

THESE / UNIVERSITE RENNES 2
Sous le sceau de l'Université européenne de Bretagne

Pour obtenir le titre de
DOCTEUR DE l'UNIVERSITE RENNES 2
Mention : Géographie
Thèse réalisée en cotutelle avec l'Université de Tunis, Tunisie

Présentée par
Mustapha MJEJRA

Préparée à l'Unité Mixte de recherche 6554 CNRS
LETG-RENNES COSTEL
Université Rennes 2

Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de l'Oued Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des systèmes d'information géographique

Thèse soutenue le 18 décembre 2015
devant le jury composé de :

Gérard BELTRANDO
Professeur, Université Denis Diderot-Paris 7 / Rapporteur et président

Habib BEN BOUBAKER
Maître de Conférences HDR, Faculté des Lettres, des Arts et des Humanités de la Manouba /Rapporteur

Latifa HENIA
Professeur, Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis/ Directrice

Vincent DUBREUIL
Professeur, Université Rennes 2/ Directeur

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

SOUS LE SCEAU DE L'UNIVERSITE EUROPEENNE DE BRETAGNE

UNIVERSITE RENNES 2 / UNIVERSITE DE TUNIS

École Doctorale Sciences Humaines et Sociales / Structures, Systèmes, Modèles

et Pratiques en Lettres et Sciences Humaines et Sociales

LETG-RENNES COSTEL/ FSHST, GREVACHOT

Doctorat en Géographie

Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de l'Oued Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique

Présentée par **: Mustapha MJEJRA**

Thèse soutenue le 18 décembre 2015
devant le jury composé de :

Gérard BELTRANDO

Professeur, Université Denis Diderot-Paris 7 / Rapporteur et président

Habib BEN BOUBAKER

Maître de Conférences HDR, Faculté des Lettres, des Arts et des Humanités de la Manouba /Rapporteur

Latifa HENIA

Professeur, Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis/ Directrice

Vincent DUBREUIL

Professeur, Université Rennes 2/ Directeur

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

FICHE PRÉSENTATIVE DE LA THÈSE

- Nom et prénom de l'auteur : **Mustapha MJEJRA**
- Intitulé du travail : Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de l'Oued Mejerda en Tunisie : apport de la télédétection satellitaire et les Systèmes d'Information Géographique
- Nom-Prénom des directeurs de thèse :
  - ✓ Professeur Latifa HENIA, Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis, UR-GREVACHOT
  - ✓ Professeur Vincent DUBREUIL, LETG-COSTEL, Université Rennes2.
- Unité et laboratoire de formation et de recherche :
  - ✓ Groupe de Recherche sur la Variabilité du Climat et l'Homme en Tunisie (GREVACHOT)
  - ✓ Climat et Occupation du Sol par Télédétection(COSTEL)
- Écoles Doctorales avec lesquelles il y a eu collaboration pour ce travail :
  - ✓ École Doctorale des Structures, Système et Matériels en Sciences Humaines et Sociales, université de Tunis.
  - ✓ École Doctorale des Sciences Humaines et Sociales, université Rennes2
- Soutien financier :
  - ✓ GREVACHOT
  - ✓ École Doctorale SMSHS
  - ✓ COSTEL
- Ce travail a donné lieu aux publications suivantes :

  - ✓ Mjejra M. Henia L. et Dubreuil V., 2012 : Apport de l'imagerie satellitaire à l'estimation de l'évapotranspiration réelle journalière dans le delta de la Mejerda en Tunisie. **25^{éme},** *colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Grenoble-France.
  - ✓ Mjejra M., 2013 : Cartographie de l'impact des inondations de février 2012 sur le secteur agricole à la basse vallée de Mejerda en Tunisie. **26^{éme},** *colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Cotonou-Bénin.
  - ✓ Mjejra M. Dubreuil V. et Henia L., 2014 : Évaluation de l'évapotranspiration maximale par télédétection à moyenne résolution spatiale : cas du bassin versant de la Mejerda en Tunisie. **27^{éme},** *colloque de l'Association Internationale de Climatologie.* Dijon-France
  - ✓ Mjejra M. Dubreuil V. et Henia L., 2015 : Suivi de la sécheresse agro-climatique à partir du déficit d'évaporation dans le bassin versant de la Mejerda (Tunisie). **28^{éme},** *colloque de l'Association Internationale de Climatologie.* Liège-Belgique.
  - ✓

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier chaleureusement mes deux directeurs de thèse, Latifa HENIA et Vincent DUBREUIL pour m'avoir, chacun à sa manière, encouragé et conseillé.

Professeur **Latifa HENIA,** ma directrice de thèse, de l'université de Tunis, qui m'a accompagné depuis bien longtemps dans mon travail de recherche et qui m'a permis de progresser durant ces années d'études. Elle a cru en mes capacités à mener à bien ce projet de thèse et m'a beaucoup encouragé.

Vincent DUBREUIL professeur de l'Université Rennes2, mon directeur de thèse, qui a accepté avec toute modestie de m'encadrer, malgré ses multiples charges. Ses échos depuis l'autre côté de la Méditerranée m'ont permis de prendre du recul et ses suggestions ont été d'une aide précieuse pour l'orientation de cette thèse. Grâce à sa collaboration j'ai eu la chance d'acquérir de nouvelles compétences et d'apporter un point de vue différent.

Mes remerciements s'adressent aussi aux membres du jury, Monsieur **Gérard BELTRANDO** professeur à l'Université Paris 7 et Monsieur **Habib BEN BOUBAKER** maître de conférence à la Faculté des Lettres, des Arts et des Humanités Manouba, qui ont accepté d'accorder du temps à la lecture et à l'examen de ce travail de recherche.

Je tiens à remercier tous mes professeurs, pour leurs patiences leurs efforts pour enrichir mes connaissances et pour m'avoir guidé tout au long de mon cursus universitaire.

Cette thèse a été réalisée dans le cadre de l'unité de recherche « GREVACHOT » de la faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis, C'est au sein de cette U.R que j'ai commencé mes premiers pas dans le domaine de la recherche et que j'ai discuté chaque fois mes résultats et tous mes problèmes relatifs à cette thèse. Je ne peux que remercier vivement tous les membres du «GREVACHOT», pour leur soutien leur disponibilité et pour l'ambiance conviviale qui y règne.

Cette thèse s'appuie sur des données qui ont été recueillies par des organismes divers, dont notamment : l'Institut National de la Météorologie (INM), les Commissariats Régionaux de Développement Agricole (CRDA), l'Office des Terres Domaniales (OTD). Qu'ils trouvent ici l'expression de mes vifs remerciements. Le recueil et la gestion de ces données représentent un travail colossal et je voudrais adresser ma reconnaissance à toutes personnes de ces organismes qui m'ont aidé dans ce sens. Je ne peux oublier aussi les habitants de notre région d'étude qui m'ont accueilli sur le terrain toujours chaleureusement.

Les évaluateurs des articles que j'ai soumis, au comité scientifique de l'Association Internationale de Climatologie (AIC), pour publication, ont également contribué à l'approfondissement et à la clarification de certaines parties de mes recherches. Je tiens à les remercier vivement pour le temps qu'ils ont accordé à ces relectures et pour leurs remarques et leurs critiques constructives.

Je remercie également l'École Doctorale de la faculté des Sciences Humaines et Sociales de l'université de Tunis, l'U.R « GREVACHOT » de la même université, le laboratoire

COSTEL de l'université de Rennes 2 qui m'ont soutenu matériellement pour mes participations aux colloques de l'AIC et pour les stages et séjours scientifiques que j'ai effectués en France

Un grand merci à l'ensemble des membres permanents ou stagiaires de COSTEL et en particulier : Hervé Quenel, Samuel Corgne, Thomas Alban, Jean Nabucet, Cloé Lamy pour m'avoir fait partager leurs diverses connaissances et expériences, et toujours avec le sourire.

Merci à mes amis : **Chaker MAAWI** Ingénieur Système d'Information à l'OTD pour son aide efficace pour la gestion au quotidien des problèmes informatiques et pour son aide dans l'élaboration des algorithmes de ce travail ; **Ammar SEDIRI** enseignant de français qui a relu ce mémoire à la recherche de coquilles ! Et je n'oublie pas **Hamouda SAMAALI** Maitre-Assistant à la Faculté des sciences Humaines et Sociales de Tunis qui m'a accompagné dans les campagnes de terrain et dans des moments difficiles.

Merci à Mr **Germain BERTRAND**, qui m'a hébergé durant les stages de ma thèse, supportant mes tergiversations scientifico-délirantes, et m'épaulant au moment où j'avais le plus besoin de lui.

Pour finir je voulais remercier tout particulièrement ma famille, mes frères et sœurs, notamment mes parents (**Majid et Fatma**) pour m'avoir toujours encouragé dans mes initiatives, donné tout ce dont j'avais besoin pour m'épanouir, supporté dans ma volubilité ! Mes pensées pour eux vont bien au-delà de ce qu'il serait raisonnable d'écrire dans la section de remerciements d'une thèse.

... Et à toi et aux autres, même si nous sommes des autres !

« Nous ne pouvons pas nous contenter de donner un point de vue sur un paysage, car celui-ci resterait forcément insatisfaisant en regard de toute une culture»

Alexandre Chemetoff

.....

Citation sur la Mejerda

« Il grossit démesurément en temps de pluie, au point que les marchands et voyageurs demeurent deux et trois jours à attendre que ses eaux baissent, car il n'y a là aucune barque ».

Jean-Léon l'Africain, *Description de l'Afrique*, édition traduite de l'Italien par Epaulard (A.), Paris, 1956, T.II, p.549.

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES

AIC	Association Internationale de Climatologie
BV	Bassin Versant
BDA	Bulletin Décadaire Agro-météorologique
BQR	Bulletins Quotidiens de Renseignements
CIRAD	Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
CV-MVC	Constant View-Maximum Value Composite
CRDA	Commissariats Régionaux de Développement Agricole
CLDVW	Contraste Local de l'Indice de Différence entre la Végétation et l'Eau
DE	Déficience d'Évaporation
DGPA	Direction Générale de la Production Agricole
EVI	Enhanced Vegetation Index
ETM+	Enhanced Thematic Mapper
ETP	Évapotranspiration Potentielle
ETM	Évapotranspiration maximale
ETR	Évapotranspiration réelle
FAO	Food and Agriculture Organization
FE	Fraction d'Évaporation
Kc	Coefficient Cultural
Kcb	Coefficient Cultural de Base
Ke	Coefficient d'évaporation
Ks	Coefficient de Stress Hydrique
GIEC	Groupe Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
LAI	l'Indice Foliaire
MODIS	MODerate resolution Imaging Spectro radiometer
MARH	Ministère d'Agriculture et de ressources Hydrauliques
MEAT	Ministère d'Écologie et d'Aménagement du Territoire
MNT	Modèle Numérique de Terrain
MIR	Moyen Infrarouge
NDVI	Indice de Végétation Normalisé
NDWI	Indice Normalisé de Différence d'Eau
NASA	National Aeronautics and Space Administration
INM	Institut National de la Météorologie
INAT	Institut National d'Agronomie de Tunisie
INRAT	Institut National de Recherche d'Agronomie de Tunisie
OMM	Organisation Mondiale de Climatologie
OTD	Office des Terres Domaniales
OS	Occupation du Sol
PIR	Proche Infrarouge
PNUD	Programme des Nations Unies Pour le Développement
RH	Réserve Hydrique
RU	Réserve Utile
PDS	Production Data Set

SIG	Système d'Information Géographique
SWI	Soil Wetness Index
SEDI	Satellite Enhanced Data Interpolation
Ta	Températures de l'Air
Ts	Températures du Sol
TVDI	Temperature Vegetation Dryness Index
VIS	Visible
WDI	Indice Déficit Hydrique

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

SOMMAIRE

Fiche présentative de la thèse……..……i
Remerciements ……...ii
Liste des sigles et acronymes ……v
Sommaire……..……vi
Introduction générale……..1
Premiere partie l'evapotranspiration : cadre théorique, région d'étude et méthodes d'approche……...9
Introduction ……..……11
Premier chapitre : cadre théorique : définition, mesures et données de base……12
1.1. L'évapotranspiration : concept, définitions et mesures…….12
1.2. Inventaire des données……...……27
Deuxième chapitre : présentation de la région d'étude…….35
2.1. Caractéristiques géophysiques du bassin versant de la Mejerda: support de l'étude de l'évapotranspiration.....……...……. ……37
2.2. Caractéristiques climatiques du bassin versant de la Mejerda ……55
Troisième chapitre : démarche méthodologique pour l'étude de l'évapotranspiration ….67
3.1 Approche de l'évapotranspiration par la télédétection et le système d'information géographique ……...69
3.2. Présentation des méthodes d'estimation de l'évapotranspiration ……70
3.3. Méthodologie pour déterminer le déficit d'évaporation……87
Conclusion de la première partie……..……95
Deuxième partie spatialisation de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda 97
Introduction……..99
Quatrième chapitre : spatialisation de l'évapotranspiration potentielle (ETP) 100
4.1. Approche méthodologique : l'interpolation SEDI..……100
4.2. Les niveaux annuels de l'évapotranspiration potentielle.....105
4.3. Les niveaux saisonniers de l'évapotranspiration potentielle……113
4.4. Le régime mensuel moyen de l'évapotranspiration potentielle …….....118
Cinquième chapitre : spatialisation de l'evapotranspiration maximale (ETM) 123
5.1. Approche méthodologique : les paramètres de base de la cartographie de l'ETM.....123
5.2. Les niveaux annuels de l'évapotranspiration maximale.....147
5.3. Les niveaux saisonniers de l'évapotranspiration maximale……152
5.4. Le niveau moyen mensuel de l'évapotranspiration maximale…….161
Sixième chapitre : cartographie de l'evapotranspiration reelle (ETR) 165
6.1. Approche méthodologique : élément de la cartographie de l'évapotranspiration réelle……165
6.2. Les niveaux annuels l'ETR…….172
6.3. Les niveaux saisonniers de l'ETR.....181
6.4. Le niveau moyen mensuel de l'ETR……185
Conclusion de la deuxième partie.....1**89**

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

Troisième partie : suivi de la déficience d'évaporation dans le bassin versant de la Mejerda……...191
Introduction…….193
Septième chapitre : la déficience d'évaporation : spatialisation et niveaux ……...195
7.1. La démarche adoptée……196
7.2. Spatialisation de la déficience d'évaporation dans le bassin versant de la Mejerda : définition des secteurs à risque de stress hydrique……..……198
7.3. Variabilité du régime mensuel de la déficience d'évaporation……203
Huitième chapitre : déficience d'évaporation : typologie, intensité et fréquence……...211
8.1. Méthodologie……...211
8.2. Typologie de la déficience d'évaporation……215
8.3. L'intensité et la fréquence de la déficience d'évaporation…… …..……225
Neuvième chapitre : éssai de zonage de la déficience d'évaporation dans le bassin versant de Mejerda.....231
9.1. Choix des critères d'analyses et de validation de zonage……232
9.2. Analyse et interprétation des résultats de la régionalisation du bassin versant de Mejerda : les variantes régionales……..…….236
9.3. Discussion sur la méthode et les résultats……247
Conclusion de la troisième partie……252
Conclusion générale……...…….253
Principaux résultats…….254
Les perspectives……..256
Reférences bibliographiques……...257
Listes des figures……274
Liste des tableaux.....278
Table des matiéres.....280
Annexes.....285
Résumé..……..299

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

INTRODUCTION GENERALE

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

INTRODUCTION GENERALE

Contexte général et problématique

L'étude de l'interaction sol-plante-atmosphère est d'un grand intérêt et d'un usage multiple (Chebbi R., 2009). L'aspect le plus important de cette interaction est celui de l'évapotranspiration (Tsé B., 1999). En effet, le terme "évapotranspiration" (ET) désigne les pertes d'eau d'un couvert végétal en fonction de la réserve d'eau du sol, le stade de développement de la végétation et l'ambiance atmosphérique (Amri., 2013). L'évapotranspiration représente, donc, deux processus de transfert d'eau. Le premier est le transfert d'eau dans le continuum « sol-atmosphère » et le deuxième concerne le transfert d'eau dans le continuum «plante-atmosphère» (Lecoeur., 2007). Elle exprime aussi, *« les échanges de masse et d'énergie entre le système sol-eau-végétation et l'atmosphère »* (Hamimed et *al*., 2014). De plus, l'évapotranspiration est une composante indispensable du bilan de l'eau. À titre d'exemple dans un bassin versant, d'une région marquée par l'aridité, la perte par évapotranspiration potentielle représente 60 % à 80 % de l'apport pluviométrique (Haamimed et *al.,* 2008). L'expression de l'évapotranspiration est la synthèse de tous les éléments du climat, en particulier les températures, la durée de l'insolation, l'humidité relative de l'air et la vitesse du vent (Borgne, 1990). Aussi, l'évapotranspiration joue un rôle capital pour l'évaluation des aptitudes climatiques d'une région donnée ; elle est considérée comme l'indicateur du développement optimal de la végétation ; elle est à la fois cause et conséquence du climat (Calanca et *al*., 2010) et récemment elle est utilisée comme un indicateur d'intérêt dans les études concernant les changements climatiques (5éme rapport du GIEC ; www.ipcc.ch/home_languages_main_french.shtml). Mais, le concept de l'évapotranspiration n'est pas toujours facile à cerner pour plusieurs raisons :

- problème de définition : il s'agit d'un concept marqué souvent par des confusions au niveau de sa structure qui est subdivisée en trois types : l'évapotranspiration potentielle (ETP), l'évapotranspiration maximale (ETM) et l'évapotranspiration réelle (ETR) que nous définissons plus loin. C'est une notion complexe, puisqu'elle fait intervenir le climat, le sol et la végétation (Jabloun et *al*., 2008) ;

- problème de mesure : elle est mesurée par différents types d'appareils (l'évapotranspiromètre, le lysimètre, bac d'évaporation, covariance turbulente[1]…), mais les mesures sont difficiles à obtenir en routine et elles « sont couteuses et rares et ne permettent pas encore des analyses géographiques fines » (Gammar et *al.,* 2012). L'ETP, est donc *« n'est pratiquement jamais obtenue par une mesure directe mais le résultat d'un calcul suivant une formule impliquant plusieurs variables météorologiques »* (Oudin., 2004). Par conséquent, il existe beaucoup de méthodes d'estimation telles que les méthodes analytiques, les méthodes empiriques et les méthodes de télédétection ;

[1] La mesure de covariance des turbulences (anglais Eddy covariance) est une méthode commune de mesure, avec l'emploi de différents instruments de mesure : anémomètre sonique, hygromètre optique, capteurs de flux thermique, radiomètre net.

- problème d'étude à l'échelle du bassin versant : le concept d'évapotranspiration à l'échelle du bassin versant, dans la mesure où il ne peut être qu'approximatif et ne peut donner d'une image globale. Cependant, Pour modéliser un bassin versant, il faut déterminer le rôle de l'évapotranspiration dans la transformation pluie-débit (Wallace., 1995). En effet, elle est le processus, quantitativement, le plus difficile à évaluer pour calculer le débit à l'exutoire d'un bassin versant. De plus, elle est aussi le composant le plus difficile à déterminer du cycle de l'eau (Cosandey et *al.,* 2012). En fait, *« il n'existe pas encore de technique expérimentale satisfaisante pour estimer l'évapotranspiration à l'échelle du bassin versant »* (Wallace., 1995), en raison de la grande variation spatio-temporelle des paramètres bio-pédo-climatiques de l'évapotranspiration.

- usage multiple : l'évapotranspiration potentielle est utilisée pour évaluer les bilans de l'eau de différentes manières. En climatologie, elle permet de déterminer le bilan hydro-climatique (P-ETP), en hydrologie elle sert de référence pour quantifier le bilan hydrologique d'un bassin versant donné et en agronomie elle donne des indications sur le stress hydrique auquel la végétation est soumise ou sur ses besoins en eau (Cosandey et *al.*, 2012).

La Tunisie, par sa situation géographique, est un pays à climat aride à semi-aride sur la majeure partie de son territoire et par conséquent on note des faibles moyennes des pluies en regard d'une forte demande évaporative (Henia L. Dir., 2008). Ce caractère fait de l'eau une ressource à la fois rare et irrégulièrement répartie dans le temps et dans l'espace. En effet, la rareté des ressources en eau conjuguée aux besoins en croissance, nécessite d'accorder au secteur de l'eau l'importance qu'il mérite, notamment, en ce qui concerne les actions de la valorisation, de la planification et de la gestion. *« La sècheresse météorologique est un phénomène récurrent en Tunisie avec une fréquence d'appariation d'années sèches successives relativement élevée »* (Hénia L. Coord., 2015). Dans ce cas, l'étude de l'évapotranspiration sous ses trois types (ETP, ETM et ETR) permet de cerner le climat d'une région donnée (Calanca et *al.,* 2010).

Cependant, le changement climatique est une nouvelle problématique qu'il faut prendre en considération dans les études sur la question de l'eau car, *« les impacts des changements climatiques sur les différentes composantes du cycle hydrologique en Méditerranée (stocks et flux) sont encore méconnus, et les sécheresses répétées de la dernière décennie montrent à la fois la fragilité de l'offre et la nécessaire régulation de la demande en eau à court et plus ou moins à long terme. Il est d'ailleurs désormais admis que les régions méditerranéennes seront le théâtre de changements environnementaux majeurs (pression démographique, rareté de l'eau, "hot spot" du changement climatique). Les modèles climatiques semblent indiquer que le réchauffement planétaire touchera plus spécifiquement la Méditerranée du Sud et de l'Est »* (Boulet., 2011). En effet, la Tunisie sera certainement très sensible aux effets négatifs des changements climatiques. La sensibilité à ces derniers des ressources en eau du pays tient, essentiellement, à l'augmentation des taux moyens annuels d'évaporation d'environ 0.3% (Gafrej R. et *al.,* 2008). En effet, pour le climat futur de la Tunisie et selon les résultats du programme de recherche européen « ENSEMBLES » l'évaporation sera plus active à cause du réchauffement de l'air (Hénia L. Coord., 2015). Ce contexte général justifie en grande partie le choix et les objectifs principaux de cette étude.

Revue bibliographique et état de la question

C'est Dalton (1802) qui a proposé les premiers fondements de la théorie actuelle de l'évaporation, dans la mesure où il a démontré que le taux d'évaporation est fortement corrélé avec la température, à l'humidité de l'atmosphère, aux mouvements de masses d'air et à la nature chimique du volume évaporant (Oudin., 2004). Ensuite, Thornthwaite (1948) a introduit la notion d'évapotranspiration potentielle (ETP) dans l'optique d'une classification des climats. Cette notion représente la demande climatique imposée par le climat sans restriction d'eau pour le sol et qui correspond au pouvoir évaporant de l'air (Mounier., 1965[2] ; Dagorne et *al.,* 1996). Depuis les années 1950, les formules et les méthodes d'estimation de l'évapotranspiration se multiplient et les chercheurs (climatologues, météorologues, agronomes, hydrologues et les ingénieurs hydrauliciens) ne cessent pas d'étudier ce paramètre climatique. Ainsi, de nombreuses formules, d'estimation de l'évapotranspiration, adaptée à différents climats, ont été proposées par différents auteurs. Il s'agit des formules élaborées par Thornthwaite 1944 ; Penman 1948 ; Turc 1961 ; De Villéle 1965 ; Espinar 1975 ; Riou 1980 ; Allen 1998 ; Gash 2007 ; Zhou 2009 etc. Mais, les formules les plus utilisées dans le monde et pour les différents climats sont : la formule de Turc et Penman-Monteith, cette dernière est une combinaison du bilan énergétique et de la méthode de transfert de masse et elle est recommandée par la FAO (Allen et *al.,* 1998).

En Tunisie, l'étude de l'évapotranspiration n'a pris réellement d'importance scientifique qu'à partir du début des années 1970, et ce à partir des travaux des chercheurs affectés aux services qui s'intéressent au secteur de l'eau, essentiellement, INM, INAT, INRAT tels que : Baldy, Riou, Espinar etc. La plupart de ces études se basent sur la formule d'Espinar-Pirlat pour estimer l'ETP sur la base de la mesure de l'évaporomètre «Piche», depuis 1975 (Ben Dakhlia., 2003). Ce succès est justifié par les points suivants :

- la fiabilité et la facilité d'exploitation de l'instrument «Piche» en climat méditerranéen ;
- la réalisation d'un projet OMM/PNUD pour le développement de l'agro-météorologie en Tunisie de 1973 à 1976 en collaboration avec l'INAT et l'INRAT.
- l'absence de réseau de mesure de l'évaporation par Bac, à cette période.

Depuis 1983, une procédure de calcul de l'évapotranspiration potentielle quotidienne adaptant la formule de Penman, a été développée et mise au point à l'INM, dans le cadre d'une recherche en modélisation agro-météorologique céréalière (Ben Dakhlia., 1987). Mais depuis 1998 et avec la mise à niveau du réseau d'observation des stations automatiques, l'évaporomètre « Piche » a été abandonné (les mesures de l'évaporation par Bac ne sont enregistrées qu'au niveau des barrages[3]) et l'estimation de l'ETP quotidienne est assurée par la formule de Penman-Monteith-FAO, dans la mesure où elle est la plus adaptée pour les régions à climat marqué par l'aridité comme celle de la Tunisie (Jabloun et *al*., 2008 ; Baccour et *al.*, 2012b).

[2] Mounier J., a été l'un des premiers à introduire et diffuser les travaux de Thornthwaite dans la communauté francophone.

[3] Nous avons remarqué lors de nos campagnes de terrain que le bac d'évaporation ne sont utilisables que dans les sites des barrages par contre dans les stations agro-météorologiques sont abandonnés.

En Tunisie, parallèlement aux mesures et à l'estimation de l'évapotranspiration dans les stations agronomiques, des études ont été menées par différents chercheurs à plusieurs objectifs. Nous pouvons retenir trois :
- optimiser l'irrigation : PNUD., 1973 ; Nasr., 2002 ; Ben Dakhlia., 2003b ; Rezgui et *al*., 2005,
- évaluer le stress hydrique auquel la végétation est soumise (Ben Naceur et *al*., 1999 ; Bajji., 1999 ; Chabaane et *al.*, 1999 ; Radhouane et *al.*, 2003, 2007 et 2011 ; Feki., 2006 ; Mellouli et *al*., 2007 ; Shabou et al., 2010 ; Khémir., 2011 ; Zribi., 2014 ; Mjejra et *al*., 2015),
- déterminer les besoins en eau et le bilan en eau en général : Riou., 1980 ; Daghri et *al*., 1988 ; Henia., 1993 ; Ben Dakhlia., 1987 ; Nsar et *al*., 1998 ; Hbaeib et *al.*, 2003 ; Boussema., 2004 ; Hlaoui., 2006 ; MARH., 2007 ; Hammemi., 2010.

Actuellement, les connaissances théoriques sur le processus d'évapotranspiration sont relativement avancées ainsi que pour les instruments de mesure permettant d'estimer de façon adéquate l'évapotranspiration à l'échelle stationnelle et même à l'échelle parcellaire. Cependant, dès lors que l'on s'intéresse à un bassin versant hétérogène, comme celui de la Mejerda, aucune technique ne permet d'estimer directement l'évapotranspiration. À cet égard, la télédétection a un rôle potentiellement important, pour l'extrapolation régionale de l'évaporation, du fait de la couverture spatiale qu'elle permet. Des recherches récentes ont mis en évidence le potentiel de la télédétection pour étudier l'évapotranspiration tout en utilisant des méthodes différentes. À titre d'exemple El Garouni et *al*., 2001 ; Boussema., 2004 ont utilisé des méthodes empiriques directes où les données de télédétection sont directement introduites dans des modèles semi-empiriques d'estimation de l'évapotranspiration (modèle simplifié de Jackson et *al*., 1985). D'autres chercheurs (Mjejra et *al*., 2012, 2014 et 2015 ; Amri., 2013) ont utilisé les méthodes basées sur les indices de végétation (NDVI) par le biais de l'imagerie satellitale, pour le calcul de facteurs de réduction tels que le coefficient cultural (Kc), pour l'estimation de l'évapotranspiration des cultures. Aussi, proposons-nous à l'occasion de cette étude une approche originale pour cerner l'évapotranspiration dans le Bassin versant de la Mejerda.

Choix et objectifs du sujet

On a choisi d'aborder ce sujet pour les raisons suivantes :

- D'une part, en Tunisie, les études sur l'évapotranspiration sont nombreuses, mais souvent fondées sur des approches qui ne permettent pas une cartographie fiable. Ce sont des études ponctuelles, qui se reposent sur des méthodes relativement classiques, uniquement applicables à un couvert de surface homogène à échelle parcellaire. Ce travail tente d'utiliser une approche différente fondée sur le couplage de la télédétection spatiale et le modèle de la FAO-56 (http://www.fao.org/docrep/) favorisant largement la cartographie, qui a l'avantage d'intégrer l'essentiel des paramètres climatiques, températures, humidité relative de l'air, durée d'insolation et vitesse du vent (Allen et al., 1988 ; Pamela et al., 2005 ; Merlin et al., 2005 ; Kaicun et al., 2006 ; Jabloun et al., 2008 ; Qiaozhen et al., 2011, Amri., 2013). De plus, ce modèle peut être appliqué à l'échelle régionale. Cette approche commence par la détermination de l'évapotranspiration potentielle, qui est ensuite combinée avec le coefficient cultural (Kc) pour estimer l'évapotranspiration maximale, elle-même multipliée par un

coefficient de stress (Ks) pour estimer l'évapotranspiration réelle (Allen et *al.,* 1998). Ceci permet de cerner la spatialisation et la variabilité temporelle de l'évapotranspiration sous ses trois formes (ETP, ETM, et ETR) à l'aide de l'approche cartographique. En effet, l'approche adoptée combine le modèle standardisé de la FAO-56 et l'outil de la télédétection spatiale, qui seront intégrés dans un Système d'Information Géographique.

- D'autre part, le choix de la région du bassin versant de la Mejerda, repose sur son importance en matière d'alimentation en eau (figure 1). À cet égard, la région est considérée comme "le château d'eau" de la Tunisie. Elle occupe, aujourd'hui, une place de premier ordre dans la stratégie de mobilisation des ressources en eau du pays. La région se caractérise par un contraste climatique entre les unités topographiques exposées aux flux humides et les sous-bassins abrités « où la saison sèche (caractérisée par des quantités de pluie inférieures à celles de l'ETP) s'allonge et peut atteindre, en moyenne, 9 mois » (Henia L. Dir., 2008) et deux aspects du bilan hydrique, un excès en hiver et un déficit important en été. Le bassin versant de la Mejerda se distingue par une grande variation de l'occupation-utilisation des terres et une topographie accidentée. Le bassin versant de la Mejerda a été étudié comme une unité hydrologique composée de sous-bassins versants. Dans ce travail nous essayons de dépasser ce cadre traditionnel pour chercher un autre découpage à base climatologique par le biais de l'approche cartographique de l'évapotranspiration. En effet, dans le cas d'un bassin versant très hétérogène, la variabilité bio-hydro-pédo-climatique, ainsi que le nombre de processus hydrologiques en présence, rendent l'évaluation de l'évapotranspiration très difficile (Oudin., 2004).

- Enfin, en Tunisie, l'évapotranspiration est un paramètre climatique estimé et les seules mesures concernant l'évaporation autour des barrages ou quelques campagnes de mesures dans les stations expérimentales sont celles de l'INRAT à Mograne et Borj Amri. L'évapotranspiration constitue certainement la donnée climatique la plus difficile à acquérir, et n'est, donc, pas toujours disponible. Dans ce cas la télédétection présente un privilège puisqu'elle permet, en même temps, une vue synoptique et l'acquisition de données régulièrement distribuées dans l'espace et dans le temps pour appréhender le fonctionnement d'un bassin versant et de donner des observations exhaustives et objectives (Benhadj I., 2008). Dans cette étude, nous disposons des données des capteurs (MODIS-TERRA/AQUA) qui permettent l'observation quotidienne de l'ensemble de la région étudiée avec une résolution spatiale moyenne de l'ordre de 250 m. Ceci permet de cartographier l'évapotranspiration dans le bassin versant de la Mejerda d'une façon globale, cohérente et économiquement raisonnable. Plusieurs travaux ont déjà utilisé l'outil de la télédétection satellitale pour aboutir à de bons résultat dans des régions similaires, par exemple les campagnes ayant lieu en France (HAPEX-MOBILHY, 1986), en Espagne (EFEDA, 1991) et récemment au Maroc (SUDMED 2007).

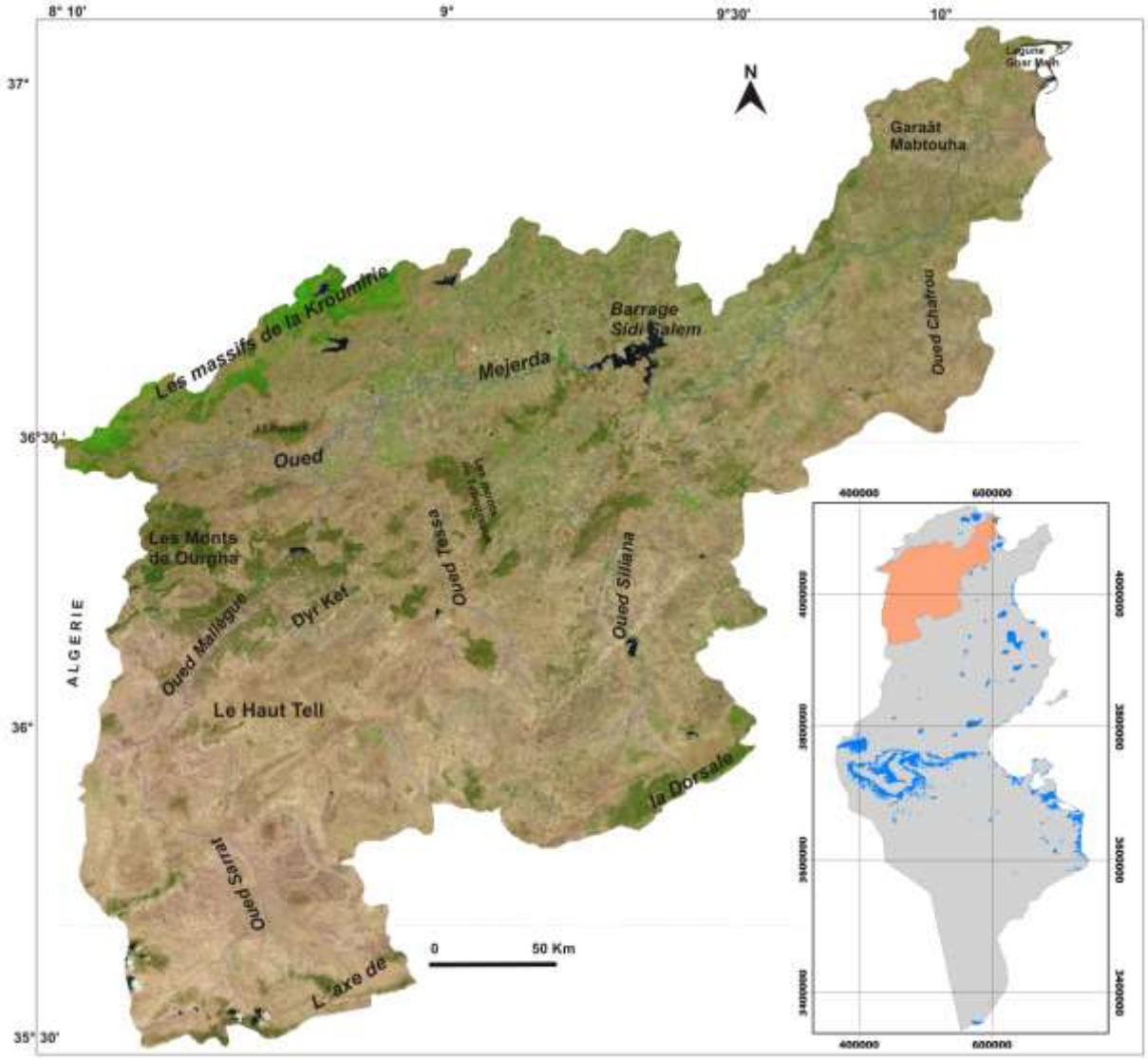


Figure 1 : Localisation du bassin versant de Mejerda

Par cette étude, on propose atteindre plusieurs objectifs :

- Exploiter les potentialités des données multi-échelles et multi-sources ainsi que leurs croisements dans l'étude de l'évapotranspiration et comprendre le fonctionnement d'un écosystème (bassin versant de la Mejerda) très hétérogène sur le plan climatique et de l'occupation de sols ;

- Analyser les facteurs conditionnels de la variation spatiotemporelle de l'évapotranspiration et ses trois types (ETP, ETM, et ETR) à savoir l'effet du relief, l'effet de l'opposition des versants (versant au vent, versant sous le vent) et les types de temps perturbés…pour cerner la diversité climatique de la région entre les bassins intra-telliens et les plaines de la basse Mejerda et entre les limites humides au Nord et les limites franchement semi-arides au Sud ;

- Étudier la déficience d'évaporation et sa signification climatologique pour en déduire un zonage dans le bassin versant de la Mejerda. De même, il s'agit d'essayer de distinguer des sous-régions qui diffèrent de la subdivision des hydrologues (découpage en sous-bassins versant selon les lignes des partages des eaux) par le biais des rapports ETR/ETP ou

ETM/ETP qui sont largement utilisés dans les études agricoles et hydrologiques. Aussi, le déficit d'évaporation traduit le manque d'eau éventuel pour la plante du fait des conditions climatiques. Il correspond au stress hydrique de la végétation. L'analyse et le suivi de cette variable permet donc de cerner au mieux les besoins en eau de la végétation (Lamy., 2013).

- Les paysages végétaux traduisent souvent fidèlement la correspondance climat-végétation. Est-il possible de justifier cette hypothèse avec l'analyse de la déficience d'évaporation comme étant un indice de stress hydrique ? Quels sont les effets des facteurs géographiques sur la modélisation spatiale de la déficience d'évaporation ? Et sur quelle base peut-on opérer une régionalisation de la déficience d'évaporation à l'échelle du bassin versant de la Mejerda ? Peut-on aboutir aux mêmes limites géographiques traditionnelles par le biais de l'étude de cet élément ?

Plan de la thèse

Cette thèse est structurée en trois parties :

• La première partie « l'évapotranspiration : cadre théorique, région d'étude et méthodes d'approche» présentera en général le contexte de la thèse, dont les données à prendre en compte et la région d'expérimentation et ce en trois chapitre. Le premier expose la définition du concept même de l'évapotranspiration sous ses différentes formes (ETP, ETM et ETR), les moyens et les techniques de la mesure et les facteurs conditionnels, ainsi que les données de base. Le second chapitre détaille pas à pas les éléments du paysage de la Mejerda, notamment, les caractéristiques climatiques, topographiques, hydrologiques, la végétation et l'occupation-utilisation du sol en général. Quant au troisième chapitre, il décrit en détail, les méthodes et les modèles d'exécution de ce travail.

• La deuxième partie « Spatialisation de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda » est consacrée à l'étude de l'évapotranspiration (ETP, ETM et ETR) dans ses aspects géographiques et dynamiques et se déroule en trois chapitres. Le premier aborde l'évapotranspiration potentielle (ETP). Le deuxième focalise sur la variation spatio-temporelle de l'évapotranspiration maximale. Une présentation de l'évapotranspiration réelle (ETR) occupera le troisième.

• La troisième partie « suivi de la déficience d'évaporation dans le bassin versant de Mejerda» s'articule autour de la signification des indices de l'évapotranspiration et la compréhension de ses comportements. Cette partie est subdivisée en deux chapitres. Dans le premier nous traitons la déficience d'évaporation par signification de plusieurs indices (ETR/ETM*100 ; ETR-ETM) : il s'agit de réaliser une typologie de la déficience d'évaporation (modéré, élevé et très élevé). Le deuxième chapitre présente les méthodes adoptées pour aboutir à un zonage du déficit d'évaporation dans le bassin versant de la Mejerda, et ce, pour distinguer l'individualité de chaque secteur de la région étudiée. Ceci est assuré par le biais du degré de la déficience d'évaporation.

PREMIERE PARTIE L'EVAPOTRANSPIRATION : CADRE THEORIQUE, REGION D'ETUDE ET METHODES D'APPROCHE

Sommaire

Premiere partie l'evapotranspiration : cadre théorique, région d'étude et méthodes d'approche……...9
Introduction ……..……11
Premier chapitre : cadre théorique : définition, mesures et données de base……12
1.1. L'évapotranspiration : concept, définitions et mesures…….12
1.2. Inventaire des données……...……27
Deuxième chapitre : présentation de la région d'étude…….35
2.1. Caractéristiques géophysiques du bassin versant de la Mejerda: support de l'étude de l'évapotranspiration.....……...……. ……37
2.2. Caractéristiques climatiques du bassin versant de la Mejerda ……..55
Troisième chapitre : démarche méthodologique pour l'étude de l'évapotranspiration ….67
3.1 Approche de l'évapotranspiration par la télédétection et le système d'information géographique ……...69
3.2. Présentation des méthodes d'estimation de l'évapotranspiration ……70
3.3. Méthodologie pour déterminer le déficit d'évaporation……87
Conclusion de la première partie……..……95

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

INTRODUCTION

L'objectif de cette thèse est de mettre en place le modèle de FAO-56 combiné au potentiel de la télédétection spatiale, capable de spatialiser l'évapotranspiration et d'aboutir au zonage de la déficience d'évaporation dans le BV de Mejerda. Il s'appuie pour cela sur l'analyse fine, précise et exhaustive des comportements du système sol-plante-atmosphère. À cet égard, nous présentons la démarche suivie dans cette étude. Mais d'abord, dans le premier chapitre, nous exposons le concept de l'évapotranspiration et le principe de sa mesure, afin de mettre en relief la complexité de l'étude de ce phénomène climatique. En deuxième lieu, nous exposons la base de différentes données utilisées qui vont servir pour réaliser ce travail. D'ailleurs, nous présentons les différentes caractéristiques, physiques, climatologiques et l'occupation du sol dans le B.V de Mejerda, domaine d'étude de ce travail. Ceci est fait dans l'intention de mettre l'accent sur la dynamique de cette région. Nous discutons dans le troisième chapitre les méthodes utilisées pour l'estimation de l'évapotranspiration, la classification de l'occupation du sol et la spatialisation de l'évapotranspiration. En fait, c'est un suivi de la dynamique de la végétation par le biais de l'identification des coefficients culturaux (Kc), en vue de calculer de l'ETM et l'ETR. Enfin nous adaptons un modèle pour déterminer le déficit en eau réel du couvert végétal et sa spatialisation dans la Mejerda, et ce à l'aide de l'équation du déficit d'évaporation.

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

PREMIER CHAPITRE : CADRE THEORIQUE : DEFINITION, MESURES ET DONNEES DE BASE

1.1. L'évapotranspiration : Concept, définitions et mesures

1.1.1. Concept et définitions

1.1.1.1. Concept

Il est important de préciser le concept de l'évapotranspiration, avant de vouloir lui donner une définition. En effet, l'examen de la revue de la littérature sur l'évapotranspiration montre qu'il existe plusieurs aspects différents et parfois même des confusions entourant la notion d'évapotranspiration. Le concept de l'évapotranspiration a été introduit, comme un paramètre climatique, pour la première fois par l'américain **Thornthwaite** en 1948 (auteur de l'expression de l'évapotranspiration potentielle), dans un contexte de classification du climat. Il considère qu'*« il y a une distinction entre le volume d'eau qui est effectivement évapotranspiré et celui qui pourrait être évapotranspiré, s'il était possible. Lorsque la disponibilité en eau augmente l'évapotranspiration atteint un maximum qui dépend uniquement du climat. C'est ce que nous pourrions appeler évapotranspiration potentielle, en distinction de l'évapotranspiration réelle ».* En conséquent, on a un climat humide lorsque la pluie annuelle est supérieure à l'évapotranspiration potentielle et inversement pour le climat aride quand la pluie est inférieure à l'ETP (Oudin L., 2004). Ce concept a été utilisé ultérieurement par les agronomes et les hydrologues comme un élément de base pour calculer l'évapotranspiration réelle (ETR). En revanche, **Penman** en 1956 (auteur d'une équation prédictive fondée sur des bases physiques théoriques) a réalisé une formule opérationnelle associant des aspects biophysiques et aérodynamiques pour déterminer la quantité maximale demandée par une plante, autrement dit il a introduit le concept de l'évapotranspiration maximale (ETM). Par la suite cette formule a été adoptée comme étant ETP de Penman, qu'il considère comme « *l'évaporation d'une pelouse rase suffisamment étendue, en bon état et convenablement alimentée en eau* ». Il est clair que ce concept, se base sur l'interaction sol-plante-atmosphère et pose beaucoup d'ambiguïté, en particulier au niveau des méthodes de mesures et de simulation. À cet égard, des revues plus détaillées sur ces méthodes peuvent être trouvées dans Rana et Katerji (2000), Itier et Brunet (1996), Perrier et Tuzet (1998). Nous rappelons, d'une manière générale, les différentes méthodes empiriques de simulation de l'ETP les plus utilisées et qui peuvent être classées en quatre groupes :

- les méthodes de température (Blaney et Criddle, 1950 ; Hargreaves et *al*., 1985),
- les méthodes de radiation (Makkink, 1957 ; Turc, 1961 ; Priestly et *al*., 1972),
- les méthodes combinées (Penman, 1948 ; Allen et *al*., 1998),
- approche par l'estimation de la demande climatique : l'ETP peut être déterminée par la formule de Penman-Monteith, de Priesley-Taylor et de Blaney Cridle.

Pour minimiser les incertitudes de mesures et la précision de son estimation en fonction des formules employées de calcul l'ET_0. La FAO en 1998 dans son rapport numéro 56 a adopté une seule formule par rapprochement de la méthode de Penman-Monteith appelée : FAO Penman-Monteith (la procédure de la formule sera détaillée dans le troisième chapitre à

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

l'occasion de l'exposé de la méthodologie utilisée dans cette thèse). Cette méthode tient compte à la fois des conditions données par le bilan énergétique pour la surface du sol et des processus d'échange qui déterminent le flux de vapeur d'eau entre la végétation et l'atmosphère. D'un point de vue conceptuel, l'évapotranspiration n'est donc pas un paramètre mesurable à l'échelle du bassin versant elle est plutôt estimable.

1.1.1.2. Définitions

L'évapotranspiration (ET) est une combinaison de deux processus : l'évaporation et la transpiration. ***L'évaporation (E)***, est générée par tout type de surface aquatique (lacs, fleuves, océans et sols inclus). ***La transpiration (T),*** est d'origine végétale. L'évapotranspiration peut être définie comme la perte d'eau par le sol et la surface des plantes, exprimée généralement en mm/jour. Tsé (1999) a le même point de vue là-dessus parce qu'il considère que l'ET est *« l'ensemble de la combinaison de tous les processus par lesquels l'eau du sol est transférée dans l'atmosphère, l'évaporation provenant de l'eau à la surface du sol et de l'eau interceptée par les plantes plus celle transpirée par leurs organes aériens »*.Le terme évapotranspiration est souvent utilisé lorsqu'il est impossible de séparer l'évaporation de la transpiration végétale. Cette définition pratique est utilisée dans de nombreuses applications agricoles, hydrologiques et climatologiques.

Cependant, l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM., 1996), admet que la demande évaporatoire peut être estimée directement par mesure de l'évaporation de l'eau d'un bac. Par contre, si l'on considère l'état des paramètres de surface, on préférera utiliser les lysimètres, mais les mesures lysimétriques sont souvent trop rares pour être utilisées en routine. C'est la raison pour laquelle il existe tant de formules empiriques ou semi-empiriques pour estimer l'ETP. Aussi, dans ce travail nous distinguons trois notions de l'évapotranspiration (figure 1 et 2) :

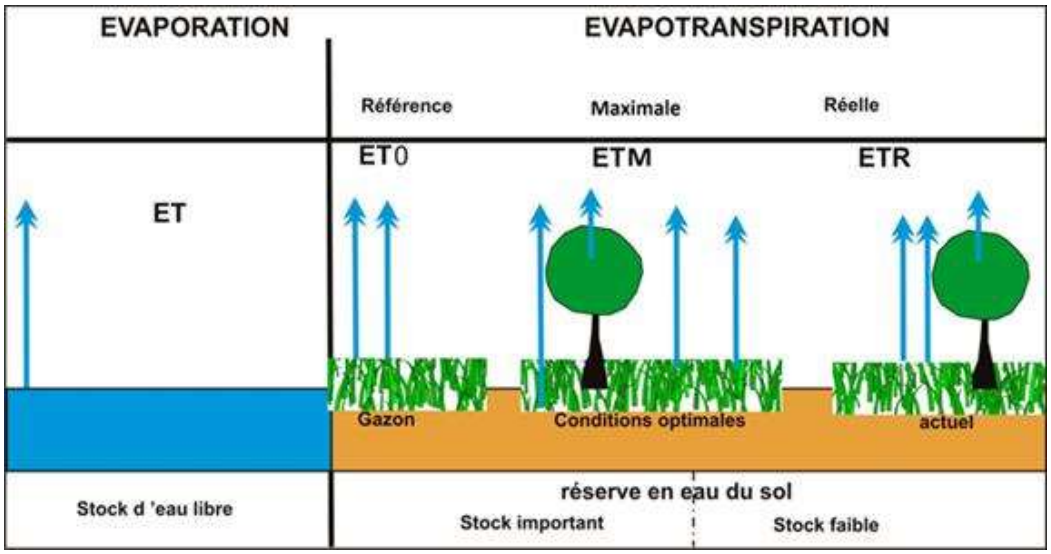


Figure 1: Évaporation et évapotranspiration (Source : Projet SUDMED 2007)

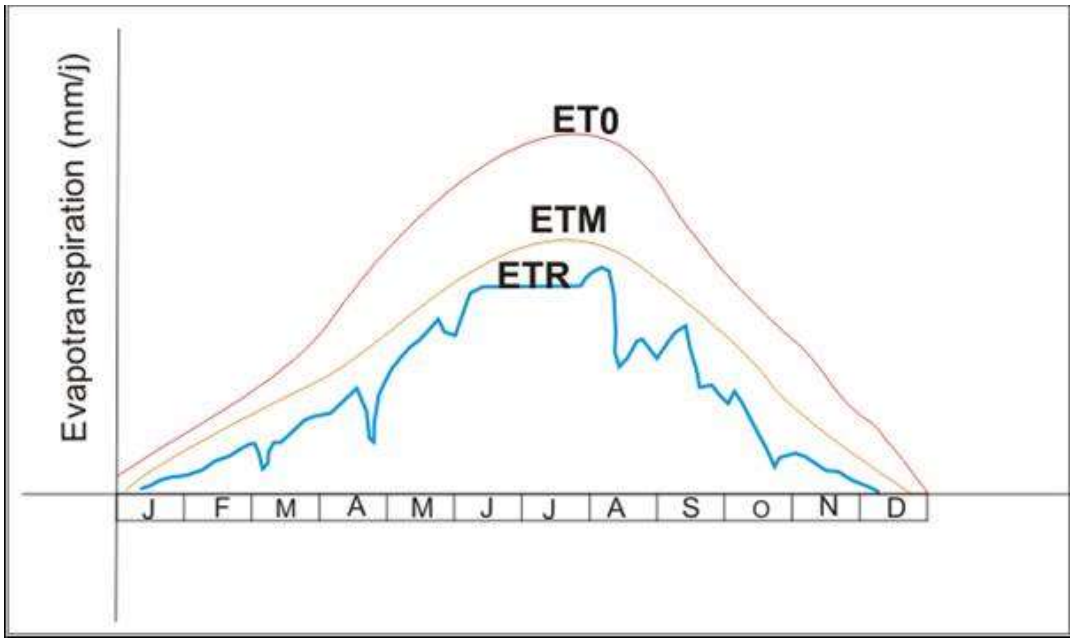


Figure 2 : Schéma théorique de la variabilité annuelle de l'ET0, ETM et ETR
(source : Chahbouni G., 2009)

- ***Évapotranspiration potentielle (ETP)*** **:** est nommée aussi, l'évapotranspiration de référence **(ET_0)**. « *l'évapotranspiration d'un couvert végétal bas, contenu et homogène dont l'alimentation en eau n'est pas limitante et qui n'est soumis à aucune limitation d'ordre nutritionnel, physiologique ou pathologique* » (Allen et *al.,* 1998, FAO papier-56). À partir de l'évapotranspiration de référence ET_0, la méthode FAO permet de déduire, à l'issue de deux autres étapes, les pertes effectives en eau des prairies et des terres arables par évapotranspiration. Cette définition couvre deux aspects distincts : le premier concerne la limite vers laquelle tend l'évaporation de la végétation qui ne souffre d'aucun déficit hydrique. Dans ce cas, l'estimation de l'ETP repose sur des ajustements statistiques de mesures expérimentales. Le deuxième touche le pouvoir évaporant de l'environnement exprimé en termes d'énergie et dont les méthodes d'évaluation de 1'ETP reposent sur des principes physiques (Tsé B., 1999)
- ***Évapotranspiration maximale (ETM)*** : l'ETM est liée à l'ETP par un coefficient cultural (Kc). C'est la quantité d'eau perdue par une végétation jouissant d'une alimentation hydrique optimale (bonne fertilité du sol, bonne état sanitaire…). *« L'évapotranspiration maximale varie au cours du développement d'une culture annuelle elle augmente progressivement avec le taux de recouvrement du sol par la plante pour atteindre ETP et diminue à la fin du cycle végétatif »* (Xanthoulis D., 2010). Cette forme d'évapotranspiration (ETM) est utilisée par les agronomes pour déterminer les besoins en eau des plantes (Allain., 2000 ; Hbaeib., 2003 ; Saleh Er-raki., 2007 ; Piedallu., 2012).
- ***Évapotranspiration réelle (ETR) :*** ETR est liée à l'évapotranspiration maximale par un coefficient de stress (Ks). Elle désigne la quantité d'eau réellement perdue sous forme de vapeur d'eau par le couvert végétal lorsque l'alimentation en eau n'est pas assurée de façon optimale. Elle est *« fixée par la présence d'eau, par les conditions climatiques et par la couverture végétale »* (Beltrando G., et Chémery L., 1995). L'ETR des végétaux est considérée comme le facteur déterminant dans la production agricole. Elle traduit l'ensemble

des interactions : sol, plante, climat. La nature du sol et le type de végétation interviennent à la même ampleur que le climat. C'est dire que le facteur limitant peut être d'ordre pédologique (épuisement rapide de la réserve en eau facilement utilisable du sol) ou d'ordre physiologique (couvert végétal incapable d'assurer un débit en eau suffisant des racines vers les feuilles) ou d'ordre climatique (pluies insuffisantes par exemple). L'ETR est le plus souvent utilisé par les hydrologues dans les modèles pluie-débit, dont ils peuvent déterminer un déficit d'eau (DE) par la différence entre l'ETP et l'ETR (Sandra., 2000 ; Oudin., 2004 ; Galleguillos., 2010):

$$\mathrm{DE} = \mathrm{ETP} - \mathrm{ETR}$$

Elle est utilisée par les agronomes pour évaluer le déficit d'eau agricole et les climatologues en vue de déterminer le déficit d'évaporation lorsque l'occupation du sol est prise en considération (Merdes., 1997 ; Lamy., 2013 et Lamy et *al.*, 2011 ; Mjejra et *al.*, 2015):

$$\mathrm{DE} = \mathrm{ETM} - \mathrm{ETR}$$

Mais quelle évapotranspiration allons-nous considérer dans cette étude ? S'agit-il de l'ETP, l'ETM ou de l'ETR ? Dans ce travail, la nature de notre problématique et de l'approche adoptée nous incite à examiner de près les caractéristiques de l'évapotranspiration sous ses trois formes ETP, l'ETR et l'ETM. Et ce, pour spatialiser ce paramètre dans une région caractérisée par un contraste climatique, une occupation du sol très variée et une topographie hétérogène. De plus essayer un zonage climatique de la Mejerda par le biais de l'étude de la déficience d'évaporation.

1.1.2. Les mesures de l'évapotranspiration

1.1.2. 1. Les facteurs conditionnels de la mesure de l'évapotranspiration

L'évapotranspiration dépend fortement de l'intervention de trois facteurs, climatiques, géographique, biologiques et pédologiques (Allen et *al.,* 1998 et 2011):

- ***Les facteurs climatiques (pouvoir évaporant du climat):***
  - la température de l'air,
  - la température de la surface terrestre,
  - la vitesse et turbulence du vent,
  - la durée de l'insolation ou le rayonnement solaire,
  - l'humidité relative de l'air,
  - pression atmosphérique.
- ***Les facteurs géographiques (essentiellement la topographie):***
  - l'état de la surface évaporant,
  - l'altitude,
  - effet du site,
  - la latitude,
  - la proximité de la mer,
  - orographie (exposition des versants au soleil, aux vents, pentes).

- ***Les facteurs biologiques (le couvert végétal):***

  - les espèces végétales (stade phrénologique de la culture considérée),
  - hauteur du couvert végétal,
  - résistance stomatique,
  - la profondeur des racines,
  - besoins ou non d'eau.

- ***Les facteurs pédologiques (les sols) :***

  - la capacité de rétention en eau du sol,
  - la réserve utile dans le sol,
  - humidité du sol,
  - la texture du sol.

Certains facteurs sont facilement mesurables (température, vent, insolation) d'autres sont mal connus (profondeur des racines, hauteur du couvert végétal) et ces mesures sont souvent rares pour être utilisées en routine. De plus, ces facteurs n'ont pas le même pouvoir pour favoriser ou accélérer le processus de l'évaporation. En effet, d'après Courault et *al.* (2005), l'évapotranspiration est très liée au rayonnement solaire et au bilan d'énergie à la surface du sol.

1.1.2. 2. Les outils de mesures de l'évapotranspiration

« La mesure de l'évapotranspiration est très complexe » (El Garouani A., 1995). Certes, les mesures directes de l'évapotranspiration (ETP et ETR) se font surtout en agronomie où on étudie chaque type particulier de cultures. Les résultats de ces mesures sont difficiles à utiliser en hydrologie car il y a une grande différence d'échelle entre la surface de la parcelle (quelques mètres carrés) et celle d'un bassin versant (des dizaines de kilomètres carrés). En outre, les plantations utilisées ne sont généralement pas représentatives de la végétation d'un bassin versant. En climatologie les mesures sont effectuées dans la plupart des cas à une échelle ponctuelle correspondant aux stations météorologiques. Par ailleurs, le tableau 1 élaboré par Rana et Katerji (2000), résume les méthodes de mesure et de l'estimation de l'évapotranspiration. En effet, la plupart des méthodes directes ou indirectes des mesures de l'évapotranspiration s'appuient sur la détermination de deux classes de facteurs :

- la teneur en eau du sol et les caractéristiques physiques des surfaces à partir desquelles se produit l'évapotranspiration (hauteur, densité des plantes, rugosité du couvert végétal, albédo) ;
- les variables climatiques telles que le rayonnement solaire, la vitesse du vent, les caractéristiques thermodynamiques de l'atmosphère, au-dessus de la végétation.

Tableau 1: Classification des méthodes de mesure-estimation de l'évapotranspiration à l'échelle de la parcelle

	Approches	Méthodes
Mesure de l'évapotranspiration	Approche hydrologique	Bilan hydrique
		Lysimètre
	Approche micro- météorologique	Bilan d'énergie et rapport de Bowen
		Méthode aérodynamique
		Eddy covariance
	Approche physiologique- végétale	Méthode du flux de Sève
		Systèmes de chambres
Estimation de l'évapotranspiration	Approche analytique	Méthode de Penman-Monteith
	Approche empirique	Méthode de coefficient cultural (Kc)
		Méthode du bilan hydrique
	Approche de la télédétection	Bilan d'énergie
		Activité physiologique des plantes

(Source : Rana et Katerji., 2000)

Cependant, les mesures directes de l'évapotranspiration peuvent être faites par les méthodes courantes suivantes :

- ***La case lysimétrique*** [4](figure 4) :

C'est pour la mesure de l'ETR. Le principe est d'isoler un bloc du sol de quelques mètres-carrés de surface sur environ 2 m d'épaisseur. Cet échantillon de terrain est drainé à sa base et on enregistre les débits D sortant par les drains. En surface, un collecteur fait le tour de la parcelle et récupère les eaux de ruissellement dont le débit Q est également enregistré. Les apports d'eau par la pluie P sont mesurés avec un pluviomètre. Enfin, l'évaluation du stock d'eau R contenu dans la case se fait, soit par une mesure à la sonde à neutron des teneurs en eau dans le sol, soit en montant la case sur un système de bascule. Un bilan très simple permet d'évaluer l'ETR sur un intervalle de temps Δt puisque l'on doit avoir la relation suivante :

$$\mathbf{P = [Q + D + ETR] + \Delta R}$$

Entrée = [sorties] + variation de la réserve

[4] En Tunisie les seules mesures de l'ETR par les cases lysimétriques sont réalisées pendant la campagne de mesure à Cherfech dans la basse vallée de la Mejerda lors du projet PNUD/OMM et CRDA de Tunisie 1973-1976 et à la station agro-climatique de Morneg entre les années 1991-1993,

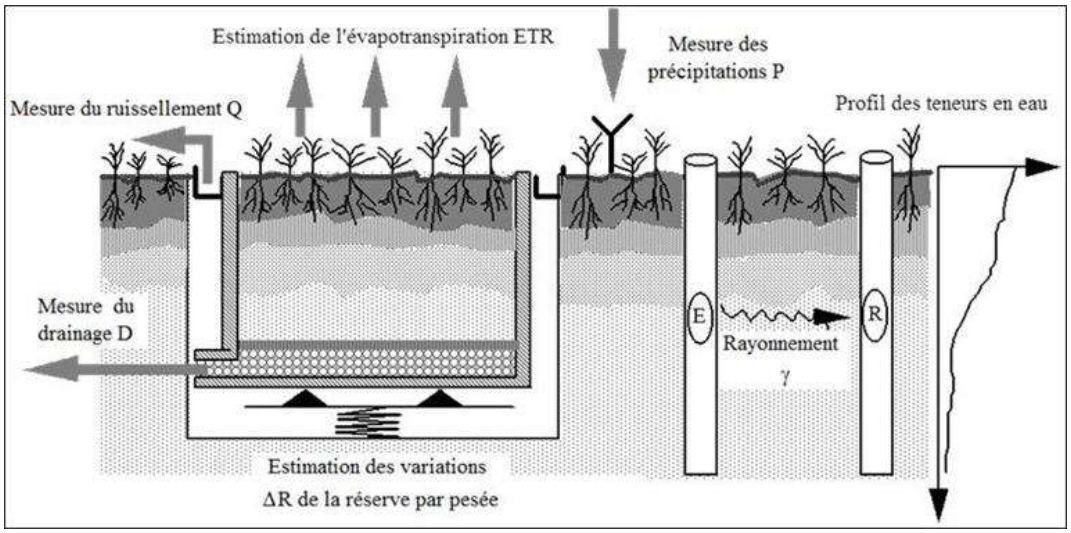


Figure 3: Mesure de l'évapotranspiration réelle par lysimètre (source : Rana et Katerji., 2000)

En Tunisie, des expériences et des essais aux parcelles et périmètres irrigués par des différents chercheurs, à l'occasion des projets de développement et de coopération. Ceci est en vue de mesurer l'ETR pour optimiser, en particulier, l'irrigation. Il s'agit, essentiellement, des expériences des chercheurs de l'INRAT à la station agro-climatique de Morneg au Sud-Est de la région d'étude par la méthode des Lysimètres au début des années 1990.

- ***L'évapotranspiromètre*** (figure 5):

Cet instrument permet de mesurer l'ETP. Il suffit alors de maintenir un niveau d'eau dans les drains pour que l'eau disponible ne soit plus un facteur limitant de l'ETR. On mesure ETP en écrivant le même bilan que précédemment mais le terme D pouvant être positif ou nul. En Tunisie, les premières mesures de l'ETP par d'évapotranspiromètres (type Thornthwaite) datent de 1959 et ce dans les stations qui appartiennent à l'INRAT (Henia., 1993). Une seule station de mesure appartient au BV de la Mejerda, celle de Béja créée en 1966. Mais, les valeurs mesurées sont affectées par certaines erreurs (Hénia., 1993): le mauvais choix du site de la station, absence des conditions de mesure idéale, le mauvais entretien du couvert végétal (figure 7).

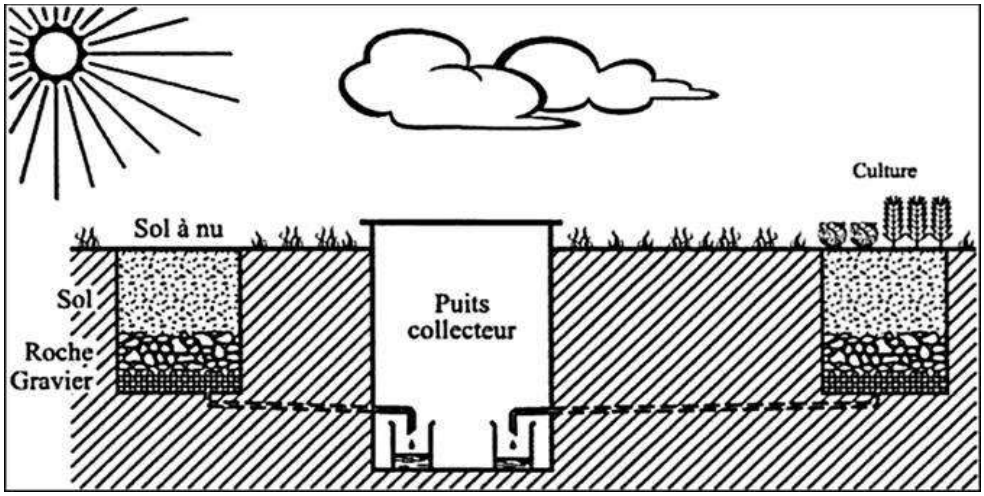


Figure 4: Schéma d'un évapotranspiromètre (source : Capus., 1984)

- ***Eddy corrélation***[5] (figure 6):

C'est une méthode statistique qui utilise les mesures à haute fréquence des températures et la vitesse du vent pour décrire la turbulence et depuis là, les flux de chaleur sensible. L'avantage de cette méthode est qu'elle permet une mesure directe des flux verticaux de la chaleur latente et sensible. Les flux turbulents constituent le produit des fluctuations de la vitesse verticale du vent par les fluctuations de la grandeur prise en compte (la température et la vapeur d'eau). En revanche aucune hypothèse n'est faite concernant les caractéristiques de la surface du sol, telles que la rugosité aérodynamique et aucune correction de stabilité atmosphérique n'est nécessaire. La méthode Eddy corrélation est avantageuse dans les zones à végétations hétérogènes et clairsemées, en particulier, dans les régions semi-arides, caractérisées par des conditions climatiques très variables (Traoré F., 2007).Cette méthode a été expérimentée dans la plaine de Haouz au Maroc et elle donne de bons résultats (Simonneaux et *al.,* 2009) et de même dans quelques parcelles du bassin versant de Kamech au Cap Bon en Tunisie (Chebbi et *al*., 2014), et ce à l'occasion du projet SUDMED.

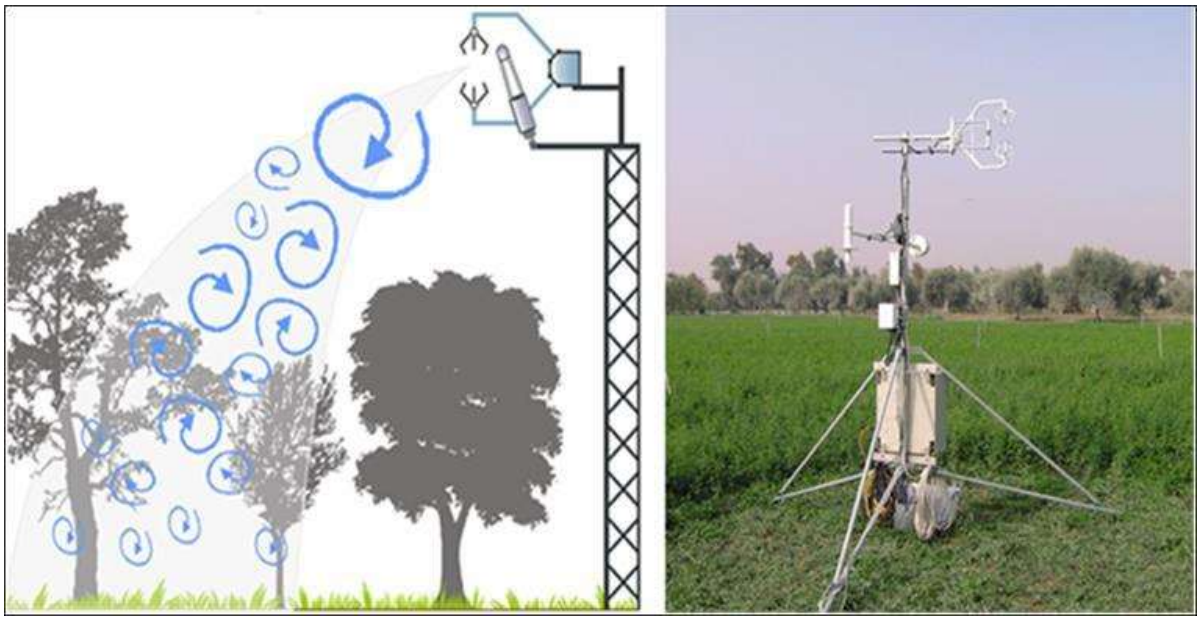


Figure 5: Eddy corrélation, à gauche schéma théorique à droite photo de l'appareil
(source : Projet SUDMED 2007)

[5] La mesure de covariance des turbulences (anglais Eddy covariance) est une méthode commune de mesure, avec l'emploi de différents instruments de mesure : anémomètre sonique, hygromètre optique, capteurs de flux thermique, radiomètre net. C'est une méthode qui utilise des mesures de la turbulence pour obtenir les flux de surface. Cette méthode a été utilisée dans le projet du dispositif d'observations et les principales activités de recherche en cours ou passées sur le bassin versant de Kamech (Cap Bon, Tunisie) OMERE (Observation Méditerranéen de L'Environnement Rural et de l'Eau).
Le principal avantage de la méthode Eddy covariance est qu'elle est la plus directe des mesures des chaleurs latente et sensible en micro météorologie. Aucune hypothèse n'est faite à propos des propriétés de la surface du sol, telles que la rugosité aérodynamique et aucune correction de stabilité atmosphérique n'est nécessaire. La méthode Eddy covariance est particulièrement avantageuse dans les végétations hétérogènes et clairsemées des zones semi-arides, caractérisées par des conditions climatiques très variables (Rana et Katerji 2000). Le taux d'erreur relative entre ETP estimée et ETP mesurée par Eddy covariance est de 15% (Calanca et *al.,* 2011).

- ***Les bacs à évaporation*** (figure 7) :

On peut aussi mesurer l'évapotranspiration de référence par le bac évaporant. Ainsi, l'ET0 est reliée à l'évaporation bac (E_B) au-dessus des surfaces d'eau libres (lacs, barrages, réservoirs…) par un coefficient K_P appelé coefficient du bac (Kamil., 2007) selon la formule suivante :

$$\mathbf{ET0 = E_B * K_P}$$

Avec E_B, évaporation moyenne journalière du bac pour la période considérée en mm/jour et K_P, coefficient du bac varie de 0,5 à 1,1 (pour plus d'information voir FAO., 1998).

Mais maintenant leur intérêt est plutôt historique que pratique : par exemple, c'est sur ces mesures « bac » que s'est appuyé Turc pour mettre au point sa formule d'évaporation (Cosandey et *al*., 2012). Cependant, en Tunisie les mesures par les bacs d'évaporation ne sont assurées que dans les sites des barrages et dans quelques stations météorologiques principales, et la plupart de ces bacs ne sont pas en bon état d'utilisation à cause du mauvais entretien. En effet, il n'est pas toujours facile de réaliser des conditions de mesure idéales.

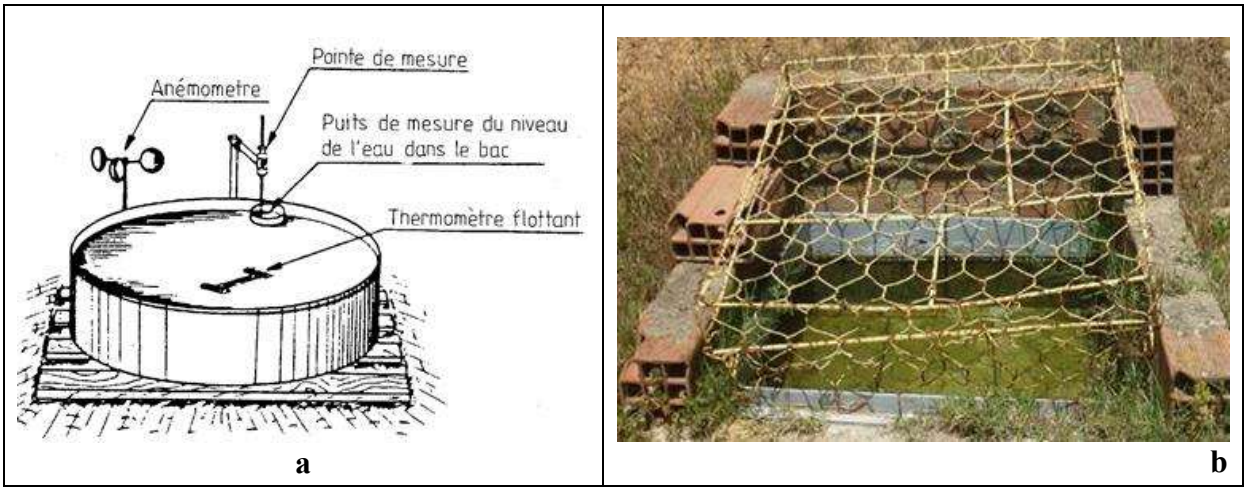


Figure 6: (**a**) Bac d'évaporation (classe A) du Weather Bureau, c'est un bac circulaire d'un diamètre de 120.7cm et d'une profondeur de 25cm, posé sur un support de hauteur de 15cm et à remplir jusqu'à 5 cm en dessous de l'anneau (d'après Capus., 1984) et (**b**) Bac d'évaporation au barrage de Bou Hertma au Nord-Est de Jendouba (Photo : Mjejra., 2011)

- ***L'évaporomètre Piche*** (Figure 8):

Cet instrument a permis à l'équipe d'Experts Agro-météorologistes de l'OMM, opérant en TUNISIE de 1973-76, de généraliser cet atmomètre dans la centaine de stations secondaires nationales, et de réaliser un ajustement statistique, basé sur les mesures de l'évapotranspiration de l'INAT appelée « Formule d'Espinar-Perlat » :

$$\mathbf{ETP = \alpha * E_{PICHE} [1 + \lambda(\theta)]}$$

Avec ETP en mm, E_{PICHE} évaporation Piche en mm/jour, $\theta = (Tmin + Tmax)/2$, α et λ coefficients d'ajustement à déterminer suivant les conditions d'observation.

Mais, l'utilisation de la mesure de l'évaporation Piche, n'est pas vérifiable dans la mesure où elle n'a pas trouvé une bonne réponse dans les essais en Tunisie (Ben Dakhlia., 2004). En effet, l'amélioration des résultats a été recherchée par l'équation mathématique qui intègre l'effet des facteurs advectif et radiatif, la formule devient donc :

$$\textbf{ETP-Espinar} = ((T\ min + T\ max + 36)/3218) * (DJ * (DJ - 5) * (E_{PICHE})^{1/3}$$

Avec DJ = durée du jour (1/10 heure) ; E_{PICHE} = évaporation en mm d'eau ; T min = température minimale quotidienne (en °C) et Tmax= température maximale quotidienne (en °C).

Enfin, il faut noter qu'on ne dispose pas des mesures dans le BV de la Mejerda par l'évapotranspiromètre, le lysimètre ou l'évaporomètre Piche sur la période d'étude (2000-2011).

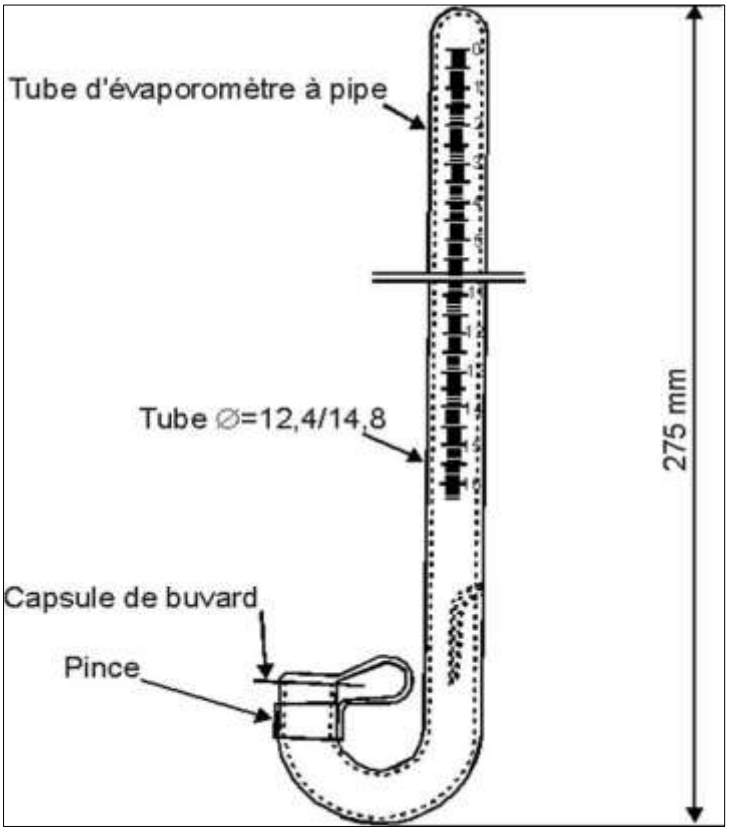


Figure 7: Evaporomètre Piche (Source : Capuis., 1984)

En somme, le terme de d'évapotranspiration dans ses trois composantes (ETP, ETM et ETR) pose beaucoup de difficultés au niveau de la conception et de la mesure qui ne peut être obtenue en routine. Il est de même pour son estimation qui fait intégrer plusieurs éléments : météorologiques, stock d'eau dans les sols et les propriétés des plantes. Dans ce contexte, une étude fiable de l'évapotranspiration impose l'utilisation d'une base de données assez crédible et complète.

1.2. Inventaire des données

Pour la réalisation de ce travail nous avons eu recours à trois catégories de données (les images satellites, données géographiques et météorologiques). Ainsi, avons-nous essayé de croiser ces données, pour y chercher des relations.

1.2.1. Les données expérimentales

1.2.1.1. Période et réseau d'étude

- ***Période d'étude***

Les données météorologiques sont à pas de temps journalier et les images satellites sont à pas de temps hebdomadaires pour la période allant de 2000 à 2011. D'une part, cette période correspond à l'information météorologique instrumentale la plus complète et le réseau de mesure le plus dense. D'autre part, l'information des images satellitales du capteur MODIS-TERRA et la plus disponible dans l'archive du site de la NASA. Sachant que les observations par MODIS-TERRA datent de la fin de février 2000. Cette période permet, en outre, l'avantage de présenter l'état très récent de l'évapotranspiration dans le B.V de la Mejerda. Étant donné que le cycle climatique en Tunisie s'étend en moyenne sur 6 à 8 ans (Ben Sakka., 2007). On peut dire que la durée de la période retenue permet d'étudier aisément l'évapotranspiration. Elle offre aussi la possibilité d'obtenir une image régionale détaillée sur ce paramètre climatique.

- ***Réseau de mesure***

Nous avons exploité le réseau de mesures des stations principales et secondaires, qui fournissent une série complète de données et tous les paramètres climatiques indispensables pour ce travail. Le réseau de mesure contient huit stations météorologiques réparties sur toute la région. Elles sont à la proximité des grandes villes et l'oued Mejerda (tableau 2). Au total, la densité du réseau apparaît faible et déséquilibrée, mais assez représentative de l'espace du B.V de la Mejerda.

Tableau 2: Nomenclature des stations

Paramètres / station	situation géographique	Altitude en m	Les coordonnées géographiques	
			latitude Nord	Longitude Est
Jendouba	vallée	143	36°29'	8°48'
Béja	versant	234	36°44'	9°11'
kef	plateau	655	36°11'	8°43'
Siliana	Plaine	430	36°09'	9°20
Tala	Plateau	1020	35°33'	8°41'
Borj Amri***	Plaine	53	36°43	9°56
Ghar Melh*	littoral	20	36°10	10°11
Cherfech **	Plaine	14	36°54	10°02

*Station secondaire, ** agro-météorologique, *** aéroport militaire (Source : I.N.M et *al.*,)

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

1.2.1.2. Données météorologiques

L'étude de l'évapotranspiration dans le BV de la Mejerda est menée à partir d'un réseau des stations météorologiques de deux types (figure 9) :

- un réseau de type synoptique mesurant tous les paramètres climatiques, il s'agit à l'heure actuelle de postes automatiques.
- Un réseau de type secondaire (agro-météorologique, aéroport militaire). Ce réseau est suivi par des observateurs bénévoles et est constitué de stations manuelles.

Ces données sont collectées auprès de l'Institut National de la Météorologie (I.N.M), la Direction Générale de la Production Agricole (DGPA) à partir du Bulletin Décadaire Agro-météorologique (B.D.A), des Bulletins Quotidiens de Renseignements (B.Q.R) et des Bulletins Mensuels de Rayonnement (B.M.R). À partir de ces sources, nous avons essayé de constituer une base de données qui permet de calculer l'ETP sur la période d'observation récente de 11 années agricoles débutant au 1er septembre 2000 et se terminant le 31 août 2011. D'un autre côté, on a eu recours pour combler les observations manquantes aux sites :

- http://www.freemeteo.com,(données journalières),
- http://www.wofrance.fr,(données journalières),
- http://www.wunderground.com, (données journalières et données Horaires).

Compte tenu de la disponibilité des séries, il a été possible de traiter les paramètres suivants :

- la température (Moyenne, Maximale et Minimale),
- vitesse et direction du vent,
- durée de l'insolation,
- humidité relative de l'air (Moyenne, Maximale et Minimale).

L'examen visuel, à l'aide des filtrages sur logiciel Excel, de la série de données retenue montre qu'il existe certaines données aberrantes qui sont généralement non homogènes avec les autres valeurs de la série et d'autres lacunaires :

- les données aberrantes présentent soit un décalage entre les valeurs sur une série de la station allant sur quelques jours ou un écart de plus en plus grand entre les données de la station et celle des stations environnantes surtout pour les stations secondaires. Ce type de données affecte les valeurs des températures et l'insolation,
- les lacunes sont de l'ordre de quelques jours affectant généralement les valeurs de l'humidité relative et du vent.

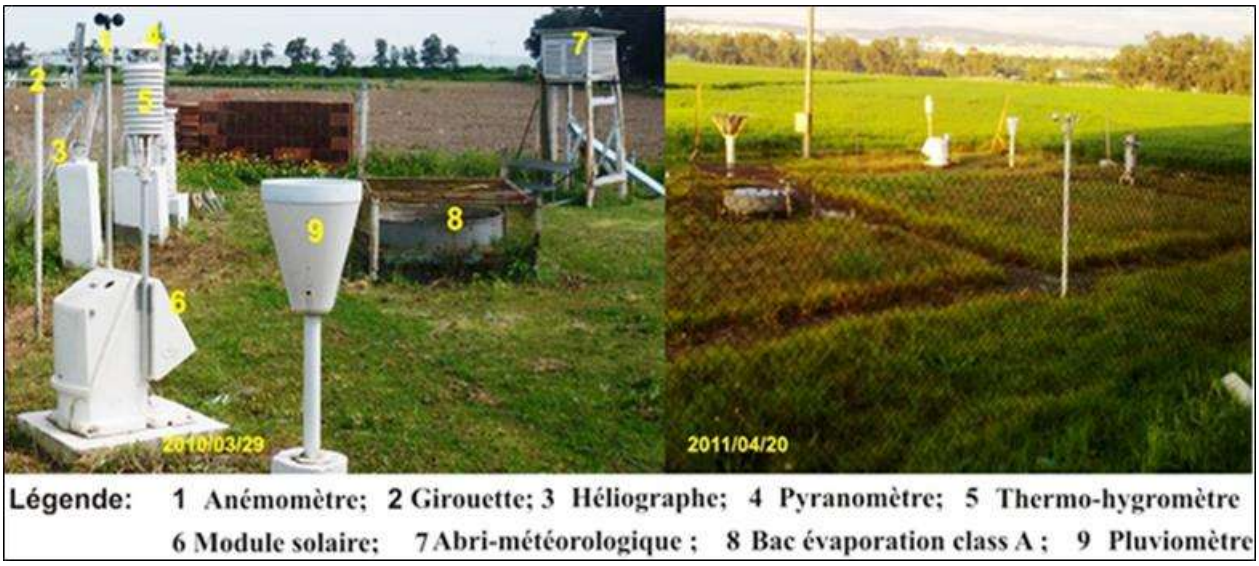


Figure 8 : Stations météorologiques (photo à gauche station agro-météorologique de Cherfech, à droite station synoptique à Béja (crédit photos Mjejra M., 2011)

Les données météorologiques nous ont servi à calculer l'évapotranspiration potentielle (ETP). Ces données ont été spatialisées sur le bassin versant de la Mejerda par d'interpolation géostatistique. Cependant, le calcul de la valeur de l'ETP à l'aide du modèle de la FAO par le biais du logiciel ET_0-Calc, est effectué à partir des techniques statistiques, fournissant des moyennes sur toute la région étudiée allant de 2000 à 2011à échelle journalière. Enfin, les résultats sont intégrés dans la base de données élaborée pour ce travail.

1.2.1.2. Données satellites

L'imagerie satellitale, joue, actuellement, un rôle important dans le suivi des phénomènes climatiques. Les données issues de la télédétection spatiale, dont la collecte se fait à téléchargement libre comme les produits issus des deux capteurs utilisés dans ce travail, MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) du satellite TERRA et ETM+ (Enhanced Thematic Mapper) du satellite LANDSAT[6].

- ***Le satellite TERRA/AQUA* :**

Ce satellite lancé par la NASA évolue à 705 km d'altitude sur une orbite héliosynchrone. Le capteur MODIS possède une fauchée de 2330 km qui lui permet d'observer chaque point de la terre tous les jours dans 36 bandes spectrales. La résolution des produits MODIS varie de 1 km, 500m à 250 m. la fréquence temporelle a été améliorée par une production progressive TERRA 1- jours de la période 001 de l'année (en jour julien) par contre AQUA à partir de 009 (jour julien), ce qui donne une fréquence de 8 jours. Dans ce contexte, nous avons collecté une série d'images du capteur MODIS pour les produits NDVI, l'évapotranspiration et les températures du sol (Ts) (tableau 3). Ce capteur offre une résolution à la fois assez large pour étudier l'ensemble du bassin versant de la Mejerda et suffisamment fine pour travailler à l'échelle de la parcelle (250 m). En outre, les images satellites sont prises d'une manière

[6]Nous présentons dans les annexes les caractéristiques des satellites que nous avons utilisés dans ce travail.

continue depuis février 2000 : leur répétitivité temporelle est donc adaptée à une étude au pas de temps hebdomadaire. Par ailleurs, les produits MOD13Q1 représentent des synthèses des indices de végétation NDVI et EVI, d'une répétitivité temporelle de 16 jours et une résolution spatiale de 250 m. Elles sont *« réalisées à partir de la méthode CV-MVC (constant view-maximum value composite) qui consiste à retenir la valeur maximum de NDVI ou EVI correspondant aux valeurs d'angles de visée minimum »* Huete et *al., 1999*. Les données des NDVI MODIS sont utilisées pour calculer les coefficients culturaux par contre les séries de température du sol (Ts) sont exploitées pour calculer l'humidité du sol.

- ***Le satellite LANDSAT*** :

Le satellite LANDSAT 7 évolue à 705 km d'altitude a été lancé en 1999. Il est équipé d'un capteur multi-spectral (ETM+). Il comporte en plus une bande panchromatique à haute résolution (15 m de résolution et une bande thermique de résolution 60 m) avec une durée de cycle 16 jours au-dessus du même point. Toutefois, les données issues de LANDSAT sont exploitées essentiellement pour valider les cartes d'occupation du sol et les cartes de l'humidité du sol, nous reviendrons sur ce point, plus en détail, dans la deuxième partie.
Il est à remarquer que les données de MODIS-Terra sont à quatre niveaux de traitement :

- Le niveau L0 : ce sont les données brutes qui sont stockées dans un format « pds » (Production Data Set), de manière à pouvoir être traitées par n'importe quel utilisateur ;
- Le niveau Ll : ce sont les données de radiances calibrées et géo-référencées. On distingue deux types LIA (données brutes calibrées) et LIB (données brutes calibrées et géo-référencées) ;
- Le niveau L2 : ce sont des données de LIB auxquelles on a appliqué les corrections atmosphériques. Elles sont directement exploitables pour traiter les paramètres de surface ;
- Le niveau L3 : ce sont les données de L2 améliorées qui composent deux ou plusieurs images (composition de bandes ou composition des périodes d'observation)[7].

Tableau 3: Produits de MODIS utilisés dans l'étude

Sigle (nom)	Plate-forme	MODIS produit	Résolution (m)	Granularité temporelle
MOD13Q1	Terra	Indices de végétation	250m	16 jours
MYD13Q1	Aqua	Indices de végétation	250m	16 jours
MCD12Q1	Combiné	Type de couverture terrestre	500m	Annuelle
MOD11 L2	Terra	Température de surface et émissivité	1000m	Journalière
MOD16A2	Terra	Évapotranspiration	1000	8 jours

Dans ce travail, les données du niveau L3 sont utilisées, plus précisément des images composites de 8 jours. Ce choix nous permet d'éliminer le maximum de nuages et d'avoir le meilleur angle zénithal pour l'observation de la Terre. *« Ces données ont aussi bénéficié de*

[7] Dans le présent travail nous avons utilisé le niveau L3, en raison de la bonne qualité de données.

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

toutes les corrections et traitements nécessaires, si bien qu'elles sont directement exploitables » (Djamai Najib., 2010). Cela nous a évité de faire les corrections radiométriques, géométriques et des effets atmosphériques.

Notre zone d'étude est située entre les latitudes 35 et 38° Nord et les longitudes8 et 12° Est (5 et 10° en coordonnées sinusoïdales), donc seule la cellule **v5hl8** est retenue (voir figure 10). Dans cette cellule, *« les distorsions causées par la projection sont faibles »* (DjamaiNajib.2010).Le passage au-dessus de la zone d'étude, la Tunisie, à une heure optimale pour avoir une bonne qualité des images (aux alentours de 10h local pour le capteur Terra et 16h pour le capteur Aqua) et un angle solaire faible proche du nadir.

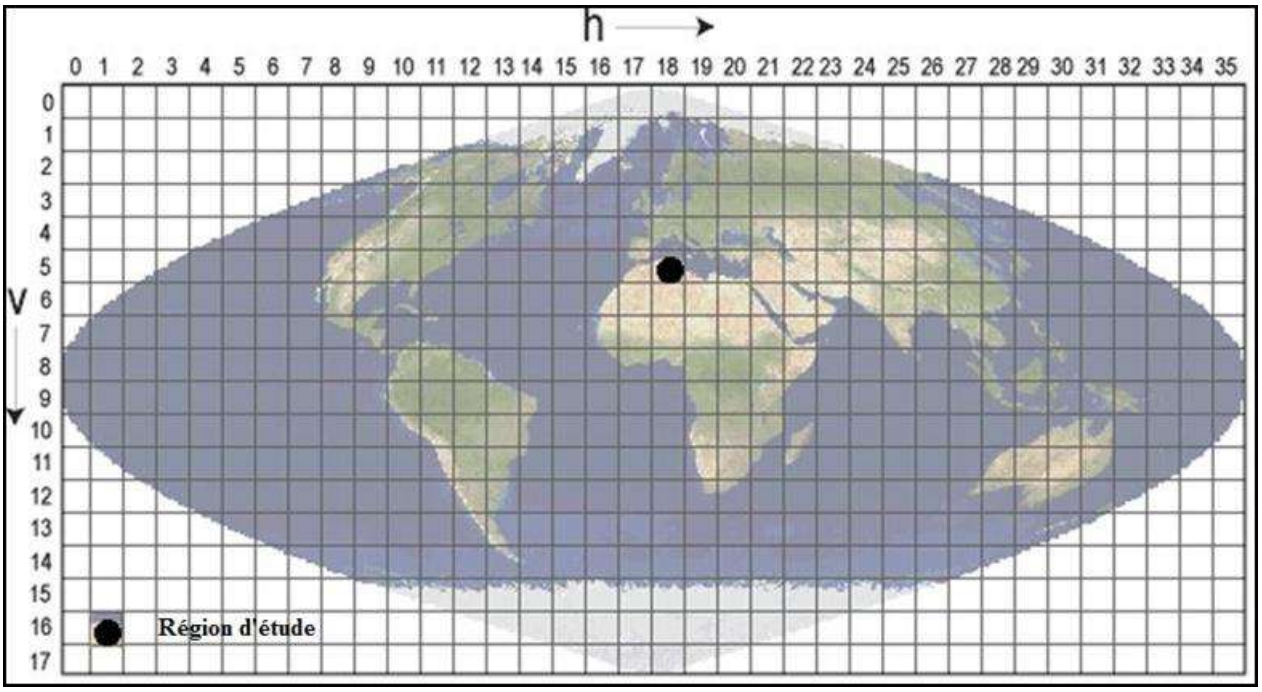


Figure 9: Les cellules de la grille de la projection sinusoïdale de la région étudiée
source :(http://modisland.gsfc.nasa.gov/MODLAND_grid.html)

Un prétraitement supplémentaire de la série d'images MODIS est indispensable pour améliorer la cartographie de l'évapotranspiration, cette étape comprend :

- l'application d'un masque pour supprimer les pixels qui n'appartiennent pas à notre région d'étude ;
- la re-projection des images dans le système cartographique local, Lambert Nord Tunisie ;
- le calibrage des valeurs des NDVI pour aboutir enfin à une représentation des produits de l'évapotranspiration exprimés en mm l'échelle du temps choisie.

1.2.1.3. Données cartographiques et statistiques

Pour assurer la fiabilité de la base de données nous avons utilisé d'autres types de données qui se trouvent dans la littérature et les services administratifs du Ministère de l'Agriculture et des Ressources hydrauliques (MARH) tels que :

- carte du réseau hydrographique au 1/200000 ;
- carte de la végétation au 1/200000 ;

- carte des sols au 1/200000 ;
- carte topographique au1/200000 ;
- carte topographiques au 1/50000 (Kalaât Landalous et Dachret Nebeur) ;
- carte agricole du Nord-Ouest (MARH, 2007) des Gouvernorats (Béja, Ariana, Manouba Jendouba, Siliana, Kef, Kasserine) ;
- serveur Google Earth 2010, extraits des images 1/10000 (altitude 340m);
- le modèle numérique du terrain qui caractérise la topographie du milieu. Il a été réalisé à partir de la carte topographique de la Tunisie de 1/200000, et dont l'équidistance est de 50 mètres. cette résolution est largement suffisante pour notre étude puisqu'elle est supérieure à celle des images MODIS-TERRA (250m) ;
- les recensements de l'Office des Terres Domaniales (OTD) et les statistiques des Commissariats Régionaux de Développement Agricole (CRDA) à propos des activités agricoles dans les Agro-combinats, les périmètres irrigués et les terres cultivées publics. Ces données concernent la taille les surfaces cultivées, les types des cultures pratiquées, les dates des activités effectuées sur les cultures (date de semis, de récolte, période d'irrigation ...) Certes, les données statistiques couvrent toute la période d'étude à l'exception de l'année agricole 2005 pour les recensements de CRDA.

On vise à travers l'utilisation de ces documents cartographiques, la délimitation de la région d'étude, le suivi de la variation de l'occupation du sol et de montrer les caractéristiques géophysiques du BV de la Mejerda. Par contre, les données statistiques de l'OTD et les CRDA nous permettent de valider les résultats des cartes de l'occupation du sol afin de calibrer les coefficients culturaux (Kc) et les coefficients de stress hydrique (Ks) dans la région. Ces données sont transmises dans une base de données numérique à l'aide d'un S.I.G, nous y reviendrons plus loin.

1.2.1.4. Le travail de terrain

La problématique étudiée a nécessité un important travail de terrain qui a permis d'acquérir des données qualitatives et quantitatives *in-situ*. Les fiches élaborées concernent la densité et la phénologie de la végétation, la typologie du couvert végétal, l'emplacement des stations météorologiques, les caractéristiques des zones humides et les morphologies des versants[8]. La prise des photos a accompagné le travail des relevés, et ce, tout au long des oueds des versants des plaines, périmètres irrigués et selon plusieurs angles de vue en fonction de leur utilisation dans le texte. Au total, 13 compagnes de terrain ont été réalisées dont lesquelles on a effectué 47 relevés de terrain (des fiches de renseignements sur les sites visités) et plus de 400 photos prises au sol avec sélection (voir figure8). Les données recueillies au terrain sont ensuite transmises sur des supports statistiques et cartographiques. En outre, les données d'occupation du sol ont été collectées durant les campagnes de terrain menées tout au long de la période 2009 à 2011. On a mené des observations de terrain pour identifier les types et les classes des cultures (figure 11). Collecter des informations sur des parcelles pour avoir des échantillons d'apprentissage utiles pour la classification de l'usage

[8]Voir la fiche en détail dans les annexes.

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

des terres. Les critères de choix des parcelles concernent leur représentativité (diversité des comportements phénologiques) et leur étendue (localisation sur les images satellites). Les protocoles de collecte concernent un ensemble de parcelles non contiguës sur toute la région d'étude pour diversifier les types de cultures et leur environnement agro-climatique. Il mérite d'être signaler qu'on ne peut pas mener des campagnes de terrain sur une telle région très vaste. C'est la raison pour laquelle on a choisi de faire des échantillonnages sur des parcelles-types de 1 km^2.

En pratique, chaque parcelle visitée a été tout d'abord localisée géographiquement sur un support cartographique réalisé à partir des images à haute résolution spatiale (extraits Google Earth) ou les cartes topographiques. Les systèmes de positionnement GPS ont été utilisés lorsque la localisation était incertaine ou lorsqu'on se trouvait dans un milieu hétérogène. Un croquis de paysage a été réalisé sur place en complément des fiches descriptives. En outre, on a effectué des mesures climatiques lors de la campagne mai 2011 avec thermo-hygromètre portatif, Radiomètre luminan-cemètre, Altimètres. Ces mesures sont confrontées à celles de la base de données météorologiques. D'ailleurs, les campagnes de mesure ont servi à la réalisation des cartes de l'occupation du sol et les cartes des coefficients culturaux. La combinaison de différents niveaux d'acquisition et de traitement des données laisse apparaître deux niveaux. Le premier c'est le niveau satellitaire qui permet d'extraire l'Indice de Végétation par la Différence Normalisée (NDVI). Le deuxième s'intéresse au niveau de traitement des données collectées sur le terrain et le calibrage des données satellitales.

1- le niveau satellitale : les images de chaque cycle de 16 jours (moyenne de l'NDVI) sont sélectionnées. Leur traitement, entièrement réalisé à l'aide des algorithmes et décrit par la suite, fournit les données suivantes :

- les coefficients culturaux (Kc) et coefficients de stress hydrique ;
- les cartes d'occupation du sol (OS).

La validation de l'information satellitaire est réalisée à travers les travaux de terrain, la documentation de l'OTD-CRDA et les autres images satellites (LANDSAT). En effet, la validation des NDVI calculés à partir des images MODIS, se fait entre autres, tout en quantifiant la production végétale par une mesure directe sur le terrain. A ce stade, 11parcelles-types (sites de contrôle) réparties dans les différentes zones de la région ont été marquées sur place pour les besoins de validation de NDVI ; et ceci par la comparaison des profils des NDVI et les types de la végétation trouvés sur le terrain.

2- **Niveau terrain** : il permet de faire une classification in-situ de l'usage des terres dans les parcelles types. Il se fait selon la méthode de l'échantillonnage empirique[9] sur une placette de 1 km^2 de surface où chaque 250 m est codée par type d'occupation allant de 1 à 4 (Er-raki. S, 2008). La taille de la placette est fonction de la résolution spatiale du pixel MODIS 250m^2. On peut distinguer :

[9]L'échantillonnage empirique ou stratifiée assure que chaque groupe soit équitablement représenté par l'échantillon. Dans ce cas il faut choisir les éléments de l'échantillon de manière que chaque groupe soit représenté ce qui rassemble à notre cas où nous avons classées l'occupation du sol en quatre classe. Voir la deuxième partie chapitre occupation du sol.

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

- code 1 correspond à une formation purement herbacée (cultures annuelles ou et prairies) ;
- code 2 correspond à une formation purement arborée (les arboricultures et forêt) ;
- code 3 correspond à une formation mélangée (cultures annuelles = arbres) ;
- code 4 correspond à une surface en eau (eau, surface humide) ;
- code 4 correspond à une surface de sol nu ;

Enfin, le traitement des données de terrain comprend plusieurs étapes :

- exploitation préliminaire des fiches de terrain ;
- calculs des taux de différentes classes des sites étudiés ;
- détermination de la composition floristique en indiquant les espèces dominantes ;
- régression entre l'indice de végétation et la biomasse totale ;
- utilisation de l'équation de la droite de régression pour calibrer les cartes de l'occupation du sol et les coefficients culturaux.

Au total, une base de données assez riche qui peut assurer une étude fiable sur l'évapotranspiration, mais elle mérite d'être contrôlée et comblée.

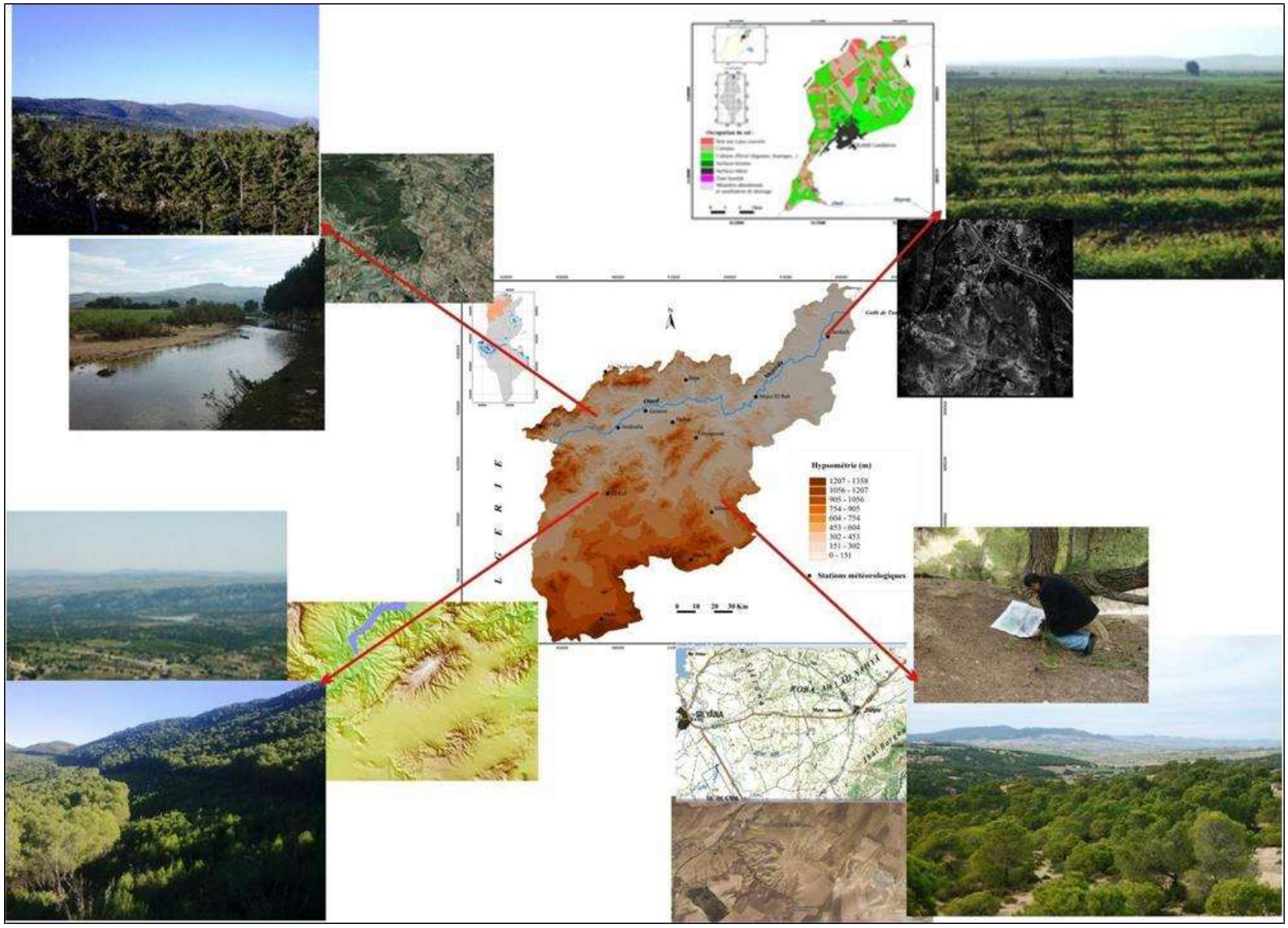


Figure 10 : Exemples de localisation de quelques campagnes de terrain : les documents fournis (cartes topographiques, extraits Google Earth, les cartes agricoles des Gouvernorats, et les appareils de mesures météorologiques) (Photos, Mjejra M., 2010 et 2011

1.2.2. Contrôle de la qualité des données

La qualité des données revêt une importance toute particulière. Elle détermine, en effet, la qualité des résultats. Pour cela, on pose les questions essentielles : est-ce que les données collectées peuvent répondre à nos objectifs ? Sinon, est-il possible de les contrôler pour les adapter ? Dans ce cas, quels sont les traitements nécessaires ?

1.2.2. 1. Les données météorologiques

L'acquisition des données nécessite une très grande prudence dans leur utilisation. En effet, ces données présentent des insuffisances, des erreurs…etc, qui sont liées à plusieurs facteurs instrumentaux et anthropiques (Hénia L., 1993) :

- l'altération des instruments de mesure et la défaillance dans certains cas, ce qui pose un problème de quantification des températures, insolation, vent…
- un personnel est souvent peu qualifié et très mal rémunéré, en particulier dans les stations secondaires (Cherfech). En effet, le personnel chargé d'effectuer les mesures dans les stations pluviométriques n'a aucune formation spéciale (instituteurs, agriculteurs…).

Dans notre série d'analyse, deux types de contrôle se présentent :

- **le contrôle des erreurs** : généralement les erreurs qui affectent les séries des données sont des erreurs de saisie. À titre d'exemple, ces erreurs sont, le plus souvent dues à une inversion de chiffres, par exemple au lieu d'écrire 15°C l'observateur enregistre 51°C. Pour détecter ces erreurs nous avons eu recours au filtrage des données pour déterminer les valeurs douteuses. Celles-ci ont été comparées aux valeurs moyennes de la période, pour être corrigées et une nouvelle série a été constituée[10]. Dans le même ordre d'idée, nous avons comparé les stations deux à deux, chaque station étant comparée à sa voisine, et ce pour vérifier la fiabilité des données. Il en résulte, une forte corrélation qui dépasse 0.70 et des écarts types moyennement faibles (tableau. 4).

Tableau 4 : Exemple de comparaison des données des stations voisines

stations	Coefficients de corrélation			Écarts types moyens		
	Température	Humidité	insolation	Température	Humidité	insolation
Tala/ Kef	0.91	0.81	0.93	1.2	4.4	1.3
Cherfech/ Ghar Melh	0.83	0.72	0.84	1.1	5.2	1.1

- **le contrôle des lacunes** : sur la série de données météorologiques de la période d'étude (2000-2011) les lacunes concernent quelques jours, ne dépassent pas 2% des observations. Et ceci, n'influence pas l'allure générale des résultats. Notons que seule la station de Jendouba présente une série d'observations complète. En effet, nous avons comblé les lacunes, presque négligeables, à partir de données fournies par les différents sites mentionnés plus haut. En outre, nous avons eu recours à la vérification des données entre les stations de la Direction Générale de la Production Agricole (DGPA) et celles de l'Institut National de la Météorologie (INM) et nous avons pu combler certaines lacunes.

[10]Ici, nous avons comparé les valeurs douteuses par la moyenne hebdomadaire et les valeurs des jours J-1 et J+1 pour aboutir à une autre série de données.

En ce qui concerne les stations de Borj Amri et Ghar Melh dont les observations de l'insolation et le vent sont douteuses ou manquantes, nous avons interpolé les données de la station la plus proche « voisine » c'est-à-dire celle de Cherfech. Car ces stations se caractérisent par des conditions environnementales similaires.

