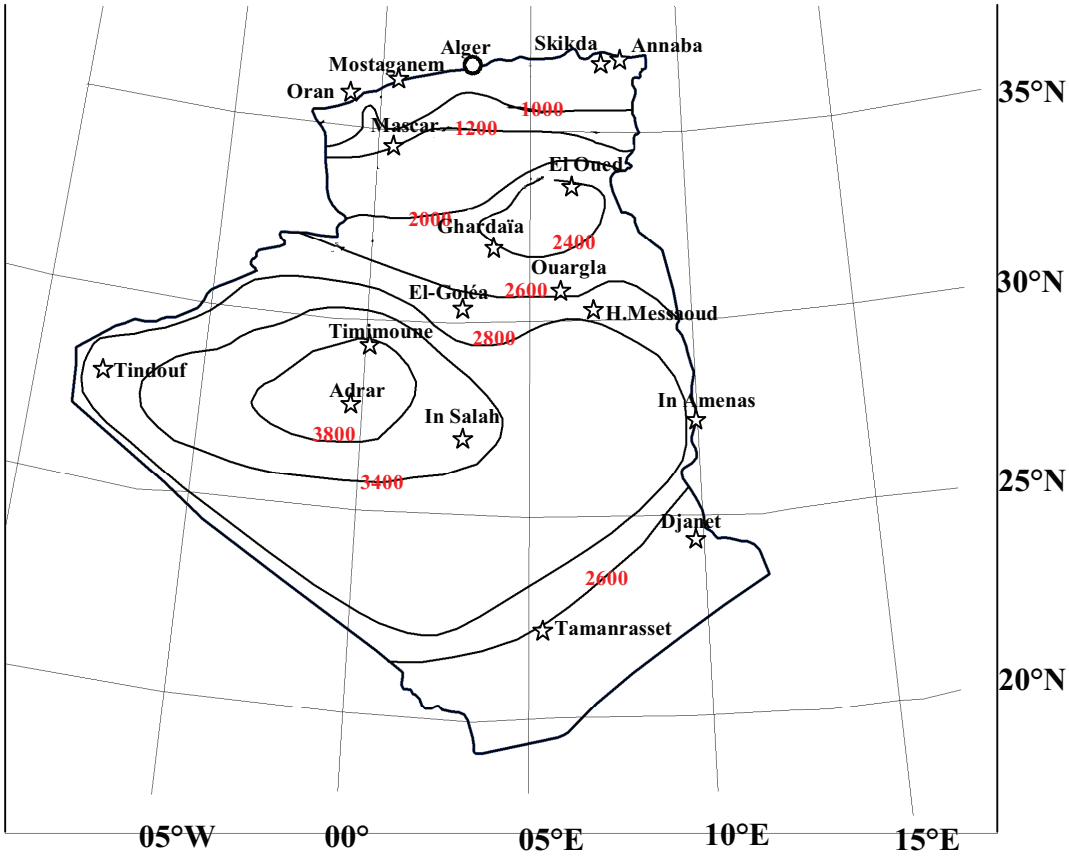


Figure II.7: Carte de l'évaporation moyenne annuelle (mm) des plans d'eau en Algérie (BOUTOUTAOU, 1995)

CHAPITRA III
REDUCTION DE L'EVAPORATION DES PLANS D'EAU

Les eaux de surface, quelles soient dans des lacs ou dans des barrages, peuvent être diminuées par infiltration qui est liée aux propriétés des couches du sol de ces réservoirs et par évaporation qui est fonction des caractéristiques climatiques de la région (FRENKIEL, 1965).

Les pertes par infiltration peuvent être minimisées par plusieurs méthodes (un lit de sable fin bien compacté, un lit en béton armé dans les barrages etc..). En tous les cas la minimisation des pertes par infiltration n'est pas notre objectif dans ce travail, ce qui nous intéresse de plus c'est les méthodes de minimisation des pertes par évaporation.

