

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE -ARBAOUI Abdellah-

DEPARTEMENT D'IRRIGATION ET DRAINAGE

MEMOIRE DE MASTER



Pour l'obtention du diplôme de Master en Hydraulique



Option: IRRIGATION ET DRAINAGE

THEME DU PROJET :

**ESTIMATION ET CARTOGRAPHIE DE
L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE**

**PRESENTÉ PAR :
BOUDJERADA IDRIS**

Devant les membres du jury

Nom et Prénoms	Grade	Qualité
M ^r MEDDI Mohamed	Professeur	Président
M ^r . RASSOUL ABDELAZIZ	M.C.B	Examineur
M ^r . YAHIAOUI SAMIR	M.A.B	Examineur
M ^{me} . AZIEZ WAHIBA	M.A.A	Examinatrice
M ^r BENKACI TARIK	M.C.B	Promoteur

Session - 2015-

Dédicaces

Je dédie ce travail :

*Avant tout à mes chers parents, pour leur soutien immense qu'ils n'ont
Cessé de m'apporter ainsi que les conseils qu'ils m'ont prodigué sans
Les quels j'avoue je ne serai pas ce que je suis aujourd'hui.*

A mes frères et ma sœur

A toute la famille BOUDJERADA

A Mon promoteur Mr Benkaci Tarik

*A mes collègues de l'ENSH sans oublier mes amis Farid, Hamza,
Abdo ,Imad, Kalifa ,Djalal ,fateh, et Samir. Tous les étudiants de
l'Ensh.*

Idriss

REMERCIEMENTS

Avant tout, je remercie le bon Dieu qui a illuminé mon chemin et qui m'a donné la force, ainsi que la bonne volonté pour achever le cursus universitaire et ce modeste travail.

Au terme de cette étude qu'il me soit permis d'exprimer ma profonde gratitude envers tous ceux qui m'ont apporté leur aide.

Je tiens à remercier chaleureusement, Mon promoteur Mer: Benkaci Tarik qui 'a bien voulu m'encadrer durant ce mémoire de fin d'études, et qui a assuré la direction et l'orientation scientifique de ce travail. Je lui exprime mes vifs remerciements

Je profite de l'occasion pour remercier tous mes enseignants de l'ENSH de la première année jusqu'à maintenant.

Je tiens aussi à exprimer mes vifs remerciements à toutes les personnes qui m'ont aidé tout au long de mon travail.

Mon respect aux membres du jury qui me feront l'honneur d'examiner mon travail.

الملخص:

ظاهرتا التبخر و النتح ظاهرتان متلازمتان اذ تعتبران مكونان رئيسيان في دورة الماء في الطبيعة حيث يشكلان مصطلح واحد و يدمجان معا عند تقييمهما. فالتبخر يمس المسطحات المائية و الاراضي المشبعة و الرطوبة في حين ان النتح يعبر عن التنفس الفيزيولوجي () . هذا الازدواج في المصطلح جعل منه ظاهرة معقدة و صعبة التقييم بسبب غياب او نقص الآلات الفعالة للقياس الصحيح والدقيق لهذه الظاهرة. غير ان العودة الى الرياضية و التجريبية اصبح ضرورة لا محيص عنها من اجل تقييم هذه الظاهرة فهذه العلاقات تعتمد على عدة معطيات مناخية من بينها درجة الحرارة، وسرعة الرياح، رطوبة الهواء و كذا عدد الساعات في هذه الدراسة قمنا برسم خرائطية و معايرة العوامل المشكلة للعلاقات الرياضية المستعملة في تقييم النتح و التبخر .

RESUME

L'évapotranspiration est une composante très importante qui entre en jeu dans le bilan hydrique, elle comprend deux termes essentiels : l'évaporation des surfaces du sol humide et des plantes aquatiques ainsi que la transpiration physiologique des végétaux et des plantes.

Cette combinaison complexe rend difficile l'estimation exacte des valeurs de ce phénomène. Cette complexité revient à l'absence des appareils sophistiqués qui nous permettent d'évaluer sans ambiguïté les valeurs de l'évapotranspiration.

Par conséquent le recours à l'utilisation des formules empiriques est devenu impératif. Cependant, ces relations nécessitent parfois plusieurs paramètres climatiques pour avoir une précision souhaitable afin d'exploiter ces valeurs dans plusieurs disciplines notamment l'hydrologie, l'agriculture et la gestion des ressources en eau.

Dans ce mémoire, nous avons étudié les différentes phases consacrées à l'estimation et à la cartographie de l'évapotranspiration potentielle.

Abstract:

The evapotranspiration phenomenal is a one of hydrological quotient entered in the water cycle, it's contains two parts: the first represent evaporation of saturated ground and aquatic area which the second one terminology is transpiration it is a physiological operation of the vegetal species.

This complicated permutation of this phenomenon has then specified one, when it was very complicate in reality computed. However the obligation to return to many empirical relations for estimated this notion of water cycle becomes indispensable, but these relations required sometimes several climatic elements to attain in exactness results to use in evapotranspiration in various areas like hydrology, agricultural hydraulics and management. In this research, we have studied different steps to estimate spatial and temporal of reference evapotranspiration.

Liste des tableaux :

Chapitre III : Méthodes d'estimation de l'évapotranspiration potentielle

Tableau III.N°1 Estimation de l'ETP avec la méthode de Turc (1960).....	37
Tableau III.N°2 calcul de l'ETP mensuelle avec la formule de Thornthwaite	39
Tableau III.N°3 : Calcul de l'ETP mensuelle avec la formule de Penman	40
Tableau III.N°4: Résultats de calcul de l'ETP.....	41
Tableau III.N°5 Résultats de calcul de l'ETP (Logiciel CROPWAT).....	42

Liste des figures :

Chapitre I

- Figure I.1 :** Mouvements de l'eau dans le continuum sol-plante-atmosphère.....5
Figure I.2 : Exemple de types de périodes végétatives (d'après FAO 1978a).....13

Chapitre II

- Figure II.1 :** Coefficient cultural de l'oignon23
Figure II.2 : Durée de la phase de développement24

Chapitre III

- Figure III.1 :** Mise en œuvre de la case lysimétrique.....29
Figure III.2 : Bac d'évaporation Classe A.....30
Figure III.3 : Bac d'évaporation du Colorado.....30
Figure III.4: Evaporomètre Wild32
Figure III.5 : Evaporomètre de Piche.....33
Figure III.6: Estimation de l'ETP avec la formule de Turc.....37
Figure III.7 : Estimation de l'ET₀ avec la méthode de Blaney-Criddle.....38

Chapitre IV

- Figure IV.1 :** Principe général de la cartographie numérique des sols.....51
Figure IV.2 : Onde électromagnétique monochromatique53
Figure IV.3 : les différentes longueurs d'ondes.....54
Figure IV.4 : cartographie de l'ETP annuelle (d'après Mebarki et Laborde, 2012)57
Figure IV 5 : cartographie de l'ETP annuelle (d'après Mebarki et Laborde, 2012)57

Sommaire

Introduction Générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Etude bibliographique

I.1) Introduction.....	3
I.2 L'eau, le sol et l'atmosphère	3
I-2.1) Mouvements de l'eau et le continuum sol-plante-atmosphère.....	4
I.3 La régulation stomatique	5
I.4 Le sol.....	5
I.4.1 Propriétés physiques et chimique du sol.	6
a- La Texture	6
I.4.2 Facteurs de structuration	6
2.1 Facteurs favorables.....	7
2.2 Facteurs défavorables.....	7
I.4.3 Effet de la structure.....	7
I.5 L'acidité du sol	7
I.6 Les besoins en eau des cultures	8
I.7 Le bilan hydrique	8
1.7.1 Facteurs influençant le bilan hydrique	9
1.7.2 Estimation et calcul des besoins en eau par le bilan hydrique	9
1.7.3 Influence de l'évapotranspiration.....	10
I.8 .1 Importance de l'évapotranspiration en agronomie	10
I.8.2 Importance de l'évapotranspiration en irrigation	13
I.9 Conclusion.....	14

Chapitre II : Etude de l'Evapotranspiration

II.1) Introduction.....	16
II-2 Concept et définition de l'évapotranspiration.....	16
II.2.1 Etude physique de l'évaporation	16
II.3 Différents types de l'évapotranspiration	17

II.3 1. L'évapotranspiration potentielle	17
II.3.2 L'évapotranspiration potentielle de référence (ET ₀).....	17
II.3.3 L'évapotranspiration Maximale (ETM):.....	18
II.3.4 L'évapotranspiration Réelle (ETR)	18
II.4. Facteurs déterminants de l'évapotranspiration.....	18
II.4.2 Les principaux facteurs du pouvoir évaporant.....	19
2.1 Température de l'air	19
2. 2 Le Rayonnement Solaire	19
2.3 Le vent	20
2.3.1 Les anémomètres.....	21
2.3.2 Les girouettes	21
2.4 L'Humidité de l'air	21
II.5 Importance de l'Evapotranspiration en irrigation	22
5.1 Besoins en eau et détermination des coefficients culturaux	22
5.2-Le Pilotage de l'irrigation	24
5.3 Pilotage à partir du bilan hydrique.....	25
Conclusion.....	25

Chapitre III : Méthodes d'estimation de l'évapotranspiration potentielle

III.1) Introduction	27
III.2) Méthodes d'estimation de l'évapotranspiration	27
III.2.1 Méthodes directes	28
III.2.1.a Evapotranspiromètre ou case lysimétrique	28
III.2.1. b. Bacs d'évaporation	30
C. Les bacs placés au-dessus du niveau du sol " Bac class A".....	30
d. Les bacs enterrés : le "Bac Colorado".....	31
e. Les bacs flottants.....	32
III.3.1. Les Evaporomètres.....	32
1- Evaporomètre Wild	32
2- Evaporomètre de Piche	32
III.4.2-Méthodes indirectes	33
1-Développement des formules empiriques.....	33

2-Classification des méthodes d'estimations de l'ETP	34
III.4.2.1. Méthodes du bilan hydrique	34
2.2. Méthodes aérodynamiques	34
III-4-3 Inventaire des méthodes de mesure des formules de l'ETP les plus utilisées....	35
III-4-3 -1-Calcul et estimation de l'évapotranspiration potentielle (E T P)	35
a-Formule de Turc 1960 : basée sur la température et le rayonnement.....	35
b-Formule de Blaney- Criddle 1959 pour 5 jours bilan.....	37
c-Formule de Thornthwaite 1948	38
d-Formule de Penman 1948.....	39
e-Formule dite ANRH.....	42
III.4 Comparaison des modèles d'ETP : revue de la littérature	43
Conclusion.....	44

Chapitre IV : Cartographie de l'évapotranspiration potentielle

IV.1) Introduction.....	45
IV.2 Objectif de la cartographie de l'évapotranspiration potentielle.....	45
IV.2.1 Nécessité de l'estimation de l'évapotranspiration en zone non jaugée.....	45
IV.2.2 Détermination de la représentation cartographique.....	46
a - Toute représentation est une simplification.....	46
IV.3 Méthodes de cartographie de l'ETP	47
IV.3.1-Les méthodes de cartographie automatique	47
IV.3.1-a les tendances.....	47
IV.3.1-b les fonctions Spline.....	47
IV.3.1-c Polygones de Thiessen	48
IV.3.1-d Modèles d'interpolation basés sur des régressions multiples.....	48
IV.3.1-f -Cartographie géostatique.....	48
IV.3.1-e Méthodes d'interpolation basées sur l'intelligence artificielle.....	49
IV-3-2 Cartographie numérique	50
IV-3-2 a-Méthode du radar	51
IV-3-2-b Cartographie satellitaire	52
IV-3-2 1. Bases physiques de la télédétection.....	53
IV-3-2.1-a Rayonnement électromagnétique.....	53

IV-3-2 c-Avantages de la télédétection en hyperfréquences.....	54
IV-3-2 d-Télédétection active/ Télédétection passive	54
IV-3-2 e Evapotranspiration.....	55
IV-4-1 Application de la cartographie de l'évapotranspiration par la méthode Du krigeage.....	55
IV-4-2 Rappel des équations du krigeage (cf. MATHERON)	56
IV-4-3. Le variogramme.....	56
IV-4-4-Etapes de cartographie automatique.....	57
Conclusion.....	58
Conclusion Générale.....	59

Introduction générale

Dans le domaine agricole, l'eau est indispensable pour permettre un bon développement des cultures, et pour obtenir des rendements plus importants, afin de garantir une sécurité alimentaire et socio- économique à moyen et long terme.

L'analyse des conditions climatiques est nécessaire dans l'élaboration d'une étude d'irrigation, ainsi que les paramètres agronomiques de la zone d'étude qui vont nous permettre de prendre les dispositions nécessaires lors de la réalisation du réseau d'irrigation

Les facteurs climatiques conditionnent d'une manière particulière le développement des végétaux. Il est important donc de connaître chacune de ses composantes, afin d'adapter les cultures au type du climat et sous lequel certaines pratiques doivent être prévues pour assurer une bonne production agricole.

L'eau est une denrée rare en particulier dans les régions arides et semi arides, où sa gestion optimale paraît indispensable pour la préserver et la mieux exploiter.

Pour mieux gérer l'irrigation, il est indispensable de bien connaître les quantités à apporter aux plantes. Pour atteindre ce but, il faut bien estimer les quantités perdues. Donc une connaissance de l'évapotranspiration paraît indispensable, car l'évapotranspiration conditionne le bilan hydrique du sol, et donc les quantités d'eau nécessaires qui interviennent dans les doses d'arrosage.

Pour estimer l'évapotranspiration, plusieurs formules ou méthodes ont été élaborées dans différents endroits de la planète et sous divers climats.

- Cependant, l'estimation de l'évapotranspiration potentielle n'est pas chose aisée car plusieurs paramètres interviennent et conditionnent ce paramètre.

C'est dans ce contexte que ce travail s'inscrit dans l'estimation et la cartographie de l'évapotranspiration potentielle.

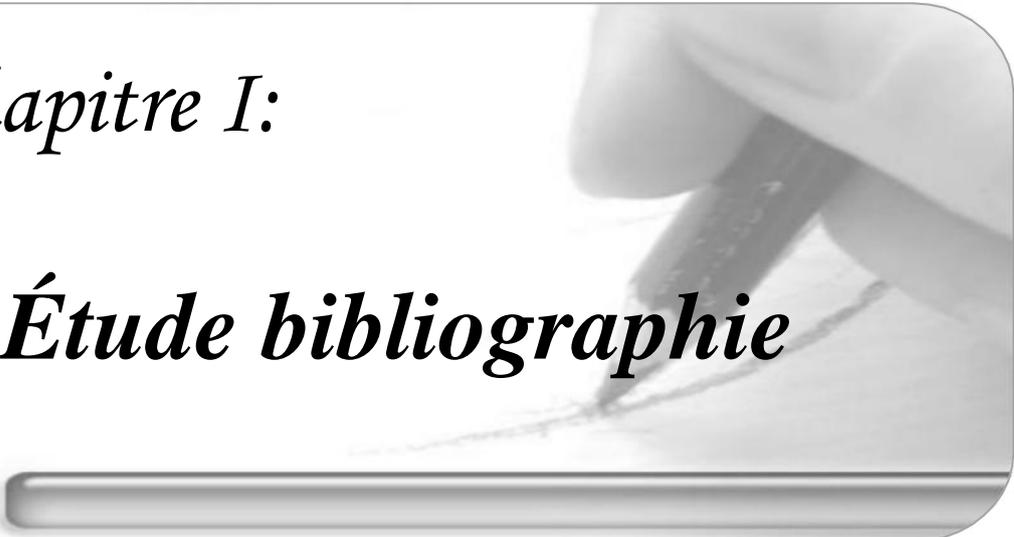
Le présent mémoire est structuré en quatre chapitres :

- Le premier chapitre développe l'étude bibliographique.
- Le deuxième chapitre est consacré à l'étude du phénomène de l'évapotranspiration.

- Le troisième chapitre décrit les méthodes d'estimation de l'évapotranspiration potentielle.
- Dans le quatrième chapitre nous présentons la cartographie de l'évapotranspiration potentielle.

Chapitre I:

Étude bibliographie

A grayscale photograph of a hand holding a pen, writing on a document. The pen is positioned diagonally, and the hand is visible on the right side. Below the text, there is a horizontal line that spans the width of the text area.

Chapitre I : Etude bibliographique

Introduction

L'eau représente un facteur important du développement des végétaux. Ceux-ci sont des organismes fixes qui dépendent pour leur nutrition des facteurs locaux, en particulier de la présence et de la disponibilité de l'eau dans le sol. Il existe un continuum entre l'absorption de l'eau par les racines dans le sol et la perte de l'eau par transpiration au niveau des feuilles **(Hillel, 1988)**.

L'évaporation est le facteur le plus déterminant par rapport aux autres paramètres climatiques. Son rôle conditionne les disponibilités en eau, et les besoins dont l'exploitant est intimement lié. La connaissance du bilan hydrique est l'un des outils le plus fiable pour le pilotage et la réussite en agriculture.

Notre étude fait état de plusieurs méthodes de calculs de l'évapotranspiration, celles-ci ont été déterminées par plusieurs climatologues, et agro-climatologues à l'exemple de : Penman, Turc, Thornthwaite ou celle de Blaney et Criddle.

Cette partie a pour objectif de préciser quelques aspects théoriques nécessaires à notre recherche.

1.2 L'eau, le sol et l'atmosphère :

Les demandes en eau des plantes varient d'une période à une autre. Les conditions climatologiques font que les différentes cultures pour un cycle végétal sont intimement liées.

- Les données concernant les évapotranspirations, et les températures enregistrées au cours du cycle annuel ou des cycles pluriannuels ont un rapport direct sur le développement rationnel des cultures. L'élément essentiel est l'évapotranspiration potentielle.

Ce paramètre entrepris par plusieurs climatologues est d'une part favorable pour analyser les besoins en eau des cultures, et d'autre part pour y remédier aux différentes carences au niveau desquelles les plantes sont soumises à l'exemple du stress hydrique **(Dubost ,1992)**.

L'eau représente un élément vital pour la vie des plantes, mais, paradoxalement, l'eau absorbée est rejetée à plus de 99% par les stomates dans l'air sous la forme de vapeur d'eau, une faible partie seulement maintient l'hydratation des cellules et une autre partie, plus faible encore, est utilisée pour la composition de la matière organique.

L'évacuation de la vapeur d'eau par les stomates est appelée la transpiration; elle représente une obligation physique dictée par la demande climatique, et est régulée par la présence des stomates dont l'ouverture est nécessaire pour la pénétration du gaz carbonique, élément important pour la photosynthèse (Hillel, 1988).

Quand on passe à l'échelle d'un champ, la transpiration végétale ne représente pas la seule perte d'eau, car le sol aussi a sa propre évaporation ; Dans les conditions naturelles, chaque fois qu'il y a un couvert végétal plus ou moins continu, on utilise donc le terme d'évapotranspiration comme étant la consommation de l'eau d'un couvert végétal.

I.2.1 Mouvements de l'eau et le continuum sol-plante-atmosphère

Du point de vue des transferts hydriques, le sol, la plante et l'atmosphère forment un continuum (Cruziat, 1995). L'eau en provenance du sol est absorbée au niveau des racines et elle transite par la plante avant de rejoindre l'atmosphère en sortant par les stomates des feuilles. L'auteur explique que la transpiration au niveau des feuilles induit une tension qui est le moteur principal du transfert de l'eau à travers la plante. Elle crée un appel qui est retransmis dans le système vasculaire grâce aux forces de cohésion de l'eau.

Laberche (2010) ajoute par ailleurs qu'un certain nombre de plantes (dont la vigne) génèrent également une pression ou « poussée racinaire » au niveau de la racine. L'action de cette poussée est annulée le jour dès que la transpiration prend le relais, en induisant une tension dans les vaisseaux du xylème qui se comportent comme des capillaires.