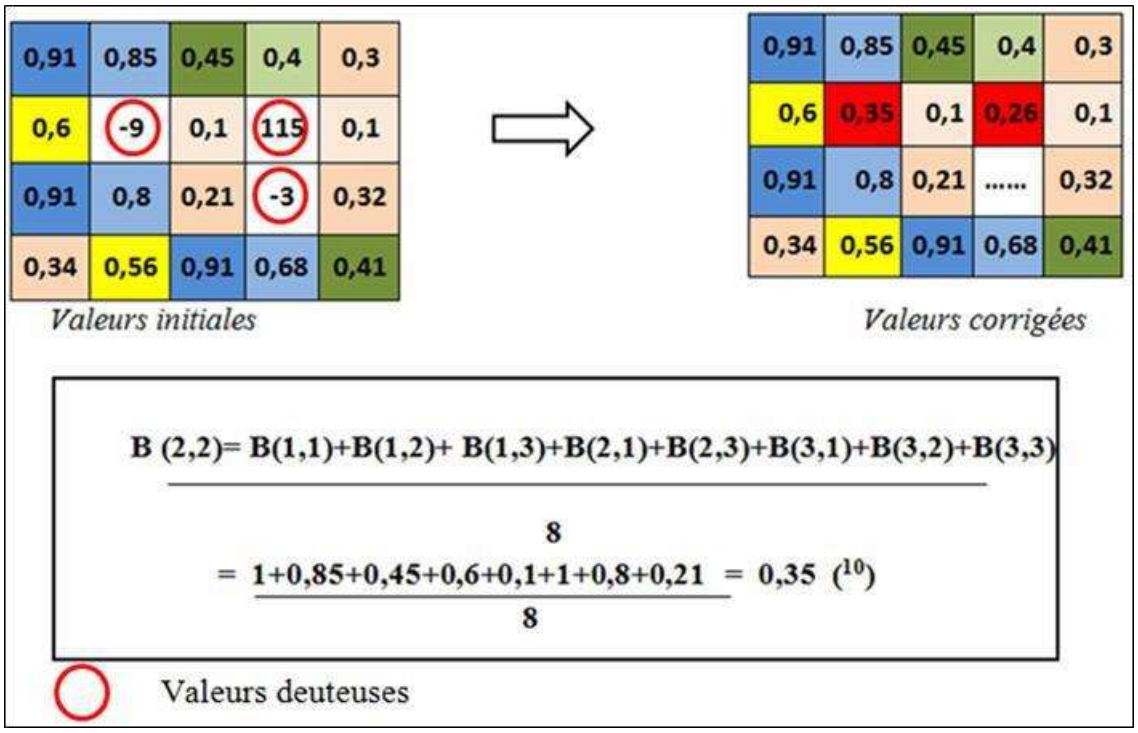
1.2.2. 2.Les images satellites

Pour les données satellitales nous avons commencé :

- d'abord, recueillir des images satellitaires réparties sur une période suffisamment longue pour qu'on puisse détecter et étudier les changements que subit la zone étudiée ;
- ensuite, Effectuer les corrections nécessaires pour réduire les erreurs susceptibles d'avoir lieu dans les images utilisées. En effet, les images MODIS sont corrigées suivant une projection sinusoïdale et pour s'adapter à la base numérique nous avons ré-projeté la série du capteur MODIS suivant une projection UTM Nord Tunisie ;
- et enfin, croiser les données de terrain et celles des indices extraits des images satellitaires, pour valider les résultats obtenus.On cherchera donc à mettre au point une procédure de validation par croisement des observations de terrain avec les informations issues des images de la haute résolution spatiale (LANDSAT).

Du reste, on a réalisé un algorithme pour identifier les pixels qui ont des valeurs de réflectance erronées. Pour résoudre ce problème, nous avons interpolé les valeurs erronées par la moyenne des valeurs acceptables parmi les huit pixels voisins (Tableau 5). Il importe par ailleurs de signaler que nous avons comblé les lacunes des images MODIS de la période d'étude par les produits AQUA (MYD13Q1).

Tableau 5: Exemple d'interpolation des valeurs aberrantes des NDVI (deuxième décade de mars 2006)



Conclusion

L'analyse des processus d'évaporation physique et de transpiration végétale dans le système sol-plante-atmosphère a permis de se rendre compte de la complexité de l'étude de l'évapotranspiration à l'échelle du bassin versant (Cosandey et *al.*, 2012). Pour cette raison, nous avons expliqué la notion de l'évapotranspiration et nous avons présenté nos sources de données multiples.

En somme, nous pouvons dire pour l'ensemble de la région et la période considérée, les données sont assez fiables et assez homogènes et le recoupement des données multi-sources : stations météorologiques, données de terrain, documents cartographioques et images satellites, a amélioré nos connaissances des caractéristiques de l'évapotranspiration dans le BV de la Mejerda. Il reste à rappeler que, la performance des données utilisées, la validité de la cartographie des éléments conditionnels de l'évapotranspiration est subordonnée à la qualité des mesures sur le terrain, ainsi qu'à leur continuité dans le temps et également à leur plus grande représentativité géographique dans cette région. En fait, cette région est marquée par des multiples nuances géographiques et climatiques. En outre le concept de l'évapotranspiration et les données de base étudiées dans ce chapitre, il serait également utile de présenter les caractéristiques de la région étudiée. Ce volet fera l'objet du deuxième chapitre.

.

DEUXIEME CHAPITRE : PRESENTATION DE LA REGION D'ETUDE

Introduction

Le BV de la Mejerda,[11] principal bassin hydrologique de la Tunisie. S'étend sur un territoire d'environ 23 milles Km^2 (dont 16.4 milles km2 en Tunisie) soit 10% de la superficie du pays (figure 12). Ce bassin coupe la Tunisie dans sa diagonale, selon une orientation Sud-Ouest/Nord-Est et fait partie de la Tunisie tellienne. Cette région située entre les deux axes orographiques majeurs, la Dorsale[12] au sud (de Tala à Tunis) et la Kroumirie-Mogôds[13]au Nord (de Gardimaou à Ghar Melh). Elle est entrecoupée par des dépressions et des couloirs topographiques transversaux qui ont pour effet d'accélérer les vents et de faciliter la progression, vers le Nord, des flux chauds et secs de secteur sud, et vers le sud des flux froids et humides responsables de la pluviométrie (Hénia L. Dir., 2008).

Le BV de la Mejerda est considéré comme le "château d'eau" de la Tunisie, puisqu'il fournit la majeure partie des eaux de surface, et qu'il alimente près de 38% de la population tunisienne, en particulier la ville de Tunis (MARH., 2007). De nombreux barrages (Sidi Salem, Mallègue, Béni M'tir, Kasseb, Laroussia, Lakhmess, Bouhertma…) ont été réalisés sur les différents affluents d'oued Mejerda. Ils occupent, aujourd'hui, une place de premier ordre dans la stratégie de la mobilisation des ressources en eau du pays et des potentialités du secteur agricole. En fait, *« Beaucoup de civilisations se sont installées tout au long de la vallée de la Mejerda faisant d'elle un axe de développement important, beaucoup de villes ont prospéré et un développement économique s'est instauré, environ 40% de la population et plusieurs périmètres irrigués alentour de 80000 ha »* (MARH., 2007).

[11]Bassin versant (bassin topographique, bassin fluvial, bassin hydrographique) : c'est une unité géographique sur laquelle se base l'analyse du cycle hydrologique et de ses effets. Il est défini comme la surface parcourue par un cours d'eau et ses affluents. Les écoulements convergent vers la zone la plus basse appelée exutoire. Le bassin versant est délimité par la ligne de partage des eaux qui correspond à la ligne de crête. Dans ce cas on parle de bassin versant topographique. Il est distingué par ces caractéristiques hydrologiques, climatologiques, pédologiques…Musy et *al.,* (2014).

[12] La Dorsale prend la Tunisie en écharpe du sud-ouest au nord-est et englobe les sommets les plus élevés du pays (Jbel Chaâmbi, 1544 m). Elle joue le rôle d'un écran vis-à-vis des flux de sud et de nord (Henia L. Dir., 2008)

[13] Kroumerie et Mogôds ensemble des chaines des Jbels, constituent la limite nord du bassin versant de la haute Mejerda

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

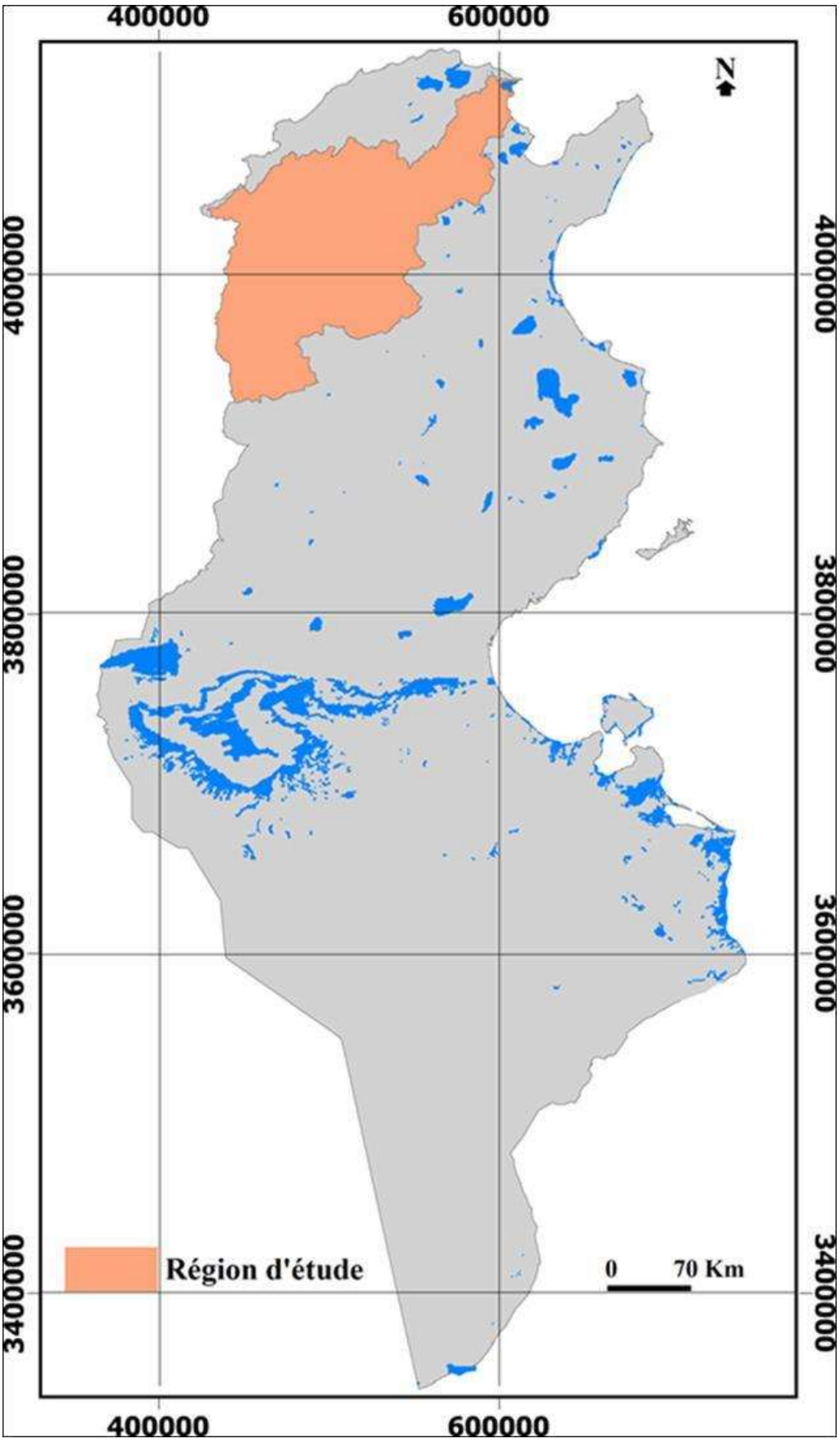


Figure 11: Carte de localisation de la région d'étude par rapport à l'ensemble du territoire de la Tunisie

2.1. Caractéristiques géophysiques du bassin versant de la Mejerda : support de l'étude de l'évapotranspiration

Le milieu physique d'un bassin versant est représenté par le relief, le réseau hydrographique, les sols, l'occupation naturelle de la zone d'étude et l'occupation due à l'action anthropique sur le milieu.

2.1.1. La topographie

L'étude du relief et de la forme des bassins versants devraient nous permettre de mieux expliquer la répartition de l'évapotranspiration et de déterminer ses grands traits. À première vue, le BV de la Mejerda se particularise par la diversité de sa topographie : des plaines, collines, ensemble de Jbels, formations de pentes et des dépressions allongées et étroites. L'altitude maximale de la région atteint 1419m à Jbel Berino. Progressivement vers le Nord-Ouest, le BV de la Mejerda s'élargit et les altitudes s'abaissent (195 m à Gardimaou, 143 m à Jendouba) pour atteindre quelques mètres dans la basse vallée (5 à 20 m à Gaârat Mabtouha) et enfin le zéro marin sur la frange littorale dans le Golfe de Tunis (figure12). Cette mosaïque susceptible de multiplier les nuances climatiques dans la région (Ben Boubaker., 2000).

L'orientation générale Sud-Ouest/Nord-Est des grands axes de relief favorise l'augmentation des pluies sur les versants nord (versants au vent) et gène de sa pénétration profondément vers l'intérieur. L'absence, par contre, de reliefs importants au Nord-Est de la Dorsale facilite, en été, la progression des vents du sud chauds vers le Nord. Le cloisonnement du relief dans le B.V de la Mejerda multiplie enfin les climats locaux. Ceci explique, en partie, la forte variation de l'évapotranspiration (exposé en détail dans la deuxième partie). La région est subdivisée en trois unités considérées assez homogènes aussi bien au niveau de l'hydrographie qu'au niveau des unités topographiques (Sethom H., et Kassab A., 1981) :

- ***La haute Mejerda,*** elle correspond à la partie la plus élevée du BV de la Mejerda et elle se termine à l'amont de Béja. Elle contient traditionnellement les sous BV de l'oued Mallègue et Oued Tessa, avec une topographie de plateaux ondulés, situés vers 600m à 800m d'altitude. Ils s'étendent autour de Tala, Tajerouine et Makther. Ils sont dominés par des chainons isolés et allongés (Jebel Brino 1419m Dir-Kef 1084m et Jbel Takrouna 955m) ou de tables perchées (Kalaât Es-nam 1271m). On note aussi, la présence des pentes fortes et une orientation des versants Nord-Ouest tels que : versant nord de Jbel Essra, versant sud de Jbel Kbouch… La figure 13 montre la dominance de l'exposition[14]des versants nord à Nord-Ouest exposés aux vents humides. On remarque aussi la présence d'une plaine allongée le long de l'oued Mejerda sous forme de couloir de Gardimaou à Bou Salem sur environ 65 km. La région est marquée aussi par la présence des plaines à faibles étendues : plaine de Zouarine, la plaine du Sers, plaine de Sidi Dhil, plaine de Sidi Khiar…Cette région est entrecoupée par des dépressions et des couloirs topographiques transversaux : dépression du Krib, Tajrouine, Dahmani…La présence des versants à pente forte, allant jusqu'à 70%, engendrent l'accélération des vents et la progression des flux chauds et froids. (Henia L. Dir., 2008).

[14]L'exposition : est donnée en calculant l'angle d'orientation par rapport au nord, de la pente principale en chaque cellule. Le codage de l'exposition est donné en degrés, le 0 correspondant au nord géographique

- ***La moyenne Mejerda***, elle représente une région faiblement montagneuse formée d'une succession de petites plaines reliées les unes aux autres par des sections de vallées très encaissées (Rodier et *al.,* 1981). Elle prend fin à la ville de l'Aroussia où l'oued Dkhila, l'oued Lahmer et l'oued Siliana constituent ses affluents les plus importants. Elle se caractérise par une topographie raide et une exposition Nord-Ouest très marquée. Cette partie représente le point de croisement des grands affluents de la Mejerda d'où on trouve le plus grand barrage du pays (Sidi Salem). Cet ensemble est considéré comme la zone la plus inondable de la Mejerda (à titre d'exemples les inondations catastrophiques des années, 1973, 2003 et 2012, 2015).

- ***La basse Mejerda*****,** elle se situe entre le pont Trajon et la mer. La région représente une plaine qui traverse des terrains inferieurs à 100m. Elle est entourée par un ensemble de Jbels d'altitude modeste environ 300 m: Jbel Nahli, Jbel Ammar et Jbel Ennadhour, ici la vallée n'a pas des grands affluents. La pente moyenne du delta est faible, de l'ordre de 7.2 % et ne commence à s'accentuer que dans la partie amont du delta (les alentours de barrage Laroussia) pour se jeter enfin dans la Lagune de Ghar Melh (Samaâli H., 2011). Elle se distingue par une topographie homogène, plate, marquée par la présence des zones humides (Garâat, Sebkhat, marécages) avec une ouverture sur la Méditerranée. Cette partie est exposée aux flux marins très chargés en vapeur d'eau. Ceci, est un facteur de la modération de l'évapotranspiration.

En somme, la topographie accidentée qui caractérise le BV de la Mejerda s'impose comme facteur essentiel des climats locaux de cette région. Cela se voit clairement à travers trois phénomènes distincts : l'effet de la rugosité, l'effet de l'altitude et l'effet du site (Ben Boubaker., 2000). Ces phénomènes ne sont pas sans influencer notablement la spatialisation de l'évapotranspiration, et devraient contribuer aussi bien au zonage du déficit d'évaporation.

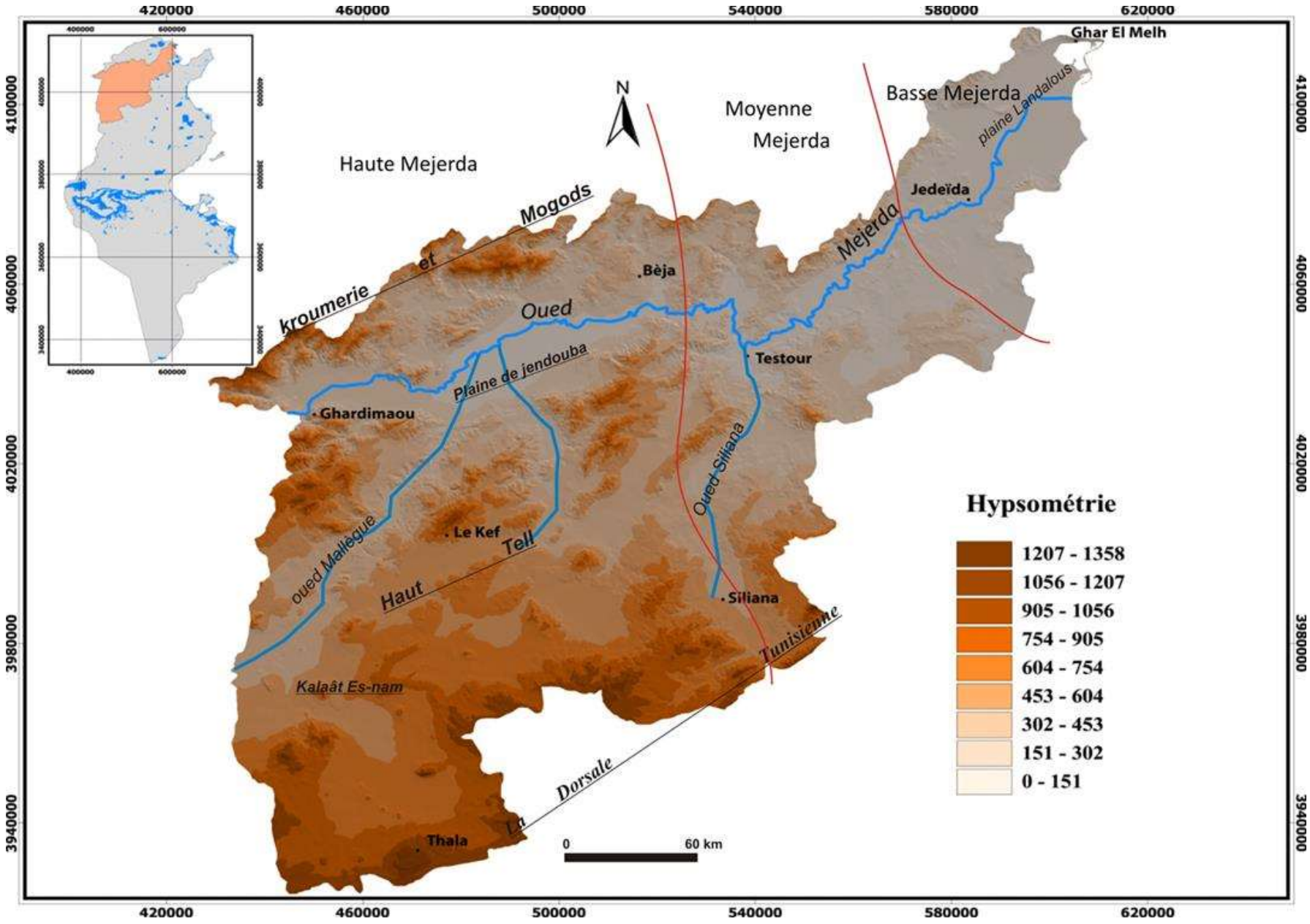


Figure 12: Hypsométrie en trois dimensions du B.V de la Mejerda à partir de la carte topographique 1/200000
(Source : Réalisation personnelle)

La figure 14 relative à l'exposition et l'orientation des terrains dans le BV de la Mejerda montre, généralement, la dissymétrie entre la rive gauche et la rive droite du cours d'eau. En effet, les reliefs de la rive gauche sont orientés vers le Sud-Est, c'est le cas des versants sud de la Kroumirie. Par contre, les reliefs de la rive droite sont dirigés, dans la plupart des cas, vers le Nord-Ouest, c'est le cas des versants nord de la Dorsale. Il découle de ce schéma *« des conditions climatiques dissymétriques* » (Ben Boubaker., 2000). Cependant, la signification de l'orientation des terrains se résume en deux cas :

- l'exposition au soleil : il est admis que les versants exposés au sud (assimilés adret) reçoivent plus de quantités de rayonnement (Beltrando et *al.,* 1995), car le rayonnement solaire frappe le sol la plupart du temps selon un angle droit. Inversement, les versants exposés au nord (assimilés ubac) qui sont situés durant une bonne partie de la journée à l'ombre ne reçoivent que très peu d'énergie. En outre, l'effet de l'exposition et de la pente *« peuvent faire varier la radiation solaire reçue à la surface du sol, donc la demande évapotranspiratoire dans des proportions de 1 à 2 et jusque 1 à 3 sous des latitudes de 28 à 36° »* (Le Houérou., 1995). En effet, les tableaux 6 et 7 montrent qu'il existe une relation linéaire entre la quantité de la radiation reçue selon leur exposition et leur pente et les cumuls de l'ETP pour les mêmes surfaces. À titre d'exemple, les surfaces exposées au sud et à une pente de 25° reçoivent et enregistrent les maxima des cumuls de l'ETP. Inversement, les surfaces dirigées vers le Nord reçoivent moins d'énergie et cèdent les minima de l'ETP (Le Houérou., 1995).

Tableau 6 : Radiation globale en cal/cm^2/an, reçue la surface du sol, en fonction de la pente et de l'exposition, sous 36" de latitude Nord (In. Le Houérou., 1995)

	Pente en degrés				
Exposition	5	15	25	35	45
S	117 400	125 950	**131 150**	130 750	130 150
SW / SE	115 600	121 850	125 500	126 200	123 850
W / E	111 500	110 600	108 600	105 600	101 300
NW / NE	107 100	96 850	85 850	74 750	64 500
N	105 100	90 700	73 900	57 700	**44 000**
Rapport entre valeur maximale et valeur minimale = **131 150 / 44 000** = 2.98.					

Tableau 7 : Évapotranspiration potentielle, ETP, en mm/an, en fonction de la pente et de l'exposition sous 36" de latitude Nord (In. Le Houérou., 1995)

	Pente en degrés				
Exposition	5	15	25	35	45
S	998	1027	**1115**	1111	1106
SW / SE	983	1036	1066	1072	1053
W / E	948	940	923	898	861
NW / NE	910	823	730	635	548
N	893	770	628	490	**374**
Rapport entre valeur maximale et valeur minimale = **1115 / 374** = 2.98					

Cette hypothèse nous amène à constater que la demande évaporatoire, dans le BV de la Mejerda, est plus moins importante dans les versants exposés au nord que ceux exposés au sud, si l'on considère uniquement l'effet de l'exposition au soleil et la pente.

- l'exposition au vent : elle se manifeste suivant deux cas. Le premier, versants sous le vent, qualifie un site protégé des vents dominants. Ainsi, les versants sud de la Kroumirie sont à «l'abri pluvial », à titre d'exemple *« la station de Jendouba, reçoit moins de 500 mm/an contre plus de 1500 mm/an plus haut, sur les montagnes de Khmir »* (Ben Boubaker., 2000). Par voie de conséquence, le stock d'eau dans le sol, élément principal de l'ETR, sera moins important sur les versants sous le vent que les sommets des montagnes voisins. Par contre, les versants nord de la Dorsale sont à l'abri des vents chauds du sud. Ils subissent « l'effet de foehn » qui accélère la vitesse de l'évaporation. Le deuxième, concerne les versants au vent, triomphe un site exposé aux vents fréquents. Il s'agit, ici, des vents pluvieux du Nord-Ouest qui gagnent les sommets de Jbels Ouergha au Nord-Ouest du Kef, les sommets de la Dorsale et les monts de Tebousouk au sud de Béja. Ces sommets recueillent plus de 150 mm/an, en moyenne, que les vallées et les plaines voisines (pour plus de détaille voir notamment les cartes réalisées par : Bousnina., 1986 ; Henia., 1993 et Henia., Dir 2008 ; Ben Boubaker., 2000).

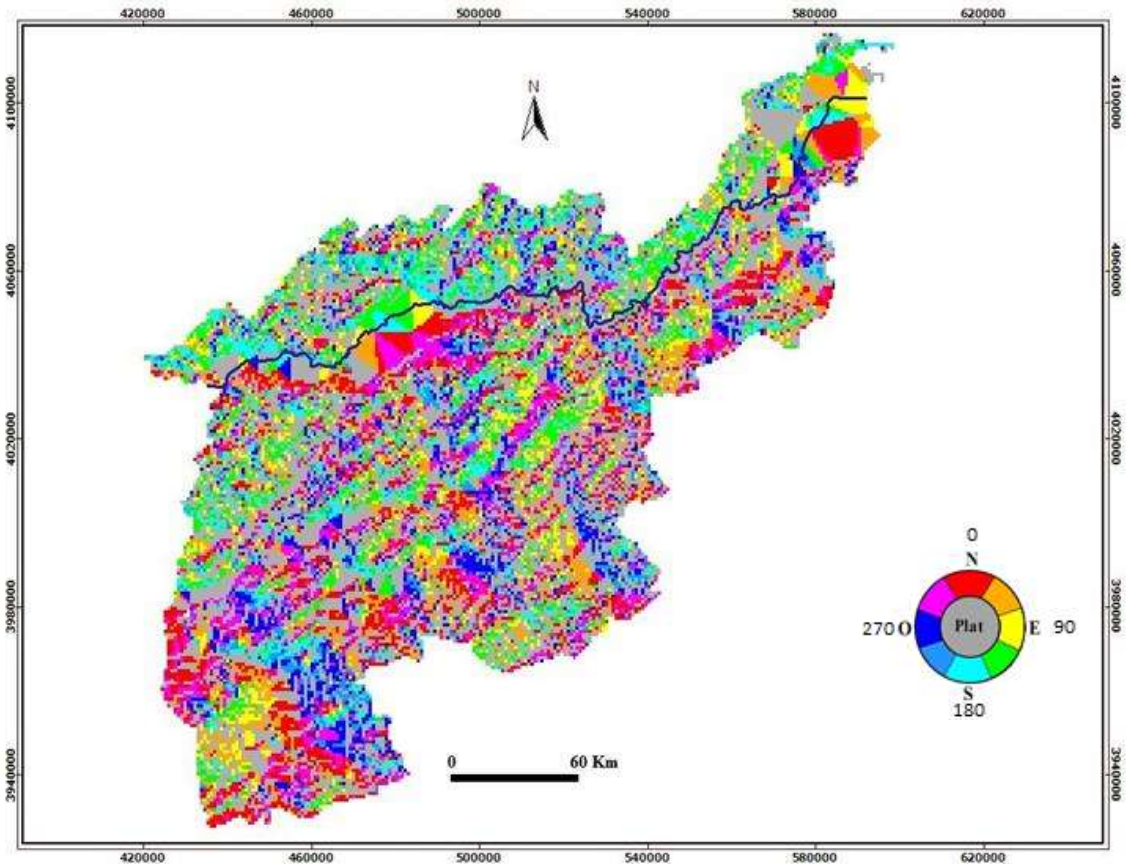


Figure 13: Carte d'exposition dans le B.V de la Mejerda réalisée à partir de la carte topographique 1/200000 (source : réalisation personnelle)

Au total, les différences d'exposition et d'orientation traduisent essentiellement l'opposition entre les versants nord et les versants sud. C'est l'une des nuances du climat de la Tunisie tellienne. Nous essayerons de montrer et d'expliquer ce résultat pour l'évapotranspiration et le déficit d'évaporation.

2.1.2. Le réseau hydrographique

L'oued Mejerda, qui traverse transversalement le Nord tunisien de l'ouest vers l'est, constitue le système hydraulique le plus important et le plus hiérarchisé du pays. Les affluents de la rive droite découpent les versants nord de la Dorsale et les plaines telliennes (oued Mallègue, ouesd Siliana et oued Tessa) les affluents de la rive gauche drainent les versants sud de la Kroumirie et les plaines de Béjaoua (oued Bou Heurtma, Oued Béja). L'apport annuel moyen de la Mejerda est de 1000 millions m^3 soit 36% de l'apport global de la Tunisie en eau ruisselante (tableau 10 ; MARH, 2005). Nous présentons sur la figure 15 un tracé général du réseau hydrographique de la Mejerda et de ses affluents effectué à partir de la carte topographique d'échelle 1/20000000. Une réduction au pantographie a permis de présenter ce réseau à l'échelle 1/500000. Le système hydraulique du bassin versant de la Mejerda est organisé autour de 6 unités selon une base topographique. Ce système est marqué par de petites montagnes orientées Sud-Ouest, Nord-Est, et séparées par d'étroites et profondes vallées avec des versants convexes en particulier. Les sous bassins versants sont (Brahim Eljaziri., 2009) :

- Le sous-bassin versant de la haute Mejerda qui s'étire sur une largeur de 130 km et d'une largeur de 25 à 30 km, de la frontière Tuniso-algérienne au Pont Trajon à Mejez Beb (Rodier et *al.,* 1981). Il comprend oued Mejerda à Gardimaou, oued Meliz, oued Bou Heurtma, oued Raghai, oued Zarga et oued Kasseb. La haute Mejerda occupe la rive gauche de tout l'ensemble de la région, où s'installe les versants les plus arrosés de la Tunisie, avec une moyenne pluviométrique qui dépasse 800mm par an ;
- Le sous-bassin versant de l'oued Mallègue : principal affluent de l'oued Mejerda il draine les plateaux du Haut Tell. Il est limité au sud par la longue chaine de la Dorsale. Ce bassin rejoint le sous bassin de la haute Mejerda dans la plaine de Bou Salem ;
- Le sous bassin versant de l'oued Tessa : il est formé d'une succession de petites plaines entaillées par des petites vallées encaissées. Son exutoire est situé légèrement à l'amont de Bou Salem.
- Le sous-bassin versant du oued Siliana : se distingue par un bassin allongé, très étroit et limité au sud par la Dorsale son exutoire est situé à Testour ;
- Le sous bassin versant de l'oued Khalled : de petite dimension située dans l'environnement immédiat du barrage de Sidi Salem où se jette l'oued Khalled ;
- La basse vallée de la Mejerda : c'est la partie homogène de la région étudiée, elle se caractérise par une topographie plane. Cette région se situe entre le Pont Trajan et la mer et comprend l'oued Lahmar et oued Chafrou.

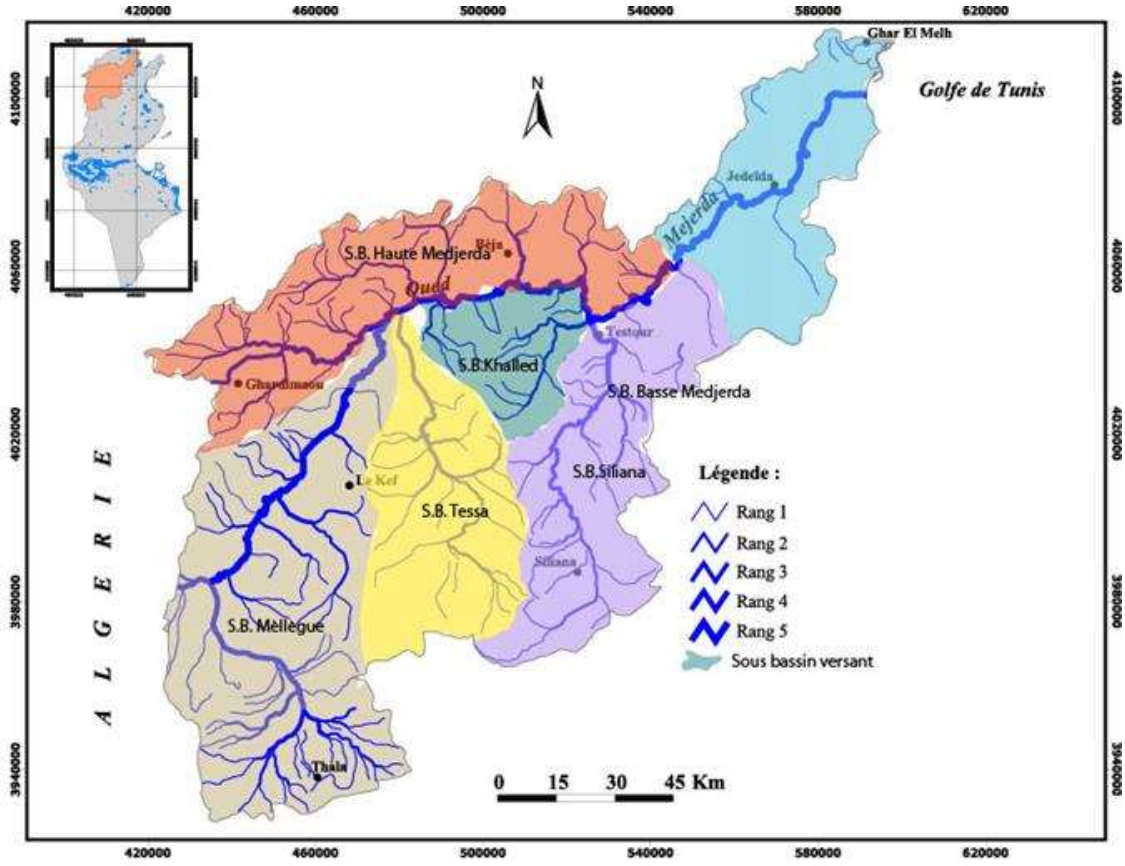


Figure 14 : Réseau hydrographique et sous-bassins versants de la Mejerda (Source : carte de réseau hydrographique 1/1000000 ; NB : les cours d'eau sont classés selon la typologie de HORTON-STRAHLER, 1952)

La classification des sous bassins versants selon la dénivelée spécifique, montre que le BV de la Mejerda, en général, a un relief accidentée [15](Rodier et *al.,* 1981). La dénivelée spécifique pour l'ensemble de la région est de 275m. Mais on souligne une dénivelée assez élevée de 370 m dans le sous bassin de Mallègue qui baisse ensuite à 98m dans la basse Mejerda (tableau 8). Ceci indique que la pente est assez forte plus en amont qu'en aval. Ainsi, le BV de la Mejerda a une tendance à s'allonger de sa naissance vers son exutoire. Cette allure influe, en premier lieu, sur les hydrogrammes des crues qui deviennent assez graves en aval et en deuxième lieu, sur l'occupation-utilisation des sols et du relief, ces deux derniers constituent des facteurs déterminants de la spatialisation de l'évapotranspiration.

[15]Classes des dénivelées spécifiques :
- < 10m : relief très faible
- 10 à 25 m relief faible
- 25 à 50 m relief assez faible
- 50 à 100m relief modéré
- 100 à 250m relief assez fort
- 250 à 500m relief fort
- > 500m relief très fort

Rodier.J et *al*., 1981 : le bassin de la Medjerdah, monographies hydrographiques, OROSTOM n°6.

Tableau 8: Caractéristiques hydrographiques des sous bassins versants de la Mejerda

Ensemble Hydrographique	Sous bassin versant	Apport par bassin Millions m^3	Surface en km^2	Dénivelée spécifique en m
Mejerda	Haute Medjerda	409	3395	338
	Mallègue	190	5106	370
	Tessa	100	2443	302
	Khalled	35	678	213
	Siliana	80	2292	330
	Basse Mejerda	186	2186	98
	Total	1000	16100	Moyenne 275

Source : MARH., 2007.

En Tunisie, l'eau revêt un caractère stratégique de développement économique et social en raison de sa rareté. Le développement rapide depuis l'indépendance de la demande en eau, pour les usages domestiques, industriels, touristiques, recharge artificielle des nappes souterraines et surtout d'irrigation, a conduit les autorités tunisiennes à mettre en place une politique soutenue d'aménagements hydrauliques depuis plusieurs décennies. Cette stratégie est appuyée sur la réalisation de grands ouvrages d'accumulation des barrages collinaires et des lacs collinaires et la réalisation d'importants ouvrages d'adduction d'eau (conduites, canaux...). L'évaluation la plus récente des ressources en eau fait état de 4503 millions de m^3des ressources annuelles, dont 2 700 Mm^3sont des eaux de surface (MARH., 2007). Les principaux ouvrages de mobilisation des eaux de surface ont été construits sur la Mejerda et ses affluents (figure 16), qui fournissent 1585 Mm^3 soit 59 % des ressources en eau de surface (MARH., 2007).

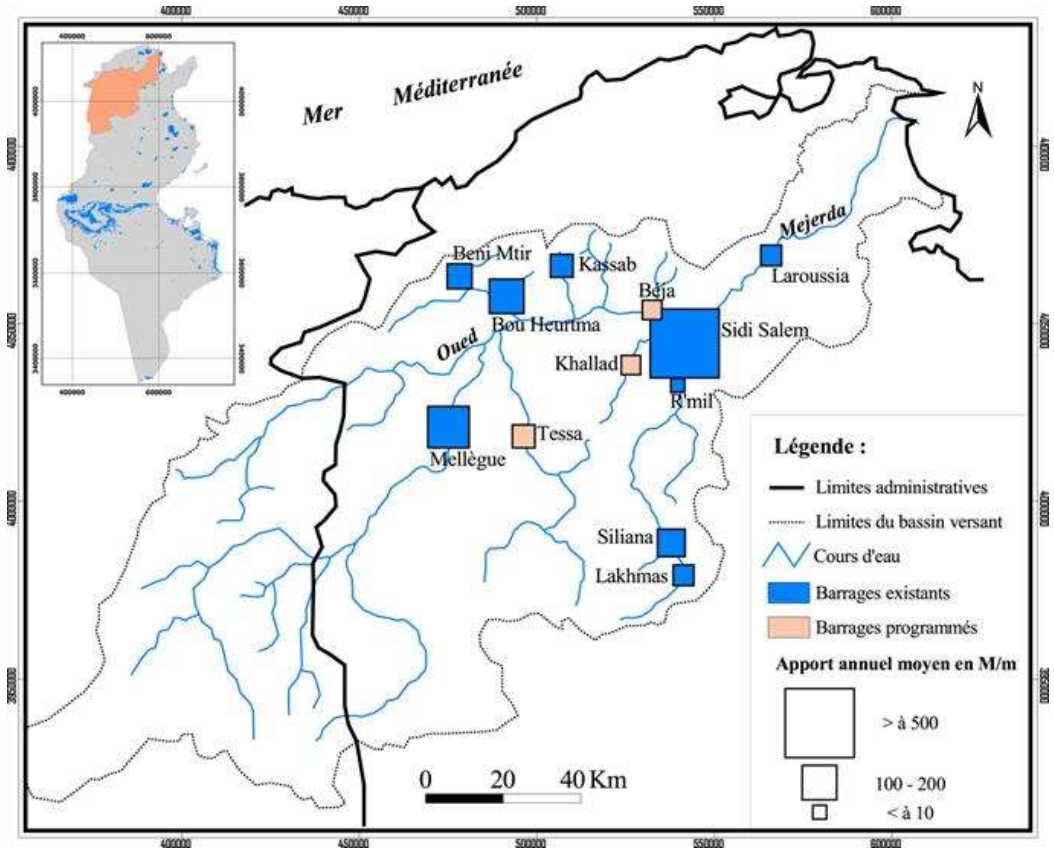


Figure 15: Les grands barrages dans le BV de la Mejerda (Sous Dir Hénia L. 2008)

En résumé, le BV de la Mejerda montre une nette dissymétrie entre ses affluents. En effet, celles de la rive gauche sont moins étendues mais reçoivent des quantités d'eaux plus importantes, cela est dû au rythme de la pluie (région la plus pluvieuse). À l'envers la rive droite constitue les zones sèches de la région. Cette allure explique en effet, par la suite, la répartition spatio-temporelle de l'évapotranspiration et le zonage de la région.

2.1.3. Les sols

Nous avons réalisé la carte des sols du bassin versant de la Mejerda (figure 17) à partir de la numérisation de la carte de l'Atlas National de Tunisie (feuille des sols à échelle 1 /500000) et les cartes publiées par Amor Mtimet en 1999[16], en particulier, les profils se dégagent par zone bioclimatique et par leur répartition selon la topographie. Dans le BV de la Mejerda on peut distinguer trois ensembles de sols qui sont : sols de Jbels et collines, sols des piémonts et sols des plaines. La carte présente une grande diversité, liée à la fois à la variation du climat, à la grande variation de la lithologie et au degré de la pente. Ces facteurs jouent un rôle très important dans la répartition spatiale des sols. Ainsi, la nature du substrat constitue un facteur essentiel pour déterminer la réserve utile dans le sol. Ce denier est l'élément fondamental dans l'estimation de l'évapotranspiration réelle. Il en est de même pour la quantification des besoins en eau des cultures et le degré du déficit d'évaporation.

Sur les versants abrupts et les reliefs accidentés du Haut Tell, se rencontrent les lithosols et les rendzines (sols minéraux bruts d'érosion). Ce sont des sols colonisés par une garrigue ou une forêt dégradée. Sur les versants moins abrupts capables de retenir l'eau et sur les hauteurs plus arrosés les cambisols calciques se développent sur marne et argile calcaire. Par ailleurs, les luvisols (sols acides sur alternance d'argile et de grès) sont peu épais mais assez riches en matière organique et relativement stables occupés par une forêt de chêne zen et de chêne liège (Mtimet A., 1999). Le fond vallée de la Mejerda est marqué par la présence des sols alluviaux de texture variable et bien drainés. Dans les plaines les sols bénéficient de leur situation plus basse pour conserver plus d'eau dans leurs horizons inferieurs. Il est à remarquer que les sols solochanks gagnent l'embouchure de l'oued Mejerda et les surfaces humides en général. Enfin, les sols dégradés sont formés sous maquis.

[16]Amor Mtimet 1999 : Atlas des sols tunisiens

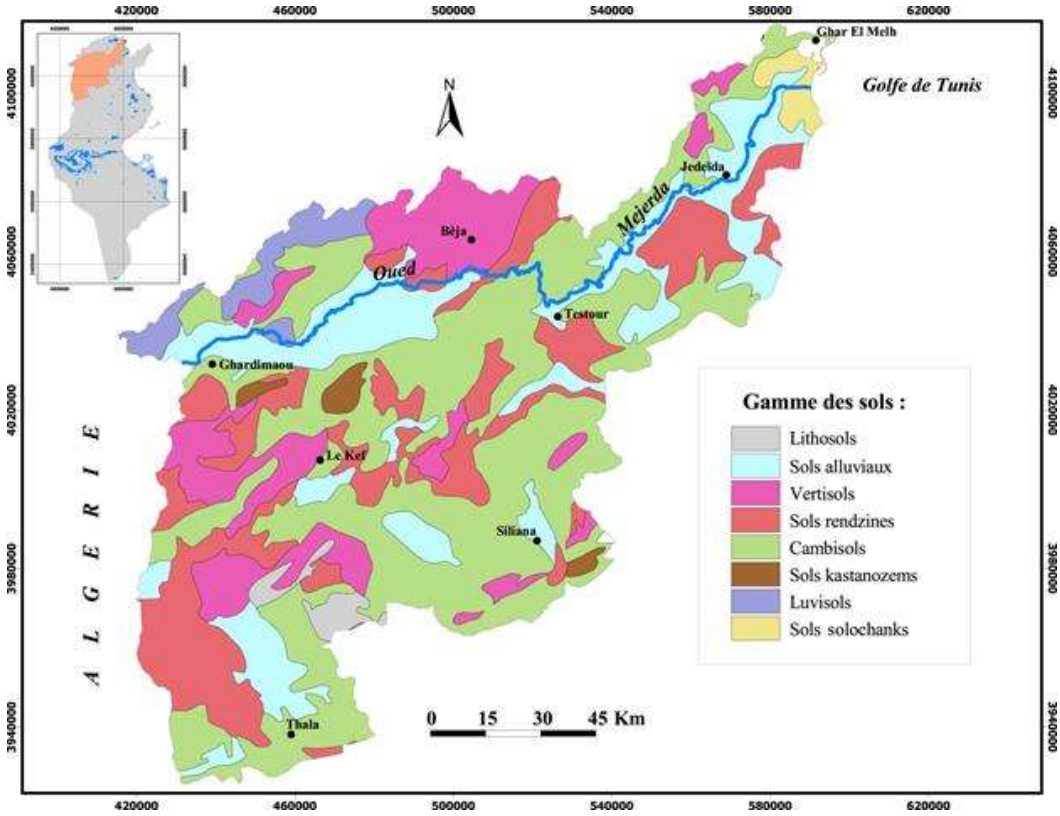


Figure 16 : Les sols dans le B.V de la Mejerda (d'après carte des sols 1/500000 et Mtimet A.,1999)

L'évapotranspiration est la combinaison de deux processus, l'évaporation et la transpiration. Ainsi la transpiration est d'origine végétal par contre l'évaporation est générée par les sols. En fait, la nature des sols déterminent les apports d'évaporation par ses réserves utiles d'eau (Gallali., 2004). Plus un sol est riche en argile plus il retient l'eau. La réserve en eau utile (RU) dépend de la texture, dans la mesure où elle est faible pour les sables et maximale pour les textures argilo-limoneuses (tableau 7). La connaissance RU est indispensable pour estimer l'ETR car elle en dépend forcément. Mais elle est très difficile à mesurer en réalité car très variable dans le temps et dans l'espace. Le tableau suivant donne une idée générale sur le RU de quelques types de sols dans le BV de la Mejerda (on revient sur ce point dans le chapitre de la méthodologie).

Dans le BV de la Mejerda l'hétérogénéité des sols est en général très forte, et ce au niveau de ses capacités de rétention, de ses textures et de ses structures (Bortli et *al*., 1973). On a pu constater que ces sols offrent à la réserve hydrique et le développement de la végétation des possibilités très variables. À ces caractéristiques s'ajoutent les perturbations, très nettes dans la région, d'ordre climatique (gel, stress hydrique…) anthropique (labour) ou biologique (modifications des sols par la végétation par la pousse des racines). En fait, le stock d'eau du sol se trouve constamment réajusté au gré des pertes et des apports (Gallali., 2004). Aussi, il est en rapport avec d'autres facteurs tels que :

- la pente du terrain,
- l'état de l'humidité du sol,
- la couverture végétale.

Tableau 9: Volumes des réserves utiles de quelques sols dans le BV de la Mejerda

Typologie des sols	Réserve Utile (RU) en mm (profondeur de 0 à 80 cm)
Sableux	70
argileux	180
limo-argileux	220
vertisol	160
isohumique	180
peu évolué	170

Source : Ben Hassine et *al.,* 2003 et Taher Gallali., 2004

2.1.4. Le tapis végétal

Il est admis que la végétation intervient sur l'évapotranspiration. D'abord, elle intervient sur le pouvoir évaporant de l'atmosphère, et ce par l'effet de l'albédo. En effet, une forêt sombre de feuillus pourrait avoir un albédo très faible (0,05) alors les prairies ou les champs élaborés pourraient avoir un albédo plus moins élevé (0,3) (Cosandey eau et *al*., 2012). Il résulte donc, plus d'énergie, facteur stimulant de l'évapotranspiration, dans les secteurs forestiers que les autres secteurs. Ensuite, elle intervient sur la quantité d'eau dans le sol disponible pour l'évaporation. Car la végétation forestière, comparée avec une végétation basse présente, forme « un écran » pour freiner le dessèchement rapide du sol et ralentir l'épuisement rapide du stock d'eau dans le sol (Cosandey eau et *al*., 2012).

L'examen de la figure 18 du couvert végétal, extraite de la carte de la végétation (Atlas National de la Tunisie, révisé par Gammar A.M., 1999) et de quelques photos prises sur le terrain entre 2009 et 2012, montre que le BV de la Mejerda est une région à faible couvert végétal. Il présente une végétation diversifiée et très dégradée sur les montagnes où les piémonts sont défrichés et les plaines sont largement cultivées. Certes, le couvert végétal est un facteur déterminant dans la spatialisation de la carte de l'occupation du sol, elle-même, un élément principal pour déterminer les coefficients culturaux. Ces derniers constituent une information de base pour la réalisation de la cartographie de l'évapotranspiration maximale (nous reviendrons sur ce point dans la deuxième partie). À partir de la figure 18 nous avons pu distinguer les formations et les groupes suivants :

- Les forêts : elles se distinguent par la présence d'une série de chênes zen, chênes lièges, chênes verts et pin d'Alep. Cette série est observée surtout aux limites nord du bassin versant de la Mejerda et les monts du Tell, à titre d'exemple sur la ligne de crête Kroumirie-Mogôds, à l'ouest du Kef et les environs de Tala. Elles constituent environ 10% de la superficie du bassin et elles sont en état de dégradation (photos de la figure 19).

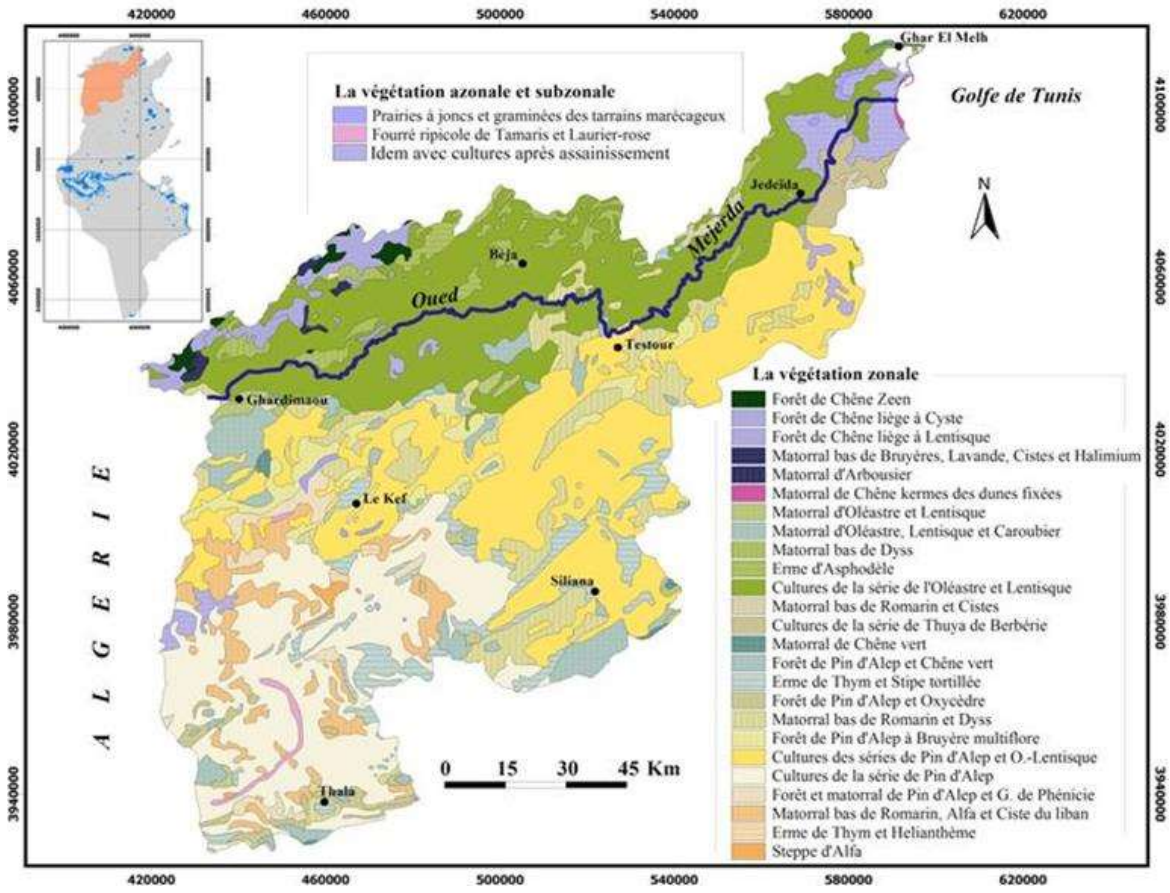


Figure 17 : Le couvert végétal dans le BV de la Mejerda (d'après la carte de la végétation 1/2000000)

- Les matorrals : formés par les chênes kermès, oléastres, lentisques, les caroubiers, les romarins et situés en particulier sur la rive droite de l'oued Mejerda, les plateaux du Tell et les monts de Siliana. Ils représentent des pourcentages modérés allant de 12 à 15 % de la superficie. On distingue aussi, la végétation des piémonts sur les glacis encroûtés. C'est une végétation spontanée et limitée à quelques espèces (oléastres, romarins…) où son recouvrement[17] est inférieur à 50%.

- La végétation des terres humides et salées : cette unité regroupe les végétations azonales des Garaâts et Sebkhats et la végétation à bord des cours d'eaux. C'est dans les secteurs à topographie basse où la salure peut atteindre des teneurs plus importants. Sa présence indique les zones à forte accumulation d'eau ou de sels. Couvrant moins de 4% de la superficie totale du bassin et se trouve surtout dans la basse Mejerda et dans des cas minimes alentours des barrages (photos de la figure 19), où la végétation se limite à quelques espèces halophiles (salicorne, et athrocnème) ou hygrophiles (joncus et orge sauvage) El Garouni., 1995.

- La végétation des terres cultivées : cette catégorie regroupe des types très variés, depuis les prairies jusqu'à l'arboriculture fruitière. Elle intéresse l'ensemble du bassin de la Mejerda. En outre, Il est difficile dans une présentation aussi sommaire de caractériser avec précision le couvert d'une zone cultivée. Nous ne pouvons pas, cependant, séparer dans certaines zones les unités forestières des prairies (prairies, cultures, série oléastre, de pin d'Alep …).

[17] C'est la projection verticale de dessus vers le sol du volume de la strate. Le matorral est dense si le taux de recouvrement est supérieur à 80%, il est troué s'il est entre 50 et 80% et il est clair s'il est entre 25 et 50% (source : http://brahimjaziri.jimdo.com/)

Il va sans dire que le BV de la Mejerda est caractérisé par un faible recouvrement forestier. Tandis que les zones nues et les zones cultivées représentent environ 70% de l'ensemble de la région. Ce panorama agit, sans doute, sur la spatialisation et la dynamique de l'évapotranspiration maximale et le déficit d'évaporation étudiés plus loin dans ce travail.



Figure 18: Variétés du couvert végétal dans le BV la Mejerda (Crédit photo, Mjejra M., 2010)

2.1.5. La carte de l'occupation et de l'utilisation des sols

La carte de l'occupation du sol peut être définit comme *« la couverture biophysique de la surface des terres émergées »* (FAO., 1998) et elle *« tente à mettre en valeur la relation entre l'homme et son milieu »* (Omrane N., 1982). La carte d'occupation du sol représente une information de base, pour les inventaires des cultures, la détermination de l'évapotranspiration maximale et de la détermination du déficit hydrique. Elle représente un des objectifs pour tester l'apport de l'analyse multi-temporelle des images satellites pour la cartographie de l'occupation du sol. En outre, la couverture spatiale joue un rôle primordial dans les processus de génération du ruissellement sur les versants et d'infiltration de la pluie vers la zone non saturée. En effet, « *un même type de sol peut avoir des comportements différents par rapport à ces processus, selon l'occupation de la surface »* (Kingumbi., 2006).

Dans ce contexte, il s'agit de mettre en place un prototype de carte d'occupation-utilisation des sols dans la région d'étude à l'aide des différents documents : les inventaires des Commissariats Régionaux au Développement Agricole (C.R.D.A), les recensements de l'Office des Terres Domaniales (O.T.D), les campagnes du terrain, les documents issus de la littérature... La figure 23 et le tableau 8, relatifs à l'occupation et l'utilisation des sols dans le BV de la Mejerda, révèlent que la région est à vocation agricole, d'une surface de 16400 km^2 dont environ 60 % du territoire est cultivé. Les cultures annuelles en sec, les céréalicultures, les maraîchages et les arboricultures fruitières représentent les éléments du paysage agricole. Cependant, le couvert végétal est plus intense le long du cours d'eau de la Mejerda et au Nord de sa rive gauche. Par contre, cette couverture végétale est d'autant plus faible sur le secteur de la rive droite, en particulier aux pays de Tala. Ceci s'explique par la présence d'un climat subhumide au Nord et un climat semi-aride au sud de la région.

Les cultures céréalières et fourragères (blé, orge, luzerne, bersem… voir photos dans la figure 20), occupent les terres intérieures de la région, les fonds de dépressions et les terrasses entre les pentes reboisées et les périmètres irrigables. La surface exploitée occupe près de 939.4 mille ha en 2010 (soit 57,28% de la superficie totale du BV de la Mejerda). Un zonage des céréales peut être effectué selon la dominance et la densité[18] (Samaâli H., 2011) : on distingue trois types de cultures céréalières :

- le premier concerne l'aire céréalière à dominance forte dans le domaine de la moyenne Mejerda, sur les environs de Béja et Siliana, en particulier, dans les vastes plaines et les versants à pente faible.

- le deuxième, est l'aire céréalière à dominance moyenne, essentiellement, sur les plateaux du haut Tell du Kef, Tala et Ghardimaou. En général, ces secteurs se caractérisent par la pratique des céréalicultures pluviales.

- le troisième celui de l'aire céréalière à dominance faible dans la basse Mejerda pour les environs de Raoued, Cherfech, Aousja et sur les versants nord de Jebel Ennahli et de Jebel Ammar.

L'importance de ce secteur se ressentit par la suite dans la répartition spatiale de l'évapotranspiration maximale, là où le coefficient cultural (Kc) du blé joue un rôle important dans les quantités évaporées.

[18] C'est la surface relative du sol couverte par l'espèce : dominance forte plus de 60% ; dominance moyenne de 40 à 60% ; dominance faible moins de 40%.

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

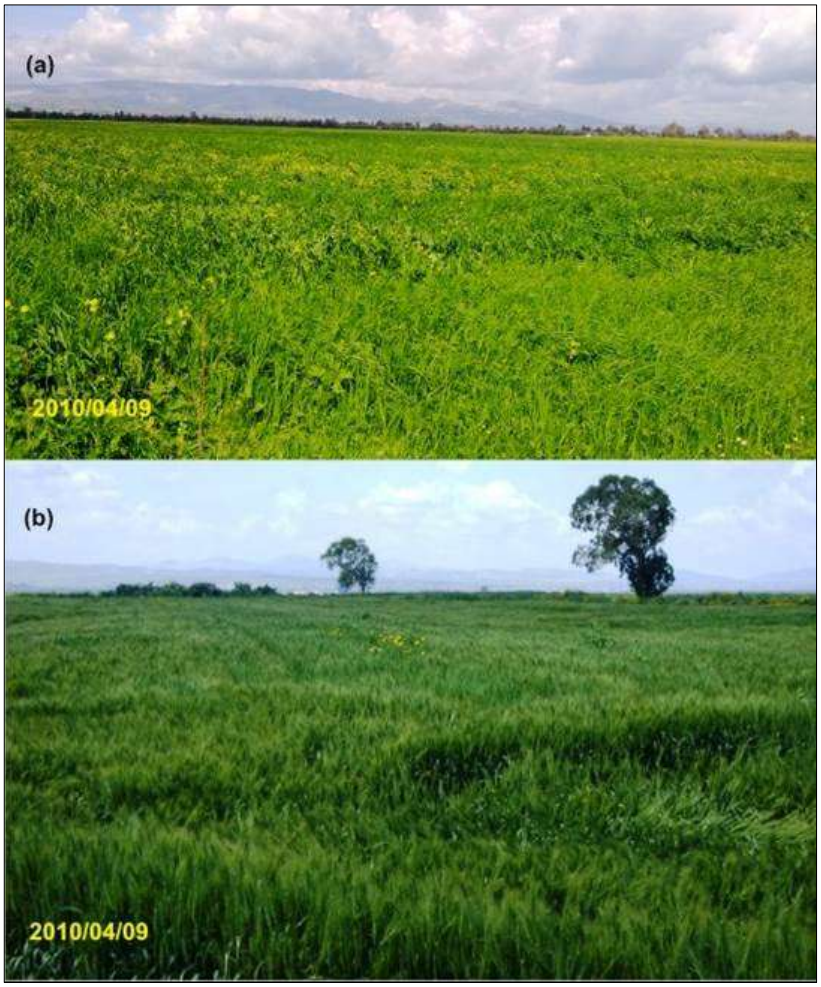


Figure 19: (a) Champs de fourrage (variété Bersim) et (b) Champs de blé (variété Razzak) dans la plaine de Jendouba (Crédit photo, Mjejra M.,)

Les secteurs irrigués occupent 186.9 mille ha, soit 11.4% de la superficie du BV de la Mejerda (tableau 10). Ils s'étendent sur des pentes inférieures à 6 % et des vastes plaines, en particulier, sur les périmètres irrigués publics tout le long de l'oued Mejerda et ses principaux affluents. Les cultures maraichères (Artichaut, légumes à racines, légumes à feuillus….voir les photos dans la figure 21) se situent généralement aux environs des cours d'eaux principaux et les grands barrages. Aussi, de petites surfaces irrigables se localisent dans les vallées étroites du Haut Tell. Il est à retenir que les surfaces irriguées sont en extension progressive, surtout avec la création d'importants périmètres irrigués est en parallèle aux grands aménagements hydro-agricoles réalisés dans le cadre des plans directeurs régionaux du Nord et du Centre (Charif A., 1998).

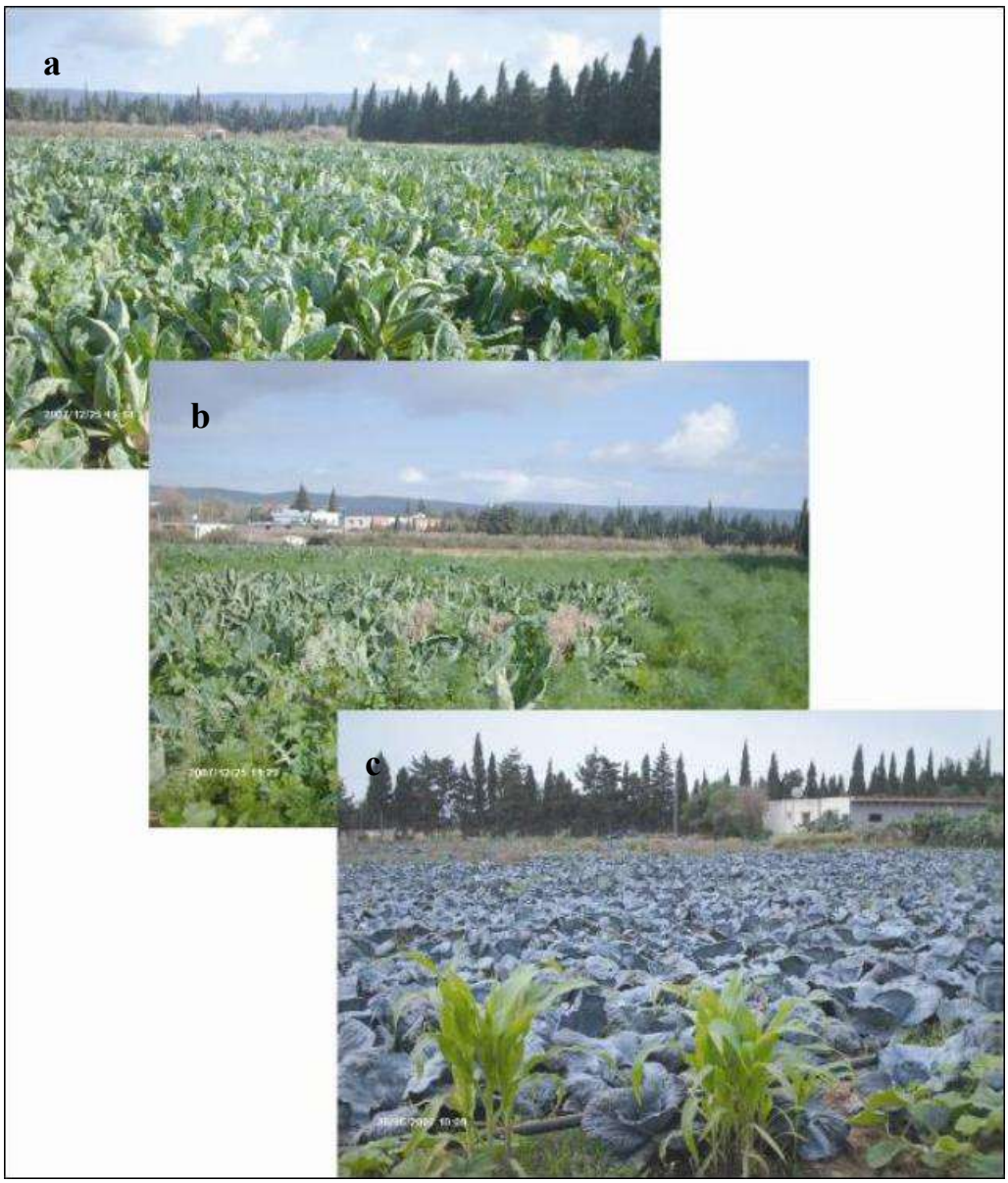


Figure 20: Quelques spéculations qui caractérisent le maraîchage dans la basse Mejerda : (a) Artichaut, (b) Epinard et (c) Chou rouge (cliché Samaâli H., 2011, avec l'aimable autorisation de l'auteur)[19]

Les arboricultures essentiellement l'oléiculture, la viticulture et abricotier se localisent dans la basse Mejerda et les plaines abritées dans les secteurs intérieurs. La forêt occupe une portion importante du territoire de la région soit 17.3% (figure 22). En effet, la densité de la forêt est nettement remarquable sur la limite nord de la haute Mejerda sur les massifs de la Kroumirie et sur les plateaux centraux du Haut Tell. Inversement elle devient estompée sur les secteurs sud de la région par les garrigues et les matorrals. En somme, ce qui précède laisse apparaitre l'importance du potentiel agricole du BV de la Mejerda[20].

[19]Les photos ont été prises 2006 et 2007 par Hamouda Samaali lors des campagnes de terrain de sa thèse soutenue en 2011. Nous avons utilisés cette documentation pour valider la carte de l'occupation du sol pour la saison agricole 2006-2007, dans la parcelle de Kalaât Landalous dans la basse Mejerda

[20]Dans le cadre de ce travail, nous avons adapté une méthode satellitale pour déterminer les cartes d'occupation des sols à l'échelle annuelle sur la région de la Mejerda. Nous exposons cette méthode et les résultats dans la 2éme partie, et ce pour déterminer les coefficients culturaux, éléments fondamentaux pour calculer l'ETM.

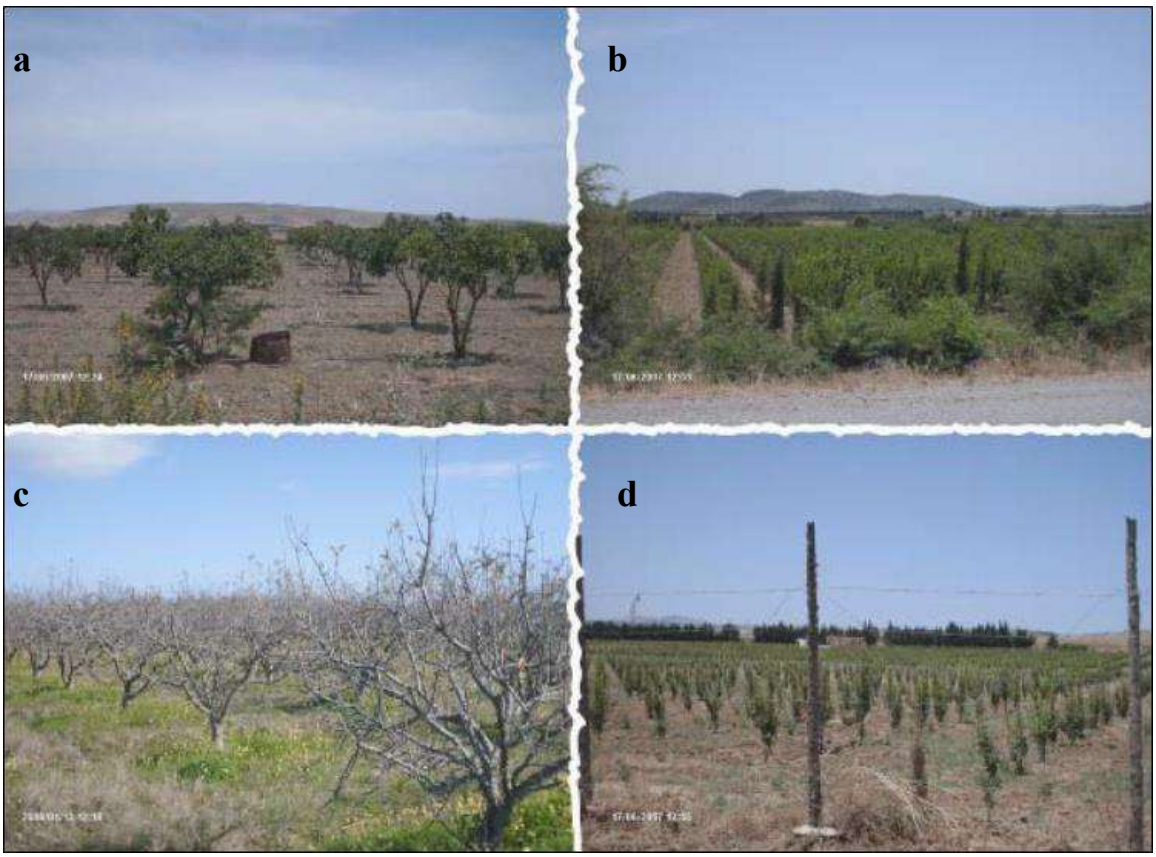


Figure 21 : Quelques variétés des arboricultures dans la basse Mejerda : (a) pêchers (b) poiriers (c) pommiers et (d) vigne (cliché, Samaâli H., 2011, avec l'aimable autorisation de l'auteur)[21].

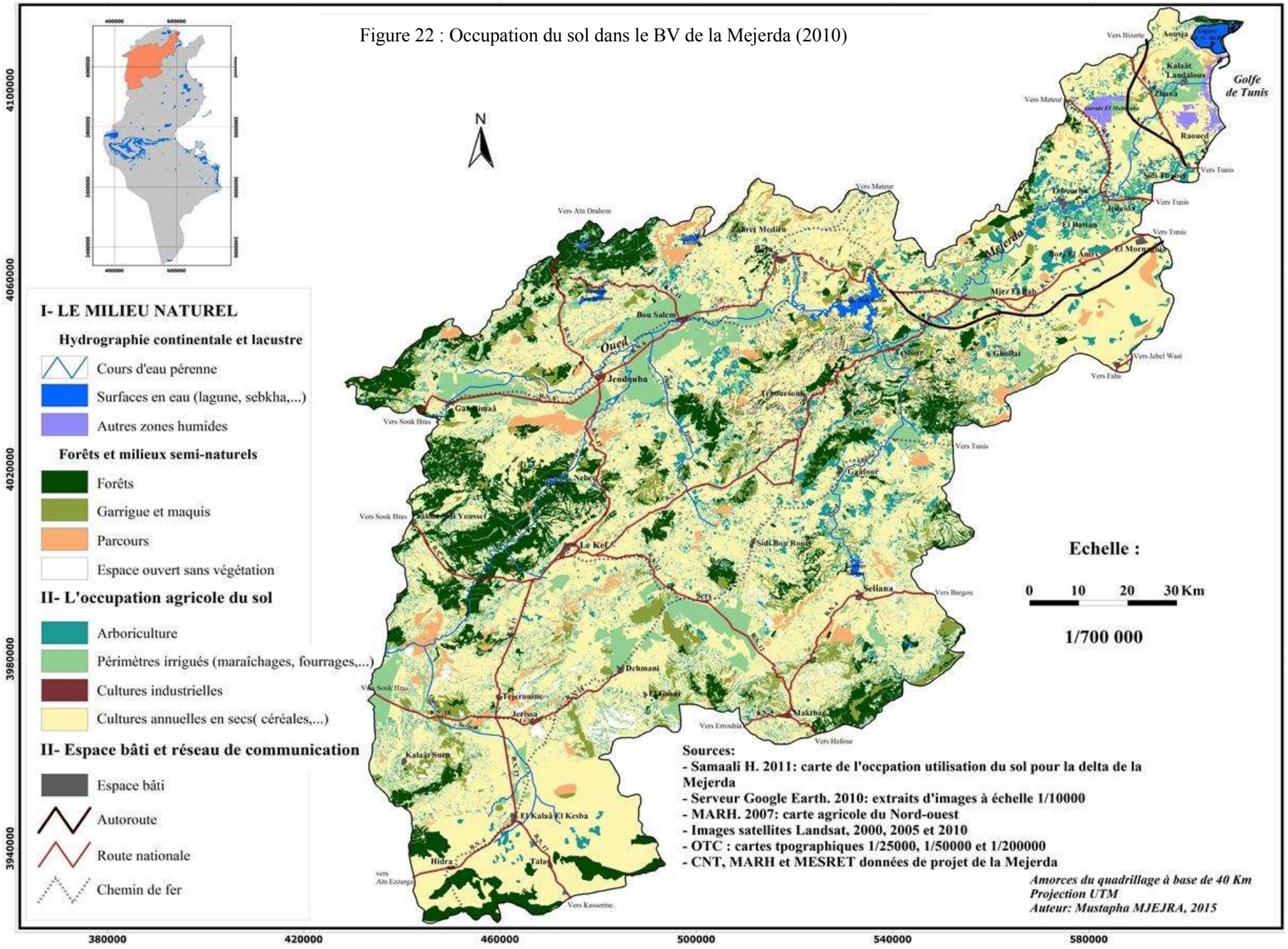
Tableau 10: Occupation actuelle des sols dans le B.V de la Mejerda (2010)

Classe d'occupation du sol	Surface en (1000 ha)	Surface en (%)
Cultures annuelles et jachère	939.4	57.28
Périmètres irrigués	186.9	11.40
Arboricultures	100.1	6.10
Prairies	50.8	3.1
Forêt	183.7	17.3
Garrigues	55.7	3.4
Zones humides	18.4	1.12
total	1640	100

En définitive, l'état actuel de l'occupation et de l'utilisation du sol montre que le BV de la Mejerda s'individualise par une dynamique spatiale très variée. Ceci explique, en partie, par la suite la répartition spatio-temporelle de l'ETM.

[21]Les photos ont été prises 2006 et 2007 par Hamouda Samaali lors des campagnes de terrain de sa thèse soutenue en 2011

Figure 22 : Occupation du sol dans le BV de la Mejerda (2010)



2.2. Caractéristiques climatiques du bassin versant de la Mejerda

Le climat du BV de la Mejerda comme celui du Nord de la Tunisie est de type méditerranéen, caractérisé par des hivers doux et humides et des étés chauds et secs. Le BV de la Mejerda constitue la région la plus pluvieuse du pays, où la pluviométrie maximale en hiver dépasse 1000 mm par an sur les massifs de la Kroumirie. Les températures estivales moyennes maximales sont relativement élevées, elles varient de 29 à 35 °C et elles n'excèdent pas 35°C surtout dans les secteurs abrités. En hiver, les minima moyennes varient, en général, de 2 à 8°C et elles atteignent parfois quelques degrés en dessous du zéro le jour, et encore plus basses la nuit surtout à l'ouest de la région, là où la neige peut tomber de temps en temps (voir photos 1 et 2). Pour les besoins de cette étude, nous avons repris les principaux éléments climatiques intervenant dans la mesure et l'estimation de l'ETP. La cartographie de ces paramètres a été réalisée en utilisant l'interpolation par la méthode de Co-krigeage[22] qui paraît la plus adéquate et la plus proche de la réalité climatique du BV de la Mejerda. Le Co-krigeage paraissait plus pertinent du fait de la prise en compte des altitudes (Ebener S., 2000). Toutefois, l'exécution de la méthode se fait par le logiciel ArcGIS. Il permet de visualiser les résultats des interpolations, sous forme cartographique et fichiers cartes (.img) en mode raster ou vecteur. Nous avons opté à exposer les cartes en mode vecteur, en raison de simplifier l'information sur les figures et d'avoir une représentation avec des iso-lignes plus lisses (Palko et *al.,* 2003).



Figure 23: Phénomène de neige dans le BV de la Mejerda : en haut à Gardimaou, ouest de Jendouba et en bas à Dachret Nabeur, Nord-Est du Kef (Crédit photo : Mjejra M., 2012)

[22] La méthode enchaîne 4 étapes:
1- reconnaissance des stations les plus proches du point d'estimation et partition du territoire par des pixels circonscrits selon la grille du MNT utilisé;
2- identification des variables explicatives (pente, orientation, la rugosité topographique) puis analyse par régression multiple dans le cadre de chaque pixel;
3- interpolation : application des coefficients aux pixels.
4- Cartographie : exposer les résultats de la spatialisation des paramètres climatiques en mode vacteur.

2.2.1. Les températures

La température représente un facteur important de l'évapotranspiration plus elle est forte la demande évaporatoire de l'atmosphère augmente. Pour évaporer une lame d'eau de1 mm d'épaisseur, il faut 590 kcal/m2, donc, elle est très importante dans l'évaluation de l'évapotranspiration (Diop., 2009). Considérant toute la période d'étude, les caractéristiques des températures sur tout l'ensemble du BV de la Mejerda peuvent être résumées comme suit :

2.2.1.1 À l'échelle annuelle

Les températures moyennes présentent une grande variation spatiale. Les sommets montagneux sont sensibles moins chauds que les bassins intra montagnards de la vallée de la Mejerda (Henia L. coord. 215). Certes, les plaines du couloir de Jendouba-Béja-Borj Amri-Cherfech constituent la région la plus chaude avec des températures moyennes annuelles comprises entre 18° et 20°C, en effet, c'est l'axe du cours d'eau de la Mejerda. Ceci s'explique par leur situation topographique bien abritée aux flux rafraîchissants du nord et favorable aux effets des vents chauds et secs de sud qui contribuent à rehausser les températures (Bousnia A., 2000). Par contre, dans les régions élevées du Haut Tell (Kef, Tala, les sommets de la Kroumirie et la Dorsale) se situent les noyaux modérés des températures qui varient entre 15° et 16°C (figure 10). Ceci est en rapport avec l'effet de l'altitude qui entraine une baisse de la température. On note aussi, une opposition entre les secteurs de la côte et les secteurs de l'intérieur (Jendouba 19 °C et Ghar Melh 17,5 °C). Cette opposition est due à l'effet de la mer qui adoucit les températures des régions avoisinantes et explique en grande partie le contraste thermique sensible entre le littoral et l'intérieur de la région. (Henia L, Coord., 2015).

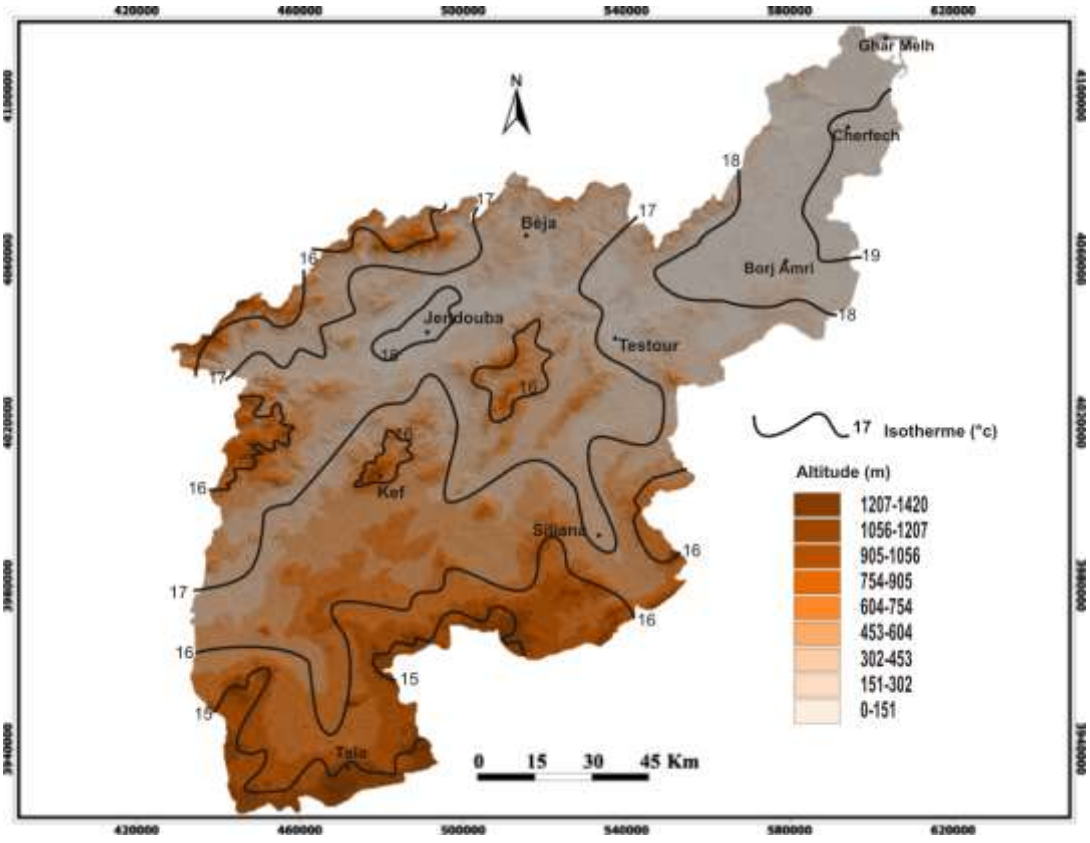


Figure 24: Les températures moyennes annuelles dans le BV de la Mejerda (2000-2011)

2.2.1.2 À l'échelle saisonnière

Les températures moyennes se caractérisent par un rythme saisonnier très marqué et une variation spatiale très nette. Le tableau 11 montre que les valeurs, en général, diminuent des secteurs sud aux secteurs nord du BV de la Mejerda et de l'intérieur à la frange littorale. Sans doute, les effets de la latitude, de la mer et de l'exposition aux flux humides du nord qui expliquent, essentiellement, cette nuance.

- ***En hiver,*** les secteurs du Haut Tell détiennent les faibles valeurs de toute la région dans la mesure où elles ne dépassent pas 10 °C. Par contre les stations côtières accusent les fortes valeurs de la saison où on enregistre 12,2 °C à Ghar Melh. La vallée de la Mejerda occupe une position intermédiaire entre les deux secteurs précédents.

- ***Au printemps,*** le même schéma se répète dans le Haut Tell puisqu'il enregistre des températures relativement modérées. Par contre les stations de la vallée de la Mejerda enregistrent les températures élevées du printemps dans tout l'ensemble de la région.

- ***En été,*** la répartition spatiale de la température se distingue par un gradient thermique dans deux directions. Le premier Sud/Nord, celui des terres de Tala à la dépression de Jendouba. Le deuxième ouest/est, tout au long de la vallée de la Mejerda pour gagner enfin la côte (cf. tableau 11). Il faut signaler que la plaine de Jendouba enregistre les records des températures estivales maximales, notamment, au mois d'aout 47,1 °C.

- ***En automne,*** les iso-lignes des températures moyennes annuelles dans le BV de la Mejerda s'accordent avec celle du printemps. Un noyau frais au sud-ouest dans le Haut Tell à l'opposé d'un noyau doux tout au long de la vallée de la Mejerda.

Au total, cette configuration confirme le régime saisonnier des températures moyennes annuelles dans le bassin versant de la Mejerda.

Tableau 11: Les températures moyennes saisonnières (2000-2011)

	Jendouba	Béja	Kef	Tala	Siliana	Borj Amri	Cherfech	Ghar Melh
Hiver	11,1	10,9	8,9	6,9	10,0	11,4	12,1	12,2
Printemps	17,0	17,1	15,4	13,4	15,8	17,8	17,4	16,9
Été	27,6	26,6	26,4	24,5	26,5	26,6	26,3	26,1
Automne	20,5	20,0	18,5	16,1	19,0	20,2	21,6	21,0

Source : INM

2.2.1.3 À l'échelle mensuelle

Les températures moyennes présentent une grande diversité d'un mois à l'autre. En janvier, les valeurs minimales moyennes varient entre 2°C et 7,6°C à Tala par contre les valeurs maximales moyennes au mois d'aout oscillent de 38,3°C et 47,1°C à Jendouba. Les valeurs des températures diminuent, généralement, des stations littorales vers les stations de l'intérieures. Cependant, les vallées étalées dans la région sont marquées par des valeurs de températures moyennes et maximales nettement plus fortes que les sommets et plateaux voisins. Dans ces conditions, *« le pouvoir évaporant du climat est maximal et les besoins en eau sont énormes »* (Sous Dir. Hénia L. 2008).

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

Le mois de janvier, enregistre une amplitude diurne moyenne de 9,9°C pour Jendouba à 143 m d'altitude et 7,6°C pour Kef à 780 m. Mais les températures du mois d'août montrent des écarts de l'ordre de 27,5°C pour Jendouba et 26.2°C pour Kef. Les températures diminuent avec l'altitude malgré l'augmentation du rayonnement solaire. Dans la Kroumirie le gradient altitudinal annuel moyen est de 0,4 °C pour 100 m il peut être modélisé en tenant compte des conditions topographiques qui ont une influence sur les températures minimales et maximales (Ben Boubaker H., 2000). En plus, les variations de la température qui sont parfois accusées entre les stations d'altitude, connaissent en janvier des minima bas, contre des maxima assez élevées en été et les stations de plaines où les minima sont relativement bas en hiver contre des maxima plus accusés en été (Henia L., 1988).

En somme, dans de telles conditions de chaleur relativement élevée, le pouvoir évaporant du climat devient très important et il détermine l'évolution de l'ETP. En outre, il conduit à une ETP très variable dans le temps et dans l'espace.

2.2.2. La durée d'insolation

L'insolation est la quantité de rayonnement solaire direct incident par unité de surface horizontale exprimée en heures et dixièmes OMM 1992. Ainsi, « *Plus le soleil échauffe directement le sol et plus l'évapotranspiration est élevée* » (Diop., 2009). Il convient de rappeler qu'on a réalisé le calcul de l'ETP avec le logiciel de la FAO (ET_0Calc, on en donnera une présentation par la suite). Ce logiciel intègre dans les entrées du modèle la durée d'insolation au lieu du rayonnement solaire, en raison de l'indisponibilité souvent de ce paramètre. C'est pour cette raison que nous avons utilisé les observations de l'insolation dans le BV de la Mejerda. Ainsi, la forte évapotranspiration est en relation étroite, avec une insolation très élevée. L'analyse de la figure 26 et le tableau 12 permet de dégager les remarques suivantes :

2.2.2.1 À l'échelle annuelle

Le BV de la Mejerda totalise une durée d'insolation très élevée allant de 2520h à 2820h par an, ce qui correspond à un indice moyen d'insolation entre 55% et 61%. Cependant, les durées d'insolation se caractérisent par une variation spatiale. Les secteurs d'altitude (sommets des montagnes de la Kroumirie, la Dorsale, plateaux du haut Tell) sont plus ensoleillés que les bas-fonds (la vallée de Mejerda et les vallées de ses affluents). Ainsi, les courbes des isohèles relatives à l'insolation la plus faible allant de 2550 à 2650 h/an, règnent sur les sous-bassins enclavés du triangle Siliana-Béja-Jendouba (Béja 2503,9h, Siliana 2625,1h et Jendouba 2636,7h). Ceci est en rapport avec la fréquence des types de temps perturbés sur ce secteur. Ce qui favorise une nébulosité importante elle-même diminue les durées d'insolation. Dans la région du Haut Tell, la durée d'insolation augmente et atteint son maximum à Tala 2741,9 h/an sans doute en liaison avec l'altitude qui augmente la durée d'insolation. En revanche, La basse Mejerda totalise une durée d'insolation autour de 2800h par an. Ceci est expliqué par une faible intensité de la nébulosité sur toute l'année dans les stations littorales par rapport à celles de l'intérieur (Mjejra M., 2005).

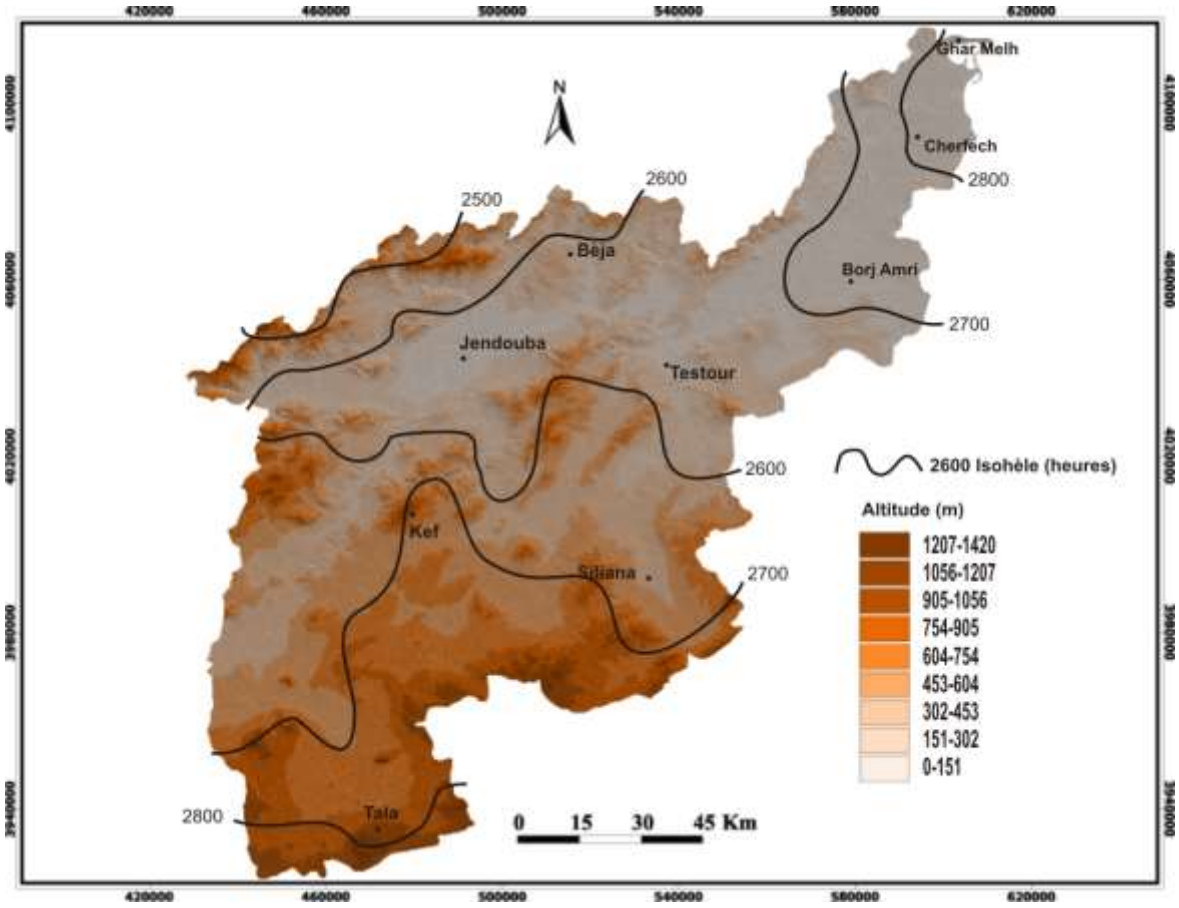


Figure 25: Durée de l'insolation moyenne annuelle dans le BV de la Mejerda (2000-2011)

2.2.2.2. À l'échelle saisonnière

La répartition saisonnière de la durée d'insolation se caractérise par une grande variabilité. L'hiver enregistre les valeurs les plus faibles notamment à Bèja 389,4 h et 430h à Siliana. Par contre, l'été totalise des valeurs très élevées qui dépassent les 900h dans toute la région pour atteindre son maximum à l'entourage de la station de Gher Melh de l'ordre de 994,3 h. Dans les saisons intermédiaires et pour l'ensemble du bassin versant de la Mejerda, la durée d'insolation varie, généralement, entre 600h et 750h. Il en résulte donc, un fort pouvoir évaporant du climat dans la mesure où plus que la durée d'insolation augmente plus les apports de l'ETP augmentent et son rythme saisonnier devient très marqué.

Tableau 12: Durée d'insolation saisonnière (2000-2011)

	Jendouba	Béja	kef	Tala	Siliana	Borj Amri	Cherfech	Ghar Melh
Hiver	441,2	389,4	474	482,3	430	451,2	458,4	451,7
Printemps	659,5	653,1	669,3	684,2	667,3	721	728,3	738,3
Été	917,7	910,6	922,9	939,3	945,6	979,8	980,3	994,3
Automne	618,3	566,7	607,5	636,1	587,2	618,5	637,2	640,2

Source : INM

2.2.2.3 À l'échelle mensuelle

La durée d'insolation enregistre des valeurs relativement élevées et varient d'une station à une autre et d'un mois à un autre. En effet, le mois de juillet enregistre la durée d'insolation la plus élevée de toute l'année, elle est, en moyenne, de 12,1 h par jour à Ghar Melh et de 11, 2 h par jour à Tala. Inversement, le mois de janvier se caractérise par une faible durée d'insolation où Jendouba enregistre une valeur moyenne journalière de 4,7h. En outre, les mois d'avril et d'octobre se distinguent par des durées moyennes quotidiennes très proches respectivement à Tala 7,6 h et 7,1 h. Cette nuance, s'explique par la variation de la durée théorique du jour et les situations atmosphériques très variables entre les mois et les saisons (Hachicha N., 1999).

Cette présentation rapide de l'insolation dans le BV de la Mejerda laisse conclure que les pertes évaporatives sont très liées à la durée de l'ensoleillement. En fait, l'insolation constitue un facteur de premier ordre dans la détermination de l'ETP (Riou., 1985 ; Nicola., 1999 ; Diop., 2009).

2.2.3. L'humidité relative de l'air

Ce paramètre météorologique, peu étudié en Tunisie, caractérise le degré d'hygrométrie de l'air et correspond à une possibilité d'évaporation tant que la saturation n'est pas atteinte. L'humidité relative de l'air est révélatrice de son taux de saturation : plus l'air n'a été en contact avec de l'eau, plus il est donc chargé en vapeur d'eau (Gond et *al.,* 2004 ; Diop., 2009). L'humidité relative de l'air est nettement élevée tout au long de l'année dans le BV de la Mejerda. Toutefois, la figure 27 relève que les valeurs de l'humidité diminuent en allant du littoral vers l'intérieur, en particulier au sud du Tell, 74,5 % à Ghar Melh et 63,3 % à Tala. Ceci témoigne de l'effet rafraichissant du littoral sur l'amplitude thermique journalière (Ben Boubaker., 2000). Ce schéma se reproduit dans la répartition spatiale de l'ETP, du fait-elle augmente en fonction du degré de la continentalité. Les fortes valeurs enregistrées à Ghar Melh à l'extrême Nord-Est de la basse Mejerda, sont corrélées avec la proximité de la mer et les plans d'eau (Garaât Mabtouha, Sabkhet Ariana, Lagune de Ghar Melh), par contre les fortes valeurs des monts de la Kroumirie sont dues à l'effet de l'exposition aux flux humides du nord. Sur la même figure on constate un autre gradient de Nord au Sud. En effet, les versants sud de la Kroumirie où le couvert végétal est dense, l'humidité relative est forte avec des paliers supérieurs à 67 %. Inversement, l'apparition du sirocco (phénomène assez fréquent sur une grande partie du BV de la Mejerda) suffit à abaisser considérablement le degré hygrométrique à moins de 20% pour une période allant de deux à trois jours (Rodier et *al.,* 1981 ; Hénia et *al.*, 1997). En fait, les versants nord de la Dorsale enregistrent des quantités d'humidité relative un peu moins fortes et moins variables que ses homologues de la Kroumirie. Cette opposition est corrélée avec l'effet de la latitude dont l'écart entre les secteurs nord et les secteurs sud dépasse légèrement 5 %. De plus, *« l'humidité relative est plus élevée en forêt, dans les prairies ou les champs que dans les zones ou le sol est à nu »* Beldrando., 1995.

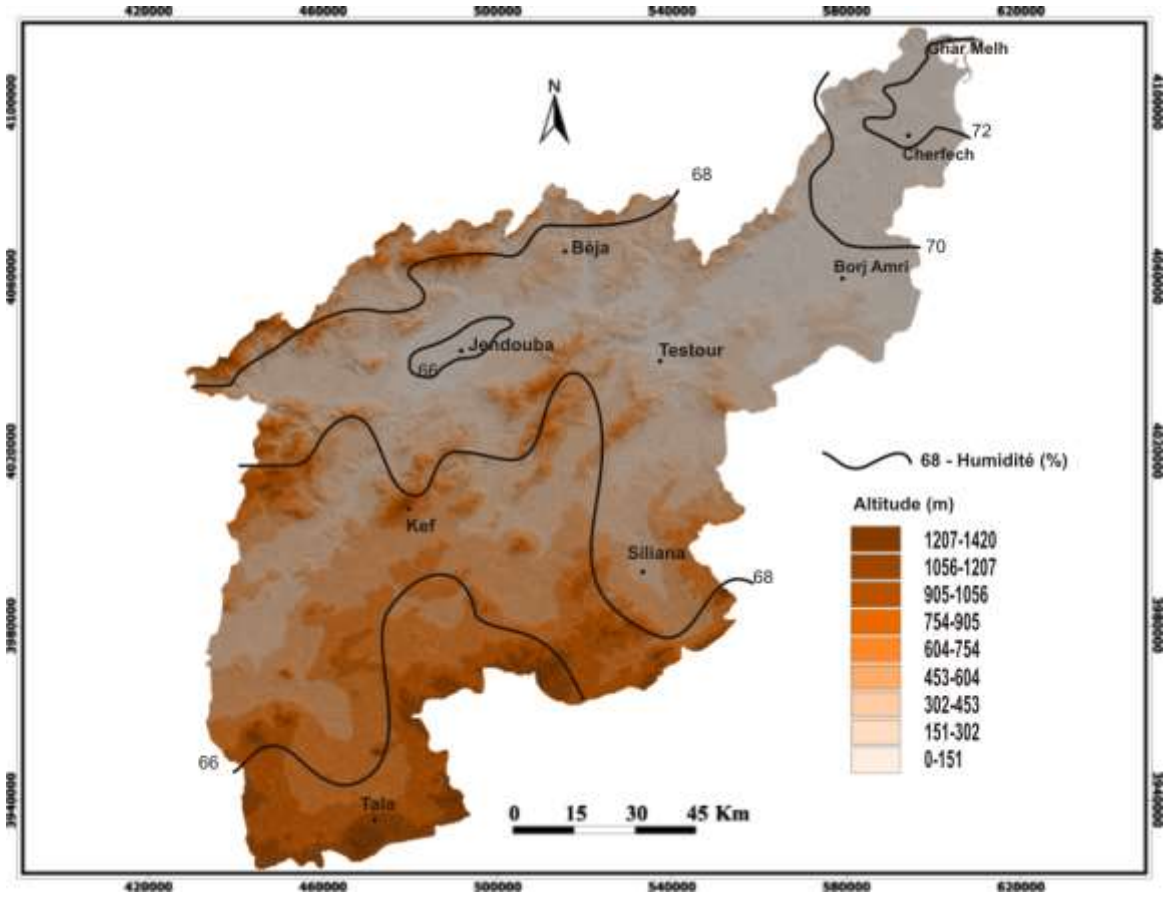


Figure 26: Moyenne annuelle de l'humidité relative dans le BV de la Mejerda

L'examen du tableau 13 relatif à l'humidité moyenne saisonnière dans le BV de la Mejerda présente des niveaux d'humidité très variés. L'hiver se distingue par des niveaux élevés qui dépassent le seuil de 70 % dans toute la région. À l'inverse, l'été détient des valeurs faibles aux alentours de 50 %, à l'exception de Ghar Melh 69,2 % sous l'effet de la mer. Même si ces faibles niveaux estivaux de l'humidité, ils peuvent activer l'évaporation (Hénia et *al.,* 1997). L'automne et le printemps révèlent des valeurs d'humidité aux environs de 65 %. Cette irrégularité est en relation avec les changements des caractéristiques saisonnières au niveau du bilan radiatif et les types du temps.

Tableau 13: Humidité relative moyenne saisonnière (2000-2011)

	Jendouba	Béja	Kef	Tala	Siliana	Borj Amri	Cherfech	Ghar Melh
Hiver	74,3	76,1	77,3	74,1	72,1	74,3	78,1	80,4
Printemps	69,8	70,6	65,4	62,7	68,3	68,3	70,8	77,1
Été	53,6	54,8	54,4	50,8	51,5	54,1	55,4	69,2
Automne	67,3	69,4	68	65,5	67,4	68,1	70,4	71,1

Source : INM

Au total, les caractéristiques de l'humidité relative de l'air dans le BV de la Mejerda agissent de deux manières sur l'évolution de l'ETP. En effet, dans les secteurs à faibles altitudes d'humidité, notamment, les bassins enclavés à l'intérieur le pouvoir évaporant du climat se ralentit. Par contre dans les secteurs à forte humidité, en particulier les traits de la côte, les plans d'eau et les forêts, l'évapotranspiration s'accélère.

2.2.4. Le vent

Le vent constitue un facteur favorable à l'évapotranspiration, il intervient par sa vitesse et par ses caractéristiques hygro-thermiques (Henia L., 1993 ; Beltrando et *al*., 1995). De plus c'est un facteur écologique de premier ordre par les effets desséchants qu'il provoque sur la végétation puisqu'il substitue en permanence de l'air nouveau sec à l'air qui se sature en eau par contact avec le sol (Gond et *al.,* 2004 ; Diop., 2009). Dans le B.V de la Mejerda, les vents dominants soufflent du secteur Nord-Ouest et Nord-Est. Ceci entretient les flux humides du nord dans la région durant la majeure partie de l'année, en particulier, sur la rive gauche. De plus, la région n'est pas à l'abri des vents de secteurs sud chaud et sec d'origine saharienne. Ceci active le pouvoir évaporant de l'atmosphère. À cet égard, Rodier (1981) disait que *« le Sirocco souffle généralement plus de vingt jours par an dans le bassin de la Mejerdah ».* À titre d'exemple la station de Borj Amri (basse Mejerda) se met sous l'effet de 21 jours de Sirocco en 2001(Al Manach., publication de l'INM 2002), la station de Béja (moyenne Mejerda) a enregistré 24 jours et la Station du Kef (Haut Tell), était touchée par 18 jours, et ce pour la même période. L'arrivée de ce vent est accompagnée d'une hausse notable de la température et d'une chute rapide de l'humidité relative. Cette ambiance engendre, sans doute, des quantités d'évapotranspiration très importantes.

En automne et en hiver, nous signalons aussi la présence des couloirs venteux, en particulier, le long de la vallée de Mejerda et les couloirs topographiques entre les montagnes du Haut Tell (tableau 14). Ceci, est un facteur de variation de l'évapotranspiration surtout dans les plateaux intra-telliens caractérisés par une topographie accidentée. Durant l'été le vent réagit, souvent, avec son pourvoir desséchant notamment par temps de Sirocco activant l'évaporation (Henia L., 1993). Pendant le printemps, la basse Mejerda se trouve sous l'effet du vent du Nord-Est qui prend de l'importance, dans la mesure où l'influence du relief est négligeable.

Au niveau ponctuel, la station de Cherfech, se montre comme la station la plus ventée, et ce en raison de sa situation géographique. Elle se trouve dans un site dégagé sans intervention du relief et sans effet de rugosité. Par contre, la station de Béja se caractérise par les vents les plus faibles de la région, en raison de situation topographique au pied d'un versant (cf. tableau 2). Quant à la direction des vents, le tableau 15 montre que les stations de la haute Mejerda sont exposées aux vents du Nord-Ouest à l'inverse les stations de la basse Mejerda qui sont plus exposées aux vents Nord-Est. Il y a aussi l'effet de la pente qui accélère et réchauffe le vent descendant, ce qui a un effet sur le rythme l'ETP. Il s'agit, en premier lieu des pentes des versants nord de la Dorsale occupés par les vents chauds et secs du sud et les pentes des versants de la Kroumirie en second lieu abordés par les flux humides du nord.

Tableau 14: Vent moyen quotidien saisonnier dans le B.V de la Mejerda (2000-2011)

	Jendouba	Béja	Kef	Tala	Siliana	Borj Amri	Cherfech	Ghar Melh
Hiver	2,5	2,5	2,6	3,6	3,3	3,8	4,0	4,0
Printemps	2,8	2,5	2,8	3,8	3,5	4,3	4,5	4,2
Été	2,7	2,8	2,7	3,7	3,4	3,6	4,1	4,0
Automne	2,5	2,3	2,5	3,5	3,2	4,0	3,6	3,6

Source : I.N.M

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

Tableau 15: Vent moyen quotidien annuel dans le B.V de la Mejerda (2000-2011)

	Paramètres / Stations	Force du vent en m /s	Direction la plus fréquente	
			Direction	En % des cas
Haute Mejerda	Jendouba	2,6	Nord-Ouest	22
	Béja	2,5	Ouest	26
Moyenne Mejerda	Kef	2,7	Ouest	25
	Siliana	3,7	Sud-Est	23
	Tala	3,4	Nord-Ouest	37
Basse Mejerda	Borj Amri	3,9	Ouest	25
	Cherfech	4,1	Nord-Est	21
	Ghar Melh	4,0	Nord-Est	30

Source : I.N.M

En définitive, par son effet desséchant le vent est un agent d'accélération d'évaporation. En effet, la corrélation vent-évaporation est de 0,84 dans les secteurs semi-arides (Diop., 2009). *« Les besoins en eau augmentent au fur et à mesure que s'accroît la vitesse du vent ; le maximum de l'évaporation correspond à celui du vent et de même que le minimum »* (Diop., 2009).

2.2.5. Étages bioclimatiques

D'après (Emberger., 1955) l'étage climatique correspond à l'étage de végétation, il n'est, en effet, qu'un paysage réel du climat. Les étages de la végétation expriment bien la zonation altitudinale de la végétation en relation avec les niveaux bioclimatiques (Ozenda., 1975). À ce propos, la limite de chaque étage varie, essentiellement, en fonction des températures, du relief et du sol. Gammar (1999) distingue deux limites altitudinales moyennes de 500 et 800 m. L'analyse de la figure 13 révèle que le BV de la Mejerda s'individualise par une succession d'étages bioclimatiques, s'étirant du Nord au Sud où les subdivisions suivent l'orientation des axes orographiques. Certes, ces étages bioclimatiques sont définis par Emberger (1955), allant de l'humide supérieur au nord vers l'étage semi-aride au sud passant par l'étage subhumide au milieu (figure 28) :

- l'étage bioclimatique humide : situé sur les sommets de la Kroumirie et ses versants sud, l'étage bioclimatique humide se caractérise par des précipitations moyennes annuelles entre 800 et 1500 mm/an, avec de forts brouillards et nébulosités et une moyenne des températures des mois les plus froids comprise entre 3 et 4,5°C (Stambouli-Essassi et *al*., 2007). De plus, sur les hauts reliefs, il neige de temps en temps durant les mois de janvier et février. Aussi, la réserve utile commence à se reconstituer dès la dernière décade du mois d'octobre pour se remplir entre janvier et avril (200 mm) et elle commence, par la suite, à se vider pour atteindre un niveau très faible entre juillet et mi-octobre (Feki., 2006). Ces secteurs arrosés et frais sont couverts par une formation végétale assez dense où on trouve « *le Chêne zeen associé au Chêne liège dans des formations mixtes auxquelles vient se mêler le Chêne kermès. La composition du sous-bois, dominée généralement par Bruyère arborescente varie en fonction de la nature du sol et de son degré d'humidité* » (Stambouli-Essassi et *al*., 2007). Dans cet étage bioclimatique la demande d'évaporation ne peut être que modérée et le stress hydrique n'est ressenti par la végétation que pendant l'été. C'est ce que nous démontrons à la troisième partie.

- l'étage bioclimatique subhumide : il couvre une bande dont la largeur n'excède pas 50 km au sud de l'étage humide, tout au long des pieds des versants de la Kroumirie (sauf à la dépression de Jendouba) au-dessus de 500 m d'altitude. Sa limite méridionale est marquée par le cours d'eau de la Mejerda. Il se distingue par des précipitations annuelles entre 600 et 800 mm et une réserve utile qui *« n'atteint pas sa capacité maximale (200 mm) à Jendouba et uniquement sur une courte période à Béja (les deux premières décades de mars pour Béja) »* Feki., 2006. La végétation est formée, essentiellement, par les cultures généralisées de la série de l'Oléastre et Lentisque et localement des série de chêne liège et du chêne Kermès non différenciées (voir carte de végétation 1/200000).
- l'étage bioclimatique semi-aride : par ses différents sous-étages il occupe environ les deux tiers du BV de la Mejerda. Il occupe la rive droite de l'oued Mejerda où la pluie annuelle varie de 400 à 600 mm. La réserve utile se charge en hiver, elle est épuisée totalement en hiver, et elle devient vide au mois de juillet jusqu'au début de novembre. La végétation est formée par une forêt de *Pin d'Alep*, série du *Thuya de Berbérie*, et plus vers le Sud-Ouest de la région le sol devient à nu. Dans cet étage le pouvoir évaporant de l'atmosphère prend de l'ampleur et le stress hydrique devient très marqué.

Enfin, dans les étages bioclimatiques, une limite importante apparaît entre le semi-aride moyen et 1e semi-aride inferieur à la seule condition de rattacher la variante « à hiver frais du semi-aride inferieur l'ensemble des bioclimats du Tell (Stambouli-Essassi et *al*., 2007). Il faut noter aussi que les limites de ces étages ne correspondent pas toujours à la réalité du terrain. Ceci nous a poussé à réaliser un zonage de la région à la base de la typologie du déficit d'évaporation (voir troisième partie de cette étude).