1- Méthodes de réduction de l'évaporation

Au vu du nombre de techniques pour réduire l'évaporation, nous les avons classées en quatre catégories :

-Réduction de l'effet de l'énergie solaire disponible

-Stockage

-Films monomoléculaires

-Autres

1.1- Réduction de l'effet de l'énergie solaire disponible

L'énergie solaire est l'un des facteurs principaux de l'évaporation des plans d'eau, sa réduction implique la réduction de cette dernière. Pour réduire l'énergie solaire nous procédons à :

- Réduire la surface de l'eau exposée au soleil par couvertures flottantes de cire, qui peut réduire jusqu'à 85% (ANONYME, 1974) de polyéthylène, des perles microscopiques, (FRENKIEL, 1965)

- Changer les caractéristiques par le changement de la couleur d'eau, l'ombrager la surface, et l'utilisation des barrières (JONES 1992)

- L'usage des surfaces réflectrices qui réduises jusqu'à 40% par l'utilisation de huit matières choisis par Cooley et Myers après étude (exemple: asphalter béton, caoutchouc du butyle blanc, etc…) (JONES 1992)

1.2- Stockage

Le réservoir d'eau (plan d'eau) est remplis de sable, l'eau est emmagasinée dans les pores et son niveau est maintenu à 30 cm au-dessus da la surface. Les roches et les pierres réduisent le volume du réservoir jusqu'à 55%, mais elles réduisent l'évaporation à 90% (ANONYME, 1974).

1.3- Films monomoléculaires

Cette méthode, qui est l'objet de ce travail, consiste à utiliser des alcools, des acides gras à long chaîne, des amines et des cétones qui sont mises en contact avec l'eau d'où la formation d'une couche très mince appelée ''film''. (CHITOUR, 2004)

1.4- Autres

Il y a d'autres méthodes données par FRENKIEL (1965), pour réduire l'évaporation telles que :

- L'élévation des réservoirs, car pour un réservoir de haute altitude, l'évaporation est moins importante que pour un réservoir situé à basse altitude.
- L'air bouillonné, pour les réservoirs profonds où une proportion considérable de l'eau reste stocker froide pendant l'année. La technique consiste essentiellement à bouillonner l'air à partir du fond du réservoir d'où le mélanger artificiellement et casser la stratification. L'eau froide remonte à la surface et l'évaporation de cette façon est réduite.
- Les brises vent pour être efficace, doivent présenter une barrière dense au niveau du sol. Les brise-vent composés des végétaux sont à l'origine des pertes par l'évapotranspiration. L'efficacité des brise-vent non végétal sur les petits réservoirs a été étudiée par Corneille (1963). Il démonte que l'évaporation est réduite de 9 pour cent pour une vitesse moyenne du vent était 10 m.p.h.

2- Réduction de l'évaporation par les films monomoléculaires

2.1- Notions

Les films monomoléculaires sont des surfaces minces formées par des acides gras et des alcools à longues chaînes au dessus de l'eau, en plus de ces deux produits chimiques s'ajoutent les amines et les cétones. Pour qu'il y soit une formation d'un film stable, il faut que l'alcool ou l'acide gras soit d'une longue chaîne hydrocarbonée et non soluble dans l'eau (CHITOUR, 2004). Les films monomoléculaires peuvent exister en trois états: gazeux qui ne se rencontrent que rarement, liquide et solide.

La présence d'une monocouche sur une surface d'eau peut augmenter l'épaisseur de la couche stagnante d'air sur la surface d'où réduire le taux d'évaporation de l'eau (MACRITCHIE, 1968). La capacité d'une monocouche de retarder l'évaporation de l'eau sur laquelle elle est étendue est souvent rapportée comme la réduction fractionnaire dans le taux de l'évaporation de l'eau, cette fraction varie avec les conditions expérimentales (BARNES, 1993)