D'après Zufferey et Murisier (2004), le continuum sol-plante-atmosphère est parcouru par des résistances au transfert de l'eau (résistance hydraulique de la part du sol et de l'interface sol-racine, résistances dans la plante, depuis la racine jusqu'aux feuilles et résistance stomatique). Ces auteurs indiquent que les plantes tentent de maintenir la différence de potentiel entre les feuilles et les racines en-deçà du seuil de cavitation (Figure I.1).

La régulation stomatique constitue en effet un moyen de réguler les flux d'eau à travers la plante pour permettre le métabolisme et la croissance du végétal, mais aussi pour éviter la cavitation.

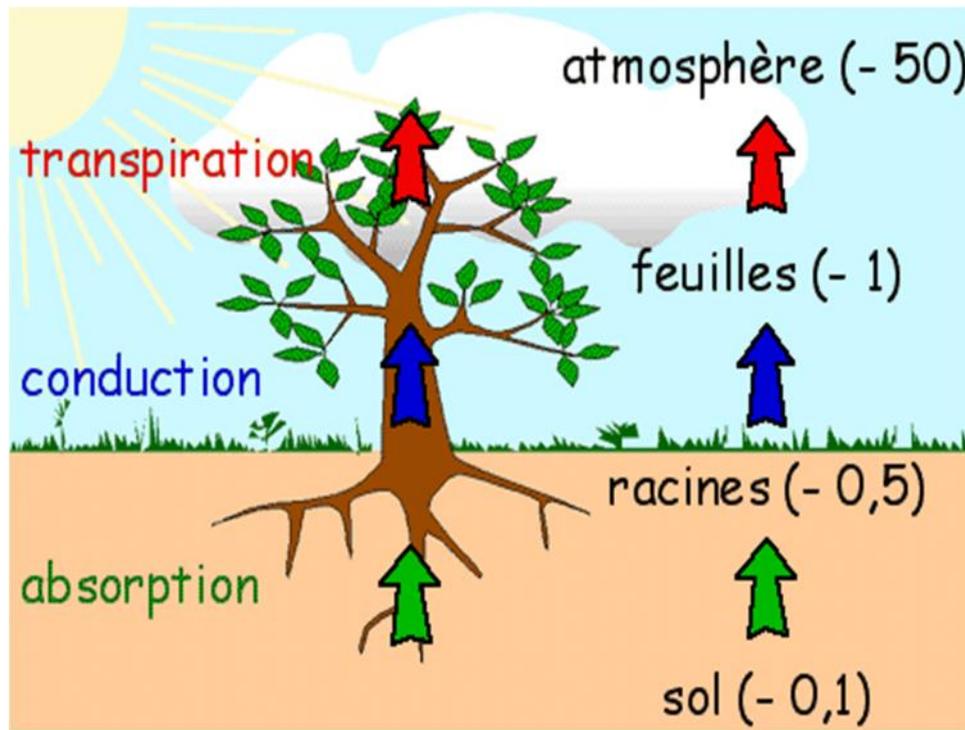


Figure I.1 : Mouvements de l'eau dans le continuum sol-plante-atmosphère

I.3 La régulation stomatique :

Les stomates jouent un rôle clé dans la régulation des flux d'eau et de gaz carbonique (CO_2) des feuilles. Ils constituent le moyen de contrôler les pertes d'eau par la transpiration et le prélèvement de CO_2 nécessaire à la photosynthèse. Les mouvements stomatiques (ouverture et fermeture) dépendent des variations de turgescence des cellules de garde et des cellules épidermiques voisines. De nombreux facteurs externes (présence de lumière, taux de CO_2 , température, hygrométrie, état hydrique du sol, etc...) et internes (hormones végétales et état hydrique du végétal notamment) influent sur le fonctionnement des stomates (Laberche, 2010 ; Adrian et Fournioux, 2011).

I.4 Le sol

Le sol est le support de la vie terrestre. Il résulte de la transformation de la couche superficielle de la roche-mère, la croûte terrestre, dégradée et enrichie en apports organiques par les processus vivants. Hors des milieux marins et aquatiques d'eau douce, il est ainsi à la fois le support et le produit du vivant. Le sol est une interface entre biosphère et lithosphère. La partie du sol spécialement riche en matière organique se nomme l'humus.

I.4.1 Propriétés physiques et chimique du sol.

a- La Texture :

La texture du sol se définit par les proportions relatives de particules de dimensions différentes.

La texture peut s'apprécier sur le terrain ou être déduite de l'analyse granulométrique qui permet, précisément, de déterminer les propriétés des diverses particules, réparties en classe de dimensions. Réparties en classe de dimensions.

La connaissance de la texture permet d'indiquer les tendances du sol quant à ses qualités physiques.

Pour exemple: les sols riches en sables sont perméables, filtrants, ceci d'autant plus que le sable est grossier.

- Si aux éléments grossiers, s'adjoignent beaucoup de sable fin et de limon, ceux-ci tendent à colmater les interstices entre les éléments grossiers, rendant le sol plus ou moins imperméable (**Gobat et al. 2010**).

- Si des proportions suffisantes d'argile s'ajoutent aux limons et aux sables, surtout en présence d'humus, une structure fragmentaire peut prendre naissance, garantissant, à la fois, une perméabilité tout en retenant assez d'eau pour la végétation.

Appréciation de la texture:

Sur le terrain, l'appréciation tactile est possible directement, mais elle demande un minimum d'expérience.

Quelques critères tactiles permettent, au moins, de ranger les sols parmi les grandes catégories: sols argileux, limoneux ou sableux:

- Les sables grattent sous les doigts à partir de 0.1mm.
- Les sols riches en limons donnent, entre les doigts, des sensations d'onctuosité.
- Les argiles peuvent se pétrir en pâtons qui ne s'effritent pas dans la main.

b- La structure:

La structure du sol se définit par le mode d'assemblage des constituants solide. Elle est due à la cimentation des grains grossiers (limon, sable) par les éléments colloïdaux, argile et humus associés en complexes argilo-humiques.

La structure est un état susceptible de modifications dans le temps, sous l'influence de facteurs, favorables ou défavorables.

I.4.2 Facteurs de structuration

2.1 Facteurs favorables:

Les principaux facteurs intervenant dans la structure des sols sont :

- Teneurs équilibrées en argile et en humus, riche en acides humiques
- Présence de calcium;
- Teneurs suffisantes en oxydes de fer et d'aluminium;
- Présence de vers de terre (surtout les espèces fousseuses) jouant un rôle primordial dans la formation des complexes argilo-humiques.

2.2 Facteurs défavorables:

- Tassement et compaction par passage des engins lourds
- Actions mécaniques des pluies battantes
- Altération des ciments colloïdaux.

I.4.3 Effet de la structure:

1) Porosité du sol, c'est-à-dire, le volume non occupé par les constituants solides du sol.

On distingue les pores capillaires des pores non capillaires.

La porosité du sol est d'importance primordiale pour la circulation de l'eau et de l'air, influençant les possibilités d'activités biologiques (racines, microflore, faune).

L'expérience semble montrer que l'optimum correspond à des proportions (sub) égales des deux types de pores (**Gobat et al. 2010**).

2) Résistance de l'érosion: la structure facilite l'infiltration des eaux de pluie et réduit le ruissellement en surface.

3) Contacts sol-racines.

4) Échanges thermiques entre le sol et l'atmosphère.

5) Quelques moyens de conservation de la structure.

- Maintien sous couverture végétale
- Maintien des réserves humiques et calciques
- Éviter le travail du sol ou le passage d'engins lourds en conditions hydriques inadéquates.

I.5 L'acidité du sol :

Rappelons qu'un milieu acide est caractérisé par la présence d'ions H^+ et un milieu alcalin, par la présence d'ions OH^- .

Lorsque ces deux types d'ions sont en proportion équivalents, le milieu est neutre. L'acidité peut se mesurer par l'indice pH (logarithme de l'inverse de la concentration en H).

En milieu neutre, le pH vaut 7.0, en milieu acide, ses valeurs sont inférieures à 7.0. Écologiquement, l'acidité revêt une grande importance car, au fur et à mesure des prélèvements d'éléments nutritifs par les plantes, le sol tend à s'acidifier (**Gobat et al., 2010**).

Elle est exprimée par le pH ou le titrage d'un extrait salin de sol. Cette expression paraît la plus intéressante, du point de vue écologique, car elle intéresse des échanges se passant dans les conditions naturelles du sol.

- Acidité totale.

Image de la quantité totale d'ions H dissociables et titrables par une base forte.

Exprimée par le titrage d'un extrait salin de sol à pH élevé.

1.6 Les besoins en eau des cultures :

Les besoins en eau des cultures, peuvent être définis comme la dose apportée à la plante dans des moments propices, afin de mettre celle-ci dans les meilleures conditions d'humidité requises, pour obtenir son rendement maximal (FAO, 24).

La pièce de base pour la quantification des besoins en eau du périmètre est le calendrier des cultures, établi par des agronomes. Il présente les différentes cultures occupant le sol à chaque instant de l'année. L'évaluation des besoins en eau du périmètre est basée sur la détermination des besoins de chaque culture retenue dans le calendrier agronomique.

1.7 Le bilan hydrique :

L'estimation des quantités d'eau passant par chacune des étapes du cycle hydrologique peut donc se faire à l'aide d'une équation de bilan appelée "bilan hydrique" qui représente le bilan des quantités d'eau entrant et sortant d'un sol (entité naturelle en générale) et dans le temps.

L'alimentation en eau des végétaux dépend de plusieurs facteurs (**Hillel, 1988**):

-La quantité d'eau météorique infiltrée dans le sol.

Celle-ci varie en fonction notamment:

- du climat (unité, nature et répartition des précipitations);
- des pertes par évaporation directe d'eau n'atteignant pas le sol (10-40% en forêt)
- du ruissellement en surface, qui dépend de la pente, de la porosité, de la texture, etc.

2) La quantité d'eau emmagasinée sur l'épaisseur correspondant au développement du système racinaire. Cette quantité d'eau dépend, entre-autres:

- de la texture;
- du taux de matière organique;
- de la perméabilité;
- de l'évaporation, etc.

3) L'importance de la fraction effectivement utilisable par les végétaux. Cette fraction correspond à l'eau contenue dans les pores de "diamètre" supérieur à 2μ . L'eau remplissant les pores les plus larges (eau de gravitation) est très facilement absorbable par les végétaux mais, normalement, elle ne séjourne que peu de temps dans le sol.

L'eau contenue dans les pores fins (eau capillaire) est de moins en moins facilement absorbable, au fur et à mesure de l'augmentation de la finesse des pores; la plante doit fournir un effort de plus en plus grand pour se procurer l'eau dont elle a besoin. Cet effort peut s'apprécier par la mesure du potentiel capillaire.

Le potentiel capillaire:

Le potentiel capillaire se mesure par l'énergie nécessaire pour déplacer les diverses formes d'eau du sol (eau de gravitation, eau capillaire). Cette énergie correspond à la hauteur d'une colonne d'eau, exprimée en cm.

Le potentiel capillaire, ou pF, exprime le logarithme de cette hauteur.

Influence du régime hydrique sur les propriétés du sol:

1.7.1 Facteurs influençant le bilan hydrique :

L'équation du bilan hydrique se fonde sur l'équation de continuité et peut s'exprimer comme suit, pour une période et un espace donnés :

$$P + S = R + E + (S + S)$$

Avec:

P: précipitations (liquide et solide) [mm];

S: ressources disponible à la fin de la période précédente (eaux souterraines, humidité du sol, neige, glace) [mm];

R: ruissellement de surface et écoulements souterrains [mm];

E: évaporation (y compris évapotranspiration) [mm];

S + S: ressources accumulées à la fin de la période étudiée [mm].

1.7.2 Estimation et calcul des besoins en eau par le bilan hydrique :

Par définition le bilan hydrique d'une culture donnée est la différence entre d'une part les besoins en eau des cultures tels que déterminés par le climat et les caractéristiques végétales (ETM) et d'autre part la somme des apports effectifs des précipitations .

1.7.3 Influence de l'évapotranspiration :

L'évapotranspiration est l'une des plus importantes composantes du cycle hydrologique. Elle est essentielle dans la planification et l'aménagement des ressources hydriques ainsi que dans le développement de l'irrigation.

L'évapotranspiration est particulièrement importante dans les milieux arides et semi arides du monde. Son importance dans les milieux humides diminue due à l'expansion du supplément d'irrigation.

Dans les conditions naturelles, chaque fois qu'il y a un couvert végétal plus ou moins continu, on utilise donc le terme d'évapotranspiration comme étant la consommation de l'eau d'un couvert végétal.

L'évapotranspiration est définie comme "la réponse de la végétation aux conditions climatiques naturelles en relation avec les propriétés physiologiques de la plante et ses ressources en eau".

En pratique, la détermination de l'évapotranspiration réelle (ETR) avec une précision suffisante est un problème commun à ceux qui, à titres divers (agronomes, hydrologues, météorologistes), s'occupent des problèmes de gestion des ressources en eau, des liaisons entre consommation en eau et production végétale (**Bouchet et Robelin, 1969 ; Peuch et al. 1976**)

Les méthodes du bilan hydrique pour déterminer l'ETP sont les mêmes que les méthodes pour déterminer l'évaporation d'une surface humide ou d'une nappe d'eau libre (voir annexe). Nous pouvons citer en particulier quelques techniques courantes : les bacs à évaporation, l'évaporomètre Piche et les mesures lysimétriques à condition que le volume soit maintenu humide (**FAO, 1978**).

I.8 .1 Importance de l'évapotranspiration en agronomie

Dans de nombreux pays, c'est la période pendant laquelle l'eau d'irrigation est disponible qui détermine la longueur de la période végétative. Certains périmètres d'irrigation de l'Asie du Sud-Est ou du Moyen-Orient alimentés par des cours d'eau ou par épandage des cours peuvent englober des terres sur lesquelles la période végétative et la période d'irrigation

peuvent aller de 12 à quelques mois par an. De telles variations auront un rôle classificateur lorsqu'elles se produisent à l'intérieur d'une même zone de projet.

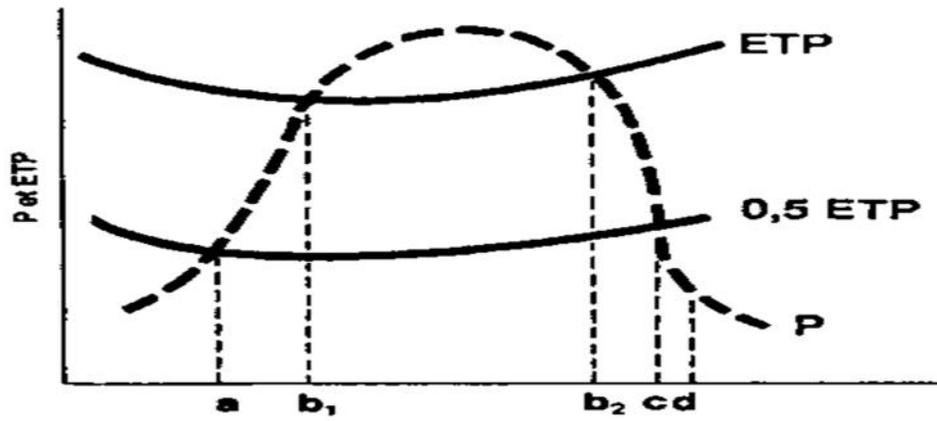
La longueur de la période végétative peut être raccourcie par des conditions d'humidité qui entravent le mûrissement et le séchage des cultures ou nuisent à la qualité du produit (diminution de la teneur en sucre de la canne à sucre, coloration anormale du coton, défauts sur les fruits, etc.).

A.1.1 Limites critiques de la période végétative

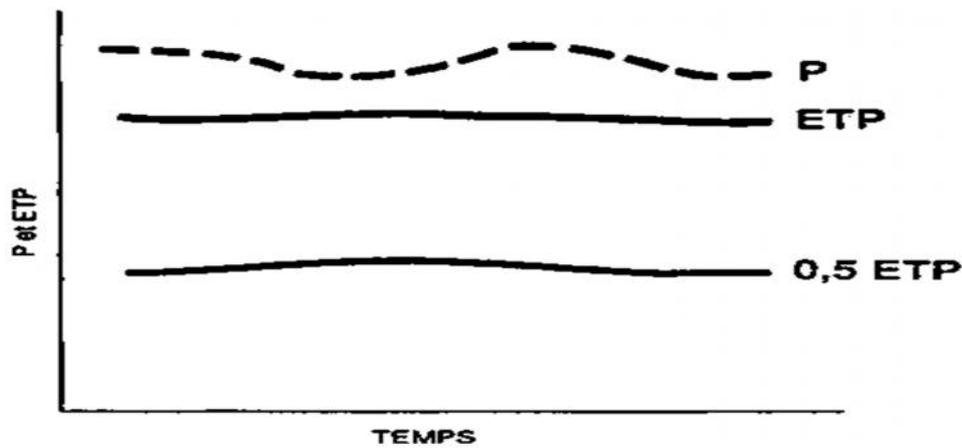
Méthode 1: Méthode générale (FAO 1978a)

Cette méthode est particulièrement utile dans les études de reconnaissance ou de faible intensité quand il s'agit d'établir la nécessité de l'irrigation. Elle se fonde sur la température moyenne journalière (T), les précipitations (P) et l'évapotranspiration potentielle (ETP) et permet de construire des graphiques tels que ceux qui sont représentés à la Figure I.2. On peut utiliser des données décadales ou mensuelles; les données mensuelles peuvent être converties en données décadales. La procédure est indiquée à la page suivante.

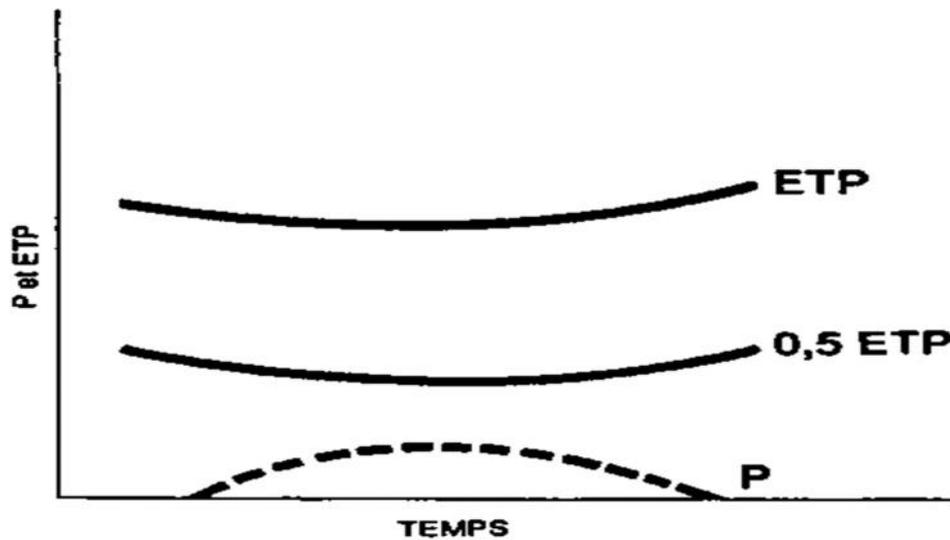
- i. **Contrainte de température:** la période végétative est limitée aux périodes décadales pendant lesquelles la moyenne quotidienne est égale ou supérieure à une température minimum donnée (5° C, par exemple).
- ii. **Début de la période végétative:** en régime pluvial, il s'agit du moment où les précipitations sont supérieures ou égales à la moitié de l'évapotranspiration potentielle.
- iii. **Période humide:** en régime pluvial, une période végétative normale doit comprendre au moins une période humide de 10 jours, c'est-à-dire une période pendant laquelle les précipitations sont supérieures à l'évapotranspiration potentielle.
- iv. **Fin des pluies:** on peut considérer qu'il s'agit du moment où les précipitations tombent au-dessous de la moitié de l'évapotranspiration potentielle.
- v. **Fin de la période végétative:** la période végétative se termine quand la réserve d'eau emmagasinée dans le sol après arrêt des précipitations et de l'irrigation se tarit.