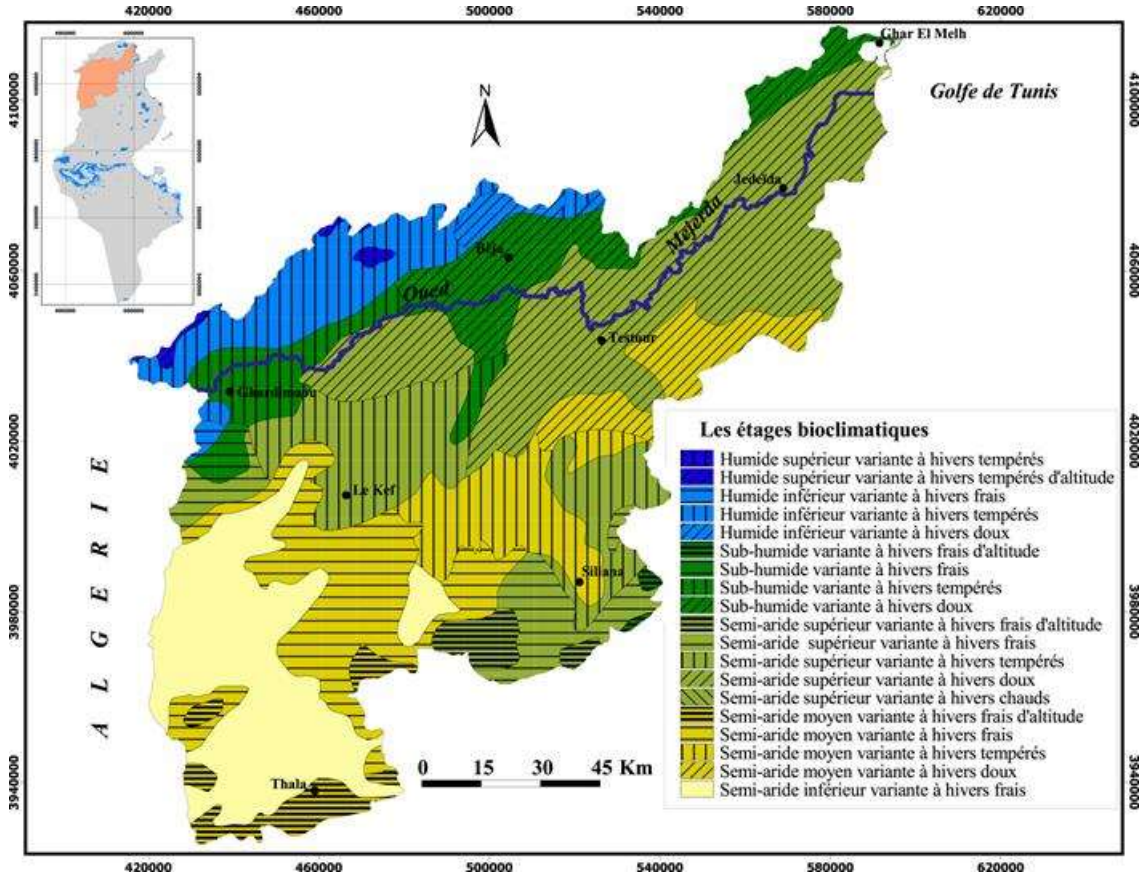


Figure 27: Les étages bioclimatiques dans le BV de la Mejerda (carte de la végétation 1/200000)

En somme, le BV de la Mejerda est marqué par un climat très contrasté avec une grande variabilité inter-saisonnière et une variation spatiale très marquée même si à une courte distance. En plus, tous les déments du climat mettent en évidence l'opposition entre les versants sud de la Kroumirie et les versants nord de la Dorsale et l'importance de la limite créée par la vallée de la Mejerda.

Conclusion

Si, au premier abord, l'étude de l'évapotranspiration semble assez simple, nous avons pu noter tout au long de ce chapitre que ce n'est en réalité pas le cas en particulier dans une région très diversifiée comme celle du BV de la Mejerda. De par les subtilités de son fonctionnement hydro-climatique ainsi que les éléments physiques caractérisant, il est essentiel de bien comprendre ce que cache la diversité de cette région.

Enfin, les diversités naturelles (climatiques, édaphiques et topographiques), qui caractérisent le BV de la Mejerda, constituent des facteurs qui influencent de près la répartition géographique de l'évapotranspiration et son articulation dynamique, ainsi que le zonage du stress hydrique auquel la végétation est soumise. On expliquera, ainsi, les apports de chaque facteur dans l'étude de ces deux éléments.

TROISIEME CHAPITRE : DEMARCHE METHODOLOGIQUE POUR L'ETUDE DE L'EVAPOTRANSPIRATION

Introduction

Ce chapitre s'articule autour de l'approche générale utilisée dans le cadre de ce travail. En effet, l'estimation de l'évapotranspiration s'appuie sur le modèle FAO-56. Ce modèle distingue trois types d'évapotranspiration : l'évapotranspiration de référence ou potentielle (ETP), l'évapotranspiration maximale (ETM ou ETc évapotranspiration de culture) et l'évapotranspiration réelle (ETR). Pour ce faire, nous avons utilisé un algorithme qui relie l'équation de Penman-Monteith largement utilisée, et la méthode de télédétection spatiale.

Toutefois, la démarche (figure 29) commence par la collecte de données : données météorologiques, images satellitales, données de terrain, documents géographiques. Par la suite, nous avons réalisé une base de données multi-scalaires sous un Système d'Information Géographique, c'est-à-dire transférer les données sous format vectoriel et matriciel. Enfin, le traitement des résultats obtenus fait l'objet principal de la présente étude. Par ailleurs, l'originalité de la méthode se résume, d'une part, à un développement d'un modèle de cartographie de l'évapotranspiration à l'échelle régionale et d'autre part, présente un modèle de typologie de la déficience d'évaporation suivant le rapport de l'ETM par l'ETP.

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

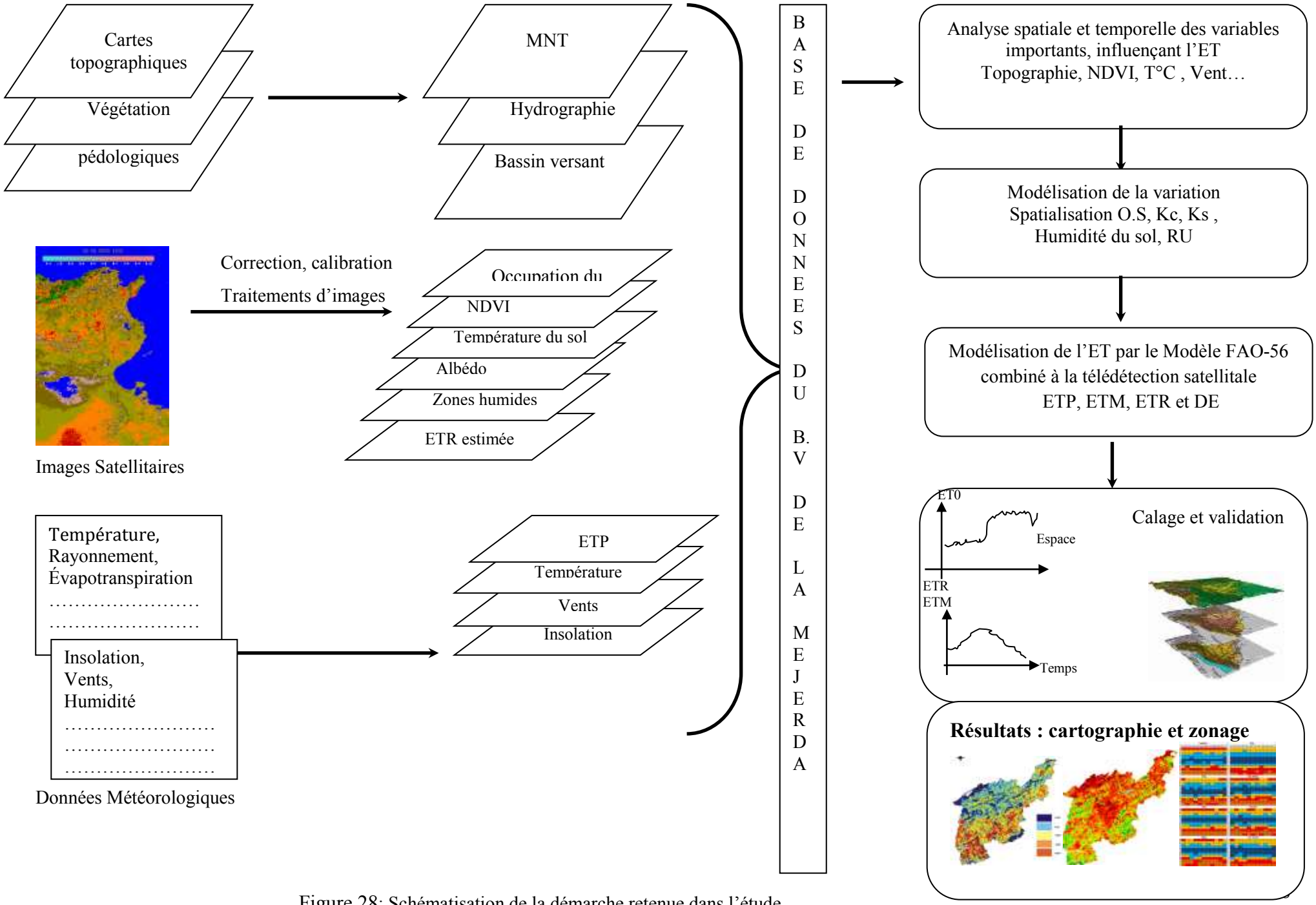


Figure 28: Schématisation de la démarche retenue dans l'étude

3.1 Approche de l'évapotranspiration par la télédétection et le Système d'Information Géographique

3.1.1. Concepts et Notions de base

3.1.1.1. La télédétection optique,

La télédétection désigne la discipline scientifique qui regroupe l'ensemble des connaissances et des techniques utilisées pour l'observation, l'analyse, l'interprétation, et la gestion de l'environnement à partir de mesures et d'images obtenues à l'aide de plateformes spatiales, terrestres ou maritimes. Cette discipline a été conçue pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance (Berg., 1986 ; Bonn F. et *al.,* 1992, Caloz R., 1996 ; Er-raki S., 2007). Par son caractère répétitif, synoptique et diversifié du point de vue des thématiques, la télédétection est une source d'information indispensable dans le suivi de certains paramètres environnementaux, et ce, à travers l'enregistrement de l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchie (Foin., 1987 ; Dubreuil V. et *al.,* 2002 ; Souidi, *al*., 2010). En climatologie, elle permet d'étudier les éléments du climat en temps quasi-réel. À la différence des enregistrements réalisés par les stations climatiques, les Images obtenues par télédétection ne nécessitent donc pas d'interpolation. Dans cette perspective, la télédétection est sollicitée en tant qu'outil méthodologique devant contribuer à la mise en œuvre et à déterminer l'évapotranspiration suivant deux principes :

- Le principe semi-empirique, à l'aide de la température de surface de la végétation (Seguin *et al.*, 1982 ; EL Garouni., 1995). Dans la plupart des cas, l'évapotranspiration est calculée comme « résidus » du bilan d'énergie (chaleur latente). En effet, lorsqu'une surface est sujette à l'évaporation, elle perd de l'énergie et se refroidit. C'est ce refroidissement qui peut être observé depuis l'espace. Les satellites peuvent cartographier la chaleur infrarouge émise par la terre, nous permettant ainsi de distinguer les surfaces froides des surfaces chaudes. Les surfaces sèches apparaissent très nettement lorsqu'elles deviennent plus chaudes que les surfaces alentour ;

- Le principe déterministe, fait appel au modèle de transfert sol-plante-atmosphère. Dans ce cas, la production de biomasse correspond à la quantité de matière sèche élaborée par l'assimilation nette (différence entre photosynthèse et respiration) à l'échelle de temps. Ce principe met en évidence la relation entre la valeur moyenne de l'indice de la végétation au cours de la saison de végétation et la production de biomasse correspondante. De plus, Il fait intervenir des calculs de surface de végétation, à l'aide d'indices de végétation basés sur l'écart de signal des canaux rouge et proche infra-rouge des images satellite (Vidal A., 1993 ; Qiaozhen, *al*., 2009 ; Amri., 2013).

À partir de ces deux principes, on peut évaluer d'évapotranspiration pour un point donné, l'exécution se fait par des algorithmes sur ordinateur. Ainsi, les informations satellite fournissent des indices qui viennent compléter les renseignements mesurés au sol par le réseau météorologiques. Enfin, cette synergie résulte en une augmentation de la valeur des données réseau et satellite.

3.1.1.2. …..et le Système d'Information Géographique

Thériault (1992) définit le système d'information géographique (SIG) comme *« un ensemble de principes, de méthodes, d'instruments et de données à référence spatiale, utilisé pour saisir, conserver, transformer, analyser, modéliser, simuler et cartographier les phénomènes et les processus distribués dans l'espace géographique ».*Plus précisément Tveiton (2007) définit l'utilisation des Systèmes d'Information Géographiques (SIG) en climatologie et en météorologie comme étant «*Ensemble de méthodes décrivant l'interdépendance de données voisines dans un jeu de données, dans un système de coordonnées typiquement cartésien ».* La spatialisation du climat consiste le plus souvent à estimer en tout point de l'espace un phénomène climatique, à partir de mesures ponctuelles (interpolation) ou exhaustives (télédétection) ou encore en modélisant l'occurrence de ce phénomène (modèles de prédictions météorologiques). La définition du terme « spatialisation » est proche du terme « cartographie ». En réalité, le terme « spatialisation » ne se limite pas à désigner le processus d'établissement d'une carte. Il indique également le post-traitement qui peut en être fait via notamment l'utilisation de SIG. La spatialisation des variables climatiques peut être réalisée en utilisant différentes sources de données (Bois B., 2007).Les SIG dans leur fonction stockage et d'intégration de données s'appuient bien souvent sur la télédétection, la plus grande source actuelle de sources de données spatiales.

Dans ce travail, nous avons élaboré une base de données sous un Système d'Information Géographique (SIG) qui met en relation les trois composantes du modèle adapté dans cette étude, sol-plante-atmosphère, suivant les taches suivantes :

- le sol : c'est la détermination du stock d'eau dans le sol, via la carte de la réserve utile, ou bien l'estimation de l'humidité du sol par imagerie satellite pour élaborer une cartographie de l'ETR ;
- plante : c'est la caractérisation de la végétation, par le biais des profils des NDVI, pour distinguer la typologie de l'occupation du sol et l'évolution du cycle des coefficients culturaux afin d'avoir une spatialisation de l'ETM ;
- l'atmosphère c'est-à-dire interpoler les paramètres climatiques conditionnels de l'ETP. La carte sera transformée sous format matriciel pour s'adapter aux produits des séries temporelles des NDVI.

Nous présentons dans ce qui suit la démarche adoptée pour déterminer l'évapotranspiration sous ses différentes formes et le déficit d'évaporation.

En somme, Le couplage de la télédétection spatiale et le S.I.G permet la paramétrisation de l'évapotranspiration sous ses trois composantes (ETP, ETM et ETR) dans le B.V de la Mejerda sur des surfaces hétérogènes et de combler les lacunes des données météorologiques mesurées au sol.

3.2. Présentation des méthodes d'estimation de l'Évapotranspiration

3.2.1. Description du modèle FAO-56

Le modèle utilisé est le modèle FAO-56 (Allen et *al.,* 1998), est aujourd'hui communément reconnu comme un standard pour déterminer l'évapotranspiration. Dans cette étude, nous avons met le l'accent sur ce modèle qui constitue le niveau le plus simple de description des échanges sol-plante-atmosphère, utilisé de façon opérationnelle par la plupart

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

des gestionnaires des bilans de l'eau en climatologie, agronomie et hydrologie. Il pondère une évapotranspiration potentielle (celle d'un gazon ras bien irrigué soumis aux conditions climatiques actuelles) par des coefficients culturaux qui synthétisent la différence de fonctionnement bioclimatique entre le gazon et la culture en question, mais aussi les différents stress environnementaux (Amri R., 2013). Dans ce modèle, on distingue trois types d'évapotranspiration selon le type de la culture et les conditions climatiques comme l'indique la figure 30 :

- l'évapotranspiration de référence ET0 (ETP) qui est définie comme l'ensemble des pertes d'eau par évaporation et par transpiration d'une surface étendue de gazon bien alimentée en eau, ayant une hauteur uniforme de 8 à 15 cm, en pleine période de croissance, couvrant complètement le sol(Allen et *al.,* 1998) ;

- l'évapotranspiration sous des conditions standards ETc appelée aussi évapotranspiration maximale (ETM). Elle est définie à différents stades de développement d'une culture donnée sous des conditions agronomiques optimales ; c'est à dire sans maladie et sans stress ni hydrique ni nutritionnel. ETc est reliée à ET0 par l'intermédiaire d'un coefficient *Kc* appelé coefficient cultural qui tient compte de la différence physique et physiologique entre la surface de référence et la culture donnée (Allen et *al.,* 1998) ;

- l'évapotranspiration sous des conditions non standards ETcadj appelée aussi évapotranspiration réelle (ETR) qui est définie comme la somme des quantités de vapeur d'eau évaporée par le sol et la végétation à un stade de développement physiologique donné et un état sanitaire réel (présence des maladies et des insectes, stress hydrique…). ETR est reliée aussi à ETc par un coefficient *K s* appelé coefficient de stress hydrique (Allen et *al.,* 1998).

Afin de déterminer l'évapotranspiration maximale et l'évapotranspiration réelle, il est nécessaire de déterminer trois paramètres : l'évapotranspiration de référence ET0, le coefficient cultural K_C et le coefficient de stress hydrique K_S. Ceci est réalisé en suivant l'organigramme de la figure 31. Enfin, il est à remarquer que nous avons opté pour l'approche 1 en raison de son exécution simple dont elle n'intègre pas les évènements des pluies et d'irrigation (Er-raki S., 2007).

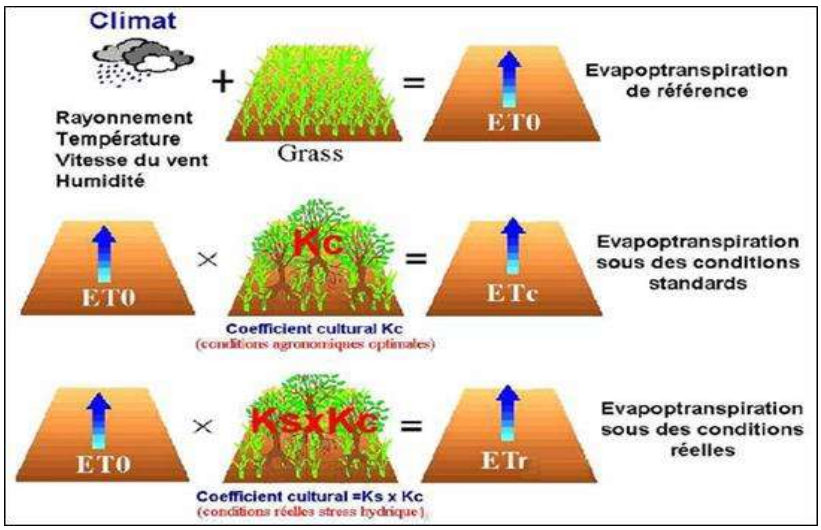


Figure 29: Trois types d'évapotranspiration estimés par le modèle FAO-56 : Évapotranspiration de référence (ETo ou ETP), évapotranspiration sous la condition standard (ETc ou ETM) et sous les conditions réelles (ETc adj ou ETR) (Allen et *al.,* 1998)

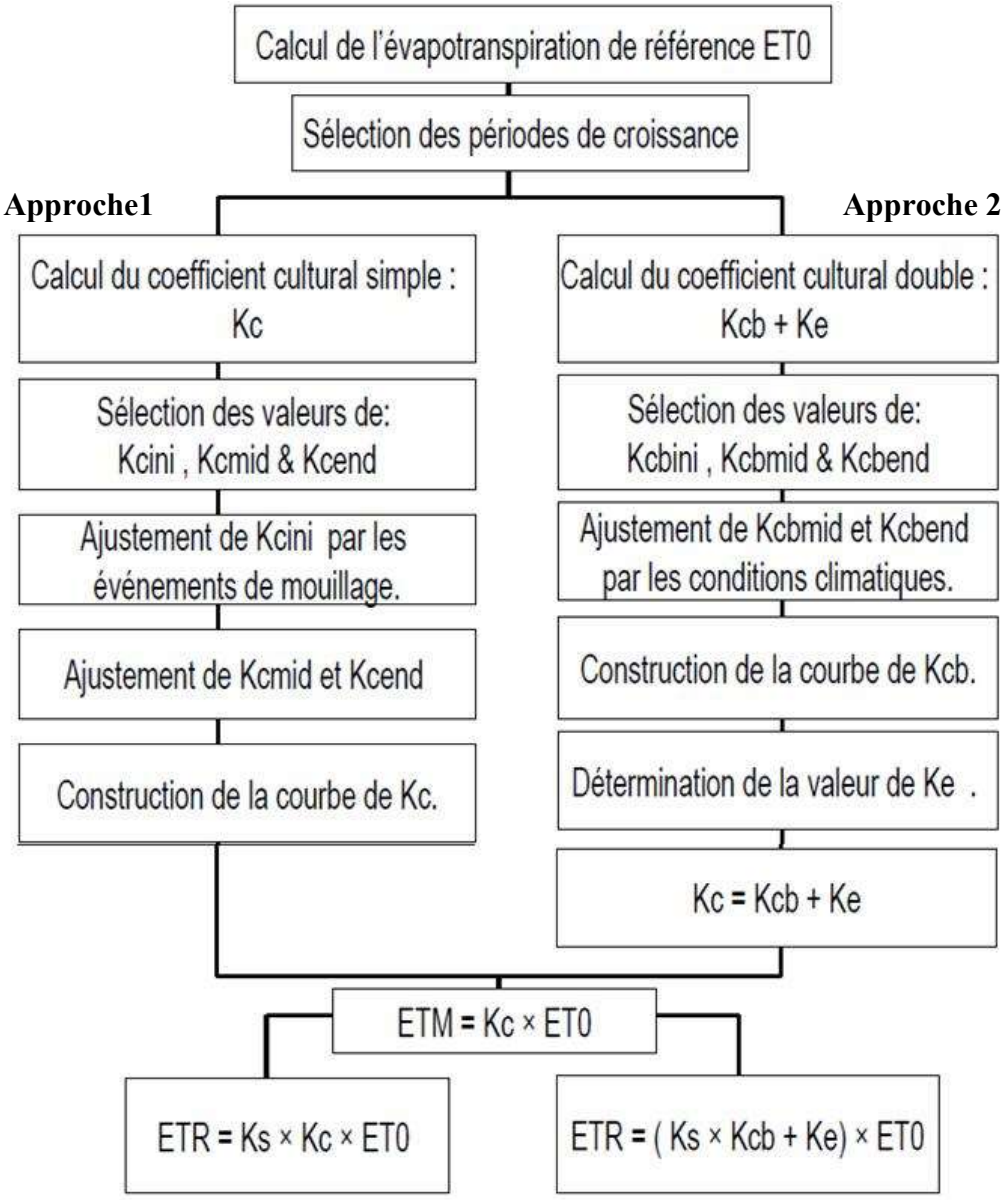


Figure 30: Organigramme de calcul d'évapotranspirations maximale (ETM) et réelle (ETR) par les deux approches du modèle FAO-56 (Allen et *al.,* 1998)[23].

[23] Légende
- Kc, coefficient cultural
- Kcb, coefficient cultural de base
- Ke, coefficient d'évaporation du sol
- Ks, coefficient de stress
- Kcini, coefficient cultural de la phase initiale
- Kcmid, de la mi-saison
- Kcend, de la récolte

3.2.2. Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP) : l'équation de FAO Penman-Monteith et procédure de calcul

Le concept de l'évapotranspiration potentielle (ETP) a été introduit pour étudier la demande évaporatoire de l'atmosphère indépendamment du type du couvert végétal et des pratiques de gestion. Face à la difficulté à respecter les conditions standards pour le calcul de l'ETP, des méthodes empiriques ou semi-empiriques ont été développées pour estimer ETPà partir de différentes paramètres climatiques. Ces formules empiriques peuvent être classées en trois groupes : les méthodes de température (Blaney and Criddle, 1950 ; Hargreaves and Samani, 1985), les méthodes de radiation (Makkink, 1957 ; Turc, 1961; Priestly and Taylor, 1972 ; El Garouni., 1995) et les méthodes combinées (Penman, 1948; Riou., 1980 ; Allen et *al.*, 1998).Dans cette étude, nous avons appliqué la méthode de FAO développée par Allen et *al* en 1998 pour l'estimation de l'ETP. Ceci nous est apparu nécessaire d'y avoir recours afin d'estimer la valeur plafond que pourrait prendre l'évapotranspiration sur le BV de la Mejerda.

3.2.2.1. Équation de Penman-Menteith

En Climatologie, comme dans beaucoup d'autres domaines, l'ETP de Penman est une référence. Elle est censée donner l'estimation la plus proche de la mesure lysimétrique de l'ETP. Cette équation a été formulée de façon à inclure tous les paramètres qui gouvernent l'échange d'énergie d'une végétation étendue et uniforme. La plupart de ces paramètres sont mesurés ou peuvent être rapidement calculés à partir de données météorologiques. Cette équation peut être utilisée pour un calcul direct de l'évapotranspiration une fois que les résistances aérodynamiques de surface sont spécifiées. La combinaison des équations d'énergie et de transfert de masse a permis de trouver une équation qui s'appelle l'équation de Penman-Monteith. Cette équation s'exprime comme suit (Allen et al, 1998) :

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \frac{\rho_a c_p (e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma\left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)}$$

λET : flux de chaleur latente (w/m2),.[24]
Rn : rayonnement net à la surface de la culture il est donné par la formule suivante (Allen et *al.,* 1998) :

$$R_N = (R_S + R_A)(1 - \alpha) - R_T$$

R_S : rayonnement solaire direct et diffus atteignant le sol [Wm-2],
R_A : rayonnement atmosphérique dirigé vers le sol [Wm-2],
R_T : rayonnement terrestre [Wm-2],
α: albédo de la surface.
G : flux conductif, il est calculé en utilisant la formule suivante (Allen et *al,* 1998) :

[24] **ET0** évapotranspiration de référence [mm/jour] ; **Rn** rayonnement net de surface [MJ/m²/jour] ; **G** flux de chaleur du sol [MJ/m²/jour] ; **T** température de l'air moyenne à 2m [°C] ; **u2** vitesse du vent à 2m [m/s] ; **es** pression de vapeur à saturation [kPa] ; **ea** pression de vapeur actuelle [kPa] ; **Δ** variation de la courbe de pression de vapeur [kPa/°C] ; **γ** constante psychométrique [kPa/°C]

$$G = c_s \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta t} \Delta Z$$

cs : Capacité calorifique du sol [MJ/m3°C],

Ti : Température de l'air au temps i[°C],

Ti−1 : Température de l'air au temps i-1[°C],

Δt : période de mesure [jour],

ΔZ : profondeur effective du sol [m],

Δ : pente de la courbe de la pression de vapeur saturante à la température de l'air. Elle est calculée en utilisant la formule suivante (Tetens, 1930; Murray, 1967) :

$$\Delta = 4098 \frac{\left[0.6108 \exp\left(\frac{17.27T}{T+237.3}\right)\right]}{(T+237.3)^2}$$

γ : constante psychrométrique. Elle est calculée en utilisant la formule suivante :

$$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} = 0.665.10^{-3} P \ [kPa/°C]$$

P : pression atmosphérique donnée par Burman et *al*. (1987) :

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065z}{293}\right)^{5.26} [kPa]$$

λ: Chaleur latente de vaporisation=2.45 [MJ/kg] (Harrison, 1963)
c_p : Chaleur spécifique = 1.013.10-3[MJ/kg. °C]
kPa= 0.622 : rapport moléculaire de la vapeur d'eau et de l'air sec.
z : hauteur a partir du niveau de la mer [m].
ra : résistance aérodynamique. Elle est calculée en utilisant la formule suivante (Thom et *al.,* 1975) :

$$r_a = \frac{1}{k^2 u_z} \ln\left(\frac{Z_m - d}{Z_{0m}}\right) \ln\left(\frac{Z_h - d}{Z_{0h}}\right)$$

Z_m : hauteur à laquelle est mesurée la vitesse du vent [m],
Zh : hauteur à laquelle est mesurée l'humidité de l'air [m],
d : hauteur de déplacement du plan de référence [m],
Z_{0m} : Longueur de la rugosité de la quantité de mouvement [m],
Z0h : Longueur de la rugosité du transfert de chaleur et de vapeur [m],
k : constante de Von Karman=0.4,
u_z : Vitesse du vent à la hauteur z [m/s]. Elle est liée à la vitesse du vent à la hauteur 2m par la relation suivante (Allen et al, 1998) :

$$u_2 = u_z \frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)}$$

rs : résistance de surface (s/m),

es – ea : déficit de pression de vapeur d'air,

ρa : densité moyenne de l'air,

cp : capacité calorifique de l'air [MJ/m3°C].

3.2.2.2. L'équation de FAO -Penman-Monteith[25]

En mai 1990, une consultation d'experts et de chercheurs a été organisée par l'organisation mondiale de l'agriculture et de l'alimentation (FAO) en collaboration avec l'organisation mondiale de la météorologie et avec la commission internationale pour l'irrigation et le drainage, pour déterminer les différentes méthodes de calcul de l'évapotranspiration de référence ET0. L'ensemble des experts a recommandé l'adoption de l'équation de Penman-Monteith comme une méthode universelle de calcul de l'évapotranspiration de référence. À partir de l'équation originale de Penman-Monteith, les équations de la résistance aérodynamique et de résistance de surface pour une surface de référence, l'équation utilisée pour le calcul de l'évapotranspiration de référence ET0 s'écrit comme suit (Allen et *al,* 1998)

$$ET0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

Avec : ET0, évapotranspiration de référence ; T : température moyenne journalière à la hauteur 2m [°C]. Elle est calculée en utilisant la formule suivante (Allen et al, FAO, 1998) :

$$T_{mean} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2}$$

Tmax : température journalière maximale (°C),

Tmin : température journalière minimale (°C),

u2 : vitesse du vent à 2m de hauteur [m/s],

es : pression de vapeur saturante de l'air [kPa],

ea : pression de vapeur réelle [kPa],

[25] Légende :

Δ : Pente de la courbe de pression de vapeur saturante en fonction de la température à la température Ta. s'écrit en kPa.°C-1 : 24098(237.3)aaeTΔ=+

Rg : Rayonnement global (MJ m-2 jour-1) : Rg = Re.(0.18 + 0.52D/DL)

Rn : Rayonnement net (MJ m-2 jour-1) : 4(1)(0.560.0992)(0.10.9) nga de DTeDασ=−+ RR

où α est l'albédo et σ est la constante de Stefan-Boltzmann (924.90310MJmj ×1).

γ : Constante psychrométrique, soit : γ = 0.066 kPa.°C-1

G : flux de chaleur du sol [MJ/m²/jour]

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

Le calcul **de l'ETP,** a été réalisé par **le logiciel ET_0 calculateur de la FAO**[26]. À cet effet, on a utilisé les coefficients de calibration (a et b) pour estimer le rayonnement solaire (proposé par Mjejra M., 2005)[27].

En définitive, la formule de Penman-Monteith peut être considérée comme la première tentative de schématisation des transferts sol-végétation-atmosphère et elle reste le modèle de la FAO le plus simple à mettre en œuvre. Pour la Tunisie, Hbaieb et Masmoudi en 2003 ont indiqué que la formule PM donne une estimation précise de l'ETP car elle « *tient compte également des caractéristiques éco-physiologiques de la plante, en l'occurrence de la résistance stomatique* ». À son tour Nasr Z. en 2002 a trouvé sur une période de 10 ans (1980-1990) une corrélation significative de 0,81 entre ETP mesurée et ETP calculée (Figure 32). De plus, Jabloun (2008) confirme que la méthode de la FAO-56 Penman-Monteith est la plus *« adéquat pour calculer ETP moyenne quotidienne avec une l'erreur quadratique moyenne (RMSE) de 0,4 et 0,2 mm par jour ».*

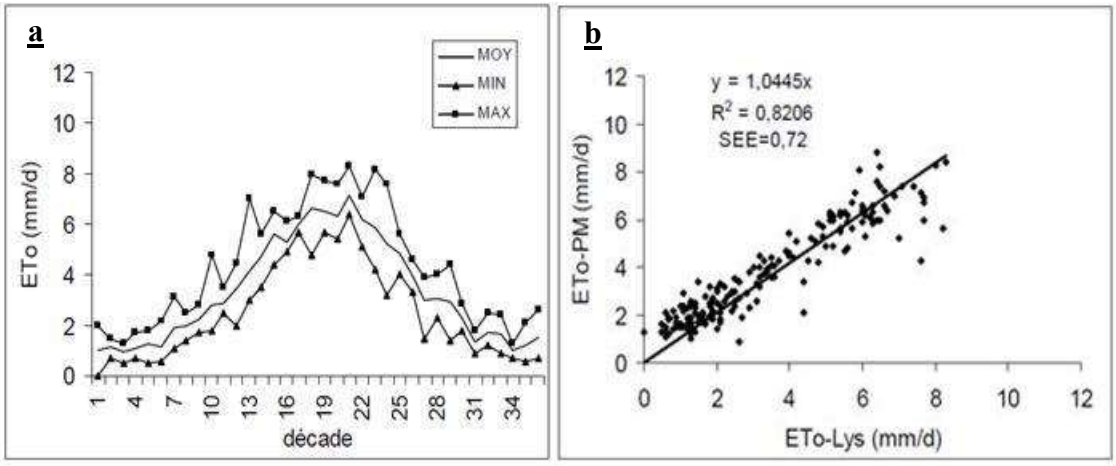


Figure 31 : (a) Valeurs décadaires de ETo mesurée par lysimètre à drainage dans la station de Mornag-Tunisie, entre 1980 et 1990 ; (b) corrélation entre les valeurs mesurées (ETo Lys) et valeurs calculées (ETo /FAO-PM) à la station de Mornag-Tunisie entre 1980 et 1990 (Source : Nasr Z. 2002)

[26]ET0 calculateur version 3.2 ce logiciel calcul ET0 partir de données météorologiques au moyen de l'équation de Penman-Monteith FAO. Cette méthode a été choisie par la FAO comme référence car il est très proche de l'herbe ETO au lieu évalué, est basé physiquement, et intègre explicitement les paramètres physiologiques et aérodynamique.
Le programme peut gérer des données climatiques journalières, décadaires et mensuels. Les données peuvent être donnés dans une grande variété d'unités et de données spécifiés dans les paramètres climatiques couramment utilisés peuvent être traitées. Lorsque les données sont manquantes pour certaines variables météorologiques, les procédures sont utilisées pour estimer les données climatiques manquantes à partir des données de température ou de conditions climatiques spécifiques selon des méthodologies décrites dans l'irrigation et de drainage No 56:. "évapotranspiration" . Même lorsque l'ensemble de données ne contient que la température de l'air maximal et minimal, il est encore possible d'obtenir des estimations raisonnables pour ETo dix jours ou tous les mois.
En sélectionnant limites inférieures et supérieures appropriées pour les données météorologiques, le programme applique un contrôle de qualité lors de la spécification ou l'importation de données. Spécifiée et dérivé des données climatiques, y compris ETO peuvent être exportés dans des fichiers texte compatibles avec AquaCrop ou tracées de diverses manières spécifiées par l'utilisateur. ETo calculateur est conçu comme un outil pratique pour aider les agro-météorologues, des agronomes et des ingénieurs d'irrigation d'effectuer des calculs standard pour ETO pour être ensuite utilisées dans les études de consommation d'eau des cultures.
[27]Mjejra M., 2005 : Estimation du rayonnement solaire en Tunisie par télédétection et méthodes statistiques, mémoire de master 139p.

3.2.3. Estimation de l'évapotranspiration maximale (ETM)

On désigne par l'évapotranspiration maximale, la demande climatique maximale en eau d'une culture sans facteur limitant comme le facteur hydrique, le facteur parasitaire etc... Elle est définie à différents stades de développement d'une culture donnée sous des conditions agronomiques optimales (Allen, *al*., 1998). C'est-à-dire sans maladie et sans stress ni hydrique ni nutritionnel. Le principe de la méthode FAO-56 pour estimer de l'ETM se fonde sur la multiplication d'un coefficient propre à chaque culture (Kc) l'évapotranspiration potentielle où sont inclus les effets des différentes conditions météorologiques. En effet, ETM est reliée à ETP par l'intermédiaire d'un coefficient cultural qui tient compte de la différence physique et physiologique entre la surface de référence et la culture donnée (Er-raki., 2007). La formule de calcul de l'ETM est la suivante :

$$ETM = Kc * ETP$$

Le calcul de l'évapotranspiration maximale passe par quatre étapes (Dorian H., 2003):

1- identifier les stades de croissance de la culture, déterminer leurs durées et sélectionner les Kc correspondant ;
2- ajuster les Kc sélectionnés selon la fréquence des évènements pluvieux ou autres conditions climatiques pour chaque stade ;
3- construire la courbe des coefficients culturaux (permettant de déterminer les valeurs de Kc pour chaque stade de croissance) ;
4- calculer ETM à partir de l'équation précédente

3.2.3. 1. L'élément conditionnel de l'ETM : le coefficient cultural

a. Concept du coefficient cultural

Le coefficient cultural (Kc)[28]est le rapport entre l'évapotranspiration maximale et l'évapotranspiration potentielle. Sa valeur est largement affectée par la nature de la culture, sa hauteur, la durée de son cycle, et son taux de croissance. La fréquence des pluies ou de l'irrigation au début du cycle de la culture affecte également le Kc. Il est donc toujours établi expérimentalement au début, pour une région et une culture donnée, puis ensuite confiné dans des tables pour une utilisation ultérieure dans la même région ou dans une région similaire. Selon la méthode utilisée pour le calcul de l'ETM ou selon l'amplitude des différences entre la culture et celle de référence, le Kc obtenu expérimentalement peut légèrement dépasse la valeur de 1 (Dorian H., 2003 ; Simonneaux, *al*., 2007) :

Les valeurs de Kc publiées par la FAO-56 sont souvent données par culture, tout en tenant compte des diverses phases de croissance. Dans ce cadre, nous présentons des exemples de valeurs de coefficients culturaux inspirés des travaux réalisés pour des régions de

[28]L'Algorithme de calcul de Kc à partir des images satellites MODIS est détaillé dans les annexes

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

la Tunisie[29]. On a à titre d'exemple le tableau 16 tiré de Habaieb H, 2003 et tableau 17 tiré de Allen et *al.,* 1998.

Tableau 16: Coefficients culturaux et durée (en jours) des différentes phases de développement de quelques cultures pratiquées au Nord de la Tunisie

cultures	Démarrage	Kcini	Kcmi	Kcar	Lini	Ldév	Lmi	Lar	Durée totale
Tomate	Février	0,60	1,15	0,80	30	40	65	30	165
Pomme de terre	Janvier	0,50	1,15	0,75	30	30	30	30	120
Blé dur	Novembre	0,70	1,15	0,30	30	140	40	30	240
Fève	Mars	0,50	1,15	1,10	20	30	35	15	100
Olivier	Mars	0,65	0,70	0,70	30	90	60	90	270

Source : Hbaeib H., 2003

Légende : Kcini, Kcmi, Kcar : coefficient cultural en phase initiale, de mi-saison et d'arrière-saison, respectivement ; Lmi, Ldév, Lmi, Lar : durée (en jours) du développement en phase initiale, de développement, de mi-saison et d'arrière-saison, respectivement.

Tableau 17: Les coefficients culturaux simples et la hauteur maximale pour différentes cultures et pour différentes régions pour à climat humide

Culture	Kcini	kcmid	Kcend	Hauteur maximale de la culture (en m)
Oignon sec	0,7	1,05	0,75	0,4
Salade	0,7	1	0,95	0,3
Tomate	0,6	1	0,95	0,3
Pomme de terre	0,5	1,15	0,75	0,6
Haricot vert	0,5	1,05	0,9	0,4
Orange	0,7	0,65	0,7	4
Olivier	0,65	0,70	0,70	4-6

Source : Allen et al., 1998

La figure 33 relative au cycle des cultures montre quatre phases de croissance :
- la phase initiale qui s'étend du semis à environ 10% de couverture du sol ;
- la phase de développement du couvert végétal se terminant au moment où la couverture du sol est complète ;
- la mi-saison qui se termine par le début de la chute ou la sénescence du couvert foliaire ;
- la phase de l'arrière-saison ou de maturation.

[29] Voir Hamadi Habaieb et al , 2003: Calcul des besoins en eau des principales cultures exploitées au nord de la Tunisie : estimation de l'évapotranspiration de référence par différentes formules empiriques (cas des régions de Tunis, Béja et Bizerte). Et Zouhaier Hlaoui, 2006 : bilans hydriques agro-climatiques de l'olivier en Tunisie.

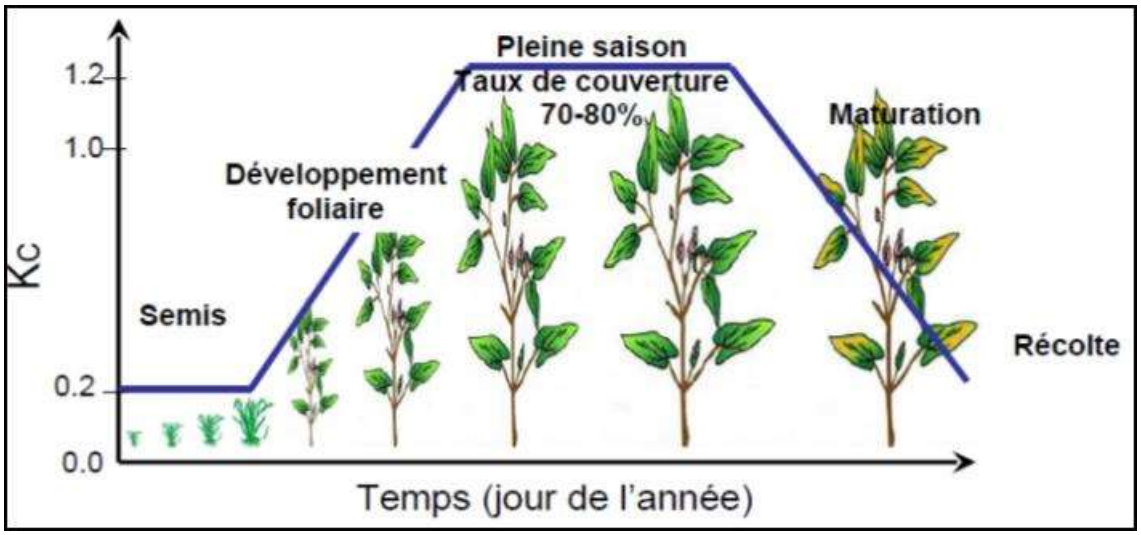


Figure 32: Cycle de développement d'une culture (In, Er-Raki., S, 2007)

b. Procédure de la détermination du coefficient cultural

Rappelons que c'est le rapport entre l'évapotranspiration maximale (ETM) et celle de l'évapotranspiration potentielle (ETP). Selon le modèle FAO-56, deux approches sont développées pour la détermination de ce coefficient : une approche à coefficient cultural simple et une autre à coefficient cultural double :

- **Approche à coefficient cultural simple** : Dans cette approche, l'effet de la transpiration de la plante et de l'évaporation du sol est confiné dans un seul coefficient. La procédure de calcul de l'évapotranspiration maximale consiste à :

- Identifier les phases de croissance de la culture et les durées correspondantes, et sélectionner les coefficients culturaux correspondants ;
- Ajuster les coefficients culturaux pour les conditions climatiques durant les mêmes phases de croissance (Allen et *al.* 1998) ;
- Construire la courbe du coefficient cultural, Kc ;
- Calculer ETM comme un produit de : ETP * Kc.

- **Approche à coefficient cultural double :** elle consiste à diviser le coefficient cultural Kc en deux coefficients : Un pour la transpiration Kcb appelé coefficient cultural de base, et l'autre pour l'évaporation du sol Ke appelé coefficient d'évaporation dans ce cas l'équation de l'ETM devient :

$$\mathbf{ETM = (Kcb + Ke)\ ET0}$$

On se limite, dans ce contexte de la première étant donné que l'approche du coefficient cultural double est beaucoup plus compliquée et nécessite plus de calcul comparativement à l'approche simple. Deux termes sont nécessaires à déterminer pour estimer l'évapotranspiration maximale : Kcb et Ke (Allen, *al*., 1998 ; Er-reki., 2007 ; Amri., 2013) .

Le paramètre Kc représente l'effet intégral de plusieurs caractéristiques qui distinguent la végétation du gazon de référence. Sa valeur est largement affectée par plusieurs facteurs : les facteurs aérodynamiques liés à la hauteur et à la densité de la végétation, les

facteurs biologiques liés à la croissance et la sénescence des feuilles, les facteurs physiques liés principalement à l'évaporation du sol, les facteurs physiologiques liés à la réponse des stomates à la pression de vapeur saturante et aux facteurs agronomiques liés aux pratiques culturales (système d'irrigation, fréquence des pluies et d'irrigation…).

L'évolution du coefficient cultural Kc au cours du cycle d'une culture présente la forme d'une cloche similaire à celle de l'indice foliaire (LAI) ou du taux de couverture du sol. La valeur du Kc est donc considérée comme constante durant la phase initiale où le sol est prédominant et pendant la phase de mi-saison où la couverture du sol par la culture est maximale. Les valeurs du Kc pendant les autres phases de croissance (2 et 4) sont obtenues par interpolation. Connaissant les valeurs du coefficient cultural de la phase initiale (Kcini), de la mi-saison (Kcmid), et de la récolte (Kcend) d'une part, et les durées des périodes de croissance, d'autre part, nous pouvons obtenir pour une culture considérée la valeur du Kc à n'importe quel moment du cycle. À noter que l'évolution du coefficient cultural de base ou coefficient de la transpiration (Kcb) est similaire à l'évolution du coefficient cultural simple (Er-Raki S., 2007, Amri., 2013).

C. Apport de la télédétection satellitale

La télédétection spatiale va nous être utile pour élaborer la procédure de calcul de l'ETM, en particulier, lors de la création des profils des NDVI[30]et ses ajustements :

- **Création d'une base de profils NDVI caractéristiques :** tout d'abord, nous avons généré des valeurs de NDVI (synthèses de 16 jours) à partir des images satellites MODIS[31]. Pour cela nous avons créé une base de données de courbes correspondant aux différentes formes que peuvent présenter les profils NDVI des différentes classes représentatives de l'occupation du sol dans le BV de la Mejerda. Chaque axe de la courbe correspond à l'une des quatre phases du cycle de la culture selon la méthode FAO (cf. figure 33). Il s'agit en fait d'un profil de référence pour type d'occupation du sol.
- **Ajustement des profils NDVI :** un autre algorithme se charge d'ajuster les courbes pour chaque pixel de l'image satellitale. Cet algorithme effectue une boucle où il teste tous les courbes pour chaque pixel, et sélectionne celui qui montre le plus faible écart moyen avec les observations (RMSE (root mean square error) minimale). En sortie de programme nous obtenons plusieurs images ENVI-standard (figure 34), sous forme de profil-type qui servira par la suite au calcul des Kc. Une image nous renseigne sur le numéro de la courbe attribué au

[30] L'indice de végétation de la différence normalisée (NDVI) est une mesure de l'activité physiologique des plantes. Cet indice le plus connu et le plus utilisé est l'indice de végétation par différence normalisé ou indice de Tucker (NDVI en anglais) Son expression est la suivante :
PIR – R / PIR+R avec PIR : bande proche infrarouge et R bande rouge
La normalisation par la somme des deux bandes permet de réduire les effets d'éclairement. Le NDVI conserve une valeur constante quel que soit l'éclairement global, contrairement à la simple différence qui est très sensible aux variations d'éclairement.
Les valeurs du NDVI sont comprises en théorie entre -1 et +1, les valeurs négatives correspondant aux surfaces autres que les couverts végétaux, comme la neige, l'eau ou les nuages, pour lesquelles la réflectance dans le rouge est supérieure à celle du proche infrarouge. Pour les sols nus, les réflectances étant à peu près du même ordre de grandeur dans le rouge et le proche infrarouge, le NDVI présente des valeurs proches de 0. Les formations végétales quant à elles, ont des valeurs de NDVI positives, généralement comprises entre 0,1 et 0,7et les valeurs les plus élevées correspondant aux couverts les plus denses. Tucker, 1979

[31] Ici, Nous avons utilisé le NDVI amélioré EVI = EVI =2.5 [(PIR–R) / (PIR+6R - 7.5B+1)] car il diminue l'effet des aérosols contenus dans l'atmosphère sur le NDVI et minimise l'effet du sol (Huete (1997).

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

pixel, une autre sur le nombre d'observations utilisées pour effectuer le calcul, deux autres images apportent des informations quant à la fiabilité de la relation entre les valeurs initiales de NDVI du pixel et les nouvelles valeurs de la courbe affectées à ce pixel, la RMSE et la RMSE relative.

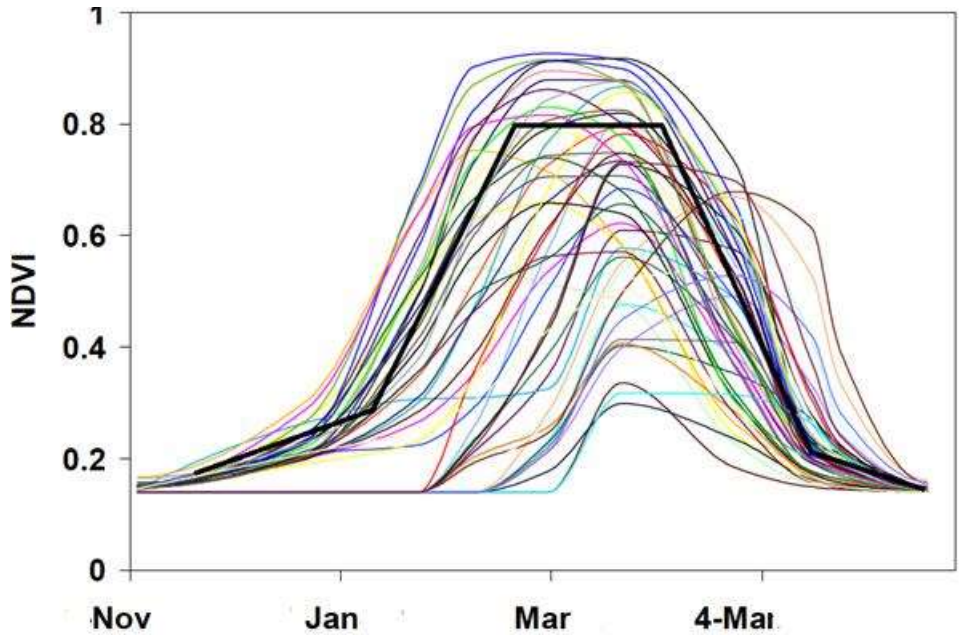


Figure 33 : Exemple de forme de la courbe d'ajustement des NDVI pour le blé de variété Razzak dans l'Agro-combinat de Badrouna (Sud-est de Jendouba)

Après avoir ajusté les profils des NDVI, on cherche par la suite à obtenir les différentes valeurs de Kc (cf. Figure 29) pour chaque pixel. Certes, on dispose maintenant d'un profil avec des valeurs hebdomadaires de NDVI pour chaque pixel. Il faut donc trouver une relation qui relie le NDVI au Kc. La littérature sur ce sujet fournie, plusieurs documents qui présentent des relations partiellement intéressantes pour notre travail (relation Kc et NDVI) (Carlson et *al.,* 1997, Kang et *al.,* 2003, Er-Raki., 2007, Chahbouni, 2008, Amri R., 2013). Nous avons préféré utiliser une relation empirique développée par Salah Er-raki en 2007 au Maroc, en raison de son exécution facile. La relation utilisée est :

$$Kc = 1{,}07 * \left[1 - \frac{\left(\frac{NDVImax - \mathrm{NDVI}}{NDVI\ max - NDVImin}\right) 0{,}88/0{,}54}{}\right]$$

Avec
NDVI min et NDVI max sont les valeurs minimale et maximale de NDVI relatives au sol nu et à la végétation en plein développement.
Dans le cadre de ce travail, nous avons déterminé une relation entre Kc et NDVI pour les différentes classes représentatives de l'occupation du sol dans la région étudiée (Cultures annuelles ou/et prairies, plantations arborées, sols nus et surfaces en eau) nous reviendrons sur ce point en détail dans la deuxième partie.

3.2.4. Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR)

3.2.4.1. Modèle FAO-56

L'évapotranspiration réelle (*ETR)* est liée à l'évapotranspiration maximale par un coefficient Ks qui est appelé coefficient de stress par l'équation suivante :

$$\mathbf{ETR = Ks * ETM = Ks * Kc * ET0}$$

Le manque d'eau dans la zone racinaire entraîne un stress hydrique chez la culture. D'où pour avoir une bonne estimation de l'évapotranspiration sous la condition non standard il faut introduire le coefficient de stress hydrique dans l'équation qui permet de calculer l'évapotranspiration maximale. Ainsi, l'équation de la démarche simple du modèle FAO-56 décrit l'effet du stress hydrique sur la transpiration. Dans l'équation de l'évapotranspiration calculée à partir d'un coefficient cultural simple, il suffit de multiplier le coefficient cultural simple (Kc) par le coefficient de stress hydrique (Ks).

Pour déterminer une valeur du coefficient de stress hydrique Ks il faut d'abord connaître la quantité d'eau disponible dans le sol. Puisque les mesures de la réserve utile[32] dans le sol sont rares. Nous avons utilisé, dans un premier lieu, les valeurs existantes dans la littérature, notamment, réalisés par Henia., L et Mougou.,R 1995 ; Ben Hassine,. H et al 2002 (tableau, 18). À partir de ces documents nous avons pu représenter une carte de la réserve utile pour le bassin versant de la Mejerda.[33] Dans un deuxième lieu, nous avons déterminé l'humidité du sol par la méthode de contraste local de l'indice de différence entre la végétation et l'eau (CLDVW) pour en déduire le coefficient de stress hydrique.

$$ETR = (Ks * Kc) * ET0$$

Tableau 18 : Densités apparentes (da) et réserves utiles (RU en % et en mm) dans quelques stations de la région

Profondeurs en cm	Vertisol (Béja)			Sol peu évolué (Béja)			Sol isohumique (Le Kef)			Sol peu évolué (Le Kef)		
	da	RU (%)	RU (mm)	da	RU (%)	RU (mm)	da	RU (%)	RU (mm)	da	RU (%)	RU (mm)
0-20	1,131	28,05	63,4	1,250	25,86	64,7	1,263	20,87	66,6	1,298	22,99	59,7
20-40	1,225	22,63	55,4	1,442	20,89	60,2	1,310	20,20	52,9	1,345	19,47	52,4
40-60	1,225	31,47	77,1	1,442	23,70	68,4	1,390	21,77	60,5	1,345	18,94	50,9
60-80	1,373	25,41	69,8	1,447	23,05	66,7	1,313	19,74	51,8	1,508	15,16	45,7
80-100	1,373	26,63	73,1	1,451	25,29	73,4	1,468	22,88	67,2	1,508	12,51	37,7
100-120	1,343	33,39	89,7	1,451	22,55	65,4	1,468	24,51	72	1,634	12,17	39,8
Total 0-60 cm			159,9			193,3			180			163
Total 0-120 cm			428,5			398,8			371			286,2

Source : Ben Hassine,. H et al., 2003

[32] Nommée aussi la réserve hydrique des sols
[33] Les résultats sont exposés dans la deuxième partie

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

3.2.4.2. Apport de la télédétection spatiale

Plusieurs auteurs ont confirmé qu'il existe un rapport entre l'humidité du sol et le coefficient de stress hydrique (Ks) (Allen et *al.,* 1998 ; Sandhot *et al.* 1999 ; Duchemin et *al.,* 2009 ; Amri R., 2013 ; Zribi, al., 2014).Dans ce contexte l'approche nécessite la réalisation de deux étapes :

a. Etape1 : l'évaluation de l'humidité du sol

L'humidité du sol maintient la vie de la végétation et permet sa croissance. Elle conditionne également la mise en place du peuplement végétal (germination des semences, émergence, implantation du système racinaire). Simonneaux en 2007 avance l'hypothèse suivante : la connaissance de l'humidité du sol dans les cinq centimètres premiers, peut donner une image assez claire sur la réserve utile dans le sol. Ainsi, l'évaluation de l'humidité du sol est donc importante dans la mesure où elle admet le suivi de la valeur du point de flétrissement de la végétation présente sur le sol et de la capacité au champ[34]. Dans ce contexte l'évaluation de l'humidité du sol peut être réalisée par le biais de deux approches :

- *Approche TVDI : Temperature vegetation dryness index*

Cette approche admet la relation entre la température du sol et l'indice de la végétation (Ts/NDVI) pour obtenir des informations sur les différents états de surface du sol. Pour ce faire le canal thermique et ceux du visible et proche infrarouge s'avèrent bien convenir pour le suivi de l'état de la végétation, particulièrement en rapport avec l'humidité du sol (Medoulo et *al.,* 2000 ; Zribi, *al.*, 2014). L'indice NDVI est un indicateur classique pour étudier le stress de la végétation. En effet, la sénescence de la végétation est en étroite relation avec la quantité d'eau disponible dans le sol. La température de surface du sol constitue également un indicateur pertinent pour estimer l'humidité du sol. Pour un même type de sol ayant la même couverture, la température de surface décroît avec l'augmentation de l'humidité du sol.

En se référant au schéma conceptuel de la figure 35, on remarque que la limite supérieure du triangle définit les types de surface où la réserve en eau du sol est limitée (bordure sèche). À l'inverse, la limite inférieure correspond aux types de surface où les conditions d'alimentation en eau sont bonnes (bordure humide). Ainsi, pour avoir des informations relatives à l'humidité du sol, un indice de sécheresse (TVDI) ayant la valeur1 sur la bordure sèche et la valeur 0 sur la bordure humide, peut être défini comme suit :

[34] - Point de flétrissement : les plantes extraient l'eau du sol, cette extraction est possible jusqu'à une certaine valeur limite de la teneur en eau du sol; les racines doivent vaincre la force qui retient l'eau et qui augmente avec le départ de l'eau; au-delà d'une certaine valeur, la plante ne peut plus vaincre la tension et satisfaire son besoin, elle flétrit. Le point de flétrissement d'une plante varie d'une espèce à l'autre. Le volume d'eau disponible pour les plantes est appelé "réserve utile"
- Capacité au champ : volume maximal d'eau qu'un sol peut retenir.

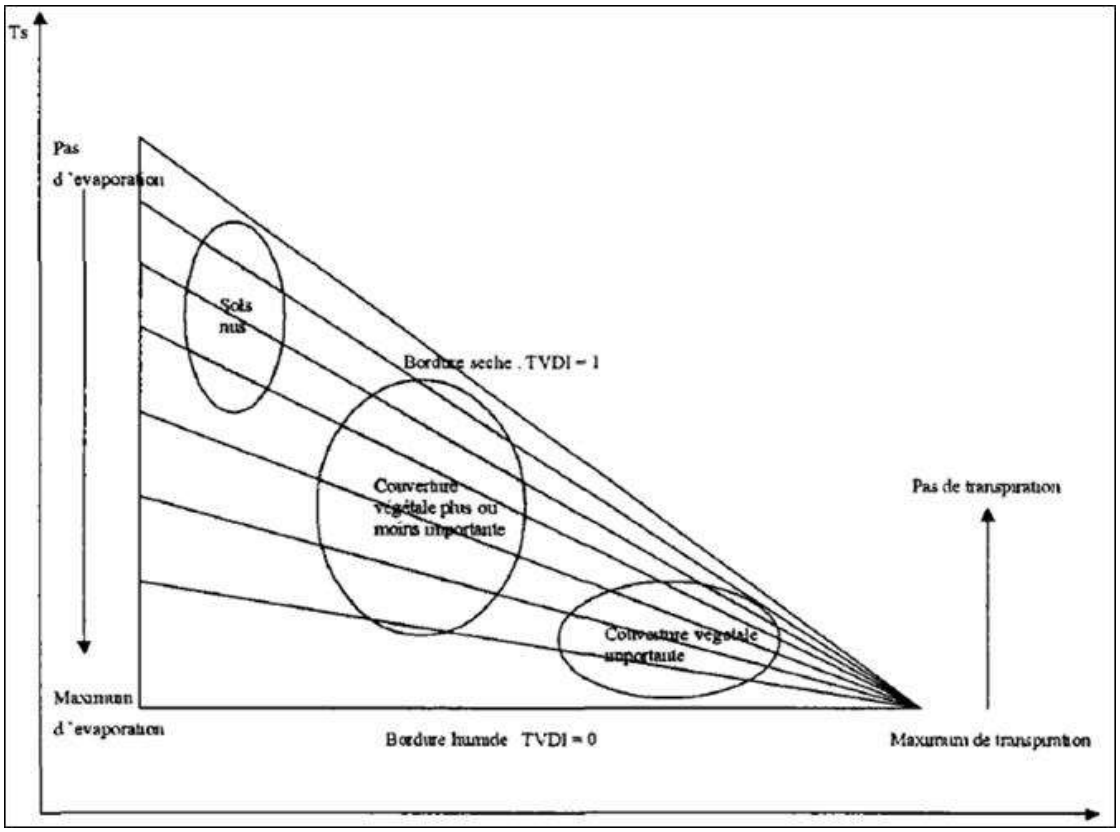


Figure 34: Schéma conceptuel de l'indice de sécheresse (TVDI) (In. Medoulo et *al.,* 2000)

$$TVDI = \frac{Ts - Ts\ min}{a(NDVI + b) - Ts\ min}$$

Avec :
Ts est la température de surface du pixel ;
Ts min est la température de surface minimum dans le triangle ;
NDVI est l'indice de végétation du pixel ;
a et b sont les coefficients de l'équation définissant la droite de régression qui constitue le bord supérieur du triangle (Ts = aNDVI + b).
La température de surface est calculée par le produit MOD11A1 du capteur MODIS-Terra en Kelvin il faut la convertir en degré Celsius.

Pour mieux estimer les paramètres *a* et *b,* on doit travailler sur une zone suffisamment large regroupant plusieurs types d'état de surface (sec, humide, présence et absence de végétation, etc.). Cette méthode d'estimation de l'indice de sécheresse est fondée sur les hypothèses suivantes (Medoulo et *al.,* 2000) : (1) le volume de la réserve en eau du sol est le facteur principal dans la variation de la température de surface; (2) TVDI est relatif aux variations d'humidité du sol liées à l'inertie thermique, à l'évaporation et à l'évapotranspiration.

- *Approche CLDVW: Contraste Local de l'Indice de Différence entre la Végétation et l'Eau*

Cette approche se base sur l'évaluation de la différence entre NDVI et l'indice normalisé de différence d'eau (NDWI). Elle a été appliquée par Djamai N (2009) en Tunisie dont

les résultats encourageants en vue de déterminer l'Humidité du sol. Les deux indices sont calculés comme suit :

$$NDVI = \frac{PIR - R}{RIR + R}$$

Avec PIR proche infrarouge et R le rouge

$$NDWI = \frac{PIR - MIR}{PIR + MIR}$$

Avec PIR proche infrarouge et MIR moyen infrarouge

Dans le moyen infrarouge MIR, les variations locales de la réflectance sont sensibles à l'évolution de l'humidité de la surface. Cette bande est très utilisée pour la détection de la teneur en eau de la surface. Ailleurs, le rouge et en dehors des bandes d'absorption de la vapeur d'eau, la réflectance est plus influencée par les mêmes facteurs affectant le rayonnement moyen infrarouge, mais non par la teneur en eau (Fensholt, 2004). Enfin l'indice de l'humidité du sol est obtenue par :

NDVI-NDWI

b. Étape 2 : calcul du coefficient de stress hydrique (Ks).

Le modèle de la FAO appliqué ici, prouve l'existence d'une relation entre le Ks et l'humidité du sol. À partir de cette relation configurée dans la figure 36 nous pouvons ajuster les valeurs du Ks sur la deuxième diagonale avec un algorithme détaillé dans la deuxième partie, en déterminant la pente par l'équation de type :

Y= ax+b

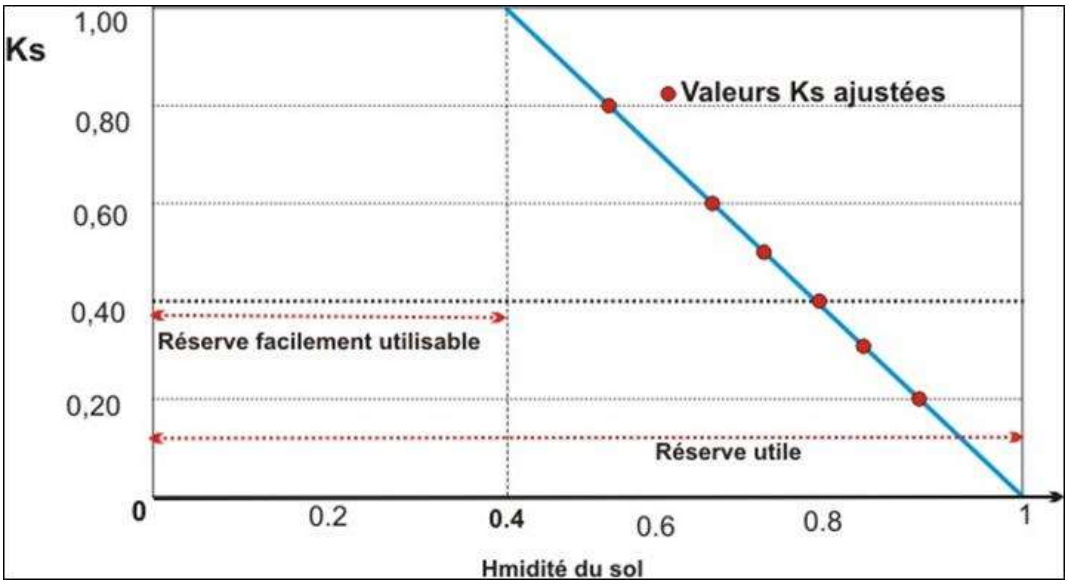


Figure 35: Schéma théorique pour ajuster le Ks (inspiré de Allen et *al.,* 1998), (les valeurs de Ks sur l'axe des ordonnées et les valeurs de l'humidité du sol sur l'axe des abscisses représentes des indices sans dimensions, et ce pour faciliter la procédure de l'algorithme calcul de ces deux paramètres par l'outil informatique

Pour valider les valeurs de l'ETR nous avons recours à l'algorithme réalisé par Qiaozhen Mu et *al*,. (2011) (figure 37). Cet algorithme sera détaillé aux annexes. Nous avons appliqué l'équation de cet algorithme dans l'article publié à AIC (Mjejra M. et *al.,* 2012 ; voir annexes).

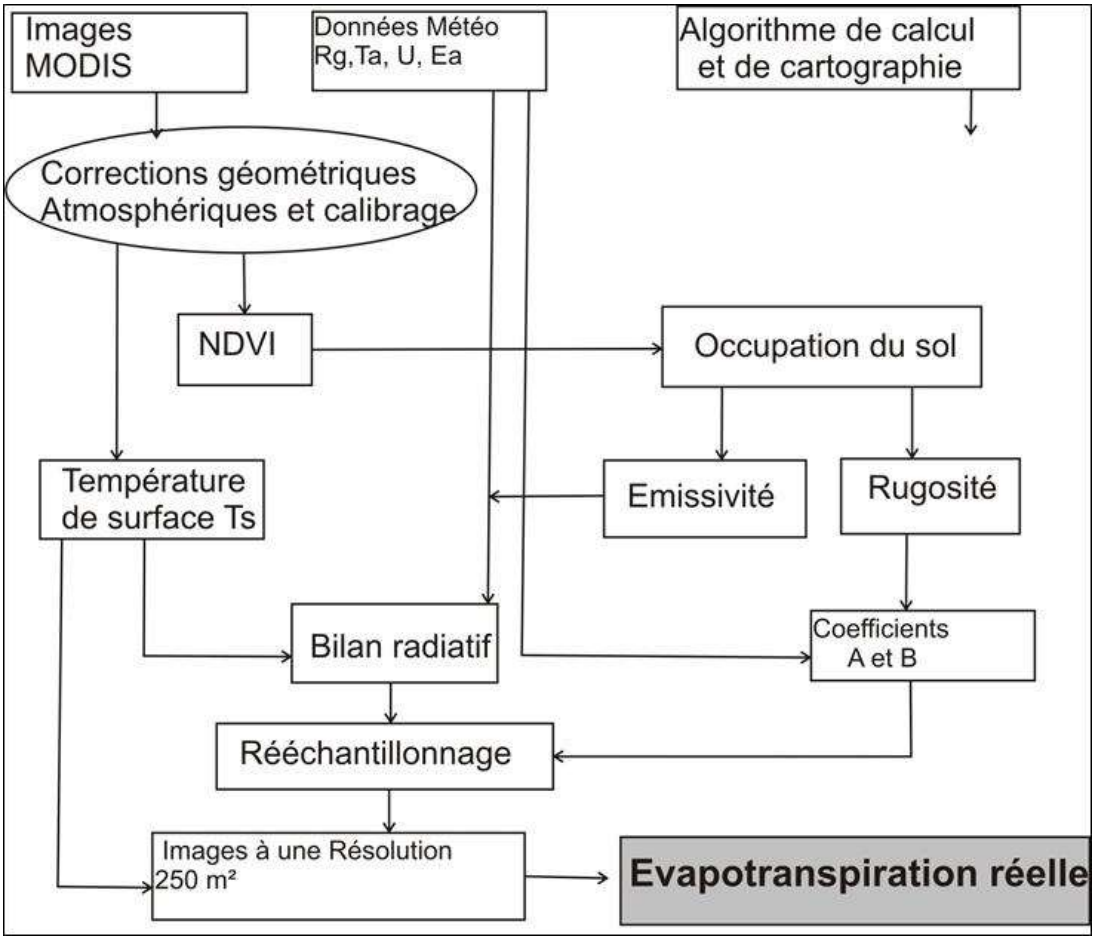


Figure 36: Organigramme de calcul de l'ETR ajusté pour la région d'étude (inspiré d'Qiaozhen Mu et *al.,* 2011)

Au total, le croisement du modèle FAO-56 et la technique de la Télédétection spatiale dans un Système d'Information géographique, permettant de déterminer l'évapotranspiration sous ses trois formes (ETP, ETM et ETR) à tout point dans le bassin versant de la Mejerda. En fait, le degré de la validité de ce modèle apparait assez clairement dans la littérature, est justifié d'une manière plus fine dans la deuxième partie. Le modèle FAO-56 qui a l'avantage d'intégrer l'essentiel des paramètres climatiques qui ont une influence directe sur l'évapotranspiration, température, humidité de l'air, durée d'insolation et vitesse du vent permet d'obtenir, dans l'ensemble, des résultats très satisfaisants par rapport à ceux mesurées sur cuves lysimétriques et il donne un rapport de 0,95 (Diop, 2009).

3.3. Méthodologie pour déterminer la déficience d'évaporation

Le modèle de la FAO-56, permet de calculer l'évapotranspiration potentielle (ETP), l'évapotranspiration maximale (ETM), l'évapotranspiration réelle (ETR) et le déficit hydrique. L'expression de déficit hydrique est utilisée dans certains cas comme un déficit d'évaporation (DE) qui sert à quantifier l'intensité des épisodes secs (Mounier, 1977 ; Mahalakshmi *et al.*, 1987 ; Dubreuil, 1994 et 1997 ; Samba et Diop, 2000 ; Lamy C., 2013). Ainsi, le comportement du déficit d'évaporation est lié aux paramètres climatiques (précipitations et évapotranspiration) pédologiques (réserve hydrique des sols) et biologiques (stade phénologique de la végétation).Ce chapitre présente le déficit d'évaporation en tant que manque d'eau pouvant provoquer le stress hydrique pour le couvert végétal (Lamy C., 2013).

3.3.1. Concept de la déficience d'évaporation

Rappelons que la déficience d'évaporation (ou déficit) signifie, globalement, un manque d'eau. De ce fait, il représente un déficit d'eau pour l'hydrologue (différence entre ETP et ETR), l'agronome utilise l'expression la déficience agricole (différence entre ETM et ETR). Selon la définition donnée par la FAO-56, le besoin en eau d'une culture est *« la quantité d'eau nécessaire pour couvrir les pertes en eau par évapotranspiration d'une culture saine, cultivée en grande parcelle, sans contraintes du sol (fertilité et humidité), et réalisant son potentiel de production sous les conditions considérées »* (Allen et *al.,* 1998). Cette définition correspond à l'évapotranspiration maximale d'une culture (ETM) qui dépend de la demande climatique ou de l'évapotranspiration potentielle (ETP) et du coefficient cultural (Kc). Ainsi, déterminer les besoins en eau des cultures revient dans la pratique à déterminer les quantités d'eau perdues. Pour Girardin (1999) « *il y a un stress chez le maïs quand l'état hydrique perturbe le métabolisme. Cela sous-entend qu'il y a des répercussions directes plus ou moins rapides sur la croissance des organes et leur développement ».* Par ailleurs, Lamy C en 2013 considère que *« le déficit d'évaporation traduit le manque d'eau éventuel pour la plante du fait des conditions climatiques. Il correspond au stress hydrique de la végétation. La réserve hydrique représente la teneur en eau dans les réserves utiles des sols à un moment donné* ». À cet effet, le déficit d'évaporation est en relation étroite avec le stock d'eau dans le sol et les comportements de la végétation. Cette grandeur[35]peut être calculée à partir des valeurs de l'ETM et celles de l'ETR trouvées pour chaque pixel la formule suivante :

Déficience d'évaporation = Besoin (ETM) - Consommation (ETR)

Cette formule se base sur l'évapotranspiration maximale et non pas l'évapotranspiration potentielle, c'est dû à la prise en compte de l'occupation du sol et la présence d'une grande corrélation entre l'ETM et l'ETR (Dubreuil V., 1995 ; Lamy., 2013). On a trois relations entre l'ETR et l'ETM :

[35]*Il est à noter que certains auteurs utilisent les expressions du déficit en eau, déficit hydrique pour décrire le déficit d'évaporation.*

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

Premièrement, tant qu'il y a de l'eau dans la RFU (réserve facilement utilisable), c'est à dire que la réserve reste supérieure à la RDU (réserve difficilement utilisable), et tant que la température de l'air ne dépasse pas 30°C et ne descend pas au-dessous de 9°C, la végétation sera en théorie en évapotranspiration maximale (Kaicun W. et *al.,* 2006). On considère que la plante reste à son niveau de consommation optimal, la plante pourra donc répondre à la demande climatique, on aura ainsi la relation suivante :

ETR = ETM

Puis si la RFU s'est vidée ou si les conditions climatiques (températures trop fortes ou trop fraîches) ne sont pas favorables à la végétation. Cette dernière ne sera plus en régime d'évapotranspiration maximale mais en évapotranspiration réelle. Cette évapotranspiration réelle sera inférieure à une évapotranspiration maximale, la plante va fermer partiellement ses stomates, on va alors considérer la relation suivante :

ETM > ETR

Enfin, si le coefficient cultural est trop pessimiste pour calculer l'ETM ou si l'ETP mesurée est fausse et trop pessimiste, on pourra voir la relation suivante :

ETM < ETR

Il est donc important de quantifier la quantité d'eau perdue par évapotranspiration. Les travaux réalisés depuis plusieurs décennies jusqu'à nos jours sur la détermination des besoins en eau des cultures, s'orientent essentiellement, soit vers des approches expérimentales (méthodes dites directes), soit vers des approches basées sur des modèles (méthodes dites indirectes ; Vidal A., 1996).

Dans ce travail l'étude du déficit d'évaporation est utilisée pour déterminer le zonage climatique dans le bassin versant de la Mejerda. Ceci est réalisé par la délimitation des secteurs secs et humides et les secteurs de transition d'autant plus pour une région allant du subhumide dans l'extrême nord et le semi-aride sur les limites sud. Puisque le déficit d'évaporation correspondant à un manque de disponibilité de l'eau dans le système sol- plante-atmosphère, l'analyse de ce bilan permet donc de cerner la période de son apparition, son évolution au cours de l'année et l'impact sur la végétation. Les perspectives du calcul du déficit d'évaporation concernent aussi, le suivi de l'intensité et la fréquence des épisodes secs, quantification des besoins en eau de la végétation et la détermination du déficit de production globale d'une plante.

3.3.2. L'approche pour déterminer la déficience d'évaporation

3.3.2.1. Approche directe par l'évapotranspiration (ET)

Dans ce travail nous avons affiné la méthode utilisée par Girardin et nous avons proposé une nouvelle piste pour déterminer le déficit d'évaporation.

- ***le déficit maximal***

On désigne par la déficience d'évapotranspiration maximale (DEM) la demande evaporatoire de la végétation lorsqu'elle est dans un état d'alimentation d'eau optimale. Il est déterminé par l'équation :

ETP – ETM(en mm)

À l'aide de ce rapport on peut tout à fait apprécier l'état d'alimentation en eau de la plante. On peut en déduire également le niveau de satisfaction des besoins en eau. Dans le même ordre d'idée, on peut déterminer l'intensité de ce déficit que subit le couvert végétal par le rapport suivant :

ETP – ETM / ETP (en%)

Dans ce cas on parle du déficit d'évapotranspiration relatif (Mohamed M., 1999).

- ***le déficit réel***

Cette grandeur se définit par les pertes d'eau du couvert végétal sous forme d'évaporation lorsqu'il souffre de manque en alimentation d'eau. C'est ainsi que Thevenet G. et Couvreur F. (1988) proposent la différence ETM – ETR comme un indicateur de l'état de déficit d'évapotranspiration dans les conditions de stress hydrique et le rapport ETR / ETM comme un indicateur du niveau de satisfaction des besoins de la culture. Il est déterminé par l'équation :

ETM-ETR (en mm)

Également on peut également déduire l'intensité du déficit d'évapotranspiration réel de la végétation par le rapport :

ETM – ETR / ETM (en%)

Quoi qu'il en soit, l'approche dite « directe par évapotranspiration »parait séduisante sur le plan conceptuel bute sur l'indispensable évaluation des ETM et surtout ETR. Même s'il existe actuellement des évapotranspiromètres pesables pour mesurer directement l'ETR et l'ETM (Vilain, 1997), la plupart du temps on est confronté à l'estimation de ces paramètres par le biais du coefficient cultural pour l'ETM et pour l'ETR en se référant à une mesure directe de l'humidité du sol ou de l'état hydrique de la plante. Ce point sera analysé dans la deuxième partie.

3.3.2.2. L'approche indirecte indice du déficit hydrique (WDI)

De façon aussi indirecte on peut apprécier la déficience d'évaporation. C'est ainsi que Moran (1994) et Lagacherie (2010) ont développé un indice pour évaluer le taux d'évaporation des végétations totalement ou partiellement couvrantes. Le calcul de l'indice du déficit hydrique repose sur la température et la réflectance de la végétation et des conditions climatiques données (le rayonnement net, le déficit de pression de vapeur de l'air, la vitesse

du vent et la température de l'air). De plus, la figure 34 montre que le calcul de WDI repose sur la construction d'un trapèze où les quatre sommets correspondent aux conditions extrêmes de la culture en termes de taux de couverture et de température. La détermination de ce trapèze repose sur l'hypothèse de linéarité à ses bornes (Moran et *al.,* 1994).

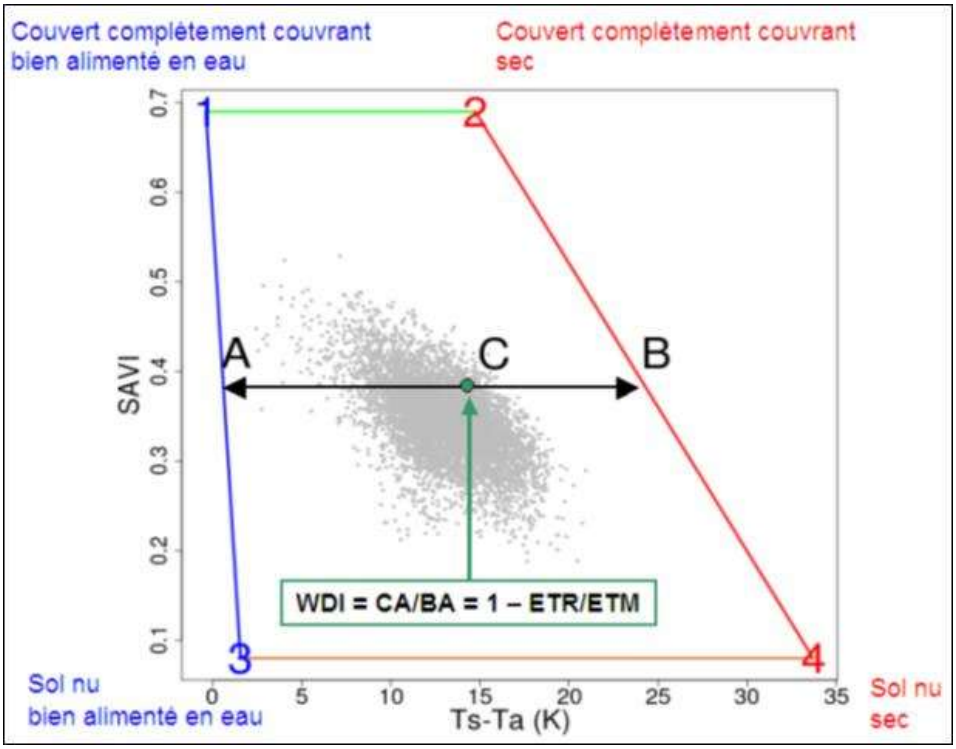


Figure 37: Le trapèze théorique et les différentes conditions de stress hydrique et de recouvrement de la végétation du continuum sol-plante (d'après Lagacherie Ph., 2010).

Le WDI (indice de déficit hydrique) du point C est donné par AC/AB

$$\mathbf{WDI} = \frac{(\boldsymbol{Ts} - \boldsymbol{Ta}) - (\boldsymbol{Ts} - \boldsymbol{Ta})\boldsymbol{L13}}{(\boldsymbol{Ts} - \boldsymbol{Ta})\boldsymbol{L24} - (\boldsymbol{Ts} - \boldsymbol{Ta})\boldsymbol{L13}}$$

Avec (Ts-Ta) : (Ts-Ta) pour un pourcentage de couvert donné
(Ts-Ta) L13 : valeur de (Ts-Ta) sur la ligne 1,3 (très irriguée)
(Ts-Ta) L24 : valeur de (Ts-Ta) sur la ligne 1,3 (très sèche)

Toutefois le pourcentage de la couverture de la végétation est estimé par les images satellites MODIS à travers les séries temporelles des NDVI. En plus le calcul du WDI montre des incertitudes dans le cas de couverts fortement hétérogènes où les effets d'ombrage peuvent être déterminants dans la caractérisation de la température de surface (Moran et *al.,* 1994).

Un autre paramètre utilisé par Météo-France, le SWI (Soil Wetness Index, Indice d'Humidité des Sols), est également utile pour suivre l'humidité des sols et s'avère ainsi complémentaire de la déficience d'évaporation (Lamy C., 2013).

$$SWI = \frac{w - w_{wilt}}{w_{fc} - w_{wilt}}$$

W : contenu en eau intégré sur la profondeur du sol
W wilt : contenu en eau au point de flétrissement

W fc : contenu en eau à la capacité au champ

Il est très difficile d'avoir une réponse claire et nette à la question quel est l'indicateur hydrique le plus pertinent pour rendre compte, à l'échelle de la parcelle, du stress hydrique dans la perspective de mise en relation avec le rendement ? Or les travaux de Tardieu et Bethonod (1990) portant sur trois indicateurs :

- réserve en eau du sol,
- mesure du potentiel hydrique du sol par tensiomètre,
- mesure du potentiel hydrique foliaire et conductance stomatique des feuilles

Ces trois indices donnent des résultats mitigés dans trois types de situations (essai en pot, essai au champ sans limite inférieure définie, essai en champ avec sol fortement tassé). Le bilan hydrique modélisé ici permet de calculer la déficience d'évaporation qui est un paramètre adapté au suivi des sécheresses. Dans un ordre pratique nous utiliserons dans ce travail l'approche directe tout en adoptant l'organigramme sur la figure 39.

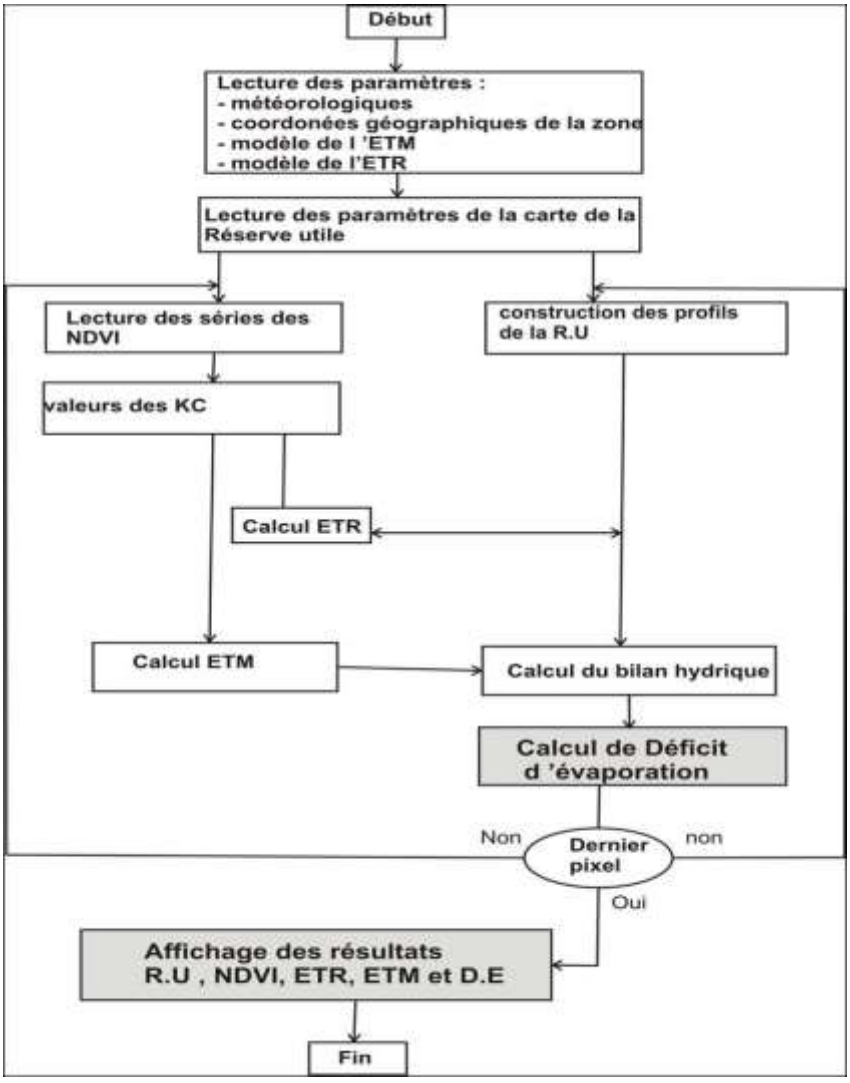


Figure 38: Organigramme de calcul de la déficience d'évaporation

3.3.3. Zonage la déficience d'évaporation dans le bassin versant de la Mejerda

3.3.3.1. Démarche suivie

Le zonage en climatologie est souvent utilisé pour distinguer la singularité des unités spatiales au sein même d'une région (Harrison *et al.*, 2000 ; Geerts *et al.*, 2006). Il peut, aussi, renseigner sur l'individualité climatique de chaque région (Henia L., 1993). Certes, l'analyse de la variabilité spatiale du climat permet également de fixer les limites spatiales et les zones de transition. En Tunisie, la démarche d'identification de la régionalisation climatique a été entreprise depuis plusieurs années. En revanche, peu de travaux ont cherché à caractériser la variabilité spatiale du climat et de développer des critères bien déterminés pour le cas d'un bassin versant aussi important que celui la Mejerda. C'est dans ce cadre que ce chapitre introduit la démarche et les critères retenus pour fignoler le zonage la déficience d'évaporation. En effet, l'objectif est double : d'une part déterminer l'intensité spatiale et temporelle la déficience d'évaporation et d'autre part distinguer la période et les secteurs du « confort hydrique » dans la région. C'est-à-dire, soit des limites claires entre des secteurs homogènes, soit des aires de transition entre celles-ci ; afin de distinguer les «noyaux forts» ayant connu un déficit élevé, les « aires de transition » et « noyaux faibles ». (Dubreuil v., 1992). La présente démarche consiste à établir un Système d'Information Géographique (SIG) permettant la spatialisation et la régionalisation des sorties du modèle de simulation de l'estimation de l'évapotranspiration et la déficience d'évaporation. Mais il faut d'abord identifier les critères et les indices utiles pour déterminer la délimitation de ce zonage. En fait, la question se pose sur la fiabilité de ce zonage et sur les critères à retenir.

La démarche retenue consiste à établir des cartes de la déficience d'évaporation par le calcul des indices en tout point d'espace à cartographier (figure 40). Le zonage est effectué à l'aide de l'indice retenu de la déficience (ou déficit) d'évaporation défini par DE= ETP-ETR (Dubreuil 1994). En fait, c'est une approche écophysiologique (interactions sol-climat-végétation) approche qui permet d'expliquer le fonctionnement du bassin versant. Elle permet de faire le lien entre le sol, le comportement de la végétation et la réserve d'eau dans le sol. Dans ce cas, nous devons déterminer l'état hydrique très variable dans la région étudiée par le recours aux nouvelles technologies telles que le SIG pour toute forme de cartographie, toutes échelles et croisement de cartes et la télédétection aéroportée. Le zonage ainsi réalisé permet de distinguer 4 classes de la déficience d'évaporation sur toute l'année :

- confort hydrique la déficience est nulle
- déficience faible
- déficience moyenne
- déficience élevée

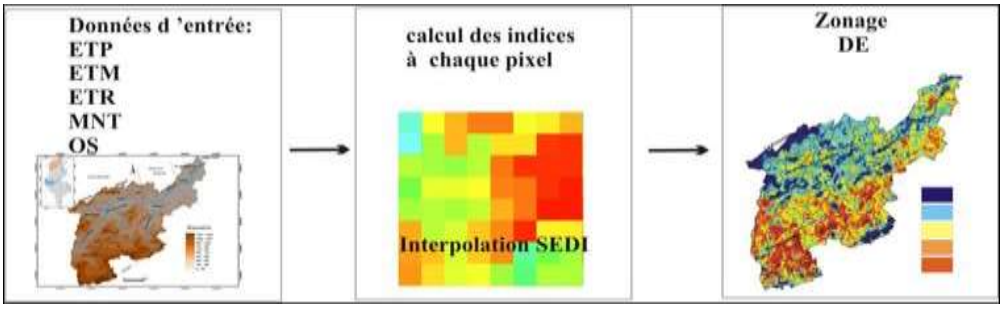


Figure 39 : Démarche de zonage de la déficience d'évaporation dans le B.V de la Mejerda

Pour voir encore mieux le principe de la démarche qui est fondée sur les noyaux forts, les noyaux faibles et les aires de transition. Ici on applique la méthode de classification ascendante pour distinguer la typologie de la déficience d'évaporation. Cette typologie associe des ensembles des secteurs homogènes à savoir :

- les pixels qui ont des fortes valeurs sont définis comme zones à déficit hydrique
- les pixels qui ont des valeurs nulles sont classés comme des zones de confort hydrique
- les autres pixels pouvant être rattachés à des zones de transition.

3.3.3.2. Identification des limites humides et limites sèches

Pour mener à bien les résultats de ce chapitre nous avons utilisé la méthode de seuillage afin de fixer le seuil humide et le seuil sec. Dans ce contexte, un algorithme de classification est réalisé en deux étapes pour déterminer le seuil « humide », puis discriminer le seuil « ses». Ceci se fait grâce à l'équation suivante :

(1 - ETR/ETM) * 100.

Mardes M., (1997)[36] a montré que Le taux moyen pour sur toute l'année a varié de 40% à 90%. Lorsque le résultat est proche de 100% on assiste à une zone humide ou une période de l'année humide. Le seuil critique en de ça duquel le seuil tend vers une limite sèche est fixé à 60% (Mardes M., 1997).

- **à l'échelle temporelle**

Il s'agit de distinguer une typologie de la déficience d'évaporation (nul modéré, élevé et très élevé) et ce à l'échelle annuelle pour identifier la durée de l'intensité de la déficience d'évaporation. C'est en quelque sorte déterminer la longueur de la saison sèche et la saison humide fondée sur l'étude de l'indice de la demande évaporatoire. De plus, distinguer la différence entre cette régionalisation et celle réalisée par les autres méthodes (bilan hydrique, sècheresse..) et expliquer les facteurs spécifiques sont, en grande partie, tributaires du stock d'eau dans le sol et du cycle végétatif (Mardes M., 1997).

La méthode adéquate est l'approche statistique :
- supérieur à 60% humide
- 40-60% modéré
- inférieur à 40% sèche

Une autre approche permet aussi de déterminer les saisons et en particulier d'approfondir la notion de mois humide et mois sèche en les classant en trois catégories (Riou, 1975):
- ETR < ETP/2, correspond à un mois sec
- ETP/2 ≤ETR < ETP, équivaut à un mois humide
- ETR = ETP, définit un mois très humide

Dans la même optique et si on considère les épisodes des pluies et d'irrigation ; on peut quantifier la déficience d'évaporation pour en déduire le mois sec et le mois humide (Monnier., 1977 ; Dubreuil., 1994 ; Lamy C., 2013) à partir des seuils suivants :

[36] Mardes Mohamed 1997 : Projet AGRIMA : application de la télédétection aux statistiques agricoles, action 4 modèle agro-météorologie de prévision de rendement des céréales

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

- mois hyper-humide P>ETP / RU reconstituée,
- mois humide P>ETP / RU non reconstituée,
- faible déficit P<ETP, DE<30 mm,
- mois sub-sec, 30 < DE < 60 mm,
- mois sec, 60 < DE < 100 mm,
- mois hyper ses, DE > 100 mm

On détaillera l'approche suivie dans ce travail dans la troisième partie.

- **à l'échelle spatiale**

On vise à établir un zonage de la déficience d'évaporation dans le bassin versant de la Mejerda et de relever les grands traits des sous-secteurs de la région suivant le degré de la déficience d'évaporation. D'un autre coté essayer de retracer les régions climatiques d'une région très contrastée allant de l'humide au semi-aride. La méthode adéquate est l'approche cartographique qui distingue entre :

- noyaux forts : zone humide
- noyaux faibles : zone semi-aride
- zones de transitions

Conclusion

Dans l'état actuel de la science et vue la complexité des processus d'évaporation physique et de transpiration végétale, il est difficile de réaliser et d'aboutir à des mesures directes et surtout en routine de ETP, ETM et ETR, et que seule une approche simplifiée est aujourd'hui possible, souvent à partir de l'estimation. Certes, la complémentarité d'approches, combinée selon une démarche inductive, accordée par le modèle de la FAO-56-télédétection satellitale selon une démarche déductive, par le biais de la méthode cartographique. Ceci a permis d'affiner davantage nos déductions et de construire un schéma régional détaillé de spatialisation de l'évapotranspiration et des facteurs de sa variation dans le BV de la Mejerda, ainsi que le zonage de la déficience d'évaporation.

Mais, nous avons calibré ce modèle pour le cas du BV de la Majerda, en modifiant si nécessaire les coefficients d'ajustements, notamment, les coefficients culturaux, seuils d'occupation du sol. Car la formule de Penman-Monteith, utilisée ici, est considérée comme la référence à l'échelle parcellaire n'est peut-être pas représentative de la demande évaporatoire à l'échelle du bassin versant. Ceci conduit à une recherche empirique des facteurs intervenant réellement à l'échelle de la région étudiée.

.

CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE

Cette partie, strictement méthodologique, a permis d'exposer les différents concepts liés à l'étude de l'évapotranspiration, de montrer l'apport d'une base de données assez riche pour mener à bien cette étude et de saisir les modèles les plus adéquats afin d'obtenir des résultats fiables. Ceci repose sur les sorties du modèle FAO-56 et la télédétection spatiale qui nous ont servi pour une cartographie de l'évapotranspiration sous ses différentes formes (ETP, ETM et ETR) et la déficience d'évaporation dans le BV de la Mejerda.

En somme, l'évapotranspiration est un concept marqué par beaucoup d'incertitudes, soit au niveau de sa mesure ou de son estimation. Viennent s'ajouter à tout cela, les caractéristiques très hétérogènes de la région étudiée. En effet, elle présente des contrastes climatiques et géophysiques. L'évapotranspiration est à la fois cause et conséquence du climat : le climat fixe la valeur de l'ETP tandis que l'ETM et l'ETR sont des éléments explicatifs du climat. Leur détermination et leur agencement sont liés aux facteurs atmosphériques, pédologiques et biologiques.

C'est à travers les relations établies entre les coefficients culturaux (Kc), calculés à partir des indices de végétation (NDVI), et l'évapotranspiration potentielle on a déterminé l'évapotranspiration maximale, qui elle-même combinée avec le coefficient du stress hydrique (Ks) détermine l'évapotranspiration réelle. Quant à la déficience d'évaporation est calculée à l'aide du rapport ETP/ETR. L'avantage de cette méthode est qu'elle nous a permis de spatialiser le modèle FAO-56 à l'échelle du bassin versant, pourtant il est considéré à l'échelle parcellaire, et ce grâce à l'imagerie satellitale (Duchemin, *al*., 2007 ; Simonneaux, *al*. 2009). Comme nous l'avons dit, cette méthode a donné des résultats fiables dans des régions similaires. On essaye de vérifier si c'est le cas pour le bassin versant de la Mejerda en Tunisie.

La perspective de l'étude la déficience d'évaporation laisse prévoir un zonage du BV de la Mejerda qui se diffère des ensembles régionaux habituels. La spatialisation la déficience d'évaporation permet de distinguer les sous-secteurs homogènes dans la région étudiée et il en est de même pour la typologie des mois secs et des mois humides. Ceci, par le biais l'approche cartographique et l'approche statistique, qui sont, par ailleurs, « maniables » au sein d'un Système d'Information Géographique (SIG). Enfin, l'étude s'articule autour de quatre questions cruciales : quelle formulation de l'évapotranspiration utilisée ? Quelles échelles spatio-temporelles sont-elles requises pour assurer la cartographie des trois formes de l'évapotranspiration (ETP, ETM et ETR) ? Quels ajustements effectués au sein d'une approche qui fait croiser le modèle FAO-56 et la technique de la télédétection pour le BV de la Mejerda ? Quels sont les critères retenus pour aboutir au zonage du stress hydrique dans le BV de la Mejerda à travers la typologie de la déficience d'évaporation ?

DEUXIÈME PARTIE
SPATIALISATION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION DANS LE BASSIN VERSANT DE MEJERDA

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

Sommaire

Deuxième partie : spatialisation de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda…… 97
Introduction……..99
Quatrième chapitre : spatialisation de l'évapotranspiration potentielle (ETP).....100
4.1. Approche méthodologique : l'interpolation SEDI.……100
4.2. Les niveaux annuels de l'évapotranspiration potentielle.....105
4.3. Les niveaux saisonniers de l'évapotranspiration potentielle……113
4.4. Le régime mensuel moyen de l'évapotranspiration potentielle …….....118
Cinquième chapitre : spatialisation de l'evapotranspiration maximale (ETM) 123
5.1. Approche méthodologique : les paramètres de base de la cartographie de l'ETM.....123
5.2. Les niveaux annuels de l'évapotranspiration maximale.....147
5.3. Les niveaux saisonniers de l'évapotranspiration maximale…….……152
5.4. Le niveau moyen mensuel de l'évapotranspiration maximale……161
Sixième chapitre : cartographie de l'evapotranspiration reelle (ETR) 165
6.1. Approche méthodologique : élément de la cartographie de l'évapotranspiration réelle……165
6.2. Les niveaux annuels l'ETR…….……174
6.3. Les niveaux saisonniers de l'ETR.....181
6.4. Le niveau moyen mensuel de l'ETR……187
Conclusion de la deuxième partie.....190

INTRODUCTION

La deuxième partie **« spatialisation[38] de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda »** est consacrée à l'étude de l'évapotranspiration sous ses trois formes (ETP, ETM et ETR) dans ses aspects géographiques et dynamiques. L'objectif est de caractériser la variation spatiale de l'évapotranspiration à l'échelle régionale du BV de la Mejerda en utilisant les différentes techniques de spatialisation. De même, nous essayerons de contribuer à la détermination d'un zonage du BV de la Mejerda, sinon distinguer « les aptitudes climatiques » des grandes unités « climatiques» et ce par le biais de l'étude de l'évapotranspiration. Peut-on distinguer, à travers l'évapotranspiration, une singularité climatique dans la région. La réalisation des cartes de l'évapotranspiration nécessite de prévoir des valeurs en tout point (ici le pixel) de l'espace considéré adéquat à partir de mesures ponctuelles (interpolation) ou exhaustives (télédétection).

Cette partie comprend trois chapitres. Le premier chapitre aborde la spatialisation de l'évapotranspiration potentielle. Il présente le principe de la méthode d'interpolation SEDI et l'analyse des niveaux moyens de l'ETP à l'échelle annuelle, saisonnière et le régime moyen mensuel. Le deuxième chapitre se focalise sur l'estimation des paramètres de calcul de l'évapotranspiration maximale, en particulier, l'occupation du sol et les coefficients culturaux. Il présente aussi la spatialisation de l'ETM dans le BV de la Mejerda. Une présentation de l'évapotranspiration réelle au niveau du modèle de simulation, sa variation et son régime mensuel saisonnier et interannuel occupera le troisième chapitre.

[38] On désigne par spatialisation (ou encore cartographie) de l'évapotranspiration, la représentation de la répartition spatiale de cet élément climatique. Le terme« cartographie » est comparable au terme « spatialisation » Farid TRAORE., 2000. La « spatialisation » du climat, définie récemment à l'occasion du COST 719 sur l'utilisation des Systèmes d'Information Géographiques (SIG) en climatologie et en météorologie (Tveito, 2007): « Ensemble de méthodes décrivant l'interdépendance de données voisines dans un jeu de données, dans un système de coordonnées typiquement cartésien ».

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

QUATRIEME CHAPITRE : SPATIALISATION DE L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE (ETP)

4.1. Approche Méthodologique : l'interpolation SEDI

On rappelle ici, que le principe méthodologique de l'estimation et de la spatialisation de l'évapotranspiration potentielle dans ce travail, dégagé déjà, dans la première partie, est basé sur le modèle de FAO-Penman-Monteith. Ce modèle est aujourd'hui recommandé par FAO comme un standard pour estimer l'ET_0. Comme on la déjà vu dans la première partie, ce modèle nécessite en entrée plusieurs paramètres climatiques (Tm, vent, humidité, rayonnement solaire…) qui peuvent provenir de mesures météorologiques. Les résultats permettent une spatialisation de l'ET_0, à travers l'utilisation de méthodes d'interpolation.

4.1.1. Principe de l'interpolation SEDI

Par définition *« l'interpolation spatiale est une procédure qui consiste à estimer la valeur d'un attribut pour des sites non échantillonnés »* FAO 1999. Autrement dit, à partir des points pour lesquels il existe des données d'évapotranspiration, nous pouvons identifier des valeurs pour les parcelles là où les mesures n'existent pas. En effet, la technique de télédétection satellitale constitue un moyen adéquat de spatialisation de l'ET0. Pour ce faire, on a eu recours à la méthode appelée SEDI (Satellite Enhanced Data Interpolation) comparable à la méthode de co-krigeage. L'interpolation SEDI tient compte des valeurs mesurées liées aux valeurs des images satellitaires qui présentent NDVI (Zhang., 2001). Cet indice est fortement lié à l'évapotranspiration dans la mesure où la méthode se fonde sur l'hypothèse selon laquelle, il existe une relation positive entre les données mesurées au sol et les données satellites (De Pauw., 2000 ; Bastianssen., 1995 ; Hammami, 2008). Elle vise à lancer des routines d'interpolation étendue, de données satellitaires et elle peut être appliquée à tout variable climatique dont les valeurs sont sous forme de points distribués dans l'espace. Ainsi, le principe de la spatialisation des résultats de l'ET_0 calculée par l'équation de FAO-PM à partir des données météorologiques mesurées dans la région, tient compte de la variabilité de l'occupation du sol. La procédure d'application de la méthode consiste à la présence de trois conditions (Traoré F., 2007) :

- la disponibilité du paramètre à interpoler, sous forme des points répartis dans l'espace (ici l'évapotranspiration potentielle) ;
- la disponibilité d'un paramètre de fond, sous forme d'un maillage, c'est-à-dire la même résolution spatiale pour chaque pixel pour l'espace étudié (ici carte satellite des NDVI) ;
- une corrélation positive ou négative entre les deux paramètres mentionnés plus haut (ici, la corrélation est positive entre l'ET0 et NDVI).

La méthode SEDI permet d'interpoler l'ETP sur la base de l'image satellitale de NDVI de 250m de résolution spatiale, de 16 jours répétitivité temporelle et elle renvoie en sortie l'ETP sous forme d'image ou de grille de données.

Mais dans certains cas, la méthode SEDI peut produire des valeurs extrêmes ou non représentatives de la réalité de terrain, en particulier, au niveau des sols nus et les surfaces marécageuses, et ce pour les travaux à grande échelle (charlier I., 1999).

4.1.1.1. Mise en œuvre l'interpolation SEDI

Notre objectif est de créer automatiquement une image interpolée de l'ET0. Alors, nous avons considéré pour l'ET0 calculée pour les 8 stations localisées sur le BV de la Mjerda les dimensions de l'image MODIS de la bande NDVI, comme paramètre[39] (ou maillage) de fond. En effet la mise en œuvre de la méthode passe par trois étapes expliquées dans la figure 41 (FAO, 1999) :

Étape1 : Extraction des valeurs de l'image et le calcul du ratio pour chaque valeur de point de l'ET0. La méthode SEDI identifie le pixel qui coïncide avec une station de l'ETP et donc extraire la valeur du pixel.

Étape 2 : celle-ci sert à la création d'une grille de rapport à partir du logiciel WinDisp qui permet à l'utilisateur de définir la distance entre les lignes de la grille, autrement dit la dimension du pixel. Le nombre de stations par point de grille détermine le nombre de stations compris dans le calcul d'un point dans la matrice de la grille. Le rayon maximal d'interpolation détermine si une valeur est calculée pour diriger dans la matrice de la grille. Si le nombre de stations autour de ce point de grille à l'intérieur de ce rayon est supérieur au nombre spécifié de stations, une valeur est calculée. Sinon, le point de grille est attribué à une valeur manquante, et l'image résultante sera 'vide' à ce point particulier.

Étape 3 : elle comprend la création de l'image par la méthode SEDI. Le principe est simple par la multiplication de la grille avec l'image satellite pour obtenir une valeur interpolée de l'ET0 et enfin on obtient une image de l'ETP par la multiplication de la grille de rapport avec l'image de fond.

Toutefois, l'exécution de la méthode se fait par le logiciel WinDisp5.1[40]. Ce logiciel permet de visualiser les résultats des interpolations sous forme cartographique et fichiers cartes (.img) en mode raster ou vecteur. Nous avons opté à exposer les cartes de l'ETP en mode raster, en raison de présenter l'information sur les figures avec une résolution spatiale très fine 250 m. Cette phase vise à reproduire le jeu de données pour maintenir une réparation spatiale originale du phénomène étudié. De plus nous avons effectué le calcul de l'ETP par le

[39]Les paramètres :

- Répertoire pour fichiers temporaires
- Fichier d'entré données Surfer
- Image de fond
- Relation positive ou négative (P / N)
- Nombre de pixels extraits par station (1, 5, 9, 13)
- Séparateur du fichier d'entrée des données Surfer (espace ou virgule))
- Donnée manquante dans fichier d'entrée
- Distance entre les lignes de la grille (kilomètres ou en mètres)
- Rayon de recherche pour interpolation (kilomètres)
- Nombre de stations proches à utiliser
- Fichier image de sortie
- Type d'image

[40] Nous avons utilisé la version 5.1 du logiciel WinDisp. Ce logiciel permet aux utilisateurs de comparer plusieurs images entre elles ; d'extraire des graphes à partir d'une série d'images satellite, par exemple durant une saison de croissance afin de la comparer à celle d'autres années; de construire de nouvelles images à partir d'une séries d'images; de construire des produits personnalisés en combinant des images, des cartes et des légendes spécialisées; de numériser de nouvelles cartes; et enfin d'afficher des données tabulaires sous forme de cartes.
WinDisp a été développé par Eric Pfirman, Justin Hogue et Linda See, les deux premières personnes ayant également développé IDA. Les routines IEDS - Interpolation Etendue de Données Satellitaires (SEDI - Satellite Enhanced Data Interpolation) incluses dans WinDisp 5.1 ont été développées par Peter Hoefsloot. La documentation du manuel d'utilisation de ce logiciel a été préparée par Eric Pfirman et Isabelle Charlier.

logiciel ETo-calculator développé par FAO. Nous ne reviendrons pas ici sur les caractéristiques de ce logiciel présenté dans la première partie.