2.2- Historique

En 1914 pour éviter la formation du brouillard, Onofrio a utilisé l'huile pour réduire l'évaporation des rivières et des lacs en France. Les études au laboratoire sur les films formés par l'huile ont débuté en 1920 (FRENKIEL,1965) ; Les premières expérimentations sur la réduction de l'évaporation sur champ en utilisant les alcools (Hexadecanol et Octadecanol) étaient réalisées en Australie dans les débuts des années 50, où ils ont obtenu une réduction de 30%.(GUGLIOTTI & al,2005). Aux Etats-Unis en Inde en U.R.S.S et en Israël, les premières expériences ont été réalisées vers la fin des années 50 et début des années 60, et les résultats ont données des réductions entre 25% et 68%, pour des conditions météorologiques différentes (FRENKIEL 1965). La tension superficielle est une contrainte qui existe à la surface de séparation de deux milieux. Cette tension est due au fait que les molécules, situées à l'interface entre les milieux, ne sont pas soumises aux mêmes forces de VAN DER WAALS de la part de toutes leurs voisines (LE XUAN & al. , 2005). La tension superficielle a souvent été exprimée en $dyn \cdot cm^{-1}$ ($1\ dyn \cdot cm^{-1} = 1\ mN \cdot m^{-1}$) (LE NEINDRE, 1993)

La tension superficielle est mesurée par :

- Ascension capillaire par loi de JURIN en utilisant un tube capillaire plongé dans un liquide qui monte sous l'effet des contraintes de tension superficielle, jusqu'à une hauteur h; ou par cuve «cunéiforme» qui est formée de petit deux lames de verre s'appuyant l'une contre l'autre avec un angle. La section de la surface dessine alors une hyperbole équilatère dont on analyse la forme à l'aide du dispositif d'acquisition et de

traitement d'image (Webcam ou appareil photo numérique + logiciel Image + procédure Igor d'extraction du bas du ménisque)(L. LE XUAN & al. , 2005).

- Méthodes d'arrachement, dans ces méthodes, on mesure la force nécessaire pour arracher un anneau ou une plaque placée sur la surface d'un liquide.et nous avons :

. Tensiomètre de Lecomte du Noüy

. Mesure par arrachement avec lame de WILHELMY (utilisation d'une balance électronique fabriquée par la sté. NIMA) (LE NEINDRE, 1993).

. Méthode de la mesure des ondes superficielles qui est basée sur la mesure du mouvement brownien à l'interface, est très intéressante pour mesurer des tensions superficielles très faibles. On utilise une technique de diffusion de la lumière sur la surface pour provoquer des ondes de surface de faible amplitude. (L. LE XUAN & al. ,2005).

La tension superficielle s'inverse proportionnellement avec la température et ceci d'après la relation générale, Equation d'EOTVOS ou la relation empirique de RAMSAY-SHIELDS ; pour la pression MASSOUDI et KING ont montré expérimentalement, en utilisant la méthode de l'ascension capillaire quelle avait une influence notable sur la pression superficielle (CHITOUR, 2004)

2.3- Méthodes d'application des films monomoléculaires

Les films monomoléculaires peuvent être appliqués sur les surfaces des réservoirs ou des lacs par plusieurs méthodes telles que :

- Méthode des grains radeaux : C'est une méthode qui se base sur l'utilisation du produit (alcool) sous sa forme solide (flocons qui flottent au dessus de la surface de l'eau). Les inconvénients de cette méthode demeurent que l'évolution du film sur la surface de l'eau est lente, les grains sont couverts par des solides organiques ou non, et cette couverture empêche l'étalement du film.

- Méthode de solvant : Dans cette méthode le produit (alcool) est dissout dans une fraction de pétrole volatil (Ex:1g d'Hexadécanol à 100 mL d'ether pétrole), l'utilisation de ces solutions sur les surfaces de l'eau a donné des résultats de réduction de l'évaporation de l'ordre de 25% à 30%.

- Application comme émulsion : dans cette méthode la technique consiste à mélanger la poudre et l'eau dans un petit réservoir monté dans un bateau. Le mélange est continuellement agité avec des agitateurs mécaniques pour maintenir une consistance uniforme.

- Application de l'aérosol chaude : Dans cette méthode l'alcool du cétylique fondu est pulvérisé d'un récipient pressurisé chauffé par un petit bruleur de kérosène, L'aérosol est solidifié dans l'air dans une bonne poudre qui est tombée sur surface de l'eau pour former une monocouche.

- Les immenses réservoirs d'eau, l'utilisation des aéronefs pour l'application des films monomoléculaires en dispersant le produit (alcool) qui est sous forme de poudre.