1. normal



2. humide toute l'année



3. sec toute l'année.

Figure I.2: Exemple de types de périodes végétatives (d'après FAO 1978a).

Parmi les résultats du projet relatif aux zones agro-écologiques, ceux publiés par la FAO (FAO 1978/80/81) :

Les iso-lignes des périodes végétatives par continents. Ces isolignes ont été généralisées pour des raisons liées à l'échelle de la publication. Pour des études plus intensives, on peut établir les isolignes des périodes végétatives à intervalles de 75 jours, de 90 jours, puis de 30 jours sur 365 jours. Elles peuvent être tracées pour l'agriculture existante et pour l'agriculture envisagée après l'apport d'un complément d'irrigation. D'après les périodes végétatives on pourra voir s'il faut se limiter à une seule culture ou à deux cultures consécutives, ou encore adopter des cultivars différents d'une même culture.

I.8.2 Importance de l'évapotranspiration en irrigation

Besoins en eau d'irrigation :

Les pluies, en particulier leur part efficace, fournissent une partie de l'eau requise pour satisfaire les besoins d'évapotranspiration des cultures. Le sol, agissant comme un tampon, stocke une partie de l'eau de pluie et la restitue aux cultures en période de déficit. Sous des climats humides, ce mécanisme suffit pour assurer une croissance satisfaisante dans des systèmes de culture sans irrigation. Dans des conditions arides ou en cas de saison sèche prolongée, il est nécessaire d'irriguer pour compenser le déficit d'évapotranspiration (transpiration des cultures et évaporation à partir du sol) dû à l'insuffisance ou à l'irrégularité des précipitations. La consommation d'eau pour l'irrigation est définie comme étant le volume d'eau nécessaire pour compenser le déficit entre d'une part l'évaporation potentielle et d'autre part les pluies efficaces pendant la période de croissance des cultures et le changement dans la teneur en eau du sol. Elle varie considérablement en fonction des conditions climatiques, des saisons, des cultures et des types de sol.

Plusieurs méthodes de planification de l'irrigation sont disponibles et varient en complexité, soit de la simple perception d'un besoin en eau jusqu'à l'utilisation de modèles dynamiques de bilan hydrique du sol, combinée avec l'utilisation de mesures directes de l'humidité du sol (Simonne et al., 2011).

Au cœur de toutes ces méthodes qui utilisent les données météorologiques pour la planification de l'irrigation, on retrouve le concept de l'évapotranspiration. Cette présentation vise à mieux comprendre les éléments requis pour prédire l'évapotranspiration et à explorer le potentiel des modèles de bilan hydrique du sol (Pepin et Bourgeois, 2012).

I.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons essayé d'illustrer les principaux paramètres influents sur le développement des cultures, en mettant l'accent sur l'eau, l'atmosphère, ainsi que l'influence du sol sur le comportement agronomique et hydraulique de la culture.

L'évapotranspiration potentielle paraît comme le facteur important intervenant dans le bilan hydrique. La précision de son estimation reste donc très utile, puisque à partir de l'évapotranspiration va dépendre les besoins en eau des cultures, et donc des régimes d'irrigation nécessaires au bon développement des cultures.



Chapitre II:
Etude de l'Evapotranspiration

Chapitre II : Etude de l'Évapotranspiration

II.1 Introduction

Les demandes en eau des plantes varient d'une période à une autre. Les conditions climatiques, font que les différentes cultures pour un cycle végétal sont intimement liées.

Les données concernant les évapotranspirations, et les températures enregistrées au cours du cycle annuel ou des cycles pluriannuels ont un rapport direct sur le développement rationnel des cultures. L'élément essentiel est l'évapotranspiration, ce paramètre repris par plusieurs climatologues est d'une part favorable pour analyser les besoins en eau des cultures, et d'autre part pour y remédier aux différentes carences au niveau desquelles les plantes sont soumises à l'exemple du stress hydrique (**Dubost, 1992**).

Les besoins en eau des cultures se trouvent de plus en plus importants, et ce au niveau de l'agronomie saharienne, dont le climat est semi/Aride (**BNEDER, 1992**).

II.2 Concept et définition de l'évapotranspiration

L'évapotranspiration est une combinaison de deux processus : l'évaporation et la transpiration.

L'évaporation, ou plus précisément l'évaporation directe, désigne l'eau qui s'évapore à partir d'un sol (nu) ou d'un plan d'eau. Autrement, l'évaporation est un transfert de l'eau, à partir de la surface du Sol, vers l'atmosphère (**FAO, 1978**).

La transpiration désigne la transpiration des végétaux à travers les stomates (micropores par lesquels l'eau s'évapore) de leurs feuilles. Les racines des végétaux captent l'eau qui se trouve dans le sol. Une fois parvenue aux feuilles, une partie de l'eau va s'évaporer à travers les stomates des feuilles. L'autre partie va servir à la photosynthèse.

II.2.1 Etude physique de l'évaporation

L'évapotranspiration est la transformation de l'eau en vapeur, vers l'atmosphère est déterminée par deux phases essentielles, qui sont l'état physique c'est-à-dire liquide à un autre état qui est la vapeur. Cette évaporation se fait sur une surface évaporante à l'exemple de la mer, du système foliaire de la plante et surtout du sol.

En Thermodynamique, nous savons en effet que la transformation d'un gramme d'eau à 0°C (glace fondante), en vapeur consomme 597 calories (**Tourad, 1990**). PEGY (1970)

stipule que l'évaporation d'un millimètre (1 mm) d'eau sur un milieu aquatique nécessite 59 calories/cm².

Généralement, cette dernière est fonction du facteur énergétique à savoir le rayonnement solaire, paramètre principal de l'évaporation. Cette énergie est issue de deux sources à savoir le rayonnement net et l'advection.

A- le rayonnement net recueilli au niveau des surfaces évaporante est fonction de la qualité optique, de leur température et du rayonnement absorbé issu du soleil.

B- l'advection dépend de l'humidité relative de l'air et surtout du vent. Par définition c'est l'énergie apportée par l'air ambiant.

L'évaporation dépend des facteurs climatiques et surtout de la nature de la surface évaporante et de ses caractéristiques physiques (**Bouchet ,1969**)

II.3 Différents types de l'évapotranspiration :

Pour mieux étudier le phénomène de l'évapotranspiration, il est utile de distinguer différentes formes de l'évapotranspiration :

II.3 1. L'évapotranspiration potentielle:

C'est un phénomène climatique continu dans l'espace et dans le temps. Ce paramètre est utilisé au niveau des recherches; sur l'utilisation de l'eau pour les besoins en irrigation. L'importance des quantités d'eau est fonction de l'ETP où le déficit en eau des plantes en est fonction (**Dubost ,1992**).

Dans tous les cas, les E.T.P et les doses à appliquer au sol vis-à-vis de la durabilité de la vie de la plante, sont en liaison directe les unes par rapport aux autres.

II.3.2 L'évapotranspiration potentielle de référence (ET₀) :

C'est l'évapotranspiration maximale d'un gazon à ras couvrant complètement le sol, bien alimenté en eau, en phase active de croissance et situé au sein d'une parcelle suffisamment étendue (**FAO, 1978, Penman 1948**).

Pour l'estimation de l'évapotranspiration de référence, nous nous sommes basés sur des résultats de plusieurs études, notamment celle de **Jensen** (1990), la consultation d'experts menée par la FAO sur les méthodologies d'estimation des besoins en eau des cultures (**Smith,1992**), a conduit à recommander la méthode de Penman Monteith modifiée comme méthode privilégiée d'estimation de l'évapotranspiration potentielle de référence.

II.3.3 L'évapotranspiration Maximale (ETM):

Quand la plante produit le maximum de matière sèche donnant un rendement maximum. Aussi l'évapotranspiration maximale est mesurée expérimentalement par les cases lysimétriques et comparée à l'E.T.P (Charles ,1975).

Lorsque l'eau n'est plus un facteur limitant au niveau de l'absorption racinaire, la régulation stomatique est minimale et l'évapotranspiration est maximale.

L'évapotranspiration Maximale dépend:

- de la culture considérée,
- du stade phénologique,
- des conditions météorologiques observées

II.3.4 L'évapotranspiration Réelle (ETR) :

C'est la valeur de l'évapotranspiration dans le cas d'une alimentation en eau insuffisante de la plante. En pratique, la détermination de l'évapotranspiration réelle (ETR) avec une précision suffisante est un problème commun à ceux qui, à titres divers (agronomes, hydrologues, météorologistes), s'occupent des problèmes de gestion des ressources en eau, des liaisons entre consommation en eau et production végétale (Bouchet et Robelin, 1969 ; Peuch et al. 1976) et la dépendance de cette ETR à l'égard des facteurs climatiques et des caractéristiques de régulation des couverts végétaux (Katerji et Perrier, 1983).

Déterminer les besoins en eau des cultures (ETR) revient dans la pratique à déterminer dans les conditions du champ le changement de l'eau dans le sol dans une période de temps.

Cette méthode a été utilisée par les chercheurs pour longtemps en utilisant les échantillons du sol et les analyses gravimétriques. Or la détermination de l'évapotranspiration réelle (ETR) par cette méthode est trop difficile.

II.4. Facteurs déterminants de l'évapotranspiration

Plusieurs paramètres qui entrent en jeu dans le phénomène de l'évapotranspiration, ces facteurs peuvent conditionner son évolution dans le temps et dans l'espace, mais on peut le regrouper en deux catégories bien distinctes suivant qu'ils sont propres à l'atmosphère ou à la surface mise en évaporation elle-même :

- Les paramètres caractérisant l'état de l'atmosphère au voisinage de la surface évaporante et son aptitude à provoquer l'évaporation ; ces paramètres régissent le pouvoir évaporant de l'atmosphère (évapotranspiration potentielle).

• Les paramètres caractérisant la nature et l'état de la surface évaporante (surface d'eau libre, neige, glace, sol nu, végétation) ainsi que son aptitude à alimenter l'évaporation et à répondre plus ou moins rapidement aux variations du pouvoir évaporant de l'atmosphère.

II.4.2 Les principaux facteurs du pouvoir évaporant sont :

- La température de l'air.
- Le rayonnement global.
- L'insolation.
- La vitesse du vent.
- L'humidité atmosphérique

2.1 Température de l'air :

La quantité d'eau évaporée est influencée par les variations de la température. Le pouvoir évaporant de l'air augmente avec l'élévation de la température qui a son tour fait varier le taux de saturation de l'air (SAINIH et al. 1998).

La mesure de la température repose sur une grande diversité de méthodes à l'exemple :

- La thermo-sonde
- Le thermocouple
- Rayons infrarouges
- Des captures de type mécanique et acoustique.
- La mesure actinothermique.

2. 2 Le Rayonnement Solaire :

Ce paramètre est un facteur énergétique important dans la mesure où il a provoqué l'évaporation. En fait, il représente la source d'énergie nécessaire pour mettre en œuvre cette dernière sur une surface évaporante. Le bilan énergétique au niveau de n'importe quelle surface évaporant est déterminé par :

- L'énergie du soleil.
- Emission vers l'atmosphère d'une partie de la chaleur reçue. Le bilan entre l'énergie reçue et l'énergie perdue représente l'énergie utilisée pour la mise en forme de l'évaporation, et la fonction transpiratoire de la plante.

L'énergie à la surface du sol se fait par le rayonnement solaire. La mesure du rayonnement nous fournit des renseignements sur la source de sur rayonnement (**BARNIERI ,1978**). A la surface du sol on trouve :

- Le rayonnement global RG
- Le rayonnement solaire direct I.
- Le rayonnement solaire diffuse Rd.
- Le rayonnement atmosphérique Ra
- Le rayonnement du sol Rs.

Le rayonnement solaire est l'un des facteurs primordiaux qui intervient dans le phénomène de l'évapotranspiration, sous l'action des rayons pénétrés à travers l'atmosphère vers la surface mise en évaporation.

L'évaporation absorbe de la chaleur qui est fournie principalement par le rayonnement solaire transformé plus ou moins sélectivement en énergie calorifique par la surface évaporante.

Dans les grandes nappes d'eau par exemple, l'échauffement des couches profondes absorbe, au printemps et au début de l'été, une partie de la chaleur incidente qui n'est plus disponible pour l'évaporation; inversement, en automne et en hiver, la chaleur ainsi emmagasinée vient augmenter l'évaporation que produirait le seul rayonnement solaire.

Pour mesurer le rayonnement de grandes longueurs d'onde, on utilise des radiomètres à plaque. Ces appareils ne sont pas sélectifs : ils mesurent tous les rayonnements, quelle que soit leur longueur d'onde.

2.3 Le vent:

Le vent est la partie essentielle et intégrante du calcul de l'évaporation. Le rôle du vent dans l'atmosphère c'est qu'il remplace les masses d'air humides en tenant la surface évaporante par des masses d'air sèches.

Selon **Jefereys (in Peguy., 1992)** stipule que la vitesse d'évaporation augmente avec ce processus du renouvellement de l'air au-dessus de la surface évaporante. **Seltzer (1946)** Souligne que l'augmentation de l'évaporation s'explique par l'augmentation de la vitesse du vent, et de la grande sécheresse. Le vecteur vent peut-être caractérisé par deux nombres représentant son orientation « direction du vent » et son module « vitesse du vent ».

2.3.1 Les anémomètres

Les anémomètres mesurent la vitesse du vent, ils sont classés en quatre catégories :

- Les anémomètres utilisant l'énergie cinétique de l'air.
- Les anémomètres utilisant la pression exercée par le vent.
- Les anémomètres thermiques
- Les anémomètres soniques.



Photo II 01 : L'anémomètre

II.3.2 Les girouettes :

La girouette indique la direction du vent à l'air transmetteur potentiométriques à rotation continue. La valeur du potentiomètre est ensuite interprétée de façon à connaître la vitesse de vent.

II.4 L'Humidité de l'air :

L'humidité de l'air est un paramètre climatique très important par rapport aux autres paramètres. Ceci s'explique par le fait, qu'il est impératif à avoir un équilibre de vapeur d'eau entre la surface évaporant, et celle de l'air qui l'entoure, (Larouci,1991). L'état hygrométrique de l'air se définit à partir de différentes grandeurs :

$$h = P_a + P$$

Avec :

La pression de vapeur d'eau dans l'air P.

Soit h : une pression atmosphérique.

Pression air sec + pression de la vapeur dans l'air.

La température du point de rosée de l'air, est la température à laquelle il faut refroidir l'air humide pour atteindre la saturation (td est telle que $p=p(td)$).

L'humidité relative de l'air humide, soit le rapport entre la pression réelle de vapeur d'eau $P(td)$, et la pression de vapeur saturante $P(ta)$, valeur maximum de P_a , de la température ambiante (T_a) avant condensation:

$$H\% = (P_{td}) / (P_{ta}) \times 100$$

Pour le climatologue **Peguy (1970)**, le pouvoir évaporant se trouve en rapport inverse à la pression de l'air. Une élévation de la pression de l'air provoque une diminution de l'évaporation.

Selon **Peguy (1970)**, la vitesse d'évaporation est inversement proportionnelle à la pression de l'air au-dessus du liquide, et qui dépend par ailleurs de la tension de la vapeur qui se trouve déjà au-dessus du liquide. La vapeur d'eau maximale croît linéairement avec la température

II.5 Importance de l'estimation de l'évapotranspiration en irrigation

5.1 Besoins en eau et détermination des coefficients culturaux :

À partir d'une série de mesures d'ETP et d'ETM, des valeurs moyennes de coefficients culturaux ont été déterminées pour chaque plante en fonction du stade de croissance.

Le coefficient cultural, K_c intègre ainsi les effets de trois caractéristiques primaires qui distinguent une culture d'une culture de référence :

la hauteur de la culture, qui affecte la rugosité et la résistance aérodynamique ;

La résistance de surface sol-végétation, influencée par la surface foliaire, la proportion de sol couverte par la végétation, l'âge et l'état des feuilles, le degré de régulation stomatique, et l'humidité de la surface du sol ;

L'albédo (ou réflectivité) de la surface sol-végétation, qui dépend de la proportion de sol couvert par la végétation et de l'humidité du sol.

Ainsi, le développement du système racinaire et foliaire se traduit par une augmentation progressive du coefficient cultural qui atteint un palier lors de la maturité puis redécroit lors de la sénescence des feuilles. Ces valeurs sont indépendantes de l'environnement de la culture. Par exemple, on peut voir sur le graphique ci-dessous que le K_c de l'oignon passe varie de 0,32 à 1,05 entre la phase initiale de croissance et la mi-saison.

L'évapotranspiration durant la phase initiale est essentiellement constituée d'évaporation du sol. (Source: Suivi expérimental des transferts d'eau provoqués par l'irrigation dans le périmètre de Ouro Madiou en moyenne vallée du fleuve Sénégal, Cahiers Agricultures. Volume 12, Numéro 2, 103-10, Mars-Avril 2003, Note de recherche)

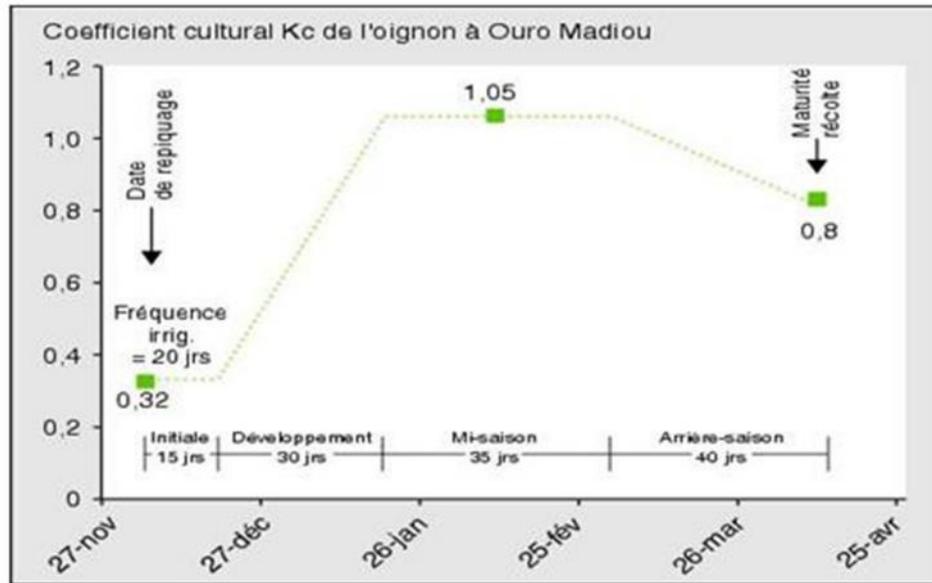


Figure II.1 : Coefficient culturel de l'oignon

Pour pouvoir déterminer la quantité d'eau mensuelle nécessaire pour chaque parcelle, nous avons utilisé les coefficients cultureux propres à chaque culture et à chaque phase de développement. En zone aride et venteuse, il faut nuancer ces coefficients cultureux de développement et de sénescence qui représentent les conditions où la valeur moyenne de l'humidité relative journalière vaut 45% et le vent 2 m/s. Pereira et al. (1996) propose une base théorique pour quantifier les modifications de k_c en fonction des modifications de vent et d'humidité quand on utilise le gazon de référence, peu rugueux, comme base pour k_c :

$$k_c' = k_c + [0,04.(u - 2) - 0,004(\Theta - 45)] \left(\frac{h}{3} \right)^{0,3}$$

Avec $\left\{ \begin{array}{l} u : \text{la valeur moyenne journalière du vent à } 2 \text{ m de hauteur (m/s)} \\ \Theta : \text{la valeur moyenne de l'humidité relative journalière (\%)} \\ H : \text{hauteur moyenne de la culture (m)} \end{array} \right.$

On obtient alors les résultats suivants pour les cultures désirées par les habitants du village (--> lien vers l'état des lieux du jardin maraîcher):

	Phase de développement	Coefficient de culture bibliographique (kc)	hauteur maximale du couvert (m)	Coefficient de culture adapté au milieu (kc')	Durée de la phase de développement
Tomate	initiale	0,32	0,6	0,44	15 jr
	développement	0,32-->1,2		0,88	30 jr
	mi-saison	1,2		1,32	40 jr
	arrière-saison	1,2 -->0,65		1,05	40 jr
Oignon	initiale	0,32	0,4	0,44	15 jr
	développement	0,32-->1,05		0,805	30 jr
	mi-saison	1,05		1,17	35 jr
	arrière-saison	1,05 --> 0,8		1,045	40 jr
Salade	de la plantation au début de croissance active	0,4	0,3	0,52	15 jr
	développement	1,05		1,17	30 jr
	sénescence	0,95		1,07	15 jr
Pomme de terre	de la levée au début de croissance	0,5	0,5	0,62	15 jr
	de la croissance à la fin de tubérisation	1,15		1,27	45 jr
	de la tubérisation à 20 jours avant la récolte	0,65		0,77	40 jr
Carotte	du semis à 30 jours après	0,5	0,3	0,62	30 jr
	30 jours après semis jusqu'à la récolte	1,05		1,17	40 jr
	phase de sénescence	0,8		0,92	30 jr
Aubergine	plantation à début de floraison	0,5	1	0,62	15 jr
	début de floraison à 3ème étage	0,6		0,72	90 jr
	croissance 3ème étage à récolte	1,05		1,17	40 jr
Chou	phase initiale	0,5	0,4	0,62	15 jr
	phase de développement	1		1,12	35 jr
	phase de sénescence	0,75		0,87	25 jr

Figure II.2 Durée de la phase de développement

5.2-Le Pilotage de l'irrigation

Pour déterminer le déclenchement des irrigations il faut :

-Évaluer l'état hydrique du sol

Le début des opérations d'irrigation s'appuie sur le suivi du dessèchement du sol. Il peut être réalisé par le calcul du bilan hydrique ou par la mesure dans les parcelles de l'humidité du sol ou de sa tension.