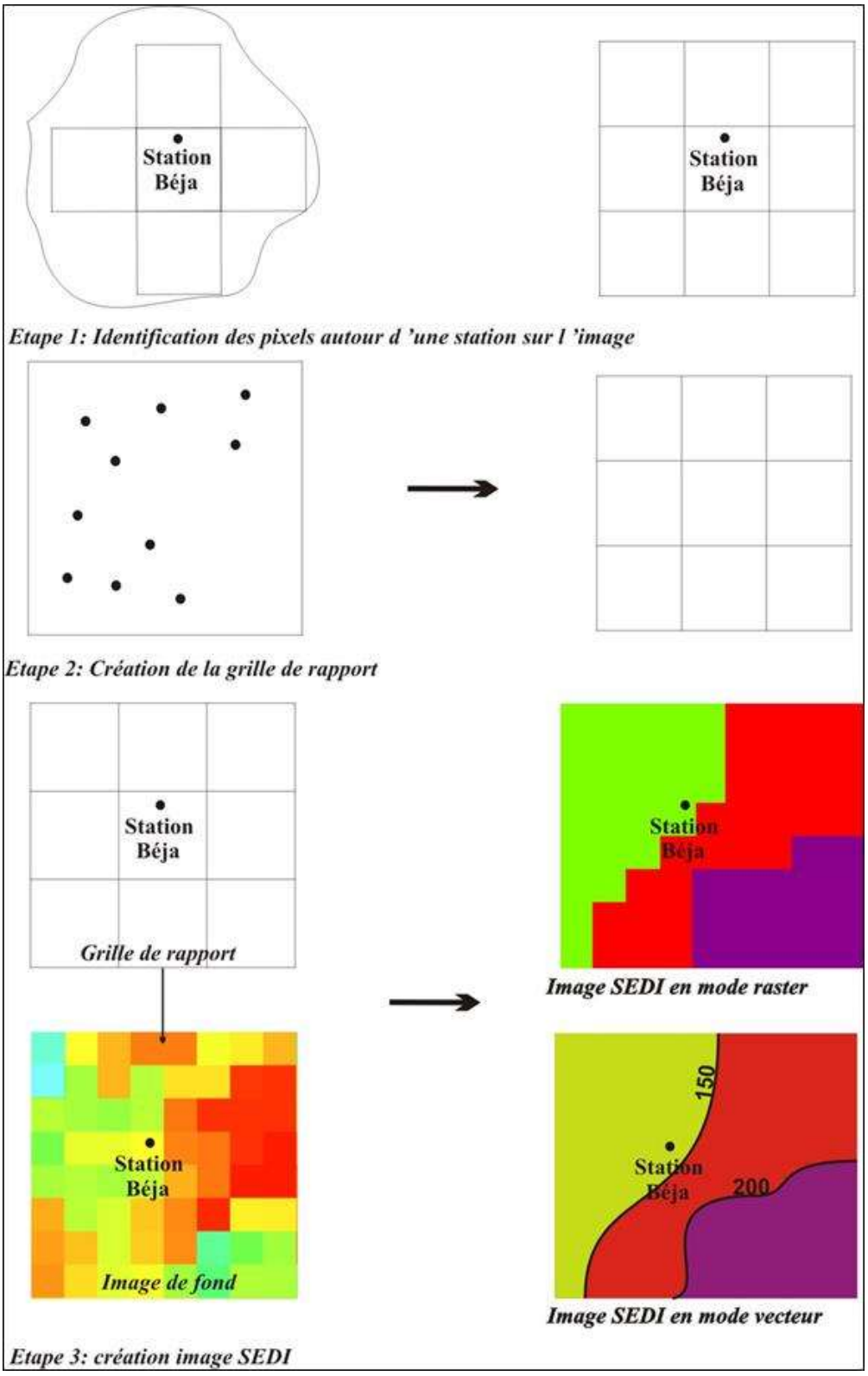


Figure 41: Procédure de la méthode d'interpolation SEDI

4.1.2. Problème de données de l'ETP en Tunisie

La Formule de Penman-Monteith, appliquée dans ce travail, donne des résultats fiables dans un cadre limité, mais leur généralisation sur un espace climatiquement hétérogène (BV de Mejerda) donne des valeurs discutables, en particulier dans le secteur du Haut Tell. Il s'est avéré que la formule de Peanman surestime l'ETP dans les stations du Haut Tell (Henia., 1993 ; Gammar et *al*., 2012). En l'absence des données mesurées sur l'ETP dans le BV de la Mejerda et pour plus de rigueur scientifique, nous avons essayé dans la mesure de la disponibilité de l'information de comparer nos résultats avec d'autres publiés dans des études antérieures. La comparaison va être effectuée uniquement pour les résultats obtenus par la formule de Penman et dans les stations où l'information est disponible. Ainsi, les valeurs de l'ETP calculée sont généralement supérieures d'environ 20 % aux valeurs mesurées (Hénia, 1993) et elles se diffèrent d'une région à une autre. En effet, *« c'est une limite méthodologique majeure dans l'utilisation des données de l'ETP dans les analyses géographiques »* (Gammar et *al*., 2012).

L'analyse du tableau 17 et les figures 42, 43 et 44 laisse retenir les renseignements suivants :

- les valeurs moyennes annuelles de l'ETP dans le BV de la Mejerda oscillent, généralement, entre 1100 mm et 1500 mm, et plus précisément entre 1200 mm et 1400 mm ;
- la répartition géographique de l'ETP se résume par le fait que les valeurs élevées occupent la vallée de la Mejerda et les plaines basses par contre les faibles valeurs sont associées aux secteurs d'altitude (les sommets de la Kroumirie, Jbels Ouergha, les sommets de la Dorsale) ;
- dans toutes les études la station de Jendouba se distingue par l'ETP la plus élevée de tout l'ensemble de la région, mais l'ETP la moins élevée est enregistrée soit à Béja ou dans les stations littorales ;
- dans ce travail, l'ETP annuelle calculée dans la station de Béja dépasse légèrement l'ETP calculée par Hbaib (2003) et Baccour (2012), respectivement de 28,6 mm et 16,3 mm soit 2,1% et 1,2% des quantités annuelles. Ces écarts semblent être assez faibles et n'influent pas sur l'allure annuelle de l'ETP dans le BV de la Mejerda.

Au total, la comparaison entre les différents résultats obtenus laisse conclure que nous résultats se recoupent avec les études antérieures, et ce pour les valeurs calculées de l'ETP.

Tableau 19 : comparaison entre des résultats obtenus de l'ETP calculée et les résultats obtenus dans les études antérieures

Référence / Station	Atlas de L'eau (2008)	Ben Boubaker	Hbaib et *al*., (2003) / ETP en (mm)	Baccour et *al*., (2012)/ ETP en (mm)	ETP calculée (mm)
Jendouba	ETP en iso-lignes, figure 44	ETP en iso-lignes, figure 43	-	1564,5	1497,6
Béja			1356,7	1369,1	1385,3
Tunis*			1448,3	1387,3	1320,5**

* station qui dispose de l'information météorologique la plus complète et située au bord du BV de la Mejerda et à 18 km de la Station de Cherfech / ** Station de Cherfech

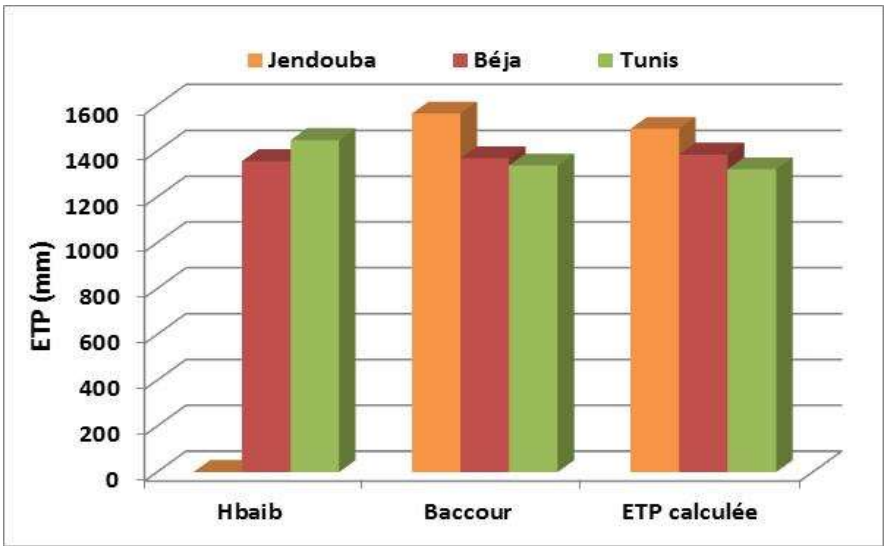


Figure 42 : Valeurs de l'ETP calculée et ETP obtenues dans des études antérieures

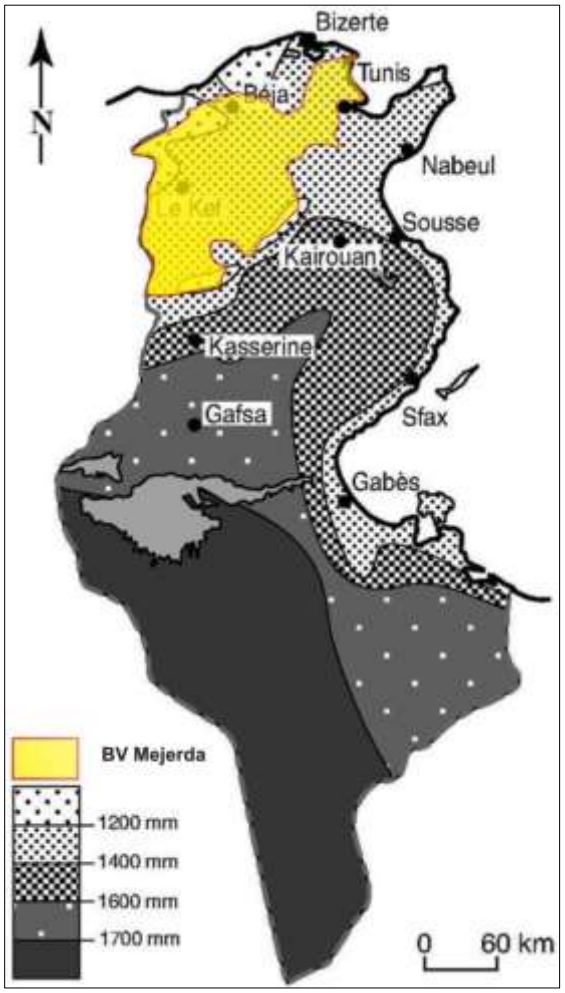


Figure 43 : Moyenne annuelle de l'ETP (mm) en Tunisie (source : Ben Boubaker et *al.,* 2003).

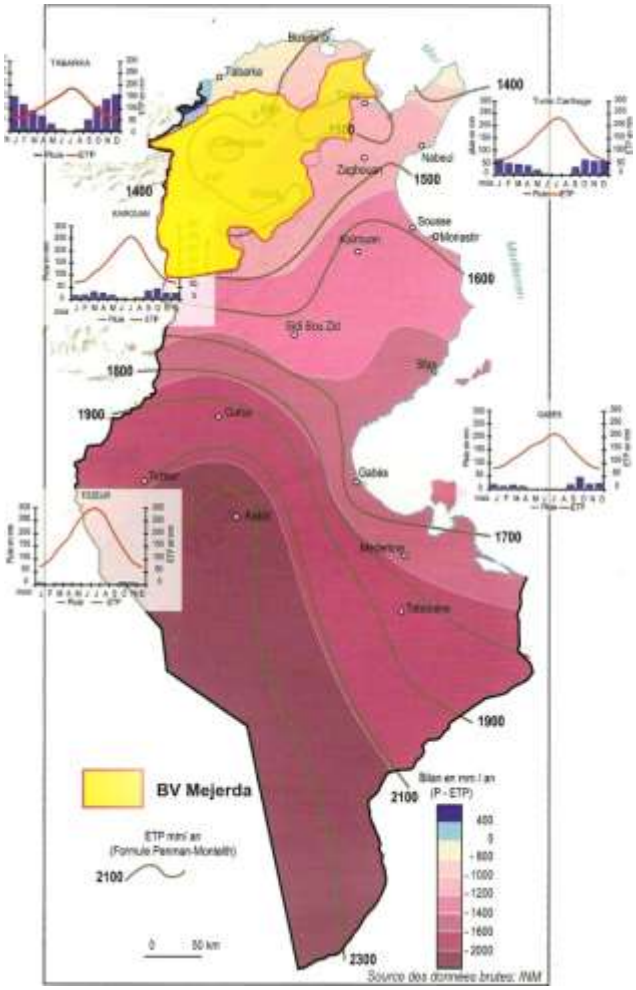


Figure 44 : Évapotranspiration potentielle et bilan hydrique climatique en Tunisie (Source : Atlas de l'eau sous Dir. Henia., 2008)

4.2. Les niveaux annuels de l'évapotranspiration potentielle

Les moyennes annuelles de l'ETP dans le BV de la Mejerda sont assez élevées. Elles témoignent une variation prononcée à la fois spatiale et d'une année à une autre.

4.2.1. Le niveau annuel de l'évapotranspiration potentielle

Considérant l'ensemble du B.V de la Mejerda, et l'échelle annuelle nous pouvons en déduire le comportement spatial de la répartition de l'ETP ainsi que les facteurs intervenants :

- du point de vue spatial l'examen des figures 45 et 46 relatives au cumul annuel de l'ETP laisse retenir les faits suivants :

- Les totaux de l'ETP estimés par le modèle FAO-56, sont plus moins élevés dans la mesure où les pertes d'eau varient, globalement, entre 1260 et 1500 mm/an, soit un rapport de 1,2 (rapport entre la valeur maximale et la valeur minimale) et une moyenne de 3,4 à 4,1 mm par jour. Cet état est en relation étroite avec l'effet du contexte climatique caractérisé par un pouvoir évaporant assez important, en particulier sous l'effet des facteurs radiatifs et advectifs. La répartition géographique manifeste une diversité remarquable dans la région. Ainsi, les totaux de l'ETP se dégradent du Nord au Sud et du littoral vers l'intérieur mettant en cause les effets du gradient hygromètrique (la position par rapport à la mer) et la latitude dans la variation spatiale (Henia L., 1993). Nous distinguons deux poussées opposées. le premier suivant un axe Sud-Nord, de Borj Amri à Ghar Melh, relatif à un gradient des valeurs dans le même sens, soit un écart relatif de 8,9 % (les valeurs varient de 1406,5 à 1281,6 mm/an) tandis que le deuxième poussée suit l'axe Nord-Sud de la rive gauche de la moyenne Mejerda, (au niveau de la station de Béja) au versant nord de la Dorsale, soit un écart relatif de 4,5 % (les valeurs varient de 1385,3 à 1450,3 mm/an).
- Il est important néanmoins de préciser que cette variation spatiale n'est pas uniforme sur toute le B.V de la Mejerda. Elle varie beaucoup d'un secteur à un autre. En effet, les noyaux des maxima de l'ETP sont localisés, essentiellement, sur la plaine de Jendouba, les bassins intra-telliens, la haute vallée de Mallègue et les hautes terres de Tala. Dans ces secteurs les pertes annuelles d'eau par évaporation oscillent de 1400 à 1500 mm, avec l'écart moyen absolu de 100 mm, soit environ 7% des cumuls annuels. En revanche, les sommets des Jbels de la Dorsale (au niveau Jbel Serij au Sud de Siliana), le versant sud de la Kroumirie (rive gauche de la Mejerda) et le delta de la Mejerda enregistrent les faibles valeurs de l'ETP en moyen 1260 mm à 1300 mm/an. Dans ce cas, la relation de l'ETP est inversement logarithmique par rapport, d'une part, à l'altitude (avec une baisse sensible sur les hauteurs) et d'autre part, à la mer (une baisse au fur et à mesure de l'intérieur vers le littoral). Enfin, nous pouvons distinguer une autre opposition concernant les versants des montagnes, dans la mesure où les versants exposés au Nord-Ouest évaporent moins que les versants exposés au sud-est. C'est l'exemple parfait de l'ensemble des collines et montagnes allant du Kef vers Teboursouk au sud du barrage de Sidi Salem, où les écarts entre les versants opposés oscillent de 80 à 120 mm/an.

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

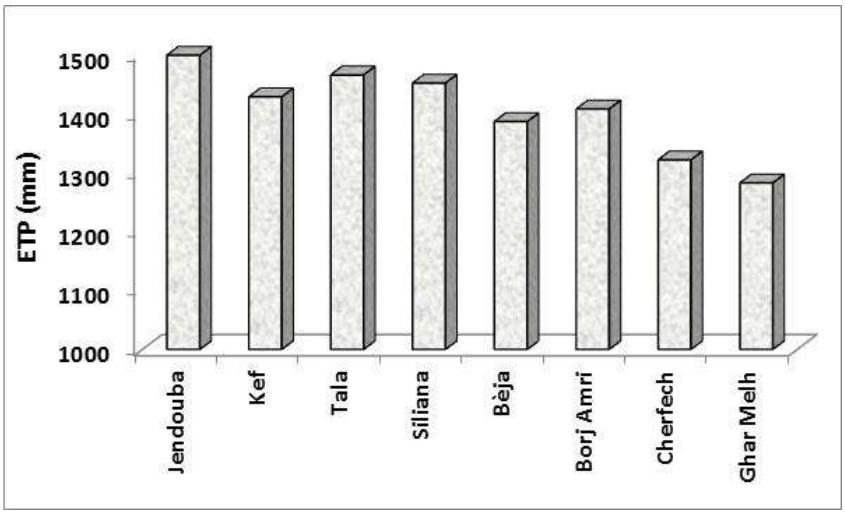


Figure 45: Total annuel de l'ETP dans les stations météorologiques (2000-2011)

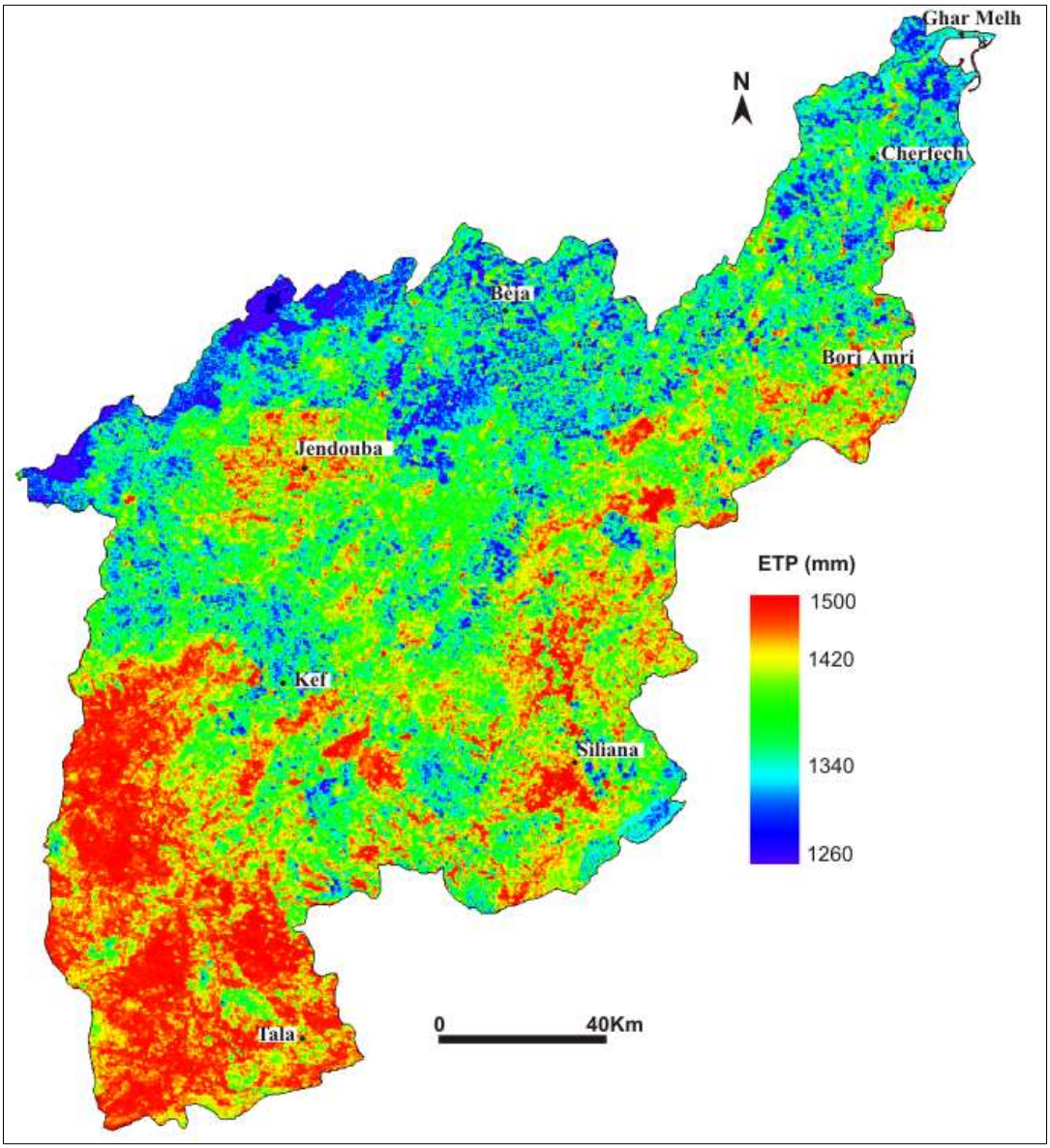


Figure 46: Total annuel moyen de l'ETP (en mm) dans le B.V de Mejerda (2000-2011)

- Ces traits majeurs de l'état annuel de la variation spatiale de l'ETP sont exprimés par la conjugaison de plusieurs facteurs géographiques (paramètres climatiques, relief, effet du site, latitude, la proximité de la mer) :

- Les **paramètres climatiques** : introduits dans la formule de la FAO qui caractérisent le B.V de la Mejerda tels que les températures élevées, les vents forts, un rayonnement solaire intense et un nombre important d'heures d'insolation, ces paramètres expliquent en partie les fortes valeurs de l'ETP. Les températures, par leurs niveaux élevés, constituent un facteur favorable à l'ETP. En effet, « *Pendant la saison chaude, où les maxima quotidiens atteignent et dépassent 40 °C à l'ombre, les volumes d'eau qui s'évaporent sont énormes. À titre d'exemple, l'évaporation Piche pendant cette saison en Tunisie est en moyenne de 5 à 13 mm/jour »* (Ben Boubaker et *al*., 2003). Les vents chauds et secs du secteur sud (Sirocco) sont les plus générateurs de dessèchement dans le BV de la Mejerda. À titre d'exemple, 45% des quantités de l'ETP à Béja sont imputables au facteur « vent » (Benzarti J., 2008). En ce qui concerne le rayonnement, il se manifeste comme la puissance d'énergie nécessaire à l'ETP (Beltrando et *al.,* 1995). La quantité reçue au sol varie de 400 à 500 cal / cm2 / jour. Ainsi « *en été, il dépasse 600, voire même 700 cal / cm2 / jour. Converti en son équivalent en eau évaporable, il dépasse 10 mm/jour, alors que la pluie est en moyenne de 0,1 à 0,3 mm / jour. En hiver, le rayonnement reçu au sol est de 200 à 300 cal / cm2 / jour. Exprimé en mm, il est de 4 à 5 mm / jour. Quant à la pluie, elle reste inférieure à 1,5 mm / jour, pour certaines stations du Tell »* (Ben Boubaker et *al*., 2003).

- L'effet du relief peut être distingué à travers **l'altitude**, et ce pour expliquer la manifestation des forts et des faibles noyaux du total annuel de l'ETP sur l'ensemble de la région étudiée. En fait, les secteurs élevés enregistrent des faibles ETP car ils sont exposés aux vents humides du Nord-Ouest. Ils sont plus arrosés que les plaines et les profondes vallées voisins et qui sont, essentiellement, *« dans une situation d'abri pluviométrique assez marquée »* (Henia, Sous Dir., 2008) en témoignant, donc, un pouvoir évaporant élevé et un effet significatif du relief. Une observation attentive de la figure 46 permet de constater que la variation spatiale de l'ETP est très irrégulière, d'ailleurs Seguin (1984) avait souligné la difficulté d'estimer la variation de l'ETP en fonction de l'altitude, en raison des multiples paramètres climatiques d'entrée de la formule de Penman-Monteith. Pa exemple, une irrégularité prononcée dans les bassins intra-telliens dans la mesure où on passe brutalement de 1298,2 mm, dans l'ensemble collinaire de ce secteur (les monts de Teboursouk, Jbel Massouj, Jbel Rihane…) à 1450 mm dans les dépressions de la vallée de oued Siliana (Gaâfour, Al Aroussa, Bou Arada…). Cet écart d'évapotranspiration de 151,8 mm, soit une différence du cumul de l'ETP de 11% dans ces secteurs en question, est assorti avec une dénivellation[41] topographique d'environ de 400 m. À partir de ce schéma nous pouvons confirmer l'hypothèse suivante : l'ETP diminue avec l'altitude, avec une corrélation presque parfaite. Mais il reste à démontrer le niveau de son gradient, ou moins à l'échelle annuelle. En effet le gradient calculé indique une dégradation verticale de la demande évaporative d'environ 37,5 mm chaque tranche de100 m d'altitude dans les bassins intra-telliens. Cela

[41] Le dénivelé : c'est la différence d'altitudes entre deux points, évalué en mètres.

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

signifie que l'ETP diminue avec l'altitude d'environ 0,10 mm par jour. À cet effet, le CIRAD (Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement) en 2003 *« a établi que dans la région Nord de l'île de La Réunion, l'évapotranspiration (ETP) décroît avec l'altitude de 0.1435 mm/jour pour une élévation altitudinale de 100 m, ce qui correspond à une diminution de 52,4 mm/an par tranche de 100 m ».* En revanche, l'irrégularité est légèrement distinguée sur les secteurs élevés. À titre d'exemple, dans les sommets de Dir-Kef où l'altitude varie approximativement entre 600 et 800 m, on enregistre un écart moyen alentour de 60 mm entre les sommets, soit 6,5% du cumul enregistré dans ces secteurs. Ceci laisse conclure que 60 mm de gradient altitudinal d'ETP correspond, globalement, à 200 m d'altitude, soit 30 mm pour chaque tranche de hauteur de 100. Ce résultat aboutit à un gradient de 0,08 mm par jour tous les 100 m d'altitude.

- L'effet du **site**, peut être saisi à travers le contraste, l'opposition entre les versants. Ainsi, l'ensemble des chaînons de montagnes et collines (d'une altitude supérieure globalement à 450 m), allant du Kef vers les monts de Teboursouk au sud de barrage Sidi Salem présente une nette opposition des totaux de l'ETP (figure 47). Les versants sud (l'adret) de cet ensemble enregistrent un palier d'ETP de 1380 mm/an à 1500 mm/an. Par contre, les versants nord (l'ubac) se distinguent par une perte de l'ordre 1300 à 1400 mm/an. Il est de même pour l'ensemble des monts de Sakiet Sidi Youssef et Jbel Ouergha et à l'Ouest du Kef (d'une altitude en moyenne de 700m). En effet, les versants nord enregistrent moins de 100 mm/an d'évaporation par rapport aux versants de la rive gauche du oued Mallègue. Cette dissymétrie entre les versants s'explique par leur position aux flux pluvieux dominats. En effet, les versants Nord-Ouest reçoivent en moyenne plus de 100 mm /an de pluie, à l'inverse les versants Sud-Est sont situés à l'abri pluviométrique (Henia., 1980). Aussi, les versants sud-ouest se distinguent par un fort rayonnement solaire, ce qui favorise le dessèchement, par contre les versants Nord-Ouest reçoivent moins de radiation, ce qui diminue le rythme d'évaporation.

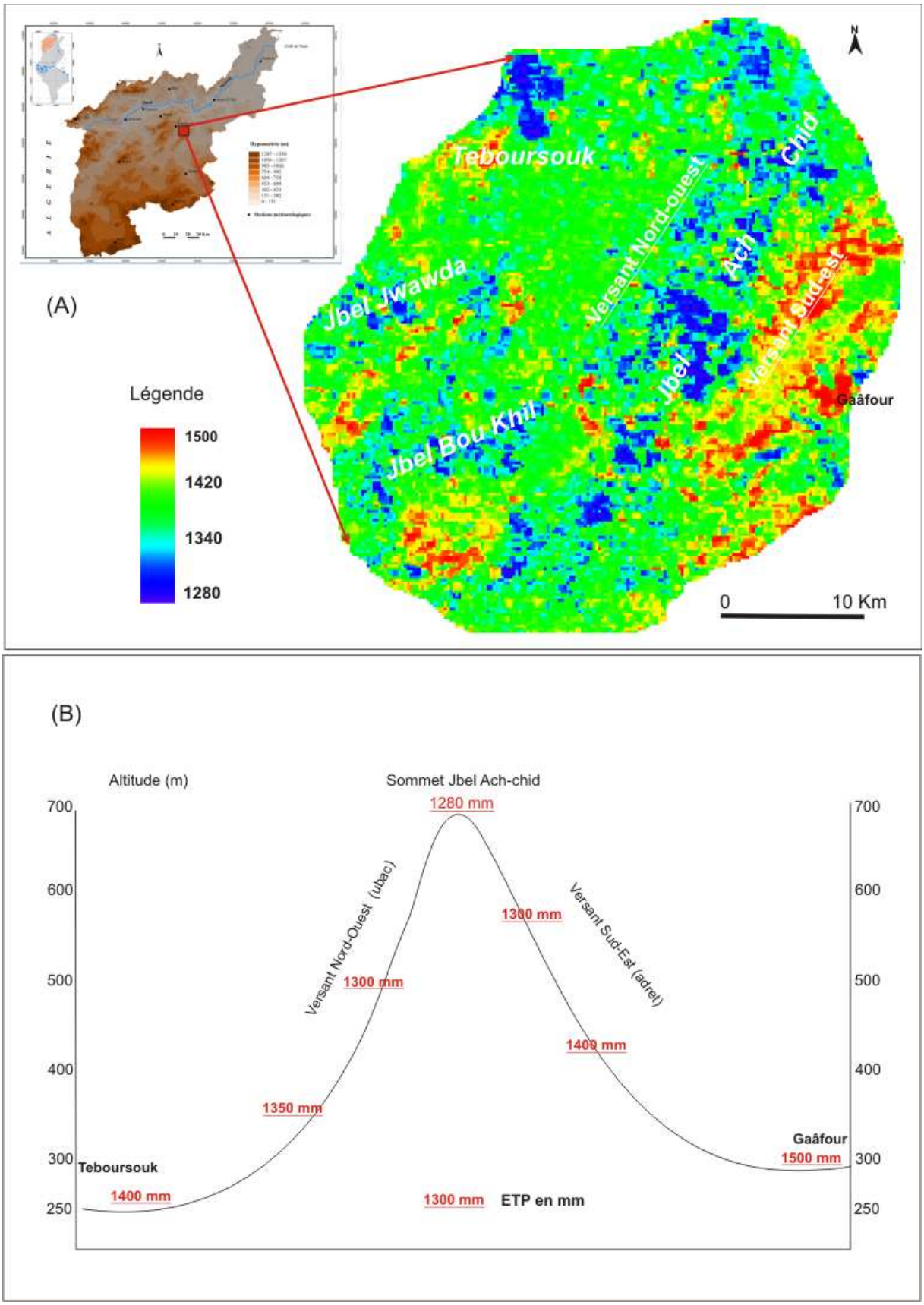


Figure 47: Opposition des versants : exemple des versants de Jbel Ash-Shid situés au Sud-Est de Teboursouk (A : extrait de la carte de l'ETP annuelle et B superposition des niveaux de l'ETP sur le profil des versants)

- Quant à **la latitude**, elle joue un rôle important au niveau du gradient Nord/Sud des valeurs de l'ETP, puisque on enregistre les faibles valeurs sur les limites nord de la région et les fortes valeurs sur les limites sud. Ainsi, sur une distance de 127 km (la distance entre les deux limites nord et sud : sommets de la Kroumirie et sommets de la Dorsale du côté Tala) l'écart s'élève d'environ 220 mm.

- La proximité de la mer et les surfaces humides : pour saisir le rôle de la mer nous nous sommes basés sur le transect allant de Tala, station franchement « continentale », à Ghar Melh, station typiquement littorale. Ce transect présente une dégradation sensible des cumuls de l'ETP d'ouest en est, avec un écart absolu entre les deux stations de 182,6 mm, sur une distance de 223 km à vol d'oiseaux, soit 0,82 mm chaque tranche de 1 km. En effet, *« la mer est une source de vapeur d'eau et d'énergie »* (Ben Boubaker., 2000). Ceci se manifeste par l'effet régulateur des ambiances climatiques, dans la mesure où il adoucit les températures, diminue la durée d'insolation et augmente l'humidité relative de l'air. En conséquence, on assiste à un pouvoir évaporant de l'atmosphère moins élevé sur le littoral qu'ailleurs. Cependant l'effet de la mer n'agit pas de la même ampleur dans l'ensemble de la région. Elle est plus intense au fur et à mesure qu'on se rapproche du littoral. À titre d'exemple, la variation spatiale de l'ETP à travers le transect, qui relie la station de Borj Amri (située à l'amont de la basse Mejerda) à la station de Ghar Melh (sur la cote) en passant par la station de Cherfech (au milieu de la région), n'a pas le même rythme (le tableau 20). La variation s'intensifie à mesure qu'on se rapproche de la mer et les surfaces humides (la majorité de ces surfaces sont entre Cherfech et Ghar Melh). L'effet de ces surfaces se traduit par la recharge de l'atmosphère par la vapeur d'eau, ce qui augmente l'humidité de l'air et diminue le rythme d'évaporation (El Garouni., 1995). L'on sait que la basse vallée de la Mejerda se caractérise par la présence de plusieurs surfaces humides telles que : Garaât Mabtouha, Lagure Ghar Melh, Sebkhet Arian, domaine d'Utique… ces surfaces influent, sans doute, sur l'allure de la répartition de l'ETP dans ce secteur.

Tableau 20 : Comparaison de la variation de l'ETP dans la basse Mejerda (transect : Bor Amri-Cherfech- Ghar Meleh)

	Borj Amri			Cherfech			Ghar Melh		
Borj Amri	0	0	0	27,6	6,4	86	58,2	9,3	125
Cherfech				0	0	0	30,6	6,4	39,1
Ghar Melh							0	0	0
Légende		Distance (m)			variation relative (%)			Écart absolu (mm)	

Au total, le BV de la Mejerda se caractérise par un niveau annuel de la demande évaporative assez important et très irrégulier dans l'espace, essentiellement, dans les secteurs intérieurs de la région. Ceci met en évidence le rôle déterminant joué par le rayonnement solaire et l'effet du relief dans la compréhension de la variation spatiale de l'ETP (Benjamin B., 2007).

4.2.2. La variabilité interannuelle de l'évapotranspiration potentielle

La variabilité interannuelle de l'ETP est étudiée sur une période de 11 ans (2000-2011), sans aucun doute, cette série de données ne permet pas de faire une étude judicieuse de la statistique de la variabilité de l'ETP. En réalité, l'étude de la variabilité dynamique de l'ETP dépasse le cadre de ce travail. Cependant, notre objectif est de dégager quelques nuances utiles sur le comportement de la variabilité de l'ETP tout en mettant en cause la notion du temps, même si d'une manière globale. Il se dégage de la figure 48 et le tableau 21 les remarques suivantes :

- Durant la période étudiée la variabilité interannuelle des quantités de l'ETP n'est pas uniforme, dans toutes les stations. Les valeurs oscillent, généralement, entre 1175,2 mm à Ghar Melh et 1599,6 mm à Jendouba, soit un écart de 424,4 mm et le rapport entre ces deux extrêmes s'élève à 1,4 fois. Cette répartition justifie l'opposition climatique, en Tunisie, entre les stations littorales et les stations de l'intérieur. C'est ce qu'on désigne aussi par « l'indice de la continentalité[42] ». Ce dernier « *varie dans le bassin versant de la Mejerdah de moins de 15 à plus de 40%* » (Rodier et *al.,* 1981). En plus, l'étendue se diffère d'une station à une autre, la minimale est enregistrée à Cherfech 133,7 mm avec un écart type de 41,2 el la maximale est observée au Kef de 266,3 mm soit un écart type de 76,2. Les valeurs exceptionnelles de l'ETP, au niveau des minima, sont enregistrées pendant l'année hydrologique 2003-2004, et ce dans toutes les stations du BV de la Mejerda, parce que cette année est la plus pluvieuse de la période 2000 à 2010 dans les régions Nord-Ouest et Nord-Est de la Tunisie (CRDA du gouvernorat de l'Ariana 2011). À titre d'exemple, cette année est marquée par les inondations dramatiques de septembre 2003 à la moyenne et la basse Mejerda. Par contre, les valeurs exceptionnelles de l'ETP, au niveau des maxima, se répartissent d'une façon plus moins équitable sur la série étudiée et n'ont pas un schéma original.

- La variabilité de l'ETP atteint son intensité maximale dans le Haut Tell, où les valeurs d'écarts types[43] frôlent 76,2 mm au Kef et 66,3 mm à Tala, en raison du *« caractère très accidenté du relief et l'existence d'unités topographiques perpendiculaires aux flux humides dominants, font que les contrastes soient nombreux et sensibles parfois même dans des distances courtes »* (Sous Dir., Henia L. 2008). Le fait suggère aussi que la variabilité de l'ETP s'accroit avec l'altitude parce que les contrastes thermiques y sont plus fréquents et plus accusés. Par contre, dans la basse Mejerda on enregistre des écarts types plus faibles de l'ordre de 48,3 mm à Borj Amri et 41,2 mm à Cherfech. Dans ce contexte, l'effet modérateur des températures par la mer et l'action d'augmentation de l'humidité de l'air par les surfaces humides situées dans cette région (Gaârat Mabtouha, Sebkhet Ariana, Lagure de Ghar Melh), contribuent d'une manière significative à la diminution de l'écart de la demande d'évaporation.

[42] Indice de continentalité : paramètre qui caractérise le degré de continentalité. Aussi, c'est « l'ensemble des caractères climatiques déterminés par l'affaiblissement des influences maritimes dès qu'on s'avance vers l'intérieur du continent » Gérard Beltrando et Laure Chémery (Larousse climat., 1995).

[43]« L'écart type est la racine carrée de la variance. Il qualifie l'écart de chacune des valeurs de la série à sa moyenne ». Gérard Beltrando et Laure Chémery (Larousse climat., 1995).

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

- Les coefficients de variation, donnant une idée globale sur la régularité d'une série chronologique, montrent des valeurs faibles (< 6%), mais aussi variables entre les stations. Les coefficients les plus élevés sont observés dans la haute Mejerda (au Kef 5,36 et à Tala 4,43%) et les plus faibles à la basse Mejerda (à Cherfech 3,12 % et à Borj Amri 3,43 ; tableau 21). Ceci nous amène à constater deux faits distincts : premièrement, l'irrégularité est d'autant plus forte que les moyennes annuelles de l'ETP sont plus élevées. Deuxièmement, la variabilité relative de l'ETP diminue sensiblement au fur et à mesure qu'on se dirige de l'intérieur vers le littoral. En d'autres termes, la continentalité favorise l'accentuation de la variabilité annuelle de l'ETP au contraire le littoral atténue son intensité.

- Enfin, L'évolution de l'ETP, même si suivie sur une courte période, est typiquement similaire à celle d'une région semi-aride méditerranéenne. Mais elle reste moins importante que celle de la pluie (Henia L., 1993).

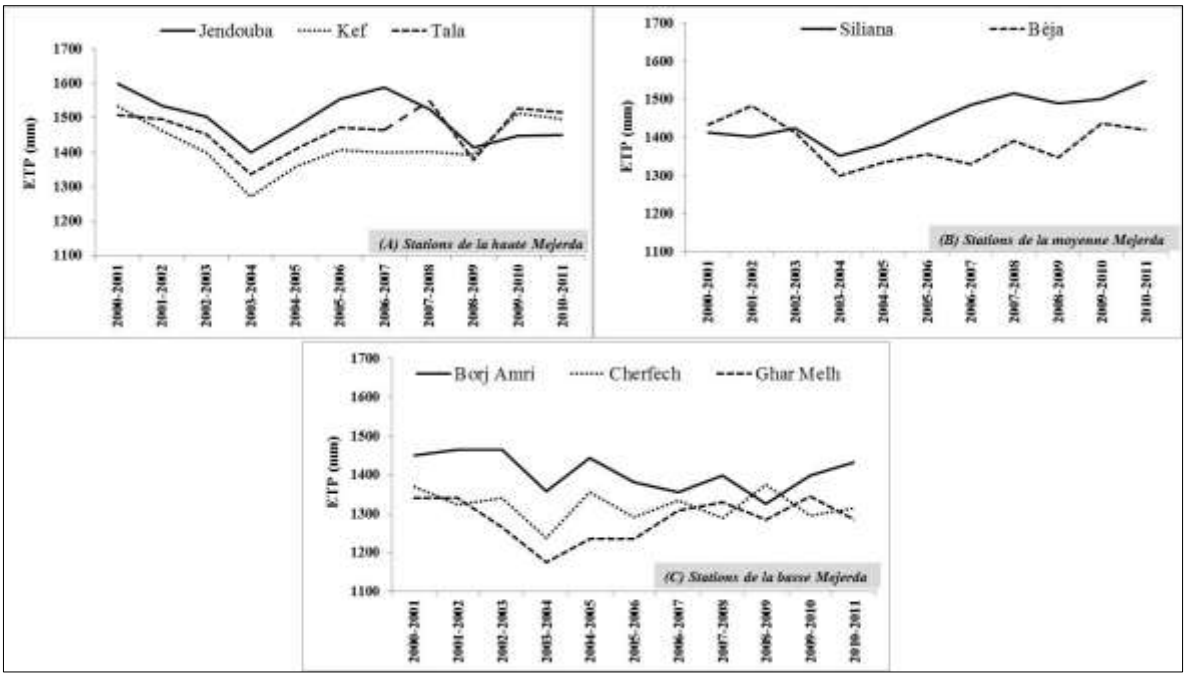


Figure 48 : Variabilité interannuelle de l'ETP dans les stations météorologiques du B.V de la Mejerda (Septembre 2000-août 2011)

Tableau 21 : Variabilité relative dans le BV de la Mejerda

Stations	Écarts- type (mm)	coefficients de variation (%)
Jendouba	68,0	4,54
Kef	76,2	5,36
Tala	66,3	4,53
Siliana	61,4	4,24
Bèja	56,8	4,10
Borj Amri	48,3	3,43
Cherfech	41,2	3,12
Ghar Melh	54,1	4,22

En somme, la situation annuelle de l'ETP dans le BV de la Mejerda confirme l'idée selon laquelle la demande évaporative du climat est très prononcée, en particulier dans les plaines et les secteurs abrités. Elle confirme aussi, que les conditions climatiques dans la région se dégradent du Nord au Sud et des secteurs de l'intérieur vers les secteurs du littoral.

Quant à la variabilité structurelle de l'ETP, nous pouvons noter que la basse Mejerda présente une certaine régularité par contre le Haut Tell se distingue par une irrégularité relativement nette. Tout cela est guidé, en grande partie, par l'effet de la rugosité exercée par une topographie accidentée dans le Haut Tell et la fréquence des types de temps perturbés sur le Nord-Ouest de la Tunisie.

4.3 Les niveaux saisonniers de l'évapotranspiration potentielle

Partout dans le BV de la Mejerda, les totaux de l'ETP à l'échelle saisonnière se caractérisent par une grande diversité aussi bien spatiale que temporelle.

4.3.1 En automne

La figure 49a permet de saisir que les cumuls automnaux de l'ETP oscillent entre 270 et 340mm, soit un palier journalier de 3 à 3,8 mm. Les noyaux qui enregistrent les totaux élevés sont localisés globalement à la dépression de Jendouba (331,1 mm), la vallée de oued Siliana (295,3 mm) et les secteurs allant de Tala (298,1mm) à la haute vallée de oued Mallègue (environ 300 mm). À l'exception de Tala, tous ces secteurs sont des bas-fonds caractérisés, généralement, par des températures élevées et une humidité relative de l'air faible, ce qui favorise le pouvoir évaporant de l'atmosphère. En revanche, les secteurs occupés par les faibles totaux de l'ETP se situent sur les massifs de la Kroumirie, l'axe topographique qui relie l'ensemble des Jbels au Kef vers les monts de Téboursouk au sud du barrage de Sidi Salem et les sommets de la Dorsale (Jbel Berino, Jbel Serij, Jbel Bargou…). Dans ces sommets la variation est très faible dans la mesure où l'écart absolu ne dépasse pas 20 mm et l'ETP varient de 270 à 290 mm. Ces faibles valeurs sont liées à l'effet de l'altitude, car l'ETP perd son intensité avec ce facteur. C'est ainsi que le long des versants nord de la région on observe les faibles valeurs de l'ETP, parce qu'ils sont exposés aux courants humides du Nord-Ouest. À son tour, la façade littorale du B.V de la Mejerda, essentiellement, aux environs de la Lagune de Ghar Melh enregistre les ETP minimales 278,2 mm de toute la saison, ceci est dû à la proximité de la mer qui joue un rôle de rafraichisseur du pouvoir évaporant du climat.

Du reste, la grande variation spatiale des cumuls de l'ETP en automne dans les zones Nord et Nord-Ouest du B.V de la Mejerda est justifiée par l'effet du relief accidenté qui caractérise cette partie de la région. Dans cette partie de la région, l'écart moyen peut s'élever à 60 mm. De ce fait, le topo climat est très favorable à une variation importante des paramètres climatiques conditionnant l'ETP, en particulier les températures et les vents. Ainsi, lorsque la rugosité de surface augmente, le transport turbulent, le principal processeur responsable de l'échange de vapeur d'eau entre la surface évaporante et l'atmosphère, devient très actif ce qui favorise l'irrégularité de l'ETP (Zhang et *al*., 1999). En ce qui concerne la dégradation latitudinale de l'ETP, elle est étroitement liée aux capacités radiatives qui

déterminent ce gradient. En effet, l'intensité du rayonnement global a tendance de se renforcer et la durée de l'insolation prend de l'ampleur à mesure que la latitude décroit (Hachicha., 1999 ; Mjejra., 2005). De plus, l'effet de la latitude peut aussi s'étendre à l'humidité de l'air (Ben Boubaker., 2000), l'un des paramètres de calcul de l'ETP. Avec tous ces facteurs on ne peut aboutir qu'à un gradient Nord-Sud de l'ETP.

De même, le début de la manifestation des perturbations climatiques du Nord-Ouest et/ou du nord accompagnées des pluies orageuses, la baisse et la hausse des températures et des vents variables en force et en direction, sont à l'origine de la variation de l'ETP dans la mesure où cette condition perturbe le rythme du pouvoir évaporant du climat. Enfin, la plaine de la basse Mejerda se distingue par une chute des cumuls de l'ETP de 311,1 mm à Borj Amri et 278,2 mm Ghar Mellh, malgré la courte distance entre les deux stations environ 56 km à vol d'oiseaux. Cette intensité de l'ordre de 32,9 mm s'explique par l'effet de la mer qui joue un rôle modérateur du bilan thermique principal facteur de l'évapotranspiration. À propos de l'effet de la proximité de la mer Ben Boubaker (2000) écrit *« en automne, les températures restent douces. La mer cède de la chaleur à un air plus frais. Mais, les contrastes terre/mer restent peu accusés ».*

4.3.2 En hiver

En hiver les cumuls de l'ETP subissent une chute remarquable dans la mesure où on enregistre les valeurs les plus faibles de toute l'année à titre d'exemple 108,9 mm à Ghar Melh et 132,4 mm à Borj Amri, un moyen journalier de l'ordre 1,2 mm et 1,5 mm. La répartition géographique de l'ETP hivernale est distinguée dans l'ensemble par le décalage des noyaux élevés dans la plaine de Jendouba progressivement pour gagner les dépressions de Siliana (figure 49b). Les valeurs de l'ETP diminuent sensiblement, suivant un axe Nord-Ouest Sud-Est à l'inverse de celui de l'automne, des versants sud de la Kroumirie vers les versants nord de la Dorsale respectivement 125,3 à Jendouba et 130,3 à Siliana. Cette saison enregistre aussi l'écart le moins élevé entre les minima et maxima des totaux de l'ETP dans la mesure où il ne dépasse pas 30 mm. Cela témoigne de la faible variation spatiale de l'ETP de cette saison dans le BV de la Mejerda. Cependant ce résultat peut cacher à son tour une diversité entre les différents secteurs de la région. En effet, la forte variation spatiale est observée dans le versant de la Dorsale au niveau de la station de Tala, où nous avons enregistré un écart de 25,3 mm (les sommets de Jbel Serij et Jbel Bargou, 105 mm contre 130,3 mm à Siliana). Vers l'ouest, dans les plateaux du Haut Tell la variation spatiale de l'ETP n'est que de 5,2 mm (Tala 120,2 mm et Kef 115 mm). Cela dit que la variation des cumuls de l'ETP est plus remarquable dans la moyenne Mejerda mais elle est négligeable dans la haute Mejerda. Ce tracé de la répartition de l'ETP est lié, en grande partie, à la durée d'insolation et l'humidité relative de l'air. En effet, la moyenne Mejerda reçoit plus d'insolation et moins d'humidité de l'air en hiver que la haute et la basse Mejerda (Mustapha Mjejra., 2005). C'est pour cette raison que le pouvoir évaporant devient plus important au milieu du B.V de la Mejerda que les parties est et ouest, dans la mesure où l'humidité élevée de la façade littorale et la fréquence des situations atmosphériques perturbées du Nord-Ouest, constituent des facteurs défavorables à l'ETP.

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

Toutefois, la convergence des noyaux forts de l'ETP, globalement, vers les bassins intra-telliens et en dehors des hautes terres de Tala, souligne que cette région représente « une limite climatique » entre le littoral et l'intérieur dans le BV de la Mejerda. Cette limite montre que l'opposition littoral/intérieur qui nous est apparue à diverses reprises, n'est pas systématique. De ce fait, les secteurs abrités au milieu du BV de la Mejerda détiennent les totaux de l'ETP les plus élevés étant donné qu'ils sont très favorables à l'évaporation puisqu'ils sont également à l'abri des situations perturbées du Nord-Ouest. Ceci confirme que plusieurs facteurs interviennent, non pas de la même ampleur, dans la spatialisation de l'ETP hivernale. C'est ainsi que les régions de l'extrême Nord-Ouest sont plus arrosées, avec une réduction des heures de l'insolation d'environ 32% par rapport à l'automne (une diminution de 600 heures à 400 heures d'insolation). Ceci pouvant avoir moins de pertes d'eau par évapotranspiration. Sur les façades littorales c'est plus tôt l'humidité relative de l'air qui détermine les faibles cumuls de l'ETP. À titre d'exemple la station de Ghar Melh enregistre une humidité relative assez élevée de l'ordre 80,4% (cf. chapitre 3 de la première partie). L'humidité relative de l'air *« atténue les amplitudes thermiques, la radiation solaire et l'évaporation »* (Hammami O., 2010).

En revanche, les hautes terres de Tala, sans tenir compte de la surévaluation des valeurs par la formule de Peman-Monteith, enregistrent les records de l'ETP hivernale dans le BV de la Mejerda. Cette configuration est influencée par l'effet de facteurs radiatifs (l'effet de la radiation) et ceux aérodynamiques (vitesse de vent) Chonget *al.,* 2005. En effet, les surfaces élevées reçoivent plus de radiation que les surfaces les plus basses, ces mêmes surfaces sont plus ventées, ce qui active l'évaporation en hiver. Ces mêmes valeurs de l'ETP s'expliquent aussi par l'effet de la latitude à mesure que les facteurs accélérant la vitesse de l'évapotranspiration ont tendance à s'intensifier (radiation solaire, les températures et humidité relative de l'air).

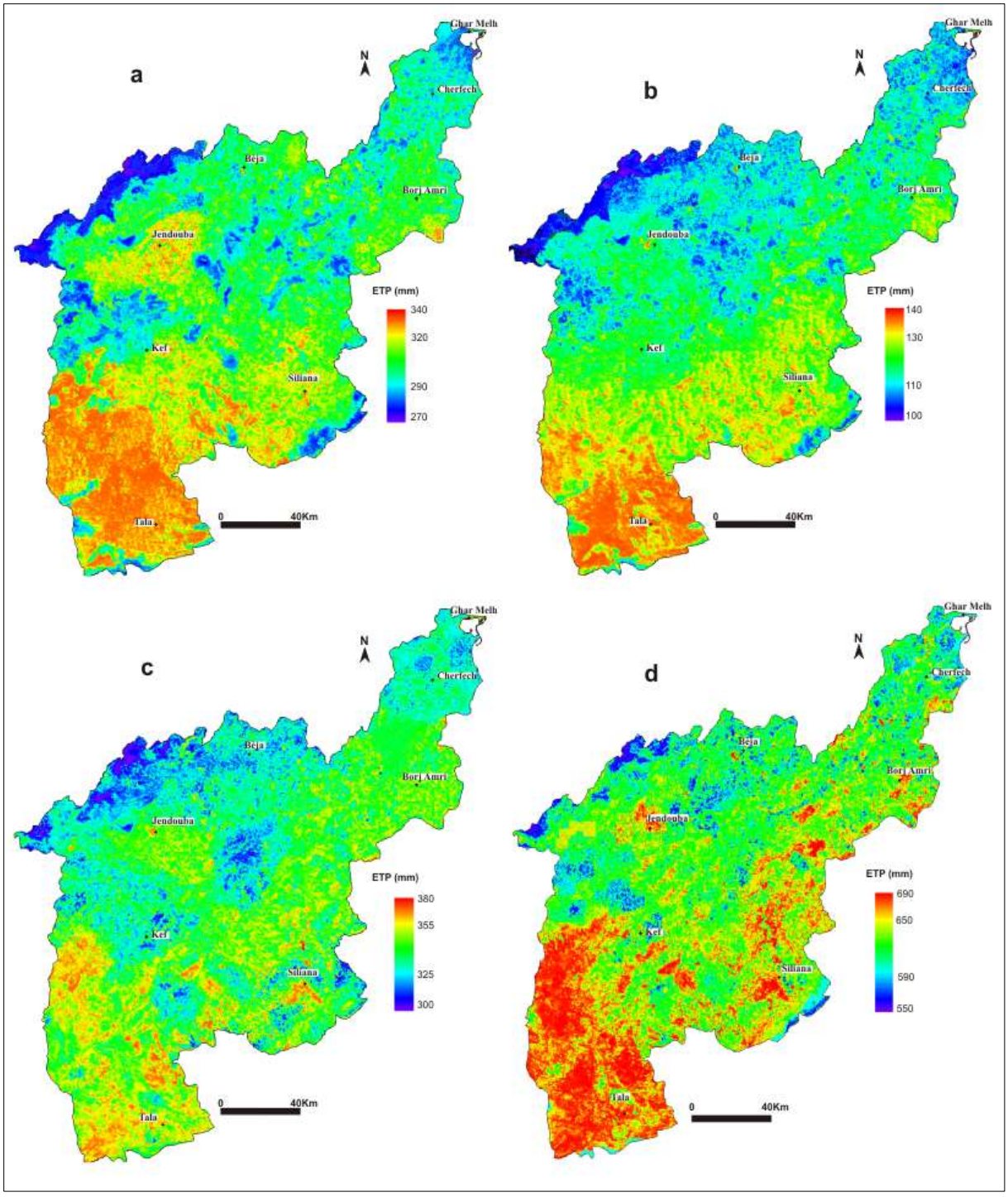


Figure 49: Les totaux saisonniers de l'ETP dans le BV de la Mejerda (2000-2011), (a) automne, (b) hiver, (c) printemps et (d) été.

4.3.3 Au printemps

Avec l'entrée du printemps un accroissement général de la demande évaporative se fait constater dans le BV de la Mejerda (figure 49c). Les pixels d'égales valeurs de l'ETP varient entre 300 et 380 mm, 3,3 à 4,1 mm par jour avec un écart absolu entre les valeurs maximales et minimales de l'ordre de 80 mm. Ces pixels prennent les allures suivantes :

- Les ETP élevées s'installent dans les régions abritées de la Mejerda et les hautes terres de Tala. Dans les régions abritées elles englobent, essentiellement, les stations de Jendouba et Siliana où les valeurs varient de 356,7 à 359,7 mm. Cette répartition peut être liée à des flux chauds, en général, d'origine saharienne et parfois du Nord. Ces vents, en descendant, les versants accentuent la chaleur et la sècheresse. En outre, pendant le mois de mai ces stations sont situées à l'abri du vent de Sirocco[44] qui se caractérise, globalement, par une demande évaporative importante, une faible humidité relative de l'air et des températures élevées ce qui augmente les quantités de l'évapotranspiration. Quant aux hautes terres de Tala l'ETP varie entre 360 mm et 380 mm. Ces fortes pertes en eau sont en rapport avec l'effet de la continentalité dans la mesure où le pouvoir évaporant de l'atmosphère augmente en même temps qu'on se dirige vers le sud-ouest de la région.

- Les faibles ETP règnent, comme d'habitude, sur les massifs de la Kroumirie, l'ensemble des collines allant du Kef vers les monts de Teboursouk et le delta de la Mejerda. Dans ces secteurs les valeurs diminuent rapidement pour atteindre 310 à 320 mm. Une telle répartition spatiale est corrélée avec l'effet de la mer, qui tend à adoucir les températures, et ce pour le delta. Quant à la situation dans les secteurs montagnards situés au Nord-Ouest du BV de la Mejerda, elle est liée, plutôt, à la fréquence des types de temps perturbés et la position en latitude.

- La variation spatiale de l'ETP est nettement marquée dans l'ensemble du Haut Tell où la topographie est accidentée. En effet, les écarts entre les minima et les maxima peuvent atteindre 70 mm au printemps. Ce schéma est lié à l'effet de la rugosité des surfaces. Elle constitue un facteur déterminant de la variation spatiale du climat, même à courte distance (Ben Boubaker., 2000 ; Musy et *al.,* 2014). Par ailleurs la faible variation de l'ETP est observée au delta de la Mejerda où les écarts entre les faibles et les fortes valeurs ne dépassent pas 30 mm (Borj Amir 331,8 mm et Cherfech 359,5 mm). La situation dans le Haut Tell et le delta de la Mejerda témoigne nettement la configuration de l'opposition littoral/intérieur.

Il est à signaler que la configuration des pixels d'égales valeurs de l'ETP est fort significative. Elle met en valeur un contraste caractéristique de la spatialisation du climat Tunisien. En effet, les deux grands axes montagnards sub-parallèles, la Kroumirie au nord et la Dorsale au sud, constituent le facteur, du premier degré, topo-climatique de la représentation des traits essentiels de la spatialisation de l'ETP dans le BV de la Mejerda. À

[44] **Le Sirocco** : « vent soufflant sur le sud de la Méditerranée occidentale. C'est un vent de secteur sud, relativement faible, très chaud et sec ». Gérard Beltrando et Laure Chémery (in Larousse climat., 1995).
Le Sirocco est vent très chaud et très sec. Il est le plus fréquent et le plus persistant en Tunisie. Il se caractérise par des températures extrêmes varient entre 42° et 49,5° et une chute de l'humidité relative où le minimum absolu par temps de sirocco est de 9% à Tala, Jendouba… (Henia et *al*., 1997).

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

l'échelle locale l'effet du site parait jouer un rôle décisif pour complété le schéma régionale de l'ETP dans la région étudiée.

4.3.4 En été

En été, l'ETP est importante puisqu'elle représente environ 50% du total annuel. Les cumuls de l'ETP varient, globalement, de 550 à 690 mm, soit 6 mm à 7,5 mm par jour et l'écart entre les maxima et les minima s'élevé à 140 mm dans l'ensemble du BV de la Mejerda. Cet écart est le plus élevé de toutes les saisons, en fait, il croît en parallèle avec l'augmentation des cumuls de l'ETP, pour atteindre son maximum en été. Cela s'explique par le fait que les facteurs radiatifs sont très actifs (radiation solaire, insolation, température) pour accélérer le rythme de l'évapotranspiration. Durant l'été, la chute des niveaux de l'ETP des environs de Tala où le sol est à nu vers les secteurs de la Kroumirie où la végétation est assez dense, devient très prononcée (figure 49d). Parce que l'albédo des surfaces conditionne la part du rayonnement absorbé par la végétation, à titre d'exemple « *le fait de passer d'un albédo de 0,05 (forêt sombre) à un albédo de 0,3 (sol sec) augmente l'ETP calculée selon la formule de Penman d'environ 20% pour un mois de juillet à Paris* » (Cosandey et *al*., 2012). Cette considération est similaire au BV de la Mejerda, puisqu'on passe des forêts relativement denses au nord vers des sols secs et nus au sud.

Les ETP estivales enregistrent une hausse remarquable par rapport à celles observées au printemps. Par exemple cette hausse dépasse 300 mm à Jendouba et Siliana. À cet effet, la vallée de la Mejerda au niveau de Jendouba enregistre le maximum de l'ETP 684,6 mm. Par la suite l'ETP diminue sensiblement vers la côte pour atteindre 586,1 mm à Ghar Melh. Plus au sud, en particulier, dans les terres telliennes et la rive droite de la moyenne Mejerda les valeurs de l'ETP varient entre 678,3 mm à Tala et 669,6 à Siliana. La variation spatiale de l'ETP est beaucoup plus considérable dans les limites nord du BV de la Mejerda que dans ses limites Sud. Enfin l'opposition littoral/intérieur est plus nette, surtout entre Tala et Ghar Melh, dans la mesure où on enregistre un écart entre ces deux stations de 92,2 mm. Sur la figure 49d on remarque que les monts de Teboursouk et les environs du barrage de Sidi Salem interviennent comme obstacle pour faire glisser l'axe des fortes ETP (Jendouba-Borj Amri) un peu plus vers le sud, c'est-à-dire vers les piémonts de la Dorsale. C'est ainsi que l'effet de barrage comme modérateur des températures et la recharge de l'atmosphère par la vapeur d'eau pouvant entrainer une diminution de l'ETP. En outre, l'effet de l'altitude explique la faible ETP sur les sommets des montagnes.

Toutefois, la forte ETP est en rapport avec plusieurs facteurs radiatifs atmosphériques. En effet, la fraction du rayonnement solaire atteint son maximum (55% à Béja et 57% à Tala), les durées d'insolation son très longues, rapprochent de la durée théorique du jour (10,5h à Béja et 11,3 à Tala) et de la température maximale moyenne du mois d'août peut atteindre 36°C dans les bassins-intra telliens. *« Dans ces conditions le pouvoir évaporant du climat est maximal »* (Henia L, sous Dir., 2008). De plus, 65% des jours de l'été sont marqués par la fréquence des situations non perturbées (Henia L ., 1977). Dans le même ordre d'idée, la masse d'air continental saharien, qui règne sur la Tunisie durant l'été en représentant 40,4 % de l'effectif total des jours, traduit l'effet du Sirocco sur les bassins inter-telliens et par conséquent des températures très élevées (Melki T., 1996). La

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

conjugaison de ces facteurs résulte d'une demande évaporative exceptionnelle et par conséquent des totaux de l'ETP énormes. Aussi, le gradient latitudinal de l'ETP mérite d'être expliqué. En été, la partie nord du B.V de la Mejerda est sous l'influence des vents frais du secteur Nord-Ouest qui contribuent à diminuer le pouvoir évaporant du climat (Bousnia A., 2001). En revanche, la fréquence du Sirocco en été sur les versants nord de la Dorsale, engendre une accélération d'évaporation dont on enregistre, à titre d'exemple, plus que 19 jours de Sirocco à Siliana (Al Manach publication de l'INM., 2002).

En somme, à l'échelle saisonnière les nuances de la répartition spatiale de l'ETP soulignent d'une part l'opposition Nord/Sud et littoral/intérieur des cumuls de l'ETP et d'autre part l'ampleur des facteurs radiatifs, atmosphériques et topographiques. L'échelle annuelle, quant à elle, figure une répartition caractéristique de l'ETP avec un noyau alentour de la vallée Mejerda au niveau de Jendouba. Dans cette optique, nous pouvons souligner que la répartition géographique de l'ETP est donc plutôt liée aux conditions climatiques locales qu'aux conditions régionales.

4.4 Le régime mensuel moyen de l'évapotranspiration potentielle

L'examen de la figure 50 relative au régime moyen mensuel de l'ETP dans le B.V de la Mejerda sur la période d'étude (septembre 2000 à août 2011) [45] permet de retenir les points suivants :

- Partout dans les B.V de la Mejerda, le régime mensuel moyen de l'ETP est dans son ensemble un régime simple. Il se caractérise par : un seul minimum au mois de janvier d'environ 1,2 mm par jour, un seul maximum au mois de juillet d'un palier de 8 mm par jour et avec une amplitude très forte entre les mois qui peut atteindre 213,4 mm à Jendouba et 176 mm à Ghar Melh. Ces résultats peuvent nous renseigner sur la caractéristique climatique principale de la Tunisie du Nord, tout en distinguant, généralement, l'opposition d'une saison relativement humide en hiver où les apports des précipitations peuvent couvrir les pertes par évapotranspiration, et une saison sèche en été, où le déficit hydrique est très prononcé.

- Dans toutes les stations, le régime de l'ETP présente un profil essentiellement concave. Les valeurs diminuent rapidement du mois de septembre au mois de janvier pour atteindre leur minimale dont l'ETP dépasse à peine 1 mm par jour. Par exemple, les cumuls de l'ETP chutent à Tala de 140,7 mm à 36,5mm et à Ghar Melh de 128,8 mm à 27,3 mm. Cette chute des cumuls de l'ETP est liée, entre autres, à une diminution de la radiation solaire et au ralentissement de l'activité physique de la végétation (Douguédroit., 1992). Par la suite, les quantités de l'ETP augmentent sensiblement jusqu'à ce qu'elles atteignent leur maximale au mois de juillet 241,9 et 203,1 pour les mêmes stations, et ce en relation avec le rythme du rayonnement solaire et de l'activité photosynthétique de la végétation (Feki M., 2006).

- Le régime de l'ETP permet de distinguer entre deux structures assez différentes. La première, intéresse la forte intensité de l'ETP qui s'étale du mois d'avril à la fin du mois de septembre où les quantités dépassent 100 mm par mois. Cela est en relation avec la

[45] Le choix de commencer le régime mensuel par les mois de septembre est justifié par le fait que dans le climat méditerranéen la pluspart des chercheurs prennent en compte l'année agricole ou hydrologique et non pas l'année civile.

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

persistance de la saison chaude en Tunisie, qui est associée à des facteurs favorisant le pouvoir évaporant de l'atmosphère, en particulier, un rayonnement solaire intense, une durée d'insolation relativement longue et des températures fortes. La deuxième concerne la faible intensité de l'ETP allant du mois d'octobre au mois de mars où les quantités sont inférieures dans la plupart des cas à 100 mm par mois. Dans cette condition, les surfaces évaporantes sont limitées à cause de la persistance des types de temps perturbés : un rayonnement solaire faible, une durée d'insolation réduite et des températures douces.

- Le régime mensuel moyen de l'ETP manifeste deux phases assez différentes de rythmicité. La première en allant du mois de septembre au mois de janvier où on assiste à une chute remarquable des quantités de l'ETP, à titre d'exemple, de 29,4% au Kef et 24,2% à Borj Amri. La deuxième s'étale sur la période de janvier-août et se distingue par un rythme lent, où on enregistre une hausse des quantités de l'ETP de 17,4% à Siliana et 17% à Cherfech. Ceci s'explique par le rythme saisonnier très marqué c'est-à-dire l'alternance des saisons astronomiques et qui prennent des caractéristiques climatiques très changeantes.

- Évidemment, la variation du régime mensuel moyen de L'ETP s'explique par plusieurs facteurs : en premier lieu, les variations des saisons et les types de temps qui règnent sur la Tunisie. C'est pourquoi aux types de temps non perturbés et à ciel dégagé correspond le maximum de l'ETP de l'année. Par contre, aux types de temps perturbés et à ciel couvert correspond le minimum de l'ETP de l'année.

- L'amplitude[46] moyenne mensuelle de la demande évaporatoire dans le BV de la Mejerda est très élevée. En effet, on a enregistré sur la période d'étude un palier de l'ordre de 223,2 mm (Jendouba 250,3 mm mois de juillet et Ghar Melh 27,1 mm mois de janvier). Mais, cette amplitude varie d'une station à une autre, prenant à titre d'exemple à Tala 203,9mm, à Béja 189,1 mm et à Cherfech 177,5 mm. Ainsi, la variation du régime mensuel moyen de l'ETP est d'autant plus importante au fur et à mesure qu'on se dirige de la façade littorale vers les plateaux telliens. Suivant cette idée, l'amplitude moyenne mensuelle de l'ETP subit sans doute l'effet de la mer d'une part et l'influence de la topographie d'autre part.

En résumé, l'analyse du régime mensuel moyen de l'ETP montre qu'il est un régime simple avec un minimum en janvier et un maximum en juillet. Ce régime est relativement stable durant la période d'étude. Mais, il est d'autant plus contrasté dans le Haut Tell que dans la basse Mejerda. Aussi, le rythme d'augmentation de l'ETP est plus lent que celui de la chute. L'augmentation la plus forte est observée à Jendouba et la chute la plus faible est notée à Ghar Melh.

[46] *Amplitude : différence entre la valeur maximale et la valeur minimale d'une série de données sur un intervalle de temps précis (elle peut être déterminée à l'échelle d'une journée, mois saison…) Gérard Beltrando et Laure Chémery (Larousse climat. 1995).*

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

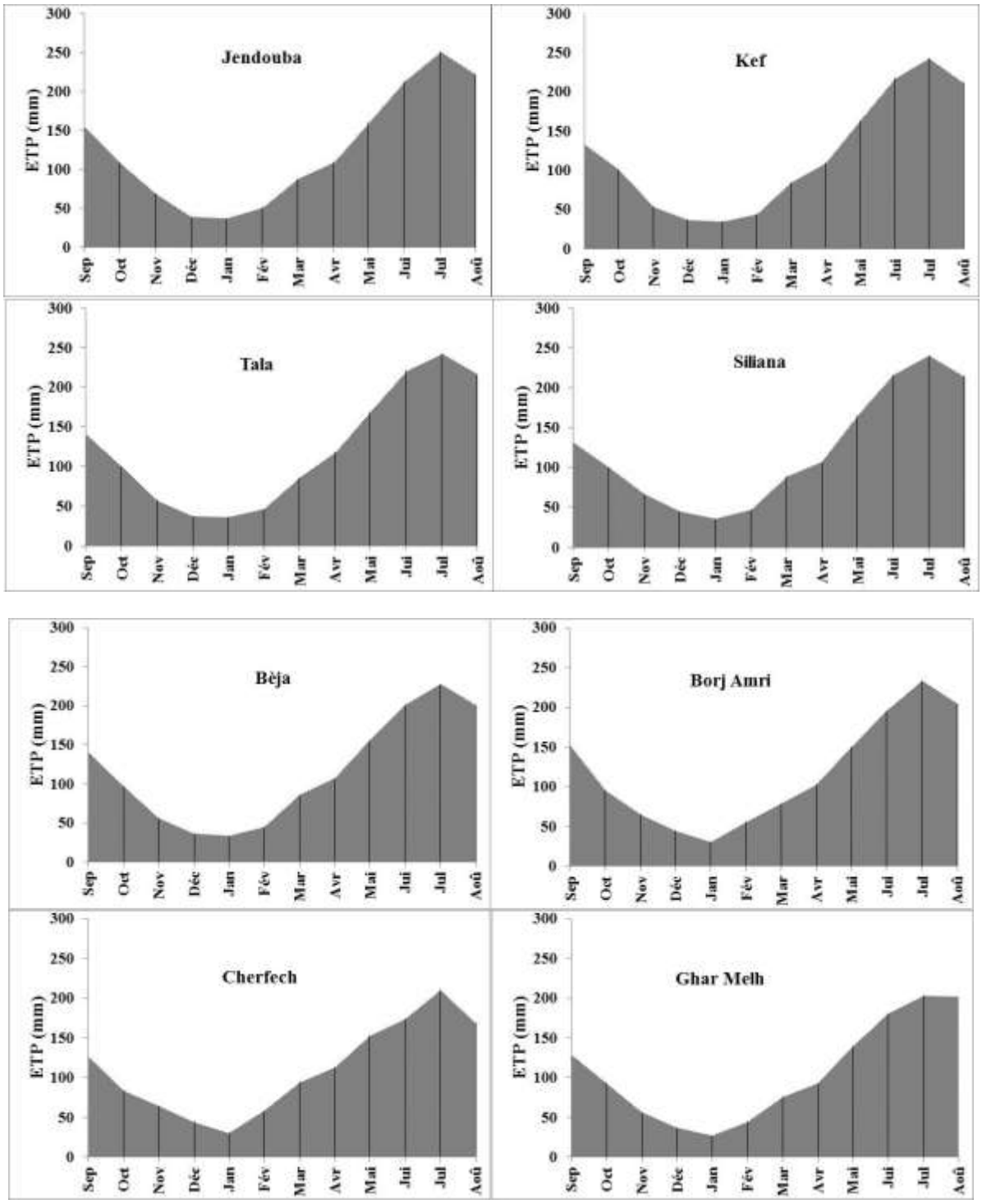


Figure 50: Le régime mensuel moyen de l'évapotranspiration dans les stations météorologiques du BV de la Mejerda (2000- 2011)

Le régime mensuel moyen de l'ETP montre aussi une double opposition : la première marque l'opposition littoral/intérieur et la deuxième concerne la relation dialectique entre l'ETP et les précipitations. De ce fait, la distribution spatiale et temporelle de l'ETP se fait dans le sens inverse de celui de la pluie, ce qui donne un contraste entre les saisons et les régions (Henia L, sous Dir., 2008), ce résultat n'est pas nouveau, mais parait-il nécessaire de le rappeler et le confirmer.

Conclusion

Tout ce que l'on a avancé nous conduit à retenir les points suivants :

- Le niveau de l'ETP dans le BV de la Mejerda est élevé. Il manifeste une grande diversité à la fois spatiale et temporelle.
- À l'échelle annuelle, les quantités de l'ETP varient de 1260 mm à 1500 mm, avec la dominance d'une morphologie régionale qui montre les contrastes entre les secteurs littoraux et les secteurs intérieurs, ainsi que le contraste entre les massifs de la Dorsale et la Kroumirie, d'une part, et les bassins intra-telliens, de l'autre.
- À l'échelle saisonnière, la variation spatiale de l'ETP devient plus intense. L'été retient environ 50% de la lame évaporée et l'hiver enregistre les faibles quantités. Quant à l'automne et au printemps, ils gardent la même allure que celle de l'annuelle. Cette variation subit le poids de plusieurs facteurs à savoir, ambiances climatiques très variables entre les saisons, les caractéristiques de la topographie via l'altitude/la rugosité et l'effet de la mer.
- À l'échelle mensuelle, les cumuls de l'ETP varient selon les mois. On assiste donc, à certaine chute de quantités aux mois de septembre et de janvier ; puis par la suite, une hausse sensible qui atteint son niveau maximum au mois de juillet. La forte amplitude mensuelle est enregistrée dans le Haut Tell en rapport avec l'irrégularité des paramètres climatiques conditionnels de l'ETP.
- La spatialisation de l'ETP dans le bassin versant de la Mejerda permet de distinguer un zonage régional, relativement net. Il s'agit, des secteurs telliens, les versants sud de la Kroumirie, et le delta de la Mejerda.
- Cependant, nous essayerons de voir par la suite, si ceci va être confirmé par l'étude de l'évapotranspiration maximale, puisqu'elle est déterminée en multipliant un coefficient cultural (Kc) par l'évapotranspiration potentielle (ETP).

CINQUIME CHAPITRE : SPATIALISATION DE L'EVAPOTRANSPIRATION MAXIMALE (ETM)

5.1. Approche Méthodologique : les paramètres de base de la cartographie de l'ETM

5.1.1. Cartographie de l'occupation du sol

5.1.1.1. Données et concept

La carte d'occupation des sols représente une information de base pour les inventaires des cultures, les besoins en eau, et la gestion d'irrigation (Belhaj., 2008 ; Amri., 2103). Aussi, elle est très importante pour déterminer l'ETM. Elle est définie comme étant *«l'occupation du sol est la couverture biophysique de la surface des terres émergées»* (FAO., 1998) ou selon Nasr Omrane (1982) *« La carte d'occupation du sol tente à mettre en valeur la relation entre l'homme et son milieu ».* Pour les besoins de ce travail, nous avons réalisé des cartes d'occupation du sol de la région étudiée pour les années agricoles allant de 2000-2001 à 2010-2011[47] , par le fait que l'année agricole semble mieux s'appliquer au contexte climatique de la Tunisie (Bousnina., 1986). Cela a été fait grâce au croisement d'une base de données multi-sources :

- des campagnes de terrain des années agricoles 2005-2006, 2009-2010 à 2010-2011[48],
- les recensements de l'Office des Terres Domaniales (OTD) ;
- les recensements des exploitations agricoles du Commissariat Régional au Développement Agricole (CRDA) ;
- des extraits des images Google Earth ;
- les séries temporelles issues du capteur MODIS embarqué sur la plate-forme Terra,
- et des scènes de Landsat (L7 ETM+) acquises pendant le mois d'Avril des années 2001, 2006 et 2011. Le choix de la date d'acquisition est dû à la situation de la végétation en pleine développement pour ne pas confondre entre sols nus et cultures annuelles et adventices ou bien entre la réflectance des périmètres irrigués et les forêts.

Ainsi, l'exploitation de ces données multi-sources nous permet d'établir une allure générale de l'occupation et l'utilisation du sol dans la région. Il s'agit d'évaluer les potentialités de ces données pour cartographier l'occupation du sol. Un test d'interprétation visuelle, même avant la localisation des parcelles types sur le terrain, à travers des images Google Earth et des images Landsat fait ressortir, essentiellement, en 4 classes : plantations arborées, cultures

[47] Les travaux réalisés, à propos les cartes de l'occupation des sols, considèrent comme saison agricole la période qui s'étale du mois de septembre au mois d'aout de l'année suivante. (Er-raki., 2007 ; Belhaj 2008 ; Amri 2013…). Étant donnée en climat méditerranéen la saison agricole commence en automne et de même pour l'année hydrologique Par exemple la période allant du mois de septembre 2000 au mois d'aout 2001 est considéré comme saison agricole 2000-2001, c'est-à-dire dès le début de la période du semis à la fin de la période de la récolte, et ce pour conserver la même variation de l'occupation des terres dans les secteurs agricoles.

[48] Pour l'année agricole 2005-2006, nous avons exploité la base de données de la thèse de Hamouda Samaâli : Étude de l'évolution de l'occupation et de l'utilisation du sol dans le delta de Mejerda par télédétection et systèmes d'informations géographiques (voir les photos du chapitre 2 de la première partie) ; avec l'aimable autorisation de l'auteur.

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

annuelles et prairies, les sols nus et les surfaces en eau. Pour cela, nous avons gardé ces catégories car elles sont les plus dominantes dans la région de la Mejerda, elles sont contrastées en termes de phénologie du couvert végétal, elles se diffèrent selon l'indice du déficit d'évaporation et elles ont les mêmes aspects agro-climatiques, c'est-à-dire, mêmes pratiques agricoles et mêmes conditions environnementales (Er-raki S., 2007). En effet, la réalisation des cartes d'occupation du sol demande quatre étapes :

- la réalisation de l'organigramme de la carte d'occupation du sol (figure 51) ;
- application d'une méthode de désagrégation supervisée des données à moyenne résolution (MODIS) sur ces saisons agricoles pour calculer les coefficients culturaux ;
- choix des zones d'apprentissage qui résume la réalité terrain ;
- cartographie d'une occupation du sol de « référence » à partir de la base de données pour les campagnes agricoles 2000-2001, 2005-2006 et 2010-2011 à travers les images Landsat. À partir de ces cartes de référence nous pouvons valider l'occupation du sol sur toute la période d'étude. De même, ces cartes nous permettent de suivre de près l'évolution de l'occupation du sol au B.V de la Mejerda.

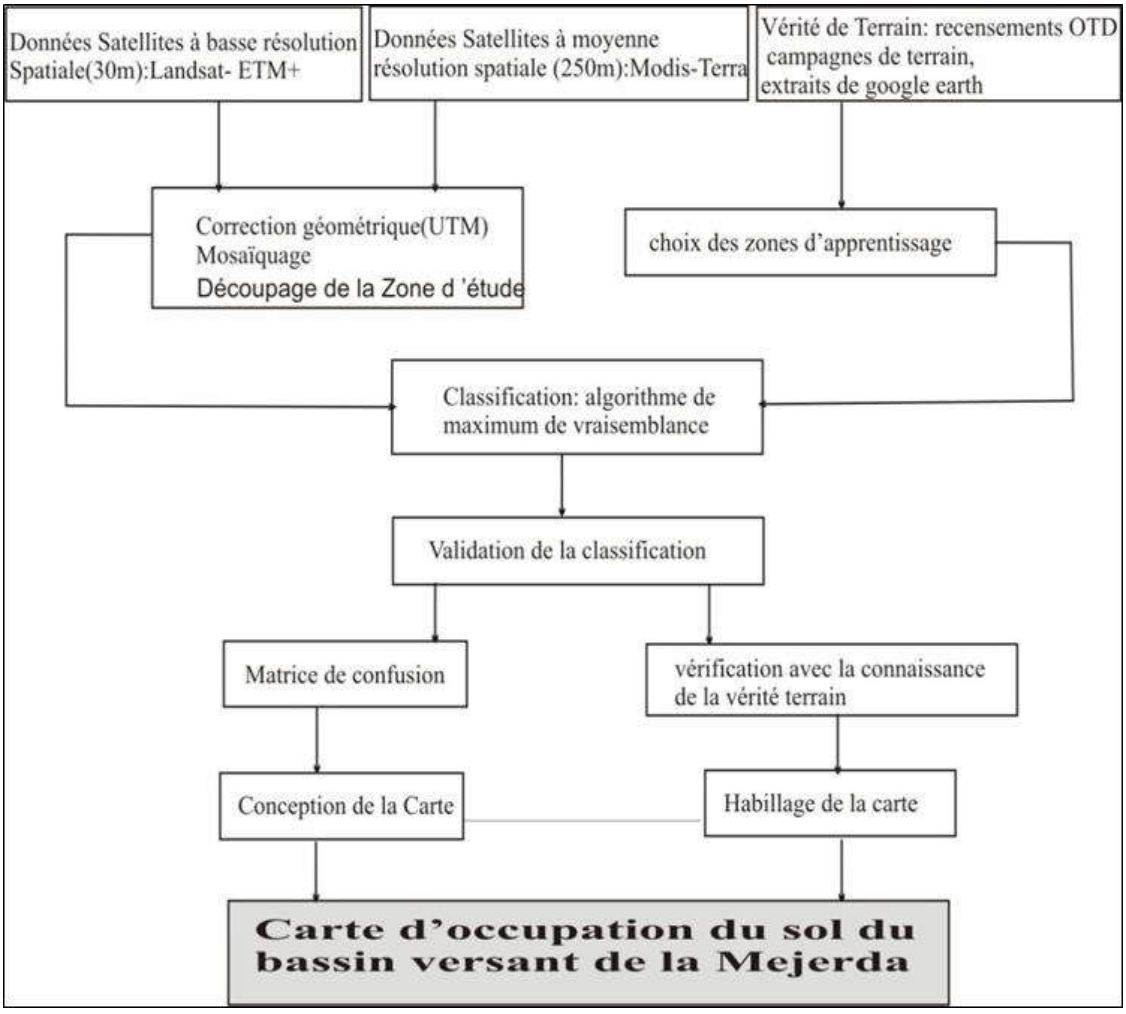


Figure 51: Organigramme de carte d'occupation du sol dans le BV de la Mejerda

Toutefois, la démarche sera d'abord visuelle, et ce, par la délimitation du B.V de la Mejerda à partir des extraits des images Google Earth, des compositions colorées classique rouge-vert-bleu (RVB) et la carte topographique à l'échelle 1/200000. Ensuite on passe à la délimitation des parcelles d'échantillonnage à partir des cartes topographiques 1/50000. On se rendra par la suite sur le terrain pour l'identification des parcelles d'entraînement pour introduire les processus de cartographie automatique par l'intermédiaire des classifications supervisées de l'extrait d'image Landsat. Cela est à partir des opérations de rectification et de contrôle de la qualité de la carte et de collecte d'une base de données de photographies et de fiches de terrain (pour les fiches terrain voir les annexes).

5.1.1.2. Méthode de classification supervisée

La classification d'images satellites a pour objectif de produire des images thématiques, c'est-à-dire des images dont le contenu ne représente plus une mesure mais une interprétation et une catégorisation de la nature des objets associés aux pixels (Richard, 1993). En télédétection, la classification consiste à effectuer la correspondance entre les éléments matérialisés d'une scène de l'image généralement par leurs valeurs radiométriques (dans notre cas les valeurs des NDVI, et des classes connues a priori ou non par un utilisateur. La correspondance est réalisée par des fonctions discriminantes sous forme de règle de décision, telle que le "maximum de vraisemblance" des probabilités, ou des distances géométriques, cette forme existe sur logiciel ENVI qui nous a servi à la cartographie de l'occupation du sol.

Nombreux sont les travaux qui ont confirmé l'opportunité de l'analyse temporelle des profils de NDVI des images MODIS pour cartographier l'occupation du sol, tout en utilisant la méthode de classification supervisée par l'algorithme de maximum de vraisemblance (MLC). Cette classification est la plus utilisée. De plus elle répond par excellence aux objectifs de notre travail. Elle se base sur la probabilité qu'un pixel appartient à une classe particulière tout en utilisant *« un algorithme automatisé qui détecte les pixels les plus pures dans la zone d'étude »* (Duchemin et *al.,* 2006). Par ailleurs, elle prend en compte la variabilité de classes en utilisant la matrice de confusion[49]. Dans ce travail, le MLC a été utilisé pour effectuer la classification de la couverture terrestre à partir des séries des profils du NDVI pour différentes dates permettant de distinguer les contrastes du paysage existant dans la région d'étude, complétés par des données des campagnes de terrain et les statistiques agricoles.

La classification supervisée est une des tâches de l'apprentissage supervisé, dont le but est de prédire une classe correcte sur des données futures. Les classes sont définies à partir des besoins de l'utilisateur et correspondent à des unités sémantiques de l'image, ce qui nécessite une étape d'apprentissage préalable à la classification. L'utilisateur, «*identifie des échantillons assez homogènes de l'image qui sont représentatifs de différents types de classes*

[49]**La matrice de confusion** permet d'évaluer la qualité statistique des noyaux (ROIs : classes occupation des sols) élaborés par le photo-interprète. L'objectif est de quantifier le nombre de pixels d'une classe de référence que l'on retrouve dans la même classe d'affectation (pixels bien classés). Les valeurs situées sur la diagonale de la matrice représentent les pixels bien classés (exprimés en valeur absolue ou en %). Différents indicateurs de précision sont proposés : précision globale, coefficient Kappa, matrice de confusion, erreurs d'excédents et de déficits, précision pour l'utilisateur et précision pour le réalisateur. (Lacombe Jean-Paul ., 2008)

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

d'information» (Richard, 1993). En effet, le principe de la désagrégation supervisée pour un pixel appartenant à la zone d'apprentissage, a été décrit en détail, par Iskander Benhaj en 2008 selon la figure 52. À cet effet, chaque pixel des classes se *« caractérise par son profil de NDVI moyen. Ce pixel est localisé sur la carte d'occupation du sol à haute résolution spatiale et sa composition (pourcentage de surface occupée par chacune des trois classes) est donc connue. Il reste alors à déterminer les profils de NDVI typiques de ces trois classes – les " signatures pures "– en résolvant, à chaque date d'observation, un système linéaire d'équation ».* Cela consiste à simplifier la radiométrie d'une image brute qui représente le paysage, en formant des classes qui regroupent les pixels similaires. Le principe de cette méthode repose sur l'étude de l'évolution des séries du NDVI pour chaque pixel. On suppose que chacune des classes a un profil NDVI caractéristique qui permet de les différencier. Il a été constaté que cinq dates aléatoires entre décembre et juin donnaient de bons résultats (François P., 2002), de même que trois dates bien choisies (décembre, avril, juin). Et ce, pour éliminer le problème de discrimination pour ces différentes occupations des terres. Comme nous l'avons dit plus haut, nous pouvons distinguer quatre grandes classes :

- surfaces en eau (cours d'eau, lacs, barrages…) la répartition est stable d'une année sur l'autre ;
- sols nus et territoires artificialisés (mais inclus des jeunes plantations peu couvrantes et le tissu urbain). La répartition reste globalement stable d'une année sur l'autre ou bien elle peut gagner ou perdre du surface aux dépends des cultures annuelles ;
- plantations arborées, comme les sols nus, la répartition reste globalement stable d'une année à l'autre (forêts, pâturages naturels, arboricultures…) ;
- territoires agricoles (cultures annuelles : céréales, luzerne, maraichères et ou/ plant) plantions herbacées : jachères, prairies) dans la mesure où la localisation peut changer d'une année sur l'autre. La cartographie de ces cultures n'est donc valable que pour une année donnée. Pour les cultures annuelles, la méthode permet également d'identifier la position dans le temps du cycle de la culture (début, plein croissance, fin).

Ces classes sont établies à l'aide de la méthode de seuillage des séries NDVI qu'on peut différencier :

- seuil végétation est égal à la valeur 0,2 après discrimination entre sol nu et la végétation,
- seuil arbre est égal à la valeur 0,45 après discrimination entre cultures annuelles et arbre.

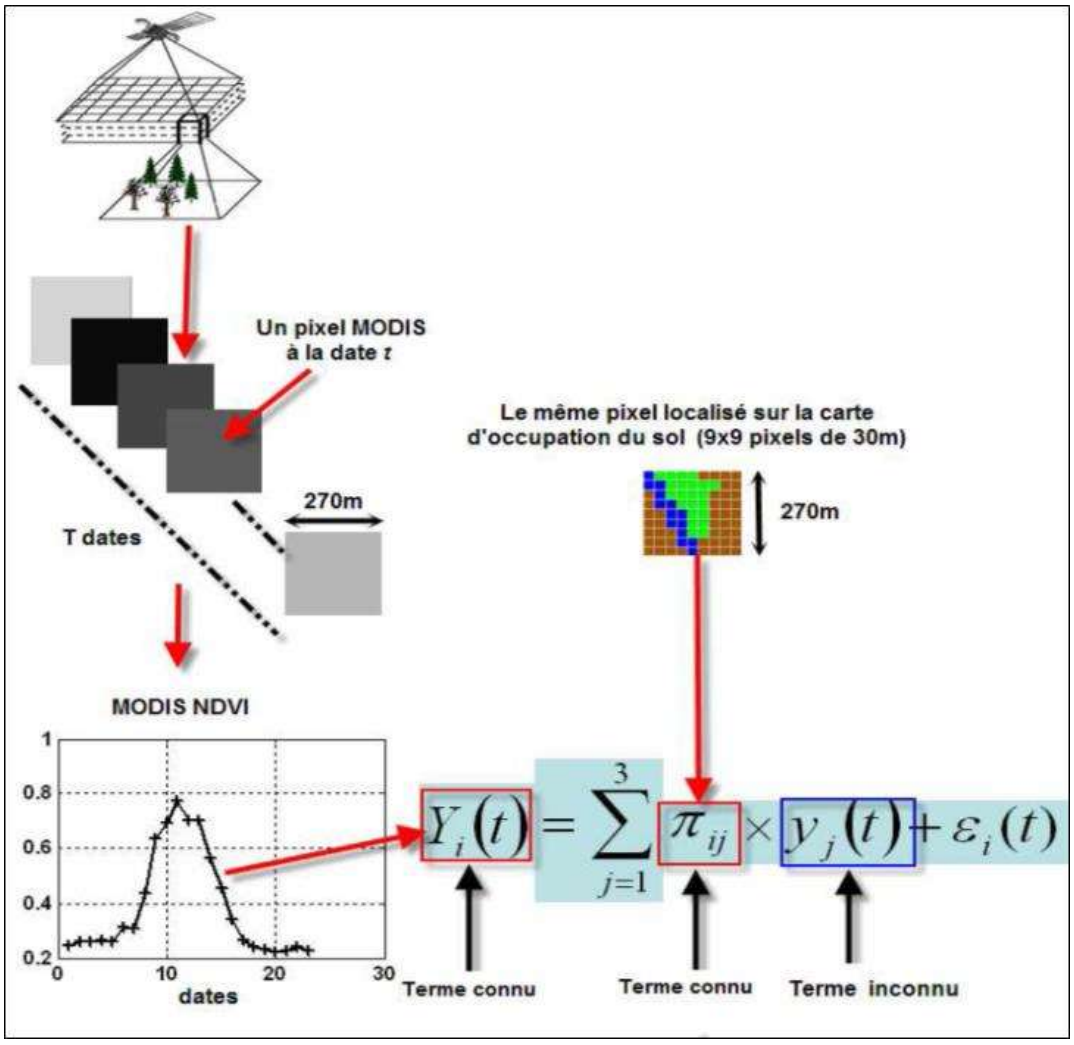


Figure 52 : Principe de la méthode supervisée pour l'identification des signatures pures yj(t) des classes d'occupation du sol (Benhaj., 2008)

Avec
Yi(t) : indice de végétation NDVI du pixel mixte i ;
πij : surface occupée par la classe j dans le pixel i ;
yj(t) : signature pure NDVI attribuée à la classe j ;
T : nombre d'observations des données BR.

5.1.1.3. Choix des parcelles types

Au point de départ, on a défini, sur les images satellites, des parcelles d'apprentissage qui sont des régions de l'image que l'on juge représentatives d'une certaine classe. Chaque parcelle est de taille 1km^2, soit environ 16 pixels des images MODIS et 1100 pixels des images Landsat. À titre d'exemple, pour segmenter une image en secteur agricole, on a sélectionné un champ de fourrage pour réaliser l'apprentissage de la classe dite « fourrage ». Ce choix des régions d'apprentissage requiert beaucoup d'attention, car il se peut que malgré les corrections radiométriques et géométriques des images, deux paysages semblables aient des spectres de réflectance légèrement différents à cause d'une exposition différente au soleil. En outre, il ne suffit pas toujours de choisir une seule parcelle par classe.

Il s'avère qu'une classe comme celle de l'arboriculture contienne plusieurs types de paysages correspondant à divers types d'arbres (olivier, vigne, pommier...). Dans ce cas, il faut soit créer des sous-classes, ce qui rend compliqué de faire les calculs, soit définir au moins une région d'apprentissage par type de paysage. La figure 53 présente les parcelles types dans la région d'étude. Le choix des parcelles représentatives du bassin versant de la Mejerda s'est guidé par les causes suivantes :

- le type du couvert végétal du sol (la végétation la plus représentative dans le BV de la Mejerda) et l'activité agricole c'est-à-dire l'existence de polycultures (cultures annuelles, jachères, arboricultures) ;
- la position géographique dans la région, nous avons essayé de localiser les parcelles pour mieux avoir une réparation spatiale équilibrée sur toute la région ;
- l'état de la surface du sol (humide ou non) et les types du sol identifies sur la carte des sols à échelle 1/200000 ;
- la possibilité de la proximité d'une station météorologique (en relation avec les valeurs de l'ETP et de L'ETM par la suite) ;
- la disponibilité des données de la pratique agricole pour garantir le suivi de la dynamique de la végétation et l'occupation utilisation des terres sur tout la période d'étude.

Pour chaque parcelle on a fait de 3 à 5 photos (une photo panoramique et 4 photos de variété paysagère), une fiche d'observation de terrain et un croquis. Ce dernier recopie d'une manière générale les éléments du paysage (l'habitat, végétation naturelle, occupation des terres, aménagement…) de la parcelle type (figure 54). Il s'agit donc d'une lecture du paysage et un recensement des données utiles pour la cartographie de l'occupation du sol et l'identification des coefficients culturaux. À cet égard, nous avons réalisé 35 relevés répartis sur toute la zone d'étude : 3 secteurs de surfaces en eau, 4 secteurs pour les forêts, 9 secteurs sols nus et 17 secteurs de cultures annuelles et prairies.

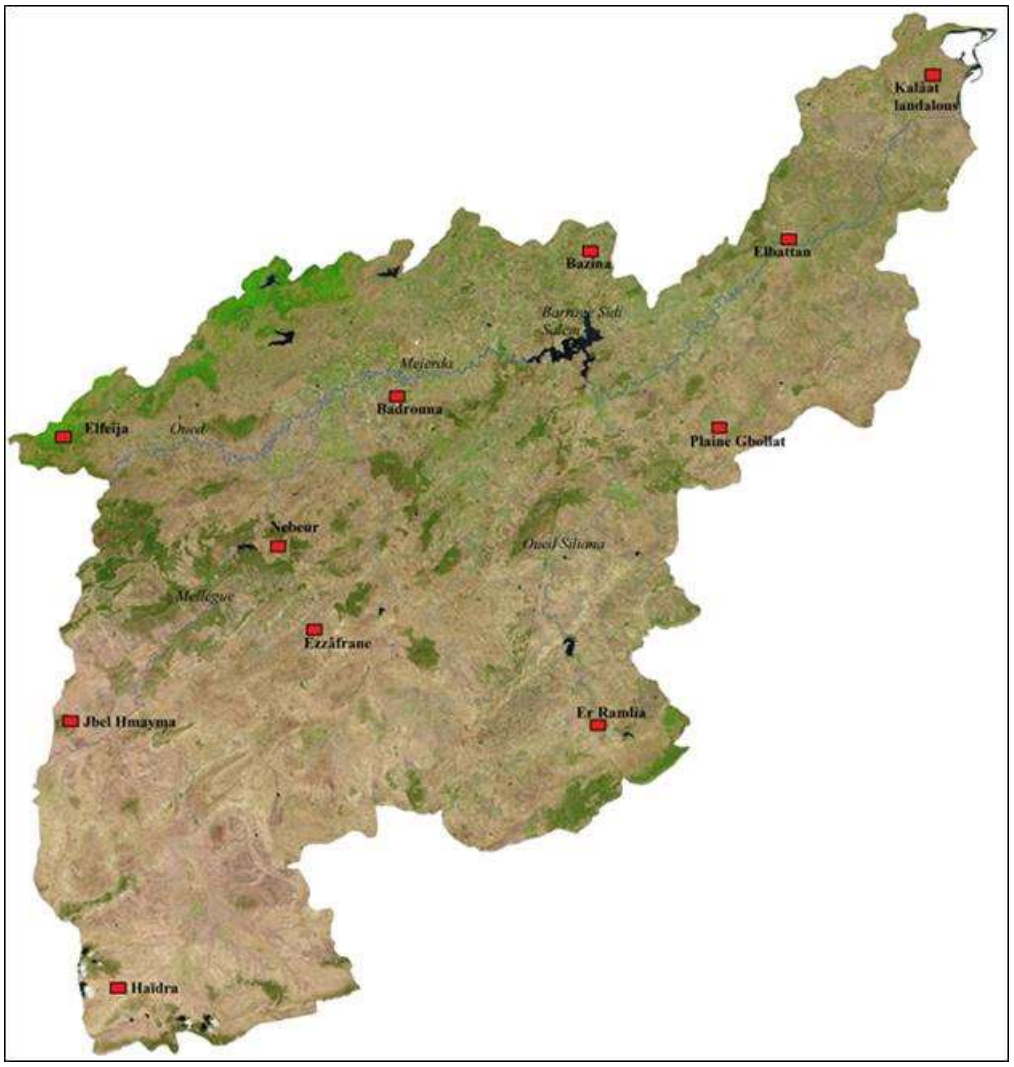


Figure 1: Localisation des parcelles types

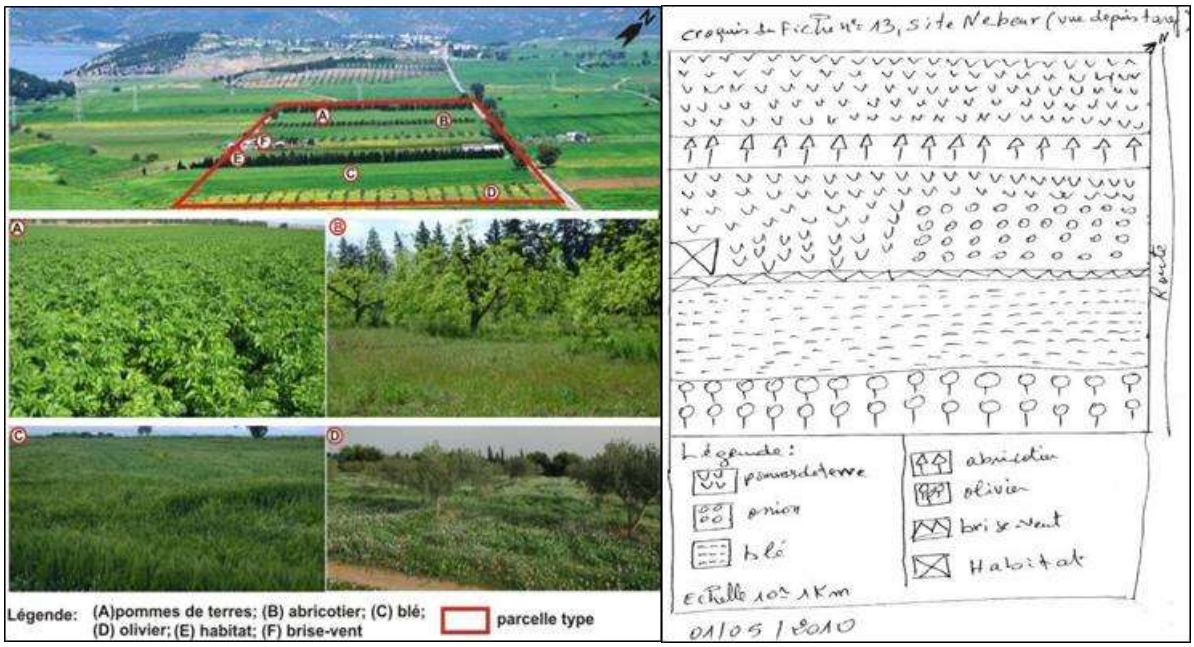


Figure 54: A gauche reconstitution de la parcelle type par les photos ; à droite exemple de croquis réalisé lors des campagnes de terrain (Nebeur, gouvernorat du Kef, mai 2010)

Dans le même ordre d'idée, on a repéré des secteurs homogènes représentatifs de chaque classe d'occupation du sol, sur toute la région d'étude, en fonction des campagnes de terrain qu'on a effectuées durant les saisons agricoles 2009-2010 et 2010-2011. La figure 55 relative aux signatures des différentes classes d'occupation du sol montre une relation étroite avec le comportement phénologique de chacune des classes d'intérêt. À titre d'exemple, la classe « des surfaces en eau » montre des valeurs négatives proches de zéro sur toute l'année (n'est pas représentée sur la figure). La classe « des sols nus » présente des valeurs d'environ 0.16 à 0,22 et la classe « des plantations arborées » montre des valeurs stables sur toute l'année en moyenne de 0.55. Enfin, les valeurs de la classe « cultures annuelles/prairies » sont marquées par une grande variabilité saisonnière, avec un minimum et un maximum pendant le début et la fin de la campagne agricole et un pic à la veille du mois d'avril.

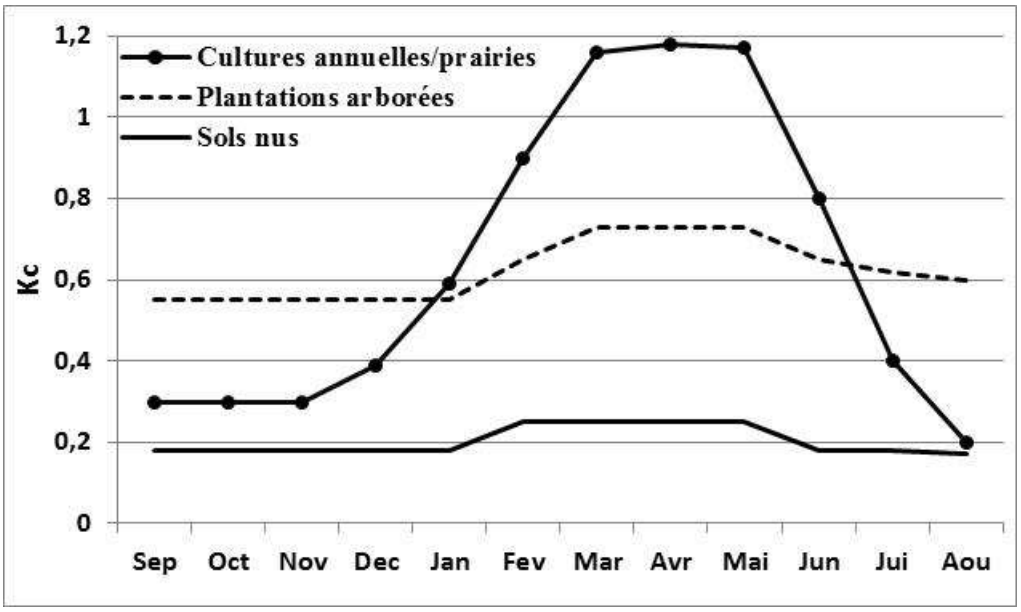


Figure 55: Les moyennes des signatures des classes pour les différentes parcelles types de la période 2000-2011 (les zones d'échantillonnage : sols nus à Haîdra, cultures annuelles à Kalaât Landalous et plantations arborées à El-Feîja)

Du reste, nous avons réalisé deux transects ouest-est et Nord-Sud pour le suivi de la dynamique et l'évolution du couvert végétal via la série des NDVI. Ici, notre objectif est de retracer la signature des différentes classes de l'occupation des terres dans la région. Sur la figure 56 le transect (A) qui suit le cours d'eau de l'Oued Mejerda, à l'exception du secteur du barrage Sidi Salem, se distingue par des valeurs allant de 0,4 à 0,6. Ce transect est dominé par les cultures annuelles et des prairies. En revanche à son début le transect Nord-Sud se caractérise par des valeurs situées entre l'intervalle 0,4 et 0,7 mais à partir des monts du Kef il manifeste une chute brutale pour atteindre des valeurs alentour de 0,2. Ceci, indique le passage d'un couvert végétal dense au nord à un sol nu au sud. Ces tracés nous renseignent sur la nature de l'occupation du sol et la formation végétale. Par la suite, ils serviront à la validation de la cartographie de l'occupation du sol dans le BV de la Mejerda.

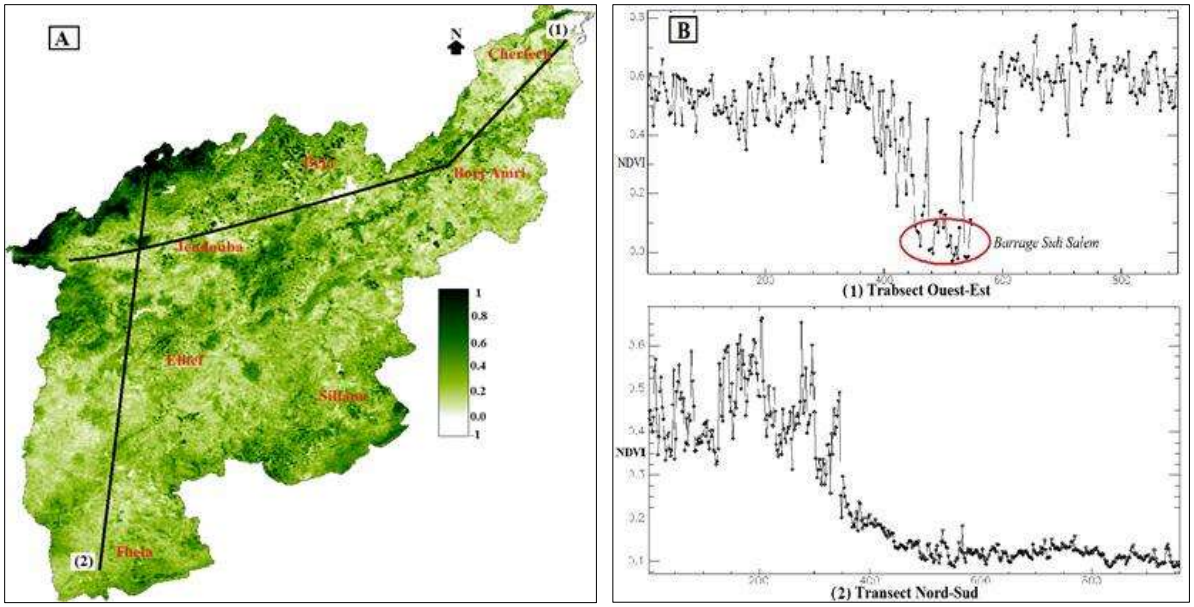


Figure 56: [A] image des NDVI et [B] Transepts des valeurs moyennes annuelles des NDVI sur le B.V de la Mejerda de la période 2000-2011

5.1.1.4. Analyse des résultats

a. L'occupation du sol de référence à haute résolution spatiale

Les données à haute résolution spatiale sont utilisées pour produire une carte d'utilisation des sols de référence afin de valoriser les cartes de classification obtenues avec les données MODIS utilisées pour le calcul des Kc, et ce pour toute la période d'étude. Nous utilisons Landsat/ETM7+ images recueillies pendant les saisons agricoles 2000-2001, 2005-2006 et 2010-2011. À cet effet, en Tunisie la meilleure période de l'année pour identifier le couvert végétal par télédétection est la saison végétative allant du mois février au mois de juin. Ainsi, la figure 57(a, b et c) illustre la répartition spatiale de l'occupation-utilisation du sol dans le BV de Mejerda. Sur l'ensemble de la période d'étude, l'analyse globale montre qu'il s'agit d'un espace agricole qui s'étend sur plus que 60% du territoire, où l'activité agricole dominante est orientée, principalement, à la polyculture : céréalicultures, maraichères, fourrage, arboricultures… Le paysage dans le B.V de la Mejerda est structuré, en général, autour de trois grands secteurs principaux :

- les terres cultivées et les jachères se localisent sur les plaines riveraines de l'Oued Mejerda, presque toute la basse vallée et sur les piémonts des versants nord de la Dorsale ;
- les plantations arborées sont situées sur les massifs de la Kroumirie, las plateaux du Haut Tell, en particulier, au niveau de la rive gauche de l'oued Mallègue et localement sur les petits Jbels du sous bassin versant de Khalled ;
- les sols nus occupent, essentiellement la partie sud-ouest de la région étudiée. Quant aux surfaces en eau, elles désignent les aménagements hydrauliques (lacs et barrages).