2.4- Propriétés d'étalement des films monomoléculaires

L'étalement des films monomoléculaires est l'un des phénomènes que nous devons prendre en considération; beaucoup de travaux de laboratoire ont été effectuées pour la détermination des propriétés de ce phénomène telles que :

- Le taux d'étalement : Il est relatif à un coefficient d'étalement E mesurant l'aptitude à former une couche superficielle devrait être positif, et il varie avec la température. Les études faites sur l'Hexadecanol (en poudre) ont optées pour un taux de $10,1x10^3$ molécules/sec/cm soit un coefficient de $2,4x10^{12}$ molécules/dyne/sec. (CHITOUR, 2004) (FRENKIEL, 1965)

- **La vitesse d'étalement :** Elle est influencée par les composantes du produit utilisé. Le meilleur résultat était pour un mélange de 45% d'Hexadecanol, 40% d'Octadecanol et 10% d'alcool oléique (FRENKIEL, 1965).

- L'effet des composantes chimiques: Le taux de l'étalement décroît quand la longueur de la chaîne hydrocarbonée croit.

- L'effet des caractéristiques physiques : McArthur et Durham (1957) ont étudié l'effet de dimension de perle et la structure de la surface sur l'étalement de l'alcool. Ils ont trouvé que pendant que l'effet de la dimension pourrait être expliqué par la Variation du périmètre du solide-eau-air, la nature de la surface solide avait aussi une influence marquée sur la vitesse initiale de l'étalement. Ils concluent que les meilleurs résultats s'obtiennent avec les particules cristallines fines.

2.5- La résistance à l'évaporation en présence des monocouches :

La résistance à l'évaporation en présence des monocouches sur la surface de l'eau dépend de plusieurs facteurs tels que la pression du film, la température de l'eau, la vitesse du vent et la pureté de substance formant le film.

2.5.1- pression du film : Pour le cas des monocouches à base des acides à longue chaîne la résistance à l'évaporation est indépendante de la pression de la surface. Dans le cas des monocouches à base des alcools à longue chaîne tels que l'Hexadecanol et

l'Octadecanol il y a une augmentation dans la résistance à l'évaporation avec la pression de surface (voir fig.).

Pour le cas du mélange Hexa/Octa à différents proportions la résistance à l'évaporation en fonction de la pression du film est donnée dans la fig.

Ce qu'il est à remarquer c'est qu'à des faibles pressions la résistance de chaque mélange est plus importante que dans le cas de l'alcool pur.

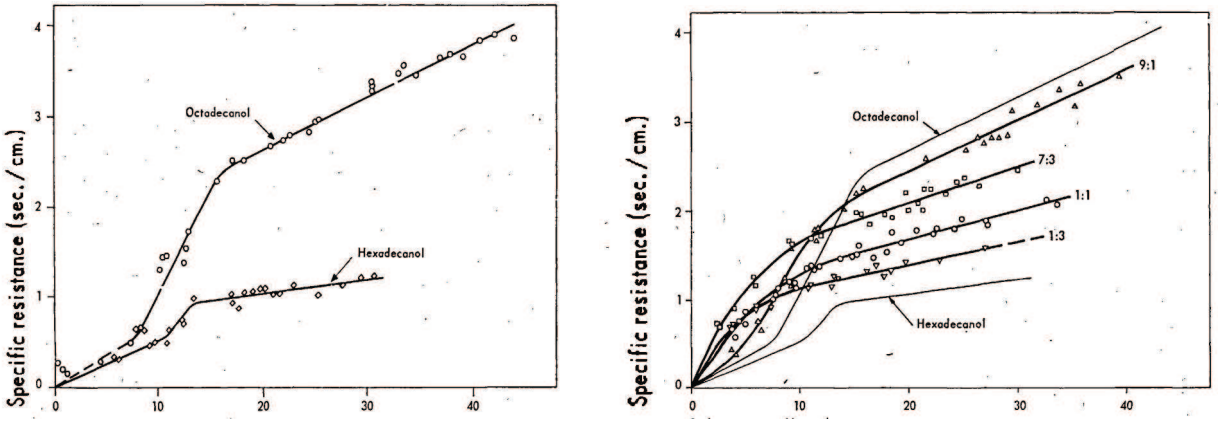


Figure III.1: La résistance à l'évaporation en fonction de la pression de surface (FRENKIEL, 1965).