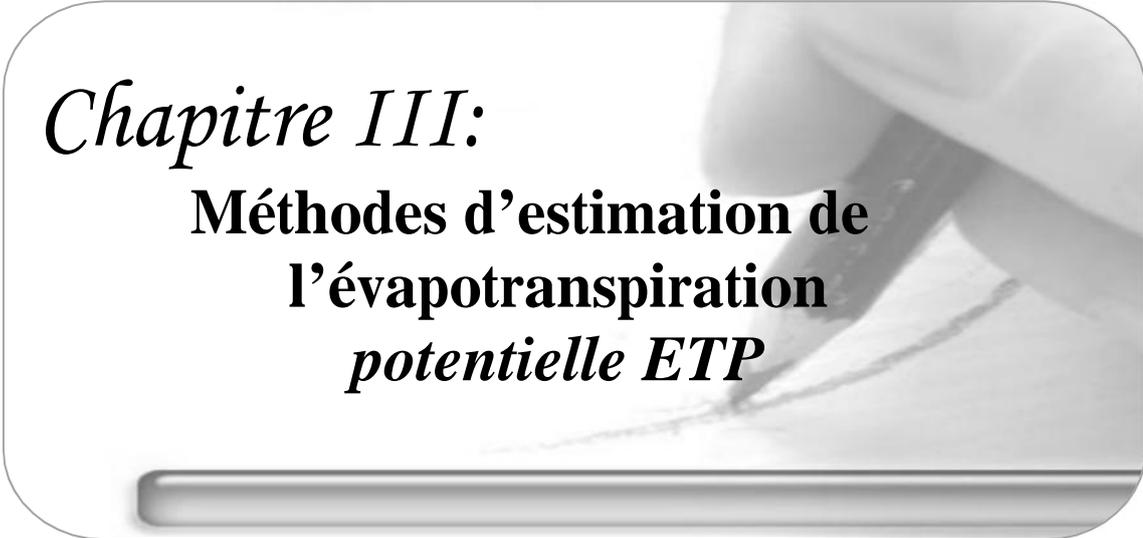
5.3 Pilotage à partir du bilan hydrique

Cette méthode fait le bilan d'eau entre les entrées et les sorties d'eau du sol (voir encadré 1). Les besoins en eau de la pomme de terre sont estimés à partir de la demande climatique, l'ETP (Evapotranspiration potentielle) et du coefficient cultural K_c dont les valeurs varient en fonction des stades. Il est aussi nécessaire de mesurer la pluie et les doses d'irrigation. L'irrigation est conseillée lorsque la réserve facilement utilisable est épuisée, en anticipant cependant les irrigations en tenant compte de la durée du tour d'eau temps nécessaire pour irriguer toutes les parcelles.

II.6 Conclusion

A la suite de cette recherche, on voit que plusieurs facteurs qui sont indépendants les uns des autres agissent tous sur le pouvoir évaporant de l'air. Ce qui donne au phénomène d'évaporation un caractère très complexe. Ceci a pour conséquence une application des formules relativement délicates, dans les conditions géographiques et climatiques de l'expérimentation.

L'amélioration des formules est toujours souhaitable afin d'aboutir à des résultats plus performants et des estimations plus précises dans différents domaines en particulier en irrigation.



Chapitre III:
**Méthodes d'estimation de
l'évapotranspiration
*potentielle ETP***

Chapitre III : Méthodes d'estimation de l'évapotranspiration potentielle

III.1 Introduction

Dans le cadre général d'une l'étude des besoins en eau d'irrigation, il s'avère nécessaire de connaître en profondeur, les différents termes qui composent le bilan hydrique.

Le bilan hydrique est une équation qui met en scène l'équilibre, au point de vue hydrique, entre les entrées, les sorties et le stock, à l'instant, ou sur une période donnée. L'évapotranspiration réelle est comptée dans les sorties d'un bilan hydrique.

L'évapotranspiration est une combinaison de deux termes, à savoir, l'évaporation (à partir d'une Surface, d'un plan d'eau), et la transpiration (des végétaux).

L'évapotranspiration est un phénomène très complexe, en ce sens que les mécanismes à son origine ne sont pas toujours totalement connus et peuvent différer d'un milieu à un autre. Il en résulte alors que son estimation est aussi complexe.

De nombreuses théories et approches ont été élaborées, en vue de l'estimation de L'évapotranspiration (réelle). De ces théories et approches, ont découlé un certain nombre de Méthodes, directes ou indirectes, d'estimation.

Dans cette étude, on essaye de se focaliser et de faire le point sur les méthodes répertoriées comme étant les plus courantes d'estimation de l'ETP.

Ces méthodes, sont issues généralement de théories ou d'approches, souvent très différentes les unes des autres, ce qui préfigurerait, à priori, des résultats différents pour des situations similaires (Traore, 2007).

III.2 Méthodes d'estimation de l'évapotranspiration

L'estimation de la valeur exacte et réelle de l'évapotranspiration reste toujours le but des chercheurs (agronomes, hydrologues, et les ingénieurs hydrauliciens). Plusieurs méthodes ont été utilisées pour calculer ou estimer la valeur de l'évapotranspiration.

Mais en général, il existe deux méthodes qui nous permettent de connaître cette composante essentielle du bilan hydrique en particulier dans les domaines d'irrigation ainsi

que la gestion des ressources hydriques ; dans notre étude il s'agit de la valeur de l'Evapotranspiration climatique.

En outre, on peut classer ces méthodes en deux types parues qui sont :

- Les méthodes directes « instruments et appareils »
- Les méthodes indirectes « utilisation des formules empiriques ».

III.2.1 Méthodes directes :

III.2.1.a Evapotranspiromètre ou case lysimétrique

L'évaporation peut être mesurée en une station avec tous les autres termes du bilan hydrique dans un dispositif appelé lysimètre ou évapotranspiromètre qui empêche les mouvements latéraux et permet de mesurer l'infiltration profonde. Les apports (pluie, irrigation) sont également mesurés ainsi que l'humidité aux différentes profondeurs. Il est alors possible d'évaluer les variations de stock d'eau et l'évapotranspiration (**Hillel, 1988**).

Ces dispositifs sont coûteux et difficile à gérer. Il est donc réservé aux stations de recherche et aux installations importantes d'irrigation disposant de techniciens qualifiés. Il s'agit d'une cuve enterrée placée au milieu d'une parcelle irriguée, qui sert d'anneau de garde, et dans laquelle on reconstitue un sol recouvert de la même culture dans les mêmes conditions. La culture dans la cuve est arrosée avec un léger excès d'eau, et l'eau de drainage est récupérée au moyen d'un tuyau se déversant dans un bac de récupération (Fig. n°1).

La détermination de l'ETP à partir des mesures sur l'évapotranspiration se fait par différence entre les apports et les pertes :

$$ETP = \text{pluie} + \text{Irrigation} - \text{Drainage} \pm R$$

Les variations de réserve du sol (R) seront négligeables en valeur relative si l'alimentation en eau est régulière, et si la période de calcul est suffisamment longue (une semaine à dix jours au minimum).

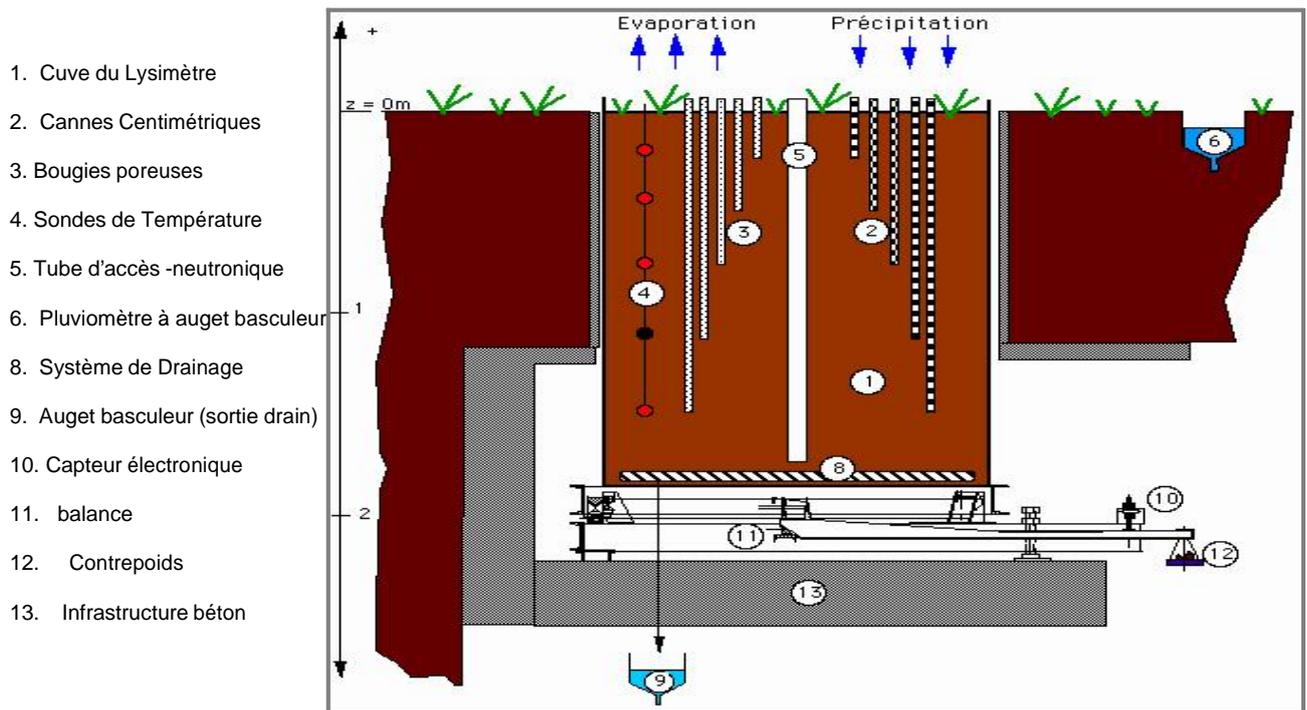


Figure III.1. Mise en œuvre de la case lysimétrique

La mise en œuvre d'une installation de mesure de l'évapotranspiration potentielle doit être dotée d'un certain nombre de conditions, si l'on veut aboutir à des résultats acceptables dont les plus importants sont (Makhloufi, 2010)

-Le site de la zone irriguée doit être dégagée et représentative de la région étudiée, suffisamment éloignée de tout objet susceptible de perturber le rayonnement, le régime de turbulence, ou les échanges advectifs (bâtiments, relief, plan d'eau,...).

-L'environnement doit être homogène, de 1000 m² de surface ;

- L'irrigation et l'entretien doivent être réguliers ;

- La surface de la cuve: doit être de 2 à 3 m² au minimum.

-Le remplissage de la cuve se fait d'une manière que le sol doit être suffisamment filtrant, meublé, sans risques d'immersion.

-La végétation doit présenter le moins possible de limitations d'évapotranspiration d'ordre physiologique. On choisit habituellement des graminées fourragères ou de gazon.

b. Les mesures effectuées sur les cases lysimétriques

L'irrigation doit être journalière, la fertilisation et les coupes régulières, les bilans doivent être établis sur des périodes de manière à avoir une variation de réserve $R = 0$. (R est mesuré, soit par pesée de la case lysimétrique, soit par mesure neutronique).

La précision des mesures obtenues avec une case lysimétrique est le plus souvent de l'ordre de 10%, même avec une conduite soignée. Par contre, le moindre laisser-aller peut aboutir à des distorsions de l'ordre de 30 % à 40%, ou plus. Ce n'est qu'avec des cases lysimétriques pesés que l'on peut atteindre des précisions de l'ordre du 1/2 mm d'évaporation (pesée piézométrique ou dynamométrique), ou même de l'ordre de 0.05 mm d'évaporation (pesée par bascule mécanique). Seuls de tels dispositifs peuvent permettre d'envisager des mesures d'ETP pour des périodes de 24 h, ou même de suivre l'évolution de l'évapotranspiration potentielle au cours de la journée (C.T.G.R.E.F, 1979).

III.2.1.b Bacs d'évaporation :

Malgré l'intérêt évident de leur normalisation, les bacs d'évaporation utilisés dans les divers pays sont de formes, de dimensions et de caractéristiques différentes, car les spécialistes ne sont pas d'accord sur le meilleur type à employer.

On peut classer ces appareils en trois catégories suivant qu'ils sont disposés à la surface du sol, enterrés dans celle-ci ou installés de façon à flotter sur une nappe d'eau.

C. Les bacs placés au-dessus du niveau du sol " Bac class A "

Ces bacs présentent l'avantage d'une installation très simple et leurs résultats ne risquent pas d'être faussés par le rejaillissement des gouttes de pluie qui tombent sur le terrain avoisinant, par contre, ils sont très sensibles aux variations de la température de l'air et aux effets de l'insolation.

Le bac dit "Class A", utilisé par le Weather bureau, U.S.A" est constitué d'un cylindre métallique de 120.7 cm de diamètre et de 25.4 cm de hauteur. Dans ce cylindre, on maintient une épaisseur d'eau de 17.5 à 20 cm. Le cylindre est supporté par un support à 15 cm du sol. Le support doit permettre une bonne aération sous le bac (ANRH, 2002)

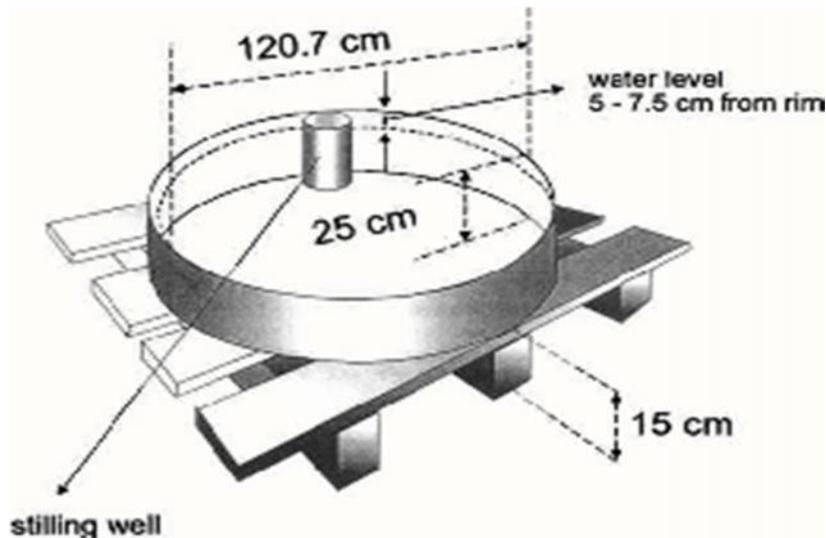


Figure III.2 : Bac d'évaporation Classe A.

d. Les bacs enterrés : le "Bac Colorado"

Les gouttes de la pluie ayant rebondi sur le sol et les débris qu'ils recueillent peuvent être la cause d'erreurs de mesure.

Le bac " Colorado " enterré se présente sous la forme d'un parallélépipède, dont la section droite est un carré de 100 cm de côté, sa profondeur est de 60 cm; il est enterré de 50 cm (ANRH, 2002) ces bacs sont moins sensibles aux influences de la température ambiante et du rayonnement solaire sur les parois, mais bien que leur bord dépasse le niveau du sol d'environ une dizaine de cm. (fig. n°03).

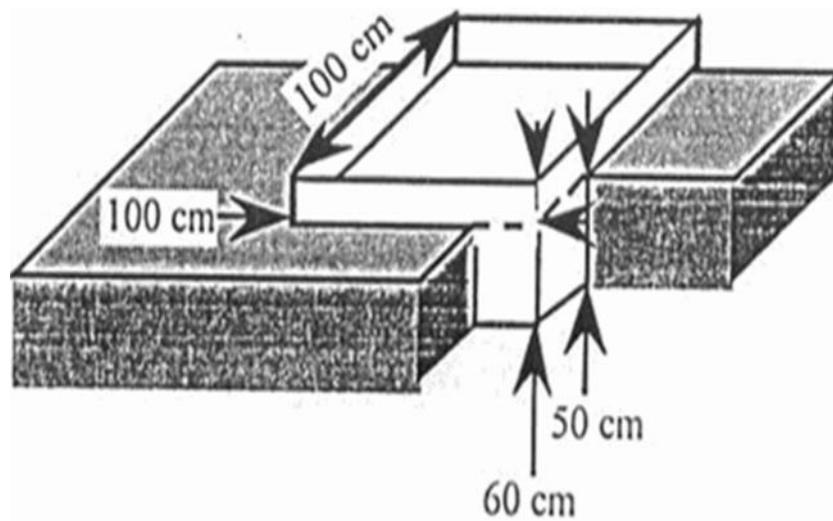


Figure III.3 : Bac d'évaporation du Colorado

e. Les bacs flottants

Ces bacs sont particulièrement utilisés quand on veut étudier l'évaporation de grandes surfaces d'eau (lacs ou rivières). Leur installation peut être difficile (problèmes d'amarrage et de stabilité sur un plan d'eau de niveau variable).

Les mesures sont évidemment moins aisées qu'à terre et sont trop souvent faussées les jours où il y a de grand vent par l'eau introduite dans le bac par les vagues ou déversé sous l'action des mouvements de roulis (**Réméniéras, 1963**).