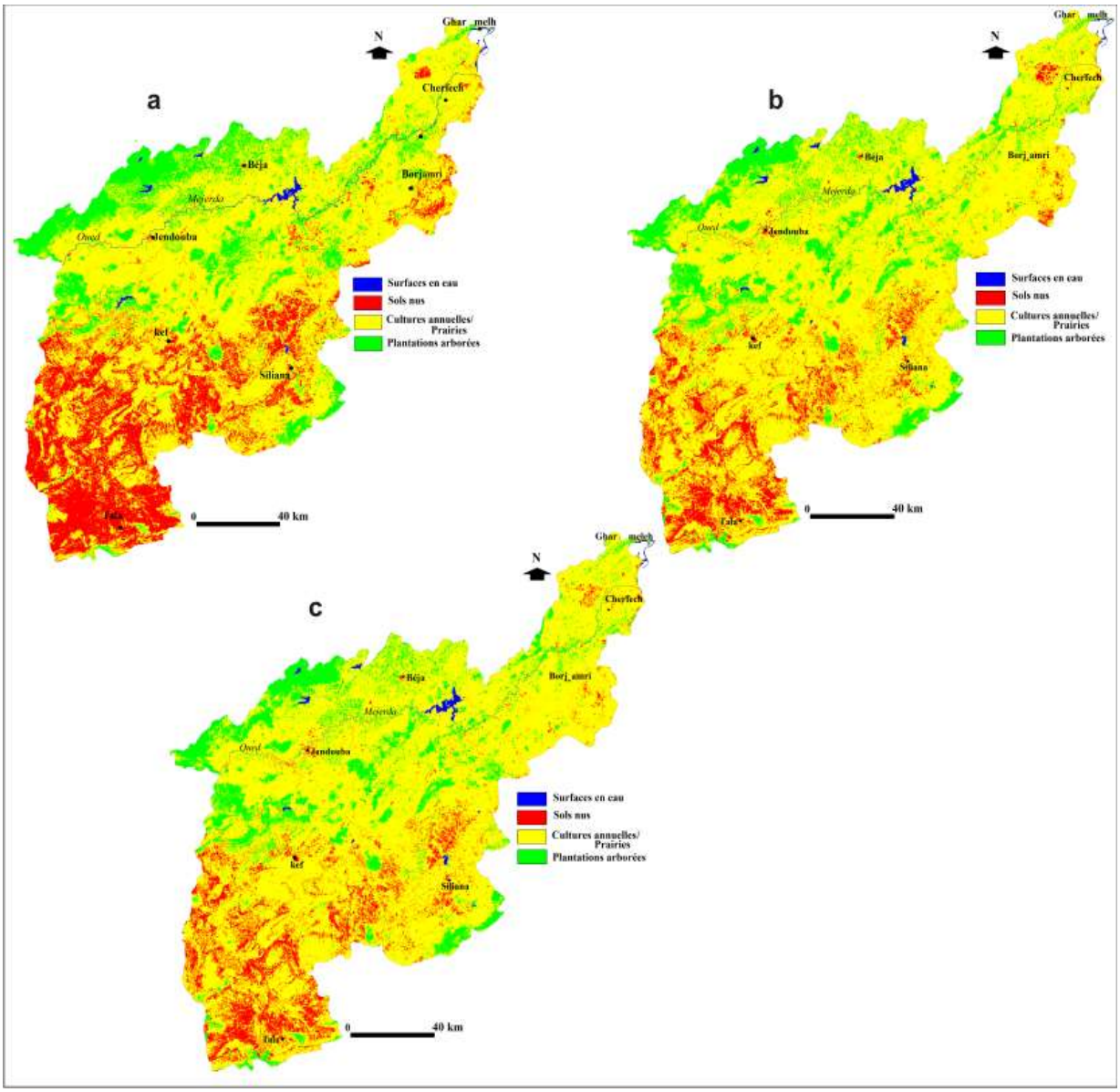


Figure 2: Occupation du sol dans le BV de la Mejerda par le satellite LANDSAT (pour les années : **a** 2000-2001 ; **b** 2005-2006 et **c** 2010-2011)

D'autre part, les terres cultivées et les prairies présentent plus de 61,7 % de la superficie totale. Les zones arborées constituent l'occupation des sols la plus stable dans la région, avec une proportion de 16,6 %. Les sols nus occupent une surface de l'ordre de 19,8% et elle varie au profil des terres cultivées d'une année à l'autre. Enfin les surfaces en eau et les surfaces urbanisées n'occupent qu'une portion faible inférieure à 1,9% (tableau 22). Le tableau 22 relatif à la matrice de confusion des cartes d'occupation du sol des saisons étudiées montre que les indicateurs de précision admettent les résultats exposés plus haut. À titre d'exemple la précision globale (ce terme désigne le rapport du nombre de pixels bien classés sur le nombre total de pixels) est de l'ordre de 93,6% avec un rejet de 6,4%. De même le

coefficient Kappa[50] est de 0.936, il correspond à une autre mesure de la précision de la classification de l'occupation du sol. Ceci permet de dire qu'il existe une excellente correspondance entre la cartographie et les observations de terrain (Simonneaux V. et *al.,* 2008).

Dans cette perspective, nous avons pu appréhender les limites de la méthode. Il se peut que des pixels, représentant deux classes déférentes, puissent avoir des signatures spectrales proches ou bien des pixels mixtes contenant des classes différentes, et donc être affectés à la même classe. Dans cet exemple, on constate que 9,1 % des pixels de la classe « Cultures annuelles/prairies » ont été affectés à d'autres classes. Dans ce cas, on peut extraire des masques d'erreur, pour chaque classe, montrant quels pixels sont mal classés. Mais, nous ne l'avons pas fait pour deux raisons distinctes : l'excellente précision globale de la classification des cartes d'occupation du sol et l'opération d'effectuer des masques dépasse de loin le cadre de ce travail. Quoi qu'on en dise, cette méthode permet d'obtenir des résultats importants sur la dynamique de la végétation et sa répartition spatiale ce qui est indispensable pour identifier les coefficients culturaux.

Tableau 22: Matrice de confusion de la carte d'occupation du sol (moyenne des saisons agricoles de références)

Vérité Terrain en pourcentage						
Classes	Surfaces en eau	Sols nus	Plantations arborées	Cultures annuelles/ prairies	Taux des classes dans la région	Erreur de commission (%)
Surfaces en eau	100 **	0	0	0	1,9 *	0
Sols nus	0	85,7 **	0	14,3	19,8 *	14,3
Plantations arborées	0	0	97,9 **	2,1	16.6 *	2,1
Cultures annuelles/ prairies	0	8,2	0,9	90,8 **	61,7 *	9,1
Total en (%)	100	100	100	100	100 *	Précision générale 93,6%
Total en Pixel	310579	3236555	2713476	10085628	16346238	Coefficient Kappa : 0,936
Erreur d'omission (%)	0	2,6	0,9	16,4		

** précision pour le réalisateur : pourcentage des pixels bien classés
* occupation du sol moyenne dans le B.V de la Mejerda

[50] **Coefficient Kappa de Cohen (k)** : Indice statistique variant entre 0 et 1utilisé notamment pour évaluer le degré d'accord (de concordance) entre deux juges, évaluateurs ou observateurs quant à la manière de classer un ensemble d'individus ou d'objets dans un certain nombre de catégories définissant les modalités d'une variable nominale (catégories non ordonnées). Il correspond à une autre mesure de la précision de la classification et Il est égal à la précision globale. Jean-Paul LACOMBE 2008.

b. L'occupation du sol à moyenne résolution spatiale sur toute la période :

Rappelons que nous avons utilisé la même méthode appliquée pour l'occupation du sol à haute résolution spatiale par le biais des « signatures pures » des profils temporels des NDVI. (Benhaj I., 2008). À cet effet, l'occupation du sol à moyenne résolution spatiale reproduit généralement la même répartition géographique que celle à haute résolution spatiale. L'examen de la figure 58 et le tableau 23 permet de retenir les remarques suivantes :

- La répartition géographique de l'occupation du sol dans le B.V de la Mejerda effectuée par les séries des profils NDVI du capteur MODIS conserve, essentiellement, les mêmes variations spatiales exposées plus haut dans les cartes d'occupation du sol de référence. Ainsi, les plaines riveraines de l'Oued Mejerda se distinguent par les cultures annuelles et les jachères, les environs de Tala contiennent les sols nus avec la manifestation de quelques prairies et les versants sud de la Kroumirie et le secteur de la rive gauche de l'oued Mallègue. On peut dire que la spatialisation de l'occupation du sol relève de notre connaissance de la région, dans la mesure où nous avons effectué plusieurs campagnes de terrain aux différents secteurs de la région. En plus, la confrontation entre les fiches de terrain élaborés (cf. figure 54) et les cartes de l'occupation des sols confirme la fiabilité des résultats obtenus.
- Les moyennes des classes de l'occupation du sol sur le B.V de la Mejerda durant toute la période varient d'une classe à une autre. Elles sont de 55,3 % pour les cultures annuelles ou/et les prairies, 22,1 % pour les sols nus, les plantations arborées détiennent 20,2 % et les surfaces en eau occupent une faible étendue de l'ordre 2,4 %. On remarque donc un changement qui s'est produit et qui marque la classe des « cultures annuelles/ prairies ». Cette classe manifeste une baisse aux dépens des sols nus et les plantations arborées. Ceci est justifié par la variabilité des profils des NDVI des cultures annuelles et les prairies entre les saisons par rapport aux autres classes et par la différence de résolution entre le pixel de Landsat (30 m) et MODIS (250 m). Celui-ci ne permet pas de montrer les détails en laissant du paysage (Lecerf R. 2008) ; et par conséquent, un taux d'erreurs de commission de 17,7 % (tableau 23). Enfin, il se peut que ces confusions entre classe « plantations arborées » et classe « cultures annuelles/prairies » proviennent des cultures maraichères (bersim, luzerne…) où les NDVI sont élevés et stables sur toute l'année (François F. 2002).
- Durant la période d'étude l'évaluation de la classification des différentes classes d'échantillonnage par les matrices de confusion révèle un taux moyen de correspondance de 87 % avec un indice Kappa de 0,87. Et les pixels mal classées sur l'ensemble du territoire occupent un palier de13 %. Donc, cela nous conduit à constater que la méthode de classification adoptée donne des résultats acceptables.

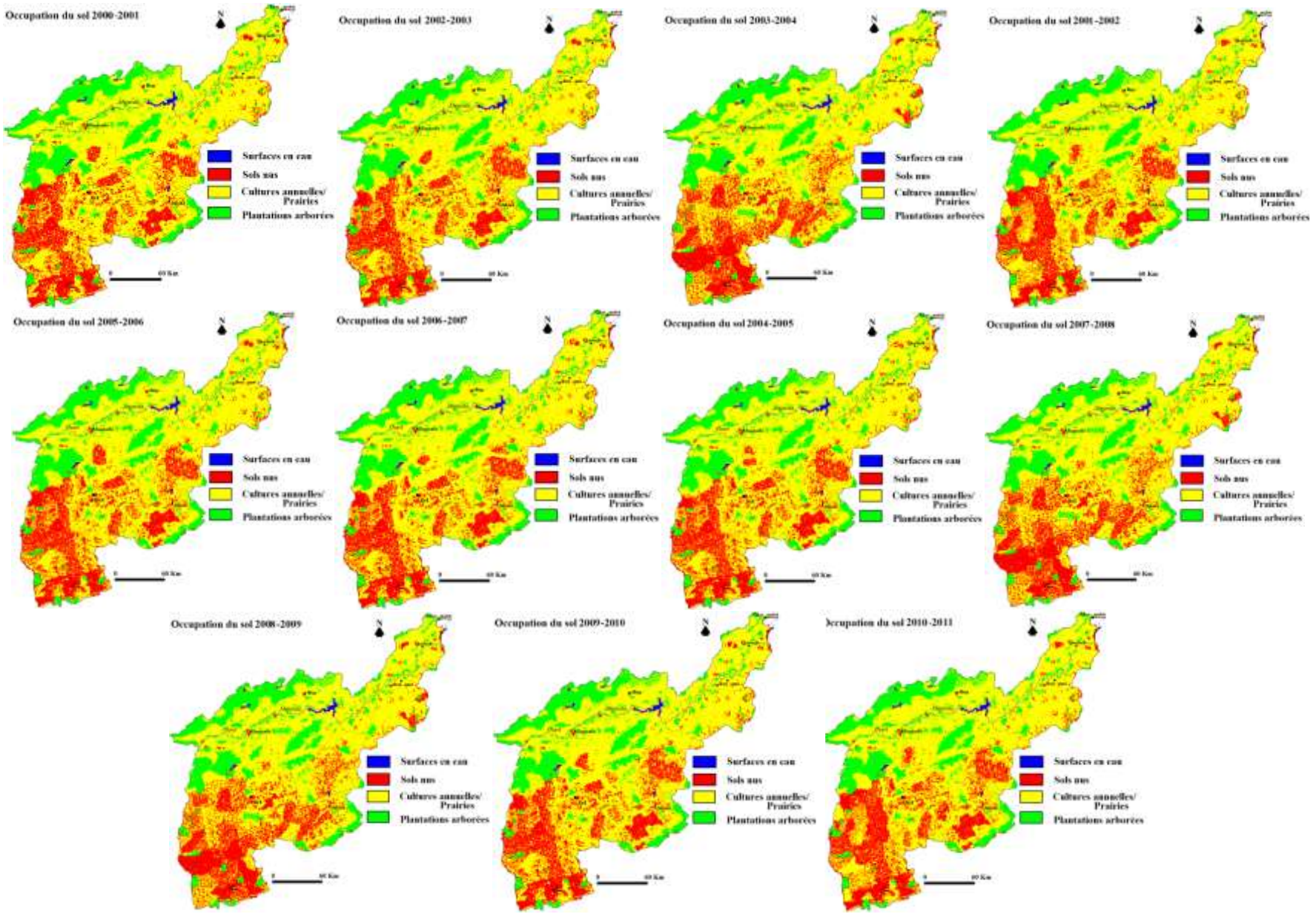


Figure 38: Occupation du sol dans le BV de la Mejerda des saisons agricoles 2000 à 2011 (images satellites MODIS)

Tableau 23: Matrice de confusion de la carte d'occupation du sol à basse résolution spatiale (moyenne des saisons agricoles de références)

	Pixels de Référence (terrain)							
	Classes	Surfaces en eau	Sols nus	Plantations arborées	Cultures annuelles/ prairies	Total	Précision pour L'utilisateur	Erreur de commission
Pixels Affectés (classification)	Surfaces en eau	6288	34	0	0	6322	99,5%	0,5%
	Sols nus	102	53472	430	4207	58211	91,8%	8,2%
	Plantations arborées	0	209	49470	3528	53207	92,9%	7,1%
	Cultures annuelles/ prairies	0	24094	1643	119923	145660	82,3%	17,7%
	Total	6390	77809	51543	127658	**263400**		
	Précision pour le réalisateur	98,4%	68,7%	96%	93,9%	**Précision globale 87%**		
	Erreur d'omission	1,6%	32,3%	4%	6,1%	**Coefficient Kappa 0,87**		
	Occupation du sol moyenne 2000-2011	**2,4%**	**22,1%**	**20,2%**	**55,3%**	**100%**		

a. Validité de la cartographie de l'occupation du sol

On a validé les résultats obtenus par la classification des séries temporelles NDVI-MODIS via la comparaison aux résultats de haute résolution spatiale Landsat, les recensements de l'OTD et des CRDA ainsi que les données issues des campagnes terrain et les extraits Google Earth. Il s'en dégage les remarques suivantes :

- *Le matrice de confusion* : le tableau 24, relatif à la matrice de confusion entre la désagrégation issue des images Landsat et celle des séries temporelles MODIS sur toute la période étudiée, exprime la similarité entre les deux résultats obtenus (Lecerf R. 2008). Toutes les classes sont bien reconnues sur la classification des images MODIS où les valeurs sont respectivement de 99,8 % " les surfaces en eau ", 95,4 % " les plantations arborées ", 88,7 % " les sols nus " et 86,5 % " les cultures annuelles ". Enfin, les cartes d'occupation du sol de référence (haute résolution spatiale) et les cartes estimées à moyenne résolution spatiale sont, plus ou moins analogues dont la précision globale est environ 90 %. Ce résultat permet de dire que l'occupation des terres dans le B.V de la Mejerda est majoritairement rétablie puisqu'on enregistre une erreur quadratique moyenne (EQM) de l'ordre de 0,13 sur toute la période d'étude.

- *Les statistiques du MARH* : le tableau 25 montre que la cartographie de l'usage des terres dans le B.V de la Mejerda est, essentiellement, proportionnelle aux statistiques du MARH (recensements de l'OTD et le CRDA). En effet, durant la période d'étude on assiste à une linéarité entre les deux sources de données.

- *les campagnes du terrain et les extraits Google Earth* sont aussi une source pour la validité des résultats. De ce fait, nos campagnes de terrain prouvent que la carte d'occupation du sol est équitable à la réalité du terrain. Les extraits des images Google Earth en particulier pour les zones forestières indiquent que la classification est identique à la vérité terrain.

Tableau 24 : Matrice de confusion entre la désagrégation issue des images Landsat et celle des séries temporelles MODIS

		Occupation sol de référence (%) (LANDSAT)			
	Les classes	Surfaces en eau	Sols nus	Plantations arborées	Cultures annuelles/ prairies
Occupation du sol (%) 2000-2011 (MODIS)	Surfaces en eau	99,8	0,5	0	0
	Sols nus	0,1	88,7	0,35	6,2
	Plantations arborées	0	0,2	95,4	4,3
	Cultures annuelles/ prairies	0	10,9	2,5	86,5

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

En somme, la carte de l'occupation du sol permet de nous renseigner sur la répartition spatiale du couvert végétal dans le BV de la Mejerda. Elle permet en fait une mise au point entre climat et végétation du fait que le couvert végétal est considéré à la fois comme conséquence et indicateur du climat (Cosandey et *al.,* 2012). En effet, « chaque climat est caractérisé par un tapis botanique, et inversement, chaque plante est considérée comme le reflet d'un type de climat » Ben Boubaker., 2000). De temps plus que l'intérêt thématique de la cartographie de l'occupation du sol est d'identifier le paramètre essentiel à l'estimation des coefficients culturaux ; pour en déduire enfin l'évapotranspiration maximale.

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

Tableau 25: Évolution de l'occupation du sol dans les parcelles types suivant les éléments de validation

Années / Parcelles	2000/2001	2001/2002	2002/2003	2003/2004	2004/2005	2005/2006	2006/2007	2007/2008	2008/2009	2009/2010	2010/2011
Kalaât Landalous	Variété de Légumes	Variété de Légumes	**	Variété de Légumes	Variété de Légumes	Variété de Légumes*	Variété de Légumes*	Variété de Légumes	Variété de Légumes	Variété de Légumes*	Variété de Légumes*
El-Battane	Variété de Légumes	Variété de Légumes	Variété de Légumes	Variété de Légumes	Variété de Légumes	Variété de Légumes*	Variété de Légumes*	Variété de Légumes	Variété de Légumes	Variété de Légumes*	Variété de Légumes*
Dachret Nebeur	**	Blé dur olivier	Jachère olivier	Orge olivier	**	**	Jachère olivier	Blé dur olivier	orge olivier	orge olivier*	orgeBlé dur olivier
Plaine Goubellat	**	Blé dur Légumes	Blé dur Légumes	Orge Légumes	Blé dur Légumes	Blé dur Légumes	orge Légumes	orge Légumes	Blé dur Légumes	Blé dur* Légumes	Blé dur Légumes
Badrouna	orge	Blé tendre	Blé tendre	Blé dur	Blé dur	Blé dur	Blé tendre	Blé tendre	Blé tendre	Blé dur*	Blé dur*
Bazina	Arbres fruitiers	Arbres fruitiers	Arbres fruitiers	Arbres fruitiers	Arbres fruitiers	Arbres fruitiers	Arbres fruitiers	Arbres fruitiers	Arbres fruitiers	Arbres fruitiers*	Arbres* fruitiers
Er-Ramlia	Fourrages (bersim)	Fourrages (bersim)	Fourrages (bersim)	Fourrages (bersim)	Fourrages (bersim)	Fourrages (bersim)	Fourrages (bersim)	Fourrages (ray-grass)	Fourrages (ray-grass)	Fourrages* (ray-grass)	Bourrages(ray-grass)
Ezzâfrane	Blé dur	Blé dur	Blé dur	Blé dur	Blé dur	Blé dur	Blé dur	Blé dur	Blé dur	Blé dur*	Blé dur
Jbel Hmayma	Forêt de résineux	Forêt de résineux	Forêt de résineux	Forêt de résineux	Forêt de résineux	Forêt de résineux	Forêt de résineux	Forêt de résineux	Forêt de résineux	Forêt de résineux*	Forêt de résineux
El-Feîja	Forêt de feuillis	Forêt de feuillis	Forêt de feuillis	Forêt de feuillis	Forêt de feuillis	Forêt de feuillis	Forêt de feuillis	Forêt de feuillis	Forêt de feuillis	Forêt de feuillis*	Forêt de feuillis*
Haîdra	Sols nus	Sols nus	Sols nus	Sols nus	Sols nus	Sols nus	Sols nus	Sols nus	Sols nus	Sols nus*	Sols nus

Légende : Extraits de Google Earth  Statistiques des CRDA  Statistiques de l'OTD 

* campagnes de terrain ** données manquantes.

5.1.2. Ajustements des coefficients culturaux :

Qu'appelle-t-on coefficient cultural ? Comment le calcule-t-on par l'outil de la télédétection satellitale ? Peut-on ajuster les niveaux des coefficients culturaux pour le B.V de la Mejerda ? Ce sont là les questions de base autour des quelles s'articule cette partie de notre étude. Rappelons (voir chapitre troisième de la première partie) que le coefficient cultural (Kc) est défini par la FAO comme étant *« le rapport entre l'évapotranspiration de la culture (ETM) et l'évapotranspiration potentielle (ETP), il intègre les effets des quatre caractéristiques primaires qui distinguent une culture de la culture de référence qui sont : la hauteur de la culture, la résistance de surface sol - végétation, l'albédo, l'évaporation de sol ».* À cet effet, le Kc à un stade de développement donné sera une valeur caractéristique de chaque culture traduisant le rapport entre son évapotranspiration maximale et l'évapotranspiration potentielle. L'évolution de Kc se fait en fonction du stade de développement de la végétation, la nature du couvert végétal et les conditions climatiques locales. En effet, la création des profils des Kc nécessite la détermination des phases de croissance de la végétation, les durées correspondantes de ces phases et la détermination des trois valeurs limites de ces coefficients culturaux, notamment, Kcini (Kc initial), Kcmid (Kc mi-saison) et Kcend (kc fin saison). À partir des données-terrain collectées, nous avons pu identifier des classes thématiques. Il convient de rappeler, à ce titre, que nous avons simplifié la typologie des classes thématiques de l'occupation du sol pour réduire les confusions et simplifier le calcul des coefficients culturaux. Il en découle le regroupement suivant déjà exposé ci-dessus :

- Le groupement des cultures annuelles et/ou les prairies : les cultures maraichères d'hiver et d'été, les céréales, les fourrages, les adventices, plantes spontanées... Cette variété d'occupation du sol se caractérise par les mêmes comportements phrénologiques et évaporatoires. Il se distingue aussi par un changement spectral cyclique ;

- Le groupement des plantations arborées : les forêts de feuillis et de résineux, les arboricultures, végétation aquatique et halophile, en particulier, à côté des cours d'eau et les surfaces humides. Ce groupement présente un changement spectral mineur sur toute l'année ;

- Le groupement des sols nus : sol battant, sol nu rugueux, sol nu recouvert des plantes spontanées durant le printemps et sol urbanisé. Ce groupement ne présente aucun changement spectral ;

- Les surfaces en eau : barrages lacs, sebkhas, cours d'eau… comme les sols nu il se caractérise par un profil stable sur toute l'année.

Dans ce travail, nous avons utilisé le modèle de FAO-56 au niveau de sa démarche à coefficient cultural simple où l'effet de la transpiration de la plante et de l'évaporation du sol est associé dans un seul coefficient. En outre, nous avons tenu compte aussi de l'application de ce modèle à la région d'étude, et ce par l'intégration des coefficients de calibrage lors du calcul des Kc Car l'utilisation de la méthode de la FAO pour déterminer les Kc est rendue difficile pour les deux raisons suivantes (Rana et Katerji, 2000) :

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

- D'un point de vue pratique, les valeurs des Kc sont pour des cultures agricoles, et non pas pour les autres types d'utilisation/d'occupation des sols. De plus, des valeurs ont été obtenues pour les régions humides et leur transposition, dans les régions marquées par l'aridité, nécessite une étude fastidieuse sur les paramètres locaux (date de plantations, de récolte, période de croissance, etc.) car la valeur du Kc est largement affectée par la nature de la culture, sa hauteur, sa durée de cycle, son taux de croissance et la fréquence des pluies (Allen et *al.*, 1998).
- D'un point de vue théorique, l'utilisation d'un coefficient de culture global à l'échelle du bassin versant pose des problèmes de signification de ce paramètre à cette échelle. D'ailleurs, les coefficients de culture semblent être affectés par de nombreux paramètres locaux tels que le développement de la plante ou les conditions climatiques.

Ainsi, la procédure de calcul du Kc simple consiste à suivre les étapes suivantes :

- **Étape 1** : elle se résume à la mise en équation du Kc. Après avoir analysé les séries temporelles des NDVI sur toute la période étudiée, saisir les valeurs des Kc trouvées dans la littérature sur la Tunisie et celles des Kc de la FAO, on a ajusté les coefficients de calibrage A et B de la formule utilisée par Duchemin appliquée au Maroc lors du projet SUDMED.

Kc pour les annuelles : A * (NDVI- $NDVI_{min}$) avec A coefficient de calibrage égal à 1,7

Kc pour les plantations arborées : A* NDVI - B avec A égale à 1.181* et B égale à 0.0265

Kc pour les sols nus : A* (NDVI) avec A égale à 2.5 ; il est proche de Kcin (Allen et *al.*, 1998)

Kc pour les surfaces en eau égale à 1.

- **Étape 2** : Identifier les phases de croissance de la culture et les durées correspondantes, et sélectionner les coefficients culturaux correspondants. Ici, nous avons élaboré un calendrier de cycle de développement du couvert végétal dans le B.V de la Mejrda (tableau 26).
- **Étape 3** : elle consiste à ajuster les coefficients culturaux pour les conditions climatiques durant les mêmes phases de croissance (voir tableau 27).
- **Étape 4** : Construire la courbe du coefficient cultural (Kc) afin de calculer l'ETM. Cependant, la connaissance des trois valeurs du coefficient cultural de la phase initiale (Kcini), de la mi-saison (Kcmid), de la récolte (Kcend) et les durées des périodes de croissance nous permet de déterminer la valeur d'une végétation à n'importe quel moment du cycle (Er-raki 2007). Ici, on se limite à l'échelle mensuelle c'est-à-dire le profil du Kc contient 12 points et correspond aux 12 mois de l'année (voir figure 59 et tableau 27).

Tableau 26 : Calendrier de développement du cycle de quelques variétés du couvert végétal agricole dans le BV de la Mejerda

	Démarrage	K_{cini}	K_{cmi}	K_{car}	L_{ini}	$L_{dév}$	L_{mi}	L_{ar}	Durée totale
maraichères d'arrière-saison *(laitue, petit pois, pomme de terre)*	octobre	0,5	1,15	0,7	20	35	55	20	130
maraichères de saison *(tomate, poivron, oignon)*	Mars	0,5	1,15	0,75	30	40	65	30	165
céréales et fourrages	Novembre	0,7	1,15	0,3	30	140	40	30	240
Prairie (adventices)	Décembre	0,5	1,15	1,1	30	120	40	30	220
Plantations arborées *(bois, Olivier…)*	Janvier	0,65	0,7	0,7	30	90	60	90	270

Avec : Kcini, coefficient cultural en phase initiale, Kcmi de mi-saison, Kcar arrière-saison, Lmi durée du développement en phase initiale, Ldév développement, Lmi mi-saison et Lar arrière-saison.

Tableau 27: Les niveaux mensuels moyens des Kc calibrés pour le B.V de la Mejerda

	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février
Cultures maraichères	0,5	0,5	0,5	1,15	1,15	0,5
Céréalicultures et cultures fourragères	0,3	0,3	0,4	0,4	0,6	0,9
Prairie (adventices)	0,3	0,3	0,4	0,4	0,6	0,9
Plantations arborées	1	0,7	0,5	0,5	0,7	0,9
	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août
Cultures maraichères	0,5	1,15	1,15	1,15	0,5	0,4
Céréalicultures et cultures fourragères	1,15	1,15	1,15	0,3	0,3	0,3
Prairie (adventices)	1,15	1,15	1,15	0,7	0,3	0,3
Plantations arborées	1	1	1	0,8	0,5	0,5

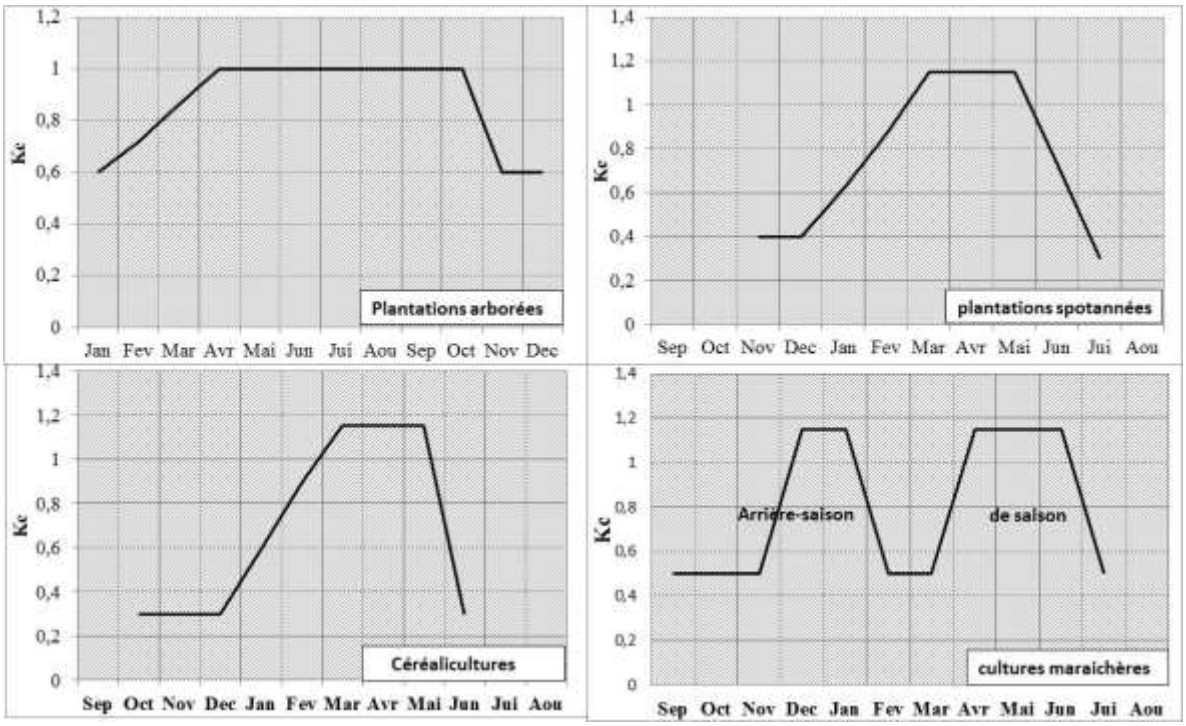


Figure 4: Les Profils des Kc pour les différentes classes d'occupation du sol dans le BV de la Mejerda (dans la parcelle de Badrouna au Sud-Est de Jendouba)

La cartographie des Kc dans le BV de la Mejerda montre que les valeurs sont faibles durant le stade initial *Kc ini*, elles augmentent au cours de la phase de développement pour atteindre son maximum entre les phases de floraison et de maturation *Kc mid*, pour ensuite décroître sur la période de la fin de vie de la culture *Kc end*. En effet, elles sont constantes durant la phase initiale où on remarque la prédominance du sol nu et pendant la phase de mi-saison où la végétation est en plein développement.

Enfin, les résultats obtenus à propos des coefficients culturaux pour l'ensemble du BV de la Mejerda sont comparés aux résultats publiés par la FAO en 1998 dans les régions humides (figure 60). Il s'en dégage les remarques suivantes :

- les résultats sont semblables pour l'occupation du sol de types surface en eau et l'espace urbain ;
- l'évolution des valeurs des coefficients culturaux à l'échelle annuelle est, grosso-modo, similaire entre les deux régions ;
- les valeurs de la FAO sont, dans la plupart des cas, supérieures à celles ajustées dans le B.V de la Mejerda ;
- on remarque un décalage pour les légumes et les céréalicultures, qui s'explique par la différence du calendrier agricole entre les deux régions.

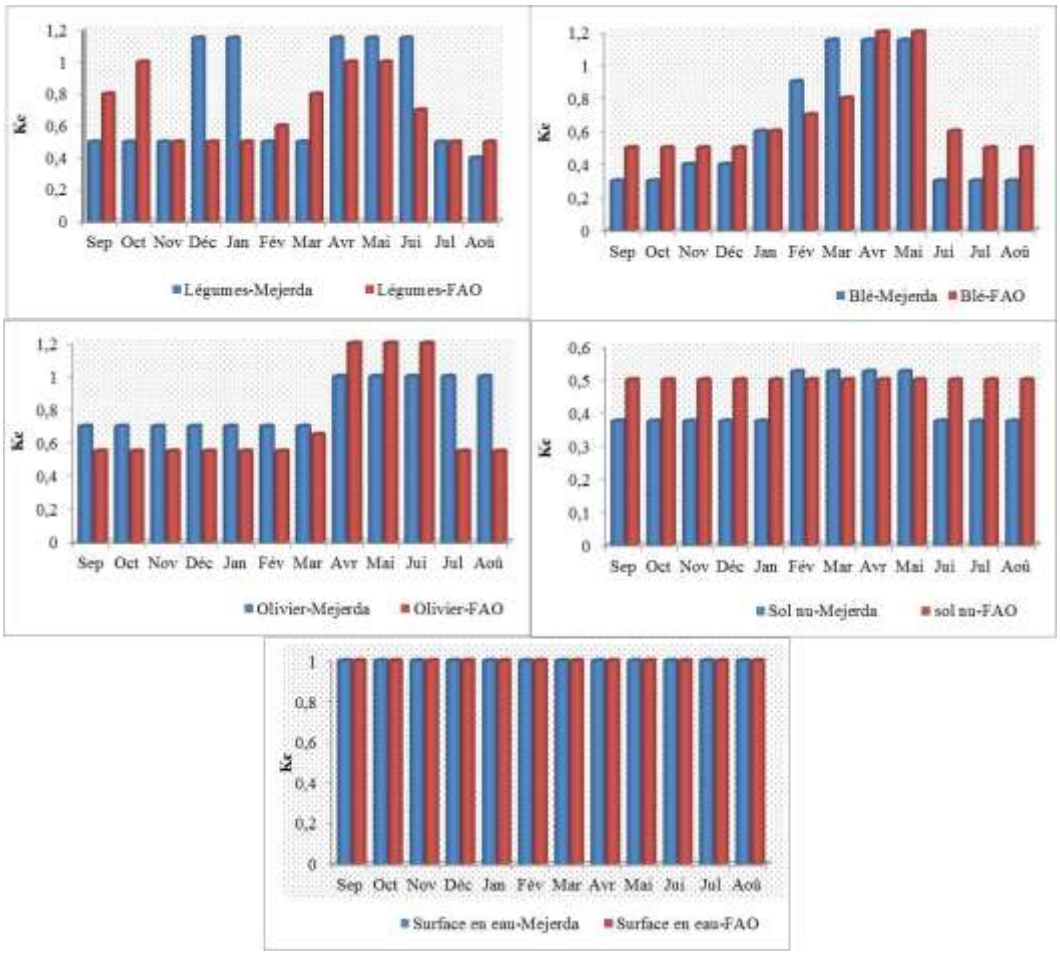


Figure 5: Comparaison des coefficients culturaux ajustés pour le BV de la Mejerda et ceux publiés par la FAO 1998 pour les régions humides.

Au total, nous avons essayé de cartographier l'occupation des terres dans le bassin versant de la Mejerda. À partir de cette cartographie, nous avons calibré les coefficients culturaux dans la région pour les différentes classes de l'occupation des sols retenues. Ces résultats sont combinés avec les ETP pour en déduire les ETM. Mais, il faut signaler que l'étude à l'échelle parcellaire s'impose pour la carte de l'occupation des sols :

- établir un découpage plus détaillé, et ce par la fragmentation des classes retenues en sous-classes. c'est-à-dire passer du niveau 1 (urbain, agricole, rural, forêts, eau, zones humides) au niveau 2, à titre d'exemple pour le niveau agricole : cultures et Pâturages, vergers et vignes, cultures maraîchères, autres zones agricoles (classification conventionnelle USGS)
- faire des classifications de l'occupation des sols à des fins climatiques, tout en se fondant sur des caractéristiques bien définies : besoins en eau de chaque classe, le bilan d'énergie, le comportement du cycle de développement,
- chercher plus de précision à propos des valeurs des coefficients culturaux en fonction de la typologie des espèces.

5.2. Les niveaux annuels de l'évapotranspiration maximale

Les totaux annuels de l'évapotranspiration maximale montrent des valeurs inférieures à celles de l'évapotranspiration potentielle. La variation spatiale se fait dans le sens inverse de celui de l'ETP ; comme elle dépend de l'occupation du sol et du cycle végétatif.

5.2.1. Le niveau moyen annuel de l'évapotranspiration maximale

La figure 61 représente l'ETM moyenne annuelle dans le BV de la Mejerda. À l'échelle de toute la période analysée (2000-2011), les valeurs oscillent de 500 mm à 1150 mm, soit un niveau journalier varie de 1,3 mm à 3,1 mm et avec un rapport entre l'ETP et l'ETM d'environ 0,4 à 0,8. Par conséquent, l'ETM dépend du pouvoir d'évaporation de l'air ou demande climatique (ETP) et du coefficient cultural (Kc) (Er-raki., 2007 ; Amri., 2013 ; Mejerda et *al.,* 2015). Les valeurs de l'ETM diminuent suivant un gradient Sud-Nord pour l'ensemble de la région, c'est-à-dire dans le sens inverse de l'ETP. En effet, les secteurs sud du Hant Tell enregistrent un palier entre 500 mm et 750 mm, les plaines riveraines d'Oued Mejerda détiennent des valeurs alentour de 900 mm et les secteurs de l'extrême nord se caractérisent par les maxima de l'ETM où le niveau peut atteindre 1150 mm, en particulier, sur les massifs de la Kroumirie. Ceci nous permet de distinguer trois grandes nuances régionales principales, et ce en relation étroite avec le type d'occupation du sol et les conditions climatiques, la biomasse et le taux de recouvrement du sol par la végétation :

- Les secteurs nord du BV de la Mejerda : ils occupent la rive gauche du Oued Mejerda, ce sont les domaines les plus arrosés et se caractérisent par un couvert végétal dense constitué essentiellement des plantations arborées (chêne vert, chêne liège, olivier, oléo-lentisque…). Ces caractéristiques témoignent des quantités d'évapotranspiration maximale importantes, en particulier au niveau de la transpiration de la végétation. Ainsi, les pertes d'eau frôlent les 1150 mm par an. À titre d'exemple El-Feija 1143,3 mm Jendouba 956,5 mm. Cette répartition est expliquée par les coefficients culturaux élevés qui se rapprochent de 1 sur toute l'année, l'activité végétative importante et l'effet des flux arrosés du Nord-Ouest qui attribuent des épisodes des pluies. La nature et la densité de la végétation déterminent près de 62% de la distribution des totaux de l'ETM dans l'espace (Caroline et *al.,* 2005).
- Les plaines de la Mejerda coïncident avec les terres arables. Elles se caractérisent par une gamme d'ETM, qui varie de 800 à 1000 mm. Cette zone explique un deuxième axe de variation spatiale de l'ETM, où les valeurs marquent une variation significative. On passe ainsi de 956,5 mm à Jendouba à 865,2 mm à Testour au sud du barrage de Sidi Salem. Toutefois, la dynamique du couvert végétal et l'occupation du sol dans ce secteur semblent exercer une influence remarquable. Ainsi, Arnell (1999) suppose que l'évaporation des forêts est supérieure de 10% à l'évaporation des milieux herbacés.
- Les secteurs sud de la Mejerda situés sur les plateaux du Tell et le versant sud-est du sous-bassin versant de Siliana : aux alentours de Tala, l'ETM enregistre son niveau le plus bas avec des quantités qui oscillent entre500 mm et 650 mm. Cette répartition géographique subit l'effet à la fois de la nature de l'occupation du sol et les coefficients culturaux. En effet, les sols nus se distinguent par des Kc très faibles d'environ 0,4 ce qui aboutit à une demande evaporative faible et donc à des valeurs d'ETM minimales.

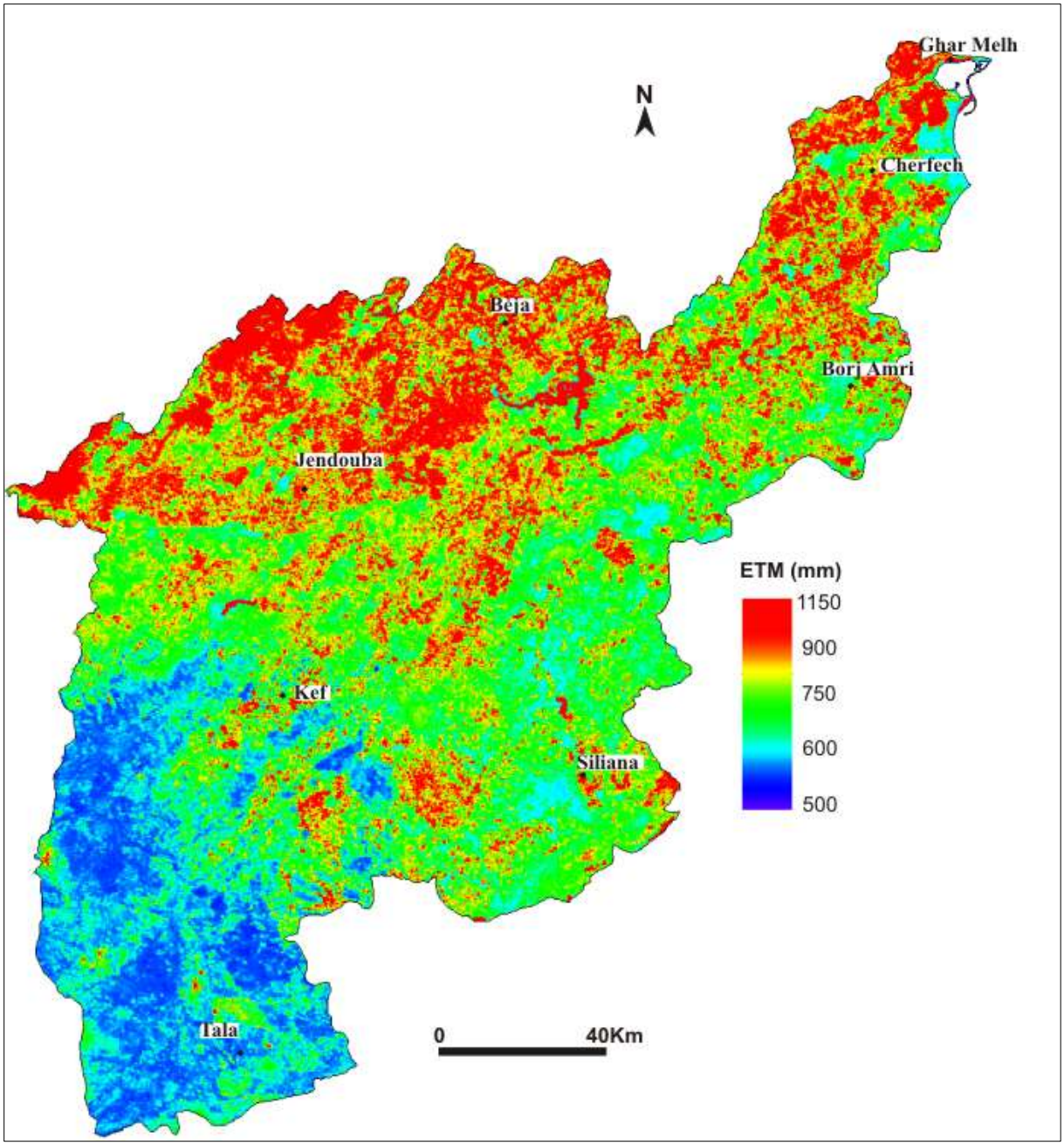


Figure 6: Le niveau annuel moyen de l'ETM (mm) dans le BV de la Mejerda (2000-2011)

Cette distribution spatiale de l'ETM est très expressive dans la mesure où elle prend la même allure que l'occupation et l'utilisation des terres dans le B.V de la Mejerda. Le changement de l'occupation des sols influence le climat en modifiant les propriétés de la surface telles que l'albédo, la rugosité et l'évapotranspiration (Davin., 2008). En ce qui concerne l'évapotranspiration, Davin a constaté (2008) que les sols végétalisés ont une ETM supérieure environ 3 fois que l'ETM des sols nus. L'ETM est, donc, très dépendante de la biomasse et des conditions climatiques. Mis à part les facteurs climatiques, elle laisse donc croire que l'ETM est maximale lorsqu'il s'agit d'un territoire à couvert végétal dense et elle est minimale en l'absence de la végétation (Caroline et *al*., 2005). On constate aussi qu'il y a

principalement quatre groupes de classes d'ETM : l'ETM des plantations arborées, l'ETM des plantations à cycle annuel (cultures et plantes spontanées), l'ETM des sols nus et urbanisés et l'ETM des plans d'eau.

Toutefois, les mécanismes de photosynthèse (respiration) comme ceux de transpiration résultent d'un flux de diffusion entre la cavité stomatique et les composantes de l'atmosphère. En fait, la production de biomasse est bien reliée à l'ETM, ce résultat permet de dire que les quantités évaporées sont fortement reliées aux coefficients culturaux (Seguin B., 1990). D'un autre coté, les secteurs exposés aux influences des flux humides situés sur les massifs de la Kroumirie enregistrent plus d'évaporation. Par contre, les plaines encaissées se caractérisent par des valeurs plus ou moins faibles, ce qui permet de constater que la variabilité spatiale de l'ETM est liée à des conditions topoclimatiques. *« Elles font apparaitre un ensemble bioclimatique bien individualisé localisé en Kroumirie au-delà de 500 m d'altitude »* occupé par une forêt dense de chênes zéine et chênes lièges… (Feki M et *al.,* 2013).

En définitive, la répartition spatiale de l'ETM à l'échelle annuelle subit l'effet de deux facteurs essentiels, à savoir le type de l'occupation du sol et les conditions topo-climatiques. Les quantités de l'ETM montrent que les besoins en eau de la végétation dans la région sont nettement élevés, et ce en regard des faibles apports de précipitations. Ce résultat pourrait théoriquement permettre de meilleures prises de décisions sur certains aspects dans le BV de la Mejerda, tels que la détermination de la conduite d'irrigation et la délimitation des secteurs les plus touchés par la contrainte des besoins en eau.

5.2.2. La variabilité interannuelle de l'évapotranspiration maximale

L'analyse de la variabilité interannuelle revêt une importance capitale dans la mesure où elle permet de saisir l'évolution de l'ETM au cours de la période étudiée. À cet effet, le tableau 28 et la figure 64 indiquent, pour quelques stations et parcelles types, la variabilité interannuelle de l'ETM sur la période de 2000 à 2011. Le choix de ces stations et parcelles est guidé par le fait d'une diversité entre les différents secteurs du BV de la Mejerda, d'une variation de l'occupation des sols d'un secteur à un autre, d'une variation spatiale des besoins en eau de la végétation dans la région étudiée et d'un agissement différent des paramètres climatiques sur la variabilité de l'ETM d'un endroit à un autre. Nous pouvons, en outre, relever les remarques suivantes :

- Pour l'ensemble des stations et parcelles étudiées, l'ETM accuse, globalement, au fil des années des fluctuations faibles, dans la mesure où les valeurs du coefficient de variation varient de 2,7% à 5,6%. D'une part, ces fluctuations sont liées à l'irrégularité du régime climatique d'une année à l'autre. Ce régime se caractérise par une variabilité du bilan radiatif, le facteur essentiel de la demande évaporative. D'autre part, elles sont à la variabilité des NDVI, qui résulte du changement des activités agricoles d'une année à l'autre dans certains secteurs. L'ETM des plantations arborées et les sols nus, est plus moins stable durant la période étudiée par contre l'ETM de la végétation annuelle varie quelque peu d'une année à l'autre. En effet, la variation de l'ETM est beaucoup plus liée à la carte de l'occupation du sol (les propriétés des coefficients culturaux) qu'aux conditions climatiques (Er-raki., 2008 ;

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

Amri., 2013). Nous pouvons signaler aussi, et indépendamment de la variation de l'occupation du sol, que la variabilité de l'ETM diminue avec l'altitude (tableau 28). C'est-à-dire sous l'effet de l'altitude les besoins en eau de la végétation (ETM) ont tendance à se régulariser et à se diminuer d'eux-mêmes (Benjamin., 2007). Cependant, les niveaux de l'ETM peuvent cacher à leur tour une grande diversité de la variabilité interannuelle de l'ETM d'un secteur à un autre.

- La rive gauche de la haute-Mejerda (figure 64a): dans ce secteur la variabilité s'intensifie au fur et à mesure qu'on se déplace des sommets de la Kroumirie vers le fond de la vallée de la Mejerda. L'écart absolu maximal est enregistré à Badrouna 104,4 mm où l'ETM oscillent respectivement entre 1010,4 mm (2001-2002) et 906 mm (2003-2004) avec un écart-type de 37,1 mm soit une variation relative de 3,9 %. Par contre, le site d'El-Feîja montre un écart absolu de 93,9 mm, un écart type de 30,7 mm soit un coefficient de variation de 2,8 %. Ces valeurs des écarts-types sont proportionnelles aux cumuls annuels de l'ETM. Autrement dit, la variation est d'autant plus élevée que le niveau de l'ETM est plus fort.
- Le Haut Tell occidental (figure 62b) : dans ce secteur l'évolution de la variation de l'ETM est régulière dans la mesure où les courbes sont plus redressées. En effet, à Haïdra, située à sud-ouest de Tala, l'écart absolu enregistre son niveau le plus bas 18,6 mm, mais il augmente avec l'altitude pour atteindre 86,8 mm à Tala. De même pour le coefficient de variation il croit de 2,7% à 4,7 % dans les mêmes stations. Il n'y a aucun doute que cette nuance de variation est conjuguée à une stabilité de l'activité photosynthétique et par conséquent des profils des coefficients culturaux quasi-linéaires puisque cette zone est, majoritairement, caractérisée par une occupation de terres nues durant toute l'année en particulier dans les plateaux ouest de Tala.
- La moyenne Mejerda (figure 62c) : les sites représentatifs de cette partie enregistrent la dispersion la plus importante, par rapport à la moyenne, de l'ETM dans l'ensemble du BV de la Mejerda. L'écart-type atteint 47,5 mm, soit un coefficient de variation de 5,6 %. En fait, c'est une caractéristique des plaines et des secteurs abrités qui se distinguent par : des cumuls élevés de l'ETM, une carte d'occupation/utilisation des sols qui peuvent subir de véritables bouleversement, d'une année à l'autre, en matière de pratiques agricoles et des conditions environnementales (Er-raki., 2007).
- La basse Mejerda (figure 62d) : la variabilité de l'ETM perd de l'ampleur pour atteindre son minimum, notamment, à Ghar Melh avec un écart absolu de 21,1 mm et d'un écart type de 23,9 mm. Il est possible, ici, que l'effet de la mer joue le premier rôle comme un régulateur du pouvoir évaporant du climat et qui contribue à diminuer le degré de dispersion. Plus qu'on s'éloigne de la mer, la variation augmente sensiblement où l'écart absolu frôle les 33,5 mm, soit une variabilité relative de 3,8 %, et pour le site d'El-Battane. Celui-ci se caractérise par un profil de variation semblable à celui de Badrouna. Ceci est justifié par la présence des mêmes classes d'occupation du sol dans les deux sites, qui sont les cultures annuelles. C'est-à-dire les mêmes profils des NDVI et les mêmes aspects agro-climatiques (Mjejra et *al*., 2014).

Tableau 28 : Variabilité interannuelle de l'ETM (mm) à quelques stations et parcelles-types dans le BV de la Mejerda (2000-2011)

Régions	Station/ parcelles	Caractéristiques des stations et parcelles types*	Écarts absolus (mm)	Écarts-type (mm)	Coefficients de variation (%)
Rive gauche de la Haute-Mejerda	Badrouna	Station de fond de la vallée de la Mejerda située à l'est de Jendouba avec une altitude de 130m. La station est bien dégagée au nord, vers le sud elle est à l'abri des Jbels : Twil, Margab… L'occupation du sol est de type grande cultures (Blé, orge).	104,4	37,1	3,9
	El-Feïja	Station forestière typique au sommet de la Kroumirie, avec une altitude de 901m. Bien exposé au flux arrosés du Nord-Ouest. L'occupation du sol est une forêt dense de chaînons (parc national).	93,9	30,7	2,8
Haut-Tell	Tala	Station d'altitude (1020 m) et se trouve très dégagée vers le Nord et du côté sud est sous l'abri des sommets de la Dorsale (Jbel Bireno 1419 m). L'occupation du sol est de type prairie et/ou sol nu	86,8	27,2	4,7
	Haïdra	Station située sur le plateau sud du Haut Tell et à l'ouest de Tala, avec une altitude de 809m. Station dégagée est occupée par les sols nus.	18,6	14,5	2,7
Moyenne Mejerda	Testour	Station de dépression car elle est située au fond d'un arc montagneux dans la moyenne vallée de Mejerda, en bordure de l'oued et au sud du barrage Sidi Salem. Son altitude est de 135m. L'occupation du sol est de type arboriculture : olivier	104,4	37,3	4,2
	Er-Ramlia	Station de plaine au nord de Siliana au piémont de la Dorsale, avec une altitude de 491m. Elle est bien dégagée vers le Nord et côté sud elle est à l'abri de l'axe de la Dorsale (Jbel Sarej). La station est occupée par les fourrages.	152,1	47,5	5,6
Basse-Mejerda	Ghar Melh	Station littorale, située sur le piémont du versant sud de Jbel Ennadhour, avec une altitude de 46m. Station exposée au sud sous influence direct de la mer. L'occupation du sol : surface humides	21,1	23,9	2,9
	El-Battane	Station de la plaine de la basse Mejerda et au fond assez étroit de la vallée, avec une altitude de 105m. Occupée par les périmètres irrigués publics (des légumes, blé irrigué)	97,6	33,5	3,8

* Source : Bousnina., 2000 et les résultats des campagnes de terrain

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

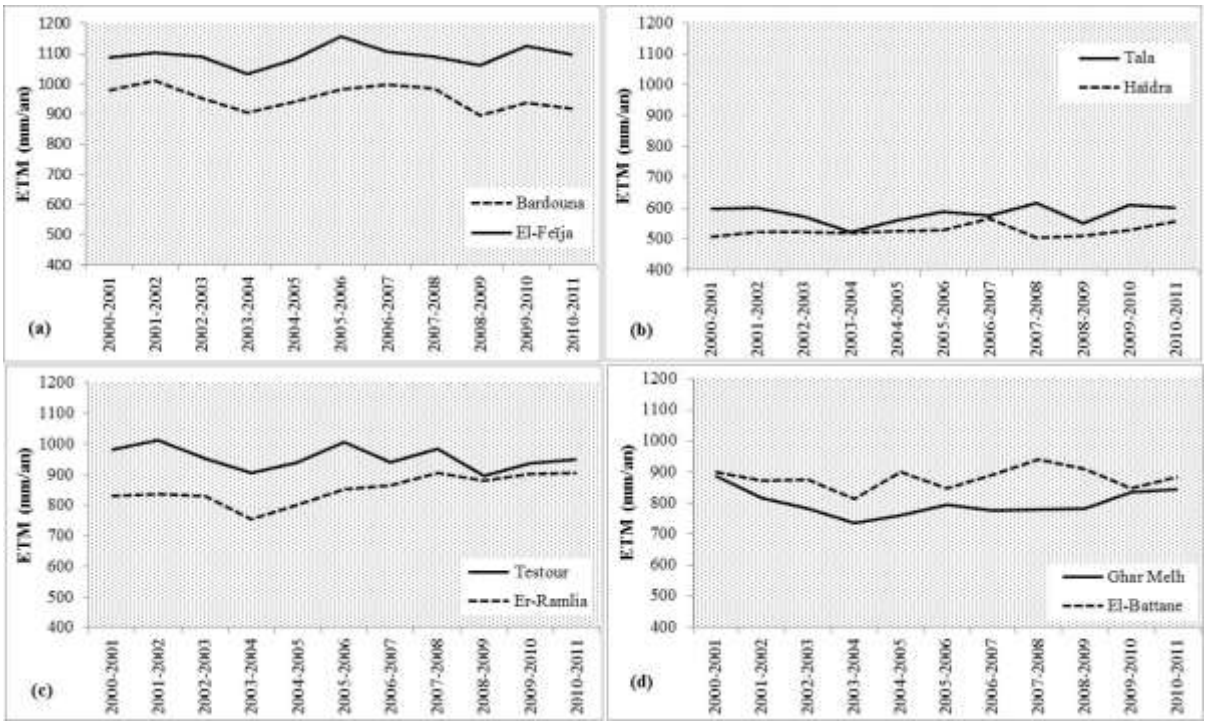


Figure 7: Variabilité interannuelle de l'ETM dans le BV de la Mejrda : (a) la rive gauche de la haute Mejerda ; (b) le Haut Tell ; (c) la moyenne Mejerda et (d) la basse Mejerda (2000-2011)

Nous pouvons, aussi, souligner le fait que la variation de l'ETM est moins importante que celle de l'ETP, mais elle se diffère d'une région à une autre. Ainsi, la variation de l'ETM traduit un contraste qui existe d'abord entre les occupations des terres : les plantations arborées à feuillage pérenne (cas des oliviers et les séries de chênes verts), couvert végétal des plantations annuelles et l'occupation du sol à nu. Ensuite, entre les différentes formes de la topographie : les vallées enclavées et les reliefs d'altitude. Enfin, l'opposition de continentalité/maritimité : entre les secteurs littoraux et ceux de l'intérieur. Selon ces apparences, il est possible de retenir, par ordre d'importance les principaux facteurs qui déterminent la variation de l'ETM dans le B.V de la Mejerda : la nature de l'occupation du sol, les conditions topo-climatiques, et la proximité de la mer. Ces fluctuations de l'ETM entre les années ont- elles la même hiérarchie au sein de l'année agricole qui dépend dans une très large mesure des conditions climatiques ?

5.3. Les niveaux saisonniers de l'évapotranspiration maximale

Le niveau saisonnier de l'ETM se caractérise par un grand contraste, en particulier, dans la vallée de Mejrda. Les fortes quantités de l'ETM sont celles du printemps et les plus faibles sont celles de l'hiver.

5.3.1 En automne

L'automne s'exprime, dans le B.V de la Mejerda, par des quantités faibles de l'ETM, où elles oscillent de 90 mm à 145 mm, soit une moyenne journalière de 1 à 1,6 mm et un écart absolu de 55 mm (cf. figure 63a). L'ETM marque son niveau le plus bas dans les environs de

Tala 93,5 mm, la haut vallée de Mallègue 95,1 mm et dans les plaines locales situées dans les secteurs bas de la région (plaine de Gardimaou à l'ouest de Jendouba 97,7 mm, plaine de Gboubellat au sud-ouest de Barj Amri 112,2 mm, plaine de Cherfech 99,2 mm…). Par ailleurs, les régions montagneuses enregistrent le niveau le plus élevé qui dépasse 130 mm : les forêts de la Kroumirie de 138,3 à 145 mm, l'ensemble des Jbels à l'ouest du Kef de 134,1 à 142 mm et les sommets de la Dorsale de 131,4 à 140 mm. Ces résultats confirment la même image retenue pour l'ETM à l'échelle annuelle, par laquelle la variation spatiale des niveaux de l'ETM est moins importante dans les secteurs élevés que les secteurs bas. En dehors de la bande de la Kroumirie, les cumuls automnaux de l'ETM perdent leur caractéristique de dégradation dans le sens Sud-Nord. Cette situation peut être expliquée par deux facteurs : le premier se traduit par une faible transpiration qui se rapproche de son niveau nul et une faible évaporation des sols ; le deuxième concerne les comportements des coefficients culturaux, dans la mesure où ils traduisent la capacité d'évapotranspiration d'une espèce végétale (Allen et *al.,* 1998 ; Simonneaux et *al.,* 2009). En fait, en automne les niveaux des coefficients culturaux de la végétation annuelle sont, partout, faibles (alentour de 0,3 cf. figure 55). L'automne s'accole avec la période de semis où les terres sont élaborées ou à nues. Dans ce cas l'évapotranspiration dépend, essentiellement, de l'évaporation des sols. Les coefficients culturaux arbres ont des valeurs moyennes (pas moins de 0,5) même s'ils sont en baisse à cause de la chute des feuilles. Ces conditions aboutissent à des faibles totaux de l'ETM. À cet égard, Arnell (1999) confirme notre explication par le fait que la végétation arborée se caractérise par un niveau d'évapotranspiration plus élevée que les autres occupations des sols. De même, (1991) a montré qu'il existe une liaison entre la quantité de l'ETM et le découpage de l'occupation des sols, dans la mesure où le gradient de l'ETM augmente de la classe « herbe » aux classes forestières (tableau 29).

Tableau 3 : valeurs de l'ETM calculées pour différentes classes d'occupation du sol, en plein saison de développement végétal (NB : les valeurs élevées des couverts forestiers sont surestimées, Taillon A., 1991)

Classes	valeurs d'ETM ($mm.jr^{-1}$)
herbe courte	4,06
herbe longue	4,56
cultures maraîchères	4,64
cultures à petits grains	4,89
prairies et pâturages	5,07
cultures fourragères	5,74
friches	5,98
grandes cultures	6,11
forêts de feuillus	12,87
forêts de conifères	13,23

(Source : Taillon Annie., 1991)

Une autre explication peut être avancée, ici, à propos de la variation spatiale de l'ETM. Elle concerne l'hétérogénéité de la couverture végétale et les échanges sol-atmosphère. En effet, l'hétérogénéité du couvert végétal constitue un facteur qui influe sur la

répartition de l'ETM par la différence de l'albédo de surface et sa capacité à soutirer l'eau du sol par transpiration (Caroline et *al.,* 2005). De plus, Penman (1956) considère que l'évapotranspiration des plantes dépend, entre autres, de l'albédo de la surface quel que soient le type de sol ou l'espèce végétale. Ainsi, la carte 65a permet de constater que la distribution spatiale de l'ETM est en relation avec la variation de l'occupation du sol dans la région puisque, les classes « plantation arborée », localisées à l'extrême nord de la région et les classes « cultures annuelles » situées alentour de l'oued Mejerda sont celles qui génèrent des totaux d'ETM les plus élevés. En outre, les échanges sol-atmosphère qui se manifestent par l'échange d'énergie, contribuent, à leur tour, à la distribution de l'ETM. Les surfaces évaporantes se caractérisent par des niveaux différents d'albédo, ce qui contribue activement à la régulation des échanges et l'influence sur le cycle de l'énergie (Davin., 2008). C'est pourquoi les faibles valeurs de l'ETM correspondent au sol nu, avec un albédo élevé de 0,15 à 0,40 dans la mesure où elle réfléchit plus d'énergie que prévue pour l'évaporation. Par contre, les surfaces à faible albédo (tableau 31) ont de fortes valeurs de l'ETM, parce qu'elles emmagasinent plus d'énergie, qui sera utilisée par la suite au mécanisme de l'évaporation.

Tableau 30 : Valeurs de l'albédo pour différentes surfaces (Source : Cosandey et *al.,* 2012)

Surfaces du sol	Albédo
Surface d'eau	0,03 à 0,10
Forêt	0,05 à 0,20
Sol cultivé	0,07 à 0,14
Pierres et rochers	0,15 à 0,25
Champs et prairies	0,10 à 0,30
Sol nu	0,15 à 0,40
Neige ancienne	0,50 à 0,70
Neige fraîche	0,80 à 0,95

Des variations « locales » peuvent également être observées, les causes étant reliées aux conditions topo-climatiques. Ainsi, l'automne se caractérise par une variation spatiale de l'ETM qui se diffère d'une région à une autre. La variation prononcée est observée dans le versant de la Kroumirie, dans la mesure où on passe brusquement de 145 mm dans les massifs à 95 mm dans les fonds vallées à l'est de Jendouba. L'écart absolu est de 50 mm soit 1/3 de la valeur maximale et avec une variation relative de 42%. Inversement les hautes terres de Tala et les basses terres de Siliana enregistrent une variation. L'écart absolu est autour de 25 mm soit une variation relative de 20,1%. Une telle variation est, à notre avis, exprimée par l'arrivée des types de temps perturbés sur la région et le début de l'activité agricole qui influe sur la dynamique du couvert végétal et son comportement de transpiration.

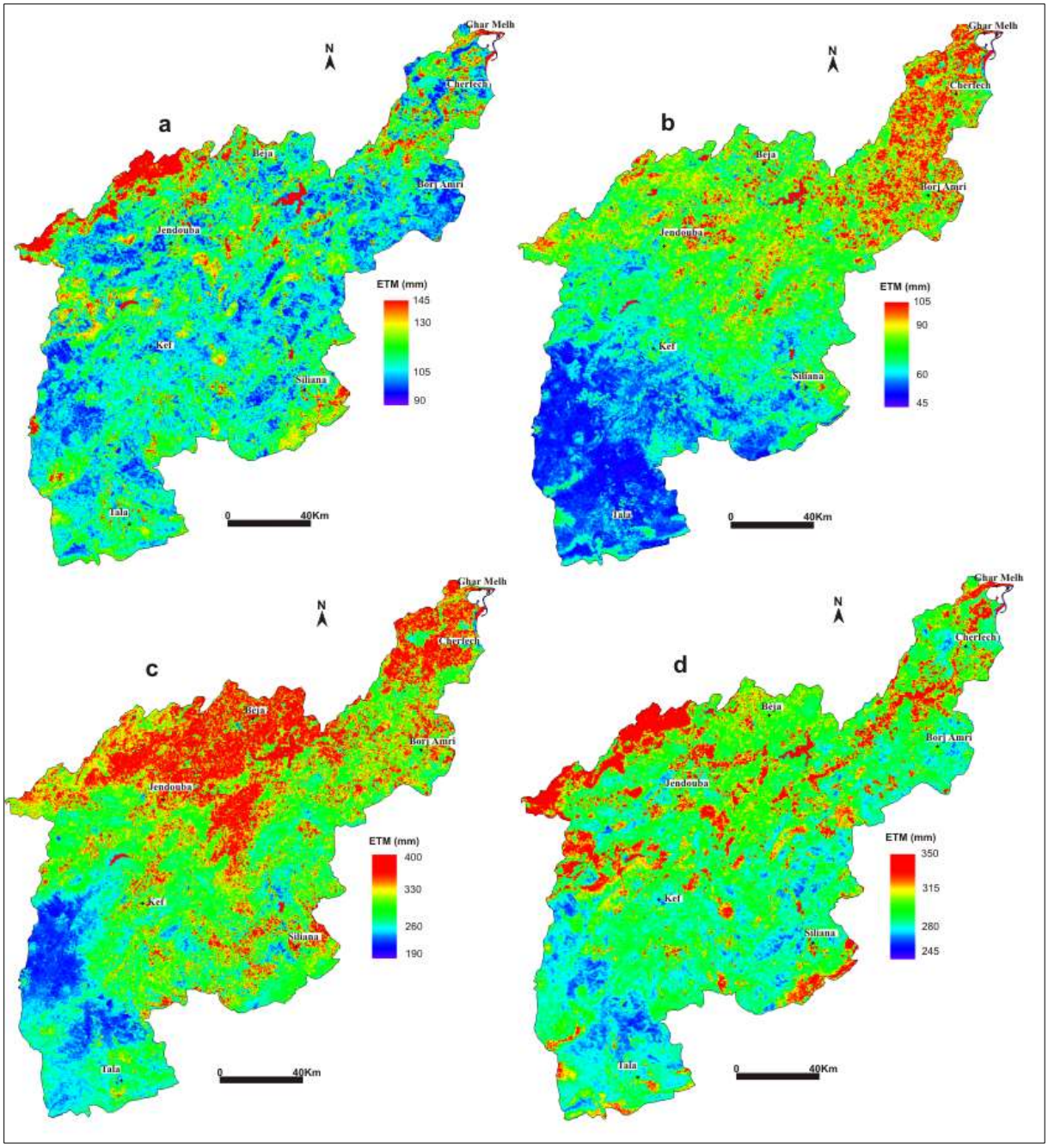


Figure 8: Les niveaux saisonniers de l'ETM (mm) (a) automne, (b) hiver, (c) printemps et (d) été, dans le BV de Mejerda (2000-2011)

5.3.2 En hiver

La figure 63b montre une répartition, tout à fait typique, de l'ETM durant l'hiver. Elle enregistre une chute considérable par rapport à l'automne, qui varie de 28,8 mm à Cherfech, à 78 mm à Ghar Melh, soit une diminution de l'ordre de 24,9 % et 63,3%, dans les mêmes stations (Tableau 31). D'ailleurs, l'ETM enregistre son niveau le plus bas, où il oscille généralement de 45 à 105 mm, soit un niveau journalier de l'ordre de 0,55 mm et 1,2 mm. Ce niveau très bas est lié aux facteurs suivants :

- Durant l'hiver le pouvoir évaporant de l'atmosphère, les coefficients culturaux sont plus ou moins faibles notamment pour la végétation annuelle car elle est peu couvrante. En conséquence, les besoins en eau de la végétation sont très faibles.
- L'activité photosynthétique des plantes est très réduite en raison d'une faible durée d'insolation et la régulation stomatique est minimale. Il en ressort la diminution du rythme de l'évapotranspiration (Huber et *al*. 2007).

Tableau 31 : variabilité inter-saisonnière (automne/hiver) de l'ETM dans le BV de la Mejerda (2000-2011)

Stations	ETM Automne	Hiver	Chute absolue (mm)	Chute relative (%)
Jendouba	138,1	82,7	55,5	40,2
Kef	121,9	56,4	65,5	53,7
Tala	93,5	46,4	47	50,3
Siliana	119,5	68,8	50,6	42,4
Bèja	122,0	74,6	47,5	38,9
Borj Amri	129,3	86,5	42,8	33,1
Cherfech	115,4	86,7	28,8	24,9
Ghar Melh	123,2	45,3	78	63,3

Cependant, la baisse de l'ETM en hiver met en relief une nuance régionale qu'on peut voir clairement à travers les éléments ci-dessous :

- La demande evaporative est nettement restreinte dans les plateaux du Haut Tell, dont les valeurs diminuent à moins de 1 mm par jour tel que le cas de Tala 46,4 mm durant la période hivernale. Ceci est expliqué par la baisse notable des températures hivernales dans la région à des niveaux très bas proches, titre indicatif la température minimale moyenne du mois de janvier varie entre 1°C à 3 C (Henia L. sous Dir., 2008). De même, les faibles cumuls de l'ETM en hiver sont tributaires d'un bilan radiatif déficitaire. Le faible rayonnement net s'explique par une durée d'insolation médiocre allant de 4 à 6 h par jour dans le meilleur des cas. En outre, dans cette région, le couvert végétal est quasi nul et par conséquent les valeurs des coefficients culturaux sont aux alentours de 0,25 (valeur caractérise les sols nus).
- La haute Mejerda se distingue par des quantités d'ETM allant de 70 à 100 mm, avec une demande d'évaporation journalière de 1 mm en moyenne, par exemple Béja 74,7 mm et Jendouba 90,4 mm. Ici, les faibles valeurs de l'ETM sont reliées en grande partie à la fréquence assez importante des jours de pluie dans ces secteurs par rapport aux autres secteurs. À titre d'exemple, la station de Jendouba enregistre en moyenne 37 jours de pluie en hiver (décembre 12 jours, janvier 13 jours et février 12 jours ; Henia L. sous Dir., 2008).Il s'en suit des valeurs de coefficients culturaux plus élevées dans cette région qu'ailleurs, dans la mesure où les niveaux de ces coefficients augmentent en parallèle avec la recharge hivernale des sols en eau et le début du développement végétal (Allen et *al.*, 1998). De plus, la fréquence des situations atmosphériques perturbées sur la haute Mejerda, contribue à la diminution du pouvoir évaporant du climat. Il est fort significatif que la progression de la

masse d'air polaire maritime sur le Nord de la Tunisie traduit l'importance des flux adjectifs polaires qui s'amplifient en hiver (Melki T., 1996).

- Dans le sous bassin-versant de Siliana, la variation spatiale de l'ETM est à son niveau maximal. En amont on enregistre le niveau le plus faible de l'ETM de l'ordre de 51,3 mm au sommet de Jbel Bargou et 48,4 mm au sommet de Jbel Serij. Le maximal de l'ETM est observée à l'aval de l'ordre de 70,8 mm à Gaâfour au sud de Siliana et 89,1 mm à Testour. Ces résultats expriment un écart maximal absolu de 40,4 mm, soit une diminution relative de 45,3%. Ceci laisse conclure que les cumuls de l'ETM augmentent, d'une part, avec l'altitude et d'autre part, au fur et à mesure que l'occupation des sols change d'une végétation annuelle en aval (cultures annuelles, prairies…) à une végétation forestière en amont (forêt de pinède : Pin d'Alep, romarin…).
- Ailleurs, dans la basse Mejerda, l'ETM atteint son maximal où les valeurs dépassent légèrement les 100 mm. À titre d'exemple, Borj Amri 100,2 mm et Cherfech 103,1 mm. Cette allure s'explique, d'une part, par l'activité végétale dans la région puisqu'elle est à vocation agricole, en particulier, les maraichères d'hiver. Il en résulte des coefficients culturaux élevés alentour de 0,80. D'autre part, la mer joue le rôle de modérateur des températures hivernales sur la frange littorale, ce qui conduit à quelques millimètres de plus d'évaporation par rapport aux régions intérieures.

Cette subdivision régionale de l'ETM s'accompagne par un gradient Sud-Ouest/Nord-Est d'un écart absolu qui peut atteindre 56,7 mm entre Tala et Cherfech, soit une variation relative de 55%. Ce gradient est soumis, à la fois, à l'effet du relief, l'effet de la mer et les caractéristiques de d'occupation du sol. En effet, il est aisé de distinguer que les faibles quantités de l'ETM intéressent les secteurs élevés du Haut Tell occupés par les terres nues. Inversement les fortes quantités de l'ETM sont enregistrées dans les régions situées à la proximité de la mer et occupées par les cultures annuelles ou/et les jachères. Cet aspect, garde-t-il les mêmes caractéristiques avec la phase de croissance de la biomasse ?

5.3.3 Au printemps

Après la stagnation durant l'hiver, les totaux de l'ETM enregistrent une hausse spectaculaire partout dans le B.V de la Mejerda. On assiste aux quantités observées les plus fortes de toute l'année, sauf dans les surfaces aux sols nus (Tala) et les surfaces humides (Garâat Mabtouha au nord de Cherfech et Ghar Melh), en raison des niveaux bas des coefficients culturaux (cf. figure 63c). Les cumuls de l'ETM printanière basculent de 190 à 400mm, soit un écart relatif de l'ordre de 52,5 % et une moyenne de 2,1 mm à 4,4 mm par jour. Cependant, la hausse entre l'hiver et le printemps permet de calculer la vitesse de la demande évaporative, qui est répartie, inégalement, sur l'ensemble de la région (cf. tableau 32). Le Haut Tell, en particulier à Dir-Kef, le sous-bassin versant de Siliana, les environs de Béja enregistrent le rythme d'évaporation le plus rapide entre les deux saisons. En effet, on assiste à des hausses relatives les plus élevées, respectivement 672,4 %, 549,7 % et 519,5 %, soit en moyenne un surplus de 3,5 mm par jour, en regard du niveau observé en hiver. De même, dans ses secteurs la variation spatiale de l'ETM connait son maximal. Les écarts absolus enregistrés sont respectivement : 184,5 mm entre Dir-Kef et les secteurs situés aux frontières Tuniso-algériennes, 177,1 mm entre les sommets de Jbel Serij et le fond de vallée

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

de Siliana et 133,4 mm aux environs de Béja ; soit une variation spatiale de l'ordre de 48,6 %, 48,9 % et 34,5 % dans les mêmes milieux. Cet aspect dépend étroitement des processus radiatifs/advectifs où l'effet sur les éléments climatiques est localement modifié par la topographie (Ben Boubaker H., 2000) et en particulier les facteurs conditionnels de l'ETM.

Tableau 32: Hausse de l'ETM de l'hiver au printemps dans les stations du BV de la Mejerda

	Jendouba	Kef	Tala	Siliana	Bèja	Borj Amri	Cherfech	Ghar Melh
Hausse absolue (mm)	306,4	323,1	149,6	309,6	312,7	269,6	295,9	178,6
Hausse relative (%)	438	672,4	422	549,7	519,5	369,3	386,2	470

Il va sans dire que, le rythme d'augmentation de l'ETM, entre l'hiver et le printemps s'explique, sans doute, par le fait que la végétation atteint son niveau de pleine croissance après avoir subi une période de vernalisation. Ainsi la phase de plein développement se caractérise par :

- un taux de couverture du sol par la végétation qui peut atteindre 80% (Allen et *al*., 1998 ; Er-raki., 2007),
- une quantité de végétation (*NDVI :* de 0,7 à 0,9), qui atteint sa valeur maximale (Amri., 2013),
- des niveaux des coefficients culturaux, qui sont à leur niveau maximal, et même, ils peuvent dépasser légèrement la valeur de 1 (Simonneaux et *al*., 2009) et la transpiration devient plus importante que l'évaporation. Xu et al. (2011) montrent que l'évapotranspiration peut être 2 jusqu'à 4 fois supérieure à l'évaporation lors de la phase de croissance.

Ces conditions traduisent un taux maximal de transpiration, il en ressort des cumuls de l'ETM les plus élevés de toute l'année. Mais, il faut noter que les surfaces qui se distinguent par des faibles valeurs de l'ETM, sont liées, à une dominance de l'occupation des terres caractérisées, en majorité, par des sols nus.

Du reste, l'ETM moyenne durant le printemps, affiche son niveau élevé dans les 400 mm (Jendouba 397,1 mm Béja 387,3 mm, Cherfech, 399,3 mm). Par la suite, les valeurs de l'ETM diminuent sensiblement du Nord au Sud pour atteindre son niveau le plus bas à la haute vallée de Mallègue et les hautes terres de Tala (195,2 mm, 196 mm). Une telle opposition entre le Nord et le Sud est bel et bien expliquée par le fait que la densité de la couverture végétale se dégrade en allant des secteurs nord aux secteurs sud du B.V de la Mejerda. Par contre les conditions topographiques et l'effet de la mer présentent une action modeste dans la spatialisation de l'ETM (Bargaoui Z. et *al.,* 2012). À titre d'exemple les faibles valeurs de l'ETM dans les environs de Ghar Meleh 226,9 mm sont liées à la dispersion des surfaces alentour de la station, qui sont occupées souvent par une végétation halophile (salicornes, orge sauvage, Joncs). Cette végétation se caractérise par des faibles NDVI et sa photosynthèse est tardive en raison de l'humidité du sol (Brahmi et *al*., 2010), ce qui influe sur les valeurs des coefficients culturaux et par la suite les niveaux de l'ETM.

5.3.4 En été

L'examen attentif de la figure 63d permet de suivre, de très près, le tracé des cumuls de l'ETM dans le B.V de la Mejerda durant l'été. Les niveaux de l'ETM oscillent, généralement, de 245 mm à 350 mm, soit un niveau journalier de l'ordre de 0,49 mm à 3,8 mm avec un écart relatif d'environ 30 %. La carte de l'ETM estivale laisse dégager les points suivants :

- Par rapport au printemps, les cumuls de l'ETM en été enregistrent une baisse plus ou moins accusée, et ce dans l'ensemble du BV de la Mejerda, à l'exception de la station de Tala et Ghar Melh. En effet, la baisse maximale a été enregistrée aux environnements de Cherfech avec un écart de 98 mm. Plus vers le ouest, on observe la baisse minimale dans l'ensemble de la région (Jendouba 58,4 mm). Cette considération est liée aux changements de l'occupation des sols entre les deux saisons, dans la mesure où l'on passe d'une occupation des sols à prairie et cultures annuelles en sec durant le printemps à une occupation des terres aux sols nus en été. À ce propos, Hallaire M. (1964) explique la réduction de l'ETM en avançant l'hypothèse que *« l'évaporation à partir du sol est freinée (en saison sèche) à cause de la constitution d'un horizon supérieur (superficiel) sec qui fait écran au passage de l'eau provenant des niveaux plus profonds. Quant à la transpiration à partir de la végétation, elle est réduite par suite de la fermeture des stomates ».* De plus, l'été correspond, en général, à la rupture de l'activité chlorophyllienne pour les cultures et à la déshydratation des sols (Brahmi et *al*., 2010). Ceci aboutit à la baisse du « potentiel » de l'ETM. En revanche, les environs de Tala et Ghar Melh enregistrent des hausses des cumuls de l'ETM en été par rapport à ceux observées au printemps (respectivement 63,8 mm, 43,7 mm) car les deux stations gardent, pratiquement, les mêmes caractéristiques de l'occupation des terres : les sols nus à Tala et les surfaces humides à Ghar Melh.
- La représentation cartographique des cumuls de l'ETM permet de constater qu'elle correspond, essentiellement, à la carte d'occupation des sols habituelle dans la région. Ainsi, les bandes à fortes ETM se rapportent soit aux secteurs forestiers, soit aux secteurs des arboricultures fruitières et soit à la végétation hydrophile localisées tout au long de l'oued Mejerda (cf. figure 64). Par exemple, les quantités de l'ETM logent entre 330 mm et 350 mm sur les massifs de la Kroumirie, et il est de même pour la bande riveraine de l'oued Mejerda (indiquée sur la carte avec la couleur rouge). À l'inverse, les sols cultivés et/ou nus se distinguent par de faibles quantités de l'ETM d'environ 3 mm par jour en regard de 8 mm par jour comme niveau de l'ETP en été.



Figure 9: Végétation à caractère hydrophile le long de l'oued Mejerda (a) au niveau de Jendouda et (b) au niveau de Mjez El-Beb (Mjejra M., mai 2011)

- La répartition géographique des totaux de l''ETM, en été, présente une allure compatible par rapport à la situation normale, qui est marquée par des dégradations Est/Ouest et Sud/Nord distinguées. Mais, elle enregistre une variation spatiale assez faible en comparaison avec les autres saisons. En effet, l'opposition entre les secteurs littoraux et les secteurs intérieurs, en particulier au niveau de l'axe d'oued Mejerda, se caractérise par une variation spatiale relative de l'ordre de 20,1 % soit un écart absolu estival de 68,1 mm. Ceci est dû à l'augmentation de la demande évaporative au fur et à mesure qu'on s'éloigne du littoral. Il est de même pour la dégradation Sud/Nord, en allant des hautes terres de Tala aux versants sud de la Kroumirie, dans la mesure où la variation spatiale atteint 23,3% soit un écart absolu de 78,9 mm. Cette répartition est justifiée par la dégradation du couvert végétal du Nord ou Sud de la région. L'activité photosynthétique est perceptible dans les secteurs nord et s'annule à mesure qu'on se dirige vers le Sud.

Au total, l'analyse des cumuls de l'ETM à l'échelle saisonnière a montré les faits suivants :

- Partout dans le BV de la Mejerda et quelle que soit la variété de l'occupation des sols, les besoins en eau de la végétation sont remarquables, notamment durant la saison de l'activité végétale ;
- Les cartes des cumuls de l'ETM sont compatibles avec les cartes d'occupation du sol dans le BV de la Mejerda. La variabilité de l'ETM dépend de la surface foliaire et du stade de développement des plantes. Il est admis, cependant, que les bassins forestiers évapotranspirent plus que les bassins agricoles (Zhang et *al.,* 2001) et une évolution graduelle du couvert végétal résulte en parallèle un gradient évaporatoire dans la région ;
- Le printemps enregistre les quantités les plus élevées de l'ETM et l'hiver détient les faibles quantités ;
- Le printemps se caractérise par une variation spatiale très forte de l'ETM, par contre, l'été présente une variation modeste ;
- L'ETM dépend, en premier ordre, de la croissance de la végétation. Elle augmente avec la quantité de végétation (*NDVI*) et atteint sa valeur maximale durant le printemps qui correspond à la période de plein développement des végétaux. Par ailleurs, les valeurs de l'ETM sont relativement faibles lorsque le sol est non cultivé et/ou les apports d'eau, qui sont généralement issus de la pluviométrie, sont importants (Amri R., 2013) ;
- Les facteurs géographiques jouent un rôle de deuxième degré dans la distribution spatiotemporelle des cumuls de l'ETM.

5.4. Le niveau moyen mensuel de l'évapotranspiration maximale :

Le régime mensuel moyen des cumuls de l'ETM dans le bassin versant de la Mejerda est présenté dans la figure 65. Les renseignements qu'on peut dégager de cette figure sont les suivants :

- À l'échelle mensuelle, les cumuls de l'ETM montrent des fluctuations entre les mois et même des différences assez importantes ont été saisies entre les secteurs dans le B.V de la Mejerda. Ainsi, on assiste à un régime simple, partout dans la région avec un seul minimum au mois de décembre et/ou de janvier et un seul maximum au mois de mai ou bien il peut être repéré tardivement, au mois de juin. Ceci est en relation étroite avec le cycle de développement de la végétation.
- Durant la période étudiée (2000-2011), l'écart absolu mensuel entre le minimum et le maximum est très significatif. Il touche 171,2 mm, où on enregistre 12,9 mm à Tala au mois de décembre, soit 0,43 mm/jour et 184,1 mm à Jendouba au mois de mai, soit 5,9 mm/jour. Cela est en rapport avec la dynamique du paysage végétal (cf. photos sur la figure 66). En état de semis, les terres sont nues et l'évapotranspiration étant assez faible, à l'inverse, en condition de pleine saison les besoins en eau de la végétation sont à leur maximum. Cette considération met en évidence la similitude entre les niveaux de l'ETM et la carte de l'occupation des terres.
- Le régime mensuel des cumuls de l'ETM présente un profil convexo-concave. Mais il se décale par rapport à celui de l'ETP, en particulier, au niveau de sa partie supérieure, où la convexité règne sur les mois du printemps et le début de l'été. Ce régime affiche à la fois, un passage lent du mois de septembre au mois de mai et une chute rapide à la fin de la saison agricole. Ce profil est lié, en grande partie, aux stades de développement majeurs des coefficients culturaux. C'est-à-dire phase de croissance initiale (Kc est faible), phase de pleine croissance (Kc est maximal) et phase se sénescence (Kc est en déclin). De plus, les stations caractérisées par la même occupation des terres, cultures annuelles et les prairies, telles que Jendouba, Béja, Cherfech et Borj Amri ont une allure quasi similaire (sommet aigu). Ici, la baisse de l'ETM commence immédiatement après le maximum de l'activité photosynthétique. Ailleurs, les stations à sols nus ou occupation des sols mélangée comme Kef, Tala et Siliana présentent pratiquement le même schéma (sommet plat), dans la mesure où la baisse de l'ETM intervient environ un mois plus tard (cf. figure 65). Ceci est justifié d'une part, par la variation des conditions climatiques sur le Nord de la Tunisie et d'autre part, par le changement d'occupation-utilisation du sol durant l'année. c'est-à-dire les modes d'exploitation du milieu (labours, plantations, irrigué, sol nu…).

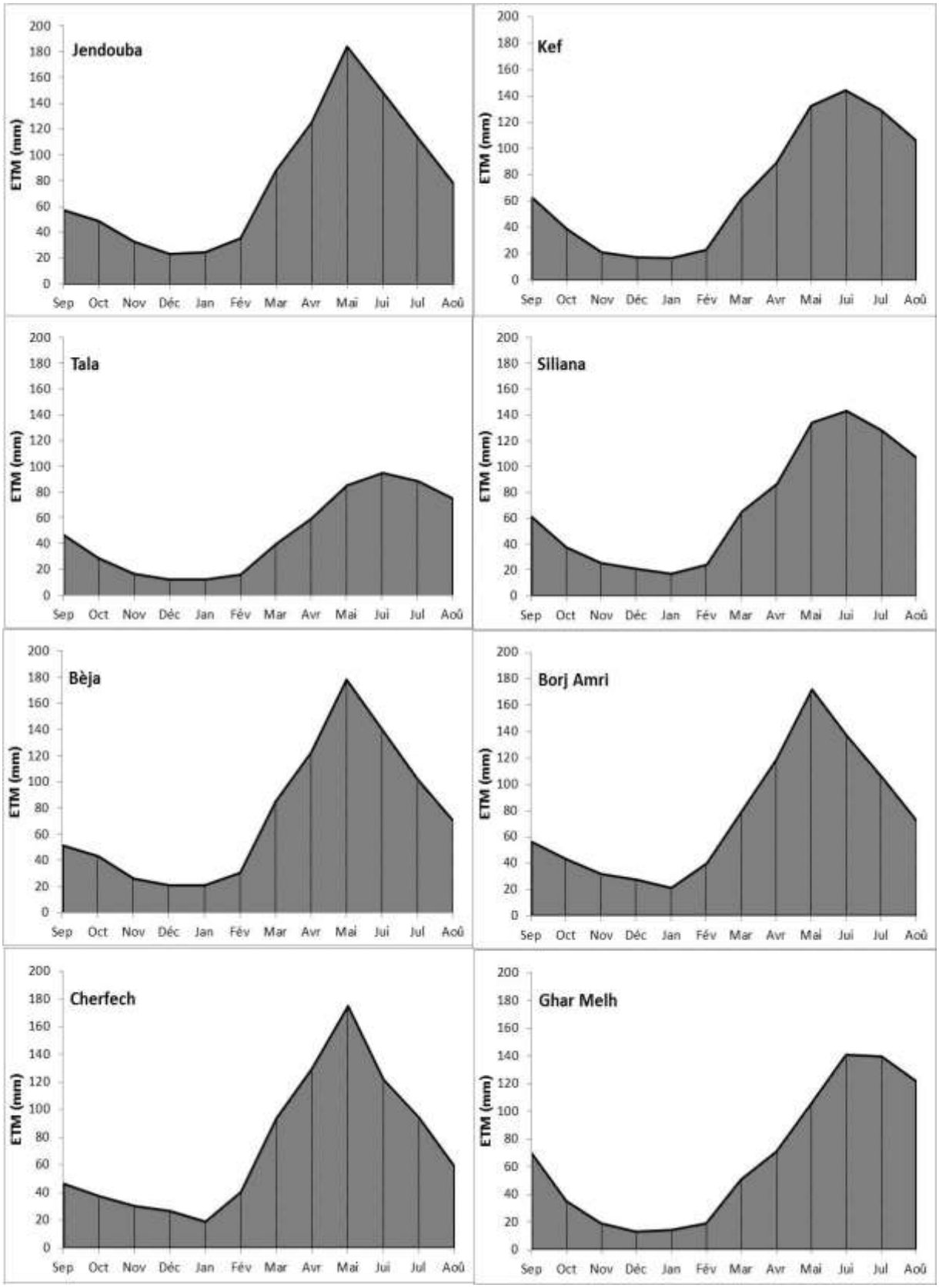


Figure 10: Le régime mensuel moyen de l'évapotranspiration maximale dans le BV de la Mejerda (2000-2011)



Figure 66: Cycle de développement d'une culture de pommes de terre (arrière-saison et de saison) à El-Battane, (a) semis novembre 2010 ; et (b) pleine saison mai 2011 (cliché, Mjejra)

- La variabilité des quantités mensuelles de l'ETM est plus importante, essentiellement, dans les stations riveraines de l'oued Mejerda et dans les versants sud de la Kroumirie. À titre d'exemple, l'écart absolu est de 160,9 mm à Jendouba, 157,2 mm à Béja et 156,1 mm à Cherfech (tableau 33). Ceci s'accompagne par la variabilité relative la plus élevée dans la région de l'ordre de 5,8 %, 5,8 % et 5,6% dans les mêmes stations. Ailleurs, la variabilité de l'ETM mensuelle diminue sensiblement. En effet, les écarts absolus enregistrés sont nettement plus faibles à Tala 83,1 mm, à Siliana 116,7 mm et à Ghar Melh 92,7 mm, et avec des écarts-types alentour de 40 mm. Cela veut dire que l'intensité de la variabilité des cumuls mensuels de l'ETM présente une dégradation en allant de l'intérieur vers le littoral. Cette opposition intérieur/littoral est exprimée par l'effet de la mer, et ce par le biais de son inertie thermique qui contribue au rafraichissement des températures (Bousnina A., 2000) l'un des facteurs principaux de la variabilité de l'ETM. Cependant, l'irrégularité du régime mensuel de l'ETM s'estompe progressivement au fur et à mesure qu'on se dirige vers le sud, sous l'effet de la régression de la masse végétale (NDVI) dans le même sens, et ce en passant respectivement : des forêts des feuillus dans les secteurs nord, le domaine des terres agricoles dans les vallées et les plaines intramontagnardes, des forêts résineux au Haut Tell et enfin une végétation steppique au sud de Tala (Ben Romdhane 2009).

Tableau 33 : variabilité du régime mensuel de l'ETM dans le BV de la Mejerda (2000-2011)

	Écarts absolus (mm)	Écarts-type (mm)	Coefficients de variation (%)
Jendouba	160,9	53	5,8
Kef	128	48,7	5,5
Tala	83,1	31,8	5,5
Siliana	116,7	41,6	5,1
Béja	157,2	52	5,8
Borj Amri	145,6	48,6	5,6
Cherfech	156,1	49,5	5,6
Ghar Melh	92,7	40,5	4,2

En somme, à l'échelle mensuelle les cumuls de l'ETM ont montré un régime moyen souvent nuancé. Nous pouvons donc en retenir les points suivants :

- La variabilité inter-mensuelle n'est pas symétrique. Elle suit un rythme lent durant le début et la mi-saison et une chute vers la fin de la saison agricole. Cette variabilité et proportionnelle aux modes de l'utilisation des terres dans le BV de la Mejerda.
- Le régime mensuel des cumuls de l'ETM dépend du cycle de développement de la végétation à l'inverse de celui de l'ETP.
- À l'échelle spatiale, la proximité de la mer agit pour ralentir la variation de l'ETM mensuelle. En contrepartie, les régions intérieures enregistrent une variation élevée, sous l'effet du relief et de la diversité de l'occupation du sol.

Conclusion

À la lumière de ce chapitre nous pouvons retenir les idées suivantes :

➢ Les résultats exposés plus haut confirment la possibilité offerte par le couplage du modèle de la FAO aux données de l'imagerie satellitale NDVI-MODIS pour cartographier l'évapotranspiration maximale. Ces résultats ne sont pas faciles à obtenir en se contentant des observations sur le terrain (Davin., 2008). Cependant, ce modèle présente des limites d'ordre théorique liées aux effets directionnels et aux interactions entre le sol et la végétation, notamment dans les régions semi-arides où la végétation est fortement dégradée (Chehbouni et *al.,* 2001) ;

➢ Le niveau de l'ETM dans le BV de la Mejerda est nettement moins élevé que celui de l'ETP. Ce niveau présente une grande variation spatio-temporelle, liée, entre autres, à la variation de l'occupation du sol d'un secteur à un autre et le rythme de croissance de l'espèce végétale ;

➢ À l'échelle annuelle, les cumuls de l'ETM enregistrent un palier allant de 500 mm à 1150 mm, avec une opposition très nette Sud-Nord et une autre de littoral/intérieur de deuxième degré ;

➢ À l'échelle saisonnière, l'ETM se caractérise par un rythme très marqué. Le printemps retient environ la moitié des cumuls de l'ETM et l'hiver enregistre les niveaux les plus bas. Ce rythme est le résultat d'une hiérarchie faite en fonction de la biomasse et de l'activité végétative ;

➢ À l'échelle mensuelle, l'évolution des cumuls de l'ETM se caractérise par un profil dissymétrique de part et d'autre de son maximum. On assiste donc à un passage un peu lent du mois de septembre au mois de mai et par la suite une chute pour attendre la fin de la saison agricole. Ceci est en rapport avec l'évolution temporelle des NDVI, qui sont liés à la classification des groupements végétaux ;

➢ Si la spatialisation de l'ETP dans le BV de la Mejerda permet de distinguer un zonage régional associable, le plus souvent, avec les ensembles topographiques (l'ensemble du haut Tel, la vallée de la Mejerda, les versants sud de la Kroumirie, les versants nord de la Dorsale, les sommets des montagnes) ; au contraire, la spatialisation de l'ETM permet de différencier des secteurs d'évapotranspiration compatible au paysage végétal naturel et agricole. Il est aussi possible d'identifier les secteurs de forts besoins en eau et les secteurs susceptibles de subir de fortes contraintes hydriques.

Cependant, on essaye de vérifier dans le chapitre suivant, si ces considérations vont être confirmées par l'analyse de l'évapotranspiration réelle (ETR).

SIXIEME CHAPITRE : CARTOGRAPHIE DE L'EVAPOTRANSPIRATION REELLE (ETR)

6.1. Approche Méthodologique : élément de la cartographie de l'évapotranspiration réelle

Jusqu'ici, nous avons, plus au moins, détaillé la méthode FAO-56 telle qu'elle a été proposée par Allen (1998) pour déterminer l'évapotranspiration maximale (ETM). Dans ce qui suit, nous développons ce modèle pour apprécier l'évapotranspiration réelle (ETR). Le calcul de cette dernière consiste à ajuster l'évapotranspiration potentielle (ETP) avec un coefficient propre à l'espèce végétale et son stade végétatif (Kc) et un coefficient qui traduit un stress hydrique (Ks), et ce par la formule suivante :

$$ETR = ETP * Kc * Ks$$

Le manque d'eau dans la zone racinaire entraîne un stress hydrique chez la culture. D'où pour avoir une bonne estimation de l'évapotranspiration réelle, il faut introduire le coefficient de stress hydrique dans l'équation de calcul. Pour ce faire, nous devons déterminer et spatialiser le coefficient de stress hydrique (Ks) dans le BV de la Mejerda.

6.1.1. Cartographie du coefficient de stress hydrique (Ks)

6.1.1.1. Concept

Le coefficient de stress hydrique traduit la disponibilité de l'eau pour la plante, souvent décrite sous termes de réserve facilement utilisable (RFU) et de point de flétrissement (pF) (Vincent J., 2011). On parle de stress hydrique *« lorsque les tissus de la plante subissent une baisse de leur teneur en eau qui affecte tout le métabolisme de la plante »* (Lecoeur J., 2007). Ce terme renvoie à l'équation entre la disponibilité en eau dans le milieu et les besoins en eau de la plante. En effet, ces besoins résultent de la combinaison entre la demande climatique et la structure de la plante (Lacoeur J., 2007). Dans ce cas, le coefficient du stress hydrique (Ks) agit sur le coefficient cultural global ou sur le coefficient cultural de base, selon l'approche utilisée. Ainsi, le coefficient de stress hydrique exprime le passage de l'ETM à l'ETR. La démarche de calcul du coefficient du stress est similaire à celle du calcul de l'évaporation du sol[51]. Il nécessite aussi un bilan hydrique mais dans la zone racinaire au lieu de la surface supérieure du sol. Il est donné par l'équation suivante (Allen et *al.,* 1998) :

[51] Les points suivants expliquent l'évolution du Ks en fonction de la teneur en eau du sol (Vincent J., 2011):
1- Lorsque la teneur en eau du sol est ≥ RFU, toute l'eau est absorbable par la plante ; dans ces conditions l'évapotranspiration ne dépend que des conditions climatiques (Ks = 1),
2- Lorsque la teneur en eau du sol est < RFU, l'eau est difficilement absorbable par la plante (c.-à-d. stress hydrique réversible) ; cela limite sa capacité d'évapotranspiration (Ks < 1), quelles que soient les conditions climatiques,
3- Lorsque la teneur en eau du sol ≤ pF, l'eau n'est plus absorbable par la plante (stress hydrique irréversible), la plante commence à flétrir et l'évapotranspiration devient nulle (Ks = 0).

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

$$\mathrm{Ks} = \frac{\mathrm{TAW} - \mathrm{Dr}}{\mathrm{TAW} - \mathrm{RAW}} = \frac{\mathrm{TAW} - \mathrm{Dr}}{(1 - \mathrm{P})\mathrm{TAW}}$$

Ks indice sans dimension allant de (0 à 1), il est égal à 1 en absence de stress et inférieur à 1 en présence de stress.

Avec :

- Dr : Épuisement de l'eau dans la zone racinaire, calculé par un bilan hydrique dans la zone racinaire,
- La fraction de TAW que la plante peut extraire de la zone racinaire sans souffrir du stress hydrique est appelée la réserve d'eau facilement utilisable (RFU ou RAW en anglais). Elle est donnée par :

$$RAW = {}_{P}\,TAW$$

- P est défini comme la fraction de l'eau disponible. La valeur 0.5 est la plus utilisée pour plusieurs cultures,
- TAW : Quantité d'eau totale disponible dans la zone racinaire. Elle dépend du type de sol et de la profondeur des racines, elle est donnée par l'équation suivante :

$$TAW = 1000 \times \left(\theta_{FC} - \theta_{WP}\right) \times z$$

Avec :

- Z la profondeur des racines (m),
- θ_{FC} Eau contenue au maximum dans le champ (m^3/m^3),
- θ_{WP} Eau contenue au point de flétrissement (m^3/m^3).

Pour comprendre l'expression du coefficient de stress, il est important de considérer la disponibilité de l'eau pour la plante, et ce suivant les étapes suivantes (Vincent J., 2011) :

- la saturation, dans ce cas toute la porosité du sol est occupée par l'eau,
- la capacité au champ qui correspond au volume d'eau retenu par un sol après 48h de drainage.

En revanche, tout le volume de la capacité au champ n'est pas disponible pour la plante. La partie qui n'est pas mobilisable par la plante est appelée point de flétrissement. Ainsi, la ressource de l'alimentation en eau de l'espèce végétale, située entre la teneur en eau à la capacité au champ et le point de flétrissement, est dite : la réserve utile (RU). Mais, la plante ne consomme qu'une partie : c'est la réserve facilement utilisable (RFU). Enfin, les caractéristiques du sol influent sur l'état de la réserve hydrique et par conséquence sur l'évapotranspiration car lorsque la réserve facilement utilisable diminue avec le temps, la valeur de Ks devient inférieure à 1. En effet, Rana et Katerji (2000) indiquent que le coefficient de stress varie avec l'humidité du sol ; il devient inférieur à 1 pour des valeurs de réserve hydrique correspondantes à 60 ou 70% de la réserve utile. Ce qui est en accord avec les préconisations de la FOA qui indique que la RFU équivaut à 2/3 de la RU (Vincent J., 2011).

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

6.1.1.2. Cartographie de l'humidité relative du sol pour le calcul du coefficient de stress hydrique

L'approche de calcul du coefficient de stress (Ks) par le modèle de la FAO-56 demande beaucoup de paramètres d'entrée qu'on ne peut les obtenir en routine dans le BV de la Mejerda. En raison, d'une part, de l'incertitude entourant les mesures de ces paramètres et d'autre part, de la faible base de données en la matière. Pour résoudre ce problème, on a eu recours à adapter une approche tenant compte de l'humidité de la surface[52] du sol au coefficient de stress hydrique. En effet, l'état de la surface du sol nous permet de se renseigner sur la teneur du sol en eau (Pindard A., 2000 ; Simonneaux V., 2009 ; Zribi et *al.,* 2014). Le sol est considéré comme « *un réservoir d'eau pouvant se remplir (précipitations, irrigation) et se vider (évapotranspiration, drainage). La capacité de stockage (ou réserve utile) est déterminée par les valeurs d'humidité à la capacité de rétention*[53] *et d'humidité au point de flétrissement*[54] » (Pindard A., 2000). Dans ce cas, la détermination de l'humidité du sol s'impose. Elle varie entre 0% et 100%, c'est-à-dire entre les valeurs minimales et maximales, correspondant aux conditions les plus sèches du sol et les plus humides (Wagner, 1998). Le produit d'humidité du sol dérivé n'est autre que l'humidité de surface (mm), qui représente la teneur en eau dans les 5 premiers cm du sol et varie entre les extrêmes correspondant à des conditions tout à fait sèches et des conditions de saturation du sol (Amri., 2013).

a. Relation humidité et coefficient de stress hydrique.

Il existe une relation inversement proportionnelle entre le coefficient de stress hydrique et l'humidité du sol (Allen et *al*., 1998 ; Rana et Katerji., 2000 ; Benhaj., 2008 ; simonneux et *al.,* 2009). En effet, « *le coefficient de stress hydrique des plantes (est défini en fonction du maximum des humidités relatives du réservoir superficiel HR (j) 1 et racinaire HR (j) 2, car la plante peut puiser l'eau dans ces deux réservoirs. La fonction est de type bilinéaire et varie entre zéro (couvert complètement stressé) et 1 (absence de stress) à partir d'une humidité critique (Hcrit)* » (Benhaj., 2008). C'est-à-dire une forte humidité du sol correspond à un stress nul où Ks égal à 1 et une faible humidité relative du sol correspond à un stress accentué jusqu'à vider la réserve utile où Ks égal à zéro. Toutefois, l'évolution temporelle du coefficient du stress est similaire à l'humidité du sol. Il est possible d'établir une relation entre ces deux paramètres. Effectivement, on a déterminé une équation simple qui se base sur la réalisation de la première diagonale du rectangle de relation Ks et humidité

---

[52] L'humidité relative du sol est définie comme le contenu en eau du sol accessible aux racines des plantes exprimable en proportion de masse ou de volume. En outre, "Humidité contenue dans la portion de sol se trouvant au-dessus de la nappe libre, y compris la vapeur d'eau présente dans les interstices du sol". Glossaire international d'hydrologie 1992.

[53] C'est l'humidité d'un sol gorgée d'eau qui aurait atteint le point de ressuyage (perte de l'eau libre par gravité). A la capacité de rétention, le *p*F varie selon la nature du sol ; on admet les correspondances suivantes : terres argileuses *p*F=3, terres limoneuses *p*F=2,5, terres sableuses *p*F=2, terres fortement organiques *p*F=1.

[54] L'humidité en deçà de laquelle les plantes sont incapables d'extraire l'eau du sol ; elles perdent leur turgescence, flétrissent et meurent. L'humidité au point de flétrissement permanent d'un sol HPF correspond à un pF = 4,2. Sa valeur augmente avec la teneur en argile jusqu'à une certaine valeur.

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

(figure 67). En effet, l'hypothèse admise dans cette étude repose sur l'évolution linéaire du coefficient de stress, lorsque la réserve facilement utilisable est épuisée (Vincent J., 2011). À cet effet, la valeur de Ks cherchée passe par l'intersection sur la diagonale par rapport à la valeur de l'humidité du sol déjà connue. Cette relation a été appliquée pour estimer le Ks dans le BV de la Mejerda. Ceci, permet de développer une autre version du modèle FAO-56 basée sur des paramètres accessibles par la télédétection notamment l'humidité du sol.

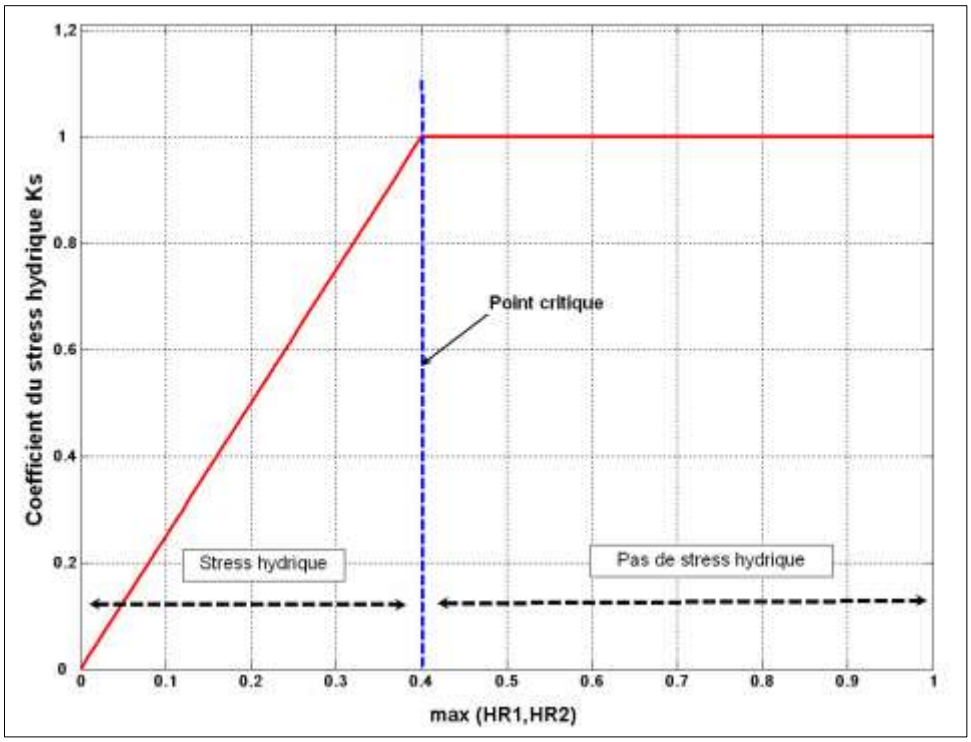


Figure 67: Schéma de la relation théorique entre Ks et humidité du sol (Benhaj., 2008

b. Cartographie de l'humidité du sol

« La teneur en humidité superficielle d'un sol représente le stockage temporaire de l'eau des précipitations à l'intérieur d'une couche superficielle de la surface de la Terre, généralement limitée à la zone d'aération » (Amri R., 2013). Plusieurs méthodes sont développées pour déterminer l'humidité du sol :

- méthodes de mesures *in situ* par la méthode gravimétrique, la méthode neutronique, la mesure par sonde TDR, la méthode capacitive et la méthode de mesure par thetaprobe ;
- Suivi de l'humidité par télédétection : Les techniques de la télédétection spatiale ou optique ont apporté une forte contribution dans l'estimation de l'état hydrique du sol, et ce à travers plusieurs approches. À titre d'exemple : Approche empirique, Approche semi-empirique, approche physique à partir du modèle de transfert radiatif

Ainsi, le modèle de transfert radiatif permet de comprendre les échanges d'énergie entre le sol et l'atmosphère (Merlin et *al.,* 2005). Cette méthode d'estimation de l'humidité du sol à l'aide de l'outil de la télédétection spatiale se base sur l'exploitation des émissions thermiques, qui sont sensibles aux variations de l'humidité dans les cinq premiers centimètres du sol : les surfaces saturées en eau émettent faiblement les radiations microondes, tandis que les sols

secs émettent des niveaux élevés (Djamai N., 2009). Cependant, il est difficile de séparer les radiations émises par les sols saturés et les sols non saturés en raison de la rugosité de la surface, la densité du couvert végétal et de la topographie accidentée (Bindlish et *al,* 2003). Pour résoudre ce problème, une phase d'étalonnage de connaissance de l'état et de la couverture de la surface sont nécessaires (Kerr, 2001).