2.5.2- Température :

La mesure de l'effet de la température effectuée par RAMDAS et NARASIMHAN (1957) sur l'évaporation d'une eau couverte par un film à base de l'Hexadecanol pur a donné des résultats qui ont montré un abaissement régulier dans la réduction de l'évaporation avec l'augmentation de la température de l'eau.

Pour l'aplatissement de la courbe de l'Octadecanol et la diminution dans la réduction de l'évaporation pour le Docosanol ($C_{22}OH$) à des basses températures comme motionné dans la fig., ils sont dus aux difficultés d'étalement à ces températures.

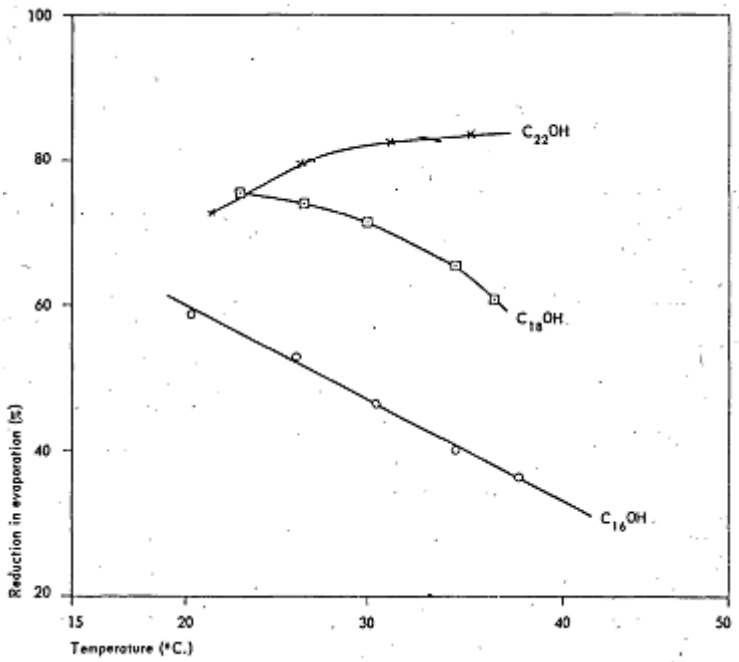


Figure III.2: La réduction à l'évaporation en fonction de la température (FRENKIEL, 1965).

2.5.3- La vitesse du vent : L'influence de la vitesse du vent sur la réduction de l'évaporation par les monocouches a été étudiée par Mansfield. Sa conclusion était que le taux réel d'évaporation d'eau couverte par une monocouche devient presque indépendant de la vitesse du vent au delà d'une vitesse limitant (laquelle est déterminée par les conditions atmosphériques).

2.5.4- Pureté de la matière : Résistances de l'évaporation d'échantillons commerciaux d'Hexadecanol et d'Octadecanol, et leurs mélanges dans plusieurs proportions, a été enquêté par Barnes et La Mer (1962) et La Mer et Aylmore (1962). Leur conclusion était que ces produits sont considérablement inférieurs aux matières pures, mais qu'ils peuvent être améliorés en maintenant les films sous pression. Ils recommandent ces produits commerciaux soit testé et alors plus loin a purifié avant leur application au champ.

2.6- Impact des films sur les plantes et les animaux aquatiques :

Les monocouches de l'Hexadecanol et dans l'absence de vent n'ont causé aucune réduction dans le coefficient du transfert de l'oxygène, donc pas d'influence sur la vie des plantes et des animaux qui vient dans l'eau.

D'autre part les déclarations qui affirment qu'il n y a aucun effet toxicologique d'Hexadecanol utilisé pour la réduction de l'évaporation ont été faites par plusieurs autorités de la santé publiques américaines (Comité de Collaborateurs, 1957; Eaton,

1958; Cruse et Harbeck, 1960). Et les résultats des trois mois d'étude dans le Lac Hefner en 1958 confirment ces déclarations car on n'a pas noté d'effets nuisibles.