III.3.1. Les Evaporomètres :

1- Evaporomètre Wild

Il est constitué par une balance du type "pèse-lettres" dont le plateau supporte un petit bassin contenant de l'eau (surface : 250 cm² ; profondeur : 35 mm), on note ou on enregistre les variations de poids du bassin (voir fig. n° 04).

Il présente deux principaux 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. (**Réméniéras, 1963**).

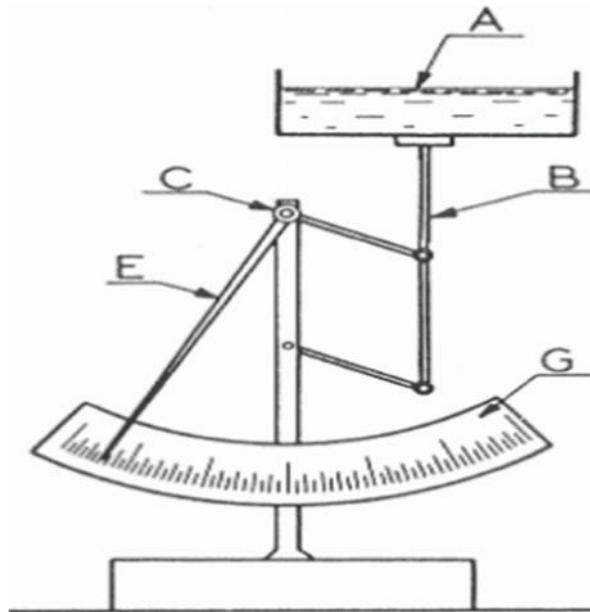


Figure III.4:Evaporomètre Wild

2- Evaporomètre de Piche"

Il est constitué par un tube cylindrique en verre en forme de U de 25 cm de long et 1.5 cm de diamètre. Ce tube gradué est fermé à sa partie supérieure, tandis que son orifice inférieur est obturé 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 (Fig.5), 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. (Réméniéras, 1963)

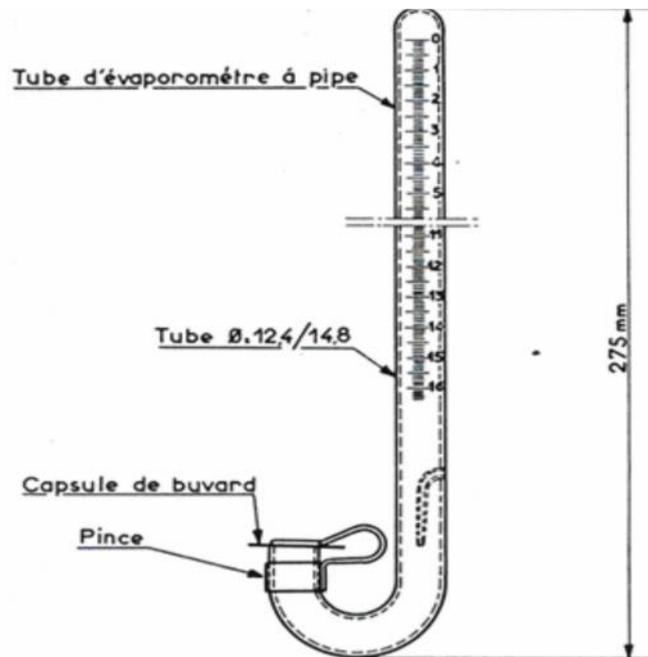


Figure III.5 : Evaporomètre de Piche

III.4.2-Méthodes indirectes

Vu la complexité de la mise en œuvre d'un dispositif de mesure de l'évapotranspiration potentielle et à défaut de mesures directes, il est toujours préférable d'utiliser des méthodes d'estimation. On dispose en effet actuellement de formules et de méthodes suffisamment variées, et adaptées à différents climats. De plus, une bonne estimation vaut mieux qu'une mauvaise mesure. Nous allons essayer de passer en résumé les principales formules d'estimation de L'ETP.

1-Développement des formules empiriques

Les méthodes d'estimation de l'ETP peuvent être groupées dans plusieurs catégories incluant notamment les équations du bilan d'énergie, aérodynamiques, combinatoires (dérivées de Penman), empiriques et semi-empiriques. La plupart de ces équations ont été développées pour des études spécifiques et sont par conséquent plus adaptées à une utilisation dans des climats similaires à ceux où elles ont été développées. De plus, il est assez courant d'utiliser

une équation développée pour déterminer l'évaporation d'une surface humide (ou d'eau libre) pour estimer l'évapotranspiration potentielle, et vice versa (**Winter et al. 1995**).

Ces nombreuses méthodes nécessitent diverses variables de données climatiques (jusqu'à quatre variables observées). Le choix d'une équation pour une étude se fait en fonction de ses performances pour des études semblables et du jeu de données disponibles. Cependant, le choix du modèle reste assez difficile, compte tenu du grand nombre de formules d'ETP existantes et il est important d'analyser et de comparer chaque groupe de méthodes.

Nous repartons ici de la classification proposée par Xu et Singh (2001), qui dénombrent cinq classes de méthodes d'estimation de l'évapotranspiration potentielle: (i) bilan hydrique, (ii) aérodynamique, (iii) combinatoires, (iv) rayonnement, et (v) température

2-Classification des méthodes d'estimations de l'ETP

Les méthodes d'estimation de l'ETP peuvent être groupées dans plusieurs catégories incluant notamment les équations du bilan d'énergie, aérodynamiques, combinatoires (dérivées de Penman), empiriques et semi-empiriques. La plupart de ces équations ont été développées pour des études spécifiques et sont par conséquent plus adaptées à une utilisation dans des climats similaires à ceux où elles ont été développées (Oudin, 2004) :

III.4.2.1. Méthodes du bilan hydrique

Les méthodes du bilan hydrique pour déterminer l'ETP sont les mêmes que les méthodes pour déterminer l'évaporation d'une surface humide ou d'une nappe d'eau libre (voir annexe). Nous pouvons citer en particulier quelques techniques courantes : les bacs à l'évaporation, l'Evaporomètres de Piche et les mesures lysimétriques à condition que le volume soit maintenu humide.

2.2. Méthodes aérodynamiques

Les méthodes aérodynamiques utilisent le concept du mouvement de la vapeur d'eau de la surface évaporante vers l'atmosphère et dérivent donc de la physique même du phénomène.

Ce sont les plus vieilles méthodes pour estimer l'évaporation d'une surface libre et elles restent parmi les plus attractives par leur simplicité.

Les méthodes issues des travaux de Penman (1948) sont aujourd'hui les plus utilisées, et la méthode de Penman est la référence pour nombre d'institutions (**Jensen et al., 1990; WMO, 1996**). Les travaux de Penman ont permis de définir une formule d'ETP en combinant l'approche aérodynamique de Dalton et une approche par le bilan d'énergie (d'où le nom

d'approche combinatoire). Ceci lui permet d'éliminer un terme délicat à mesurer : la température de surface. Cette approche, basée sur les principes physiques du bilan d'énergie et pratique à utiliser, est très séduisante.

III-4-3 Inventaire des méthodes de mesure des formules de l'ETP les plus utilisées

Dans la littérature climatologique ou hydrologique, bon nombre de formule sont systématiquement utilisées pour la mesure et la prédiction de l'évapotranspiration, les plus utilisées sont :

Formule de Turc (1960);

Formule de Thornthwaite (1948, 1955);

Formule de Blaney-Criddle (1959);

Formule de Penman ou formule dite : du bilan d'énergie (1948);

Formule de Penman-Monteith modifiée (1965) et recommandée par la FAO;

La formule de Priestley–Taylor (1972);

La méthode de Doorenbos et Pruitt (1977) dans le cadre de la FAO.

Formule de l'ANRH.

III-4-3 -1-Calcul et estimation de l'évapotranspiration potentielle (E T P) :

Le calcul de l'évapotranspiration potentielle se fait à partir des données climatiques disponibles. Pour cela, nous utiliserons les méthodes empiriques les plus utilisées en Algérie. En effet, le choix d'une formule par rapport à une autre est conditionné par le climat de la région étudiée et de son utilisation fréquente.

a. Formule de Turc 1960 : basée sur la température et le rayonnement.

Pour le calcul de ETP mensuelles nous pouvons utiliser la formule de Turc donnée par :

$$ETP = 0,40 \times (I_g + 50) \times \frac{t}{(t + 15)} K$$

Avec : t (°c) : température moyenne mensuelle et K coefficient d'ajustement mensuel.

I_g (cal/ cm²/ jour) : radiation solaire globale.

Au cas où I_g n'est pas mesurée, nous procédons à son calcul en utilisant la formule suivante :

$$I_g = I_{gA} \times \left(0,18 + 0,62 \times \frac{h}{H} \right).$$

Où:

$$I_gA = 1035 - 9,076 \times Lat + (7,050 \times Lat + 49,90) \times \cos(29,92 \times i - 182,5)$$

$$H = 362,7 + 0,2101 \times Lat + (4,085 Lat - 80,99) \times \cos(30,01 \times i - 188,9)$$

Avec:

I_{gA} : Radiation solaire globale théorique (**calories/cm²/jour**).

H : La durée d'insolation (**heure/mois**).

i : Numéro du mois (4 pour Avril et **10** pour Octobre par exemple).

Lat : Latitude du point considéré en degrés et minutes.

La formule de Turc a été établie pour une humidité relative pour le mois considéré supérieur à **50%**.

Lorsque HR n'atteint pas 50%, la valeur trouvée pour l'ETP doit être multipliée par le facteur correctif K suivant :

$$K = 1 + \frac{(50 - HR)}{70}$$

Les résultats de calculs sont présentés dans le tableau III.1 :

Tableau III.1: Estimation de l'ETP avec la méthode de Turc (1960)

Mois	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	juil	Août	Sep	Oct.	Nov.	Déc.
I_{gA} (cal/cm ² /jours)	435,31	541,54	691,68	845,7	962,56	1011,11	978,39	873,14	723,41	569,11	451,37	401,57
H (heures)	307,84	328,27	359,98	394,46	422,46	436,48	432,76	412,29	380,57	346,09	318,11	304,13
h (heures)	172,7	201,8	236,89	247	292	286	316	314	270	239	178	160
I_g (cal/cm ² /jours)	229,77	303,88	406,71	480,55	585,75	592,76	619,05	569,45	448,42	346,11	237,84	203,27
t(C°)	10,64	11,2	14,4	16,52	20,81	27	29,42	29,5	25,5	20,9	14,45	11,4
K	1	1	1	1	1	1,04	1,01	1	1	1	1	1
ETP (mm)	46,44	60,51	89,48	111,23	147,78	171,89	179,02	164,26	125,53	92,24	56,49	43,75

La représentation graphique d'ETP selon Turc est la suivante :

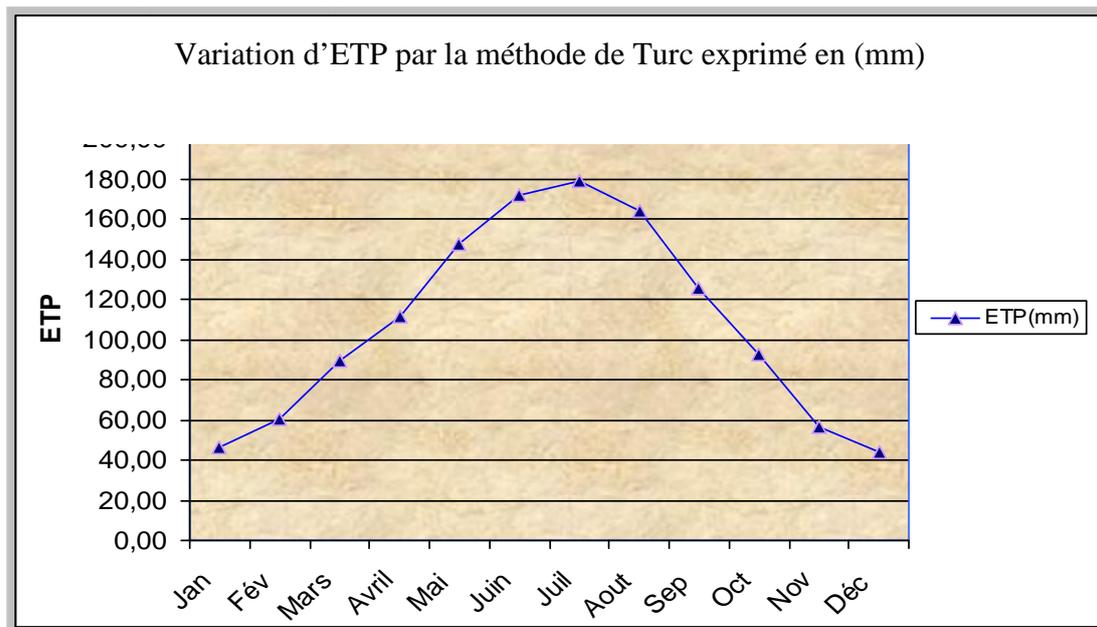


Figure III.6: Estimation de l'ETP avec la formule de Turc

b. Formule de Blaney- Criddle 1959 pour 5 jours bilan énergétique :

Elle utilise des paramètres facilement accessibles et introduit des coefficients cultureux susceptibles d'ajustement aux données locales éventuelles. Le facteur f (en mm) de cette formule s'exprime comme suit :

$$f = (0,46 \times T + 8,13) \times P$$

Où T (°C) est la température moyenne et P le pourcentage de la durée d'éclairement pendant la période considérée.

La prédiction d'ET₀ à partir du facteur de Blaney-Criddle, pour différentes conditions d'humidités relatives minimum, d'heure d'insolation par jour et de vent diurne est donnée par la figure III.7

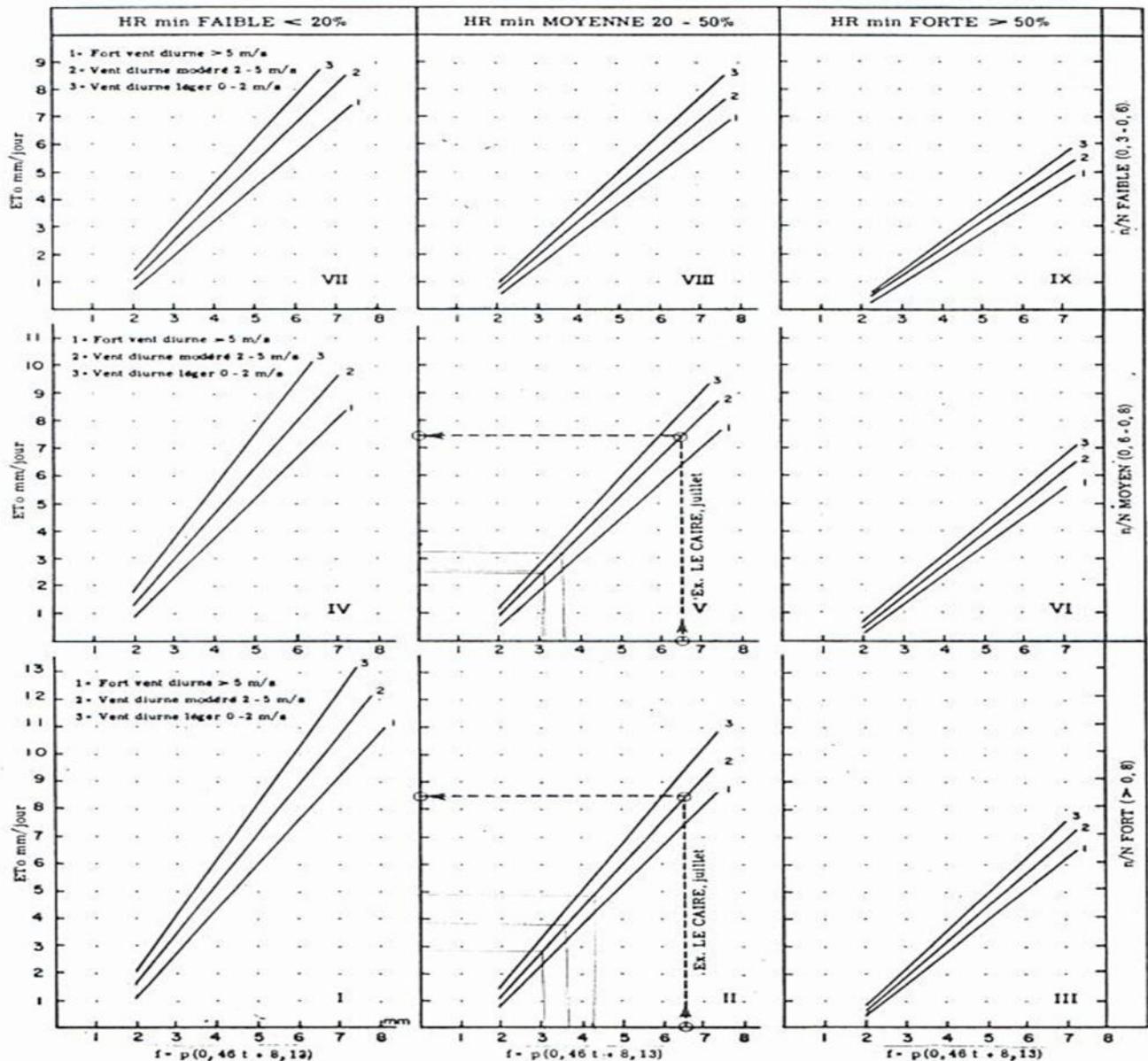


Figure III.7 : Estimation de l'ET₀ avec la méthode de Blaney-Criddle

c. Formule de Thornthwaite 1948 :

C'est une formule qui utilise un seul paramètre qui est la température

$$ETP = 16 \left(\frac{10 \times t^a}{I} \right) \times K$$

Où t est la température moyenne mensuelle (°C), a : est fonction de l'indice thermique mensuel & K : coefficient d'ajustement mensuel.

$$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1,514}$$

I : l'indice annuel égale à la somme de douze (12) indice mensuels ci-dessous & i : numéro de mois. **Formule approchée de a**

$$a = 1,6 \times \frac{I}{100} + 0,5 \quad \text{Avec : } I = \sum_1^{12} i$$

Les résultats des calculs sont présentés dans le tableau III.2

Tableau III.2 : Calcul de l'ETP mensuelle avec la formule de Thornthwaite

Mois	Jan	Fév.	Mar s	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct.	Nov.	Déc.
T(C°)	10,64	11,2	14,4	16,52	20,81	27	29,42	29,5	25,5	20,9	14,4 5	11,4
K	1	1	1	1	1	1,04	1,01	1	1	1	1	1
I	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,06	1,02	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
ETP (mm)	2426,49	2709,2	4544,3	6028,7	9695,3	17232,2	19968,66	19881,76	14730,61	9781,87	4576,8	2809,7

Avec : **a=2,058** et **I=97,40**.

d. Formule de Penman 1948:

La méthode utilisée pour calculer les valeurs de l'évapotranspiration de référence **ET₀** est celle qui est exposée dans les bulletins **FAO** série « d'irrigation et drainage N° 24 des besoins en eau des cultures ».

$$ET_0 = C [W \times Rn + (1 - W) \times f(u) \times (ea - ed)]$$

Cette méthode comprend deux paramètres, à savoir le facteur climatique (rayonnement) et le facteur aérodynamique (vent et humidité).

Où :

W x Rn : Paramètre de rayonnement.

(1-W) x f(u) x (ea - ed) : Paramètre d'aérodynamique.

ET₀ (mm/jour) : représente l'évapotranspiration de la culture de référence.

W : facteur de pondération lié à la température.

Rn (mm/jour) : représente le rayonnement net en évaporation équivalente.