Dans ce travail on a utilisé la méthode de cartographie des plans d'eau et des zones humides développée par Djamai en 2009, et pour la Tunisie entière. Cette méthode est basée sur la notion du contraste local de l'indice de différence entre la végétation et l'eau (CLDVW). Cet indice est défini comme la différence entre l'indice de végétation (NDVI) et l'indice normalisé de différence d'eau (NDWI). Le principe de la méthode se résume par la détermination de la différence entre la valeur d'un pixel et la moyenne d'une surface centrée autour du pixel. La taille de cette surface est choisie de sorte qu'elle soit presque insensible aux valeurs particulières (Djamai en 2009). Rappelons que NDVI et NDWI sont calculés par les équations suivantes :

$$NDVI = \frac{PIR - R}{RIR + R}$$

Avec PIR proche infrarouge et R le rouge

$$NDWI = \frac{PIR - MIR}{PIR + MIR}$$

Avec PIR proche infrarouge et MIR moyen infrarouge

Dans le moyen infrarouge (MIR), les variations locales de la réflectance sont sensibles à l'évolution de l'humidité de la surface. Cette bande est très utilisée pour la détection de la teneur en eau de la surface. Ailleurs, le rouge est en dehors des bandes d'absorption de la vapeur d'eau, la réflectance est plus influencée par les mêmes facteurs affectant le rayonnement moyen infrarouge, mais non par la teneur en eau (Fensholt, 2004). Le produit d'humidité relative du sol dérivé n'est autre que *« l'humidité de surface, qui représente la teneur en eau dans les 5 premiers cm du sol et varie entre les extrêmes correspondant à des conditions tout à fait sèches et des conditions de saturation du sol »* Amri., 2013.

Toutefois, la figure 68 relative à la carte de l'humidité du sol issue de la méthode de cartographie de l'indice des plans, calculée finalement par différence entre les deux indices NDVI-NDWI. Mais, d'ordre méthodologique on a converti les valeurs en pourcentages aux indices (zéro à 1) pour calculer par la suite, d'une manière facile, la pente des coefficients de stress hydrique. Les valeurs d'humidité relative du sol varient, en théorique, entre zéro et 100%, c'est-à-dire entre les valeurs minimales représentent des conditions sèches et maximales indiquent des conditions humides (figure 69). Tandis que les surfaces en eau sont considérées comme saturées (100%) (Pindard., 2000). Ainsi, la carte de l'humidité du sol annuelle montre que les secteurs allant de la haute à la basse Mejerda occupent les valeurs les plus élevées. On enregistre un palier compris, en général, entre 50 et 100%. Par contre, les secteurs situés tout au long du nord de la Dorsale enregistrent des valeurs inférieures à 50%. Il va sans dire qu'à partir des quantités de l'humidité du sol on peut déduire le coefficient de stress hydrique (Ks). Comment donc procéder pour déterminer ce coefficient ?

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

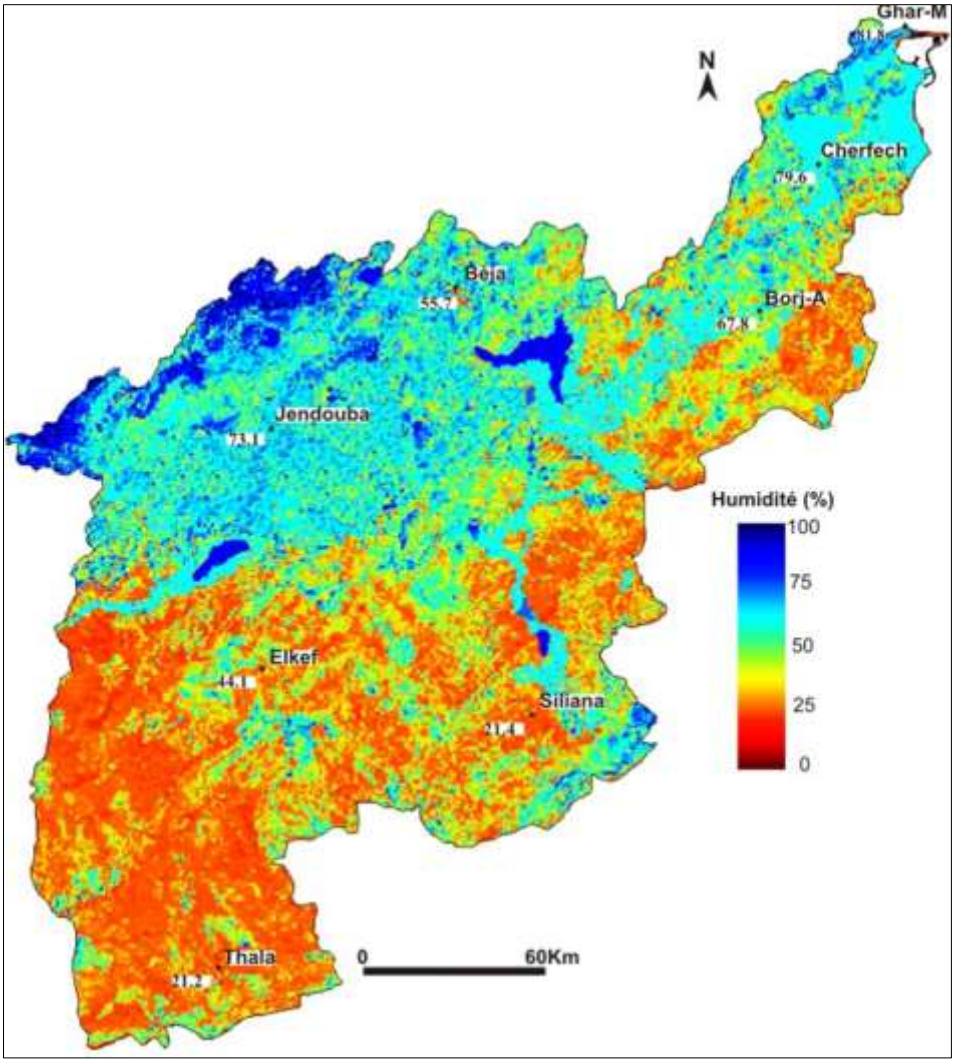


Figure 68: Humidité du sol moyenne (%) dans le B.V de la Mejerda calculée à l'aide de des images MODIS pour la période 2000-2011.

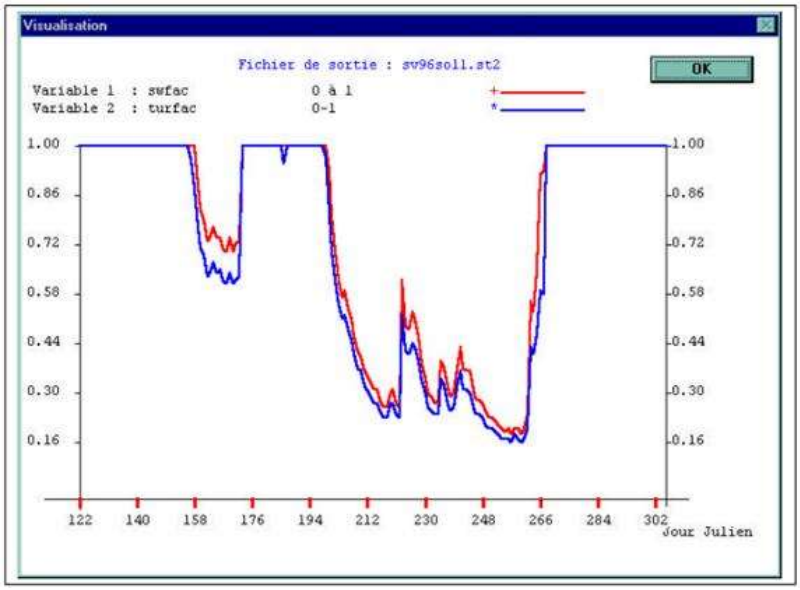


Figure 11: Évolution des deux indices de stress hydrique (cas de Verdun Nord-Ouest de la France ; Pindard A., 2000**)**

6.1.1.3. Ajustements des coefficients de stress hydrique

Tout d'abord, nous avons créé une base de pentes[55] Ks à l'échelle de 16 jours tout en prenant en compte la résolution temporelle des séries NDVI utilisées auparavant. Cette base correspond aux différentes formes que peuvent présenter les droites des Ks. Chaque axe de la première diagonale (cf. figure 70) représente la pente de la relation linéaire simple qui existe entre le Ks et l'humidité du sol. Un algorithme de calcul a été réalisé pour déterminer toutes les pentes afin d'en déduire les valeurs de Ks. De ce fait, cet algorithme se charge d'ajuster les pentes pour chaque pixel de la région. En sortie, on obtient plusieurs graphiques ou un tableau d'observations de calcul, dans la mesure où l'intersection à la pente entre l'axe des humidités et l'axe de Ks, renseigne sur la valeur ajustée.

Cependant, les incertitudes de la méthode proviennent de la réserve utile maximale (RUM) des sols. Il est difficile d'évaluer cette réserve sur le terrain. Le fait que la profondeur d'enracinement ne soit pas prise en compte, la difficulté à creuser à la pioche, les difficultés d'évaluation des textures ou de la charge en cailloux, l'imprécision des fonctions de pédo-transfert existantes sont autant de limites à une estimation adéquate (Richard, 2011). De plus, la RUM varie beaucoup sur de courtes distances, les relevés réalisés localement pourraient ne pas être représentatifs de la placette qu'ils caractérisent (Richard, 2011 ; Amri, 2013).

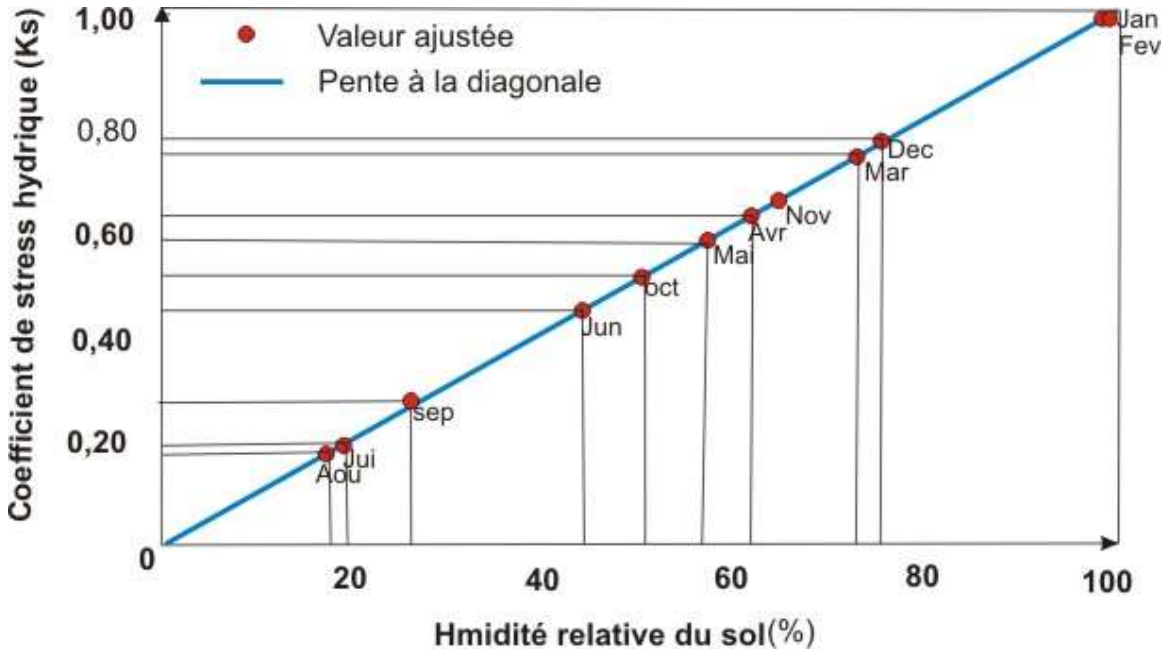


Figure 70: Méthode d'ajustement des valeurs de Ks mensuel, par l'algorithme du traçage de la diagonale (exemple station de Béja 2000-2011)

[55]La pente est le coefficient directeur dans un repère cartésien orthonormé. En géométrie cartésienne, le coefficient directeur désigne le coefficient de l'équation d'une droite. Toute droite non parallèle à l'axe des ordonnées admet une équation du type y = ax + b. Pour déterminer l'équation d'une droite dont on connaît deux points A(xA ; yA) et B(xB ; yB), on procède de la façon suivante :

1- On calcule le coefficient directeur y en utilisant la formule : y = (yB – yA) /(xB – xA)
2- On détermine l'ordonnée à l'origine p en utilisant les coordonnées d'un des points de la droite qui, forcément, vérifient l'équation y = ax + b dans laquelle on connaît désormais x, y et a.

La figure 71 montre que l'indice du Ks augmente avec le contenu en eau dans le sol. Il atteint son niveau maximal durant la saison des précipitations où il touche la valeur de 1, en particulier les mois de janvier et février. Cette période se coïncide avec la recharge hivernale maximale. Ailleurs, l'indice du Ks enregistre son niveau bas durant la saison estivale où la demande évaporative est à son maximal et le stock d'eau est épuisé. Dans cette situation on observe des valeurs qui frôlent 0, 3 au mois de juillet. Plus généralement, le niveau du stress hydrique indique que la majorité des espèces végétales souffrent d'un déficit hydrique à partir de la phase de croissance et il atteint son maximum durant le stade de sénescence. Les mêmes résultats sont obtenus dans la région de l'Albacete en Espagne (Campos et *al.,* 2012). C'est-à-dire les valeurs des Ks sont maximales à partir du 1er janvier jusqu'au mi- printemps ensuite grâce à la recharge hivernale. Par la suite, elles subissent des chutes au fur et à mesure que la réserve utile mobilisable par la plante diminue, pour atteindre son niveau minimum en été avec des valeurs alentour de 0,2 (cf. figure 72).

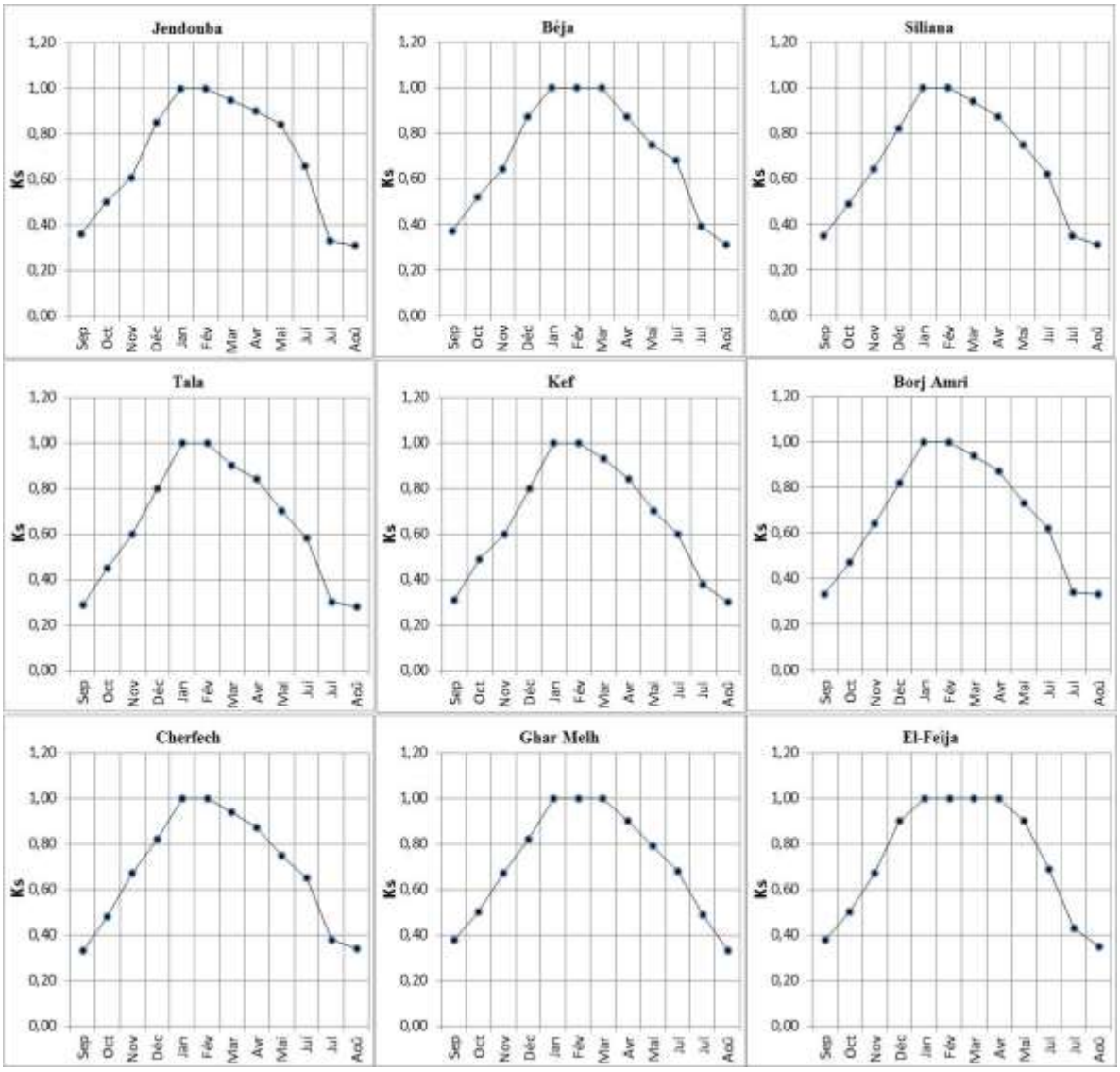


Figure 12: Profil du coefficient de stress hydrique dans quelques sites du BV de la Mejerda (moyenne mensuelle de la période 2000-2011)

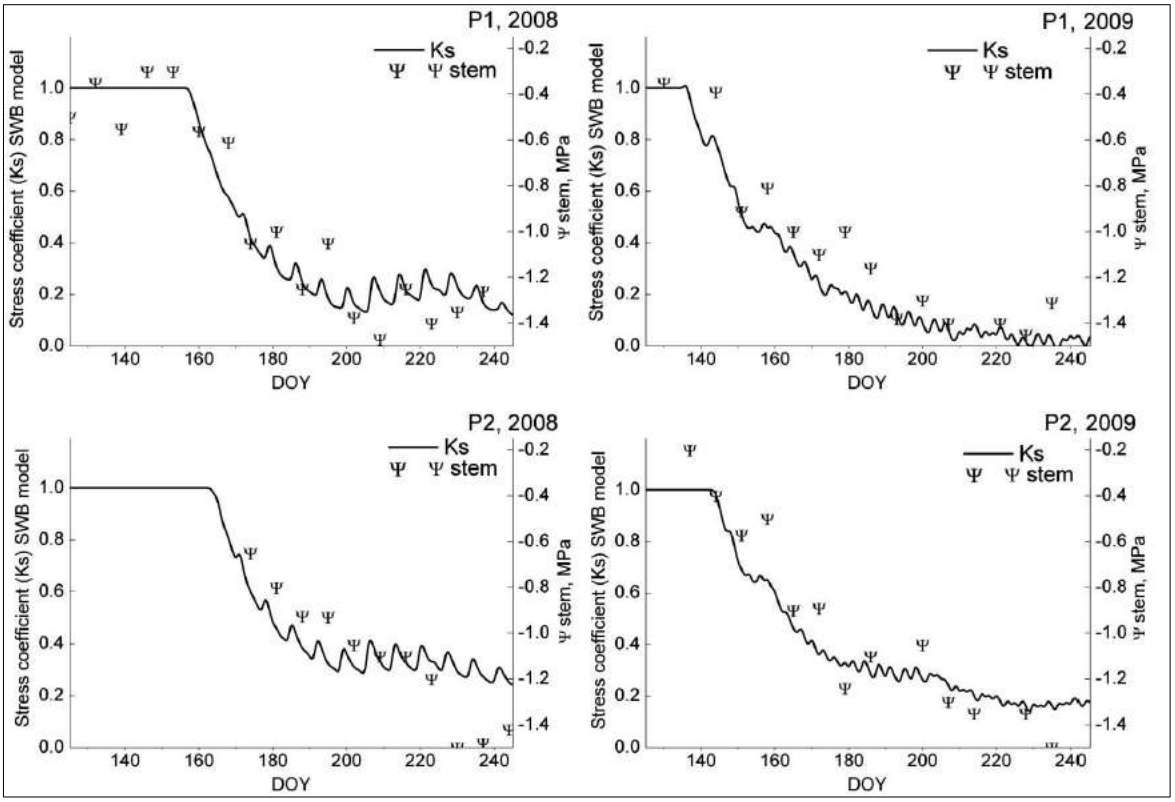


Figure 72 : Évolution des coefficients de stress hydrique dans la région de l'Albacete en Espagne (source : Campos et *al.,* 2012)

Du reste, nous pouvons distinguer à partir des profils du coefficient de stress hydrique trois phases différentes :

- La phase de croissance : c'est la phase initiale, elle se déroule à partir du mois de septembre à la mi-décembre. Durant cette période, les valeurs du coefficient de stress hydrique augmentent progressivement, en parallèle, d'abord, avec la remontée capillaire, et ensuite, avec la recharge de la réserve utile suite aux épisodes pluvieux.
- La phase constante : c'est le stade de plein développement, il s'accompagne de l'absence de stress car la réserve utile atteint son niveau maximal avec la recharge hivernale.
- La phase de chute : à partir du mois d'avril, le stock d'eau dans le sol prend le sens inverse par rapport, à son début. Il commence à se vider progressivement jusqu'à son épuisement total au mois d'août. Ce qui indique un stade d'intensité de stress hydrique, où l'ETR ne couvre qu'environ le tiers de l'ETM.

En conclusion, l'étude du coefficient de stress hydrique (Ks) qui relie l'ETM à l'ETR nous a permis de conclure que la méthode de télédétection donne des résultats acceptables, confirmés par Djamai (2009) pour l'ensemble de la Tunisie et Gond et *al*. 2004 à Burkina Faso. Ce coefficient varie en fonction de la saison des précipitations, la densité de la couverture végétale et le type des sols (pour plus de détaille voir Chap.7). Cette étude a permis, cependant, d'identifier généralement deux grands ensembles régionaux. Les secteurs situés sur les versants sud de la Kroumirie et la basse Mejerda où le coefficient de stress hydrique tend à s'annuler. Par contre les secteurs qui occupent les versants nord de la Dorsale se caractérisent par des Ks accentués où les valeurs se rapprochent de zéro. On se demande donc si cette allure expliquera la répartition spatio-temporelle de l'évapotranspiration réelle ?

6.2. Les niveaux annuels de l'ETR

Ce chapitre s'articule autour de la cartographie de l'évapotranspiration réelle par l'utilisation conjointe du modèle de la FAO-56 et données du capteur MODIS, et ce pour le BV de la Mejerda. Il vise aussi à étudier la variabilité interannuelle de cet élément climatique. La répartition spatiotemporelle de l'ETR est en fonction de l'interaction sol-atmosphère en général.

6.2.1. Le niveau moyen annuel

L'analyse de la figure 73, permet de déceler le niveau de l'ETR dans ses valeurs annuelles. Ce niveau varie de 320 mm à 630 mm selon les régions et avec un écart absolu entre le minimum et le maximum de l'ordre de 310 mm, soit un écart relatif de 49,2%. La moyenne journalière de l'ETR dans la région oscille de 0,88 mm à 1,73 mm. L'écart absolu, montre que la variation de l'ETR dans le BV de Mejerda est, nettement, plus faible que celle de l'ETM qu'est d'environ de 650 mm (cf. figure 61 chap, 5). Cet écart nous renseigne aussi, sur le degré de la variation spatiale des cumuls de l'ETR dans le BV de la Mejerda. En effet, la répartition géographique de l'ETR présente, généralement, deux gradients opposés.

Le premier, **latitudinal** du Nord vers le Sud. Ce gradient enregistre un écart absolu de 291,5 mm (entre la station de Jendouba et Tala), soit une variation relative de 47,3 %. Ceci s'explique par plusieurs facteurs :

- L'effet du changement de l'occupation du sol : on passe, brutalement, d'une végétation dense à feuilles persistantes dans les sommets des montagnes au nord à de terres presque à nu au sud. Par conséquent, une grande partie de l'énergie solaire serait consommée sous forme de chaleur latente, ce qui augmente les quantités de l'évapotranspiration. De plus, la vitesse de l'évaporation est plus importante dans les secteurs de la Kroumirie à forêts feuillées, ainsi que ces versants à végétation agricole (les grandes cultures), à l'inverse elle est assez faible et dans les plateaux et les plaines à sols nus aux environs de Tala.

- La capacité de rétention en eau : dans le sud du Haut Tell les valeurs sont inférieures à 400 mm, sauf dans quelques secteurs couverts d'une végétation forestière (des forêts des résineux) tels que le *pin d'Alep, le Genévrier le Thuya de Berbérie et le romarin,* situés aux sommets des Jbels de la Dorsale plus à l'ouest. Dans cette condition, les secteurs sont à forte capacité de retenir l'eau et par conséquent un stock d'eau dans le sol utile pour l'évaporation. Par contre les secteurs avoisinants des sommets de montagnes, en particulier, les versants qui ont une faible capacité de retenir l'eau à cause de leur pente plus moins forte et en conséquent une diminution des quantités de l'ETR. Plus au nord, les versants sud de la Kroumirie enregistrent le niveau plus élevé de l'ETR dans l'ensemble de la région. Nous soulignions ici, que les quantités évaporées dépassent les 600 mm, par exemple 616,3 mm à Jendouba, 628,4 mm à El-Feïja. Ceci, est lié aux caractéristiques des sols (sols alluviaux, et luvisols) qui ont la plus haute capacité de rétention en eaux, notamment, dans l'horizon (0 à 20 cm) Ben Hassine et *al.,* 2002.

- La densité du couvert végétal : avec une densité assez élevée du couvert végétal, comme celle de la Kroumirie, on enregistre plus de volume d'eau stockée dans le sol (Cosandey et *al.,*

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

2012). Dans le cas inverse, on est devant une formation d'une couche dure dans les premiers centimètres du sol. Cette couche empêche l'eau de la pluie de s'infiltrer et diminue par la suite le rythme d'évaporation des sols.

Cependant **le deuxième gradient**, moins important que le premier, intéresse la destination Ouest/Est. De ce fait, les valeurs de l'ETR diminuent progressivement au fur et à mesure en allant de Jendouba à Ghar Melh. L'écart absolu entre les deux stations atteint 113 mm, soit une variation relative de l'ordre de 18,3 %. Ce gradient caractérise, essentiellement, l'axe de oued Mejerda. Il est en relation avec l'effet de la mer, dans la mesure où les valeurs du coefficient de stress hydrique diminuent lorsqu'on se rapproche du littoral. Par contre, ce coefficient prend de l'ampleur sous l'effet de la continentalité.

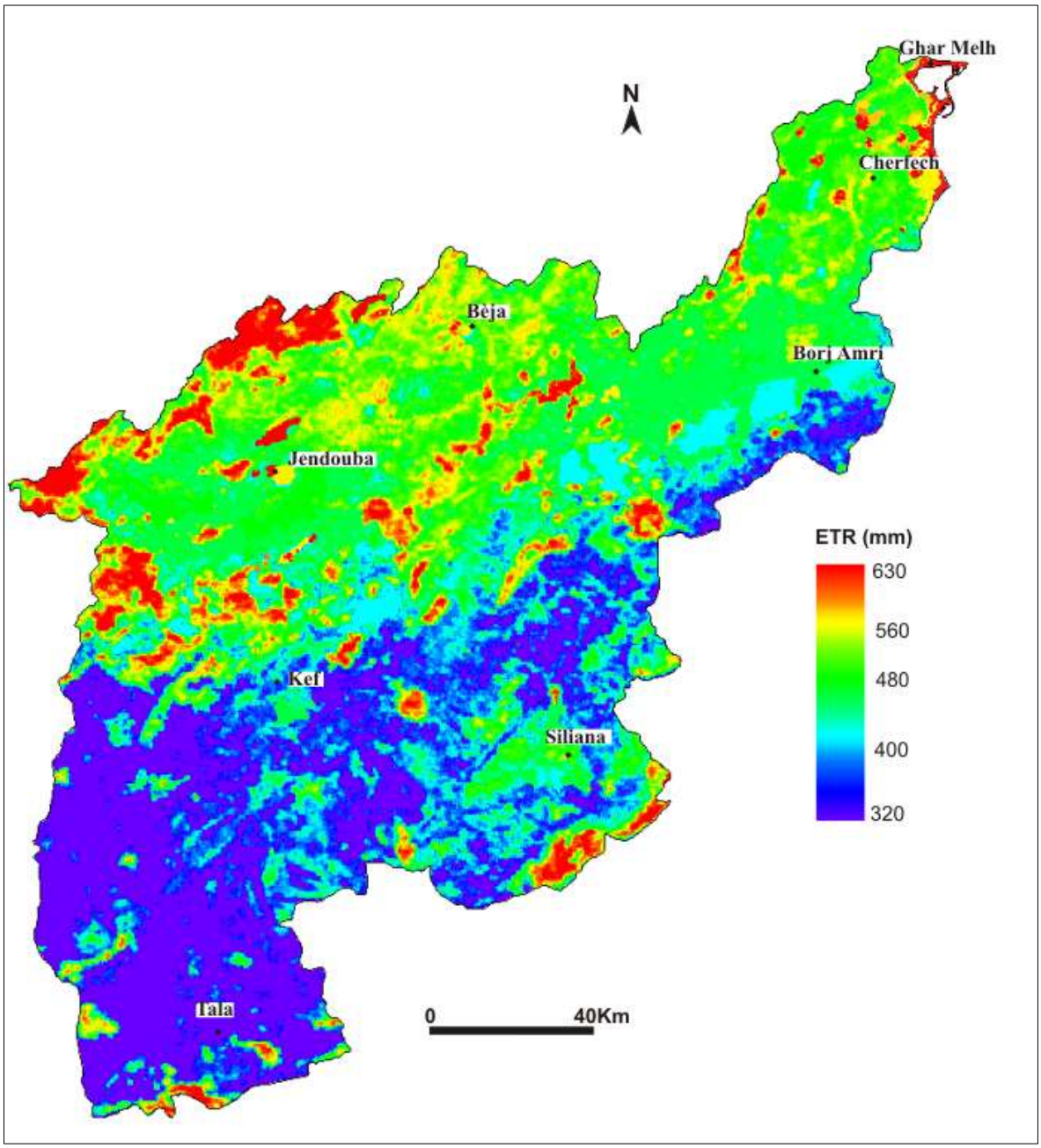


Figure 73: Le niveau annuel moyen de l'ETR (mm) dans le B.V de la Mejerda (2000-2011)

Pour approfondir l'analyse précédente, nous avons suivi, de plus près, la variation spatiale des cumuls annuels de l'ETR. En effet, la figure 73 montre, généralement, deux secteurs opposés : d'une part la vallée de la Mejerda et d'autre part, les versants de la Dorsale et les plateaux du Tell.

- La haute Mejerda : il comprend les massifs de la Kroumirie et leurs versants sud, les plaines de l'axe la Mejerda, et les fonds des vallées. Dans cet ensemble, l'ETR varie de 460 mm dans les plaines et les secteurs abrités (dépression de Gardimaou à l'ouest de Jendouba, les basses terres du delta de la Mejerda) à 630 mm aux sommets des montagnes (la Kroumirie, Jbels Ouergha à l'ouest du Kef, les collines de Teboursouk). L'écart entre ces deux ensembles est de 170 mm, soit une variation relative de 27 %. Ce schéma est lié principalement au niveau de stress hydrique. Ce niveau diminue sous l'effet de l'altitude, c'est pourquoi les secteurs élevés subissent moins de stress que les bas (Feki., 2006). À titre d'exemple, El-Feîja située à environ 900 m se caractérise par une moyenne annuelle de coefficient de stress de 0,74 par contre, Gardimaou, situé au fond de la vallée Mejerda à environ 200 m d'altitude, retient un niveau moyen annuel de coefficient de stress de l'ordre de 0,67. Ce schéma s'explique aussi par le fait que *« l'évapotranspiration réelle augmente avec l'altitude suivant la disponibilité d'humidité dans le sol au lieu de le gradient de température »* Ayenew T., 2003.

- Les versants nord de la Dorsale et les plateaux du Tell : ils contiennent les sommets de la Dorsale et ses piémonts, les environs de Tala et haute vallée de Mallègue. En dehors de quelques sommets de montagnes le niveau de l'ETR oscille de 320 à 420 mm par an. L'écart absolu alentour de 80 mm, soit une variation relative de 19,1 %. En effet, l'ETR manifeste une faible variation dans les environs de Tala et la haute vallée de Mallègue, sans doute, sous l'effet de la dominance des sols nus. À cet effet, El Garouni et *al* en 2000 ont montré que l'ETR estimée dans la basse Mejerda varie suivant l'occupation du sol : « *elle est en moyenne de 2 mm par jour sur sol sec où dominent les sols nus, de 4 mm par jour dans les zones irriguées et/ou à végétation dense et elle peut atteindre 8 mm par jour sur les surfaces en eau»*. En ce qui concerne les faibles valeurs de l'ETR, observées dans les versants nord de la Dorsale et ses piémonts, elles s'expliquent par l'effet de l'exposition. En fait, les versants de Dorsale sont situés à l'ombre et reçoivent moins de rayonnement solaire, l'un des facteurs principaux de la demande évaporative. De plus, ces secteurs sont, généralement, situés au tracé de l'iso-ligne 400 mm et par conséquent, le stock d'eau dans le sol est moins important que les secteurs nord du BV de la Mejerda. En résultat, ce stock d'eau sera épuisé rapidement par l'ETR.

- Il reste à signaler que la basse Mejerda est occupée par un palier variant de 503,6 mm à Ghar Melh à 601,7 mm à Cherfech. Les fortes valeurs de l'ETR dans cette région, bien que située à proximité de la mer, sont liées à la présence des nappes phréatiques superficielles, des surfaces d'eau (Garaât Mabtouha, Lagune Ghar Melh, Sebkhet Sidi Bahroun…) et des périmètres irriguées le long du cours d'eau Mejerda (El Garouni A., 1995).

Cette variation spatiale s'observe aussi à l'intérieur de chaque secteur, principalement, sous l'effet de la pente et de l'exposition. Les versants orientés vers l'ouest (les versants des monts d'Ouergha à l'ouest du Kef) présentent les niveaux les plus élevés qui

suivent la logique de l'arrivée des flux humides du Nord-Ouest. Les versants exposés au sud, notamment les versants sud de la Kroumirie, ont eux aussi des valeurs élevées de l'ETR comparées à ceux exposés au nord, et plus précisément les versants nord de la Dorsale, en raison, de leur forte densité de végétation et leur exposition au rayonnement solaire. Alors que les versants exposés au nord, étant plus secs et plus dénudés, sont situés sur les pentes fortes, au mauvais drainage et aux couverts clairs auxquels s'associent, souvent, à la culture en sec ou le pâturage, favorables au déclenchement du feu. Ces secteurs enregistrent les valeurs les plus faibles de l'ETR.

En résumé, l'analyse de la cartographie de l'ETR révèle, d'abord, que la végétation dans la région d'étude est soumise à un stress hydrique très élevé, et ensuite, une dominance très nette des surfaces souffrant d'un déficit hydrique plus ou moins fort (les secteurs secs) à l'inverse, le confort hydrique n'est représenté que sur une faible superficie, en particulier, sur la bande de la Kroumirie (Mjejra et *al.,* 2015). Enfin, l'existence d'une structure spatiale, au regard des propriétés pédologiques, occupation des terres et des conditions hydriques (Galleguillos M., 2010). C'est-à-dire l'ETR est à la fois influencée par la teneur en eau du sol et par la manière dont cette eau du sol répond à la demande atmosphérique.

6.2.2. La variation interannuelle de l'ETR

Nous signalons d'abord que nous allons focaliser notre attention sur la variation interannuelle des cumuls de l'ETR uniquement sur la période étudiée (2000-2011). Ensuite, l'approche cartographique représentée dans la figure 74, dans la description, assurément, nous rappelons ici que nous avons choisi une moyenne de 16 pixels voisins qui représentent en général la réalité dans chaque secteur choisi. Cette échelle a été choisie pendant les campagnes de terrain et elle peut résumer l'allure du site échantillonné. Le choix de ces sites se base sur les facteurs suivants :

- Ces points de 1km de côté (grille de 16 pixels d'une résolution spatiale de 250m) ont été choisis de façon à illustrer plus en détails les grandes tendances observées à l'échelle de la région ;
- La typologie des sols : chaque site a été choisi selon la typologie des sols dans le BV de la Mejerda (cf. figure 17, les sols dans le B.V de la Mejerda). Nous avons essayé de représenter la capacité de rétention en eau de chaque type de sol pour en déduire son intervention sur le rythme de l'ETR ;
- Le taux d'humidité des sols : c'est à la base de la carte de l'humidité des sols (cf. figure 68, humidité relative des sols) que nous avons choisi les sites. En fait, l'humidité des sols nous renseigne sur l'état de la réserve utile de chaque type de sol (Gond et *al*. 2004 ; Simonneaux V., 2009 ; Zribi et *al.,* 2014) pour en déduire enfin son relation avec les niveaux de l'ETR ;
- Les facteurs géographiques, notamment, la topographie, l'exposition, les conditions environnementales (changement de l'occupation des sols d'un secteur à un autre), étage bioclimatique…etc. Ceci vise à représenter les différents secteurs du BV de la Mejerda et de suivre de près les comportements interannuels de l'ETR, pour démontrer l'individualité climatique de chaque ensemble régional ;

L'analyse de la figure 74 relative à l'évolution de l'ETR et le tableau 35 concernant les statistiques descriptives des variables retenues, permet d'établir une certaine classification de la variabilité interannuelle des cumuls de l'ETR. Cette variabilité est classée en trois groupes[56], et ce à partir de leur degré d'intensité :

- Groupe 1 : variabilité élevée comprend les sites abrités et des vallées (Badrouna, Testour, Er-Ramlia). L'ETR manifeste une irrégularité importante où l'écart type enregistre le niveau le plus élevé dans le BV de la Mejerda (39,6 mm à Er-Ramlia, 38,1 mm à Badrouna et 31 mm à Testour soit une variation relative respectivement (7,1%, 6,2% et 5,9%). Dans les trois stations, le niveau minimal de l'ETR se coïncide l'année agricole 2003/2004 par contre, il atteint son maximum durant l'année agricole 2007/2008. Ces deux pics extrêmes (un coefficient de stress hydrique faible et un coefficient de stress hydrique élevé) sont liés vraisemblablement aux quantités de pluies reçues. L'on sait que la période de reconstitution des réserves utiles est très variable en fonction des conditions pluviométriques de l'année et même le niveau de ces réserves dépend fortement de la lame d'eau écoulée (Cosandey et *al*., 2012). Ainsi, selon les statistiques de CRDA l'année agricole 2003/2004 correspond à l'année la plus pluvieuse et inversement pour la saison 2007/2008, et ce pour la période de 2000 à 2011. L'allure de cette variabilité interannuelle est gouvernée, en premier lieu, par la position topo-climatique des sites. Ils se trouvent dans une situation abritée caractérisée par l'instabilité climatique. En deuxième lieu, apparaissent les particularités de l'occupation des terres. La forte variabilité dans ce groupe est associée à l'occupation des sols des cultures annuelles (Badrouna : blé et orge ; Er-Ramlia : fourrages) par contre la faible variabilité est observée à Testour, occupée par des plantations arborés (olivier). Cela dit que l'ETR est beaucoup plus variable pour les espèces végétales annuelles que les plantations arborées (El Garouni et *al.,* 2001). Un autre facteur peut expliquer la variabilité de l'ETR dans ces sites retenus. Il s'agit des caractéristiques des sols, en particulier la capacité de rétention en eau, qui influence sur le stockage de la réserve hydrique. En fait, la majorité des sites retenus sont localisés sur des sols alluviaux, riveraines des cours d'eau. Ici, la recharge des réserves utiles est donc davantage dépendante de l'irrégularité du rythme des précipitations, dans la mesure où les apports infiltrés dans les sols sont très variables d'une année à l'autre.

- Groupe 2 : une variabilité modérée qui concerne les stations de Cherfech et du Kef. Bien que les deux stations soient diversifiées sur plan topographique, elles se rassemblent en termes d'intensité de dispersion. Certes, les courbes évolutives des cumuls de l'ETR dans ces deux stations présentent des fluctuations un peu rapides autour de la moyenne annuelle. L'écart type oscille de 26,6 mm à Cherfech à 28,3 mm au Kef, avec une variabilité relative de 5,2 % à 5,6 %. Mais, le poids des facteurs géographiques explicatifs de la variabilité interannuelle n'est pas le même pour les deux stations. La variabilité au Kef s'explique par l'irrégularité des facteurs climatiques affectant l'évapotranspiration réelle, en particulier les précipitations, les températures, les vents et l'insolation et ce d'une année à une autre. À titre d'exemple « *la variabilité spatiale et temporelle des précipitations étant très influente sur la*

[56] Nous avons utilisé pour la discrétisation de la série des sites la méthode « des seuils naturels » ; c'est la plus facile à mettre en œuvre et la plus couramment utilisée en géographie. Cette méthode consiste à choisir comme bornes des classes les « trous » de la distribution. Les valeurs sont placées et ordonnées sur l'échelle numérique d'un diagramme de distribution. Les zones de séparations « naturelles » plus large entre certaines valeurs sont choisies visuellement comme limite de classes (Zanin et *al.,* 2003).

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

grandeur et la répartition géographique de l'ETR » Caroline et *al.,* 2005. Cependant, d'une part l'effet du changement de l'occupation des sols et d'autre part, l'effet de la mer sont responsables de la disparité temporelle de l'ETR dans la station de Cherfech.

- Groupe 3 : une faible variabilité s'y retrouve en trois stations (Tala, El-Feîja et Ghar Melh), malgré la disparité spatiale entre ces stations, elles présentent une faible variabilité interannuelle de l'ETR, avec une variation relative alentour de 3 %. Dans les environs de Tala, l'écart-type est de l'ordre de 12,6 mm. Ayenew T., (2000) suppose que la faible variation spatiale de l'ETR est liée à un pouvoir d'évaporation qui se déroule plus ou moins au même rythme sur la surface à sol nu durant toute l'année. Certes, l'écart diminue progressivement, dans le Haut Tell, au fur et à mesure qu'on se dirige vers le sud. Ceci s'explique par le changement du poids des facteurs géographiques relatifs à chaque station, ainsi que les éléments climatiques affectant l'évapotranspiration réelle en particulier, les précipitations, les températures, les vents et l'insolation et ce d'une année à une autre. À titre d'exemple « *la variabilité spatiale et temporelle des précipitations étant très influente sur la grandeur et la répartition géographique de l'ETR* » Caroline et *al.,* 2005. En ce qui concerne, les massifs de la Kroumirie (station d'El-Feîja) se caractérisent par une variation de 3,6 % soit un écart-type de 17,5 mm. La faible variabilité de l'ETR est en fonction d'une réserve hydrique qui ne change pas beaucoup d'une année à l'autre et un couvert végétal qui garde sa stabilité tout au long de la période étudiée (formation forestière). Enfin, Ghar Melh enregistre la variabilité la moins élevée dans l'ensemble du BV de la Mejerda (tableau 34). Il est à noter que la variabilité de l'ETR est plus marquée dans les sites continentaux que dans les sites littoraux. Ceci confirme les propriétés de la répartition géographique des paramètres climatologiques en Tunisie, dans la mesure où la mer joue le rôle de modérateur de la variabilité climatique. De plus, le pouvoir évaporant du climat « *diminue d'environ 1% chaque fois que le teneur en sel augmente de 1% à cause de la faible pression de vapeur d'eau dans l'eau salée* » Csandey et *al*., 2012. L'on sait que la basse Mejerda est occupée par plusieurs plans d'eau salés et des surfaces marécageuses (Garaât Mabtouha, domaine d'Utique, Lagune Ghar Melh, Sebkhet Ariana…).

Tableau 4 : Variabilité interannuelle de l'ETR (mm) à quelques stations et parcelles-types dans le BV de la Mejerda (2000-2011)

	Écart absolu (mm)	Écart type (mm)	Coefficient de variation (%)
Badrouna	88,9	38,1	6,2
El-Feîja	78,1	17,5	3,6
Testour	141,3	31,0	5,9
Er-Ramlia	94,1	39,6	7,1
Ghar Melh	47,3	14,8	2,9
Cherfech	101,4	26,8	4,5
Tala	30,4	12,6	3,3
Kef	101,2	26,6	5,1

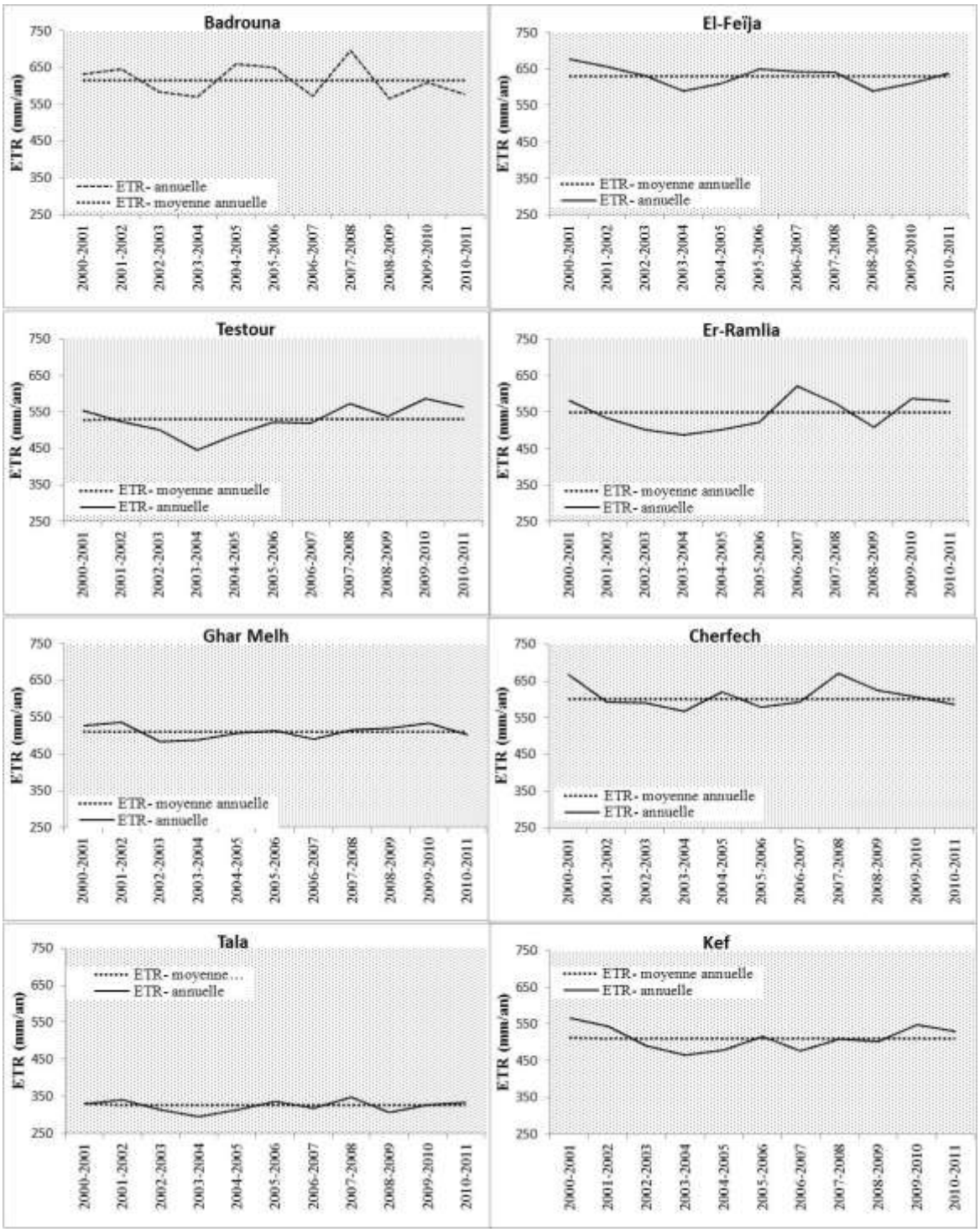


Figure 74: Variation interannuelle de l'ETR (mm) dans le B.V de la Mejerda (2000-2011)

Au total, la cartographie permet de distinguer l'intensité de la variabilité interannuelle de l'ETR de manière synthétique dans les différentes sous-régions du B.V de la Mejerda. La disparité spatiale de cette variabilité s'explique par le changement du poids des facteurs géographiques relatifs à chaque secteur. Il est possible qu'aucune tendance temporelle ne puisse également être établie car la période considérée est courte et n'introduit pas des résultats significatifs.

En somme, il est important de déduire, en général, une ressemblance morphologique de la spatialisation entre l'ETR et l'ETM provenant, en grande partie, des mêmes facteurs agissants, dans la mesure où le gradient Nord/Sud et intérieur/littoral garde la même position. En revanche, l'ETR montre une variation interannuelle plus marquée que celle de l'ETM en raison de la forte irrégularité, en plus que les conditions climatiques, des propriétés pédologiques reliées au stock d'eau dans le sol (Amri R., 2013).

Pour mieux approfondir les connaissances de l'ETR dans le B.V de la Mejerda, nous proposons de fignoler l'analyse à l'échelle saisonnière et mensuelle. Afin de cerner les grands traits significatifs de la répartition spatiotemporelle de l'ETR.

6.3. Les niveaux saisonniers de l'ETR

Nous allons essayer, dans ce qui suit, de suivre le comportement des cumuls de l'ETR à l'échelle saisonnière dans le B.V de la Mejerda. Également, nous visons à connaitre les traits majorats de la distribution spatiale et les facteurs qui agissent le plus sur ce paramètre. Ainsi, le niveau de l'ETR se caractérise par une nouvelle articulation à la fois dans l'espace et entre les saisons.

6.3.1 En automne

Durant l'automne le niveau des cumuls de l'ETR dans l'ensemble du B.V de la Mejerda oscille de 40 mm à 75 mm, 0,44 mm à 0,82 mm par jour. La distribution de l'ETR suit deux axes opposés. Ce fut le cas des faibles quantités qui correspondent, le plus souvent, au sud de la région et les fortes quantités règnent dans le Nord. En effet, les terres de Tala enregistrent le niveau le plus bas avec 41,7 mm, à l'inverse, les massifs de la Kroumirie sont occupés par le niveau maximal alentour de 70 mm (voir figure 75a). Ce gradient Nord/Sud est accompagné par une variation spatiale significative, dans la mesure où l'écart absolu entre Tala et Jendouba atteint 23,1 mm. Dans ce contexte, la topographie accidentée et la diversification du couvert végétal entre les formations forestières aux sommets des collines et les plantations annuelles dans les vallées abritées, semblent être les facteurs déterminants de cette répartition. Vers l'est, la plaine de la basse Mejerda se distingue par une singularité justifiée, essentiellement, par une variation douce. C'est l'exemple de Borj Armi 60,3 mm et Cherfech 54,6 mm, pour qui l'écart absolu parvient à son seuil le plus bas de l'ordre de 5,7 mm. Ceci peut s'associer, d'une part, à la régularité de l'occupation du sol qui est, le plus souvent, des cultures annuelles et/ou des prairies, et d'autre part, à l'effet de la mer qui adoucit la demande évaporatoire du climat. Par contre, l'effet de la réserve hydrique sur la variation spatiale n'est que de deuxième degré. En effet, l'axe de la Mejerda, situé généralement sur des sols alluviaux, peu évolués et limono-argileux, bénéficiant d'un bon drainage. À cela s'ajoute que ces sols plus humides, moins perméables et se caractérisent par une réserve hydrique, qui ne varie pas beaucoup d'un secteur à un autre (Gallali., 2004).

Toutefois, si on considère l'aspect de l'ETR dans chaque sous-région, on peut retenir les idées suivantes :

- le Haut Tell : la principale caractéristique qui distingue cet ensemble est l'intensité de la variation spatiale de l'ETR. Le rapport entre les valeurs maximales situées aux sommets et les valeurs minimales qui dominent les plaines abritées, touche 69 % avec un écart absolu d'environ 22,2 mm. Cette silhouette est corrélée, à mon sens, à l'effet du relief qui intensifie la variation du climat et par conséquent l'ETR.
- la haute Mejerda, constitue un réservoir important pour l'évaporation puisqu'elle détient les valeurs maximales de l'ETR de toute la région. Ces valeurs occupent un palier de 60 à 75 mm, avec une variation spatiale relative d'environ 20 %. À cet égard, plusieurs facteurs peuvent être intervenir : l'effet de l'exposition aux flux humides d'origine Nord-Ouest durant l'automne, l'existence d'une réserve hydrique héritée et la dominance d'une couverture végétale forestière favorisant la transpiration.
- la moyenne et la basse Mejerda, constitue une bande d'environ de 60 km le long du cours d'eau de l'oued Mejerda, se distingue par des valeurs situées le plus souvent alentour de 55 mm et avec une variation spatiale relative de l'ordre de 8,3 %. Il est notoire de constater que le caractère agricole détermine la répartition de l'ETR. En effet l'occupation du sol durant la période de semis peut évaporer entre 0,5 à 1,1 mm par jour (El Garouni A., 1995).

Enfin, une telle répartition de l'ETR présente une gamme de valeurs assez bien définie durant l'automne. Elle met en relation le début de la recharge de la réserve utile et le rythme de l'ETR dans la région.

6.3.2. En hiver

En hiver, les cumuls de l'ETR montrent des niveaux plus élevés que ceux de l'automne, non pas à cause d'une demande évaporative plus forte, mais plutôt à cause de l'absence de stress hydrique de la végétation, où le coefficient de stress est nul (égal à 1). Les valeurs varient peu d'une sous-région à une autre pour s'installer, en général, entre l'intervalle de 55 à 95 mm, soit une moyenne journalière de 0,55 mm à 1,1 mm (voir la figure 75b). La répartition géographique de l'ETR hivernale garde le même aspect par rapport à celui enregistré en automne, dans la mesure où nous constatons une nette opposition entre les secteurs nord et sud de la région. À cet effet, la haute Mejerda détient une gamme de quantités d'ETR allant de 70 à 95 mm. Par exemple, on note 78,5 mm à Jendouba et 93,7 mm à El-Feîja. Plus au sud, le Haut Tell et l'amont du bassin versant de oued Siliana sont occupés par un palier allant de 55 à environ 70 mm, à savoir, Tala 56,2 mm et Siliana 68,1 mm. Par ailleurs, à l'exception de la station de Ghar Melh, la basse Mejerda s'individualise, quant à elle, par une gamme de valeurs comprise entre 75 et 85 mm, c'est le cas de Cherfech 81,9 mm et Borj Amri 81,7 mm. Cependant, les faibles cumuls hivernaux de Ghar Melh sont liés à la dominance d'un sol alluvial hydromorphe à cause de la propagation des surfaces humides. Enfin, le faible niveau des cumuls de l'ETR en hiver résulte, essentiellement, de la fréquence des événements pluvieux, dont le taux d'évapotranspiration devrait être réduit, puisque l'air est presque saturé en vapeur d'eau (Caroline et *al.,* 2005). Une autre explication se rapporte à une ETP très faible et un stress hydrique presque nul, dans la mesure où la valeur de son coefficient (Ks) atteint un record (la valeur de 1) durant les mois de janvier et février.

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

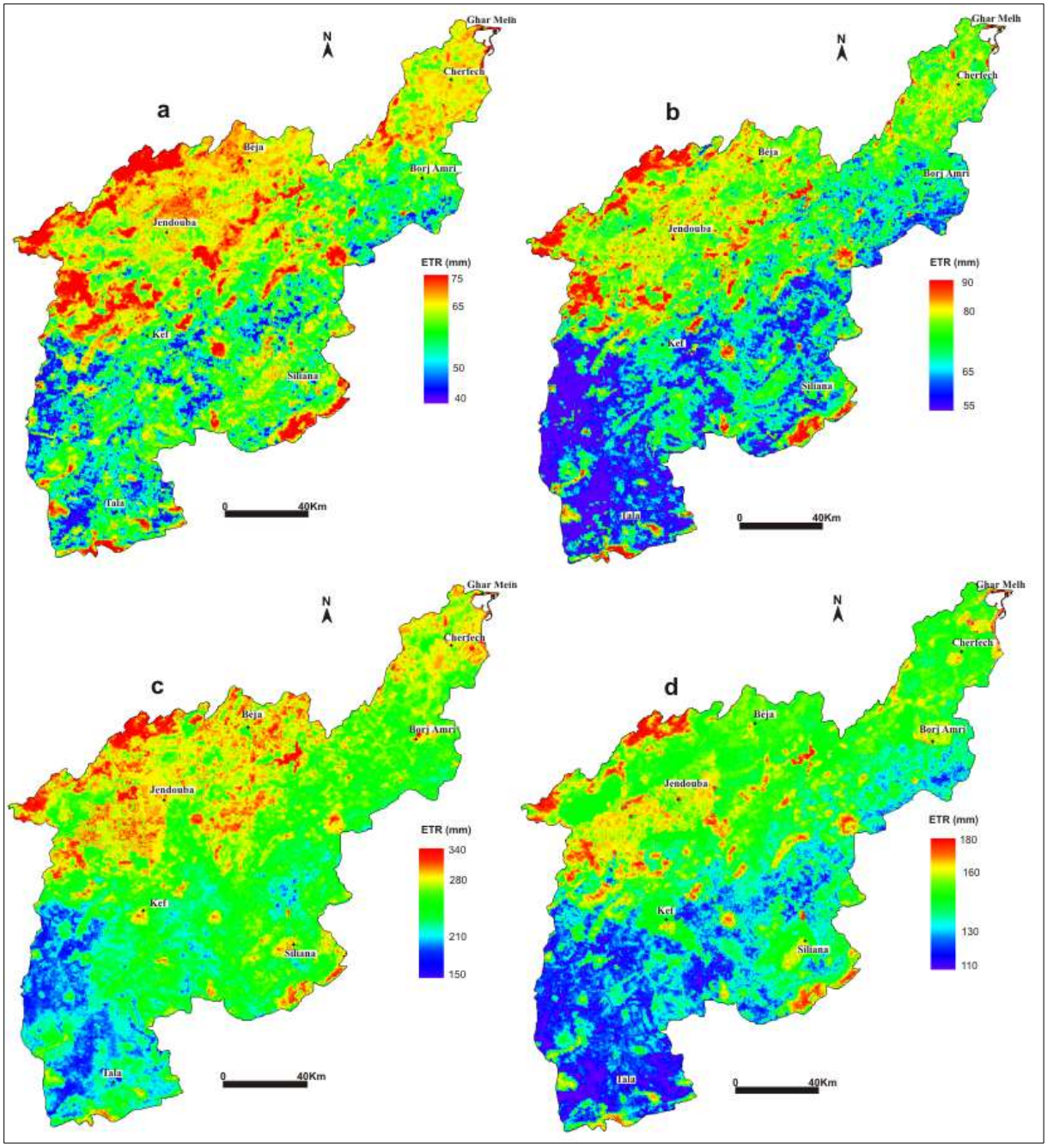


Figure 75: Les niveaux saisonniers de l'ETR (mm) (a) automne, (b) hiver, (c) printemps et (d) été, dans le B.V de Mejerda (2000-2011)

À y regarder de plus près, en hiver, l'ETR se qualifie par une forte variation spatiale par rapport à celle enregistrée en automne. Ainsi, dans les plateaux du Tell, l'écart absolu entre Tala et les sommets de la Dorsale touche 30,8 mm en hiver alors il n'est que de 15,2 mm en automne. Vers le Nord, la haute Mejerda présente en hiver un écart absolu de 10,5 mm entre Béja et Jendouba et il diminue à 7,5 mm en automne pour les deux sites. Cette forte variation entre les deux secteurs est liée, probablement, à la forte variabilité des perturbations climatiques qui règnent sur la Tunisie durant l'hiver et l'effet du relief qui influe sur les facteurs conditionnels de l'ETR (les vents, températures, insolation). En effet, les stations du Haut Tell sont exposées aux vents du Nord-Ouest par contre les stations de la vallée de la

Mejerda en sont à l'abri. Plusieurs auteurs mettent en relation l'exposition aux courants advectifs, l'importance de la variation spatiale de l'évapotranspiration (Benzti., 2008 ; Vincent J., 2011). Ceci résulte un pouvoir évaporant du climat très variable même au sein de la même sous-région. À titre d'exemple, les monts de Teboursouk au sud du barrage sidi Salem et les monts d'Ouergha à l'ouest du Kef, enregistrent des apports autour de 92 mm, par contre, les plaines voisines montrent des niveaux très faibles d'environ 60 mm. D'un autre côté, dans la basse Mejerda, l'effet de la mer intervient en premier degré pour freiner la demande évaporative du climat et par conséquent une faible variation spatiale des cumuls de l'ETR. Ici, on assiste à un écart absolu qui ne dépasse pas 1 entre mm Cherfech et Borj Amri.

Sans être encore totalement concluante, l'analyse de l'ETR en hiver permet de retenir que le niveau d'évaporation, en l'absence de stress hydrique, est gouverné en premier lieu par les conditions climatiques et l'effet du relief. De même, s'il n'y a pas de stress, l'ETR sera égale à l'ETM.

6.3.3. Au printemps

Avec l'évènement du printemps, les cumuls de l'ETR enregistrent leurs niveaux maxima. Ils retiennent presque la moitié des totaux annuels en moyenne, 52,5 % à Jendouba, 51,2 % à Borj Amri et 45,3 % au Kef. Cette situation est en relation avec la présence des coefficients culturaux élevés (alentour de 1) et une réserve utile dans le sol héritée de l'hiver et contribuant en plus des pluies printanières à alimenter l'ETR (Henia L., 1993). Les résultats présentés sur la figure 75c montrent que le niveau de l'ETR occupe un palier, en général, de 150 mm à 340 mm, soit une moyenne journalière varie de 1,6 mm à 3,7 mm et avec un écart relatif de l'ordre de 55,8 %. En effet, on note 154,4 mm à Tala, 237,6 mm à Siliana et 329,5 mm à Jendouba, ces chiffres résument l'ETR pour les principales occupations des terres et la topologie du sol dans le B.V de la Mejerda. En ce sens, les deux remarques suivantes peuvent être retenues :

- les maxima de l'ETR sont associés aux sols de type vertisol et les sols alluviaux où l'évaporation peut atteindre 3,6 mm par jour au printemps (Hammami O., 2010). De plus, ces types de sols se distinguent par une réserve utile considérable qui touche 63,4 mm au niveau de 0 à 20 centimètres et de 428,5 mm au niveau de 0 à 120 centimètres (Ben Hassine H. et *al.,* 2003). Dans le même ordre d'idée, ces types de sols sont le plus souvent occupés par des cultures annuelles ou d'une végétation arborée dense où l'évapotranspiration s'élève à son niveau maximal.
- Les minima de l'ETR sont, généralement, accordés avec des sols peu évolués (Rendzines et lithosols) et qui ont une capacité d'évaporer une lame d'eau allant de 1,92 mm et 2,54 mm par jour (Hammami O., 2010), à cause des faibles *« teneurs en eau qui sont inférieures ou égales à 10 % en profondeur de 0 à 80 cm »* (Ben Hassine H. et *al.,* 2003). Ici, on assiste à une réserve utile de 286,2 mm pour l'horizon de 0 à 120 cm. Dans une telle condition, l'occupation des sols se caractérise par les céréalicultures en sec, les sols nus et une végétation arborée clairsemée, duquel l'ETR baisse à son niveau minimal.

L'évapotranspiration agit sur le sol. « *Elle réduit l'humidité en surface et épuise plus rapidement les réserves dans la terre sableuse que dans les terres limoneuses ou argileuses* » (Diop., 2009)

Néanmoins, l'ETR est un processus hautement variable à l'échelle régionale qui doit être pris en considération dans notre étude et que sa variation spatiale dépend en particulier du stock d'eau dans le sol, de la dynamique du couvert végétal et des flux radiatifs nets. Certes, la basse Mejerda se qualifie par une variation spatiale très marquée. L'écart absolu atteint 118,2 mm, avec une variation spatiale relative de 38,6 %. Le haut Tell, a son tour, enregistre un écart absolu de 95,1 mm sur le transect des piémonts de la Dorsale aux plateaux du Kef, soit une variation spatiale relative de 29,7 %. La haute Mejerda, quant à elle, présente l'écart le plus faible de toute la région d'environ 15 mm. Les écarts notés dans la répartition spatiale de l'ETR indiquent que l'hétérogénéité spatiale des interactions sol-plante-atmosphère joue un rôle majeur dans cette configuration (Caroline et *al.,* 2005). En effet, la haute Mejerda détient des sols plus saturés que les autres sous-régions à cause de son exposition des précipitations et par conséquent un stock d'eau important qui alimente l'ETR. En revanche, la forte variation spatiale de l'ETR, observée dans la basse Mejerda, s'explique par le changement brutal de la capacité de rétention d'eau. En effet, on passe sur une courte distance des sols alluviaux à l'amont de la région à un sol hyrdomorphe en aval (dans le delta). En outre, la couverture végétale est un autre facteur qui détermine la variation l'ETR par ses différences dans l'albédo de surface et par sa capacité à soutirer l'eau du sol par transpiration. Souidi Z et *al.,* (2010) ont constaté que « *les valeurs élevées sont observées sur les couverts forestiers denses et que les faibles valeurs concernent les sols nus qui correspondent à des valeurs élevées d'albédo ».*

En somme, dans le B.V de la Mejerda et durant la saison de l'activité végétale, l'ETR présente son niveau maximal. Ceci s'explique par la synergie de plusieurs facteurs qui n'ont pas le même poids. En premier lieu, le potentiel du stock d'eau dans le sol hérité de l'hiver. En second lieu le comportement du couvert végétal vis-à-vis du stress hydrique et en fin les conditions climatiques. En ce qui concerne la répartition spatiale, l'ETR prend le sens inverse de l'ETP. C'est-à-dire une croissance du sud vers le Nord de la région.

6.3.4. En été

En été, les valeurs de l'ETR subissent une nette diminution par rapport à celles qui caractérisent le printemps et la répartition spatiale garde un aspect semblable. Les cumuls varient, généralement, de 110 mm à 180 mm, soit 1,2 mm à environ 2 mm par jour. L'écart absolu estival dans l'ensemble de la région atteint 70 mm, soit une variation relative de 38,8 %. Un gradient Nord-Sud, en particulier, suivant le transect Kroumirie/ Haut Tell et une variation inter-régionale dont le rapport gagne 1,5 fois plus important. En effet, le site à Jendouba garde le niveau élevé de 165,7 mm et le site à Tala témoigne le niveau le plus bas 112,8 mm (figure 75d). La manifestation de ce cas, est en relation avec la répartition du bilan radiatif et de l'activité végétale. En période estivale les températures moyennes sont plus élevées, en particulier, dans la vallée de la Mejerda et frôlent 28 à 30°C et le potentiel du rayonnement solaire est maximal. Par ailleurs, l'indice de végétation est quasi-nul dans le

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

Haut Tell par contre, la haute Mejerda se distingue par des indices moyens à faibles (0,2 à 0,45). Ceci met en évidence un stress hydrique de la végétation prononcé et par conséquent un palier d'évapotranspiration plus important au nord qu'au sud. Vers l'Est, le gradient prend le sens inverse, dans la mesure où les valeurs diminuent au fur et à mesure qu'on s'éloigne du littoral. Cependant, on marque à Ghar Melh 172,5 mm et 125,9 mm à Cherfech, et ce pour une distance d'environ 60 km. Ceci est justifié, probablement, par l'effet de la mer, l'existence des surfaces en eau tels que : des Gaârats, des Sebkhas, Lagunes, surfaces marécageuse (cf. figure76) et une nappe phréatique superficielle dans ce secteur. On sait que la mer et les plans d'eau chargent l'atmosphère en vapeur et par conséquent une source de plus pour alimenter l'évaporation. Quant à la nappe phréatique superficielle, elle agit par son pouvoir de charger le stock d'eau dans les sols par la remontée capillaire en cas d'épuisement de la réserve utile, ce qui accentue le rythme de l'évaporation (El Garouni A., 1995).



Figure 76 : Surfaces marécageuses aux environs de Ghar Melh. La végétation est constituée ici de *salicornes* (juin 2010 ; Cliché Mjejra M.)

Il est significatif de constater à ce propos que les valeurs extrêmes de l'ETR aux alentours de 170 mm (présentées sur les cartes par la couleur rouge) se répartissent sur des secteurs très réduits. Elles sont associées, la plupart des cas, aux sommets des montagnes couverts par des forêts de feuillus. Dans le même ordre d'idée, les secteurs situés de part et d'autres de oued Mejerda et occupés par les périmètres irrigués ou la végétation hydrophile enregistrent une gamme de valeurs entre 160 mm à 175 mm. Ceci confirme que les surfaces irriguées ont un potentiel moyen d'évaporation d'environ 4,9 mm par jour en mois de juillet (Mjejra M. et *al.,* 2012). Les valeurs d'ETR simulées en été sont très faibles, ce qui contredit les résultats habituels, malgré l'importante quantité de l'ETP dans la région (500 mm à 700 mm). Ce phénomène s'explique par les effets suivants :

- la présence prolongée des sols nus durant une grande partie de la saison et le faible niveau du coefficient de stress hydrique (de 0,35 à 0,5). Cela confirme la relation étroite entre le taux de couverture végétale et l'évapotranspiration réelle (Ayenew, 2003) ;
- la dominance des sols en majorité sablo-argileux, en particulier, dans les secteurs sud du BV de la Mejerda. Ce qui résulte une forte infiltration (faible réserve utile) et un couvert végétal clair (Souidi S. et *al.,* 2010) ;
- L'effet de l'albédo sur la fraction de l'évapotranspiration, ainsi les valeurs élevées de l'ETR sont observées sur les couverts forestiers denses à faible albédo par contre, les faibles

valeurs concernent les sols nus qui correspondent à des valeurs élevées d'albédo (Hamimed et *al*., 2008).

Au total, l'ETR observée en été, varie de 110 mm à 180 mm avec une fraction d'évaporation très faible d'environ 22,5 %. Ce résultat indique la présence d'un stress hydrique plus ou moins élevé. Il est associé, le plus souvent, aux surfaces forestières denses et les surfaces des cultures annuelles.

Finalement, l'ETR dans son niveau saisonnier présente une grande variabilité à la fois inter-saisonnière et inter-régionale. Au niveau de la variabilité inter-saisonnière les valeurs de l'ETR oscillent de 40 mm en automne à 340 mm au printemps, l'écart-type varie de 46,4 mm à 58,5 mm et avec un coefficient de variation de 0,42 à 0,54, et ce pour les stations, respectivement, de Tala et Jendouba. En ce qui concerne les variations spatiales se manifestent, d'abord, par une décroissance apparente du taux de l'ETR du Nord vers le Sud du B.V de la Mejerda ; en suite une nette opposition entre les versants exposés au nord et ceux exposés au sud ; enfin un contraste entre les terres nues et les terres végétalisées. Cette hiérarchie est liée à l'interférence des propriétés sol-plate-atmosphère, essentiellement, les caractéristiques de la réserve utile, le cycle de la croissance de la végétation et les processus radiatifs.

6.4. Le niveau moyen mensuel de l'ETR

L'examen de la figure 77 relative aux différents sites du B.V de la Mejerda est nécessaire pour comprendre l'origine de la morphologie du régime mensuel de l'ETR. À cet égard, nous pouvons retenir les idées essentielles suivantes :

- Partout dans le B.V de la Mejerda, les cumuls de l'ETR présentent un régime mensuel simple, duquel le niveau maximal occupe le mois de mai sauf à la station de Ghar Melh qui se décale au mois de Juin. Le niveau minimal est associé, dans la majorité des stations, au mois de novembre, sauf à Ghar Melh où il est enregistré au mois de décembre et il est accordé au mois de septembre pour Cherfech et Borj Amri. Cette situation se coïncide, probablement, avec l'état des réserves en eau du sol et l'état de croissance des plantes. À cet effet, le mois de mai est désigné par des NDVI élevés (se rapprochent de 1) reflète le record de l'activité végétale et par conséquent plus de transpiration. À l'inverse, le mois de novembre est attaché, généralement, à la période de semis, dans la mesure où l'activité végétale est faible et la recharge du stock d'eau est à son début. Ceci résulte des faibles valeurs des termes évaporation du sol et la transpiration de la végétation (Hammami O., 2010).
- Le maximal mensuel des cumuls de l'ETR gardent le même pic par rapport à celui de l'ETM, et ce au mois de mai. La situation de Ghar Melh est liée aux caractéristiques de la fréquence d'une végétation hydrophile qui fait glisser, par sa photosynthèse tardive, le maximum de l'ETR au mois de juin. Quant au minimal, il se décale pour gagner le mois de novembre, qu'est généralement attaché à la période de semis dans la mesure où l'activité végétale est faibles (le minimal de l'ETM est enregistré en décembre et/ou janvier). Cet état est conditionné, selon Hammami O., (2010) par l'accroissement moyen journalier de la production primaire (en Kgha/jour) et de l'ETR moyenne journalière (en mm/jour). Ainsi, la

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

saison de la période où pousse la végétation (septembre, octobre, mi-novembre) enregistre un taux de croissance moyen journalier de végétation de 0,4 kgha/j et une ETR moyenne journalière de 0,48 mm, et ce sur les vertisols. Par contre, sur la période (mi-novembre, décembre, janvier) on assiste à un taux de croissance moyen journalier de 1,5 kgha/j et une ETR moyenne journalière de 0,66 mm. En ce qui concerne le minimum, observé au mois de septembre dans les stations de Cherfech et Borj Amri, s'explique par l'usage des terres dans ces deux stations. Ce sont des parcelles irriguées, dans la mesure où la réserve utile va être chargée à l'occasion de l'irrigation des cultures.

- Les profils des cumuls mensuels de l'ETR expriment une nette dissymétrie. Ce fut une allure lente dès le début de la saison agricole vers le mois de mai, et une chute remarquable vers la fin de la saison. Ce schéma correspond, sans doute, aux comportements de la couverture végétale et la teneur en eau du sol. Il est admis que la saison de croissance de la végétation commence en automne et atteint son plein développement au printemps pour connaitre une chute par la suite. la réserve utile suit la même procédure, c'est-à-dire, la reconstitution progressive de son potentiel et puis un puisage rapide pour se vider complétement à la fin de la saison.
- Sur toute la période étudiée (2000-2011), l'écart moyen inter-mensuel est intéressé par une gamme de valeur variant entre de 31,3 mm à 40,9 mm, en tenant bien sûr compte de l'exception de Tala et Gar Melh respectivement 18,7 mm et 25,9 mm (voir le tableau35). Toutefois, les faibles valeurs des écarts type sont expliquées, d'abord, pour Tala par l'effet de la fréquence de l'état des terres à sols nus avec des réserves utiles faibles de de 286,2 mm pour l'horizon de 0 à 120 cm, et ensuite, pour Ghar Melh, l'effet modérateur des plans d'eau provoquant une demande évaporative du climat, relativement, régulière sur toute l'année. Par ailleurs, les fortes valeurs des écarts types, en particulier, dans les sites de Siliana, Kef, Jendouba, Borj Amri et Cherfech sont à l'origine de la dynamique du cycle végétal rapporté, essentiellement, aux pratiques des cultures annuelles ou les jachères. Ceci permet de dire que la variation inter-mensuelle des cumuls de l'ETR est plus accidentelle que pour la végétation annuelle que la végétation arborée et les sols nus.

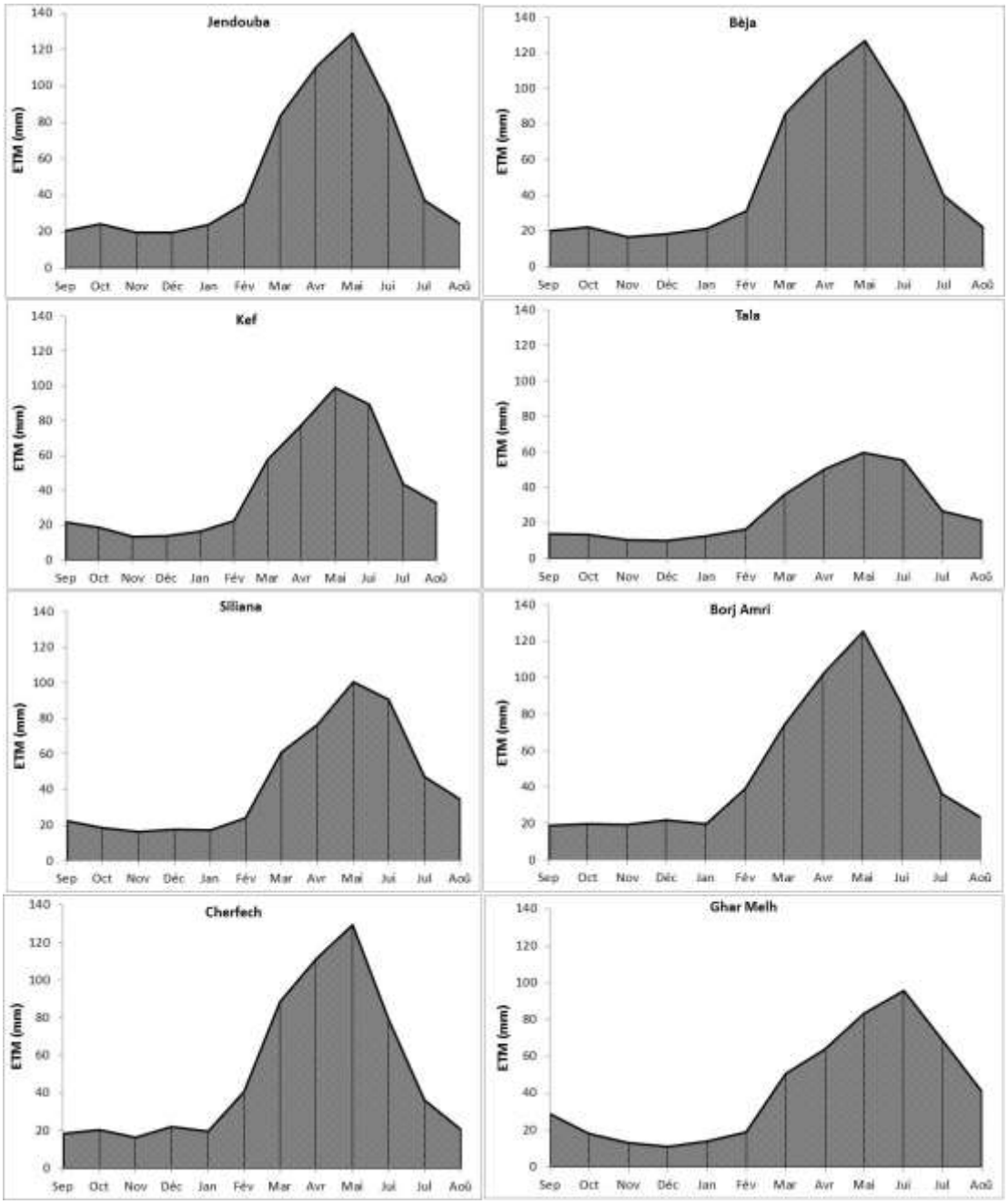


Figure 77: Le régime mensuel moyen de l'évapotranspiration réelle dans le B.V de la Mejerda (2000-2011)

Tableau 35 : variabilité du régime mensuel de l'ETR dans le BV de la Mejerda (2000-2011)

	Écarts absolus (mm)	Écarts-type (mm)	Coefficient de variation (%)
Jendouba	109,4	40	6,5
Kef	89,1	33,2	6,3
Tala	50,1	18,7	5,7
Siliana	88,3	31,3	6,1
Béja	109,9	40,7	6,7
Borj Amri	106,3	37,8	6,4
Cherfech	113,4	40,9	6,8
Ghar Melh	75,3	25,9	5,6

En demeurant à l'échelle mensuelle, les cumuls de l'ETR varient dans le temps comme dans l'espace. La variation inter-mensuelle montre une dissymétrie criante entre les mois allant du développement foliaire à la pleine saison, d'une durée d'environ de cinq mois et la période de récolte d'une durée d'environ de deux mois. À l'échelle spatiale, les surfaces à sols nus situées au sud du Tell et les surfaces à proximité des plans d'eau enregistrent des faibles variations de l'ETR. Par ailleurs, la vallée de la Mejerda et les plaines intramontagnardes témoignent les fortes variations spatiales sous l'effet des processus radiatifs et le caractère changeant de l'occupation du sol.

Conclusion

Bien qu'ils soient inégalement répartis dans le temps et dans l'espace les cumuls de l'ETR dans le BV de la Mejerda ont permis de distinguer les sous-régions selon leurs comportements en coefficient de stress hydrique. Ils ont confirmé l'apparence d'un noyau à faible ETR centré dans la haute vallée de Mallègue, aux environs de Tala et aux alentours de Ghar Melh et un autre noyau à forte ETR qui s'étend sur les versants sud de la Kroumirie et les sommets de montagnes. Ceci est à l'origine de l'interaction entre la réserve utile dans les sols et les caractéristiques des états de la surface, notamment la dynamique du couvert végétal. Cependant, l'ETR est relativement homogène dans les vallées abritées et la basse Mejerda, et ce en regard des effets radiatifs et l'effet modérateur des plans en eau.

L'approche cartographique de l'ETR, selon les trois pas de temps (l'année, la saison et le mois) par le modèle de la FAO, combiné au potentiel de l'imagerie satellitale MODIS, a montré que la végétation dans le B.V de la Mejerda est soumise à un stress hydrique qui devient de plus en plus important à une échelle de temps plus fine (échelle mensuelle) et qu'on se dirige du Nord vers le Sud.

CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE

Au terme de cette deuxième partie, plusieurs aspects peuvent être retenus :

➢ Les résultats obtenus montrent l'importance de l'intérêt de l'approche satellitale pour fournir une image régionale détaillée sur l'évapotranspiration dans le BV de la Mejerda. En effet, l'approche permet de caractériser l'état hydrique de la végétation à partir de l'humidité des sols et de caractériser l'état de développement de l'espèce végétale à partir des NDVI. La combinaison de ces deux types d'information avec le modèle de la FAO-56 conduit à la cartographie opérationnelle de l'évapotranspiration. L'originalité de cette approche repose sur l'avantage d'utiliser les images satellites sans, même, de données supplémentaires de terrain (Souidi et *al*., 2009).

➢ Dans l'ensemble, on peut dire que la cartographie de l'évapotranspiration dans ses trois articulations (ETP, ETM et ETR) confirme que la végétation dans le B.V de la Mejerda est soumise, la plupart du temps à une demande évaporative intense (ETP), à des besoins en eau (ETM), relativement élevés et à un stress hydrique plus moins fort (ETR), et ce en regard à des apports d'eau très faibles (précipitations).

➢ Quoi qu'il en soit, l'évapotranspiration sous ses trois formes montre une grande variation spatiale, qui se diffère d'un secteur à un autre. Son niveau maximum est observé au Haut Tell et son minimum est enregistré dans la basse Mejerda. En outre, la spatialisation de l'évapotranspiration permet de dégager une certaine régionalisation, notamment à partir de la fraction d'évaporation. Il s'agit de la haute Mejerda, les hautes terres de Tala et le delta de Mejerda. Les limites de ces régions sont légèrement différentes aux limites habituelles des sous-bassins versants de la Mejerda. Par contre, la variabilité temporelle est moins importante que la variation spatiale. La vallée de la Mejerda et les plaines intramontagnardes la variabilité la plus élevée et les secteurs d'altitude retiennent une variabilité relativement faible.

➢ L'évapotranspiration maximale (ETM) évolue par rapport à l'évapotranspiration potentielle (ETP), principalement en fonction de l'état de recouvrement du sol par la végétation et de son "degré" d'activité biologique. L'évapotranspiration réelle (ETR), quant à elle, évolue par rapport à l'évapotranspiration maximale (ETM), en fonction de l'état de la réserve hydrique du sol. Donc, Elles sont soumises au rythme saisonnier des apports radiatifs, l'état de développement de la végétation et le stock d'eau dans les sols.

➢ Les facteurs agissants sur l'évapotranspiration sont diversifiés. L'ETP est gouvernée, toujours, par les conditions atmosphériques (bilan radiatif, température, vent). L'ETM est en relation avec la carte de l'occupation des sols, le stade de développement de la végétation et les caractéristiques des surfaces (rugosité, albédo, taux de couverture). L'ETR est associée en premier degré à l'état des réserves en eau des sols et à la capacité de rétention en eau. Ces conditions nous poussent à chercher des liens : d'une part, entre le degré d'influence de chaque élément climatique pour l'ETP, d'autre part, entre la typologie des sols et les caractéristiques de la végétation pour l'ETR et l'ETM. Cette approche présente le côté de

l'incertitude d'une telle application et qui devient plus complexe avec, notamment, la grande échelle spatiale du BV de la Mejerda.

- Il est essentiel aussi de garder à l'esprit le fait que les valeurs calculées de l'évapotranspiration (ETP, ETM et ETR), en dépit de l'armature physique des formules utilisées, sont à prendre avec un sens relativement critique car il n'existe pas de méthode de validation à des échelles de temps et d'espace aussi larges. La technique utilisée pour la validation des résultats se base sur la confrontation des valeurs ponctuelles mesurées au sol (presque inexistantes dans le BV de la Mejerda) avec celles obtenues à partir de l'image satellite (Hamimed et *al*., 2014).

- L'étude de différents types d'évapotranspiration a, jusqu'ici, permis de suivre le fonctionnement du B.V de la Mejerda en évaluant les potentialités du modèle de la FAO et des données satellites spatiales dans le suivi des états de la végétation et de l'humidité des sols. Aussi, est-il nécessaire de pousser l'étude aux aspects plus fins intégrant l'approche de l'indice du déficit de l'évapotranspiration, et ce pour aboutir à un zonage du stress hydrique dans le B.V de la Mejerda ? de plus voir l'intérêt de ce zonage dans une région, c'est d'ailleurs confirmé, qui constitue une unité géographique diversifiée, accentuée par l'effet de la multiplicité des situations d'abris et d'expositions. Elle présente aussi des caractéristiques climatiques très variables, voire, contrastes.

TROISIEME PARTIE : SUIVI DE LA DEFICIENCE D'EVAPORATION DANS LE BASSIN VERSANT DE LA MEJERDA

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

Sommaire

Troisieme partie : suivi de la deficience d'evaporation dans le bassin versant de la Mejerda……..... 191
Introduction.....193
Septieme chapitre : la déficience d'évaporation : spatialisation et niveaux 195
7.1. La démarche adoptée 196
7.2. Spatialisation de la déficience d'évaporation dans le bv de la mejerda : définition des secteurs à risque de stress hydrique 198
7.3. Variabilité du régime mensuel de la déficience d'évaporation.....203
Huitieme chapitre : deficience d'evaporation : typologie, intensite et frequence.....211
8.1. Méthodologie 211
8.2. Typologie de la déficience d'évaporation.....215
8.3. L'intensité et la fréquence du déficit d'évaporation 225
Neuvieme chapitre : essai de zonage de la deficience d'evaporation dans le bassin versant Mejerda 231
9.1. Choix des critères d'analyses et de validation de zonage 232
9.2. Analyse et interprétation des résultats de la régionalisation du bv de la mejerda : les variantes régionales.....236
9.3. Discussion sur la méthode et les résultats.....247
Conclusion de la troisieme partie……252

INTRODUCTION

Les résultats présentés dans la deuxième partie, à propos de la structure spatio-temporelle de l'évapotranspiration, ont montré que la végétation dans le BV de Mejerda souffre de pertes d'eau relativement élevées. Il est donc primordial de se doter d'outils et d'indicateurs efficaces afin de suivre, de plus près, ces pertes et de détecter leurs degrés d'intensité durant le cycle végétatif. Il existe déjà certains indicateurs pour qualifier l'état hydrique de la végétation. Parmi ces indices, on site les plus simples à calculer « la déficience d'évaporation » à travers la différence entre (EM - ETR) et « **l'indice de satisfaction** » des besoins en eau de la plante à partir des valeurs du rapport (ETR / ETM). C'est pour cette raison que la troisième partie s'intéresse aux résultats obtenus avec la chaine d'analyse pour le suivi la déficience d'évaporation dans le BV de Mejerda. Il s'agit donc, d'un suivi des épisodes secs et humides (Lamy., 2013) c'est-à-dire de suivre l'intensité du déficit d'évaporation et de distinguer les sous-secteurs et leurs limites spatiales dans la région. Il s'agit aussi, de se renseigner sur la durée de la saison sèche et de la saison humide (Henia., 1993) et, par suite, sur le degré de l'intensité de stress hydrique (Feki., 2006). Il s'agit, enfin, d'un critère de régionalisation qui permet de découper le BV de la Mejerda en secteurs individualisés. Ceci est à la base des seuils et des critères retenus pour l'objectif de notre étude tels que : les seuils de l'intensité de la déficience d'évaporation, typologie de la déficience…

Le but de cette partie est de cerner l'état hydrique de la végétation dans le BV de Mejerda. Dans un premier temps, nous présentons la démarche adoptée pour cette fin. En effet, la connaissance de la déficience de l'évaporation apparaît comme une donnée de première importance dans la mesure où elle indique les mois pendant lesquels les plantes ont des difficultés à se ravitailler en eau et précise les quantités d'eau nécessaires pour compléter des ressources naturelles insuffisantes d'humidité. Ce qui nous permet de définir le niveau de satisfactions des besoins en eau de la végétation, le degré de son intensité et la typologie de la déficience d'évaporation. Dans un deuxième temps, nous cernons la variation spatiale de la déficience d'évaporation dans l'ensemble du BV de Mejerda. Ensuite, nous détaillons la répartition géographique à l'échelle parcellaire par le suivi de la déficience d'évaporation dans la parcelle de Badrouna. Ceci vise à cerner l'état hydrique de la végétation à l'échelle locale, notamment, dans un site caractérisé par des niveaux relativement élevés de l'évapotranspiration. En définitive, nous mettons l'action sur le zonage du BV de Mejerda à travers la synthèse des critères retenus et la méthode de classification utilisée pour cette fin. En effet, c'est un découpage de la région en secteurs homogènes selon des variantes climatiques bien définies. Il s'agit d'une part, de confirmer l'identification des limites climatiques connues (les massifs de la Kroumirie au Nord et la chaine montagneuse de la Dorsale au Sud) et des ensembles régionaux homogènes (Le Haut Tell, la vallée de Mejerda, la basse Mejerda). D'autre part, montrer les fortes disparités régionales dans le BV de Mejerda.

SEPTIEME CHAPITRE : LA DÉFICIENCE D'ÉVAPORATION : SPATIALISATION ET NIVEAUX

La déficience (ou déficit) d'évaporation[55] traduit le manque d'eau réel au niveau de la végétation du fait des conditions climatiques. En d'autres termes, le manque d'eau pouvant entraîner un stress hydrique pour la végétation. Elle est utilisée par plusieurs chercheurs comme indicateur de contrainte hydrique pour la végétation nous citons essentiellement :

- indicateur d'interprétation de l'intensité de la sécheresse (Mounier., 1977 ; Dubreuil., 1994 ; Durand., 2007 ; Lamy., 2013). La déficience d'évaporation permet, notamment, de qualifier la sècheresse bioclimatique et agro-climatique. Cette sècheresse se « *traduit pour la plante par une dégradation du bilan entre la perte d'eau par transpiration et l'absorption du sol par les racines* » (Durand., 2007).

indicateur de déficit hydrique (Wilhelmi et *al.,* 2002 ; Er-raki., 2007 ; Radhouane L., 2011 ; Gammar et *al*., 2012) : la déficience d'évaporation permet de déterminer les ordres de grandeur du stress hydrique auquel la végétation est soumise. À ce propos, Gammar et *al*., (2012) considèrent que «*Le déficit climatique(P-ETP) qu'on note d'un mois à l'autre est un indicateur brut de l'intensité de la sécheresse. Il résulte du niveau de compensation de l'ETP par P. Sa valeur est à remplacer par le déficit hydrique(D = ETP-ETR) qu'on obtient après le calcul de ETR d'un mois à l'autre en tenant compte du transfert d'une partie des excédents hydriques enregistrés certains mois sur les mois déficitaires suivants* ». Dans le même ordre d'idée Wilhelmi et *al,* (2002) proposent de calculer le déficit hydrique réel (DHR) comme suit : ETM – ETR. Ceci permet de dire que si les précipitations ont été longtemps l'outil le plus performant pour le suivi du déficit hydrique, car elles conditionnent rapidement la quantité d'eau dans le cycle hydrologique, il a par ailleurs été montré qu'on peut qualifier le manque d'eau de la végétation par la déficience d'évaporation. Cela met en évidence l'intérêt de pouvoir simuler l'indice HDR ce qui aura certainement un poids dans le zonage de la région.

- indicateur de classification de climats (Thornthwaite et Mather, 1955 ; Doorenbos., 1979 ; Zierl, 2001 ; Aghrab A., 2005) la déficience permet, également, d'identifier et de caractériser la demande évaporative non satisfaite par l'eau disponible (différence entre l'ETP et l'ETR), ou l'indice d'aridité qui se définit par le rapport ETR sur ETP. Cet indice d'aridité est défini par : IA= ETR/ETP permet ainsi de comparer la disponibilité en eau à la demande évaporative de l'atmosphère et ce par le biais des valeurs d'évapotranspiration réelles et potentielles. Enfin, les valeurs de la déficience d'évaporation sont les indices hydriques qui sont les plus efficaces pour expliquer la distribution des espèces arborées (Piedallu et *al*., 2013).

Le BV de Mejerda est caractérisé, dans l'ensemble, par un fort impact du déficit hydrique sur la croissance de la végétation. La situation devient plus grave lorsque ce déficit d'apport en eau a lieu en hiver et au printemps, saisons qui permettent une régénération du stock d'eau dans le sol, ou en été, lorsque l'absence des pluies et les températures atteignent des records, accélèrent le rythme de l'évapotranspiration estivale (Camille., 2012). Ainsi,

55

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

l'étude du déficit d'évaporation nous permet d'identifier son niveau, sa fréquence et son intensité. Les valeurs de cet indicateur permettent de classer les sites, qui paraissent en concordance avec l'interprétation de la végétation et de l'occupation des sols, de délimiter et redéfinir les limites fixées par les chercheurs auparavant (Doorenbos., 1979 ; Dyer., 2009). Elles permettent aussi de déterminer une typologie du déficit d'évaporation et de cerner son évolution au cours de l'année et les facteurs déterminants. Dans ce chapitre, le déficit d'évaporation sera présenté à travers sa variation interannuelle et ce à partir du calcul fait à pas de temps mensuel.

7.1. La démarche adoptée

La déficience d'évaporation (DE) est obtenue par la différence entre les besoins en eau de la végétation (ETM) imposés par le climat et la quantité d'eau réellement consommée par évaporation (ETR) et exprimée généralement par millimètre par unité de temps. Elle représente l'eau manquante dans le sol pour que la demande évaporative soit pleinement satisfaite (Dyer, 2009). C'est-à-dire *« l'écart (en millimètres) entre l'exigence climatique en eau imposée aux plantes et la quantité d'eau qu'elles peuvent effectivement utiliser en puissant dans le sol »* (Dubreuil., 1996). Il permet, aussi, de déterminer le bilan agro-climatique d'une végétation donnée. Dans ce contexte, Zouhaier Hlaoui en 2006 confirme que « *le bilan agro-climatique nous permet de connaitre la différence entre les besoins en eau de l'olivier et son évapotranspiration réelle en tenant compte de la réserve utile du sol ».* Le déficit d'évaporation est calculé par l'équation suivante :

Déficience d'évaporation (DE) = Besoin (ETM) – Consommation (ETR)

Cette approche tient compte des échanges d'eau entre l'atmosphère et le système sol-plante. En fait le sol stocke une partie des pluies qui sera cédée par la suite pour satisfaire aux besoins en eau de la végétation. *« Ce type d'approche s'inscrit plutôt dans une optique agro-climatique»* (Henia., 1993) et elle traduit, donc, la réalité mieux que l'optique climatologique. C'est en fonction de cette approche que nous proposons, une typologie simple des mois climatiques qui pourrait être appliquée au BV de Mejerda. Ainsi, nous déterminons le nombre de mois pendant lesquels la végétation est parfaitement alimentée en eau (mois excédentaire) et le nombre des mois durant lesquels la végétation souffre du manque en eau (mois déficitaire). Cela nous permet, en d'autres termes, de caractériser la durée de la saison favorable (excédentaire) et la saison défavorable (déficitaire) dans le BV de Mejerda. Il nous offre aussi la possibilité de suivre la variation spatiale du manque d'eau réel dans la région, et ce tout en intégrant le potentiel de la Carte de l'occupation des terres. « *Cela vient du fait qu'en prenant en compte l'occupation du sol réelle on intègre les besoins en eau spécifiques de chaque stade phénologique. Ainsi pour une culture de blé les besoins hydriques sont importants au printemps, contrairement à une prairie où les besoins en eau sont réguliers tout au long de l'année »* (Lamy., 2013).

Il faut signaler, cependant, que pour les besoins de cette partie (calcul de la DE) nous avons étalonné les valeurs de l'ETM dans les secteurs occupées par les sols nus par un coefficient d'évaporation du sol (Ke). En effet, ce coefficient peut constituer une quantité importante d'eau qui se perd par évaporation du sol estimée à environ 30% de l'ETR dans la

plaine de Haouz au Maroc (Er-raki., 2007). Il s'avère que le modèle de la FAO sous-estime l'ETM pour les sols nus et par conséquent la déficience d'évaporation, et ceci pour au moins deux raisons :

- raison méthodologique : les Kc des sols sont très faibles ce qui aboutit à des niveaux de l'ETM relativement faibles (cf. chapitre 5). De plus, l'approche simple de la FAO appliquée ici (coefficient cultural simple : Kc) pour déterminer les Kc ne tient pas compte du coefficient d'évaporation des sols nus (Ke), paramètre très important pour l'estimation des valeurs de l'évaporation du sol, (Allen et *al*., 1998 ; Er-raki., 2007 ; Hammami., 2010 ; Amri., 2013). A l'inverse, l'approche double (coefficient cultural double (Kcb + Ke) tient compte de ce paramètre, mais elle est beaucoup plus compliquée dans la mesure où elle demande plusieurs paramètres d'entrée, nécessite plus de calcul et n'est fiable qu'avec des mesures expérimentales (Amri., 2013). Ceci dépasse en fait le cadre de ce travail et n'est appliqué qu'à l'échelle parcellaire ;
- raison théorique et pratique : les secteurs à sols nus dans les hautes terres, essentiellement, à Tala se prêtent à une demande evaporative de l'atmosphère très importante sous l'effet des facteurs advectifs très actifs en regard à des cumuls de l'ETM relativement faibles (cf. chapitre 4 et 5). Dans ces conditions, la déficience d'évaporation ne peut qu'être énorme. En effet, Allen et al, (2011) mettent en évidence l'influence des courants d'advection sur les quantités de l'ETP. C'est-à-dire, déplacement horizontal d'une masse d'air avec transfert d'énergie. Ce phénomène tend à augmenter l'évapotranspiration. c'est pour cette raison que la FAO propose des valeurs relativement élevées dans les conditions où les sols sont nus (pour plus d'information voir Allen et *al*., 2011). C'est pour ces deux raisons que nous avons opté la formule suivante pour estimer l'ETM des sols nus :

$$\mathbf{ETM = ET0 * Kcb + Ke}$$

Cette formule consiste à diviser le coefficient cultural Kc en deux coefficients : Un pour la transpiration (Kcb) et l'autre pour l'évaporation du sol (Ke). En effet, Ke permet d'ajuster l'ETM dans des conditions très sèches à sols nus (Simonneaux et *al.*, 2009). Ce coefficient a été déterminé par la même procédure que son analogue coefficient de stress (Ks, cf. chapitre 6). Dans la mesure où une partie de la RU est facilement accessible correspond relativement à un stress nul (Ks= 1). Par la suite le dessèchement du sol se poursuit et le stress s'accélère jusqu'à vider la RU (Ks =0). C'est avec le même principe qu'on peut déterminer le coefficient d'évaporation du sol (Ke). En effet, *« tant qu'on se situe dans une réserve facilement évaporable (Ke = 1), et décroissant ensuite linéairement pour atteindre la valeur Ke = 0, lorsque le réservoir est vide »* (Simonneaux et *al.*, 2009).

Cette démarche nous paraît fondamentale car elle montre les particularités physiques du BV de Mejerda et ses spécificités de l'occupation du sol (confirmée déjà dans les cartes de l'occupation des terres). En dépit de l'armature physique des formules recommandées par la FAO, et appliquées dans plusieurs régions du monde pour la végétation agricole ; cette démarche offre la possibilité de cerner les pertes en eau pour des surfaces non agricoles. Enfin, cette démarche représente une tentative pour aboutir à une régionalisation du stress hydrique dans le BV de la Mejerda, tout en combinant des paramètres phénologiques, pédologiques et atmosphériques qui individualisent chaque sous-secteur de la région.

En somme, l'apport de cette approche agro-climatique où le niveau du stress hydrique est exprimé, essentiellement, par la formule ETR-ETM (la demande des plantes - l'offre des plantes) utilise les meilleurs jeux de données disponibles actuellement (climatiques, pédologiques et paysagères) Lamy C., 2013 via un indice de synthèse (DE). De ce fait, elle repose sur la prise en compte simultanée de l'ensemble des facteurs atmosphériques responsables de la demande évapotranspiratoire (rayonnement solaire, température, humidité et vent). Elle se base aussi sur l'intégration du paramètre pédologique (la réserve utile) afin de suivre la réduction de l'humidité du sol particulièrement pendant la période de développement des cultures (Aghrab A., 2005). Elle s'appuie enfin sur les caractéristiques de la végétation durant le cycle de croissance.

7.2. Spatialisation de la déficience d'évaporation dans le BV de la Mejerda : définition des secteurs à risque de stress hydrique

La DE permet de donner une visualisation régionale et dynamique de la contrainte du stress hydrique ressenti par la végétation. Une valeur de la DE (couleur rouge) indique une plus forte contrainte hydrique, par contre (couleur bleu) témoigne une faible contrainte. Sur l'ensemble du BV de Mejerda, le niveau de la DE varie entre 270 et 420 mm par an, soit un niveau journalier qui oscille de 0,74 mm à 1,15 mm et avec une variation relative de l'ordre de 35,7 % (figure 78). La carte de la DE met en évidence aussi bien des variations à large échelle dues aux changements de l'humidité des sols (ici nous avons utilisé l'humidité des sols pour calculer l'ETR au lieu de la réserve utiles) ou du climat, que des variations locales induites par l'effet du relief. À titre d'exemple, les hautes terres de Tala et les régions abritées sont les premières exposées à une forte DE à l'inverse les régions d'altitude (les massifs de la Kroumirie, les monts d'Ourgha, de Teboursouk, de Tibar et les sommets de la Dorsale) connaissent toujours une faible DE. Là aussi, ces secteurs se distinguent comme des ilots de fraîcheur et d'humidité. En outre, on note des différences entre les versants de la rive gauche de Mejerda (versants de la Kroumirie) où les secteurs confinés plus humides et plus arrosés, et les versants de la rive gauche (versants de la Dorsale) plus secs, d'autant plus que la pente est forte et mal drainée (cf. photos de la figure 81). À titre d'exemple, sur la figure 79 on observe une différence de niveau de la DE à une altitude de 600 m, dans la mesure où les niveaux frôlent 282,9 mm sur le versant de la Kroumirie et 291,3 mm sur le versant de la Dorsale, et avec un écart absolu entre les deux points de l'ordre de 8,4 mm. Ces variations de DE font que l'intensité de stress hydrique n'aura pas les mêmes conséquences pour deux points de même altitude. Les mêmes constatations sont valables pour les dépressions de Gardimaou et Gaâfour. Dans ces deux sites, la DE augmente rapidement pour attendre des niveaux très élevés, à cause de l'effet d'abri. Dans ce cas, on a moins de précipitations et un pouvoir de dessèchement de l'atmosphère et les sols plus importants. La carte de la DE montre aussi un gradient latitudinal dans la mesure où les cumuls augmentent en allant des secteurs nord vers les secteurs sud-ouest. À y regarder de plus près, le croquis de la figure 80 montre un écart absolu de DE de 116,3 mm soit une variation relative de 28,4 %, et ce pour les deux latitudes 37° et 35°. On peut noter, donc, la dégradation de la DE se fait chaque anneau de latitude (d'un degré « ° » de latitude) d'un écart absolu alentour de 60 mm. Un troisième gradient se manifeste, essentiellement, dans le sens Nord-Est/Sud-Ouest. Les niveaux de la DE diminuent

au fur et à mesure qu'on se dirige du littoral vers les hautes terres de Tala. Ce gradient s'explique par l'effet de rafraicheur de la mer et l'effet de la continentalité qui font augmenter la probabilité d'avoir un niveau de déficit plus moins élevé et, par la suite, un secteur à contrainte en termes de moyenne de la DE.

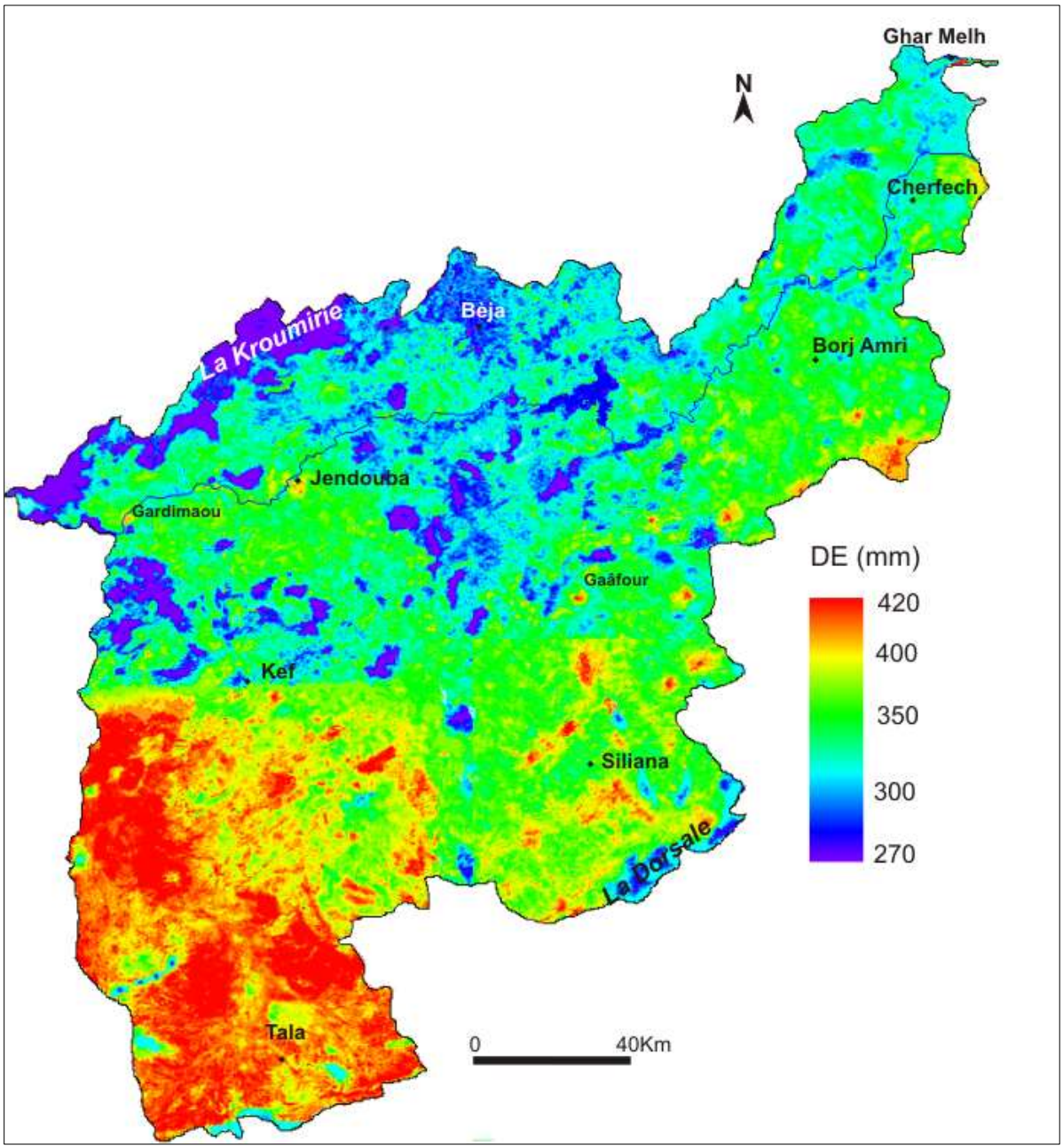


Figure 78 : Cumuls annuels de la DE dans le BV de la Mejerda (2000-2011)

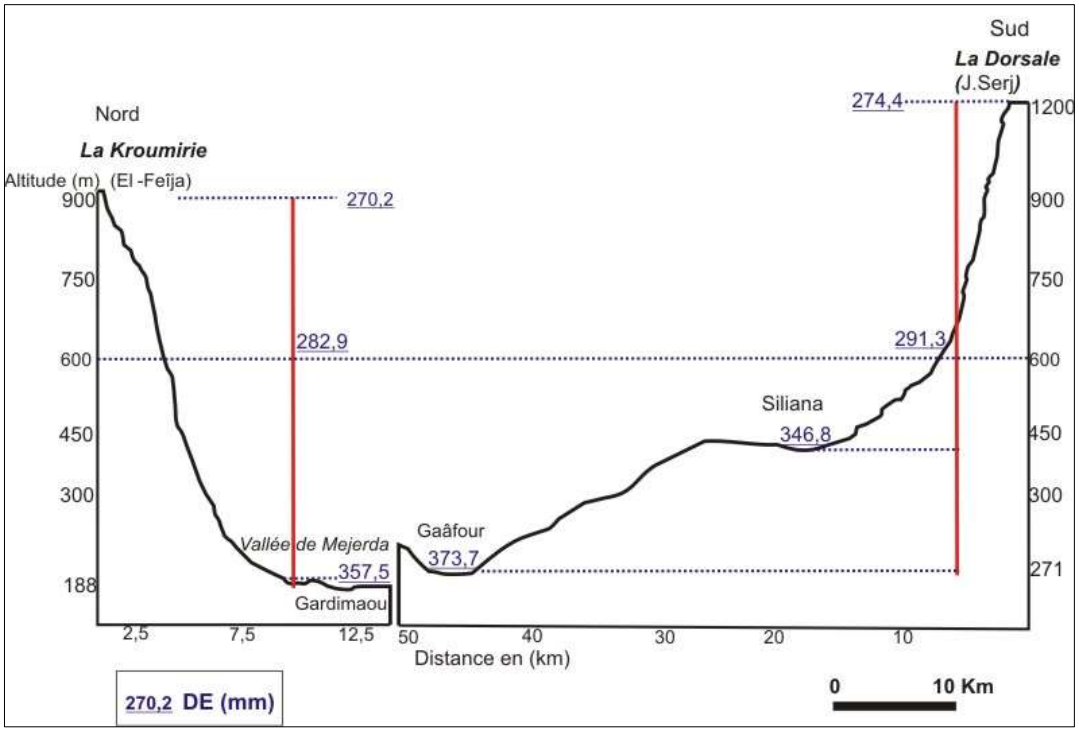


Figure 79 : Croquis du gradient altitudinal de la déficience d'évaporation (en mm) dans le BV de la Mejerda

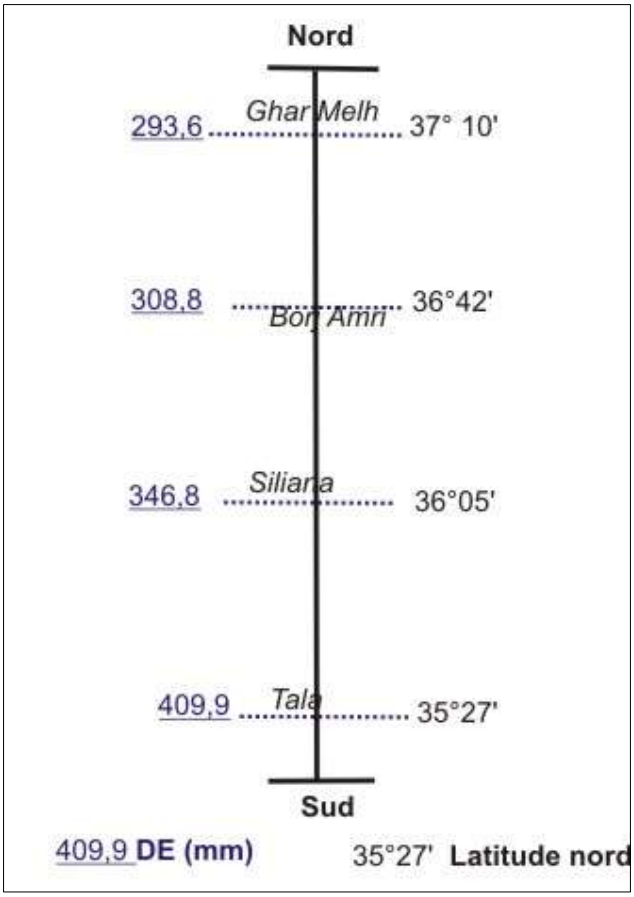


Figure 80 : Croquis du gradient latitudinal de la déficience d'évaporation (en mm) dans le BV de la Mejerda



Figure 81 : Panorama depuis l'amont des versant : à gauche le versant d'El-Feîja –Gardimaou (la photo prise du parc national d'El-Feîja) ; à droite le varsant Jbel Serj-Siliana (la photo prise du pied de Jbel Serj ; avril 2010 ; cliché Mjejra M.)