2.7- Evaluations économiques :

Le coût pour conserver de l'eau par la réduction de l'évaporation est calculé en divisant le total de la somme de dépenses opérationnelles pendant la période de l'épreuve par le montant d'eau sauvée. Il est gouverné pour une grande part par le coût de matière.
Car du coût total de $27.500, le coût d'Hexadecanol est de 73.5 %, alors que le coût de travail était 15 %, et le coût sauvé par m3 pour l'entière période de l'épreuve était de $0.05 au lac Hefner et du coût total des traitements de $7.400, 52 % est le coût des matières et 32 % et celui de travail, et le coût sauvé par m3 était de $0.1 au lac Sahuaro.
Il faut savoir que les chiffres cités ci-dessus sont en rapport seulement avec les grands réservoirs. Pour les petits réservoirs de l'ordre de 0.4047 hectare ou moins, le montant de matière retardant exigé pour une unité de surface pour obtenir une réduction de l'évaporation est plus grand que celui exigé pour les grandes étendues (FRENKIEL, 1965).

CONCLUSION GENERALE

Les expérimentations réalisées qui comportent l'étude de l'efficacité des films monomoléculaires à base des alcools avaient aussi comme objectif la détermination du taux de réduction de l'évaporation des plans d'eau pour différentes alimentations en alcool et enfin le choix de l'alcool suivant les critères technique et économique.

Les résultats obtenus montrent que les films monomoléculaires à base du mélange Hexa/Octa donnent un taux de réduction le plus élevé (29.9%) pour une alimentation régulière une fois chaque trois jours. Cette constatation n'est pas la même dans le cas où l'alimentation se fait une fois par décade car le taux de réduction des pertes par évaporation diminue et devient inferieur à celui d'un bac alimenté par l'Hexadecanol.

Pour le cas d'un film à base de l'Octadecanol le taux de la réduction de l'évaporation est faible que se soit pour les alimentations d'une fois par trois jours ou d'une fois par décade. Il faut souligner que pour une longue durée le film à base de l'Octadecanol devient inefficace et l'évaporation est presque identique à celle remarquée dans un bac non alimenté (eau pure), à cause de la destruction de ce film sur la surface d'eau.

Dans le cas des films à base d'Hexadecanol, les différents résultats obtenus montrent qu'il y a une très faible fluctuation de réduction que se soit pour une alimentation de chaque trois jours où cde haque décade. Les taux marqués sont entre 25% et 36%, avec une moyenne de 30%.

Le film à base de l'Hexadecanol en plus de l'avantage de la rapidité d'étalement par rapport a l'Octadecanol, il a une autre caractéristique –l'autoréparation après rupture- qui explique son efficacité malgré le changement dans le dosage. Ces deux caractéristiques avantageuses (étalement rapide et autoréparation) plus le prix bas par rapport à l'Octadecanol (18 euros contre 236 euros), nous permettent d'opter pour l'Hexadecanol. Les résultats obtenus malgré qu'ils soient proches de ceux établis dans d'autres études faites auparavant dans le monde, nécessitent d'autres études approfondies qui prennent en considération autres paramètres : météorologiques, techniques ou économiques, étalés dans le temps.

En résumé nous tenons à conclure que :

1. Dans nous expérimentations, tous les types d'alcools utilisés créent un film monomoléculaire capable de réduire l'évaporation des surfaces des plans d'eau.

2. La réduction de l'évaporation la plus importante, pour des les différents dosages, a été observée dans le bac alimenté par l'Hexadecanol.
3. La réduction de l'évaporation la plus faible, pour différents dosages, a été observée dans le bac alimenté par l'Octadecanol.
4. Le prix de l'alcool utilisé pour un mètre cube d'eau récupéré est égale à environ 30DA/an, établi expérimentalement, il peut être revu et corrigé.
5. Les résultats obtenus ne sont pas tout à fait fiables et nécessitent encore d'autres expérimentations.