(ea – ed) : c'est la différence entre la tension de vapeur réelle moyenne, les deux étant exprimées en millibars.

f (u) : c'est la fonction liée au vent.

C : c'est le facteur de correction pour compenser les conditions météorologiques diurnes et nocturnes.

Rnl = f (u) x f(ed) x f (n/N) : Rayonnement de grande longueur d'ordre en **mm/jour**.

f(ed) = 0,34 – 0,044 ed : Correction rendant compte de l'effet de la tension de vapeur sur le rayonnement de grande longueur d'onde.

f (u) = 0,27 (1+u/100) : Valeur de la fonction du vent, d'après le parcours du vent (**Km/jour**) à une hauteur de **2 m**.

f (n/N) = 0,1 + 0,9 n/N : Correction rendant compte du rapport entre les heures réelles et astronomiques sur le rayonnement de grande longueur d'onde.

ed = ea HR : Tension de vapeur en millibars.

Rn = Rns – Rnl : Rayonnement net en mm/jour.

Ra : Rayonnement extra- terrestre exprimé en évaporation équivalente en mm/jour.

Calcul des besoins en eau en utilisant la formule de Penman Monteith 1965 modifiée et les données de la station climatologique de la ville de Chéiff.

Tableau III.3 : Calcul de l'ETP mensuelle avec la formule de Penman

Mois	Jan	Fé v.	Ma r	Avr	Ma i	Jui n	Jui l	Aoû t	Sep	Oct.	Nov.	Déc.
Température moyenne(C°)	10,6 4	11, 2	14, 4	16,5	20, 8	27	29, 42	29,5	25,5	20,9	14,4 5	11,4
Humidité relative (%)	77,3	68, 3	64, 4	60,2	56, 4	46, 9	49, 1	51,1	57	63,6	73,7	73,5
Vitesse du vent U (m/s)	3,2	3,5	3,3	4	3,4	3,6	3,3	3,2	3,6	3,1	3	3,3
U/100 (Km/jours)	2,76	3,0 2	2,8 5	3,46	2,9 4	3,1 1	2,8 5	2,76	3,11	3,68	2,59	2,85
Ea (mbar)	12,8 1	13, 3	16, 5	18,8	24, 6	35, 7	41, 07	41,2 5	32,6 5	24,7 5	16,5 1	13,4 6
Ed (mbar)	9,90	9,0 7	10, 60	11,3 3	13, 89	16, 74	20, 17	21,0 8	18,6 1	15,7 4	12,1 7	9,89
Ea-ed (mbar)	2,91	4,2 1	5,8 6	7,49	10, 73	18, 96	20, 90	20,1 7	14,0 4	9,01	4,34	3,57
f (u)	0,84	0,9 0	0,8 6	0,99	0,8 8	0,9 2	0,8 6	0,84	0,92	1,04	0,81	0,86
1- W	0,44	0,4	0,3	0,35	0,3	0,2	0,2	0,22	0,26	0,31	0,38	0,43

		3	8		1	4	2					
(1-W) x f (u) x (ea-ed) en (mm/j)	1,08	1,6 3	1,9 2	2,59	2,9 3	4,1 7	3,9 7	3,74	3,35	2,89	1,33	1,32
Ra (mm/jour)	7,40	9,4 0	12, 10	14,7 0	16, 40	17, 20	16, 70	15,4 0	13,1 0	10,6 0	8,00	6,60
n (heure/jour)	5,57	6,9 4	7,6 4	8,23	9,4 2	9,5 3	10, 19	10,1 3	9	7,71	5,93	5,16
N (heure/jour)	9,9	10, 9	11, 9	13,1	14, 1	14, 6	14, 38	13,5 4	12,4 2	11,3 2	10,2 4	9,7
n/N	0,56	0,6 3	0,6 4	0,63	0,6 7	0,6 5	0,7 1	0,75	0,72	0,68	0,58	0,53
F (n/N)	0,6	0,6 7	0,6 8	0,67	0,7	0,6 9	0,7 4	0,78	0,75	0,71	0,62	0,58
f (t)	12,8 3	12, 9	13, 6	13,9	14, 8	16, 1	16, 58	16,6	15,3	14,7 8	13,5 7	12,9 8
f(ed)	0,2	0,2 1	0,2	0,19	0,1 8	0,1 6	0,1 4	0,14	0,15	0,17	0,19	0,2
(0,25+0,5n/N) (mm/j)	0,53	0,5 7	0,5 7	0,56	0,5 8	0,5 8	0,6 0	0,62	0,61	0,59	0,54	0,52
Rns=0,75 x Rs (mm/j)	2,95	4,0 0	5,1 8	6,21	7,1 9	7,4 4	7,5 7	7,21	6,02	4,69	3,24	2,55
Rnl=f (n/N) x f(ed) x f (t) mm/J	1,54	1,8 2	1,8 4	1,77	1,8 6	1,7 8	1,7 2	1,81	1,72	1,78	1,60	1,51
Rs=Ra x (0,25+0,5 x n/N)	3,93	5,3 3	6,9 1	8,28	9,5 9	9,9 1	10, 09	9,61	8,02	6,26	4,32	3,41
W	0,56	0,5 7	0,6 2	0,65	0,6 9	0,7 6	0,7 8	0,78	0,74	0,69	0,62	0,57
Rn=Rns-Rnl	1,41	2,1 8	3,3 4	4,44	5,3 3	5,6 6	5,8 5	5,40	4,29	2,91	1,64	1,05
W x Rn	0,79	1,2 4	2,0 7	2,89	3,6 8	4,3 0	4,5 6	4,21	3,18	2,01	1,02	0,60
f (u) x (1-W) x (ea - ed)	1,08	1,6 3	1,9 2	2,59	2,9 3	4,1 7	3,9 7	3,74	3,35	2,89	1,33	1,32
C	0,97	1,0 2	1,0 8	1,15	1,0 7	1,0 8	1,0 8	1,07	1,03	1,05	0,98	0,95
W x Rn + (1-W) x f (u) x (ea-ed)	1,87	2,8 7	3,9 9	5,48	6,6 1	8,4 7	8,5 3	7,95	6,52	4,90	2,35	1,92
Eto (mm/jour)	1,81	2,9 2	4,3 1	6,30	7,0 7	9,1 5	9,2 1	8,51	6,72	5,14	2,30	1,82

En ce qui concerne notre projet, le calcul des besoins en eau des cultures est effectué à l'aide des logiciels INSTAT & CROPWAT. Pour l'exploitation du logiciel, nous avons introduit les informations mensuelles de la station météorologique données par l'ONM, la méthode adoptée emploie les informations homogènes et fiables suivantes :

- Température : Les températures moyennes mensuelles sont données en degré Celsius.
- Humidité de l'air : l'humidité relative de l'air exprime en pourcentage %.

-Insolation journalière : L'insolation journalière donnée en heures d'insolation.

-Vitesse de vent : La vitesse du vent peut être introduite en m/s.

Le premier utilisé par l'ONM, nous permet de calculer seulement l'évapotranspiration de référence. Les résultats de ce logiciel sont:

Tableau III.4: Résultats de calcul de l'ETP

Mois	Jan	Fé v.	Ma r	Avr	Ma i	Jui n	Jui l	Aoû t	Sep	Oct.	Nov.	Déc.
Eto (mm/jour)	1.39	2.1 6	3.1 3	4.21	5.4 7	7.2 9	7.5 3	6.95	5.32	3.42	1.88	1.49

Le logiciel CROPWAT permet au passage, l'évaluation de l'évapotranspiration de référence, selon la méthode empirique la plus appropriée de Mr Penman et Monteith modifiée. Le tableau III.5 représente l'évapotranspiration de référence ET₀, calculée à l'aide du logiciel CROPWAT :

Tableau III.5: Résultats de calcul de l'ETP (Logiciel CROPWAT)

Évapotranspiration de référence ET ₀ de Penman et Monteith						
Pays : ALGERIE		Station climatique: Chélif			(10ans)	
Altitude : 143 mètres		Coordonnées : 36.02 LN			1.33 LE	
MOIS	Temp Moy C°	Humidité %	Vent km/jour	Insolation Heures	Radiation MJ/m ² .jour	ET ₀ Penman mm/jour
Janvier	10.6	77	276	5.6	3.2	1.37
Février	11.2	68	302	6.9	5.3	2.14
Mars	14.4	64	285	7.6	8.4	3.09
Avril	16.5	60	346	8.2	11.1	4.20
Mai	20.8	56	294	9.4	13.5	5.36
Juin	27.0	47	311	9.5	14.2	7.22
Juillet	29.4	49	285	10.2	14.8	7.42
Août	29.5	51	276	10.1	13.6	6.93
Septembre	25.5	57	311	9.0	10.6	5.43
Octobre	20.9	64	268	7.7	7.7	3.47
Novembre	14.5	74	259	5.9	3.9	1.83
Décembre	11.4	74	285	5.2	2.6	1.49
ANNEE	19.3	62	292	7.9	9.0	1523

Tableau III.5

E-Formule dite ANRH

Il arrive souvent que les données climatiques ne soient pas disponibles pour permettre le calcul de l'ETP. Dans ce cas, on peut utiliser la relation de l'ETP de l'ANRH, qui permet d'évaluer l'évapotranspiration potentielle mensuelle à partir de la seule mesure de la température moyenne mensuelle correspondante de la position géographique.

Elle est développée en 2002 sous la direction du Professeur J.P.Laborde et elle s'écrit sous de la forme suivante :

$$ETP_ANRH = K_r \times K_m (H - 187) (0.032 t + 0.077).$$

Avec :

- ETP : Evapotranspiration potentielle (mm/mois).
- K_m : Coefficient mensuel dont ses valeurs sont données à la figure 8.
- K_r : Coefficient régional qu'on peut lire sur le tableau 6.
- t : température moyenne mensuelle pour le mois considéré (°C).
- H : Durée théorique mensuelle d'insolation (heures/mois) et elle est exprimée en fonction de l'ordonnée (Y) de Lambert selon la formule suivante :

$$H_i = a_i Y + b_i \quad (1.24)$$

Y : l'ordonnée de Lambert de la zone (Km).

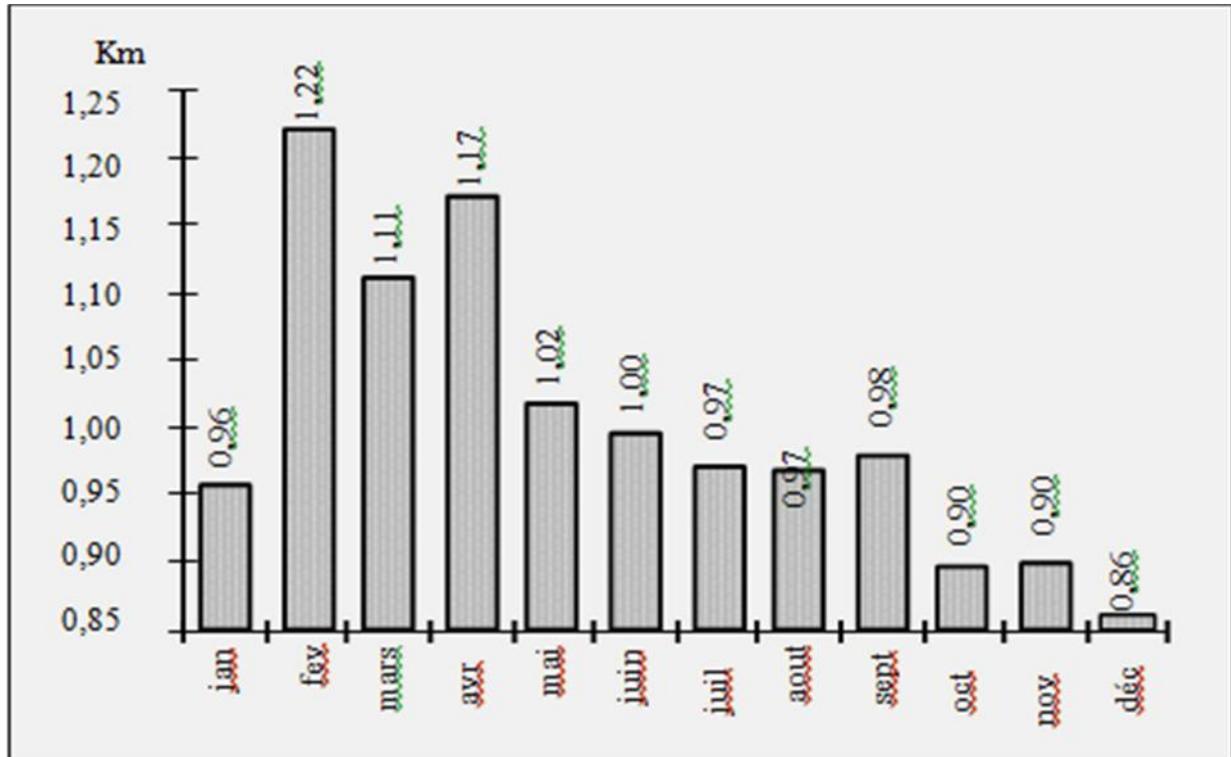


Figure 8: Evolution du coefficient correctif mensuel

Tableau III.6 : Coefficient régional

STATION	Kr	Nom	Kr	N	Kr
Aïn Sefra	1,21	DellysA	0,87	Mostaga	0,87
Annaba	0,91	Djelfa	1,10	Msila	1,12
Arzew	0,97	El	1,15	Naam	1,11
Barika	1,24	ElBaya	1,23	O	0,99
Batna	1,12	ElMili	0,79	OumElBo	0,92
BBArreidj	1,07	Ghazao	0,81	Saida	1,01
Béchar	1,32	Guelm	0,83	S	1,04
Bejaia	0,92	JijelAe	0,79	SidiBelA	0,94
BeniSaf	0,88	Jijelpo	0,79	Skikd	0,86
Biskra	1,26	KsarChel	1,09	SoukAh	0,99
Bou Saada	1,10	Maghn	0,93	Tebess	1,00
Bouira	1,04	Masca	0,95	Tenes	0,95
Chlef	0,93	Mecher	1,14	Tiaret	1,08
Constantine	0,91	Mede	1,05	TiziOuz	0,83
DarElBeida	0,89	Milian	0,97	Tlemcen	0,93

Tableau III.7 Exemple de calcul « cas de la station Dar el Beida –Alger »

FEVRIER	kr	km	a	b	H			
28	0.89	1.22	-0.011	307	302.82			
Date	Année	ETPpenman	t°C	V _{vent} (Km/h)	Ins(h)	Hr(%)	ETP _{ANRH} (mm)	EQ
15/02/1975	1975	57.76	11.14	3.33	6.66	71	53.18	21.00972
15/02/1976	1976	49.73	11.32	3.55	4.12	77	53.9	17.43735
15/02/1977	1977	58.76	12.85	3.42	5.69	75	59.92	1.347646
15/02/1978	1978	68.33	13.89	3.76	6.03	69	64	18.73055
15/02/1979	1979	71.81	12.59	5.16	4.63	70	58.89	167.0364
15/02/1980	1980	51.08	12.29	2.75	5.88	76	57.7	43.77518
15/02/1981	1981	54.04	10.76	3.52	5.79	74	51.71	5.422076
15/02/1982	1982	48.48	11.4	3.03	4.96	77	54.21	32.89908
15/02/1983	1983	49.85	10.03	2.84	5.41	72	48.85	1.008677
15/02/1984	1984	55.87	10.62	4.03	4.46	73	51.13	22.40128
15/02/1990	1990	50.05	10.9	2.5	8.36	77	52.25	4.845729
15/02/1991	1991	42.88	10.3	3.2	4.5	81	49.89	49.17016
15/02/1992	1992	44.19	10.1	2	7.17	77	49.11	24.22418
15/02/1993	1993	36.99	10.2	1.9	5.5	84	49.5	156.5948
15/02/1994	1994	59.4	12	3.6	7.25	74	56.57	8.026392
15/02/1995	1995	48.43	12.7	1.7	7.96	78	59.32	118.5111
	MOY	52.98					54.38	

Tableau III8 : Coefficient d'évaluation des durées théoriques d'insolation pour la formule de l'ANRH

Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
al	-0.022	-0.01	-0.001	0.01	0.02	0.025	0.02	0.014	0.003	-0.008	-0.019	-0.025
bl	315	307	371	389	429	429	436	414	370	351	311	308

III.4 Comparaison des modèles d'ETP : revue de la littérature

Il est difficile de faire un bilan comparatif des formules d'évapotranspiration potentielle, compte tenu de la diversité géographique des sites d'étude. De plus, les modèles d'ETP sont évalués par rapport à des estimations de référence. Il s'agit souvent de mesures obtenues à partir d'un lysimètre ou à partir de bacs à évaporation, ou encore des estimations d'ETP par la méthode de Penman, considérée comme la méthode la plus satisfaisante, d'un point de vue physique (Jensen et al., 1990).

L'étude la plus complète est celle menée par Jensen et al. (1990) : 19 méthodes d'estimation d'ETP sont comparées aux mesures lysimétriques sur onze stations climatiques réparties aux États Unis, au Danemark, en Australie et au Zaïre. Les principales méthodes évaluées sont les suivantes : méthode de Penman, Kimberly-Penman, Penman-Monteith, Van Bavel, Jensen-Haise, Doorenbos-Pruitt, Priestley-Taylor, Turc, Blaney-Criddle, Thornthwaite, évaporation par bac. Les estimations de chacune des méthodes sont comparées aux mesures lysimétriques, pour plusieurs pas de temps. Au pas de temps mensuel, les meilleures estimations de l'ETP sont obtenues par les méthodes combinatoires. Ensuite, la méthode de Doorenbos-Pruitt obtient les meilleurs résultats avec les formules basées sur le rayonnement, malgré une surestimation systématique et la méthode de Blaney-Criddle est la méthode basée sur la température la mieux adaptée. Au pas de temps journalier, les méthodes combinatoires offrent aussi les meilleures garanties par rapport au lysimètre, (Oudin, 2004).

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons essayé d'illustrer les principales méthodes et formules qui ont été utilisées dans la littérature pour l'estimation de l'ETP, en mettant l'accent sur les appareils, les instruments de mesure, ainsi que toutes les relations mathématiques délivrées par plusieurs auteurs en cas d'absence de mesure.

La nécessité de recours à l'utilisation des formules empiriques reste toujours indispensable en cas de l'absence de plusieurs paramètres météorologiques. Mais leurs application est recommandée, et conditionnée par plusieurs disciplines et précautions pour aboutir à des résultats acceptables en comparant avec celles obtenus par les instruments de mesure.

L'estimation de l'évapotranspiration en zone non pourvues de stations de mesures rend plus délicate cette mesure.

Des moyens de cartographie de l'évapotranspiration restent donc utiles et doivent être testés pour mieux estimer l'évapotranspiration potentielle.

Chap : IV

Cartographie de l'ETP

Chapitre IV : Cartographie de l'évapotranspiration potentielle

IV.1 Introduction

Le suivi des transferts de masse et d'énergie au niveau d'une surface est prépondérant pour la gestion des ressources hydriques et végétales. Il est également nécessaire à la bonne compréhension des systèmes hydrologiques et climatiques, ainsi qu'au suivi et à la prévision de leurs évolutions (**Hamimed et al.** 2014).

La cartographie désigne la réalisation et l'étude des cartes géographiques et géologiques. Elle est très dépendante de la géodésie, science qui s'efforce de décrire, mesurer et rendre compte de la forme et des dimensions de la Terre. Le principe majeur de la cartographie est la représentation de données sur un support réduit représentant un espace généralement tenu pour réel (**Brabant, 2010**).

L'évaporation des sols nus est fortement influencée par l'humidité de surface. Lorsque le sol se dessèche, il se crée en surface une couche sèche, également appelée mulch, qui réduit fortement le flux évaporatif. Nous avons donc accès avec la télédétection microonde à une variable qui est étroitement associée aux phénomènes de réalimentation en eau de la surface évaporante.