La répartition spatiale de la DE s'explique aussi par la dégradation des facteurs favorisant le déficit d'évaporation, eux-mêmes déterminants du pouvoir évapotranspirant du climat tels que : les températures, l'humidité de l'air et l'effet de la mer. Il est clair que la dépression de Jendouba et de Siliana se caractérisent par une contrainte remarquable de la DE. Cela signifie que les facteurs géographiques jouent un rôle de premier plan dans le suivi spatial de la DE (Pindard A., 2000). Autrement dit, les secteurs abrités des bas-fonds en premier lieu et les secteurs exposés aux vents sont les plus touchés par le stress hydrique.

Toutefois, la variation spatiale de la DE est fonction de la nature de l'occupation des terres. Les faibles valeurs de la DE sont associées aux formations forestières (les chaînons de la Kroumirie) et l'axe du cours d'eau de Mejerda où se trouvent les périmètres irrigués. Inversement, les fortes valeurs occupent les plateaux sud-ouest du Haut Tell où on peut atteindre les 420 mm, en particulier, sur les surfaces aux sols nus. Ceci permet de dire, que la contrainte de stress hydrique touche en premier lieu les sols nus, puis les cultures annuelles, plus précisément pluviales, et enfin les essences forestières (Mjejra et *al.*, 2015). Ces dernières sont légèrement touchées par l'effet de la sècheresse, car la hauteur du couvert végétal permet de conserver de l'humidité et les racines des arbres allant puiser l'eau en profondeur (Quenol et *al*., 2008). De plus, « *les plantations arborées ont des potentionnellités plus importantes que les plantations annuelles en termes d'accessibilité à la réserve utile* » (Gammar et *al*., 2012). Par contre, les plantes annuelles (les grandes cultures, les maraichères, les fourrages…) se caractérisent par une conductivité hydraulique des racines moins importante et une haute variation de la surface d'échange par les feuilles (enroulement, modification de l'angle d'inclinaison moyen, modification de la taille …) par rapport à celles des plantations arborées (Jouany et *al*. 2009). Il en résulte donc une haute sensibilité en réponse à la sècheresse à cause de la variation des états hydriques de la végétation différenciés par les régimes de défoliation et de fertilisation. En outre, une faible capacité de régulier l'état hydrique quand survient le stress hydrique, en raison d'un rythme de fauche rapide et peu tolérant au stress hydrique (Jouany et *al*. 2009).

La répartition géographique de la DE permet d'observer une régionalisation des secteurs à risque de stress hydrique. En effet, elle laisse apparaître que la vallée du cours d'eau de l'oued Mejerda s'impose comme une véritable limite topographique entre les versants nord à faible contrainte de stress et les versants sud à forte contrainte hydrique dans la mesure où on assiste à une dégradation des conditions climatiques et le développement de la sécheresse peut s'aggraver (Mjejra et *al*., 2015). Cependant, il convient d'insister sur les fortes variations spatiales au sein du même secteur. Par exemple, les pays du Kef, constitués d'une juxtaposition de montagnes, de collines et de dépressions, se distinguent par des différences plus moins importantes des niveaux de la DE. Ici, on passe de 323,3 mm à Dir-Kef et d'une altitude à environ 800-900 m à 407,8 mm dans la dépression Sers à l'est du Kef et d'une altitude alentour de 490 m. Dans ce secteur, on enregistre un écart absolu de 84,5 mm soit une variation relative de l'ordre de 20,7 %. Les mêmes remarques peuvent être faites dans le sous-bassin versant de Siliana, dans la mesure où on enregistre un écart absolu de la DE aux alentours de 72,4 mm entre la vallée de Siliana et les sommets de Jbel Bargou, soit une variation relative de l'ordre de 18,1 %. Ces résultats permettent de souligner que la contrainte hydrique diminue avec l'altitude, ainsi que l'hétérogénéité du BV de Mejerda vis-à-vis du stress hydrique. Toutefois, les facteurs d'exposition des versants sont favorables au développement des niveaux faibles de la DE. À cet égard, la rive gauche d'oued Mejerda est exposée aux flux arrosés du Nord, on a donc, la reconstitution rapide de la réserve utile des sols et son épuisement lent. Par contre, les secteurs du sud-ouest se caractérisent par des sols nus et perméables où la recharge de la réserve utile n'est pas toujours assurée (Hammami O., 2010). Les secteurs sud de la région enregistrent aussi des niveaux NDVI très faibles, de ce fait *« une déficience d'évaporation élevée correspondrait à de faibles valeurs du NDVI, traduisant des phénomènes de sécheresse »* (Dubreuil, 1996). Par ailleurs, la variation spatiale de la DE enregistre son niveau le plus bas. Il s'agit des versants de la Kroumirie et la basse Mejerda, dans la mesure où la variation relative oscille respectivement de l'ordre de 7,4 % à de 4,9 %, soit des écarts absolus 21,6 mm et 15,2 mm pour les mêmes secteurs. Enfin, Les stations intérieures connaissent des niveaux de la DE plus marqués que les stations littorales.

Au total, la cartographie de la DE souligne trois gradients sensibles à l'extension du stress hydrique : un gradient latitudinal, un gradient altitudinal et un gradient littoral/intérieur. Elle permet aussi de mieux transcrire les niveaux de stress de la végétation dans le BV de Mejerda et d'identifier les secteurs à risque. Enfin, le Haut Tell, la dépression de Jendouba et le sous-bassin versant de Silana se présentent comme étant des secteurs à risque de stress hydrique. Cependant, ces résultats peuvent estomper des disparités concernant l'ampleur de la DE et les dates de début et de fin de la période de la déficience. Pour résoudre ce problème, nous avons confronté ces résultats à leur variabilité interannuelle.

7.3. Variabilité du régime mensuel de la déficience d'évaporation

Il est à signaler, tout d'abord, que l'approche mensuelle reste la plus couramment utilisée en climatologie en Tunisie. Ainsi, pour étudier le niveau moyen mensuel du déficit d'évaporation nous retenons les huit stations météorologiques utilisées dans ce travail[56]. Ce schéma stationnel nous semble adéquat pour suivre les durées des saisons humides et celles des saisons sèches. Quant à l'échelle temporelle, nous gardons la même démarche utilisée dans la deuxième partie, qui se prolonge sur la saison agricole (qui commence au mois d'octobre-novembre et se termine au mois de mai-juin). Ce choix a été guidé par la répartition géographie des sites choisis. En effet, les aspects environnementaux, climatiques et la typologie de l'occupation du sol représentent largement l'allure générale du BV de Mejerda. De plus, *« les schémas stationnels donnent les durées de la saison sèche et celles de la saison humide dans leurs variabilités interannuelles »* (Henia., 1993).

Le tableau 36 et les figures 82 et 83 permettent de suivre la situation moyenne de la déficience d'évaporation dans le BV de Mejerda sur la période étudiée (2000-2011). Il s'en dégage les idées suivantes :

- Le tableau 36 montre l'importance des totaux enregistrés du déficit d'évaporation annuel moyen. Ces totaux oscillent entre 293,6 mm à Ghar Melh et 409,9 mm à Tala. Des quantités qui peuvent mettre la végétation dans la région à un stress hydrique sévère, en particulier durant la saison estivale. Le maximum de déficit d'évaporation est enregistré aux mois de juillet et/ou août dans toutes les stations. Ceci est relié à l'épuisement de la réserve utile du sol et l'accélération du pouvoir évapotranspirant du climat. Par ailleurs, le minimum de ce déficit est observé durant la période allant du mois de janvier au mois de mars. Ce qui met en évidence qu'en hiver, essentiellement, le stock d'eau dans le sol est à son maximum et que la végétation ne souffre pas de manque d'eau. Le mois de mars, quant à lui, est marqué par une DE nulle. Ceci est en rapport avec le stockage de l'eau dans le sol de la période hivernale et le début de la saison de l'activité végétative.
- L'exception est observée dans la station littorale de Ghar Melh où le déficit nul se prolonge sur 4 mois (janvier-avril). Ceci s'explique par l'influence de l'environnement de cette station. D'abord, elle est située à l'abri de Jbel Ennadhour qui représente un obstacle vis-à-vis des vents du nord, ensuite elle est entourée par les plans d'eau en particulier Lagune de Ghar Melh, domaine d'Utique et Garâat Mabtouha enfin la nappe phréatique est très proche ce qui permet une remontée capillaire, en particulier, à la fin de l'été et le début de l'automne (El Garouni., 1997). Cette remontée comble en partie l'épuisement total de la réserve utile. On remarque donc que le suivi temporel du déficit d'évaporation est expliqué, en grande partie, par les caractéristiques des phases de la période d'activité végétative (Hlaoui., 2006). En d'autres termes, les phases de développement et, en particulier, la phase de mi-saison enregistrent les niveaux les plus hauts.

[56] Pour résoudre le problème des pixels mélangés, nous tenons à rappeler que les niveaux stationnels de la DE sont saisis pour chaque station météorologique dans le BV de la Mejerda d'après la moyenne de 16 pixels, dans la mesure où une moyenne de 16 pixels d'une résolution spatiale de 250m, peut représenter suffisamment le niveau stationnel du paramètre climatique étudié et son aspect environnemental (Er-raki., 2007).

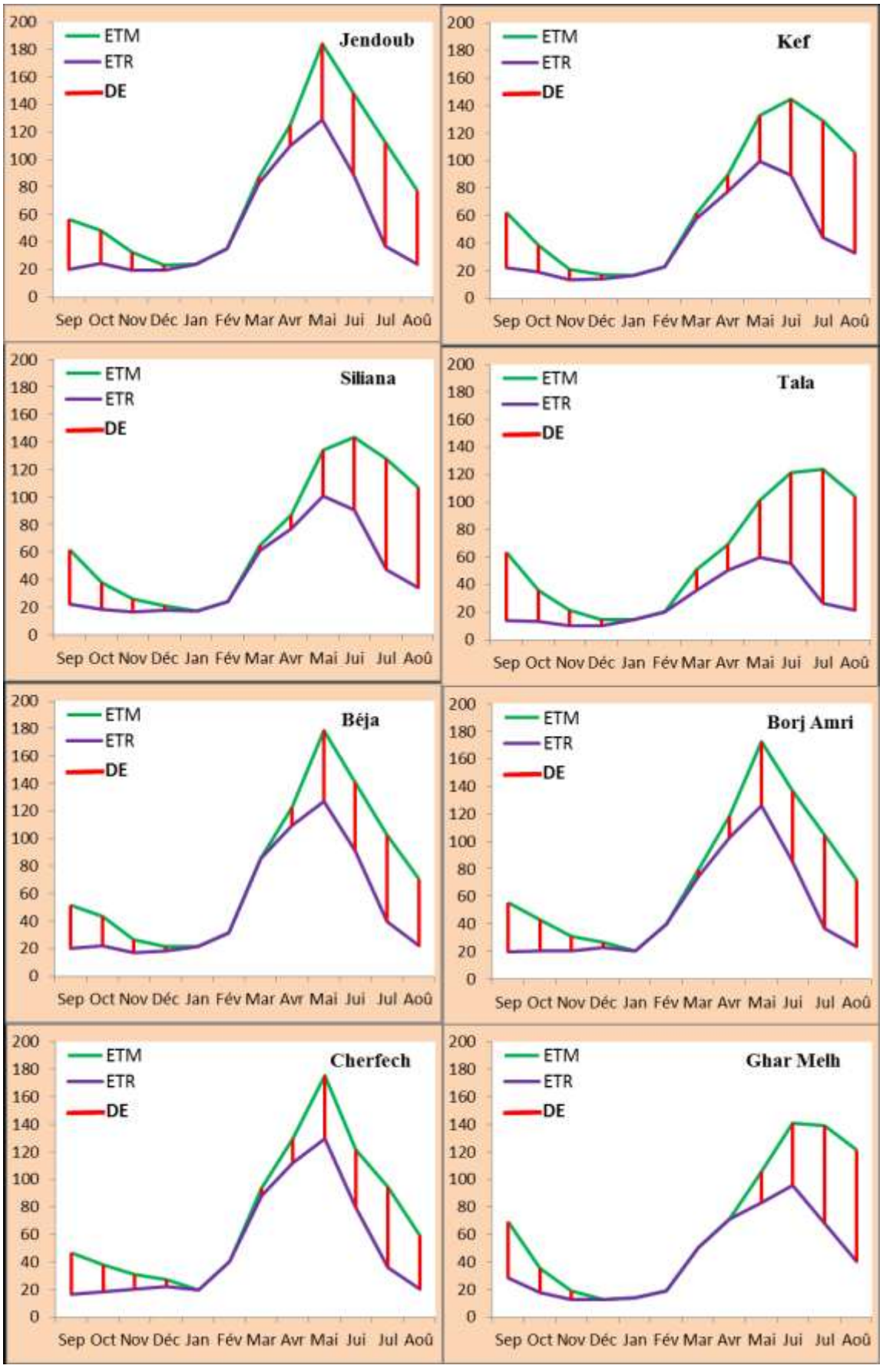


Figure 82: Le régime mensuel moyen de la déficience d'évaporation (mm) dans les stations météorologiques du BV de la Mejerda (2000-2011)

Tableau 36: Synthèse des niveaux moyens mensuels de la déficience d'évaporation (mm) dans quelques stations du BV de la Mejerda (2000-2011)

	Jendouba	Kef	Tala	Siliana	Bèja	Borj Amri	Cherfech	Ghar Melh
Septembre	38,5	39,7	50,0	41,5	31,5	36,1	31,3	41,0
Octobre	26,6	18,6	22,6	21,3	21,4	22,6	20,7	17,5
Novembre	15,4	6,6	11,1	11,3	9,6	11,2	11,5	6,2
Décembre	3,7	3,1	4,5	3,3	3,0	4,3	4,8	2,3
Janvier	0	0	0	0	0	0	0	0
Février	0	0	0	0	0	0	0	0
Mars	4,4	3,7	14,9	4,9	0	4,7	5,6	0
Avril	17,0	10,7	19,1	12,2	13,5	15,4	19,1	0
Mai	57,1	32,3	41,1	35,3	51,8	46,5	46,4	22,2
Juin	63,7	53,4	65,8	56,5	52,3	51,9	44,1	45,1
Juillet	79,3	84,0	97,5	83,8	62,4	68,1	59,9	71,1
Août	57,2	71,2	83,3	76,6	48,6	48,0	40,7	81,2
Cumuls annuels (mm)	363,0	323,3	409,9	346,8	294,2	308,8	284,2	293,6

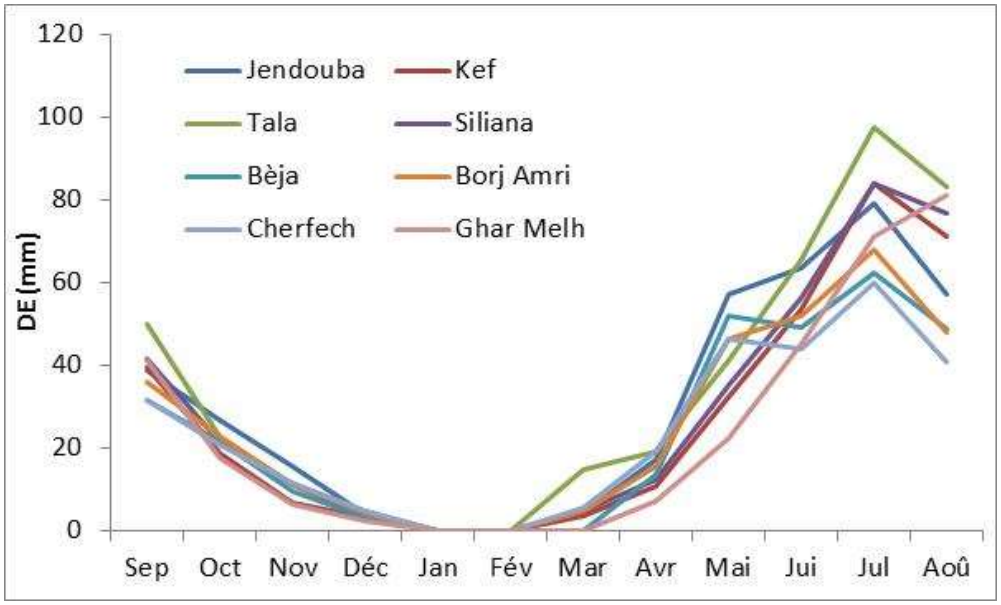


Figure 83: Évolution des profils des niveaux mensuels moyens du déficit d'évaporation (mm) dans les stations météorologiques du BV de la Mejerda (2000-2011)

➢ La figure 83 relative à l'évolution interannuelle de la DE montre un palier allant, généralement, d'un niveau nul des mois janvier-février jusqu'à le maximum du mois juillet de l'ordre 97,5 mm. Cet aspect nous permet de classer l'année en trois périodes :

- i période du mois d'août au mois de décembre montre une diminution progressive de la DE jusqu'à s'annuler au mois de janvier. Ici, l'ampleur du stress hydrique de la végétation diminue au fur et à mesure que la recharge hivernale des réserves hydriques est assurée (Lamy., 2013).

- ii période allant du mois de janvier au mois de février qui coïncide avec une période d'absence de besoin d'eau (période de stagnation). C'est, en quelque sorte, la saison de vernalisation qui fait le passage du stade végétatif au stade reproductif. Cette période est caractérisée par l'absence de déficit à cause de l'équilibre entre l'ETR et l'ETM et on est dans un procédé de confort hydrique ;
- iii troisième du mois de mars au mois de juillet présente un cumul croissant pour atteindre le niveau le plus élevé de l'année. Ceci indique un épisode d'augmentation de la DE d'un mois à un autre. Dans ce cas, les besoins en eau de la végétation augmentent progressivement de la période de la floraison jusqu'à la période de la maturité. En conséquent, le stress hydrique devient de plus en plus étendu.

L'évolution des valeurs moyennes de la DE permettent d'effectuer un suivi mensuel du stress hydrique auquel la végétation est soumise. Elle montre, en effet, l'extension de la DE au cours de l'année. En janvier et février, ces valeurs sont nulles, confirmant l'humidité des deux premiers mois de l'année, tandis que la DE apparaît au mois de mars, mais le stress n'est véritablement sensible qu'à partir du mois de juin. C'est en juillet que sont atteints les niveaux les plus élevés. Le stress hydrique proprement dit (DE supérieure à 50 mm) affecte les secteurs sud du BV de Mejerda car les réserves utiles ne peuvent pas se reconstituer totalement pendant la période hivernale (Hammami O., 2010).

La rythmicité de la DE est liée essentiellement à deux facteurs : une humidité des sols[57] (l'état de la recharge du stock d'eau dans le sol) et une variabilité saisonnière du climat très marquée. En fait, si l'on positionne sur un même graphique (figure 84) le DE et l'humidité des sols on obtient une expression de la relation DE/humidité des sols. Il est intéressant de remarquer que l'allure du nuage des points obtenus est conforme à la règle selon laquelle, la diminution de la DE est plus proportionnelle à l'augmentation de l'humidité des sols (Pindard., 2000). C'est ainsi qu'un sol saturé d'eau (humidité 100%) entraînerait une DE nulle et lorsque le sol devient sèche (humidité environ 30%) la DE prend de l'ampleur, dans la mesure où leurs niveaux dépassent souvent les 70 mm par mois, notamment, en été. Le coefficient de corrélation le plus élevé dans la région est observé dans la station de Ghar Melh (0,83) compte tenu du fait qu'elle se caractérise par des sols très humides (la proximité des surfaces humides). Par contre, le faible coefficient de corrélation (0,57) est observé dans la station de Tala par le fait des caractéristiques des sols. Ces derniers sont souvent perméables et dégagés de tout couvert végétal, qui conserve en partie l'humidité. Si l'on tient compte de la remarque précédente, du fait qu'il s'agit une forte liaison entre la DE et l'humidité des sols, on peut raisonnablement conclure que le stress hydrique de la végétation est beaucoup plus lié au stock d'eau disponible pour les plantes qu'aux conditions atmosphériques.

[57] Voir la procédure de calcul et la signification de l'humidité relative des sols chapitre 6 paragraphe 6.1.1. et les annexes.

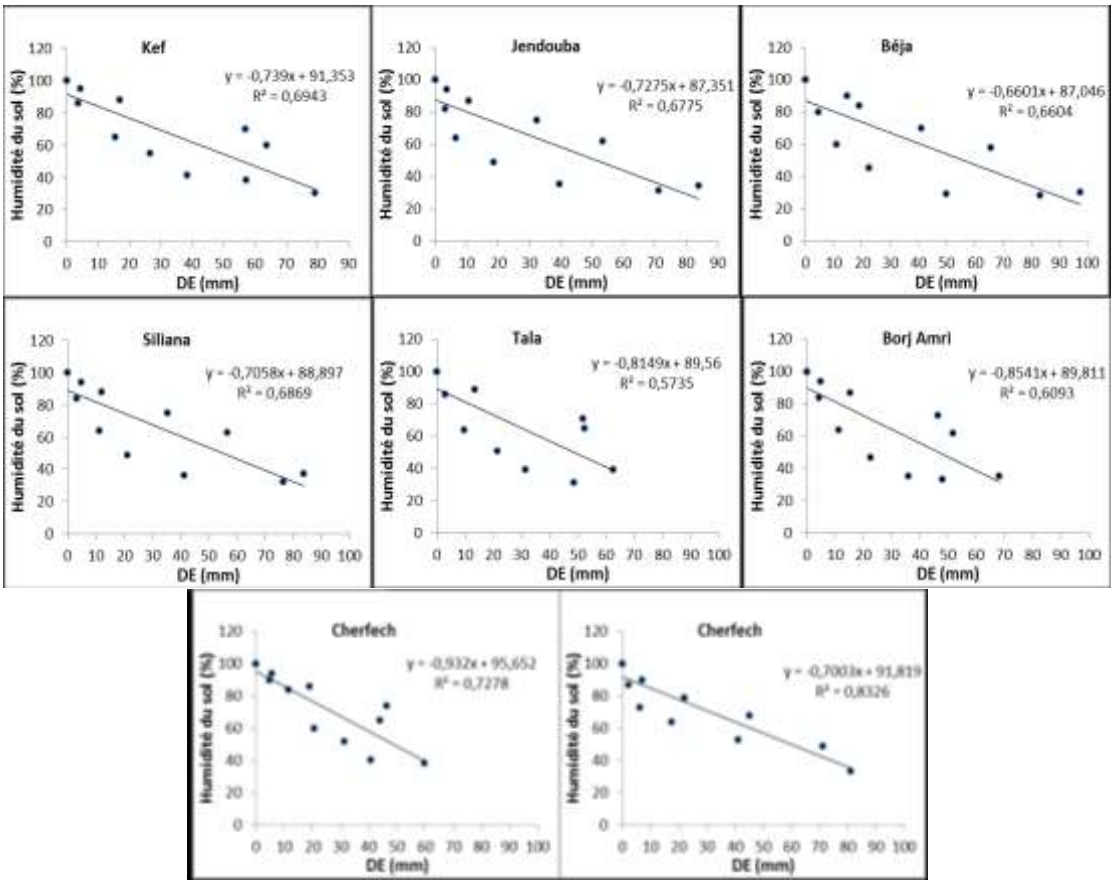


Figure 84 : Relation DE et humidité des sols dans les stations météorologiques du BV de la Mejerda (moyennes de la période 2000-2011)

Cependant, les stations des bassins intra-telliens (Jendouba, Béja et Siliana) connaissent une irrégularité importante. Par contre les stations de Cherfech et Ghar Melh situées dans la plaine de la basse Mejerda se distinguent par une faible variabilité. En comparant les deux aspects (hausse et baisse des niveaux de la DE) relatifs à l'évolution des cumuls mensuels de la DE, on constate que la baisse se fait lentement, à l'inverse la hausse présente des abrupts d'un mois à un autre. Cela traduit le fait que les différents facteurs déterminants de ce schéma ne gardent pas toujours le même poids. Ainsi, la période d'activité végétale est une période critique où la DE devient relativement plus dynamique. La phase d'arrière-saison (septembre-octobre-novembre) se qualifie par la diminution du déficit. Ceci est dû à la diminution des besoins en eau de la végétation et au démarrage de la saison des pluies (Hlaoui., 2006). À l'échelle spatiale, on peut noter, d'après la figure 83, que les stations de la rive gauche de Mejerda (Tala et Siliana) révèlent une variabilité moindre que celles situées tout le long de la vallée de Mejerda (Jendouba, Cherfech). Il ne fait pas de doute qu'une telle répartition dépend des conditions géographiques (le relief). Ainsi, l'écoulement rapide des vents dans les couloirs de la vallée de Mejerda d'une part et le réchauffement de l'air par les températures d'autre part contribuent à augmenter l'ampleur de l'irrégularité du niveau de la DE. Ailleurs, les versants du Nord de la Dorsale manifestent une variabilité moindre, ceci nous paraît en relation avec la régularité de l'occupation du sol sur toute l'année (sol nu ou prairie).

La figure 83 permet de suivre l'allure générale du déficit d'évaporation dans les stations météorologiques retenues. Les profils de la DE moyenne suivent une progression semblable à celle d'une sinusoïde. Ces figures montrent une saison déficitaire majeure en été et une autre plus au moins faible en automne et au printemps. Ainsi, l'été est marqué par un déficit compris entre 197 mm et 276,6mm, l'automne de 66,4 mm à 115,9 mm, et le printemps allant de 26,6 mm à 73,3 mm. On remarque ici nettement l'effet de l'absence des pluies en été et la présence de la réserve utile du sol héritée de l'hiver pour le printemps et la reconstitution progressive de cette réserve pendant l'automne. Cela laisse conclure que la végétation est soumise à un stress hydrique accentué en été et il est de moindre degré en automne et au printemps. Par ailleurs, à l'exception du mois de décembre, où le déficit peut atteindre 6 mm, le reste des mois de l'hiver se caractérise par un déficit nul dans toutes les stations. Cela est lié, d'abord, au fait de l'état de vernalisation de la végétation dont les besoins en eau sont quasi nuls, ensuite, les facteurs déterminants du pouvoir évaporant du climat ne sont pas significatifs durant cette période. Ici, on peut en effet déduire que la végétation en hiver ne souffre pas du stress hydrique et que le niveau de l'ETR est compensé par le niveau l'ETM. À l'échelle spatiale, des contrastes régionaux intéressants imprègnent la répartition géographique du régime mensuel du déficit d'évaporation. Ainsi, les stations situées sur les versants sud du B.V de Mejerda (Tala et Siliana) et les stations de la haute vallée de Mejerda se distinguent par des niveaux élevés du déficit, où le niveau maximal est observé à Tala au mois d'août 105,9 mm. Ce schéma est expliqué, premièrement, par la nature de l'occupation du sol et deuxièmement par l'intervention du relief apparait également dans le fond de la vallée Mejerda qui connait une élévation des niveaux de l'ETM, en particulier, et accélère les agents de l'évaporation en générale. Cependant, les stations des versants nord du B.V Mejerda (Béja) et la basse vallée de Mejerda se caractérisent par des niveaux mensuels du déficit d'évaporation faibles, dans la mesure où les valeurs peuvent atteindre 77,3 mm à Ghar Melh au mois d'août. De même, dans cette station le déficit nul gagne le mois d'avril à l'exception des autres stations. Cela est dû à l'effet rafraichisseur de la mer et les conditions environnementales, puisque la végétation est développée sur des sols argileux non filtrants en plus la proximité des surfaces humides qui sont d'une part chargent l'atmosphère en humidité et augmentent le taux d'humidité des sols (El Garouni., 1994).

En ce qui concerne les cumuls mensuels probables de la DE (l'évolution des niveaux mensuels cumulés) représentés sur la figure 85 on peut retenir des remarques suivantes :

- On perçoit, dans un premier temps, une augmentation remarquable de la DE au cours de l'année (année hydrologique). Au début de l'année le déficit commence par un niveau aux alentours de 40 mm et il pourrait atteindre des valeurs comprises entre 293,6 mm à Ghar Melh et 409,9 mm à Tala.
- Les profils des niveaux moyens cumulés de la DE gardent, pratiquement, la même allure dans toutes les stations. En effet, une augmentation assez lente jusqu'au mois de mars où les valeurs ne dépassent pas les 100 mm à l'exception de Tala (103,2mm), par la suite on assiste une croissance rapide dès le mois d'avril. Ceci s'explique, d'une part, par le cycle de développement de la végétation qui commence dès le mois de mars et d'autre part, le maximum de la DE aura lieu avec l'évènement de l'été.

- La variabilité la plus importante est observée dans les stations de fonds de vallées (Jendouba et Siliana) et les stations d'altitude (Tala). Ainsi, Jendouba et Siliana enregistrent des écarts-types respectivement de 103,5 mm et 96,3 mm, ailleurs, à Tala l'écart-type atteint 113,6 mm. La variabilité importante des stations de Jendouba et de Siliana est fortement exprimée par l'effet d'abri et le bilan thermique. Ces deux stations sont moins arrosées et se caractérisent par des températures estivales très élevées. Dans cette condition la croissance de la DE ne peut être que rapide. En ce qui concerne les stations d'altitude les facteurs advectifs (le vent) et radiatifs (rayonnement solaire) sont responsables de l'évolution rapide du déficit cumulé. En effet, la station de Tala, du fait de son altitude élevée (1020 m), est la plus venteuse et la quantité du rayonnement solaire reçue au sol devient plus important avec l'avènement de l'été. Ces deux facteurs entraînant, sans doute, une DE qui prend de l'écart assez rapidement.
- Les stations plus proches du littoral se distinguent par une variabilité moins importante (Cherfech 64,4 mm et Ghar Melh 55,6 mm). Cette allure est fonction de l'effet de la mer qui joue le rôle de rafraicheur du pouvoir evapotranspirant de l'atmosphère (des températures de l'air et des humidités relatives de l'air moins élevées en été sur la frange côtière qu'à l'intérieur).
- En dehors de la Station de Ghar Melh, les cumuls (Moy, Min et Max) de la DE entre le mois de mai et le mois d'août dépassent les 100 mm dans toutes les autres stations de la région. En outre, à partir du mois de juillet les cumuls de la DE dépassent les 200 mm mettant en évidence l'importance du climat thermique de l'été qui accentue énormément le stress hydrique de la végétation.

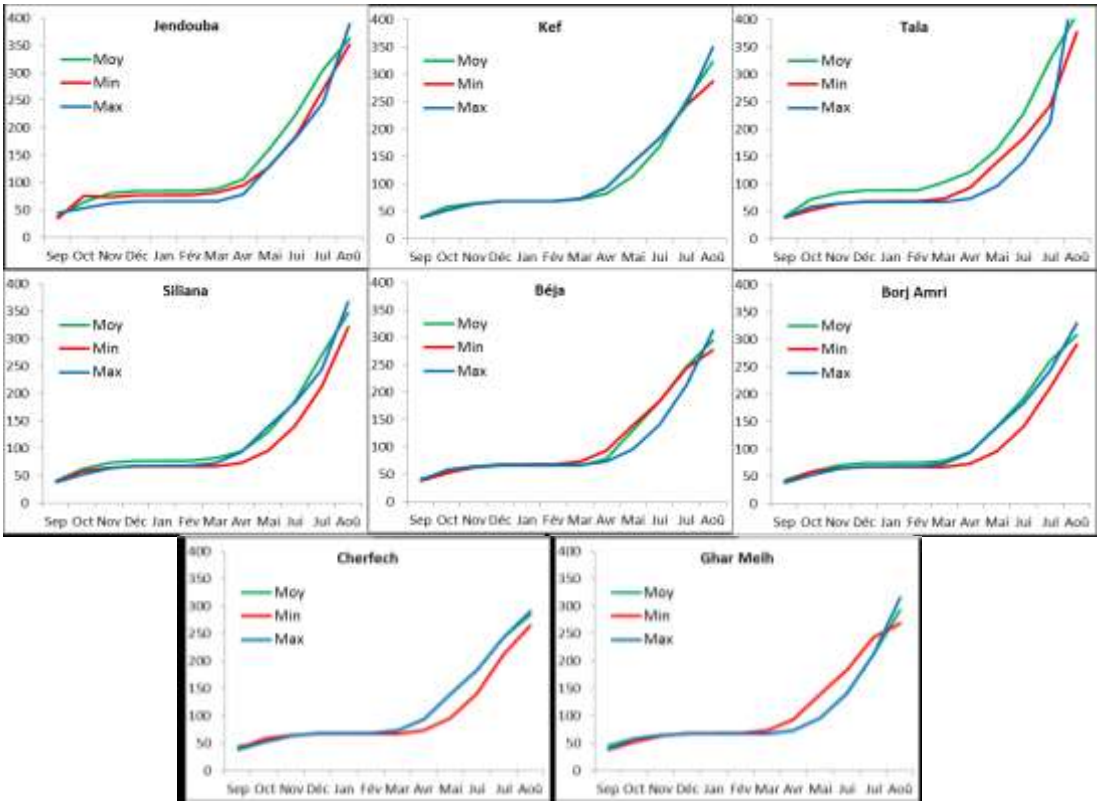


Figure 15 : Évolution des niveaux cumulés de la DE dans les stations météorologiques du BV de la Mejerda (2000-2011)

En somme, le suivi de la situation moyenne du déficit d'évaporation permet de *« présenter au mieux les variations des besoins en eaux des plantes selon les stades phénologiques »* (Lamy., 2013). La végétation dans le B.V de Mejerda subit un stress hydrique dès que l'écart entre l'ETR et L'ETM devient négatif. Ce stress devient assez élevé durant les mois de l'été. Le rythme de l'évolution du déficit d'évaporation n'est pas semblable entre les stations retenues. Le sud du BV de Mejerda et les fonds vallées se caractérisent par un rythme peu variable par contre les stations de la rive nord du B.V de Mejerda et le delta ont un rythme régulier. Il faut remarquer, cependant, que la méthode de suivi du DE par son niveau moyen (en millimètres) ne peut pas aboutir à des résultats comparables entre les valeurs des mois. En effet, il se peut que deux mois ayant une même valeur de DE ne soient pas forcément comparables par leurs niveaux de besoins en eau ou de stress hydrique chez les plantes. À titre d'exemple, le mois de novembre pour les stations du Kef et Cherfech, respectivement 12,2 mm/12,8 mm.

Conclusion

La déficience d'évaporation permet de cerner les besoins d'eau de la végétation afin d'obtenir une description du stress hydrique perçu par la végétation (Mjejra et *al*., 2015). Elle permet aussi d'offrir une visualisation régionale et dynamique du risque de la contrainte hydrique dans le BV de Mejerda. La cartographie a abouti d'appréhender la variation spatiale du stress hydrique dans la région et d'identifier des secteurs à risque. Ainsi, les secteurs abrités et les hautes terres de Tala sont les plus sensibles à cette contrainte hydrique. Par contre les massifs de la Kroumirie, se présentent comme des secteurs humides. La DE est marquée aussi par une variabilité inter-mensuelle qui s'accentue durant les mois d'été. Ces mois révèlent l'importance des écarts par rapport à la moyenne et par conséquent une forte probabilité de persistance de la contrainte hydrique.

L'approche de la DE en termes de moyenne représente un indicateur synthétique pour cerner l'état hydrique de la végétation à l'échelle régionale. Elle a montré que le climat du BV de Mejerda s'individualise par une DE qui augmente dès qu'on quitte les massifs de la Kroumirie et avec la fin de la période janvier-février. Mais, une meilleure traçabilité du stress dépend fortement d'une carte d'occupation des sols plus détaillée ainsi qu'une carte de la réserve utile des sols plus fine (Richard J-B., 2011). Ceci permet d'analyser les épisodes secs au regard de la variabilité de la DE et l'évolution du stock d'eau dans le sol : assèchement des sols l'été et recharge durant l'hiver (Lamy., 2013).

HUITIEME CHAPITRE : DEFICIENCE D'EVAPORATION : TYPOLOGIE, INTENSITE ET FREQUENCE

La DE se voit à travers un manque d'eau qui peut entraîner un stress hydrique pour la végétation. Bien que cette définition soit simple, elle pose une difficulté majeure à savoir le niveau de déficit à partir duquel on peut dire qu'il y a de stress. L'importance de la répartition interannuelle de la DE incite à faire une typologie à la base des niveaux mensuels de cette déficience. Sur cette base, nous pouvons quantifier la durée de chaque épisode de stress. En outre, la variabilité interannuelle de la DE nécessite de poser le problème en termes d'intensité et de fréquence. Ceci permet de souligner l'irrégularité dans le temps du stress hydrique des plantes et cerner au mieux leurs particularités. Pour ce faire, des approches complémentaires du suivi du stress hydrique sont abordées à ce propos :

- Une typologie de la DE est présentée dans un premier temps. Ceci permet d'avoir une vision la plus exhaustive possible sur les variantes climatiques dans le BV de Mejerda ;
- Ensuite on s'intéresse à l'évolution de l'intensité et à la fréquence des épisodes secs ou humides, afin de mettre en évidence l'ampleur du stress hydrique dans la région étudiée.

8.1. Méthodologie

L'étude de la typologie de la DE nécessite avant tout de fixer les seuils à prendre en compte pour définir les moins selon leurs niveaux de déficit. Mais, il faut d'abord formuler les hypothèses de la démarche.

Premièrement, tant qu'il y a de l'eau dans la RFU (réserve facilement utilisable), c'est-à-dire que la réserve reste supérieure à la RDU (réserve difficilement utilisable), et tant que la température de l'air ne dépasse pas 30°C et ne descend pas au-dessous de 9°C, la végétation sera théoriquement parlons, en évapotranspiration maximale (Kaicun W. et *al.,* 2006). On considère que la plante reste à son niveau de consommation optimal et elle est convenablement alimentée en eau lorsque l'état hydrique du sol lui permet d'évapotranspirer en ETM (Lecarpentier., 1975). La plante pourra donc répondre à la demande climatique, on aura ainsi la relation suivante :

$$ETR = ETM$$

Dans ce cas, un mois pleinement humide (Henia., 1993) où la végétation ne souffre pas d'un stress hydrique, en d'autres termes, la plante est dans une période favorable (état de "confort hydrique"). En effet, le déficit d'évaporation est nul et l'eau disponible n'est pas en déficit par rapport à la demande évaporative.

Deuxièmement, si la RFU s'est vidée ou si les conditions climatiques (températures trop fortes ou trop fraîches) ne sont pas favorables à la végétation, celle-ci ne sera plus en régime d'évapotranspiration maximale mais en évapotranspiration réelle. Cette évapotranspiration réelle sera inférieure à une évapotranspiration maximale, la plante va fermer partiellement ses stomates et elle souffre en revanche du manque en eau dès que les conditions obligent de passer en ETR (Lecarpentier., 1975). Ici, le déficit est positif et caractérise le fait que les

précipitations sont insuffisantes pour reconstituer au moins partiellement le stock d'eau dans le sol. On va alors considérer la relation suivante :

$$ETM > ETR$$

Dans ce cas, la végétation est soumise à un stress hydrique qui prend de l'ampleur en parallèle à l'augmentation du niveau de l'ETR. À partir des indices proposés par (Mounier., 1977, Dubreuil., 1994, Pindard 2000 et Lamy., 2013) auxquels nous avons apporté des calibrages[58], compte tenu du contexte climatique du B.V de Mejerda[59], et les travaux réalisés par les chercheurs de l'Institut National de la Recherche Agronomique de Tunisie (INRAT ; Radhouane L., 2006 et Hammami O., 2010) et Mjejra et *al.*, 2015), nous avons défini :

- un mois subhumide où la déficience d'évaporation enregistre des faibles valeurs qui ne dépassent pas 15 mm par mois à raison 0,5 mm par jour dans une situation où la réserve utile n'est pas reconstituée. C'est-à-dire, hors les mois où l'ETR égale à l'ETM (Hammami 2010 et INRAT 2009). Ceci est pour un sol à une réserve utile transférable égale à 80 mm et indiqué généralement pour des sols alluviaux (Yankovitch., 1956).
- un mois sub-sec :(15 DE < 50 mm/mois) au cours duquel commence la sollicitation de la réserve utile ; à ce seuil de déficience, l'épuisement de la réserve utile devient plus important
- un mois sec : (50 DE < 80 mm/mois) où la réserve utile commence à atteindre ses valeurs minimales ; la sécheresse, très prononcée, se caractérise par des fentes de dessiccation sur le sol et une perte maximale de feuilles chez les arbres ;
- un mois très sec : (DE >= 80 mm/mois) où l'eau dans le sol est difficilement extraite par les racines des plantes.

Du reste, le seuil du DE indiquant la contrainte de la sécheresse varie selon les types des plantes. C'est pour cette raison que nous avons considéré que la sécheresse des plantes aura lieu dès que le DE dépasse 15 mm par mois (Mejerda et *al*., 2015). Ce seuil a été appliqué pour la culture de sorgho dans la délégation de Fernana à environ 17 km au nord de la région de Jendouba (Radhouane., 2006).

L'intensité de la déficience d'évaporation permet d'apprécier la persistance des épisodes secs et de valoriser le taux de satisfaction des besoins en eau de la plante (Alain P., 2000). En outre, elle désigne le rapport de la consommation en eau de la végétation (ETR) aux besoins en eau de celle-ci (ETM). A ce propos, il existe plusieurs formules pour apprécier et classer l'intensité de la DE, nous citons les plus proches de l'objectif de ce travail :

- Taux de satisfaction en eau de la végétation (Forest et *al*., 1991; Benoît et *al*., 2012), est également calculée par le rapport :

$$\frac{ETR}{ETM} * 100$$

[58] Nous avons modifié les seuils de la typologie des mois pour s'accorder avec les variantes climatiques dans la région étudiée en se basant sur les caractéristiques de la réserve utile, notamment, son niveau et la durée de sa reconstitution. Car les seuils utilisés ont été appliqués dans des régions humides par contre le BV de la Mejerda est marqué relativement par l'aridité. Une autre rectification au niveau de la terminologie où nous avons changé le terme sub-sec par semi-aride.

[59] Voir également : Omrane Hammemi,. 2010 ; Jean Collinet., 2002 et Habib Ben Hassine, *al.,* 2012, Faycel Ben Dakhlia 1987.

Ce rapport nous renseigne sur le diagnostic de l'état hydrique de la végétation, c'est-à-dire le taux de sa satisfaction en eau. En fait, on considère une valeur tendant vers 100% traduisant un état optimal de satisfaction d'eau par contre une valeur tendant vers 0 traduisant un stress hydrique (Kaicun et *al.*, 2006). La classification de la DE est donnée dans le tableau suivant :

Tableau 37: Classification de l'intensité de la déficience d'évaporation

Catégories de satisfaction	ETR/ETM*100 (%)	Humidité du sol moyenne (%)
Très favorable	> 85	> 75
Favorable	75 à 85	60-75
Stress	55 à 75	45-60
Stress sévère	< 55	< 45

Sources : Forest., al 1991et Benoît 2012

- Le quotient évapotranspiratoire : Borgne (1990) a montré que le rapport ou « le quotient évapotranspiratoire » est défini comme un véritable « indice bioclimatique » qui nous renseigne sur le taux de couverture des besoins en eau de la végétation. Ce quotient est calculé avec la même formule de l'intensité de la DE. Il a indiqué qu'en « *climat humide, il est proche de 100 % ; par contre, il est voisin ou égal à zéro en climat aride* ». En effet, entre ces deux extrêmes peuvent être classés les différents climats intermédiaires et ce à partir des seuils suivants :

Tableau 18: classification bioclimatique selon le quotient évapotranspiratoire

Bioclimat	quotient évapotranspiratoire (%)	Nombre de mois où les besoins en eau de la végétation sont satisfaits
Aride	< 5	0
Semi-aride	5 à 20	0
Semi-aride à subhumide	20 à 40	1 à 4 mois
Subhumide à humide	40 à 60	4 à 6 mois
Humide	60 à 80	6 à 8 mois
Hyper-humide	80 à 100	9 à 12 mois

Source : in. Richard et al., 1990

- L'intensité du manque en eau de la végétation : Aghrab (2005) propose de déterminer l'intensité du manque en eau de la végétation par le calcul de la fraction du déficit hydrique réel (FDHR)60, suivant le rapport suivant :

$$\mathbf{FDHR} = \frac{\mathbf{ETR}}{\mathbf{ETM}} * \mathbf{100}$$

Ceci a permis de simuler la probabilité de la consommation réelle d'eau par les plantes. À partir de cette fraction le déficit hydrique réel est classé en 4 classes :

- ✓ Classe 1 = Déficit hydrique faible lorsque la fraction de DHR est supérieure à 70% ;
- ✓ Classe 2 = Déficit hydrique modéré lorsque la fraction de DHR est entre 50% et 70%;
- ✓ Classe 3 = Déficit hydrique élevé lorsque la fraction de DHR est entre 30% et 50%;
- ✓ Classe 4 = Déficit hydrique Très élevé lorsque la fraction de DHR est inférieure à 30%.

[60] Chez d'autres chercheurs on parle de la fraction d'évaporation ou bien le potentiel de l'évapotranspiration (Priestly et Taylor 1979).

Au total, toutes ces classifications mettent en évidence le taux de couverture de la consommation réelle en eau de la végétation (ETR) à son besoin optimal (ETM).

À la base de ces différents indices et leurs classifications et pour les besoins de ce travail, il convient d'admettre que l'intensité de la déficience d'évaporation (rapport entre ETR/ETM en %) a permis de préciser les catégories des mois durant l'année dans le BV de Mejerda suivant le tableau ci-dessous :

Tableau 39: Classification de l'intensité du déficit d'évaporation dans le BV de la Mejerda

Catégories des mois	ETR/ETM*100 (%)	Humidité du sol moyenne (%)
Mois humide	≥ 80	> 75
Mois sub-sec	60 à 80	60-75
Mois sec	40 à 60	40-60
Mois très sec	< 40	< 40

Sources : Forest., al 1991, INRAT., 2009 et ; Benoît 2012

En effet, nous avons utilisé les quantiles (la série est subdivisée en 5 classes : 20, 40, 60, 80 et 100%) pour en déduire une typologie des mois qui s'appuie sur l'intensité du déficit d'évaporation en %. « *La valeur de ces paramètres est, en effet, communément utilisée en climatologie (étude des séries pluviométriques sur les cartes climatiques détaillées, par exemple)*» Dubreuil 1996.

Toutefois, le déficit hydrique traduit l'état réel de sécheresse de la surface du sol. Il permet aussi de cerner les besoins en eau de la végétation. En effet, ce sont deux indices (DHR et FDH) qui peuvent être dérivés de l'indice du déficit d'évaporation puisqu'ils dépendent du paramètre climatique de l'évapotranspiration. C'est pour ces raisons que nous avons utilisé les seuils proposés ici pour identifier les typologies du déficit d'évaporation dans le BV de Mejerda.

Dans ce travail, on a utilisé le critère des taux de l'humidité du sol moyenne (cf. 6.1.1) au lieu des valeurs de la réserve utile, et ce en raison de la rareté de l'information sur ce paramètre dans le B.V Mejerda. En fait, on considère comme une situation très favorable correspond d'avoir une réserve facilement utilisable supérieure à 80 mm (Hammemi., 2010). À partir de là, le dessèchement se produit, le stock d'eau dans le sol s'atténue linéairement jusqu'à se vider complétement et le sol devient sec. Un raisonnement analogue permet de définir les seuils de l'humidité du sol par rapport à l'intensité du déficit d'évaporation. En effet, l'humidité du sol est supérieure à 75% tant que la réserve utile est facilement évaporable (Simonneaux et *al*., 2009) et elle décroit en suite linéairement pour atteindre la valeur de zéro lorsque la réserve est épuisée.

Ainsi, la détermination des périodes déficitaires ou excédentaires et la mise en évidence de leur intensité peuvent être intéressantes dans la gestion de l'irrigation et la production végétale. Le rapport est compris entre zéro et 100%, lorsque sa valeur est supérieure ou égale à 50% on parle d'une période favorable, dans la mesure où « *la satisfaction de la moitié de l'ETM permet alors à la plante de se développer* » (Morel., 2004). L'évapotranspiration des plantes n'atteint le niveau de l'ETM que si elles sont au stade de développement maximal de leur surface foliaire et si elles sont correctement alimentées en

eau, c'est ainsi qu'en début de cycle végétatif on a ETR égale à 20% à 30% de l'ETM. La limite de la vie végétale est prononcée lorsque cette valeur tend en dessous de 10% (Tabeaud., 1980). Cependant, l'étude de la fréquence (ou occurrence) de chaque catégorie de mois retenus dans ce travail, permet de déterminer la période à de risque de stress. Cela nous permet, aussi, d'identifier la saison humide et la saison sèche dans chaque secteur du BV de Mejerda.

En somme, cette méthode montre des inconvénients, exprimés par (Benoît et *al.,* 2012) *« une faible adaptabilité dans des zones subhumides et humides nécessite des simulations du bilan hydrique dont l'exploitation n'est pas toujours aisée pour les usagers ».* Toutefois, la chaine des prétraitements et de traitements de la déficience d'évaporation permet de suivre son niveau moyen et son intensité. Ces deux éléments d'analyse nous permettent de cerner le degré de contrainte auquel la végétation est soumise. Bien que cette contrainte n'apparaît pas de la même hiérarchie dans les différents secteurs du BV de Mejerda.

8.2. Typologie de la déficience d'évaporation

8.2.1. Classification de la déficience d'évaporation en termes moyenne

Pour aller plus loin dans l'analyse, une typologie a été dégagée pour suivre le déficit d'évaporation dans quelques stations du B.V de Mejerda sur la période étudiée (2000-2011). Cette typologie appliquée ici au territoire tunisien a été inspirée des travaux sur le territoire français (Mounier., 1977, Dubreuil., 1994, Pindard 2000 et Lamy., 2013) et le territoire Tunisien (Henia., 1993, Radhaoune., 2006 et Hammemi., 2010). Ainsi, la figure 86 relative à la typologie de la situation moyenne de la DE laisse apparaître que la saison sèche s'allonge jusqu'à 8 mois (du mois d'avril jusqu'à mois de novembre) et la saison humide dure de 4 à 6 mois (décembre-janvier-février-mars). Cette situation est due, sans doute, à l'effet de la saison des pluies en Tunisie et par conséquent la recharge hivernale de la réserve du sol durant les mois de l'hiver. Dans cette condition on parle d'une période favorable où les besoins en eau des plantes sont suffisants, du fait que les niveaux de la DE sont nuls. Par contre, durant le reste de l'année les pluies deviennent rares jusqu'à s'annuler en été, ce qui entraîne l'épuisement de la réserve utile et donc la DE devient assez remarquable où les valeurs dépassent 70 mm en moyenne. Ici, la végétation souffre d'un stress hydrique persistant. En revanche, la manifestation de la sécheresse dans le BV de Mejerda prend deux allures différentes. La première concerne les mois plus secs qui tentent à se multiplier au fur et à mesure qu'on se dirige vers le Sud. La deuxième se rapporte aux mois les plus humides qui s'accroîtront en allant de l'intérieur vers le littoral. Ceci révèle que le stress hydrique est plus occurrent dans les secteurs sud de la région. Mais dans la frange littorale il devient moins important. Enfin, les stations retenues sont classées en deux groupes. Le premier intéresse les stations avec mois très secs (Jendouba, Kef, Siliana, Tala et Borj Amri). Ici, le stress hydrique est très prononcé, notamment, durant la période estivale, dans la mesure où la déficience dépasse le seuil de 80 mm par mois. Le deuxième concerne les stations sans mois très secs (Béja, Cherfech et Ghar Melh). Ces stations sont moins vulnérables à la sècheresse estivale car les sols conservent au moins une partie de la réserve utile sous prétexte de la remontée capillaire ou l'a proximité des surfaces humides.

Toutefois les épisodes de la DE sont regroupés en cinq classes différentes et ce à partir de ses niveaux moyens mensuels (cf. figure 86) :

- Les mois pleinement humides : concernent généralement les mois (janvier et février) dans toutes les stations, à l'exception de Béja et Ghar Melh qui peuvent s'allonger au mois de mars. Au cours de cette période, la DE est nul dans la mesure où l'ETR couvre totalement l'ETM et la réserve utile est à son maximum. Dans ce cas, la végétation est dans une situation de « confort hydrique » dont elle peut survivre sans risque de stress (Ben Dakhlia., 1997).
- Les mois sub-humides intéressent les mois à faible DE (novembre, décembre et avril). Cet épisode touche, essentiellement, la phase de semis pour les cultures annuelles et la phase d'arrière-saison pour les plantations arborées (sans tenir compte du mois d'avril). À cet égard, les besoins en eau de la végétation ne sont pas élevés c'est pour cette raison que le niveau de la DE est inférieur à 15 mm. Dans ce cas, la végétation supporte ce niveau de manque d'eau car la réserve utile peut alimenter encore les plantes. Ici, la réserve utile transférable est environ 80 mm dans la profondeur de 60 à 80 cm pour les sols alluviaux (Ben Hassine., 2002).
- Les mois sub-secs, touchent, essentiellement, les mois de septembre, octobre et mai dans la majorité des stations retenues. Le niveau de la DE oscille entre 15 mm et 50 mm, il va sans dire qu'à ce niveau les besoins en eau de la végétation sont insuffisantes, surtout les plantations annuelles, dans la mesure où elle ne peut pas prélever de l'eau car la réserve utile a été entièrement consommée (Mounier., 1977).
- Les mois secs, se rapportent essentiellement le mois de juin et dans quelques stations ils peuvent s'installer aux mois de septembre et août. Le niveau de la DE est compris entre 50 mm et 80 mm. En effet, la réserve utile est totalement épuisée et la végétation souffre d'un stress hydrique assez important. Il va sans dire que ce niveau de la DE entraîne le flétrissement des plantations annuelles et des épisodes d'irrigation sont indispensables.
- Les mois très secs, intéressent les mois de juillet et août pour les stations situées à l'intérieur du BV de Mejerda. Par contre, les stations de la basse vallée (Cherfech et Ghar Melh) ne sont pas intéressées par cette variante climatique. Ici, le niveau de DE dépasse 80 mm où les fonctions vitales des plantes annuelles sont bloquées par contre les activités végétales des plantations arborées se ralentissent. Dans ces conditions, l'ETR ne couvre même pas l'un tiers de l'ETM et l'eau dans le sol est difficilement extraite par les racines des plantes.

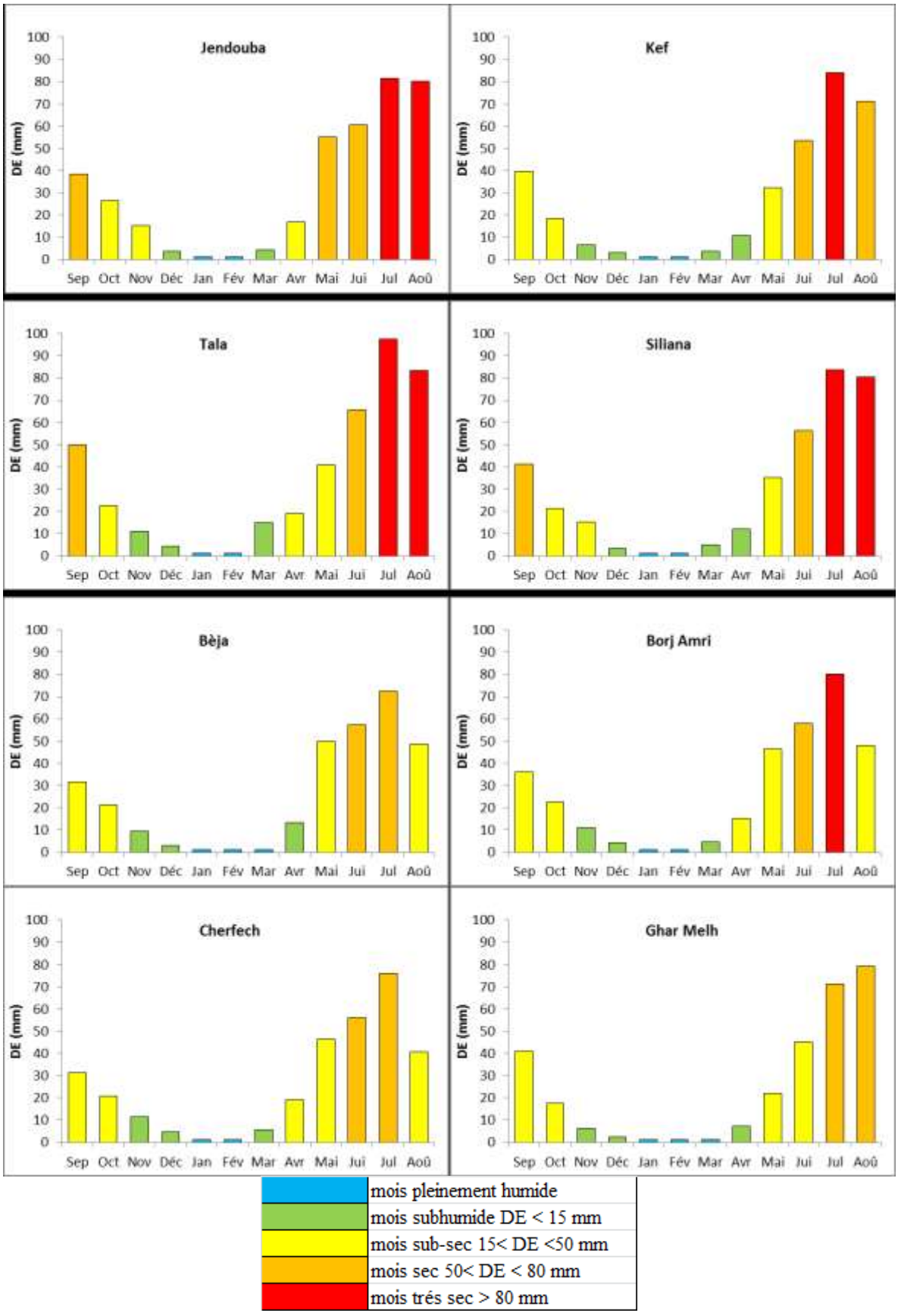


Figure 86: Typologie des mois selon les niveaux moyens de déficience d'évaporation (mm) dans les stations météorologiques du BV de Mejerda (la moyenne de 2000 à 2011)

Au total, l'avantage de l'utilisation de la méthode des valeurs moyennes c'est qu'elle donne une idée synthétique sur la typologie de la DE, ainsi que l'évolution du stress hydrique durant la saison agricole. Mais elle présente aussi des inconvénients. En effet, les valeurs moyennes présentent un vison simplifié et ne permet pas de souligner les contraintes potentielles du déficit hydrique, malgré la diversité climatique et géographique de la région. Il est de même pour la durée de chaque classe des épisodes retenus. C'est-à-dire, donc, la méthode des niveaux moyens ne peut pas aboutir à des résultats assez représentatifs pour le suivi de la variabilité interannuelle et elle tente à laisser la variation spatiale de la DE. Pour résoudre ce problème nous avons étudiée la DE dans sa structure fréquentielle. Au moins, un suivi précis des séquences sèches et humides est possible, et ce à partir de la DE mensuelle sur toute la période étudiée (Dubreuil., 1996, Wilhelmi., 2002 et Binoît., 2012).

La figure 87 en damier présente la fréquence (en pourcentages) de la DE mensuelle établie pour toutes les stations dans le BV de Mejerda et pour la période de 2000 à 2011. Les mois secs sont plus fréquents que les mois humides, ils occupent environ 56,8 % du total de la période étudiée. Sur toute la période étudiée la saison sèche s'étend sur 6 à 8 mois. Elle peut commencer plus tôt, au mois d'avril à Tala, ou plus tard, au mois de mai à Ghar Melh. Par contre l'achèvement de cette saison est effectué au mois d'octobre ou novembre. L'intensité du DE se distingue par un rythme très variable pendant les mois d'automne et elle est régulière durant l'été. Cette variation est due à la manifestation de types de temps perturbés sur le BV de Mejerda au cours de l'automne. Il va sans dire que les besoins en eau de la végétation n'est assuré, en général, que durant les mois d'hiver. Le BV de Mejerda se caractérise, dans la plupart des cas, comme une région à mois sub-sec dans la mesure où cette nuance occupe 29,5 % du total (cf. tableau 40). Les épisodes des mois très secs sont les moins fréquents avec une moyenne de 11,6 %. Cependant, la nuance subhumide occupe la deuxième place avec un taux de l'ordre de 23,3 %.

Cependant, l'examen des fréquences peut montrer différents groupes de stations :

- Les stations de fonds des vallées (Jendouba : la vallée de Mejerda et Siliana : dépression de Siliana) : ces deux stations se caractérisent par la fréquence la plus élevée des mois très secs, respectivement 17,4 % et 18,2 %, mais aussi la plus faible occurrence des mois pleinement humides de l'ordre deux 13,6 % et 15,9 %. Dans cette condition la végétation ne bénéficie pas de la recharge hivernale de la réserve en eau du sol, puisque les écarts entre l'ETR et l'ETM prennent de l'ampleur progressivement et même dès le mois d'avril. En outre, elle est exposée à un niveau de la DE très sévère, provoquant un stress hydrique pour les plantes et qui devient pénible durant l'épisode estival. Toutefois, il y a lieu de remarquer que cette nuance est liée, d'abord, à l'effet de canalisation des vents le long de la vallée de Mejerda, ensuite, à l'aide de l'effet de réchauffement par les températures estivales dans les bassins enclavés et enfin à travers l'effet *« de Foehn dont l'occurrence est facilité par le massif des Khémirs et en présence d'une prédominance du flux d'ouest »* (Bousnina A., 2000). Ceci accélère le pouvoir évapotranspirant de l'atmosphère et affecte le bilan hydrique et par suite les disponibilités en eau.
- Les stations d'altitude (des plateaux du Haut Tell) : en particulier les stations du Kef et de Tala. Elles se distinguent par une période sèche de 6 à 7 mois allant de mai à octobre et/ou novembre. Ce secteur témoigne du caractère de dégradation du climat dans la Tunisie

tellienne. En allant d'avantage vers le sud, on remarque que la fréquence des mois humides diminue au détriment des mois sub-secs. C'est ainsi qu'au Kef on enregistre 25 % des mois humides et 26,5 % mois sub-secs et à Tala située plus au sud respectivement 21,2 % et 28,8%. En effet, les hautes terres de Tala sont caractérisées par des sols nus et en l'absence du couvert végétal, le taux de la transpiration diminue et l'évaporation des sols devient élevée. De plus, la capacité de rétention en eau des sols est faible, ce qui accentuera la vulnérabilité de ce secteur à la sècheresse.

- Les stations littorales : Ghar Melh (située à proximité de Lagune de Ghar Melh) appartient à ce type de stations. Cette station connaît une période humide régulière qui s'étale sur 5 mois (de décembre au mois d'avril), une période sèche fixe qui s'installe sur 5 mois (de juin au mois d'octobre) le reste des mois (novembre et mai) sont tantôt humides tantôt secs. D'ailleurs, la station de Ghar Melh enregistre le plus faible taux des mois très secs (3,8 %) et le taux élevé des mois pleinement humides (28,8 %) dans l'ensemble de la région. Cette position de la saison humide est liée à l'effet de la mer qui retarde le rafraîchissement des températures hivernales jusqu'aux mois printaniers et par suite le flétrissement de la végétation n'aura lieu qu'avec l'avènement de l'été. Par contre, la courte saison sèche est attribuable au ralentissement de l'épuisement du stock d'eau dans le sol et une évaporation moins active.
- Les stations de versant (versant de la Kroumirie) : elles sont représentées par la station de Béja. Cette station s'individualise par une symétrie entre la durée de la période humide et la période sèche. En effet, la saison humide s'étale sur 6 mois de novembre à avril et la saison sèche s'étale de mai à octobre. Elle occupe la deuxième place, après Ghar Melh, en termes de pourcentage des mois pleinement humide de l'ordre de 22,7 %. Cependant, il faut préciser que la station de Béja bénéficie de sa situation géographique sur les versants les plus arrosées du BV de la Mejerda. Il en résulte un stock d'eau dans le sol très important et un couvert végétal assez dense retarde le dessèchement des sols car il conserve de l'humidité (Cosandey et *al*., 2012). Cette station témoigne un climat humide dans les secteurs de la rive gauche du BV de la Mejerda et par suite moins vulnérable au stress hydrique.

Tableau 40: Occurrence (% du nombre total des mois) de la typologie des mois dans les stations météorologiques du BV Mejerda (2000-2011)

	Mois pleinement humide (%)	Mois subhumide DE < 15 mm (%)	Mois sub-sec 15< DE <50 mm (%)	Mois sec 50 < DE < 80 mm (%)	Mois très sec > 80 mm (%)	Total (%)
Jendouba	13,6	26,5	25,0	17,4	17,4	100
Kef	21,2	25,0	26,5	13,6	13,6	100
Tala	16,7	21,2	28,8	15,2	18,2	100
Siliana	15,9	23,5	25,0	17,4	18,2	100
Bèja	22,7	24,2	32,6	15,2	5,3	100
Borj Amri	19,7	20,5	34,1	14,4	11,4	100
Cherfech	18,9	23,5	37,1	15,2	5,3	100
Ghar Melh	28,8	22,0	29,5	15,9	3,8	100
Moyenne	19,7	23,3	29,8	15,5	11,6	100

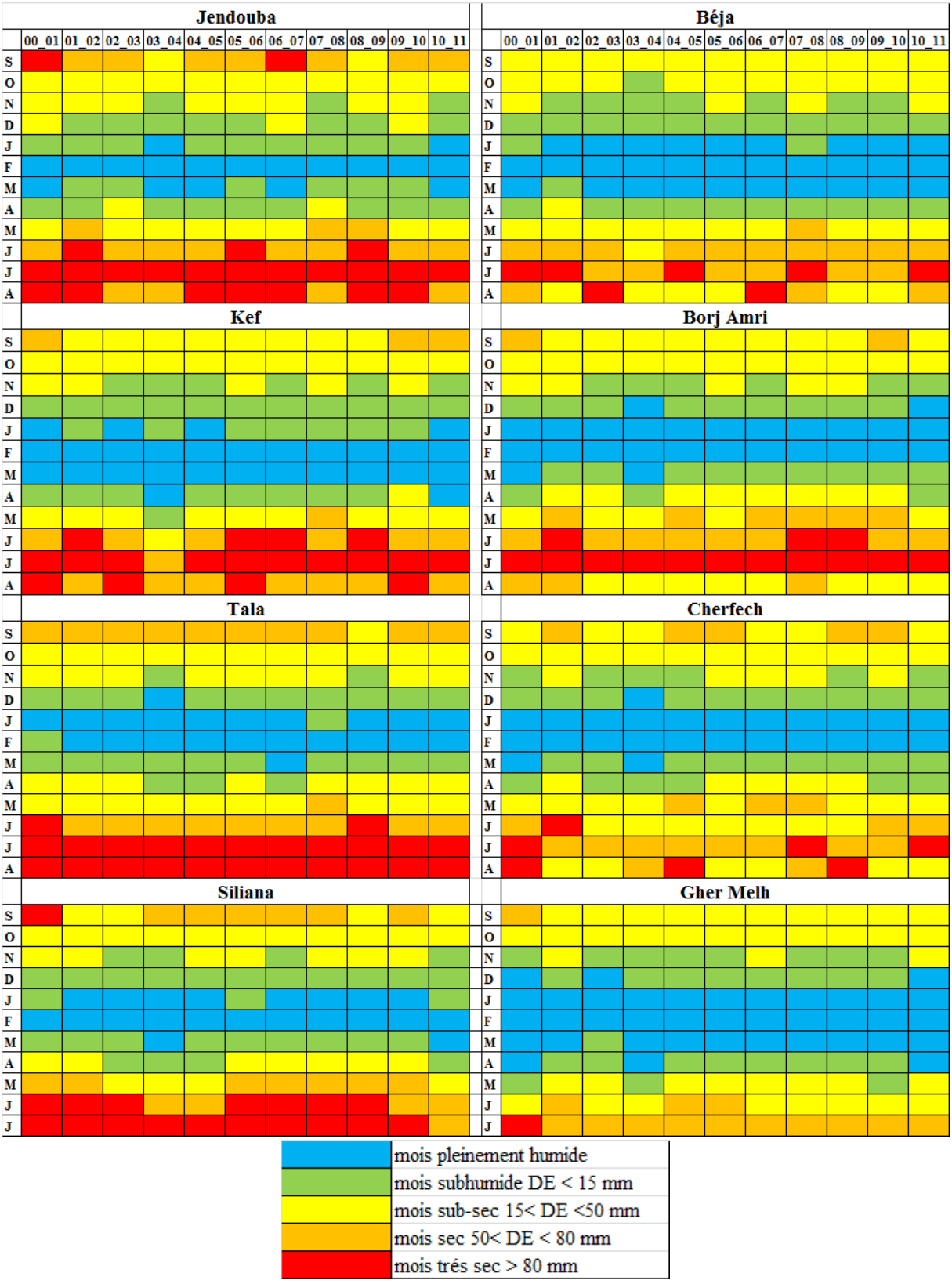


Figure 87 : Typologie du déficit d'évaporation mensuel (mm) dans les stations météorologiques du BV Mejerda (2000-2011)

En somme, ces nuances stationnelles significatives des fréquences mensuelles des épisodes humides et sèches dans le BV de Mejerda, présentées ci-dessus, nous permettent de mieux comprendre la répartition géographique du DE. Cette répartition ainsi que ses facteurs fonctionnels (radiatifs, relief et l'effet de la mer) permettent de dégager des allures : la première met en opposition les versants nord et les versants sud du BV Mejerda. Ici la vallée du cours d'eau de oued Mejerda s'impose comme une véritable limite de la persistance de la DE. La deuxième se résume à l'opposition de l'intérieur et le littoral. De même, ici, le fossé de la plaine de Nefza, entre la Kroumirie et les Mogods, et qui s'installe au niveau de la moyenne Mejerda se présente comme une limite de la variabilité de la fréquence de la DE. Du reste, la méthode de classement des niveaux mensuels et l'étude fréquentielle de la DE ont permis de conclure que les stations abritées sont les plus vulnérables à la sécheresse estivale par contre les stations littorales sont les moins vulnérables.

8.2.2. La déficience d'évaporation en fonction de l'occupation du sol

Les résultats présentés dans ce paragraphe concernent la DE pour cinq sites à différentes occupation-utilisation (sol nu, cultures annuelles, prairies et plantations arborées) et qui sont représentatives du BV de la Mejerda. L'objectif est de cerner, au mieux, la réponse de chaque occupation du sol aux conséquences de la DE. La figure 88 présente les cinq sites choisis. Ces points de grille sont également choisis de façon à avoir une occupation du sol agricole diversifiée et la végétation naturelle. Le choix de ces points de grille de 1km de côté, s'est basé sur la régularité de l'occupation du sol durant la période étudiée (2000 à 2011) de plus ils représentent la diversité topographique, agro-climatique et environnementale du BV de la Mejerda (cf. tableau 28).

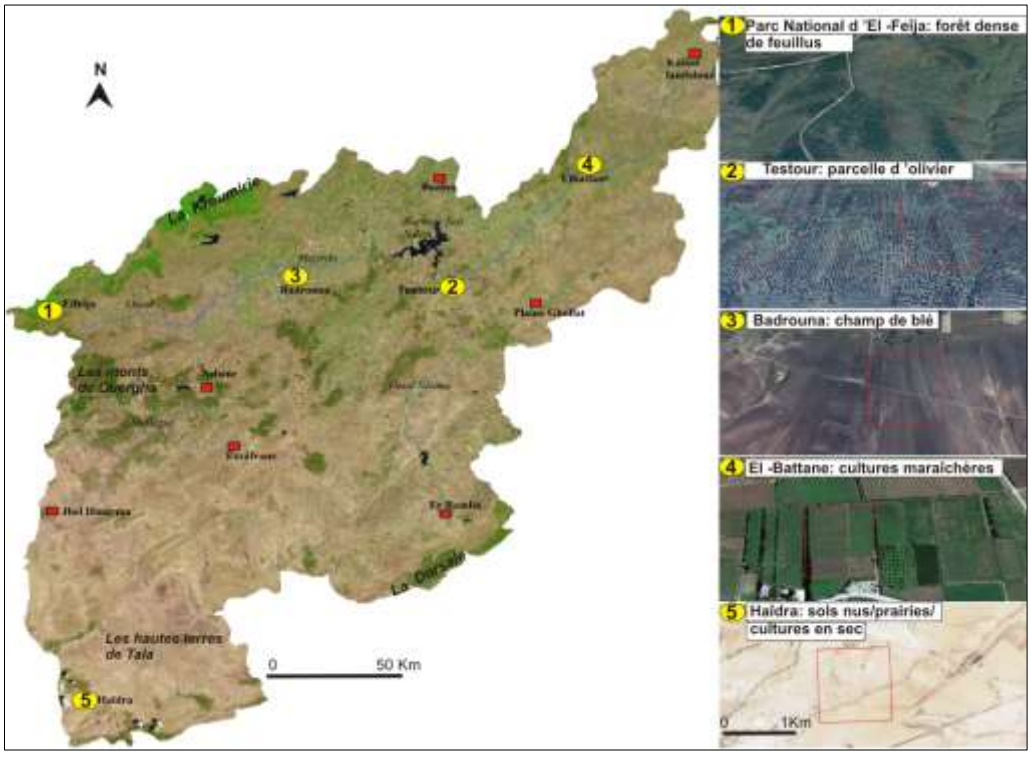


Figure 2: Localisation des sites d'étude de la DE selon la variété de l'occupation du sol (NB : les extraits Google Earth ont été pris d'altitude de 2 km)

La figure 89 laisse apparaître que l'évolution annuelle de la DE pour les différentes occupations des sols se caractérise par une allure semblable, un minimum en hiver et un maximum en été, dans la mesure où les valeurs de la DE oscillent entre zéro mm et 94,3 mm. Le régime mensuel permet de suivre l'aspect du DE au cours des différentes phases de l'activité végétative, il s'en dégage pour l'occupation du sol arboré :

- Au cours de la phase initiale (février et mars) la DE des arbres est nulle dont les besoins en eau sont satisfaits. Ceci s'explique d'une part *« par la faiblesse relative des besoins en eau de l'arbre au cours de cette période »* et d'autre part *« par l'existence d'une RU dans le sol, héritée de l'hiver et permettant de couvrir avec l'apport pluviométrique les besoins de l'arbre* » Hlaoui Z., 2006.
- Pendant la phase de développement (Avril, mai et juin) la DE augmente progressivement pour atteindre 34,9 mm pour la forêt des chaînons et 60,5 mm pour l'olivier soit respectivement 18,6 % et 31,5 % des besoins en eau. Cela vient du fait que les arbres demandent plus d'eau au fur à mesure que la RU se vide et le rythme de développement s'accélère.
- Durant la phase de mi-saison (juillet –août) les totaux de la DE continuent à augmenter et dépasse les 80 mm. Ici, l'ETR ne couvre que 28,5 % de l'ETM pour l'olivier et 39,3 % pour la forêt de feuillus. Ceci est lié à l'absence des pluies, la sècheresse des sols et la demande élevée en eau par les arbres.
- Au cours de la phase d'arrière-saison (Septembre-novembre) la DE enregistre une chute remarquable allant à environ de 30 mm à moins 5 mm pour les deux points de grille et le taux de recouvrement augmente d'environ 49 % à 74 %. Cette condition est expliquée par « *la diminution des besoins en eau de l'arbre et au démarrage de la saison des pluies* » (Hlaoui Z., 2006).

Généralement, le régime mensuel du DE des arbres permet de distinguer la saison sèche et la saison humide. En effet, la saison sèche (DE > 15 mm)[61] commence à partir du mois de juin et prend de l'ampleur aux mois de juillet et août pour se terminer au mois de septembre. Par ailleurs, la saison humide se prolonge sur le reste de l'année où le DE est inférieure à 15 mm et le taux de recouvrement dépasse 50 %. Cependant pour dégager le comportement de chaque occupation des sols vis-à-vis au stress hydrique nous avons comparé entre ces deux points de grille. En effet, l'écart de la DE annuelle entre l'olivier et la forêt de feuillus atteint 93,2 mm (tableau 41). Il est nul en hiver et atteint son niveau maximum en été, en particulier, durant la phase de mi-saison (33,8 mm). Bien que ne soient pas situés dans le même secteur, on peut conclure que l'olivier est plus vulnérable au stress hydrique que les chênes verts.

[61] Il faut remarquer que le seuil du DE indiquant la contrainte de la sécheresse varie selon les types des plantes. C'est pour cette raison que nous avons considéré que la sécheresse des plantes aura lieu dès que le DE dépasse 15 mm par mois (seuil appliqué pour la culture de sorgho dans la région de Jendouba, Radhouane L., 2006).

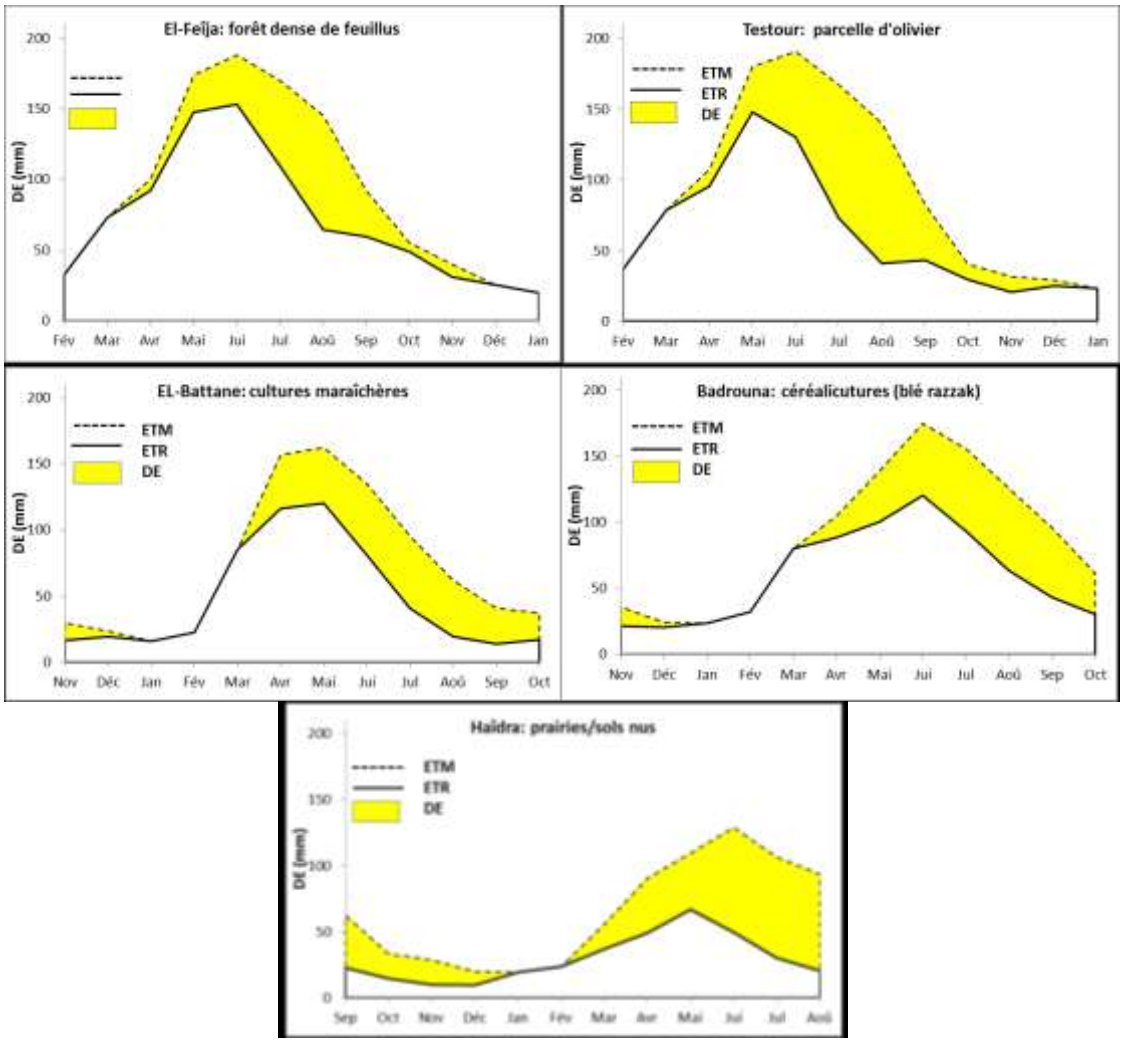


Figure 89 : Variabilité de la déficience d'évaporation en fonction de l'occupation du sol pour les points de grille retenus (2000-2011)

Tableau 41 : les écarts absolus de la DE (en mm) entre même typologie d'occupation des sols (2000-2011)

	Testour/El-Feïja (olivier/ forêt feuillus)	Badrouna/El-Battane (blé : maraîchères)
Septembre	6,9	11,6
Octobre	4,5	0,6
Novembre	2,1	1,2
Décembre	0,5	0,3
Janvier	0,0	0,0
Février	0,0	0,0
Mars	0,0	16,2
Avril	3,7	12,2
Mai	5,8	15,4
Juin	17,6	8,3
Juillet	33,8	12,1
Août	18,3	6,5
cumul Annuel	93,2	84,4

Le deuxième type d'occupation du sol étudié ici, il s'agit des cultures annuelles (ici blé et maraîchères). Le niveau annuel de la DE varie entre 298,5 mm pour les maraîchères et 337,6 mm pour les céréalicultures (blé variété Razzak). Ainsi, la figure 89 montre le comportement du DE des cultures annuelles est lié en grande partie au cycle de développement des cultures, ceci permet de retenir les remarques suivantes :

- Au cours de la phase de semis qui commence au mois de novembre, essentiellement, pour les céréalicultures la DE diminue progressivement afin de s'annuler en hiver, en passant de 38,7 mm à zéro mm. Ce niveau est expliqué par la fréquence des épisodes pluvieux et la recharge de la RU au fur et à mesure de l'entrée de l'hiver.
- Durant la phase de développement qui débute avec le mois de mars et se termine au moment où la couverture du sol est complète. La DE augmente progressivement pour atteindre 14,2 mm et 40,7 mm à la fin du mois d'avril respectivement pour le blé et les maraîchères. Dans ce contexte, le taux de recouvrement de l'ETR par rapport à l'ETM varie de 73,8 % pour les maraîchères et de 84,2 % pour le blé.
- Pendant la phase de pleine saison qui se termine au moment de la chute ou la sénescence du couvert foliaire (mois de mai et mi-juin). Le pic de la DE a lieu en juin soit un mois d'avance par rapport à celui des plantations arborées. Ceci est dû au fait que les cultures annuelles sont récoltées généralement durant le mois de juin.
- Lors de la phase de maturation ou d'arrière-saison (fin juin à juillet) la DE diminue progressivement et l'ETR couvre un niveau autour de 30% de l'ETM. Dans ces deux points de grille la DE garde le même niveau, même si les sols sont nus, et ce en rapport avec le niveau élevé de l'évaporation des sols.

Ainsi, les maraîchères se caractérisent par des niveaux de la DE moins faible que ceux du blé, et ce par le fait que la pratique de l'irrigation dans le BV de la Mejerda. Les cultures maraîchères sont totalement irriguées par contre le blé partiellement irrigué. L'écart annuel absolu entre ces deux occupations des sols touche 84,4 mm et il atteint son niveau maximum durant la période de floraison. Il est moins important par rapport à celui de l'olivier et la forêt de feuillus.

Le troisième type de l'occupation du sol concerne les sols nus ou les prairies. En fait, la DE enregistre des valeurs élevés. Elles sont comprises entre un niveau nul de 79,4 mm où le taux de recouvrement de l'ETR à l'ETM ne dépasse pas 40 %. À l'exception des mois de janvier et de février, le reste de l'année est marquée par la sècheresse. Il va sans dire qu'en l'absence de couvert végétal, la transpiration s'annule et l'évaporation des sols augmente (Simoneaux, 2007). Ce schéma est lié à deux facteurs essentiels : les précipitations et le coefficient d'évaporation (Ke : coefficient déterminant l'évaporation de la fraction du sol nu). Il dépend en premier lieu de l'humidité de l'horizon supérieur du sol et du taux de couverture par la végétation). Ainsi, les précipitations rechargent la réserve utile du sol tandis que le Ke assure la demande évaporative.

Au total, le régime mensuel du DE est lié aux différents phases de l'activité végétative. Il dépend de l'état de remplissage de la réserve utile dans le sol et le cycle de développement de la végétation (Mjejra et *al.,* 2015). Le déficit d'évaporation permet de cerner les besoins d'eau de la végétation afin d'obtenir une description du stress hydrique perçu par la végétation et de quantifier l'intensité des sécheresses (Lamy C., 2013).

8.3. L'intensité et la fréquence du déficit d'évaporation

Nous examinons, dans ce paragraphe, l'intensité moyenne de la DE déficit, dans les mêmes stations retenues, qui constitue un critère important de différenciation entre les mois et la singularité régionale. L'accent sera mis, sur l'ampleur des mois secs et des mois humides et ensuite sur le degré de chaque épisode et la spécificité de chaque station. Ainsi, la figure 90 résume le degré de l'intensité du déficit d'évaporation (c'est-à-dire taux de satisfaction en eau) sur la période de référence. Le découpage de l'année suivant l'intensité du DE présente, en général, une saison sèche de 7 mois allant du mois de mai au mois de novembre et une saison humide qui concerne le reste de l'année (décembre à avril). En effet, lorsque l'ETR couvre plus que 80% de l'ETM le mois est considéré humide (Leila Radhouane *al.*, 2003). La persistance de 5 mois humides dans le BV Mejerda, selon ce critère, est justifiée par la recharge hivernale de la réserve utile suite aux évènements pluvieux et un rythme lent de l'activité végétale et par suite une faible demande d'eau. Il est à remarquer que le mois de mai pour les stations Béja et Ghar Melh est classé comme un mois humide. Ce qui prolonge la saison humide à 5 mois. Ceci est relié, entre autres, au niveau élevé de l'humidité de l'air et la situation géographique. En effet, une atmosphère chargée, fréquemment, de vapeur d'eau diminue le quotient d'évaporation et par conséquent le DE ; c'est le cas de la station de Béja qui subit l'effet de la proximité du barrage de Sidi Salem alors que la station de Ghar Melh se trouve limitrophe à la Lagune Ghar Melh (Djamai., 2010). Quant à la situation géographique, elle est traduite ici par l'effet de l'exposition aux flux humides du nord pour la station de Béja et l'effet modérateur de la mer pour la station de Ghar Melh. Il faut ajouter aussi le rôle important des brouillards et les brumes[62] de nature à réduire l'effet des facteurs radiatifs sur le pouvoir évapotranspirant de l'atmosphère tout en favorisant la recharge de l'atmosphère en vapeur d'eau et la baisse de la fraction d'évaporation. En effet, ce phénomène lorsqu'il atteint le point de saturation l'atmosphère se charge en vapeur d'eau on aura, dans ce cas, un excès d'humidité qui devra se condenser sous forme de rosée (voir les photos de la figure 91).

[62] Brume : brouillard léger réduisant la visibilité en surface. Elle est formée par de microscopies gouttelettes d'eau ou de particules hygroscopiques humides en suspension (Beltrando et *al*., 1995)

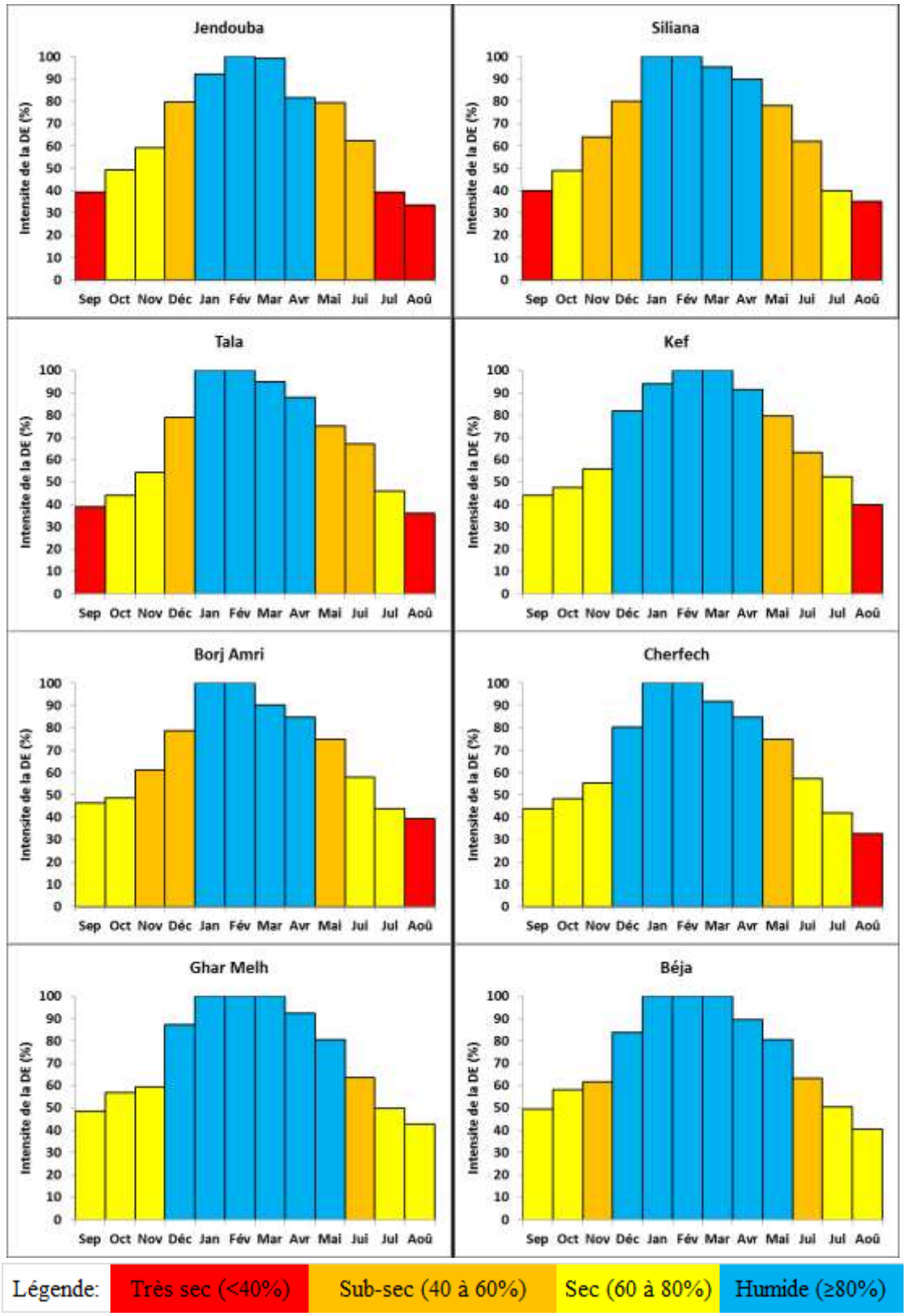


Figure 3 : L'intensité moyenne (ETR/ETM en %) de la satisfaction en eau de la végétation dans les stations météorologiques du BV Mejerda (2000-2011)



Figure 91: Exemples de photos illustrant les phénomènes de brouillard et de rosée à l'environnement du barrage de Sidi Salem (photos Mjejra M., 2010)

La dépression de Jendouba se caractérise par une saison humide de 4 mois (janvier au mois d'avril) et une saison sèche de 8 mois (mai à décembre). Mais, il faut noter que la fréquence des mois très secs s'allonge sur trois mois (juillet, août et septembre), dans la mesure où les valeurs oscillent de 33% à 39%. Ce schéma permet de mieux comprendre l'importance du rôle du relief, en particulier la situation d'abri de la station de Jendouba dans la vallée de Mejerda, dans la répartition de l'intensité de la DE. Ainsi, les bassins enclavés accumulent la chaleur le jour qui sert par la suite d'accélérer l'évaporation et le dessèchement des sols. Nous avons avancé cette hypothèse pour confirmer l'apport du relief dans le zonage de la DE dans ce secteur. Vers le sud, la station du Kef retient l'attention par l'occurrence des mois secs, en particulier en automne, aux dépens des mois très secs, par rapport aux autres stations du Haut Tell. En fait, les plateaux sont plus affectés par les types de temps perturbés par rapport aux secteurs voisins. Cela justifie l'avantage de la station du Kef sur les autres stations voisines. Ceci, peut donner au Kef des chutes de pluies exceptionnellement fortes (Henia., 1980). C'est ce qui explique la recharge précoce du stock d'eau dans le sol et par conséquent l'ETR peut couvrir plus que 50% de l'ETM.

Cependant, le suivi de l'intensité moyenne de la DE permet de déterminer le degré d'aridité de chaque région et l'humidité de chaque mois (Henia., 1993). Si nous comparons la fréquence des mois où l'ETR est inférieure à 50% de l'ETM (tableau 42), nous remarquons que la végétation dans le BV de Mejerda souffre de stress hydrique, mais il n'a pas la même

ampleur dans toutes les stations. En effet, l'intensité du DE s'accentue dans deux directions différentes. La première concerne un gradient latitudinal, dans la mesure où le stress devient sévère lorsqu'on se dirige du Nord au Sud. La deuxième suit un gradient ouest-est, c'est-à-dire en allant des stations de l'intérieur vers les stations littorales. À ce propos, il y a lieu de souligner le rôle des facteurs de la diversité spatiale du climat en Tunisie. Il s'agit notamment, de l'étirement de la Tunisie entre la Méditerranée au nord et le Sahara au sud qui engendre la dégradation des conditions climatiques du Nord au Sud ; et les effets de la maritimité/continentalité qui traduit une dégradation progressive de l'intérieur vers le rivage (coord Hénia L. Aléas et risques climatiques en Tunisie 2015).

Tableau 42 : L'intensité mensuelle de déficience d'évaporation (ETR>50%>ETM en %) dans les stations du BV de la Mejerda (2000-2011)

	Jendouba	Kef	Tala	Siliana	Béja	Borj Amri	Cherfech	Ghar Melh
Mois ETR>50%>ETM	34, 3	29,2	41,4	31,5	21	27,4	25,1	20,5

Du reste, on peut dégager aussi le degré de la sècheresse dans le BV de la Mejerda suivant le gradient latitudinal. Ainsi, la figure 92 relative à la fréquence de l'indice de la satisfaction eau des plantes révèle une diminution de la contrainte hydrique avec l'altitude. Mais cette allure se diffère d'un secteur à un autre. Sur le versant El-Feîja/Gardimaou on passe de trois mois très secs au fond de la vallée de Mejerda (point de grille de Gardimaou) à seulement, un mois très sec à une altitude d'environ 900 m (point de grille El-Feîja) ; et de deux mois pleinement humides à quatre mois sur le même versant. Le même schéma se répète sur le versant Jbel Serj/Gaâfour, mais avec un décalage de l'intensité vers le haut, dans la mesure où on enregistre trois mois pleinement humides à une altitude de 1200 m et les deux mois secs sont observés au niveau de 900 m par contre ils sont observés à 700 m sur le premier versant. Ceci met en évidence le gradient altitudinal du stress hydrique de la végétation (Feki., 2006). Le décalage de la même situation de stress entre les deux versants s'explique par l'effet de la latitude sur le climat et en particulier sur les facteurs intervenants tels que : le rayonnement solaire et les températures qui tentent à augmenter avec la latitude. Par conséquent, la vulnérabilité de la végétation au stress hydrique devient plus importante au fur et à mesure qu'on se dirige vers le sud du BV de Mejerda.

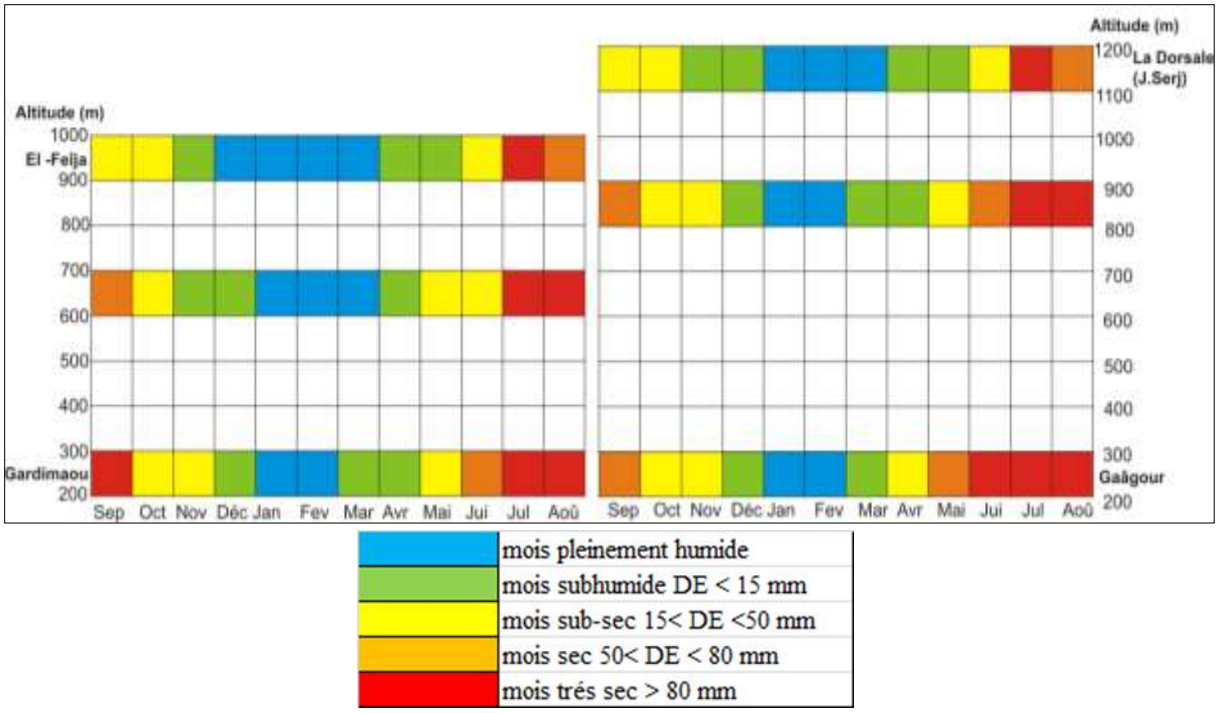


Figure 92 : La fréquence de l'indice de la satisfaction des besoins en eau selon l'altitude dans les deux versants opposés (la Kroumirie et la Dorsale)

En somme, la DE mensuelle est une contrainte fréquente dans le BV de Mejerda. Il touche toute la région et durant la période allant du mois de mai au mois de novembre et/ou décembre. L'intensité de la DE se distingue par un rythme très variable pendant les mois automnaux et elle devient régulière durant l'été. Quant aux mois printaniers, seul le mois de mai se caractérise par un déficit prononcé d'autant plus qu'il est précédé par un hiver plus moins pluvieux et coïncide avec la période de plein développement de la végétation. Finalement, il faut préciser que l'épisode de satisfaction en eau (une DE nulle) ne correspond pas toujours à la saison pluvieuse. En fait, elle glisse à janvier au lieu de décembre et gagne même le mois d'avril. Ceci s'explique par la recharge et l'épuisement progressifs de la réserve en eau du sol.

Conclusion

Nous avons consacré ce chapitre à l'analyse de la déficience d'évaporation dans son articulation temporelle et stationnelle, et ce en mettant l'accent sur le niveau, la typologie et l'intensité. Ce suivi a permis de révéler les points suivants :

- La DE, qui engendre le stress hydrique chez les plantes, est un phénomène fréquent même dans les secteurs pluvieux dans le BV de Mejerda.
- La végétation dans le BV de Mejerda est soumise la plupart du temps à un stress hydrique important, en particulier, dans la phase de l'activité végétative. En outre, la diminution des conditions hydriques tendait à se confirmer
- Dans le BV de Mejerda la période sèche où le DE dépasse le seuil de 15 mm par mois se prolonge du mois de mai jusqu'au mois d'octobre.
- Les nuances stationnelles de la DE montrent que les stations de la rive gauche se caractérisent par une intensité régulière par contre les stations de la rive droite, en particulier, les plateaux du Haut Tell et le versant nord de la Dorsale, se distinguent par une intensité irrégulière.
- La spatialisation de la DE révèle deux gradient, bien distincts : le gradient latitudinal et le gradient altitudinal. Le premier indique que le stress hydrique de la végétation devient sévère au fur et à mesure qu'on se dirige du Nord au Sud. Le deuxième montre que le stress perd son intensité avec l'altitude.
- La DE des plantations arborées est plus important que la DE des cultures annuelles. Ceci est expliqué par le fait que les plantations arborées sont exposées au stress hydrique durant environ 6 mois, par contre, les cultures annuelles subissent le stress pendant la phase de développement et la phase de pleine saison.
- La répartition temporelle de DE est liée aux stades phénologiques de la végétation, la recharge de la réserve utile des sols et le coefficient d'évaporation du sol.

Si le suivi de la DE, par son intensité et sa fréquence, permet d'interpréter le stress hydrique dans l'ensemble de la région et de montrer le degré de sa vulnérabilité vis-à-vis à une telle contrainte. Mais, l'indice de satisfaction en eau n'a pas caractérisé le BV de la Mejerda avec la même vigueur. En effet, cet indice risque de ne pas individualiser la région du Haut Tell, dans la mesure où les niveaux de l'ETM et l'ETR et les écarts ne sont pas importants par rapport aux autres secteurs, bien que la région se caractérise par une forte rugosité de surface et une occupation à sol nu. L'on sait que lorsque la rugosité de surface augmente, la résistance aérodynamique diminue, ce qui favorise l'évapotranspiration. C'est pour cette raison que nous avons cherché à calibrer le modèle tout en intégrant le coefficient de l'évaporation des sols (Allen et *al*., 1998 ; Er-raki., 2007 ; Amri., 2013).

Enfin, le suivi de la DE permet l'identification de l'intensité des saisons sèches et des saisons humides. En plus de ces résultats, la DE peut être utilisée en tant qu'un indice de disparités régionales. En effet, peut-on donc en utilisant cet indice, distinguer des sous-secteurs dans le BV de Mejerda ? Existe-t-il des limites bien distinctes entre ces sous-secteurs ? Qu'est-ce qui fait l'individualité de chacun entre eux ? Nous essayerons de répondre à ces questions dans le chapitre suivant.

NEUVIEME CHAPITRE : ESSAI DE ZONAGE DE LA DEFICIENCE D'EVAPORATION DANS LE BASSIN VERSANT MEJERDA

Le zonage[63] permet une vison géographique des aptitudes régionales (Huber et *al*., 2007). Il implique aussi l'introduction aux variations spatiales et aux délimitations des secteurs. À titre d'exemple, pour identifier les limites sèches et les limites humides (Merdes., 1997). En climatologie est un essai de découpage d'une région donnée en unités plus réduites à la base des indices de synthèses (ici la DE) pour aboutir à des variantes climatiques homogènes. Le niveau de détail de définition d'une aire est compatible avec l'échelle de l'étude, la disponibilité et la capacité de traitement des données. Cependant, le découpage d'un bassin versant en unités homogènes, se base, dans la plupart des cas, sur le critère des lignes de partage des eaux pour aboutir aux sous-bassins versants. Dans ce chapitre, on essaye d'établir le zonage de la DE pour identifier une aptitude régionale dans le BV de Mejerda en dehors du découpage hydrologique habituel. De plus, on essaye de chercher leurs limites ou les aires de transition. Enfin, on essaye de faire une synthèse de comparaison entre les résultats de cette étude avec d'autres résultats sur la région en termes de régionalisation.

Compte tenu des différents critères de la régionalisation climatique en Tunisie et la synthèse des résultats présentés dans les chapitres précédents, nous avons choisi l'approche géographique. Quel que soit le type de zonage retenu, il ne doit pas être une finalité en soit. Il ne doit pas être figé non plus. Basé sur un SIG dynamique, il doit aboutir à «une carte de découpage climatique pour le BV de Mejerda ». Il va sans dire que l'intensité et la fréquence de la DE ne se reproduisent pas de la même manière, dans les mêmes secteurs et pour toutes les typologies. Le zonage à élaborer devrait se fixer, à priori, deux principaux objectifs : le premier est de démontrer l'utilité de l'indice de la DE pour identifier les différentes sous-régions du BV de Mejerda, en fonction des saisons et de l'occupation du sol. Le deuxième est de fournir un découpage territorial permettant de suivre et de recueillir les informations sur le stress hydrique. Il est à noter que le choix des critères a été aisé, puisque les paramètres d'entrées sont analysés dans les chapitres précédents (l'ETM, l'ETR et la DE).

Il est donc question ici de faire la synthèse des résultats de cette étude. Il s'agit en fait d'exposer les critères retenus, de dégager par la suite les sous-régions climatiques dans le BV de Mejerda et, enfin, d'expliquer le comportement de la trame climatique du BV de Mejerda. En outre, identifier les secteurs vulnérables au stress hydrique dans la région. Un tel résultat permet de mettre en évidence la fiabilité d'un système cultural local à l'échelle locale en fonction de la gestion de l'irrigation et par conséquent des ressources en eau. Quels critères adoptons-nous pour atteindre cet objectif ? Existe-t-il un ajustement entre le découpage hydrologique (les sous-bassins versants) et le découpage climatique, adopté ici, les sous-régions climatiques ? Quel rapport entre les sous-régions et les aires de transitions ? Pour répondre à ces questions il est de prime abord nécessaire de fixer les critères à retenir et l'approche à suivre.

[63] Ce terme est utilisé par certains auteurs (Oudin., 2004 ; Galleguillos ., 2010 ; Piedallu., 2012) comme étant : la spatialisation ou la régionalisation.