Nous présenterons donc plusieurs alternatives de cartographie de l'évaporation utilisant l'information soit mesurée par les outils d'interpolation soit donnée par les nouvelles technologies telle que les radars ou la télédétection.

IV.2 Objectif de la cartographie de l'évapotranspiration potentielle

Une connaissance approfondie de la variabilité spatiale du climat est essentielle en agronomie et agroforesterie, afin d'évaluer les capacités de production d'une région.

IV.2.1 Nécessité de l'estimation de l'évapotranspiration en zone non jaugée

L'estimation de l'évapotranspiration potentielle pour un site non pourvu de stations de mesures est nécessaire par le biais d'une cartographie. Cette cartographie reste utile en irrigation pour mieux gérer le pilotage de l'irrigation.

a-Estimation de l'évapotranspiration potentielle

Nous pouvons distinguer les modèles sur leur mode de conception. Un premier groupe de modèles rassemble les modèles mécanistes. Ceux-ci résultent de l'application des lois physiques intervenant dans le processus d'évaporation. En ce qui concerne la modélisation de l'évaporation, nous pouvons citer le modèle aérodynamique (**Grant, 1975**), les modèles issus de l'application du bilan d'énergie de surface et les modèles de transferts couplés d'eau et de chaleur dans le sol (**Passerat de Silans et al. 1989**).

Dans le second groupe, les modèles résultent encore des lois physiques, mais un certain nombre d'hypothèses simplificatrices supplémentaires sont apportées au système physique. Ces modèles seront appelés modèles mécanistes simplifiés. C'est le cas des modèles de type bicouche de bilan hydrique (**Bernard et al. 1986**) ou du modèle de Penman-Monteith appliqué Aux surfaces sèches (**Perrier, 1975**).

Enfin, nous avons un dernier groupe de modèles qui rassemblent toutes les approches purement statistiques. Dans ce cas, l'évaporation est mise en relation avec les variables d'entrée par des relations statistiques :

Lorsque nous avons à choisir un modèle, nous avons tout intérêt à prendre un modèle qui se rapproche le plus possible des lois physiques. En effet, une base physique présente de nombreux avantages. Elle permet notamment de donner une signification physique aux paramètres du modèle. Celle-ci ouvre la possibilité de les prévoir de manière tout à fait indépendante des mesures d'évaporation, offrant ainsi une clé d'extension du domaine d'application. Quant aux modèles statistiques, ils présentent souvent des domaines de validité réduits qu'il est délicat d'extrapoler à d'autres situations que celles qui ont servi à l'ajustement.

IV.2.2 Détermination de la représentation cartographique

a - Toute représentation est une simplification.

Une représentation graphique est la transcription sous forme de dessin de valeurs numériques. Un histogramme, une courbe, un diagramme en secteurs, une carte, sont des transcriptions de valeurs numériques sous une forme simplifiée, visuelle. Une variable quantitative devient alors une série de formes dessinées, selon des principes, des règles, des usages conventionnels. Lors de cette transformation, on passe de valeurs très précises, numériques, à des formes dessinées, c'est donc une simplification assez grande de l'information.

C'est cette simplification qui permet à l'information d'être plus facilement et rapidement compréhensible il est plus intéressant de lire un graphique ou une carte que de lire le tableau de données qui en est la source (**Brabant**).

IV.3 Méthodes de cartographie de l'ETP :

La cartographie des variables climatiques telles que l'évapotranspiration potentielle peut être réalisée en utilisant différentes sources de données.

Les trois principales techniques de spatialisation sont :

IV.3.1-Les méthodes de cartographie automatique : elles reposent sur le principe d'interpolation spatiale des éléments du climat, elles s'appliquent typiquement aux mesures ponctuelles de variables climatiques, telles que la pluie ou la température de l'air. Les techniques d'interpolation spatiale des données sont nombreuses. Dans ce qui suit, on détaille les méthodes et techniques les plus utilisées (**Bois, 2012**) :

IV.3.1-a les tendances

Les tendances sont des interpolations simples, réalisées avec des fonctions usuelles (polynômes de degrés croissants dans l'espace 2 , fonctions simples et suffisamment lisses à deux dimensions). On calcule des critères d'ajustement comme le critère des moindres carrés ou des moindres carrés pondérés (Somme de Carrés Résiduels). Les techniques à mettre en œuvre sont classiquement les techniques de régressions linéaires (bien que ce terme ne soit pas approprié, comme le rappellent Monestiez et Goulard, 1989, car les hypothèses du modèle statistique ne sont pas vérifiées) ou non-linéaire selon la forme du modèle.

IV.3.1-b les fonctions Spline

Une spline polynomiale d'ordre r (où r est un entier) est une fonction f dans un intervalle $[a,b]$, ayant pour nœuds un nombre n de points z_1, \dots, z_k définis (en pratique, des données expérimentales), et telle que :

f est continûment dérivable jusqu'à l'ordre $r-2$ (si $r \geq 2$)

Une spline constitue donc un ensemble de fonctions, noté $S_r(z_1, \dots, z_n)$. Il contient l'ensemble des polynômes de degré inférieur ou égal à $r-1$. Pour $r = 2$, une spline d'ordre 2 est donc une fonction continue et linéaire par morceaux. Les splines les plus fréquemment

utilisées sont les splines d'ordre 4 dites splines cubiques (car le degré du polynôme correspondant est $r-1=3$).

IV.3.1-c Polygones de Thiessen :

Cette méthode est la plus simple des interpolations, puisqu'elle attribue à tout point z la valeur du point z_i le plus proche, au sein d'un polygone, dont le centre est le point de mesure (station climatique, par exemple), et la limite est formée par la médiatrice des droites qui joignent les points entre eux. Elle est très utilisée dans l'estimation des pluies en hydrologie (**Rémeneiras, 1963**).

IV.3.1-d Modèles d'interpolation basée sur des régressions multiples

Il s'agit de techniques d'interpolation consistant à établir, pour chaque situation, une régression linéaire ou polynomiale expliquant la variabilité spatiale d'un élément du climat.

Cette approche est identique à la méthode d'interpolation par tendances, à la différence que les coordonnées euclidiennes (ou géographiques) ne sont pas les seuls variables de régression. Cette méthode permet d'éliminer les tendances qui conditionnent le champ de la variable climatique (**Oudin, 2004**). Cette approche est souvent associée à une seconde étape qui consiste à interpoler les résidus (c'est-à-dire le champ de la variable climatique, sans tendance).

IV.3.1-f -Cartographie géostatistique

La géostatistique avec ses méthodes de simulations conditionnelles offre un cadre idéal pour relier les différentes informations, comprendre et modéliser leur structure statistique, élaborer des outils de prévision. (Brochu, 2002)

Les méthodes géostatistiques sont souvent utilisées pour les problèmes impliquant des transformations non linéaires des variables mesurées. En hydrogéologie, les problèmes inverses sont traités par ces méthodes. Le paramètre inconnu peut être le coefficient de perméabilité, transmissivité, coefficient de dispersion, les conditions aux limites peuvent être identifiées.

Les paramètres sont considérés comme étant des variables aléatoires à cause de la nature hétérogène du milieu, en examinant la distribution spatiale des valeurs ponctuelles à la méthode de krigeage développées pour la prospection minière dans les années 50 (Matheron, 1960) offre l'avantage d'avoir la variance d'estimation minimale (**Laborde, 2000**), ce problème de simulation peut être résolu en deux étapes :

1. La moyenne et la fonction de variance sont estimées par les observations (données brutes).
2. L'estimation du champ (piézométrie ou concentration) est conditionnée par les observations pour obtenir les meilleures réalisations.

La technique du krigeage repose en grande partie sur la théorie statistique des variables aléatoires. Le krigeage utilise le semi-variogramme (communément appelé variogramme) pour assigner les poids aux points d'observation pendant le processus d'interpolation.

L'essentiel des méthodologies présentées requiert l'utilisation d'un logiciel de cartographie Automatique performant, accompagné si possible d'un logiciel tableur. La bonne compréhension de ce cours nécessite donc une importante phase de travaux personnels, de Pratique des méthodologies, c'est pourquoi chaque leçon est complétée par la manipulation D'un tel logiciel en situation réelle sous la forme d'exercices guidés.

IV.3.1-e Méthodes d'interpolation basées sur l'intelligence artificielle

La cartographie basée sur l'intelligence artificielle est un nouveau concept inspirée de l'interpolation des séries temporelle.

L'utilisation de réseaux de neurones artificiels par exemple ou de la logique floue est relativement récente. Elle a pris son essor depuis une quinzaine d'années, et a été rarement utilisée pour l'interpolation de variables climatiques. Cette méthode reprend les principes de fonctionnement du système nerveux des êtres vivants : un réseau d'éléments unitaires (les neurones) qui transmettent une seule information, de façon plus ou moins intense. L'interconnexion des neurones permet de véhiculer une information de complexité croissante en fonction du nombre de neurones et du nombre de connexions qui les relie.

Le principe des réseaux de neurones artificiels est né dans les années 1940 à partir d'une analogie avec le système nerveux humain. En 1943 deux chercheurs Mc Culloch et Pitts ont inventé le premier "neurone artificiel", qui correspondait à un produit d'un vecteur d'entrées, et un vecteur poids suivi d'un élément de seuillage (**Benkaci, 2006**).

Ces deux chercheurs ont montré que ces réseaux de neurones formels peuvent réaliser des fonctions logiques, arithmétiques et symboliques complexes.

Les travaux de recherches avaient pour objectif de s'approcher le plus possible du fonctionnement du cerveau humain, afin de bénéficier de plusieurs de ses fascinantes caractéristiques.

L'application des réseaux de neurones a été appliquée dans la cartographie des températures de surface (**Snell, 2000**) pour les zones du New Mexico, aux états unis.

IV-3-2 Cartographie numérique:

La cartographie numérique s'est structurée au cours du temps pour fournir une réponse à la demande croissante en données quantitatives et spatialisées sur les sols. Issue de travaux de recherche méthodologique, elle s'affirme aujourd'hui comme une méthodologie opérationnelle d'inventaire pédologique, dont l'objectif, explicitement est de fournir les données climatiques qui manquent actuellement aux activités de modélisation et d'aide à la décision.

Cet objectif comporte également des contraintes :

- Réduction des incertitudes d'estimation actuelle grâce à une relance des activités d'observation et de mesure des sols favorisée par l'utilisation systématique d'outils de mesure performants (spectrométrie des sols, proxydétection, télédétections hyperspectrale et gamma-radiométrique) et des stratégies d'échantillonnage raisonnées.

- Capacité des scientifiques à s'organiser et à se mettre en marche autour d'un objectif commun et coordonné. Au-delà des objectifs affichés dans GlobalSoilMap, la Cartographie Numérique est appelée à évoluer pour mieux intégrer qu'actuellement la connaissance et l'estimation de l'évapotranspiration. En retour, en relançant et intensifiant la collecte d'observations, la cartographie numérique peut être une opportunité pour revisiter les approches climatologiques historiques de compréhension des changements climatiques. A ce titre, la cartographie numérique des s'inscrit comme une composante à part entière de la climatologie.

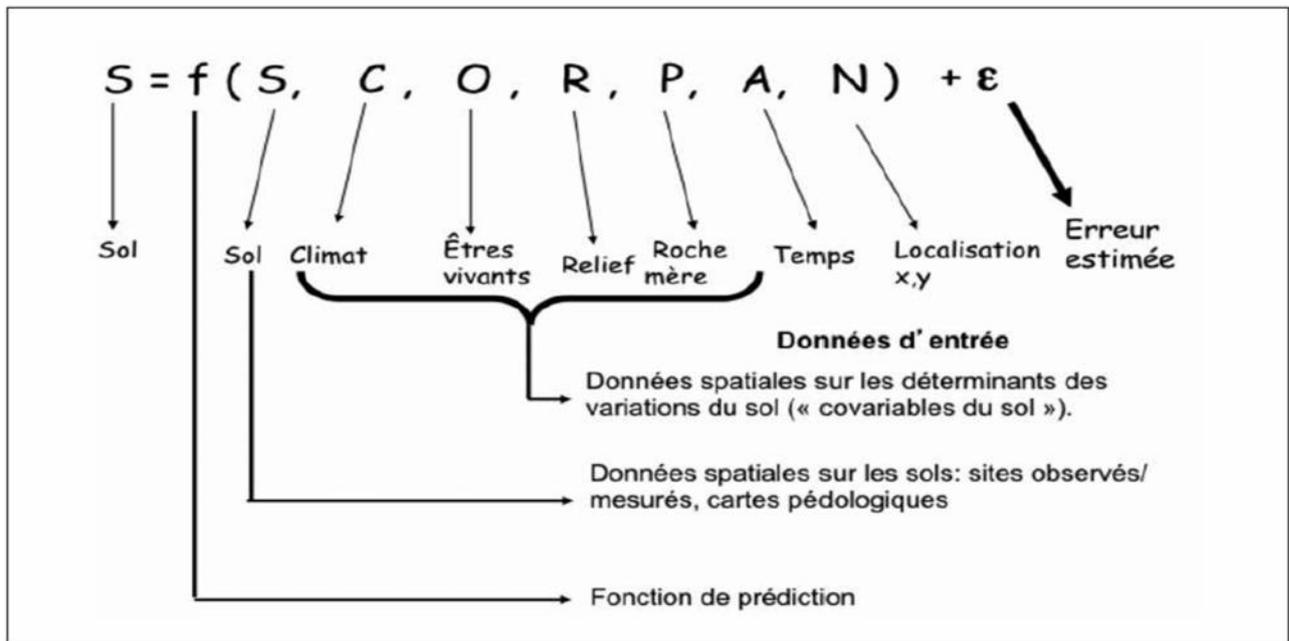


Figure IV 1 - Principe général de la cartographie numérique des sols (modifié d'après McBratney et al. 2003).

IV-3-2 a-Méthode du radar :

RADAR est un acronyme de Radar Détection and Ranging qui signifie « Détection et Télémétrie Radioélectriques ». Un radar est un système qui utilise la propriété des ondes électromagnétiques de se réfléchir (en totalité ou partiellement) sur tout obstacle, permettant ainsi de détecter des objets (cibles) qui sont situés à l'intérieur de son volume de couverture pour en extraire des informations comme la position, la vitesse, la forme.

Cible

Au sens large du terme, une cible (Target en Anglais) est tout objet qui interfère avec l'onde émise et réfléchit une partie de l'énergie vers le radar. On fait la distinction entre une cible qui est l'objet qu'on veut détecter et le « clutter » qui représente les objets non désirés (réflexions de la mer, de la terre, pluie, oiseaux, insectes, météorites,...) qui interceptent aussi l'énergie et la renvoient.

Classification des radars

Selon l'information recherchée, les radars possèdent différentes technologies. Différentes classifications sont utilisées en fonction de certains critères:

a-Selon le type de cibles

Primaires : le signal reçu est le résultat de la réflexion de l'onde émise par le radar sur un objet.

Secondaires : système d'identification des cibles où on émet un signal codé pour recevoir des réponses.

b-Selon la position relative de l'émetteur et du récepteur

Mono statiques : émission et réception sur une antenne unique.

Multistatiques : deux antennes ou plus émettrices et réceptrices séparées par une certaine distance

c-Selon l'objectif :

De veille ou de surveillance (à balayage) : le radar explore en continu la zone de couverture

De poursuite : en continu ou en discontinu (track while scan)

Multifonction : réalise les deux fonctions de surveillance et de poursuite

d-Selon la résolution

Conventionnels

Haute résolution

e-Selon le type de signal

A onde continue

A impulsions

IV-3-2-b Cartographie satellitaire :

L'estimation de l'évaporation à partir de données accessibles par télédétection a déjà fait l'objet de nombreuses études avec l'utilisation de l'infra-rouge thermique qui permet la mesure de la température de surface (**Jackson et al. 1977; Seguin et al. 1982**). Toutefois, cette approche souffre de quelques handicaps qui nuisent à l'obtention régulière d'une estimation précise de l'évaporation: les mesures sont souvent perturbées par la couche atmosphérique et les fortes variations journalières de l'évolution de la température de surface rendent peu précis les modèles basés, dans la plupart des cas, sur l'utilisation d'une mesure par jour.

L'utilisation des microondes semble pouvoir combler en partie ces handicaps. En effet, celles-ci sont peu sensibles aux conditions atmosphériques ce qui permet d'envisager d'avoir la

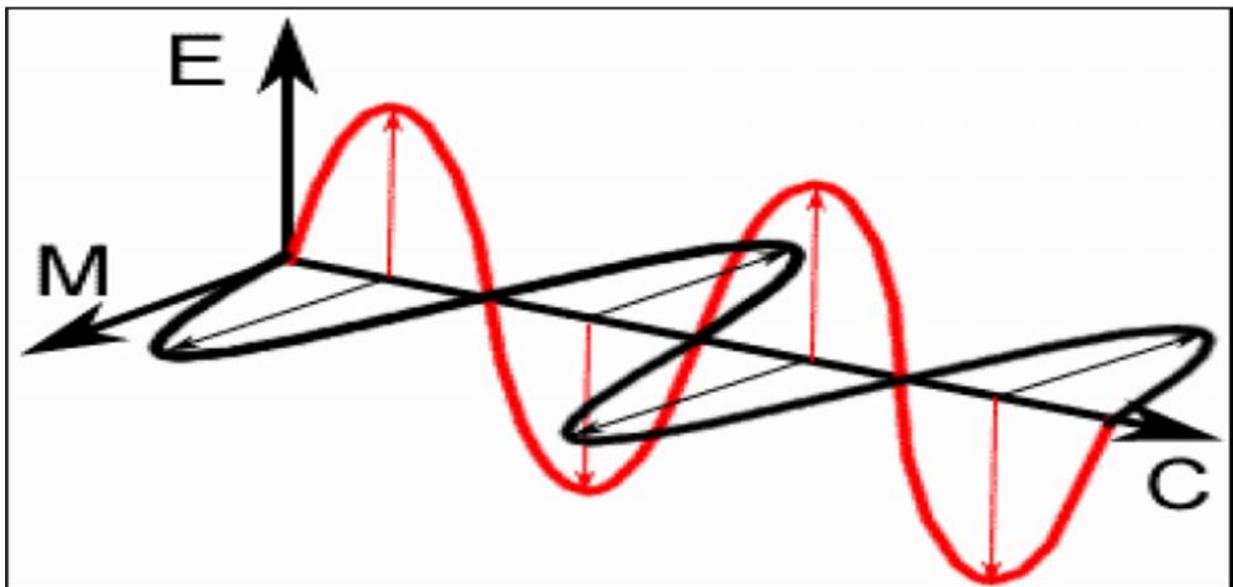
régularité dans l'acquisition des données, nécessaire pour le suivi de l'évaporation. De plus, il a été montré (**Jackson & Schmugge, 1989**) qu'en bande L (1.4 GHz) et en bande C (5.3 GHz), un des principaux facteurs de variation du signal mesuré sur sol nu est l'humidité volumique de surface du sol.

La télédétection est une technique qui permet, à l'aide d'un capteur, "d'observer" et d'enregistrer le rayonnement électromagnétique, émis ou réfléchi, par une cible quelconque sans contact direct avec celle-ci. Le traitement et l'analyse des informations véhiculées par le rayonnement enregistré permettent d'accéder à certaines propriétés de cette cible : géométriques (position, forme et dimensions), optiques (réflexion, transmission, absorption, etc.) et physico-chimiques (température, teneur en eau, chlorophylle foliaire, phyto-masse, matière organique du sol,...), etc.

IV-3-2 1. Bases physiques de la télédétection

IV-3-2.1-a Rayonnement électromagnétique

Selon la théorie corpusculaire de la lumière, le rayonnement électromagnétique peut être considéré comme étant un flux de particules élémentaires appelés photons. Selon la théorie Ondulatoire, le rayonnement électromagnétique est composé de deux vecteurs champ électrique et magnétique perpendiculaires et se déplaçant à la vitesse de la lumière (dans le vide $c = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$) (figure 1). Deux propriétés principales caractérisent une onde électromagnétique : sa longueur et sa fréquence.



FigureIV2 : onde électromagnétique monochromatique

La longueur d'onde est la distance entre deux points homologues (deux crêtes ou deux creux) qu'on note λ (m). La fréquence est le nombre d'oscillations par unité de temps qu'on note ν (nombre oscillations/s ou Hertz Hz). La relation reliant ces deux propriétés est : $c(m s^{-1}) = \lambda(m) \cdot \nu(Hz)$

IV-3-2 b- Les différentes longueurs d'ondes sont données dans la figure suivante :

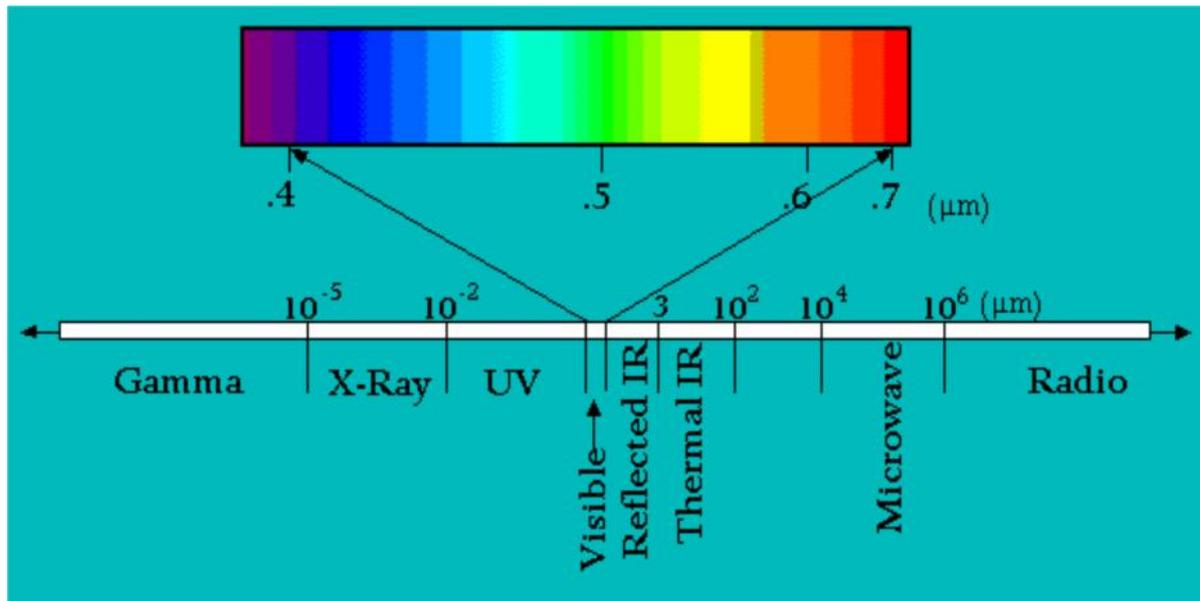


Figure IV 3 : Les différentes longueurs d'ondes

IV-3-2 c-Avantages de la télédétection en hyperfréquences :

- Observations jours et nuits
- Absence des effets atmosphériques
- Bonne sensibilité à l'humidité du sol
- Potentiel de pénétration dans le sol et à travers la végétation

IV-3-2 d-Télédétection active/ Télédétection passive:

La télédétection en mode passive s'avère très intéressante pour le suivi temporel de l'humidité du sol à l'échelle globale à cause de:

- La bonne résolution temporelle
- Le moindre des facteurs perturbateurs

IV-3-2 e Evapotranspiration

L'estimation de l'évapotranspiration par télédétection peut-être réalisée par diverses approches :

Des approches semi-empiriques, à l'aide par exemple de températures de surfaces de la végétation (**Seguin et al., 1982**). Dans la plupart des cas, l'évapotranspiration est calculée comme « résidu » du bilan d'énergie (chaleur latente).

Des approches déterministes, faisant appels à des modèles sol-végétal-atmosphère (SVAT). L'utilisation des images satellite pour l'estimation de l'évapotranspiration concerne essentiellement l'évapotranspiration réelle, par des approches de bilan énergétique. Elles font intervenir des calculs de surface de végétation, à l'aide d'indices de végétation (NDVI, par exemple), basés sur l'écart de signal des canaux rouge et proche infra-rouge des images satellite. Le rayonnement net est estimé soit directement à partir de l'albédo obtenu par analyse d'images du canal visible, soit par couplage avec les valeurs de rayonnement global mesuré par des capteurs situés au sol. La pression de vapeur est estimée par la température de surface.

Les modèles de bilan d'énergie peuvent donner des estimations assez précises de l'évapotranspiration réelle, sous climat méditerranéen (**Sobrino et al. 2005**). Ces approches ont un intérêt limité en agro-climatologie : la mesure de l'évapotranspiration réelle n'étant pas dépendante seule des conditions climatiques, il est difficile de caractériser les sources de variations spatiales de l'évapotranspiration. Elles peuvent être dues à la culture qui occupe le sol, au type de sol sur lequel elle est implantée ou encore à la demande évaporative de l'atmosphère. Il n'est, par conséquent, pas possible d'évaluer le potentiel agro-climatique d'un milieu concernant la demande évaporative uniquement. Il faut pour cela faire appel à des méthodes estimant l'évapotranspiration potentielle (ET₀ ou ETP).

Choudhury (1997) a établi des cartes d'ET₀ sur l'ensemble de la planète, à partir du rayonnement global et de la pression de vapeur estimés à partir d'images satellite, et de la température de l'air mesurée au sol, avec des incertitudes importantes, mais suffisamment faibles en comparaison avec la variabilité de l'ET₀ à l'échelle planétaire.

IV-4-1 Application de la cartographie de l'évapotranspiration par la méthode du krigeage

Le krigeage est largement utilisé pour l'interpolation d'une variable régionalisée. On montre cependant que si les points connus sont entachés d'une erreur de mesure non stationnaire, il convient de modifier la méthode classique en introduisant la notion de variogramme structural. Dès lors le krigeage peut être abordé de façon rigoureuse.

Ondétaile ci-après l'étude du variogramme et de son utilisation dans le krigeage lorsque la Variable Régionalisée (V.R) échantillonnée est affectée d'erreurs de mesure connues a priori, et se présente notamment lorsque la Variable Régionalisée étudiée est le résultat d'une analyse statistique en chaque point de donnée.

IV-4-2 Rappel des équations du krigeage (cf. MATHERON)

Le krigeage envisagé est le krigeage ponctuel universel à variogramme connu :

-Ponctuel signifie que l'on cherche à estimer la valeur Z_0 prise par la V.R. Z en un point x_0 non échantillonné,

- Universel signifie que la méthode est applicable même en présence d'une dérive non stationnaire sur le domaine étudié (la dérive $m(x)$ est l'espérance de la V.R. Z au point x : $E[Z(x)]$).

* A variogramme connu signifie que l'on utilise l'hypothèse intrinsèque :

L'hypothèse intrinsèque stipule que les accroissements $z(x) - z(x+h)$ entre deux points distants de h (et non la V.R. Z elle-même) admettent, sur le domaine étudié, les deux moments stationnaires suivants :

$$E [Z(x) - Z(x+h)] = M(h)$$

$$\text{Var} [Z(x) - Z(x+h)] = 2 \gamma(h)$$

(1b)

La fonction $M(h)$ est la dérive linéaire. Sa valeur ne dépend que de la distance h :

$M(h) = m(x) - m(x+h)$, Quel que soit x .

La fonction $\gamma(h)$ est le demi-variogramme ou variogramme, ou fonction intrinsèque, également indépendante de la coordonnée x .

Pour établir les équations du krigeage, nous supposons que la dérive peut être approchée, dans le voisinage du point x_0 où l'on cherche à estimer z_0 , par la forme linéaire :

$$m(x) = \sum_{l=1}^k a_l \cdot f^l(x)$$

Où les $f^l(x)$ sont k fonctions linéairement indépendantes (avec $f^1(x) = 1$) et les a_l sont des coefficients inconnus.

Si l'on note γ_{ij} , le variogramme $\gamma(d(i, j))$ pour la distance entre deux points i et j , si n est le nombre de points connus et le sous-indice o désigne le point inconnu, Le système d'équations du krigeage ponctuel universel à variogramme connu s'écrit :

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j \cdot \gamma_{ij} + \sum_{l=1}^k \mu_l \cdot f_i^l = \gamma_{io} \quad \forall i = 1, n$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j \cdot f_j^l = f_0^l \quad \forall l = 1, k$$

Où les μ_l sont les k paramètres de Lagrange associés aux conditions d'optimalité de l'estimation, et les λ_j sont les poids associés aux mesures z_j pour l'estimation de z :

$$\hat{z}_0 = \sum_{j=1}^n \lambda_j \cdot z_j$$

La variance d'estimation ou variance de krigeage est donnée par :

$$\sigma_K^2 = \sum_{j=1}^n \lambda_j \cdot \gamma_{0j} + \sum_{l=1}^k \mu_l \cdot f_0^l$$

IV-4-3. Le variogramme

Le variogramme $\gamma(h)$ (défini à l'équation 1b) contient toute l'information structurale souhaitable concernant la variable régionalisée (Serra, 1967) :

- dimension de la zone d'influence autour d'un point,
- nature isotropique ou anisotropique de la V.R.,
- nature de la continuité de la V.R. dans l'espace.

L'étude du variogramme est donc un puissant moyen d'étude de la structure du phénomène analysé. De plus, la connaissance du variogramme est indispensable à la mise en œuvre correcte du krigeage.

Dans le cas général où la dérive $m(x)$ n'est pas stationnaire, la détermination du variogramme n'est pas facile.

Si l'on se limite au cas où la V.R. ne présente pas de dérive, la détermination du variogramme $\gamma(h)$ peut facilement être effectuée. On aura en effet :

$$\begin{aligned}\text{Var}[Z_i - Z_j] &= \text{Var}[Z_i] + \text{Var}[Z_j] - 2\text{Cov}[Z_i, Z_j] \\ &= E[(Z_i - E[Z_i])^2] + E[(Z_j - E[Z_j])^2] - 2E[(Z_i - E[Z_i])(Z_j - E[Z_j])]\end{aligned}$$

Si la dérive $m(x) = E[Z(x)] = \text{constante}$, on a donc $E[Z_i] = E[Z_j]$.

Il vient donc : $\text{Var}[Z_i - Z_j] = E[(Z_i - Z_j)^2]$.

L'estimateur non biaisé de $\gamma(h)$ est alors donné par la formule :

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2(N_h - 1)} \sum_{i,j}^{N_h} (z_i - z_j)^2$$

Où N_h est le nombre de couples de points i et j distants de h , N_{h-1} corrigeant le biais de l'estimateur. z_i et z_j sont deux points connus distants de h .

Pratiquement, on effectuera la détermination de $\gamma(h)$ par classes de distances. On dira que $\hat{\gamma}(h)$ (11) est le variogramme brut expérimental (appelé variogramme expérimental dans la littérature).

IV-4-4-Etapes de cartographie automatique

1- Collecte d'une base de données

- Collecte et critique des données de mesures (ANRH, et ONM)
- Constitution de Grilles mensuelles des P et E.T.P. Lambert) issu du MNT (ALGERIE DU NORD)

2- Analyse géostatistique

- Etude du variogramme de l'échantillon et choix du modèle (linéaire, gaussien, exponentiel)

3- Cartographie au moyen d'un logiciel tel que le Surfer.

4- Analyse de la cartographie et exploitation dans le bilan d'eau par exemple.

IV-5 Conclusion

La cartographie est un axe de recherche et d'application qui s'est modernisé avec l'avenue de nouveaux outils tels que le radar et la télédétection.

Ainsi plusieurs méthodes ont été développées pour permettre une analyse et une estimation spatiale de certains paramètres agro-climatiques tels que l'évapotranspiration potentielle. Cette estimation devient nécessaire dans le cas de grandes étendues en particulier dans les zones arides et semi-arides.

L'objectif final est d'avoir une cartographie représentative de certains coefficients d'usage courant pour l'estimation de l'évapotranspiration avec des coefficients correctifs correspondants pour chaque secteur et chaque formule et d'en tirer en finalité des conclusions constructives et de perspectives pour les études ultérieures.

Conclusion générale

La notion de l'évapotranspiration est très importante dans le domaine de l'irrigation et de l'agronomie, la certitude dans son évaluation a un impact évident dans le bilan hydrique et notamment dans la modélisation conceptuelle qui aboutit aux évaluations des ressources.

Dans toute étude agro-climatologique, l'estimation de l'évapotranspiration potentielle nécessite la mesure de plusieurs paramètres en relations étroites avec sa valeur à l'échelle journalière et mensuelle, ce qui n'est pas le cas pour plusieurs stations de mesure où la température demeure l'unique paramètre à maîtriser.

Dans ce mémoire, nous avons eu recours aux différentes méthodes d'estimation de l'évapotranspiration potentielle. Les mesures effectuées par quatre formules ont donné généralement des variations parfois très importantes, ce qui stipule sur la rigueur de choix de la méthode d'estimation de l'évapotranspiration avant toute étude en irrigation.

En deuxième lieu, nous avons détaillé les différents modèles de cartographie de l'évapotranspiration, cette cartographie devient indispensable, dans le cas de zones non pourvues de stations climatologiques.

L'objectif final est d'avoir une méthodologie de cartographie de l'évapotranspiration par des méthodes les plus robustes.

La télédétection est une méthode de cartographie relativement récente, vu sa capacité de généralisation spatiale, elle doit être explorée dans la cartographie de l'évapotranspiration et de certains paramètres intervenant dans le suivi agricole, pour une meilleure gestion des grands périmètres irrigués.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1-ANRH. (2002). Notice explicative de la carte des évapotranspirations potentielles du Nord de l'Algérie. *Edit : Agence nationale des ressources hydrauliques. Alger, 42 p.*

2-Bernard, R., Soares, J. V. & Vidal Madjar, D. (1986) Differential bare field drainage Properties from airborne microwave observations. *Wat. Resour. Res.* 22, 869-8.

3- Benkaci, T. (2006). Etude des modèles pluie débit au pas de temps mensuel et journalier par les modèles conceptuels et les systèmes neuro-flous. Thèse de Doctorat, INA Alger, 230 p.

4-BNEDER, 1992 - Hydrogéologie, Mission .n°2. TIPAZA: 25p.

5-Bouchet P. (1964). Evaporation réelle, évapotranspiration potentielle et production agricole. *Edit : I.N.R.A .Paris, 165 p.*

6-Bouchet R.J., Robelin M., 1969- Météorologie et agronomie bulletin Technique d'information : 238 p.

7-Charles R., 1975- La détermination pratique de l'évaporation. Application à l'Afriques centrale. ORSTOM. Paris: pp 27-67.

8-Choudhury B.J., Di Girolamo N.E., 1998. A biophysical process based estimate of global land surface evaporation using satellite and ancillary data Model description and comparison with observations. *Journal of Hydrologie* 205 (1998) 164-185.

9-Clement M., Paul A., Jean C.C., 2007- Bases techniques de l'irrigation par Aspersion: pp 455-457.

10-C.T.G.R.E.F.1679 - Evaluation des quantités d'eau nécessaires aux irrigations. *Edit: Ministère de l'agriculture. CTGREFF. France, 204p.*

11-Cruziat, 1995. La circulation de l'eau dans les plantes. *PMH, revue Horticole, 363, 17-23.*

12-Dubost D., 1992- Aridité, agriculture et développement : le cas des oasis algériennes .In *sécheresse* no 2. vol. 3.

13-Gobat J.M , Agrano M., Matthey W, 2010 : Le sol vivant, base de pédologie biologie des sols. Presses universitaires et romandes, EPFL, Lausanne, Suisse.

14-Grant, D. R. (1975) Comparison of evaporation measurements using different methods. *Quart. J. Roy. Met. Soc.* 101, 543-5

15-Hillel, D. 1988. L'eau et le sol: Principes et processus physiques. Ed Academia, 288 pages.

16-Katerji N., & Perrier A., 1983 Modélisation de l'évapotranspiration réelle ETR d'une parcelle de luzerne: Rôle d'un coefficient cultural. *Agronomie, 3, 513-521.*

17-Jackson, R. D., Reginato, R. J. & Idso, S. B. (1977) Wheat canopy temperature: a practical Tool of evaluating water requirements. *Wat. Resour. Res.* 13, 651-6.

18-Jackson, T. J. & Schmugge, T. J. (1989) Passive microwave remote sensing system for soil Moisture: some supporting research. *IEEE Tians. Geosci. Remote Sens.* "ZI (2), 225.

19-Laberche, 2010. Biologie végétale. Editions Dunod, 2010 304 pages.

20- Laborde J.P, 2010. Eléments d'hydrologie de surface. Ecole polytechnique de l'université de Nice, Sophia Antipolis. France.

21-Larouci N., 1991- Contribution à la conception d'un évaporomètre a surface Poreuse. Thèse ING. AGR. INA, Al Harrach.

22-Makhloufi A. 2010, Calibrage spatial et temporel de quelques relations d'usage courant pour l'estimation de l'évapotranspiration de l'Algérie du Nord

23-Matheron G., 1982 : *La déstructuration des hautes teneurs et le krigeage des indicatrices.* Rapport N-761, Fontainebleau, Ecole des Mines de Paris, 33 pp

24-Murisier, F. et Zufferey, V., 2004. Etude des Terroirs Viticoles Vaudois. Revue Suisse de Viticulture, Arboriculture et Horticulture, 36(2-3): 1-20.

25-Passerat de Silans, A., Bruckler, L., Thony, J. L. â Vauclin, M. (1989) Numerical modeling of coupled heat and water flows during drying in a stratified bare soil. Comparison with field observations. 7. *Hydrol.* 105,109-1

26-Peguy CH. P., 1970- Précis de climatologie. 2eme édition, ed. Masson et Cie. Paris: pp 265-275.

27-Pepin S., Bourgeois G. 2012. Outils agro-météorologiques pour la planification de l'irrigation des cultures. Colloque sur l'Agroclimatologie, Quebec, Canada.

28-Perrier, A. (1975) Etude physique de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles. Expressions et paramètres donnant l'évapotranspiration réelle d'une surface "mince". *Ann. Agron.* 26 (2), 105-123

29- MEBARKI et Pr Jean Pierre LABORDE(2012). LA CARTOGRAPHIE, OUTIL DE VALORISATION DES DONNEES DE MESURES. Colloque international. *ABH-CSM, Constantine, 4-5 juin 2012*

30-Rémériéras G.1963- L'hydrologie de l'ingénieur. Edit : Collection de la direction des études et recherche d'électricité. France, 266 p.

31-Sainh S., Aspinall D., 1998- Sterility in wheat induced by water deficit or high temperature: possible mediation by abscisic acid. Australia: pp 529-537.

32-Séguin, B., Baelz, S., Monget, J. M. & Petit, V. (1982) Utilisation de la thermographie Pour l'estimation de l'évaporation régionale. I. Mise au point méthodologique sur le site De la Crau. *Agronomie* 2 (1), 7-1

33-Tourad O.S., 1990- Contribution à la conception d'un évaporomètre à surface Poreuse. Thés ING AGR. INA. El -HARRACH.

34-Traore F. 2007, Méthodes d'estimation de l'évapotranspiration réelle à l'échelle du bassin versant du Kou au Burkina Faso. DEA, Univ de Liège. Belgique.