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

9.1. Choix des critères d'analyses et de validation de zonage

Plusieurs chercheurs se sont déjà intéressés à la question de zonage du territoire tunisien selon des objectifs différents et des types de zonages diversifiés : zonage climatique, zonage écologique, zonage des systèmes agraires, zonage en régions naturelles et zonage bioclimatique (Monchicourt., 1913, Despois., 1966, Sithom, *al.,* 1981, Henia., 1993, Ben Boubaker., 2000, Ben Romdhane., 2008, Djamai., 2010). Mais ces chercheurs ont consacré leurs travaux, dans la plupart des cas, à la régionalisation de la Tunisie entière ou à la limite la Tunisie tellienne (toute la partie située au nord de la Dorsale). Nous cherchons ici une autre échelle plus fine pour traiter ce sujet au sein même d'une région. Ainsi, le BV de Mejerda, support de ce travail, constitue une pleine justification pour répondre à notre objectif. Nous nous proposons d'étudier le DE dans le BV de Mejerda pour mieux identifier les sous-régions et de tenter une approche spatiale sur la base des critères climatiques et non pas des critères hydrologiques. D'ailleurs le BV de Mejerda a été étudié comme une unité hydrologique subdivisé en six sous-bassins versants (haute Mejerda, oued Mallègue, oued Siliana, oued Khalled et basse vallée de Mejerda) ce découpage a été adopté par les services de pluviométrie et d'hydrologie de MARH. Dans ce contexte, nous proposons un nouveau découpage climatique sur la DE. Un découpage à l'échelle régionale plus détaillé que ceux mentionnés auparavant. Pour les besoins de ce travail, nous avons fait une synthèse de critères qui répond aux objectifs de l'étude. Dans ce sens, les différentes études de climatologie en Tunisie ont prouvé que la subdivision était à l'échelle de la Tunisie entière. Les subdivisions et leurs limites ont été fondées sur des seuils pluviométriques, quotient pluvio-thermique d'Emberger, indice bioclimatique, indice de bilan hydrique. Aussi, adoptons-nous pour le BV de Mejerda un indice de régionalisation adéquat à ce niveau d'échelle à l'aide des pertes d'eau (évaporation du sol et transpiration de la végétation).

Une lecture même rapide, des subdivisions climatiques[64] et ses multiples facteurs, pour le BV de Mejerda permet de dégager les remarques suivantes :

- Le BV de Mejerda, situé entre l'ensemble de chaînons du Tell septentrional au nord (Kroumirie, Nefza et Mogoods) et la Dorsale au sud (la dorsale englobe les sommets les plus élevés du pays), se caractérise par un climat assez variable dans le temps et dans l'espace. Ces deux ensembles orographiques individualisés représentent des barrières climatiques souvent reconnues comme des facteurs de variations et des limites climatiques (Ben Boubaker., 2000). D'ailleurs, la topographie constitue un facteur de contraste climatique dans le BV de Mejerda même sur des distances réduites (Hénia L., Coord, 2015). Toutefois, les versants sud de chaînons du Tell septentrional sont exposés à un climat franchement humide à l'inverse les versants nord de la Dorsale sont exposés à un climat, la plupart des cas, sub-sec. Quel effet donc, de cette variation climatique sur le zonage de la DE dans le BV de Mejerda ? peut-on transposer cette aptitude régionale sur le BV de Mejerda ?
- Du fait que le BV de Mejerda est situé entre deux ensembles de reliefs, il se trouve dans une situation d'abri des flux humides du secteur nord et à l'abri des flux chauds et secs de secteur sud (Hénia L., Coord, 2008). Cette situation d'exposition peut expliquer le degré de

[64] La régionalisation climatique en Tunisie sont fondées sur des indices prenant en compte des paramètres climatiques dans leurs valeurs moyennes, décadaires ainsi que la variabilité à différents échelles de temps, en particulier, la pluie et les températures et la déficience d'évaporation (Henia., 1993, Bousnina., 2000…).

sensibilité de la région à la sècheresse, dans la mesure où « *les facteurs d'exposition des versants sont également importants et les situations d'abri sont plus favorables au développement de la sécheresse* » Dubreuil, 1996. Quel rôle peut jouer cette position à la délimitation des subdivisions climatiques locales dans la région ? Peut-on définir des sous-régions du BV de Mejerda qui s'apprêtent à suivre la DE ?

- La région est située entre l'isohyète annuelle de 400 mm au sud et l'isohyète 800 mm au niveau de la haute Mejerda et l'isohyète 600 mm au niveau de la basse Mejerda. Ce schéma permet de distinguer trois sous-régions sur la base des caractéristiques pluviométriques où la satisfaction de la végétation en eau se diffère : les plateaux du Haut Tell, les versants sud de la Kroumirie et la basse Mejerda. Admettons-nous ce découpage pour le DE pour l'ensemble de la Mejerda ?
- Sur la base des caractéristiques thermiques le BV de Mejerda est subdivisé, en général, en trois sous-secteurs différents : les plateaux du Haut Tell se caractérisent par les îlots les plus fraîs (dont les températures annuelles moyennes allant de 15 à 17 °C), la haute et la moyenne vallée de Mejerda se distinguent par les noyaux chauds du fait qu'ils enregistrent les températures maximales moyennes estivales et hivernales. Enfin, le sous-secteur littoral (la basse Mejerda) est marqué par un champ plus ou moins tempéré en raison de sa proximité de la mer. Cette situation détermine-t-elle les grands traits du zonage du DE dans le BV de Mejerda puis qu'elle représente un facteur important de l'évapotranspiration ?

En somme, ces classifications permettent, à l'échelle de la Tunisie tellienne, de distinguer que le terroir du BV de Mejerda est situé dans une aire de variation assez marquée. De plus, les études climatiques ont considéré, dans la plupart des cas, la région uniquement le secteur qui s'étale sur la vallée de Mejerda c'est-à-dire le couloir qui abrite le principal cours d'eau du pays sur une bande d'environ 40 à 60 km et sans tenir compte de tout le BV comme unité hydrologique et topographioque. Ainsi, le Haut Tell et les massifs de la Kroumirie et de la Dorsale sont considérés comme des régions à part (par exemple la Dorsale pour Gammar., 1999). Il va sans dire qu'une telle approche ne peut, à la limite, aboutir à une allure générale de la région bien qu'on cherche une classification plus détaillée et spécifique au BV de Mejerda à une échelle plus réduite que l'ensemble de la Tunisie tellienne. Mais au-delà de cette image traditionnelle supposant une certaine unité spatiale du climat tunisien plusieurs subdivisions apparaissent lorsque nous cherchons à caractériser plus finement la réalité climatique du BV de Mejerda. Dans ce contexte une hypothèse mérite d'être exposée : plus on réduit l'échelle d'investigation pour rétablir un zonage, avec des moyens appropriés, plus on a de chance d'avoir un meilleur schéma régional. Cette hypothèse correspond en fait à un raffinement plus poussé des approches précédentes, et ce pour montrer que le BV de Mejerda n'est pas, toujours, une unité climatique qui réagit comme un tout vis-à-vis des extrêmes contraintes climatiques, en particulier la déficience d'évaporation.

En revanche, ces différents critères de la régionalisation climatique en Tunisie ne sont pas indépendants, mais ils sont liés les uns aux autres par des éléments explicatifs multiples :

- les apports radiatifs : le rayonnement solaire, les températures ;
- les apports advectifs : le vent, les flux humides du nord et les flux chauds et secs du sud ;
- les données géographiques : l'orographie, l'exposition, effet du site et effet de l'altitude ;

- les données paysagères : occupation du sol (végétation naturelle, végétation agricole, phénologiques (le coefficient cultural) ;
- les données pédologiques : réserve utile du sol, le coefficient d'évaporation du sol, coefficient du stress hydrique.

Nous essayons, dans la mesure du possible, de faire appel à ces facteurs pour expliquer les caractères de chaque variante régionale dans le BV de Mejerda.

Cependant, tout critère de différentiation climatique à l'échelle régionale doit tenir compte de ces paramètres. De ce fait, les critères de zonage de la DE montre une synthèse combinant, essentiellement, les résultats de l'étude de l'évapotranspiration sous ses trois formes (ETP, ETM et ETR). Puisque l'évapotranspiration, paramètre fondamental pour le calcul de la DE, est un phénomène de perte d'eau, il est équitable de retenir le critère qui se rapporte à la fréquence et à l'intensité du déficit hydrique, surtout là où l'agriculture reste une activité importante et la DE peut avoir des effets négatifs sur le rendement des cultures. Dans ce contexte, la fréquence des mois secs, des mois humides et ses intensités (typologies de la DE) répondent aisément à notre objectif. Ce choix est justifié, car tout au long de ce travail il s'est avéré que la répartition spatiale des paramètres analysés a permis de mieux comprendre la différentiation et la délimitation climatiques locales dans le BV de Mejerda. Ainsi, ce travail sur le zonage de la DE présente une nouvelle approche de spatialisation et de compréhension des nuances climatiques des différents secteurs de la région. C'est une signification concrète du moment qu'on touche des termes où la question de l'eau est transite et c'est surtout la possibilité d'obtenir une image régionale détaillée. En effet, la DE est utilisée pour suivre plusieurs phénomènes agro-climatiques tels que : stress hydrique, sècheresse, besoin en eau de la végétation, gestion de l'irrigation et la mise en valeur d'une région donnée de telle ou telle culture dont on connaît les conditions environnementales et écologiques. Il permet aussi d'apprécier les allures de contrastes et de diversités régionales, en particulier, au niveau de ses caractéristiques agro-climatiques, hydrologiques et le pouvoir évaporant de l'atmosphère. À cet égard Olivier., C en 2001 disait « *Pour preuve intérieur un domaine climatique considéré comme homogène originalité géographique de certains secteurs, formes de relief, modelés, nature de la flore et de la faune est en partie le témoin concret d'existence de ces conditions climatiques propres échelle plus fine* ».

Du reste, l'approche consiste à intégrer les résultats des chapitres précédents dans un SIG. L'utilisation de cet outil d'aider à mieux délimiter et comprendre l'extension des secteurs humides et des secteurs secs (arides) dans le BV de Mejedra. En fait, la superposition de la carte des typologies de la DE, la carte de l'occupation du sol et la carte du MNT résume l'approche spatiale, adoptée pour cette étude, afin de retracer les variantes régionales du BV de Mejerda. Ces variables fournissent donc les éléments préalables nécessaires à un zonage simplifié en termes de probabilité et sans tenir compte de l'aspect stationnel. Les caractéristiques stationnelles peuvent ne pas respecter la hiérarchie des sous-régions. C'est pourquoi nous avons réalisé un maillage à petite échelle, avec des points de grille de 10 km de côté, et ce pour représenter la tendance de chaque station météorologique en termes variantes régionales. Ainsi, la figure 93 montre la synthèse des critères retenus pour aboutir au découpage du BV de Mejerda suivant les caractéristiques de la déficience d'évaporation. L'association de ces critères nous permet de coder de 1 à 3 les sous-régions. Pour ce faire, on

a utilisé la méthode de classification non supervisée qui ne nécessite aucune information d'apprentissage autre que le nombre de classes que l'on cherche. Elle tend à regrouper les pixels purs ayant des profils temporels comparables. Or, ces pixels expliquent au mieux les profils de tous les autres pixels de l'image. Nous avons utilisé la méthode des nuées dynamiques « *qui est une méthode itérative qui, à chaque itération, calcule les centres de gravité des classes et les distances des pixels à ces centres jusqu'à ce que les centres de gravité se stabilisent* » Benhaj., 2008. Pour les besoins de ce travail, nous avons fixé le nombre de classes des sous-régions à trois. En fait, nous avons limité à trois classes car les nuances de la DE les plus fréquentes sont : humide, semi-aride et sec. Le résultat de la classification est donc une image où les pixels de mêmes caractéristiques sont regroupés ensemble. Cette approche appliquée ici, en utilisant la méthode de classification non supervisée (Kmeans), dans la mesure où les classes sont représentées par leur noyau ou nuée, composé de plusieurs éléments ou un seul comme le centre de gravité.

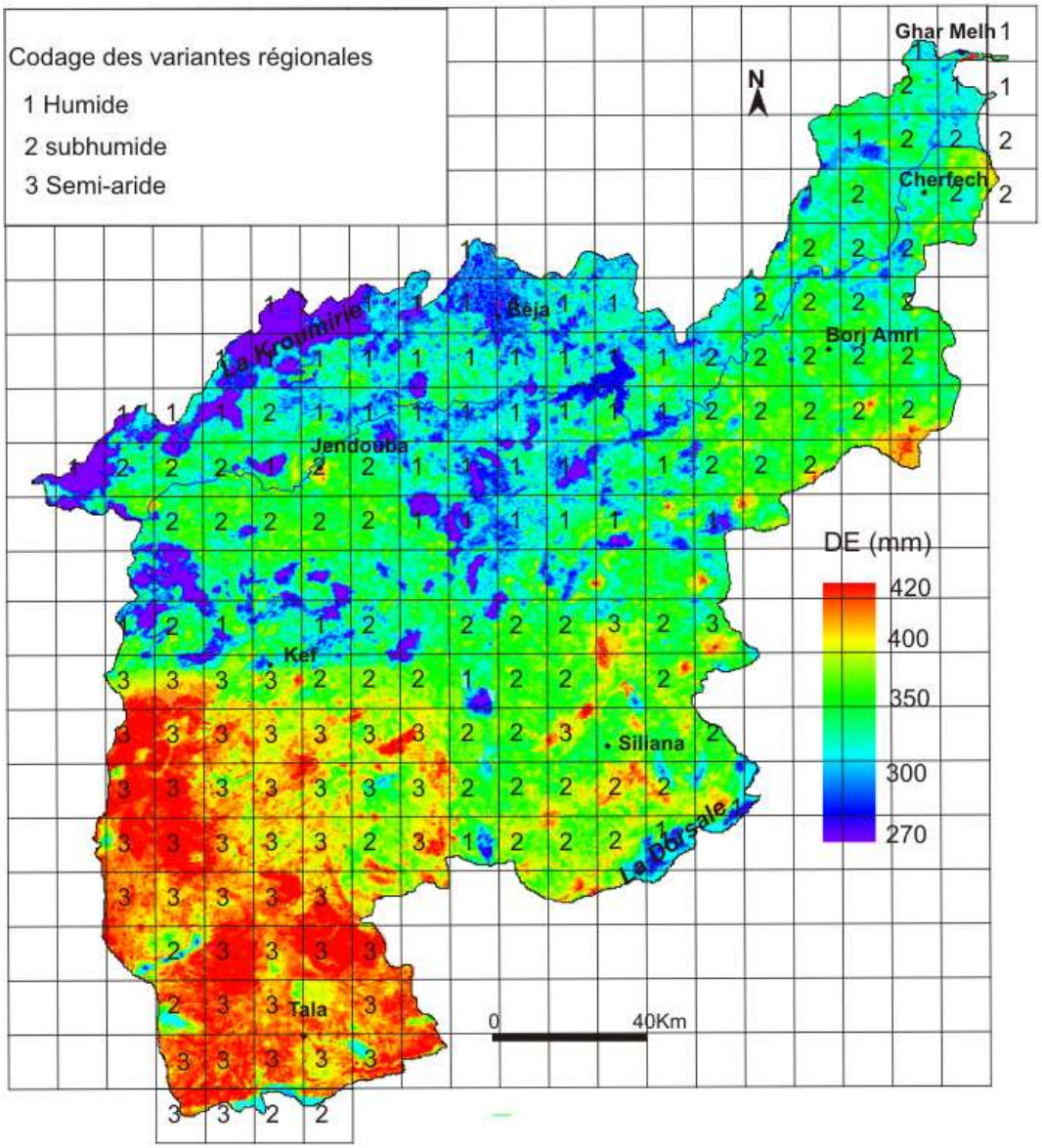


Figure 93: Superposition du codage simplifié de la classification des variantes régionales (avec des chiffres) sur la carte des niveaux moyens annuels de la DE en mm (avec des couleurs)

Au total, les critères utilisés sont pleinement justifiés. En effet, ce qui caractérise la spatialisation du climat régionale du BV de Mejerda est l'étude de la fréquence et l'intensité de la DE. Le SIG est un outil privilégié pour retracer les limites des subdivisions climatiques grâce à la superposition de plusieurs thématiques. Enfin, la nouvelle image régionale du BV de Mejerda peut être validée par la méthode de classification non supervisée. Dans ce qui suit on essaye, dans une certaine mesure, d'intégrer tous ces paramètres pour présenter un schéma complet de chaque secteur.

9.2. Analyse et interprétation des résultats de la régionalisation du BV de la Mejerda : les variantes régionales

La figure 94 représente la synthèse de ce travail. Elle montre, en effet, l'extension spatiale et de la localisation géographique de l'aridité et de l'humidité ainsi que leurs limites. Elle définit, aussi, trois sous-régions dans le BV de Mejerda différentes l'une de l'autre. La régionalisation du BV de Mejerda par le biais de la déficience d'évaporation, montre qu'il possède une mosaïque climatique de type méditerranéen. Cette mosaïque se caractérise principalement par la variation des nuances climatiques allant de l'humide à l'extrême nord à une nuance semi-aride au sud en passant par la subhumide au milieu. Cependant, à l'intérieur de chacun de ces trois ensembles d'autres nuances, à distinguer chaque fois, intégrées de part et d'autre hors du secteur en question. Elle se caractérise aussi par l'alternance d'une saison humide centrée sur l'hiver et une saison sèche qui peut s'allonger sur environ 7 mois en particulier dans les hautes terres de Tala. Cet aspect expose la végétation à un stress hydrique assez important (Feki M., 2006) par contre, en hiver, l'eau disponible couvre la consommation de la végétation. Il va sans dire que ce schéma résume, en grande partie, les caractéristiques climatiques de la Tunisie tellienne.

Les résultats obtenus montrent que les secteurs humides dans le BV de Mejerda représentent 27,1%, les secteurs subhumides sont de l'ordre de 41,6% et les secteurs semi-arides potentiellement concernés par le stress hydrique occupent 31,3% du territoire. Cette répartition spatiale permet d'analyser la distribution de la végétation en relation avec les différents paramètres biophysiques (topographie, exposition, altitude, précipitations, température…). En outre la connaissance des relations variabilité climatique et végétation permet de mieux instaurer des politiques d'adaptation aux phénomènes de sécheresse et d'agressivité des agents météorologiques. Dans les paragraphes suivants un intérêt particulier sera accordé à l'analyse des relations entre les aires de répartition de chaque nuance climatique et leurs limites géographiques.

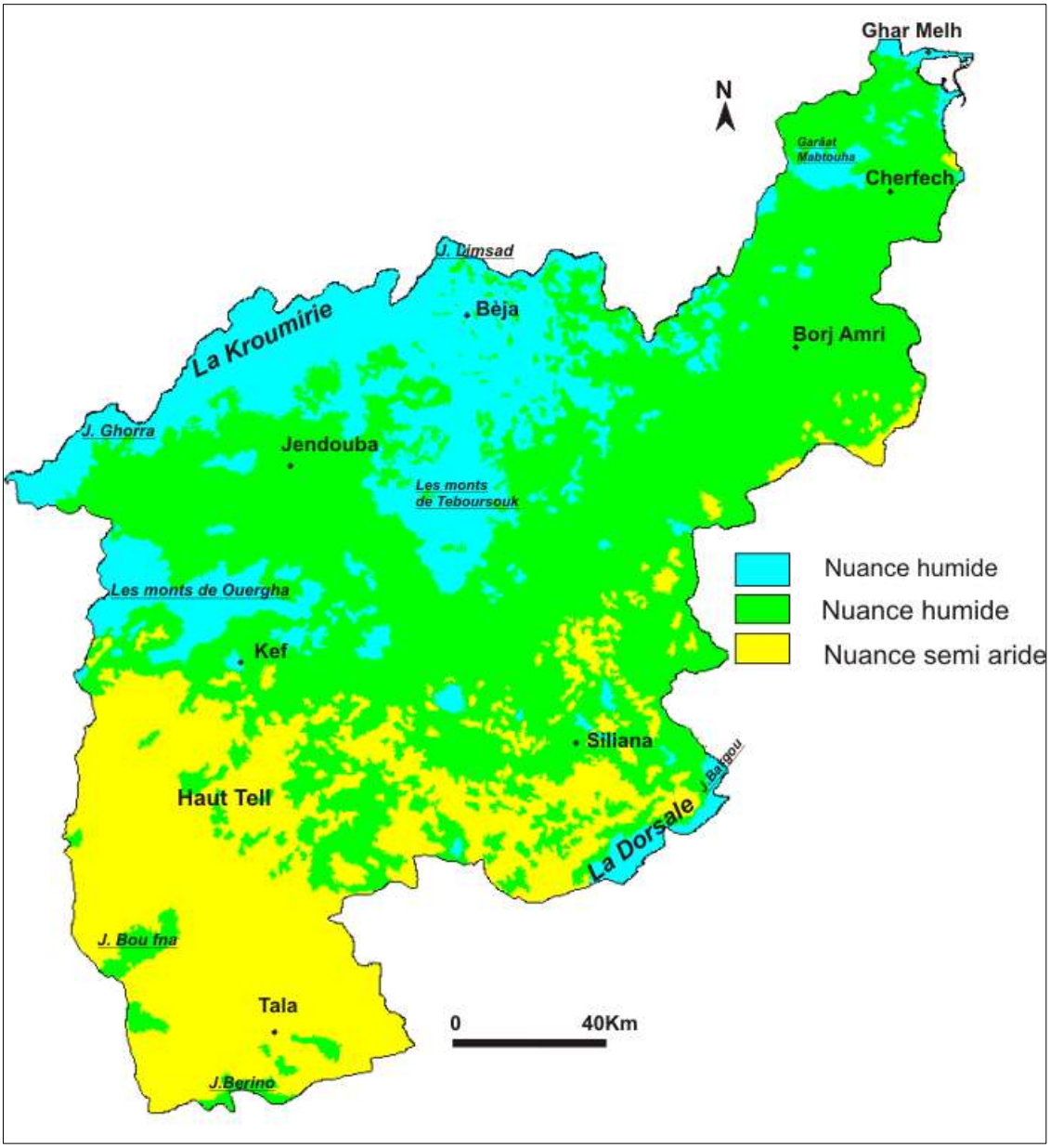


Figure 94: Les nuances climatiques par le biais de la régionalisation de la déficience d'évaporation dans le BV de la Mejerda

9.2.1 La variante humide

La variante, apparaît en bleu ciel sur la carte de la figure 94, se distingue par une nuance climatique humide et un terroir relativement fragmenté. Elle est localisée dans les secteurs montagneux et les versants suivants :

- les massifs et les versants sud de la Kroumirie, la ligne de crête de la Dorsale en allant de de l'Est à l'Ouest de Jbel Bargou, Jbel Fkirine à Jbel Serj ;
- les montagnes du Kef (Jbel Ouergha, Jbel Takrouna, Jbel Kabouch) les monts de Teboursouk (Jbel Rihane, Jbel Ech-hid) la ligne de crête de Jbel Ennadhour à l'extrême Nord-Est.
- les aires humides dans la basse Mejerda : Garâat Mabtouha, Lagune Ghar Melh, domaine d'Utique.

Tous ces secteurs sont relativement élevés, (500 m à 1151 m) à l'exception des aires humides dans la basse Mejerda. Ils sont exposés aux courants pluvieux intéressants. En effet, la pluviométrie moyenne annuelle enregistre un palier allant de 600 mm à 1200 mm (voir entre autres Hénia., 1980 et Coord, 2008 Ben Boubaker H., 2000, Feki M., 2006). Dans cet ensemble, la DE varie de 270 mm à 325 mm par an, soit un déficit journalier qui ne dépasse pas 1 mm avec une variation relative d'environ 16,9%. En outre, ils renferment les véritables formations forestières de la Tunisie de type méditerranéen tels que : les arbres, les arbustes feuillus, les résineux ... La nuance humide de cette région se traduit par les faits suivants :

- Sur toute la période étudiée, la saison humide[65] (mois pleinement humides et mois humides) s'étend sur 5 à 6 mois de novembre à mai et elle occupe une probabilité moyenne d'environ 49% des mois étudiés (tableau 43). Par contre, la saison sèche (mois sub-sec et mois sec) s'étend sur 3 à 5 mois une fréquence de 41% des nombres des mois étudiés. De plus, la nuance très sèche est, essentiellement, centrée sur le mois d'août et représente une portion faible autour de 10%, contrairement aux autres secteurs du BV de Mejerda. Ceci permet de mettre en évidence que la végétation est soumise uniquement à un stress hydrique estival qui s'accentue en août quand l'écart entre ETR/ETM est maximal au moment où la réserve en eau du sol est pratiquement épuisée. Cette réserve ne dépasse pas 10 mm dans les meilleurs cas (Feki M., 2006). Elle témoigne donc d'un couvert végétal moins sensible au stress hydrique. Ce couvert est formé des forêts mixtes (chêne vert, chêne liège, pin d'Alep…) et une végétation hydrophile (orge sauvage, salicornes …).

- La saison humide se caractérise par un taux moyen d'apparition des mois pleinement humide relativement important, 21,8 %, 25 %, 28,8 % respectivement à Kef, Béja et Ghar Melh. La période humide s'étend sur 2 à 4 mois. Ceci est très dépendant de la réserve utile, dans la mesure où les sommets des montagnes disposent des ressources en eau plus importantes que les vallées et les plaines voisines. Cet aspect est à mettre en relation avec le gradient pluviométrique et la diminution de la température avec l'altitude (Ben Boubaker H., 2000). En plus de ce gradient altitudinal, on peut remarquer un autre gradient du climat latitudinal (Nord/Sud). Il se manifeste par l'augmentation de la probabilité d'avoir des mois humides aux dépens des mois pleinement humides (tableau30). Il se manifeste aussi par la présence ou moins de 3 mois successifs qui n'ont pas de stress dans 5 ans sur 11 ans dans la station du Kef. Par contre, on enregistre cette situation sur toute la période dans la station de Béja et de 10 ans/ 11 ans pour la station de Ghar Melh. Ceci s'explique, d'une part, par les totaux pluviométriques qui sont plus importants sur l'extrême nord du BV de Mejerda et qui dépassent 1000 mm, mais ils sont autour 700 mm par ans dans les plateaux du Kef. D'autre part, la réserve d'eau des sols se forme rapidement les secteurs nord de la région et se vide tardivement par rapport aux plateaux du Kef. Durant la saison humide la végétation est dans un « confort hydrique ».

[65] Mois pleinement humide, ETM égale ETR et mois humide ETR ≥ 80% ETM
Mois humide DE <15mm
Mois sub-sec 15< DE <50 mm
Mois sec 50< DE < 80 mm
Mois très sec > 80 mm

Tableau 43: Fréquences (en %) des nuances climatiques et typologies des mois dans la région des versants, des montagnes et des sommets (2000-2011)

	Mois pleinement humide	humide	Mois sub-sec 25< DE <50 mm	Mois sec 50< DE < 80 mm	Mois très sec > 80 mm	Total
Kef	21,2	27,3	24,2	17,1	10,2	100
	Saison humide 48,5		Saison sèche 41,3			
Béja	25,0	25,8	24,2	18,9	6,1	100
	Saison humide 50,8		Saison sèche 42,1			
Ghar Melh	28,8	20,5	28,0	15,2	7,6	100
	Saison humide 49,3		Saison sèche 43,2			

- La saison sèche dans la région se distingue par un stress hydrique moins remarquable qu'ailleurs. Ce stress se traduit par des cumuls mensuels de la DE élevés qui varient entre 80 mm et 93 mm. Ce niveau des cumuls est associé avec les mois très secs. En effet, ces mois marqués par l'aridité deviennent plus fréquents et le stress hydrique prend de l'ampleur, et ce au fur et à mesure qu'on se dirige vers le sud de la région. C'est dans la station du Kef qu'on enregistre la succession de deux mois très secs dans 6/11 des années étudiées, contre 0/11 à Béja et 1/11 à Ghar Melh (Ces deux dernières stations situées sur la limite nord de la région). On peut remarquer, cependant, que le climat se dégrade dans le sens Nord/Sud. Ainsi, la station du Kef est marquée par rapport aux stations de Béja et Ghar Melh par une nuance semi-aride. Celle-ci se traduit par la présence de 15,2 % des situations de mois très secs aux dépends des mois secs qui occupent 12,1 % de toute la période étudiée. Ceci est en relation avec la nature de l'occupation du sol qui se caractérise, essentiellement, par des forêts résineux de pin d'Alep. Ce qui montre que le stress hydrique est ressenti dans les forêts de résineux plus que les forêts feuillues.

- Dans la région des versants, des montagnes et des sommets, la saison humide est marquée par l'irrégularité au niveau de sa durée ainsi que les dates de son avènement et de son achèvement (cf. figure 87 chapitre 8). À titre d'exemple, dans la station du Kef la durée varie de 5 à 7 mois durant la période de 2000 à 2011. Le début de la saison des pluies[66] aura lieu du mois de septembre et son achèvement peut avoir lieu avec le passage au régime estival qui s'opère généralement au mois de juin. en effet, *« la saison de pluie s'inscrit dans la période située entre le 1er septembre et le 30 juin »* (Abederrahman et *al*., 2013). À l'inverse, la saison sèche se distingue par une structure morcelée. Des mois très secs peuvent s'installer aux mois de juin ou septembre, alors que leur apparition habituelle aura lieu dans 95% des cas en juillet ou/et août. On peut dire que le stress hydrique correspond au minimum de l'activité photosynthétique.

[66] Les climatologues déterminent le démarrage de la saison des pluies par l'apparition des premières pluies associées à une modification sensible dans les mécanismes de la circulation atmosphérique, après la sécheresse estivale (Bousnina A., 1986 ; Henia L., 1993 ; Aberrahman A., 2013).

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

- Le relief paraît jouer un rôle de premier ordre dans la spatialisation des nuances de ce secteur du BV de Mejerda. En effet, à la faveur d'une meilleure exposition aux flux pluvieux du Nord-Ouest, la nuance humide, qui caractérise la région, glisse beaucoup plus en latitude, au niveau des plateaux du Kef et les massifs de la Dorsale, qu'à l'est au niveau de la basse Mejerda (Henia., 1993). En effet, on constate que sur les sommets de la Dorsale à forte demande climatique (ETP), le stress hydrique est peu important. Cela signifie que dans certains endroits, la recharge de la réserve d'eau des sols assurée par les flux pluvieux suffit à satisfaire les besoins des plantes indépendamment de la degré du pouvoir évaporant du climat (Piedallu et *al.*, 2013). De plus, dans les régions humides, les épisodes de dessèchement sont plus courts et le sol ne se dessèchera pas en profondeur. En effet, les sols superficiels peuvent conserver un taux d'humidité plus élevé que dans les autres régions situées plus au sud.

- Nous pouvons ajouter aussi que « *le DE diminue au fur et à mesure avec l'altitude* » Dubreuil 1996. En effet, la figure 95 confirme cette idée, dans la mesure où la limite de la nuance humide se décale en altitude en allant des secteurs du nord vers les secteurs du sud. La limite est située à 450 m sur les versants de la Kroumirie, elle est de 600 m aux monts d'Ouergha à l'est du Kef, à partir de 675 m à Jbel M'Iza à l'ouest de Siliana et au-delà de 800 m sur les sommets de la Dorsale. Cela s'explique par le fait qu'avec l'altitude, les apports des pluies augmentent et par conséquent plus de recharge pour le stock d'eau dans les sols. À l'inverse, les températures diminuent avec l'altitude ce qui ralentit le pouvoir évaporant de l'atmosphère.

- Sur les limites Nord du BV de Mejerda la nuance humide (DE faible) est nettement marquée à l'ouest qu'à l'est en allant de Jbel Ghorra sur les frontières Tuniso-algériénnes à Jbel Limsad au Nord de Béja, dans la mesure où les valeurs de la DE augmentent de 271,9 mm à 294,2 mm. Ceci est lié aux apports de la pluviométrie, dans la mesure où les montagnes de l'ouest reçoivent autour de 1000 mm par an, par contre, les montagnes de l'est reçoivent des quantités qui varient entre 800 m à 1000. Ce qui recompose le taux des pertes d'eau par évaporation à l'ouest qu'à l'est. Cette situation se renverse sur les sommets de la Dorsale. En effet, les apports du DE sont plus importants à l'est qu'à l'ouest, dans la mesure où on arrive même à la disparition de la nuance humide sur les sommets de Jbel Berino, au sud-ouest de Tala, d'une altitude de 1420 m. Ceci s'explique par l'effet de continentalité qui favorise les pertes en eau au fur et à mesure qu'on se dirige vers le sud-ouest. Enfin, on peut ajouter l'influence de l'occupation du sol sur la dégradation de l'humidité à la faveur de la sècheresse du Nord au Sud. Ainsi, Jbel Berino (d'altitude 1420 m), se caractérise par une végétation résineuse (pin d'Alep, Romarin…) xérophile caractérisée par une déficience d'évaporation élevée par rapport à celle feuillue située plus au nord.

- La nuance humide ne concerne pas uniquement les secteurs des versants et les sommets des montagnes. Elle s'installe aussi sur les surfaces humides du delta de Mejerda. La manifestation de cette nuance dans un secteur où l'accès des flux pluvieux du Nord-Ouest ne se fait directement s'explique, sans doute, par la proximité de la mer et des surfaces piézométriques. Ceci se traduit par les Garaâts, les Sebkhas liées aux systèmes endoréiques et l'engorgement hydrographique entraînant la genèse d'une hydromorphie. Ainsi, dans la basse vallée de Mejerda « *la nappe phréatique est très proche de la surface et affleure en plusieurs zones sous forme de garâats et marécages* » El Garouni., 1995. Dans ces surfaces les niveaux

de la DE sont faibles et l'influence de stress hydrique sur la végétation ne peut être ressentie qu'en période estivale. De plus, ces surfaces ne sont pratiquement sèches qu'en été par contre elles sont humides sur le reste de l'année.

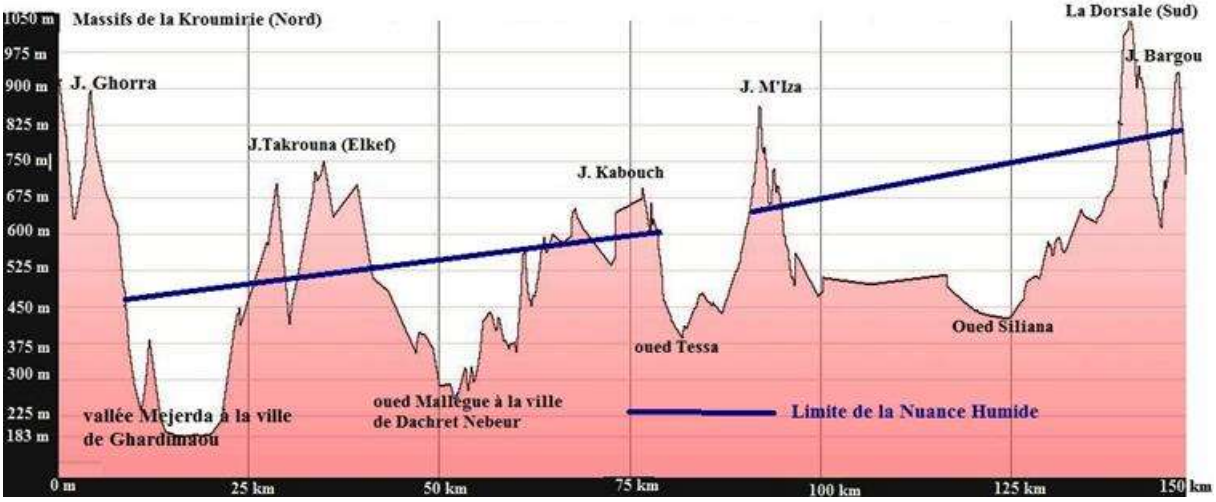


Figure 4 : Profil topographique et limites de la nuance humide dans le BV de la Mejerda

Au total, la région des versants, des montagnes et des sommets apparaît aux aspects de la carte du DE comme un ensemble à climat humide où le « système hydrique est bien favorable aux cultures, car, durant six à huit mois sur douze, l'eau disponible est soit l'eau fournie par la réserve du sol, soit l'eau qui provient des précipitations » (Khémir E., 2011). En revanche, la recharge de la réserve utile, le comportement des espèces végétales, la position en latitude, l'effet de l'altitude et l'occurrence des faibles niveaux de la DE, introduisent des nuances à l'intérieur de cette variante. De ce fait, la région prend une structure morcelée en 4 sous-secteurs, répartis dans tout le BV de Mejerda. Mais, le point commun entre ces secteurs est déterminé par la bonne exposition aux flux pluvieux dominants du Nord-Ouest (Henia L., 1980).

9.2.2. La variante sub-humide

Cette variante à des aires abritées, apparaît sur la carte en vert clair, se caractérise, essentiellement, par une nuance climatique subhumide. Elle forme un ensemble contenu et englobe les unités suivantes :

- les plaines de la vallée de Mejerda c'est-à-dire les aires riveraines du cours d'eau de Mejerda ;
- les bassins intra-telliens situés dans le trajet allant de l'Est du Kef, Siliana, Borj Amri.
- la plaine de la basse Mejerda ;
- les couloirs transversaux qui séparent les monts de la Dorsale et de Mogods (couloir Rohia, Ain Bou saïdia, dépression de Nefza…)

Cet ensemble se manifeste dans le BV de Mejerda comme étant une bande qui suit les baisses terres. Il se caractérise par une position d'abri relatif par rapport aux flux pluvieux du Nord-

Ouest qui fréquentent la Tunisie tellienne. Il subit l'effet de canalisation des vents, de l'ouest et de l'est par le cours d'eau de Mejerda, et du Nord-Sud par les dépressions transversales de la Kroumirie et de la Dorsale, et ce pendant toutes les saisons. Dans cette variante, les moyennes annuelles des précipitations sont partout inférieures à 600 mm. On enregistre, aussi, des foyers de chaleur dans les bassins enclavés, notamment, en été. Les niveaux annuels de la DE varient entre 308 mm et 380mm, soit un écart relatif de l'ordre de 18,9%. Les cumuls DE sont plus intenses par rapport à la nuance précédente dans la mesure où les maxima varient le plus souvent entre 100 à 112 mm à Jendouba au mois de juillet. L'analyse des nuances climatiques de cette région permet de retenir les idées suivantes :

- Le climat de cet ensemble se distingue, généralement, par l'établissement de chaque année d'une saison humide et une saison sèche. Il se distingue aussi par la dégradation des conditions climatiques par rapport à la variante précédente. Ceci met en évidence que cet ensemble est moins humide que le premier dans la mesure où l'occurrence des mois pleinement humides diminue et l'occurrence des mois sub-secs augmente.

- La durée de la saison humide oscille entre 4 et 6 mois et sa durée moyenne est de 5 mois. Sur toute la période étudiée, la saison humide s'étend sur 43,3 % à Jendouba et 42,4% à Cherfech de toute la période retenue. On note, donc, une régression de l'occurrence des mois humides par rapport à la première variante. En effet, cette saison prend naissance dès que l'ETR ne couvre que 80% l'ETM, et ce au mois de novembre ou décembre. En revanche, elle s'achève dès que le recouvrement de l'ETR descend à moins de 80% de l'ETM, et ce au mois de mars ou avril. On remarque que le stress hydrique de la végétation dans cette région aura lieu très tôt, par la durée au moins d'un mois, que celui de la région précédente. On assiste ici à la diminution de la fréquence des mois pleinement humides en regard des mois humides dans tout l'ensemble de la région à l'exception de la plaine de la basse Mejerda (Tableau 44). Ceci est dû au fait que ce secteur est plus humide que les autres secteurs. En effet, il contient plusieurs surfaces piézométriques et la majorité des périmètres irrigués de tout le BV de Mejerda. Cette condition entraîne la recharge des sols par l'eau d'irrigation et retarde l'épuisement de la réserve utile par l'ETR. On peut ajouter, à ce propos, que la dégradation du climat dans la région II se fait dans le sens Ouest-est, c'est-à-dire en allant de l'intérieur vers la côte. Cela s'explique par l'effet de la proximité de la mer, qui joue le rôle du régulateur du pouvoir évaporant de l'atmosphère et par conséquent une saison relativement fraîche.

- La saison sèche devient plus longue et se démarque par un stress hydrique relativement intense. Cette intensité découle évidemment de l'occurrence des mois très secs qui prend de l'ampleur et atteint par exemple à Borj Elamri environ 20%. En outre les nuances sèches, en particulier les mois secs, enregistrent des valeurs fréquentielles légèrement élevées par rapport à ses homologues de la première région (17,2% à Jendouba, 17,4 à Cherfech…). La figure 96 montre que le stress hydrique dans l'ensemble de la région II devient plus intense dans la mesure où la part de l'intensité[67] des mois secs prend la première place au lieu de l'intensité des mois humides, à l'inverse des autres stations. Cela signifie que le climat dans cette région

[67] Mois humide ≥ 80%
Mois sub-sec 60 à 80%
Mois sec 40 à 60%
Mois très sec < 40%

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

se dégrade au fur et à mesure qu'on se dirige vers les secteurs sud. Ce résultat se recoupe avec la majorité des travaux des climatologues tunisiens (Henia., 1993 ; Bousnina., 2000 ; Ben Boubaker, 2000 ; El Melki., 2014).

- Dans cette région subhumide on remarque une irrégularité notable au niveau des fréquences de la typologie, notamment, des mois secs. Ceci témoigne que la contrainte hydrique de la végétation subit une grande variabilité temporelle avec l'augmentation des besoins en eau. En effet, les cultures annuelles et les prairies qui occupent la majorité du deuxième secteur (variante subhumide) se distinguent par un stress hydrique très variable en particulier durant la saison sèche. De même, les cultures estivales sont impossibles en l'absence d'irrigation. Cette condition est liée aux caractéristiques de la demande en eau de chaque type des cultures. Ceci confirme que le stress hydrique dans cet ensemble est en fonction beaucoup plus de l'occupation des sols que des conditions climatiques.

- La région des aires abritées est fragmentée, en particulier, dans sa partie sud au niveau des secteurs allant du Kef à Siliana. Elle révèle la variation climatique dans ce territoire. Elle indique aussi la difficulté de tracer et d'identifier les limites et les aires de transition avec la région suivante. Cette configuration montre plutôt une variation climatique qui s'impose, en particulier, dans les bassins intra-telliens et dans les pays du Haut Tell en général. Ceci montre que la variation des conditions climatiques s'amplifie au fur et à mesure qu'on se dirige vers le sud.

- Toutefois, l'exemple des sommets à l'ouest de la Dorsale (au sud et à l'ouest de Tala) aussi expressif soit-il, ne doit nous faire oublier l'effet de l'altitude et la latitude sur la spatialisation des variantes climatiques. En effet, les monts de Jbel Berino et Jbel Bou fna aux frontières Tuniso-algériennes, d'une altitude supérieure à 900 m, présentent des bouts de variante subhumide dans un ensemble franchement semi-aride selon la classification des étages bioclimatiques par les indices d'Emberger.

Tableau 44: Fréquences (en %) des nuances climatiques et typologies des mois dans la région des surfaces abritées (2000-2011).

	Mois pleinement humide	humide	Mois sub-sec 15< DE <50 mm	Mois sec 50< DE < 80 mm	Mois très sec > 80 mm	Total
Jendouba	13,4	29,9	22,0	15,8	18,9	100
	Saison humide 43,3		Saison sèche sans aridité 37,2			
Siliana	17,4	24,2	23,5	17,4	17,4	100
	Saison humide 41,7		Saison sèche sans aridité 40,9			
Borj Amri	20,5	21,2	22,9	18,1	17,3	100
	Saison humide 41,7		Saison sèche sans aridité 41			
Cherfech	18,9	23,5	25,0	17,4	15,2	100
	Saison humide 42,4		Saison sèche sans aridité 42,4			

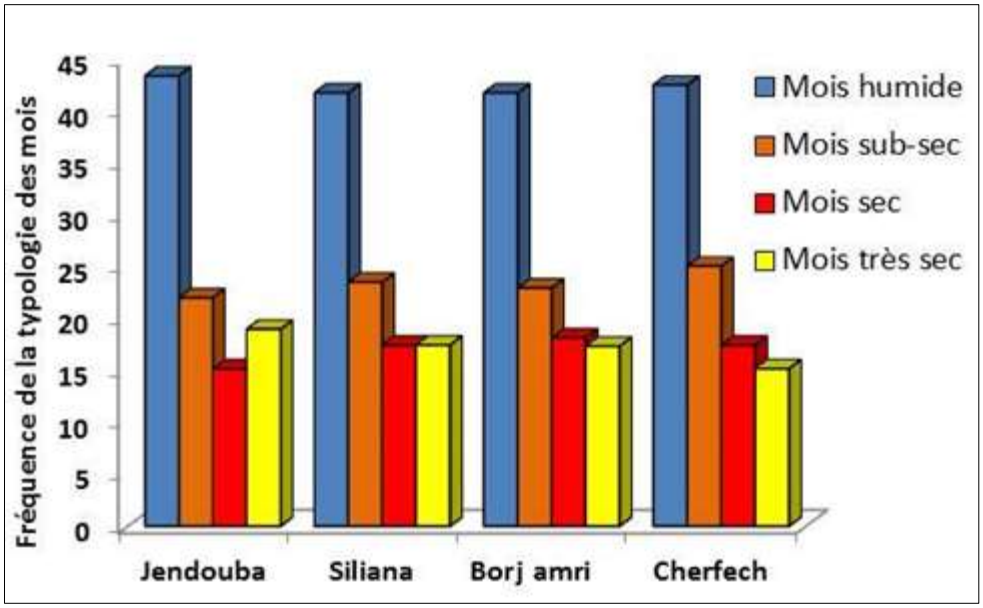


Figure 5: Fréquence (%) de la typologie des mois dans quelques stations de la région des surfaces abritées (2000-2011)

En somme, la variante sub-humide apparaît comme une aire de transition entre les secteurs nord et les secteurs sud du BV de Mejerda. Le stress hydrique devient plus intense et plus irrégulier en pleine saison végétative pour, essentiellement, les cultures annuelles pratiquées dans la région. C'est ici qu'on détecte une grande variation spatiale et variabilité temporelle du stress hydrique. C'est ici qu'on pose la question sur la signification climatique des limites entre la région II et la région III marquée par l'aridité !

9.2.3. La variante semi-aride

La région des plateaux du Haut Tell, représentée sur la carte de synthèse en couleur jaune, est démarquée par une variante semi-aride. Elle englobe les secteurs situés au sud de la haute et la moyenne Mejerda, c'est-à-dire les hauts bassins versants de Mallègue, Tessa et Siliana. Elle regroupe les aires suivantes :

- Les hautes terres de Tala qui ont une altitude allant de 600 à 1200 m environ ;
- Les aires dispersées tout au long des piémonts nord de la Dorsale au niveau de Jbel Bargou et Jbel Serej où l'altitude frôle 500 à 850 m ; jusqu'à aux plaines sud de Borj Amri ;
- La haute vallée du BV de Mallègue où l'altitude loge entre 450 et 700 m.

Tous ces secteurs regroupés dans la région des plateaux du Haut Tell se caractérisent par les foyers les plus froids en hiver où les températures minimales enregistrent des valeurs négatives et où il neige deux à trois fois par ans. Les totaux pluviométriques enregistrés oscillent de 400 à 600 mm. Les cumuls annuels DE varient entre 380 mm à 420 mm, soit un écart relatif de l'ordre de 9,5%, avec un déficit journalier qui varie de 1 à 1,2 mm. Dans cette région on enregistre la faible variation spatio-temporelle de la DE. Aussi, la région se caractérise par des Ke (coefficient d'évaporation) très élevés et des Kc (coefficient cultural) très faibles sur toute l'année c'est pour cela que la DE est intense car les écarts entre ETM et

ETR sont plus au moins importants. En plus que les cumuls élevés du DE un autre problème se pose ici en rapport avec la mauvaise répartition du déficit entre les mois. Dans ces secteurs, l'occupation des sols se qualifie, la plus part du temps, par les terres nues, les cultures annuelles en sec ou les prairies. Lorsque la disponibilité de l'eau est limitante, des quantités plus faibles que l'énergie potentiellement disponible sont dépensées (ETR < ETM), et l'énergie non dissipée par évaporation conduit à un réchauffement de la surface. Au niveau d'une feuille ou d'un couvert végétal, cet échauffement peut atteindre plusieurs degrés. Il est encore plus élevé pour un sol nu et peut atteindre 20 à 30°C dans les situations sèches extrêmes (INRA., 2006).

Les caractéristiques de la région des plateaux du haut Tell sont en relation étroite avec les nuances climatiques qui l'individualise. En effet l'analyse de ces nuances nous permet de retenir les renseignements suivants :

- La région, identifiée par un climat semi-aride, justifie, une autre fois, la dégradation des conditions climatiques dans le BV de Mejerda en allant du Nord au Sud. On remarque également la diminution de la fréquence des mois humides aux profils des mois secs. Il en va de même pour l'intensité de la déficience dont on enregistre environ de 1/3 des mois sont classés en tant que mois sec, indiquant, en effet, le caractère sec de cet ensemble (tableau 31). On remarque aussi que les sommets des montagnes dans cette région sont classés comme étant des secteurs sub-sec et non pas humide comme les autres sommets. Ceci confirme le caractère de dégradation du climat et l'effet de la continentalité.

Tableau 2: Fréquence et intensité DE mensuelle dans la station de Tala (2000-2011)

Fréquence (%)					
pleinement humide	humide DE <15mm	Sub-sec 15< DE <50 mm	sec 50< DE < 80 mm	Très sec DE > 80 mm	total
16,7	21,2	28,8	16,7	16,7	100
Intensité (%)					
humide ≥ 80%	Sub-sec 60 à 80%	sec 40 à 60%	Très sec < 40%		total
30,3	19,7	32,6	17,4		100

- Dans cette région, la saison humide (nous avons considéré qu'une saison humide là où ETR est supérieure à 80% ETM) s'étend sur en moyenne 3 mois, elle est plus souvent de 3 à 4 mois. Elle peut commencer à novembre ou décembre pour se terminer plus tôt à février dans 3 ans sur 11 ans étudiés et plus tard à mars. On peut remarquer, donc, que dans cet ensemble l'achèvement de la saison humide recule au moins d'un mois par rapport aux régions I et II. L'épuisement rapide du stock d'eau dans le sol revient entre autres au réchauffement rapide des sols car ils sont presque à nus. Cela n'empêche pas de conclure que la réserve hydrique des sols se vide rapidement. Dans cette condition, la végétation ressentit le stress hydrique, même au début, de la phase de plein développement végétal. La fréquence et l'intensité des mois humides représentent 37,9 % et 30,3 % sur la période d'étude. Elle présente la particularité que la saison humide coïncide avec la saison hivernale où les valeurs nulles de la déficience d'évaporation reviennent aux totaux pluviométriques importants enregistrés dans la région pendant cet épisode et aussi des faibles ETP. Mais les sols ne sont pas parfaitement

humides que de 15% des jours de l'année (la moyenne de toute la période étudiée). Ceci explique l'humidification des horizons supérieurs des sols avant la reconstitution de la RU qui n'aura lieu qu'au début du mois de décembre (Hammami.O., 2010).

- La saison sèche devient plus longue dans la région des plateaux du Haut Tell. Elle peut couvrir en moyenne 7 à 8 mois successifs. La sècheresse dans cet ensemble se traduit par la fréquence et l'intensité des mois secs à très secs qui sont de l'ordre respectivement 33,4 % et 50 % des mois de toute la période retenue. La sècheresse ici peut avoir lieu plus tôt au mois de mars, ce qui n'est pas le cas pour les régions précédentes (mois avril ou mai). Dans le même ordre d'idée, l'intensité des mois très secs touche 17,4 %. En fait, son importance relève de l'apparition des mois arides durant le mois de novembre et même en octobre ; favorisé surtout par un couvert végétal discontinu et des versants souvent à nu. Ceci est expliqué par le fait que, les sols dans cette région possédant de grands fissures ou crevasses se dessèchent plus vite et à des profondeurs plus grandes que les sols compacts à texture fine. Des sols peu profonds se dessèchent plus vite que des sols profonds lors qu'ils sont exposés aux mêmes facteurs de dessèchement …De plus, le contenu d'humidité d'un sol, desséché par évaporation à travers la surface, croît avec la profondeur. La RU ne reste pas longtemps dans les sols puisqu'elle est destinée à combler la DE à l'opposé de la région I et II. La situation des cultures et des végétaux en général est très difficile et le rendement très médiocre dans la région, en particulier, les cultures estivales sont impossibles en l'absence d'irrigation. Ces conditions témoignent la nuance semi-aride de la région.

- La nuance semi-aride dans cette région découle, sans doute, de l'importante occurrence des mois très secs dans la mesure où les valeurs de l'ETR peuvent atteindre 70 mm, la DE touche 100 mm durant les mois de l'été et aucun stock d'eau dans le sol n'est constitué. À remarquer que cette valeur maximale DE est inférieure à celle enregistrée dans les deux régions précédentes, mais l'ETR ici ne couvre qu'environ 25% de l'ETM. Situation n'est enregistrée que dans la région des plateaux du Haut Tell durant les années agricoles 2007/2008 et 2008/2009. Cette sècheresse capricieuse flétrit et jaunit la végétation et même les arbres de l'olivier et de pin d'Alep, résistants à la sècheresse restent sans fruits. Autrement dit, la floraison et la fructification ne sont pas assurées (Radhouane L., et *al.,* 2007). Toutefois, plus on se dirige vers les sud et vers l'ouest de la région, plus les conditions climatiques se dégradent et plus l'aridité devient distinguée, et ce sous l'effet de la continentalité.

Au total, la région des plateaux du Haut Tell apparaît comme l'ensemble le plus touché par la dégradation des conditions climatiques. C'est la région la plus sèche du BV de la Mejerda. C'est là où les besoins de la végétation sont loin d'être satisfaits. Au contraire, il sévit partout une carence hydrique importante sur environ 2/3 de l'année. C'est à ce niveau que les cultures sèches sont certes pratiquées, mais elles sont très hasardeuses et aléatoires. Par voie de conséquence, on assiste à une baisse assez considérable de production végétale. À ce titre, l'irrigation devient une nécessité vitale pour une pratique rentable des cultures à grande échelle.

9.3. Discussion sur la méthode et les résultats

9.3.1. Évaluation de la méthode

Au terme des analyses effectuées, plusieurs remarques peuvent être faites concernant l'apport de la méthode de la spatialisation de la DE dans le BV de Mejerda. Le contexte climatique du BV de Mejerda rend la spatialisation de la DE plus difficile par la faible disponibilité des données à cause du faible réseau de mesures, les effets de l'hétérogénéité de la topographie et la variabilité de l'occupation des sols rendent la tâche encore plus compliquée. Cependant, d'après les résultats obtenus et leurs recoupement avec d'autres résultats issus des travaux sur la région, (Henia., 1980, 1993 ; Safa Ben Romdhane 2008, Mustapha Riahi., 2012) on remarque une similarité assez nette. En effet, sur le plan spatial, l'individualité se traduit par une gradation latitudinale et altitudinale du climat. Les critères de régionalisation retenus dans ce travail ont abouti à un modèle de zonage qui intègre à la fois des paramètres climatiques, des types de couverts végétaux rencontrés et de l'état du stock d'eau dans le sol. Enfin, la méthode a permis d'obtenir des résultats assez bons, en termes de la répartition géographique du stress hydrique, surtout au niveau de la résolution spatiale. Mais, au niveau du découpage du BV de Mejerda, les résultats ont estompé certaines variations à l'échelle locale parce que la région ne constitue un ensemble ni homogène ni simple. Il est très diversifié sous l'influence de la variabilité de l'occupation du sol, le relief, les sols, et le climat.

La méthode de régionalisation à partir de la DE bien qu'offrant des avantages dans la réalisation de notre objectif présenté au début, montre toutefois un certain nombre de limites, en particulier, dans la détection des limites géographiques entre les différents ensembles. En effet, comme tous les résultats obtenus jusqu'à maintenant, le problème ne se pose pas au niveau du découpage de la région à des ensembles homogènes, mais plutôt au niveau des limites géographiques. Ces limites ne sont pas toujours identiques, elles se décalent d'une méthode à une autre, elles sont souvent floues et parfois contradictoires. En outre, la méthode utilisée peut influencer la qualité des cartes. Elle peut localement lisser les données (non exhaustives) issues d'observations de terrain et les dégrader. Cette double action rend les résultats mitigés quelle que soit la méthode utilisée (Piedallu et *al.,* 2011). De plus, la nécessité de distinguer les nuances climatiques générales de chaque ensemble à estomper certaines variations. Cependant, la répartition végétale n'est pas toujours liée aux paramètres climatiques. Bien qu'on ait développé le long de ce travail le schéma du transfert sol-végétation-atmosphère et on dispose en effet des données d'occupation du sol dans la région, ainsi que son évolution sur la période de 2000 à 2011. Dans cette condition, le facteur stationnel du stock d'eau dans le sol devient alors le facteur déterminant. Par exemple, en période estivale, une végétation à fort développement racinaire sera plus susceptible d'évapotranspirer qu'une végétation herbacée (Ludovic Oudin., 2004). Enfin, faut-il croiser ces résultats avec d'autres paramètres pour voir, encore mieux, la validité de l'approche et la conformité de l'idée rencontrée souvent dans les études climatiques en Tunisie, selon laquelle : les divisions climatiques obtenues semblent assez bien correspondre aux divisions naturelles des formations de la végétation, et permettre comme dans le cas précédent de les caractériser climatiquement ?

9.3.2. Augmenter le degré de confiance par le couplage des résultats issus des différentes classifications

Une démarche inverse pourrait être adoptée afin de voir le degré de confiance de la méthode de zonage pour découper le BV de Mejerda à des ensembles homogènes. Ainsi, plutôt que de focaliser sur des critères offrant les meilleurs résultats, il serait intéressant de superposer certains résultats. Nous avons eu recours à la méthode de régionalisation spatiale des données. Cette méthode semblable à celle des noyaux forts et des aires de transition. Le concept de noyau fort et d'aire de transition s'inspire de l'article de Vincent Dubreuil (1992) appliqué à la classification de l'ETP dans la France de l'Ouest (région Breton). Après classification suivant la méthode de régression multiple, l'auteur distingue des ensembles des régions homogènes (figure 97). En effet, assurer une telle étude, nécessite, outre que les cartes de variation spatiale par des valeurs moyennes, des cartes de noyaux de variation par les méthodes de seuillage. Ainsi, l'approche appliquée ici, en utilisant la méthode de classification non supervisée (K-means), dans la mesure où les classes sont représentées par leur noyau ou nuée, composées de plusieurs éléments ou un seul comme le centre de gravité. Cette approche permet de déterminer les zones climatiquement aptes à porter une culture donnée et ce à partir de l'identification des limites sèches et les limites humides (Merdes 1997).

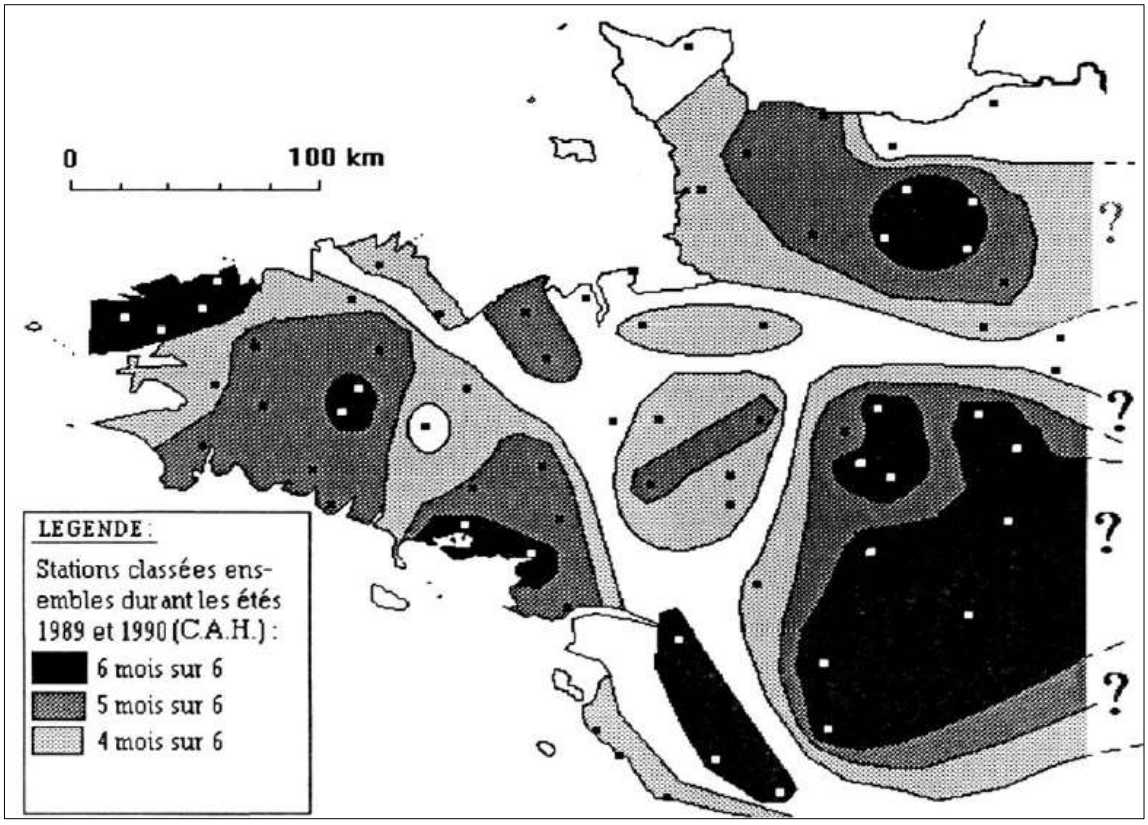


Figure 6: Noyaux forts et zones de transition dans la France de l'Ouest : application à la variabilité mensuelle de l'ETP Penman journalière.

Le principe de la méthode comprend deux étapes : l'étape de compression de l'information est une classification non supervisée qui tend à regrouper les pixels ayant des profils similaires (des valeurs voisines). La phase d'identification des signatures est basée sur un algorithme de recherche statistique et itératif, qui opère, sous l'hypothèse qu'il existe, des pixels très dominés par une classe d'intérêt (Benhaj., 2008). La méthode requiert de fixer le nombre de classes à extraire des données, de localiser arbitrairement le nombre de noyaux et puis les repositionner par itérations successives jusqu'à leur séparation spectrale optimale pour arriver enfin à distinguer des sous-régions homogènes. Elle se base sur l'arrangement des pixels selon des valeurs radiométrique homogènes (ici les valeurs moyennes mensuelles du DE ou les valeurs de l'intensité). Pour cette application, nous avons procédé comme si nous ne connaissions rien du climat du BV de Mejerda et nous avons recueilli au hasard les aires homogènes…classes humides, classes sèches et aires de transition. Pour répondre aux objectifs de ce travail nous avons fixé le nombre de classes recherchées à trois en appliquant la formule de seuillage pour définir les aires sèches et les aires humides de Merdes en 1997. Cette formule est une version du modèle de Stewart donnée dans le bulletin numéro 33 de la FAO (Doorenbos et Kassam, 1987):

(1-ETR/ETM)

On a donc trois classes :

- inférieure à 0,4 aire humide (confort hydrique)
- de 0,4 à 0,6 aire de transition
- supérieure à 0,6 aire sèche (aire inapte)

Cette approche permet d'améliorer la fiabilité et la finesse des découpages climatiques issues de la spatialisation DE et tout point d'appui supplémentaire améliorant la précision finale. La mise en évidence d'une éventuelle sous-division climatique locale de la région.

9.3.3 Discussion

La figure 98 relative à l'identification des limites sèches et humides selon l'indice de déficit hydrique présente, généralement, la même allure que celle de la régionalisation de la DE dans le BV de Mejerda. Ainsi, l'aire humide coïncide avec la nuance humide, l'aire de transition se rapporte à la nuance sub-humide et l'aire sèche s'accole avec la nuance semi-aride. En revanche, elle présente une résolution spatiale plus fine que la précédente, surtout, dans les régions abritées. Cette figure apprécie le degré de stress hydrique dans chaque secteur et bien différencie les limites humides et les limites sèches[68].

[68] Les limites sont représentées manuellement tout en tenant compte de la continuité de l'aire en question.

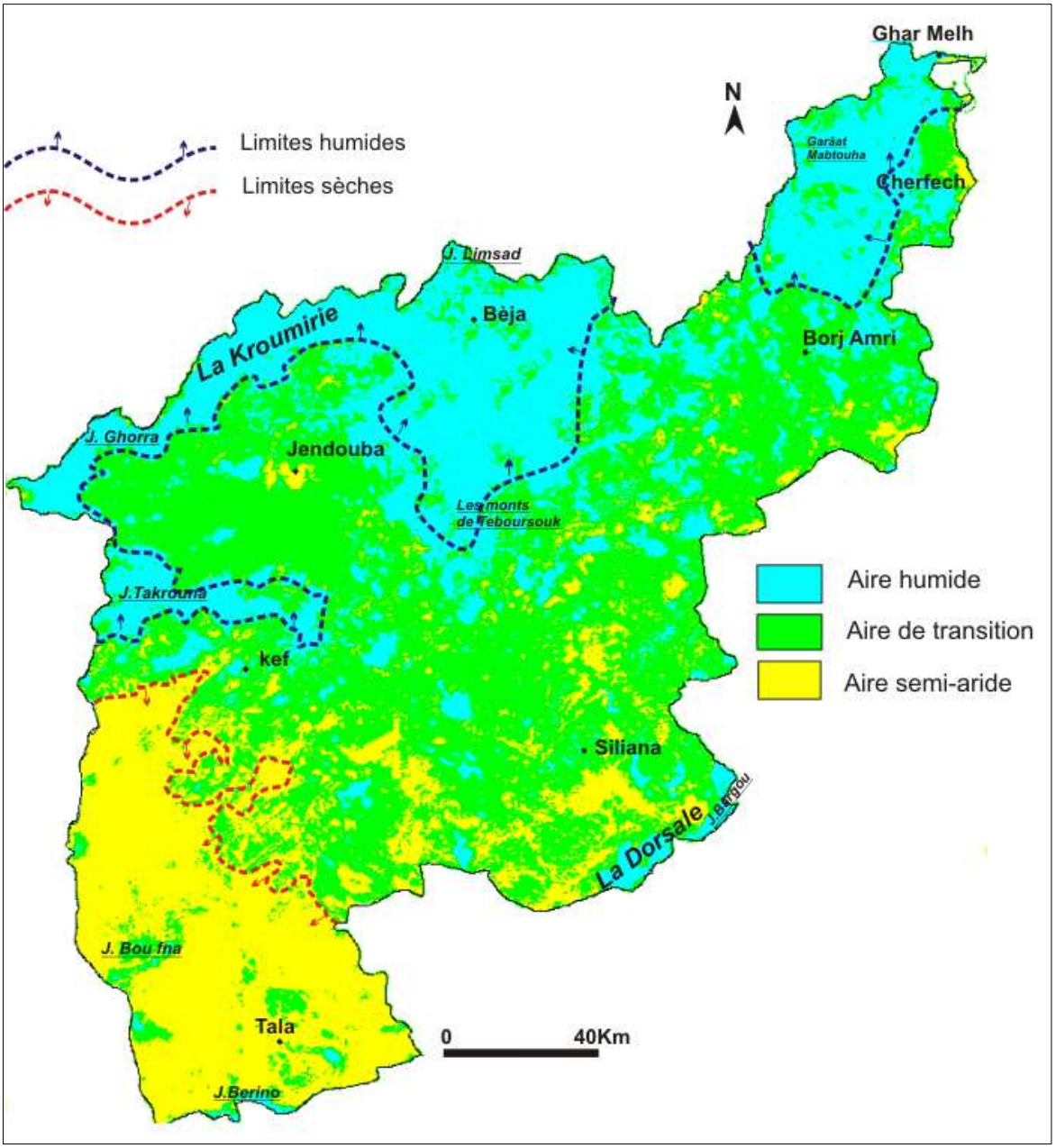


Figure 98: Identification des limites sèches et humides selon l'indice de déficit hydrique dans le BV de la Mejerda (2000-2011)

À y regarder de plus près, les aires des montagnes conservent le même schéma entre les deux cartes. Cela nous renseigne que les secteurs élevés dans le BV de Mejerda se rapportent, toujours, aux nuances humides quelle que soit l'approche utilisée. Elles sont bien individualisées par un climat moins variable. D'ailleurs, la régularité de la demande et la déficience évaporatoire est enregistrée dans ces territoires. La même remarque s'applique, mais dans une moindre mesure, sur les plateaux sud du Haut Tell. Ici, règne les aires semi-arides où on enregistre des indices de déficit hydrique supérieurs à 0,6. Sans doute, sous l'effet de la continentalité bien marqué dans ces secteurs. Par ailleurs, les aires de transitions sont distribuées partout dans le BV de Mejerda, avec des noyaux bien localisés sur les vallées

à l'intérieur de la région. Elles sont disséquées par les aires humides dans les secteurs nord et par les aires sèches dans les secteurs sud. Ceci, témoigne d'une part la dégradation du climat du Nord au Sud et d'autre part la grande variabilité climatique dans les bassins abrités au milieu de la région. À remarquer enfin, que la basse vallée de Mejerda glisse de la nuance sub-humide vers les aires humides, sous l'effet modérateur de la mer et la fréquence des surfaces humides dans la région.

Comme nous l'avons déjà annoncé dans ce chapitre, cette partie présente une tentative de valider les résultats du zonage du DE dans le BV de Mejerda et de fixer dans la mesure du possible les limites de chaque sous-régions. En fait, les résultats obtenus mettent en évidence la difficulté de la tâche et la complexité du problème du découpage régionale. Un fait semble certain, c'est que les limites sont très variables et flous. Une constatation déjà affirmée dans tous les travaux précédents. Ceci s'explique par les facteurs géographiques du climat de la Tunisie qui sont responsables de la très grande variation climatique (Coord. Hénia L. 2015).

Conclusion

Les critères et les seuils que nous avons retenus dans ce chapitre permettent de décrire, d'une manière détaillée, le statut de la DE dans le système sol-plante-atmosphère. Ils permettent aussi de montrer la diversité des climats et les facteurs influençant d'un secteur à un autre dans le BV de Mejerda. Cependant, l'approche utilisée aboutit à un zonage global de la région à la base du déficit hydrique de la végétation. Mais, à l'échelle locale, les nuances ne sont pas établies étant donné que de tels critères et seuils appliqués à la régionale, ne sont pas toujours compatible au niveau local (par exemple à l'échelle parcellaire).

Malgré les imperfections, le découpage climatique obtenu de la région étudiée, montre une assez bonne correspondance avec l'occupation du sol, les caractéristiques du stock d'eau dans le sol et les facteurs géographiques. Par contre la correspondance avec le découpage de la région en sous-bassins versants n'est pas assurée ici. L'intérêt de ces résultats est de définir, différencier et identifier les grands secteurs dans le BV de Mejerda, et ce pour connaitre les propriétés hydriques et les exigences écologiques de la végétation.

Le BV de Mejerda est figuré en trois variantes géographiques et climatiques différentes. En effet, une nuance humide sur les montagnes et les versants sud de la Kroumirie. La nuance franchement semi-aride gagne tous les secteurs du sud-ouest de la région. Également, les régions abritées se rattachent à une nuance sub-humide où la variabilité climatique s'amplifiée.

CONCLUSION DE LA TROISIEME PARTIE

Le suivi de la DE fait apparaître que le BV de Mejerda s'inscrit dans un climat très variable qui se caractérise, notamment, par un régime hydrique variant de l'humide au semi-aride. La DE calculée au pas de temps mensuel souligne la variabilité spatio-temporelle du stress hydrique de la végétation. Sa fréquence et son intensité soulignent, en particulier, la sensibilité des secteurs abrités au stress hydrique. En outre, l'intensité de la DE est ressentie dès la phase de développement végétal.

La prise en compte de l'interaction sol-plante-atmosphère et l'intégration de plusieurs critères pour le zonage de la DE, offrent une nouvelle lecture des contraintes hydriques de la végétation, le schéma régional du BV de Mejerda est également une connaissance plus exacte de son potentiel climatique. Cette région présente un modèle assez complexe formé de plusieurs unités à dynamique différenciée sous l'effet d'une topographie accidentée, un cycle de développement de la végétation centré sur les forêts de chêne vert et les grandes cultures et une réserve hydrique qui varie d'un secteur à un autre.

Enfin, le suivi de la DE a permis de comprendre le fonctionnement d'un écosystème diversifié et complexe en évaluant les potentialités des états de végétations, de l'humidité des sols et du pouvoir évaporant du climat. Nous avons montré que l'approche utilisée s'adapte mieux à l'échelle régionale dans la mesure où elle offre la possibilité d'une représentation spatiale complète et dynamique du BV de Mejerda. Mais, à l'échelle locale (parcellaire) l'approche nécessite des réserves et de la prudence. Cela étant, nous pensons qu'une finalisation plus poussée des méthodes utilisées et des seuils retenus aurait certainement conduit à des résultats plus adéquats.

CONCLUSION GENERALE

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

CONCLUSION GENERALE

L'objectif principal de ce travail est de cerner l'évapotranspiration dans le BV de la Mejerda. L'approche climatique basée sur la méthode de la FAO-56 a été utilisée, avec des données multi-sources : celles des stations météorologiques, des mesures de terrain, des images satellites et des données cartographiques et statistiques. Nous avons montré dans quelle mesure des modèles issus de l'interaction sol-plante-atmosphère et la télédétection spatiale peuvent être combinés pour accéder à une présentation spatiale et dynamique de l'évapotranspiration à une échelle régionale. Ceci permet de voir aussi, à quel point on peut considérer cette région comme une unité à singularité climatique, ou bien une unité qui présente des diversités dans la Tunisie tellienne. Deux volets sont à retenir pour cette étude :

Principaux résultats

Plusieurs travaux décrivant des méthodes d'estimation de l'évapotranspiration et le stress hydrique des cultures ont été conduits à l'échelle de la parcelle, la complexité des variabilités du paysage limitant leur extension à l'échelle régionale. C'est dans ce contexte que se situait l'objectif principal de notre étude qui visait à tester la pertinence de la télédétection spatiale et des SIG, pour déterminer de manière spatialisée l'évapotranspiration dans le BV de la Mejerda. En effet, les principaux résultats obtenus montrent qu'il est possible de modéliser spatialement, avec une résolution fine (250 m) les trois types de l'évapotranspiration (ETP, ETM et ETR) et la déficience d'évaporation. Cependant, ces résultats ont révélé que la méthode sous-estime l'ETM dans les surfaces à sols nus, dans la mesure où elle est appliquée uniquement pour la végétation agricole. À cette fin, la calibration et la validation de cette méthode sont nécessaires, en particulier pour le coefficient d'évaporation (Ke). *« Un des défis les plus importants à relever pour ce type d'application est le développement des possibilités de prévision, nécessaire à son usage pleinement opérationnel, mais tributaire de nombreuses incertitudes sur les données d'entrée »* Simonneaux et *al*., 2009.

Ce travail répond à l'objectif de mieux comprendre les transferts d'eau et d'énergie dans le système sol-végétation-atmosphère, à l'échelle d'un bassin versant de couvert hétérogène. Nous avons montré que le modèle de la FAO-Penman-Monteith est bien adapté pour le cas du BV de la Mejerda, en particulier, avec l'intégration des paramètres bien déterminés. Ainsi, la carte de l'occupation du sol permet de spatialiser les besoins en eau de la végétation et de présenter en détail la réalité du terrain. L'humidité du sol permet de déterminer la taille des réserves utiles des sols disponibles pour les plantes et, par la suite, cerner au mieux le stress hydrique de l'espèce végétale. Quant au Modèle Numérique du Terrain, il permet de suivre l'effet du relief sur l'évapotranspiration et de déterminer le gradient altitudinal. L'utilisation de ces paramètres est innovante en ce qui concerne les études de climatologie en Tunisie, puisque jusqu'à présent la plupart des études considéraient une taille de réserve utile moyenne unique pour tout le territoire, des valeurs des coefficients culturaux issus de la littérature et des mesures climatiques ponctuelles. Mais le modèle sous-estime l'ETP dans les hautes terres de Tala. Ceci est dû à l'impact de l'advection. Ce modèle fonctionne dans des

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

conditions de stabilité atmosphérique il sous-estime donc l'ETP dans les régions venteuses (Nasr., 2002 ; Egypte., 2006 ; Jabloun., 2008).

Les niveaux moyens de l'ETP dans le BV de la Mejerda sont assez élevés mais ils sont aussi très variables dans le temps comme dans l'espace. Ces variations temporelles sont dues à plusieurs paramètres. Le maximum d'été est tributaire des températures élevées, une durée d'insolation importante et des records de rayonnement global. Le minimum de l'hiver est lié aux fréquences de type de temps perturbés sur la région. Par contre, la variation spatiale de l'ETP est rapportée à l'effet d'une topographie accidentée et à l'effet de la latitude. Les valeurs de l'ETM sont relativement élevées. Elles manifestent une répartition spatiale dans le sens inverse de l'ETP, et ce en rapport avec les caractéristiques de l'occupation du sol dans la région. Quant à l'évolution temporelle, elle est guidée par le cycle de développement végétal. Les quantités de l'ETR témoignent que la végétation dans le BV de la Mejerda est soumise à une demande évaporative prononcée, surtout en été. L'allure générale de l'ETR s'explique, en plus des facteurs climatiques, par le statut de la réserve utile. En effet, cette réserve n'est disponible, pratiquement, qu'en hiver au-delà la quantité d'eau disponible pour la végétation diminue progressivement jusqu'à l'épuisement presque total en été. Nous avons observé une grande variation spatiale des niveaux ce l'ETP, l'ETM et l'ETR selon la topographie, grâce à l'intégration du MNT et le SIG. Ces niveaux augmentent avec l'altitude, traduisant donc, un gradient altitudinal qui se diffère d'un secteur à un autre. En effet, ce gradient est plus prononcé sur les versants de la Kroumirie et il est un peu plus faible sur les versants de la Dorsale (Mjejra et *al.,* 2015).

Le suivi de la déficience d'évaporation a montré que la végétation dans le BV de la Mejerda est soumise à un stress hydrique important. Cette contrainte touche la période de floraison et elle devient de plus en plus grave au cours de l'été. Ce stress est un phénomène fréquent même dans les secteurs pluvieux dans la région. De plus, sa fréquence et son intensité confirment que la vulnérabilité de la région aux contraintes hydriques en général reste élevée. La spatialisation du stress hydrique reflète aussi un gradient décroissant avec l'altitude, mais il est plus intense sur les versants au vent et perd son ampleur sur les versants sous le vent. La régionalisation de la déficience d'évaporation révèle que le BV de la Mejerda se caractérise par l'alternance de trois nuances régionales en faisant le passage du Nord au Sud. La nuance humide dans les secteurs des versants et des sommets, la nuance sub-humide dans les secteurs abrités et la nuance semi-aride des hautes terres telliennes. Mais, au sein de cette configuration, nous observons une diversité assez nette, notamment dans la variante sub-humide. Nous avons montré aussi que la nuance humide se dégrade avec l'altitude où nous avons déterminé certains seuils altitudinaux. Cette nuance se voit clairement à une altitude de 500 m dans les secteurs sud et elle n'aura lieu qu'à une altitude de 800 à 900 m dans les secteurs sud et ce en fonction de la latitude et les étages de végétation. Seuls les sommets de la Kroumirie et les zones humides de la basse Mejerda ne connaissent pas des mois très secs où le stress hydrique n'a pas d'effet sur la croissance de la végétation.

En définitive, le schéma spatial et dynamique de l'évapotranspiration et de la déficience d'évaporation est compatible avec la carte de l'occupation du sol, l'état de la réserve utile dans le sol, les facteurs radiatifs, les facteurs advectifs et l'effet du relief. Le point essentiel ici, et qui marque l'originalité de ce travail c'est l'intégration de la carte

d'occupation du sol dans les études de la climatologie et ce par le biais des potentialités de l'imagerie satellitale MODIS. Cependant, nous n'avons pas pu confronter nos résultats à des mesures de terrains issues d'expérimentations comme c'est souvent le cas dans la phase de validation d'un modèle. Mais la technique de la télédétection à moyenne résolution spatiale représente le gage de simulations encourageantes et cohérentes avec les résultats des autres travaux (Henia., 1993 ; Feki., 2006 ; Ben Romdhane., 2008 ; Amri., 2013), dans la mesure où nous avons constaté certains recoupements.

Les perspectives

La première perspective de ce travail est d'ordre cartographique : établir des cartes de la réserve utile dans le sol par le biais de la télédétection radar, et ce pour suivre le stock d'eau disponible pour la végétation ; établir des cartes plus détaillées de l'occupation du sol avec la possibilité de l'utilisation d'une résolution spatiale très fine (Landsat 30m) et détailler les classes de l'occupation des sols pour chercher plus de précision. Ceci a pour objet d'aboutir à une typologie d'évapotranspiration et de la déficience d'évaporation pour chaque type d'occupation des sols et à une échelle spatiale plus fine.

La méthode est appliquée à une échelle régionale, il serait intéressant de la tester, premièrement, sur des échelles plus fines celle de la placette par exemple afin d'évaluer l'approche et deuxièmement, pour les différentes variétés des cultures dans la région. Ceci pose évidemment des problèmes de calibration de la méthode, en particulier, dissocier le coefficient de la transpiration de la végétation et le coefficient de l'évaporation du sol. En outre, essayer de transposer le modèle pour suivre l'état réel du stress hydrique de la végétation à l'échelle décadaire ou journalière et ce pour l'échelle parcellaire avec une résolution de 250 m. Ceci vise à améliorer nos travaux de spatialisation du modèle et à préciser le calcul d'évapotranspiration en intégrant d'autres indicateurs.

Les travaux récents sur le réchauffement climatique du GIEC confirment l'accentuation du déficit pluviométrique et par suite une accentuation de la sécheresse agricole. Celle-ci est fréquemment accompagnée d'une hausse des températures, qui intervient sur la physiologie des plantes et les flux du bilan hydrique via l'évapotranspiration et un raccourcissement de la durée des cycles des cultures (Seguin et *al.,* 2005). Il mérite donc, de suivre la déficience d'évaporation dans ce contexte de changement climatique, et ce pour voir s'il y a une tendance à l'augmentation des sécheresses dans la région et quel est le degré de son évolution probable dans l'avenir. De même, évaluer le degré de la vulnérabilité du BV de la Mejerda aux contraintes hydriques dans les secteurs fragiles**,** en particulier, le delta de la Mejerda, qui constitue une plaine lacustre, marécageuse très fragile et menacée sous l'effet de l'Élévation Accélérée des Niveaux de la Mer à cause des Changements Climatiques (MEAT., 2001).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABDERRAHMAN A., HENIA L., et HLAOUI Z., 2013 : contribution à l'étude de la saison des pluies en Tunisie : variabilité des marges et fréquences des épisodes secs. 26éme colloque de l'Association Internationale de Climatologie. Cotonou-Bénin, pp. 31-36.

ABDERRAHMAN A., 2009 : *Les intensités des pluies dans la Tunisie orientale*. Thèse de doctorat, Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis. 310 p.

AIT BELAID M., 1994 : Les systèmes d'information pour l'environnement : Développement et formation. *Géo-observateur,* **vol 5** : 61-69.

ALLEN R.G., PEREIRA, L.S., HOWELL. T et JENSEN M., 2011: Evapotranspiration information reporting: Factorsgoverning measurement accuracy. *Agricultural Water Management* **98** (6), pp. 899-920.

ALLEN R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., et SMITH, M., 1998: Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. *Irrigation and Drainage Paper* **No. 56**, FAO, Rome, Italy, 300p.

ALLEN R.G., SMITH, M., PERRIER, A., et PEREIRA, L.S., 1994: An update for the definition of reference evapotranspiration. *ICID Bulletin* **43 (2)**, 1-92.

AMRI R., 2013 : *Estimation régionale de l'évapotranspiration sur la plaine de Kairouan (Tunisie) à partir de données satellites multi-capteurs*, Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse, 176 p.

AMBROISE B., 1998. *La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin-versant. Processus, facteurs, modèles*. Éditions H.G.A, Collection Tempus, Bucarest, 200 p.

AGHRAB A., 2005 : *Étude de la sécheresse au Maroc : types, impacts, gestion, caractérisation et alerte précoce*. Edition Le Manuscrit 122 p.

ASSOCIATION CLIMATOLOGIQUE DE L'HÉRAUT., 2008 : *Les indicateurs de changement climatique sur le département de l'Héraut.*Rapport sur 5 paramètres climatiques, 39 p.

AYENEW T., 2003: Evapotranspiration estimation using thematic mapper spectral satellite data in Ethiopian rift and adjacent highlands. *Journal of Hydrology*, **vol. 279**, pp. 83-93.

BACCOUR H, FEKI H, SLIMANI M, CUDENNEC C, 2012a : Interpolation de l'évapotranspiration de référence en Tunisie par la méthode de krigeage ordinaire. *Revue Sècheresse,* **vol. 23, n°2**, pp 21-132.

BACCOUR H., SLIMANI M., et CUDENNEC C., 2012b : Structures spatiales de l'évapotranspiration de référence et des variables climatiques corrélées en Tunisie. *Hydrological Sciences Journal*, **57** (4), pp. 818–829.

BARGAOUI Z., HOUCINE A., et DAKHLAOUI H., 2012 : L'estimation de l'évapotranspiration réelle : quels réseaux de suivi ? *Colloque International les 4, et 5 juin 2012*. Constantine (Algérie).

BARGAOUI Z., HOUCINE A., et DAKHLAOUI H., 2008 : Modélisation pluie-débit et classification hydro-climatique ». *Revue des sciences de l'eau*, **vol. 21**, n° 2, pp. 233-245.

BALAJI N., et RAGHAVAN S., 2002: Determination of Regional Scale Evapotranspiration of Texas from NOAA – AVHRR satellite. *Final Report Submitted to Texas Water Resources Institute,* 16 p.

BAJJI M., 1999 : *Étude des mécanismes de résistance au stress hydrique chez le blé dur. Caractérisation de cultivars différents par leurs niveaux de résistance à la sécheresse et de variants somaclonaux sélectionnés in vitro*. Thèse de Doctorat. Faculté des Sciences. Université catholique de Louvain. 188p.

BELLIL M**.,** 1979 : Le climat de la Tunisie, les Atlas Jeune Afrique.

BELLIL M**.,** 1978 : *Étude de la température et de quelques phénomènes climatiques particuliers dans la haute vallée de la Medjerda et ses régions de bordure,* Mém. C.A.R., Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis, 273 p.

BELTRANDO G. 2004 : *Les climats - Processus, variabilité et risques*. Armand Colin, Paris : 266p.

BELTRANDO G., et Chémery L., 1995 *: dictionnaire du climat*. Larousse, 344 p

BENHADJ I., 2008 : *Observation spatiale de l'irrigation d'agrosystèmes semi-arides et Gestion durable de la ressource en eau en plaine de Marrakech.* Thèse de l'Université de Toulouse, 296 p.

BEN BOUBAKER H., 2009 : Fortes chaleurs et topoclimat thermique à Siliana (Tunisie tellienne). Géographie et Développement, **7**, pp. 57-87.

BEN BOUBAKER H., 2006 : Évaluation des dispositifs d'alerte précoce à la sécheresse existants à l'échelle nationale – cas de la Tunisie, Expertise dans le cadre du *projet SMAS/OSS*. Rapport de l'étude, 80 p + annexes.

BEN BOUBAKER H., BENZARTI Z., et HÉNIA L., 2003 : Les ressources en eau de la Tunisie : contraintes du climat et pression anthropique. *Revue eau et Environnement*, Tunisie et milieux méditerranéens, ENS Éditions, pp. 37-52.

BEN BOUBAKER H., 2000 : *Les gradients climatiques en Tunisie : application à la température et à la pluie.* Publication FLAHM, 324 p.

BEN HASSINE H., BEN SLIMANE D., et SAYARI C., 2012 : Effet de la pluviométrie sur la variation des réserves hydriques des sols cultivés en zone semi-aride tunisienne. Can. J. Soil Sci. **92**: 367-377.

BEN HASSINE H., BEN SALEM M., BONIN G., BRAUDEAU E., et ZIDI C., 2003 : Réserve utile des sols du Nord-Ouest tunisien. *Étude et Gestion des Sols,* **Volume 10**, **1,** pp 19 -33

BEN HASSINE H., 2002 : *Étude de l'évolution des propriétés chimiques et physico-hydriques des principaux types de sols céréaliers du Nord-Ouest tunisien. Effets sur les productions céréalières*. *Thèse*, Université de Provence, Aix-Marseille I, 299 p+ annexes.

BEN DAKHLIA F., 2005 : Programme d'analyse numérique des données satellitaires NOAA. *Note technique.* I.N.M, Tunis. 30 p.

BEN DAKHLIA F., 2003a : Logiciel d'analyse numérique de données HRPT/NOAA, *Note technique I.N.M*, Tunis, 60 p.

BEN DAKHLIA F., 2003b : avertissement à l'irrigation : contribution à l'estimation de l'évaporation régionale combinée aux indices dérivés satellitaires HRPT/NOAA, *Note technique I.N.M,* Tunis, 30 p.

BEN DAKHLIA F., 1995 : Caractéristiques générales du climat de la Tunisie, p. 63-90, in Nabli et *al*., *Essai de Synthèse sur la végétation et la phytoé- cologie tunisiennes, II et III, le milieu physique et la végétation, écologie végétale appliquée*, Tunis, 542 p.

BEN DAKHLIA F., 1994 : Le bilan hydrique agro-météorologique actuel et prévu pour le suivi de la sècheresse agricole. Note technique INM Tunis. 32 p.

BEN DAKHLIA F., 1993 : L'environnement agro-climatique tunisien des systèmes agricoles concernant la culture pluvialme de l'orge. *The Agrometeorology of Rainfed*, Barley Farming Systems. ICARDA.- Syrie

BEN DAKHLIA F., 1987 : La prévision agro-météorologique céréalière : cas du blé en Tunisie. INM-Tunis, 330 p + annexes.

BEN ROMDHANE S., 2009 : *Régionalisation bio-climatologique de la Tunisie : essai de classification dynamique à partir de l'imagerie NOAA*. Mémoire de Mastère, **FLAH** Manouba, 101 p.

BENZARTI Z., 1975 : *Étude de climatologie agricole du nord de la Tunisie*. Thèse de 3éme cycle, Université Paris7, 170 p.

BENZARTI J., 2008 : Aménagement de l'environnement agricole et indicateur bioclimatiques d'efficience : application aux périmètres irrigués aménagés avec brise-vent. in «Gammar A. et Ben Boubaker H.: *Bioclimatologie et Topoclimatologie*», Université de Manouba, pp. 89-106.

BENJAMIN B., 2007 : *Cartographie agro-climatique à meso-échelle : méthodologie et application à la variabilité spatiale de climat en Gironde viticole. Conséquences pour le développement de la vigne et la maturation du raisin.* Thèse, Université de Bordeaux1, 201 p.

BEN NACEUR M'BAREK., MOUNIR NAILY., et MOHSEN SELMI., 1999: Effet d'un déficit hydrique, survenant a différents stades de développement du blé, sur l'humidité du sol, la physiologie de la plante et sur les composantes du rendement. *MEDIT*, **n°2**/1999. Pp 53-60.

BERG A., 1986 : Contribution de la télédétection comportant le suivi de paramètres météorologiques et bio-climatologiques, *la Météorologie, **VIIe série***, pp.14-31.

BEAUDOIN J., 1978 : *Étude de l'évaporation et l'évapotranspiration dans l'Estrie*. Mémoire de M.Sc., Département de géographie, Université de Sherbrooke, 145p.

BENKRID E., 2008 *: Étude de l'évolution spatio-temporelle de l'occupation du sol dans la plaine du Bas Chéliff (Algérie)*, Mémoire de M.Sc., 54p

BENOÎT S., SANOUSSI A., et LUC K., 2012 : Revue des indices climatiques utilisés dans les systèmes d'assurances agricoles indicielles en Afrique. *Revue Sècheresse ;* **23** ; 255-260

BENNANI S., OUATTAR S., et ISMAILI M., 1992 : Modèle de quantification des déficits hydriques subis par des blés de différentes durées de cycle en climat méditerrané en subhumide (Saîss, Maroc). *Cahiers Agricultures* **1**: pp. 341-347.

BINDLISH R. and BARROS A.P., 2000: Multifrequency soil moisture inversion from SAR measurements with the use of IEM, *Remote Sensing of Environment*, vol.71, pp. 61-88.

BORTOLI L., et BELKHOUDJA K., 1973 : *Sols de Tunisie. Les sols de la Tunisie septentrionale*. Bulletin de la division des sols, V: 186 p.

BORTOLI A., 1967 : *Climatologie et bioclimatologie de la Tunisie*. Annales de l'Institut National de la Recherche Agronomique de Tunis (INRAT), 42, fasc.1, 235 p.

BOUSNINA A., 2000 : *Variations et variabilité des températures en Tunisie 1901-1985*, Deuxième série, Géographie, Pub de l'Université de Tunis, II Tome.

BOUSNINA A., 1986 : *La variabilité des pluies en Tunisie*. Deuxième série, Géographie, vol. 22, 1–308. Pub, de l'Université de Tunis.

BOUSSEMA M. R., et ENNABLI M., 2004 : Suivi spatio-temporel de l'état hydrique de la végétation dans le nord-ouest de la Tunisie par imagerie satellitaire. **17^{éme}** *colloque de l'Association Internationale de Climatologie,* Caen.

BOUSSEMA, M. R., 1989 : Interprétation de données multi-sources pour l'étude du système hydrographique du delta de la Medjerda et de la sebkhet er Riana. In *Apport de la télédétection à la lutte contre la sècheresse*, P. La France et J.-M. Dubois (réd.). Collection Université Francophone-Actualité Scientifique, Éditions *AUPELF-UREF* et *John Libbey Eurotext*, Paris, pp. 29–34.

BOULET G., 2011 : *Modélisation, spatialisation et assimilation des données de la télédétection pour la gestion de l'eau des milieux semi-arides*. Hydrology, Université Paul Sabatier Toulouse III, 85 p.

BOULET, G., CHEHBOUNI, A., GENTINE, P., DUCHEMIN, B., EZZAHAR, J. and HADRIA, R., 2007: Monitoring water stress using time series of observed to unstressed surface temperature difference. *Agricultural and Forest Meteorology*, **146(3-4)**: 159-172.

BOULET G., CHEHBOUNI A., BRAUD I., VAUCLIN M., HAVERKAMP R. and ZAMMIT C., 2000: A simple water and energy balance model designed for regionalization and remote sensing data utilization. *Agricultural and Forest Meteorology*, **105(1-3)**, pp. 117-132.

BRAHMI N., HATIRA A., et RABIA MOHAMED-CHEDLY., 2010: Contribution de la télédétection et des systèmes d'information géographique à la prise en compte du risque de prolifération des Aedes dans les zones humides de Bizerte (Nord de la Tunisie). *Revue Physio-géo*, Vol 4, 2010 ; pp. 151-168.

CALANCA P., SMITH P., HOLZKÄMPER A., et AMMANN., C., 2011 : L'évapotranspiration de référence et son application en agrométéorologie. *Recherche Agronomique Suisse* **2** (4), pp. 176–183.

CALANCA P., HOLZKÄMPER A., 2010 : Conditions agro-météorologiques du Plateau suisse de 1864 à 2050. *Recherche Agronomique Suisse* **1**(9), pp. 320-325.

CALOZ R., et PECH C., 1996 : Hydrologie et imagerie satellitaire, in « *Précis de Télédétection, volume **2**, Applications thématiques* », UREF/AUPELF ed.

CAMPOS I., BOTETA L., BALBONTÍN C., FABIÃO M., MAIA J., and CALERA A., 2012: Remote sensing based water balance to estimate evapotranspiration and irrigation water requirements. Case study : grape vineyards. *Options Méditerranéennes* : Série B. Études et Recherches, **n. 67**, pp. 85- 94

CAMILLE S., 2012 : hydrologie spatiale pour le suivi des sècheresses du bassin méditerranéen. Thèse de Doctorat., Université de Toulouse. 197 p.

CAPUS P., 1984 : étude de l'évapotranspiration dans un bassin versant à faible étendue, *Recherche hydrauliques,* pp 177-187.

CAROLINE P., ROBERT L., JEAN ROUSSELLE., et SÉBASTIEN G., 2005 : Modélisation de l'évapotranspiration réelle à l'échelle régionale pour des bassins versants situés dans la forêt boréale. Can. *J. Civ. Eng*. **32**, pp 839–852.

CESARI V., et DOUGUEDROIT A., 2003 : Diminution altitudinale du stress hydrique estival de la végétation méditerranéenne d'après le NDVI. *Publication de l'Association Internationale de Climatologie, Vol. 15,* pp. 57-64.

CHABAANE Z L., DUCHESNE J., NICOLAS H., et RIVOAL R., 1999 : *Élaboration d'un indice de quantification de stress hydrique d'origine pathologique par télédétection*. Presented at 8. Journées scientifiques du réseau télédétection de l'AUF, Lausanne, CHE (1999-1122 /1999-1125).

CHAMAYOU H., 1994 : *Éléments de bioclimatologie.* PUF, 283 p.

CHARFI S., 2012 : La température dans l'agglomération de Tunis : comportement spatio-temporel. Thèse de doctorat, de l'Université de Tunis en cotutelle avec l'Université de Nice Sophia-Antipolis, 312 p.

CHARFI S., ET HENIA L**.,** 2007 : Variation spatiale et tendance de la température dans la ville de Tunis et ses environs : l'apport des données conventionnelles, *Actes du XXème colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, *Tunis,* pp. 181-186.

CHARLIER I., 1999 : *Manuel de l'utilisateur windisp 4.0*. FAO, Rome. 113p

CHAMAYOU H., 1994 : *Éléments de bio-climatologie.* PUF, 283 p.

CHEBBI R., PREVOT L., JACOB F., et VOLTZ M., 2014 : Quantification de l'évapotranspiration réelle a l'échelle d'un bassin versant agropastoral du semi-aride. *Revue des Régions Arides - Numéro Spécial* - **n° 35** (3) - Actes du 4ème Meeting International ''Aridoculture et Cultures Oasiennes : Gestion des Ressources et Applications Biotechnologiques en Aridoculture et Cultures Sahariennes : perspectives pour un développement durable des zones arides, 17-19/12/2013, pp 785-793.

CHEBBI, R. 2009 : *Observation et caractérisation des échanges d'eau et d'énergie dans le continuum sol-plante-atmosphère en condition de relief collinaire. Cas du bassin versant Kamech, Cap Bon, Tunisie*. Thèse de Doctorat Montpellier SupAgro, France. 292 p.

CHERIF A., 1998 : Eau et espace dans la basse vallée de la Mejerda : approche diachronique ; Cahiers de SERES, *série géographie*, **n° 20**, pp. 101-129.

CHOISNEL E., 1993 : Le risque sécheresse en agriculture. *Chambres d'agriculture*, supplément au **n° 807**, janvier, pp. 6-12.

CHOISNEL E., 1992a : L'analyse du bilan hydrique en agro-météorologie. *La Météorologie*, Série 7*,* **n° 43-4**4, pp. 31-41.

CHOISNEL E., 1992b : Le calcul du bilan hydrique du sol : options de modélisation et niveaux de complexité. *Science du sol*, **30**, **1**, pp. 15-31.

CHOISNEL E., O. DE VILLELE et LACROZE F., 1992 : *Une approche uniformisée du calcul de l'évapotranspiration potentielle pour l'ensemble des pays de la Communauté européenne*. *EUR* 14223, 177 p.

CHOISNEL E., 1988 : Estimation de l'évapotranspiration potentielle à partir des données météorologiques. *La Météorologie* **7**e série**, 23**, pp. 19-27.

CHAPONIÈRE A., 2005 : *Fonctionnement hydrologique d'un bassin versant montagneux semi-aride - Cas du bassin versant du Rehraya (Haut Atlas marocain).* Thèse de l'institut national Agronomique Paris Grignon, 268 p.

CHOPART J-L, MÉZINO M, et NATIVEL R., 2003 : *Fluctuation saisonnière de l'évapotranspiration (ET0 Penman-Monteith) dans le Nord, l'Est et le Sud-est de l'île de La Réunion. Influence de l'altitude et comparaison avec l'Ouest et le Sud*. Rapport d'étude de CIRAD, 38 p.

CIHLAR J., LAURENT L., et DYER J.A., 1991: Relation between the Normalized Difference Vegetation Index and ecological variables. *Remote Sensing of Environment,* **35**, pp. 279-298.

COURAULT D., LACARRERE P., CLASTRE P., LE CHARPENTIER P., JACOB F., MARLOIE O., PREVOT L., and COLLINET J., ET ZANTE P., 2007 : Estimation et spatialisation des réserves hydriques du sol, application au bassin versant de l'oued Zanfour, Tunisie. IRD Tunis, 21 pages + annexes.

GUIDE des pratiques hydrologiques, OMM., (2004 : (WMO-168°) CH9.1 pp.135-137.

GUIDE des pratiques hydrologiques, OMM., 2004 : « Chapitre 38.page 543, édition WMO-N 168 »

DAKHLAOUI H., 2014 : *Vers une Procédure de Calage Automatique plus Efficiente du Modèle HBV*. Thèse de Doctorat en Génie Hydraulique. Université de Tunis El Manar. 231 p.

DAGHRI L.W et DE BACKER., 1988 : Utilisation de la méthode des profils hydriques pour la détermination du bilan d'eau (comparaison avec des mesures lysimétriques). *Revue de l'INAT*, Tunis, Tunisie, **Vol 3**, ndeg.2, pp. 153-166.

DAMAGNEZ J., 1960 : le sol, l'eau et la plante. Quelques problèmes de Bioclimatologie. La *Tunisie agricole*, **61**, 3, pp. 39-55.

DAMAGNEZ, J. et DE VILLÈLE, O. 1959 : Besoins en eau d'une culture d'Orangers. Influence de la salure et de l'enracinement. *Annales INRAT*, **vol. 32**, pp.159-180.

DAO H., 2004 : Les principes de la représentation cartographique de données géographiques. Une approche ontologique et sémiologique." *Revue internationale de géomatique* **Vol. 14** : pp 259-283.

DAVIN EDOUARD., 2008 : *Étude de l'effet biophysique du changement de l'occupation des sols sur le système climatique*. Thèse de Doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie. Laboratoire des Sciences de l'Environnement et du Climat, 194 p.

DEROUICHE A., 1994 : *Apport de la télédétection et du SIG à la compréhension du fonctionnement hydrologique de bassins versants : évaluation et cartographie de l'évapotranspiration, de l'érosion hydrique et de la pollution des eaux*. Collection Études et Thèses de l'ORSTOM, Paris.

DEPARTERE C., 1993. *Chaîne de production et de traitement des modèles numériques de terrain.* DEMIURGE 2,3. Module de numérisation T2 version 1,2. Edition ORSTOM.

DJAMAI N., 2010 : *Exploitation des images satellites Modis-Terra pour caractérisation des états de surface : cas de la Tunisie.* Mémoire de master, Université Laval canada 108p.

DIDON E., 1990 : *Système d'Information Géographique : Concepts, formation et applications,* ENGREF Montpellier.

DIOP M., 2009 : *Les bilans hydriques dans la moyenne vallée du Sénégal, contribution a l'étude des besoins en eau de la végétation*. Thèse de l'Université Paris 1 Pantheon – Sorbonne. 373 p.

DORIAN H., 2003 : *Estimation de l'évapotranspiration des cultures annuelles dans la plaine du Haouz (Marrakech) par télédétection et la méthode de FAO*, rapport de stage IRD Maroc, 43 p.

D.G.E.T.H, 1995 : *Économie de l'eau 2000*, Rapport final, Tunis, 8 volumes.

D.G.R.E : *carte des ressources en eau de la Tunisie (échelle 1/500000).*

D.R.E. 1993 : *Étude hydrologique du bassin de l'oued Medjerda.*

DOUGUEDROIT, A. 1992. Sécheresse et incendies de forêts en région méditerranéenne. Revue *d'Analyse Spatiale Quantitative et Appliquée.* 23, pp. 169-176.

DUBREUIL V., DELAHAYE C., et STRAT A., 2011 : Changements d'occupation du sol et leurs impacts climatiques au Mato Grosso, Brésil. *Confins*.doi:**10**.4000/confins.6845

DUBREUIL V., LECERF R., et HUBERT-MOY L., 2005 : Suivi de la sècheresse par télédétection : exemlpe de l'été 2003 en Bretagne. *Romanian journal of climatology*,**1**, 109-125.

DUBREUIL V., JALLET A., RONCHAIL J., et MAITELLI G., 2004 : Estimation des précipitations par télédétection au Mato Grosso (Brésil). *Annales de l'Association Internationale de Climatologie,* **1 pp.** 133-156.

DUBREUIL V., 1997b *:* La sécheresse dans la France de l'Ouest *:* une contrainte climatique trop souvent oubliée. *Secheresse,* **Vol.8***,* 47-55.

DUBREUIL V., et MARCHAND P., 1997a : Le Climat, l'Eau et les Hommes, Textes réunis, *Ed P.U.R. Collection espace et territoire*, Presse universitaire Rennes, France, pp. 113- 126.

DUBREUIL V., 1994 : *La sécheresse dans la France de l'Ouest : Étude d'après les bilans hydriques et les données des satellites NOAA-AVHRR*. Thèse de doctorat. Université Rennes 2, 381 p.

DUBREUIL V., 1992 : Typologie des paysages ruraux de l'ouest de la France à partir des classificatoires d'images du satellite NOAA ; *Norois,* **n° 39** *p283-296.*

DUCHEMIN, B., HADRIA, R., ERRAKI, S., BOULET, G., MAISONGRANDE, P., CHEHBOUNI, A., ESCADAFAL, R., EZZAHAR, J., HOEDJES, J.C.B., KHARROU, M.H., KHABBA, S., MOUGENOT, B., OLIOSO, A., RODRIGUEZ, J.C., and SIMONNEAUX, V., 2006: Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco: On the use of relationships between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely sensed vegetation indices. *Agricultural Water Management*, **vol.79**, pp.1-27.

DUCHEMIN B., BOULET P., MAISONGRANDE I., BENHADJ R., HADRIA S., KHABBA A., CHEHBOUNI, et OLIOSO A., 2005 : Un modèle simplifié pour l'estimation du bilan hydrique et du rendement de cultures céréalière en milieu semi-aride. *Deuxième Congrès Méditerranéen "Ressources en Eau dans le Bassin Méditerranéen". Marrakech (Maroc).*

DYER, J.M., 2009*:* Assessing topographic patterns in moisture use and stress using a water balance approach. *Landscape Ecology* **24***, pp* 391-403.

EBENER S., 2000 : *Utilisation d'un SIG en mode raster pour la spatialisation du bilan hydrique à l'échelle mensuelle, application au bassin versant de l'Allondon (France Suisse),* Thèse de doctorat ès sciences.

EL HAMROUNI A., 1994 : Végétation forestière et pré-forestière de la Tunisie. Typologie et éléments pour la gestion. *Revue des régions arides*, **6/ 94**, pp. 1-299.

EL HAMROUNI A., 1992 : *Végétation forestière et pré-forestière de la Tunisie : Typologie et éléments pour la gestion*. Thèse Université de Provence Aix-Marseille III, 235 p.

EL GAROUNI A., BOUSSEMA M., ENNABLI M., 2001 : Utilisation du système d'information géographique (SIG) et des données de télédétection pour l'estimation de l'évapotranspiration réelle à l'échelle régionale, *Le Bulletin d'information du Réseau Télédétection de l'AUF,* **n° 52**, pp. 75-82

EL GAROUNI A., BOUSSEMA M., JABRENE R., 1999 : "*Contribution de l'imagerie satellitaire à la détection des zones saturées et au zonage de l'évapotranspiration dans la basse vallée de la Madjerda (Tunisie)*". Cahier sécheresse, **vol10**, **Numéro2**, pp. 177-122.

EL GAROUNI A., BOUSSEMA M., ENNABLI M., 1999 : contribution de l'imagerie satellitaire à la détection des zones saturées et ou zonage de l'évapotranspiration dans la basse vallée de Mejerda (Tunisie). *In Sécheresse **vol. 10** n°2, pp. 117-122*.

EL GAROUNI A., 1995 : "*Estimation et cartographie de l'évapotranspiration réelle par télédétection et systèmes d'Information Géographiques" : contribution à l'étude hydrogéologique de la basse vallée de la Medjerda*. Thèse du 3ème cycle- Faculté des sciences de Tunis.150 p.

EL MELKI T., 1997 : *Les masses d'air sur la Tunisie,* Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis, 323 p.

EMBERGER, L., 1955 : Une classification biogéographique des climats. Revue Travaux Laboratoire de Botanique Géologie et Zoologie. Faculté des Sciences, Montpellier, *série Botanique*, **7**, pp. 3-43.

ER-RAKI, S., CHEHBOUNI, G., GUEMOURIA N., DUCHEMIN, B., EZZAHAR, J., HADRIA, R. 2008: Combining FAO-56 model and ground-based remote sensing to estimate water consumptions of wheat crops in a semi-arid region. *Agricultural Water Management journal*. vol.87, pp. 41-54.

ER-RAKI S., 2007 *: Estimation des besoins en eau des cultures dans la région de Tensift AL Haouz : Modélisation, expérimentation et télédétection*, Thèse de doctorat en Mécanique des Fluides et Energétique -Télédétection, Faculté des Sciences Marrakech, 112 p.

ERPICUM M., 1991 : La topoclimatologie, un outil au service de l'agronomie. Exemples pris en Belgique, *Bull. Rech. Agron. Gembloux*, **26 (1)**, 91-111.

ESCOUROU G., 1991 : *Climat et environnement : Les facteurs locaux du climat*, Masson. Paris 180p.

ESSEKET F., 2005 : l'évaporation au niveau des barrages en Tunisie : cas des barrages de sidi Salem et de Sidi Saâd. Mémoire de master, FLAHM, Tunis, 121p.

FRANÇOIS P., 2002 : *Caractérisation de l'occupation du sol à partir d'une série d'images temporelles, Plaine du Haouz (Maroc)*, Mémoire M.Sc. 84 p.

FEKI M., 2013 : Variabilité spatiotemporelle de l'activité végétative au nord de la Tunisie. *Actes du 26ème colloque de l'AIC, Cotonou,* 236-241.

FEKI M., DOUGUEDROIT A., et DUBREUIL V., 2007 : analyse spatio-temporelle de l'activité chlorophyllienne dans la végétation du nord-ouest de la Tunisie, par imagerie satellitaire, *revue tunisienne de géographie*, **n° 38**, pp41-50.

FEKI M., 2006 : La sècheresse bioclimatique estivale en Kroumirie et dans les Mogods (Tunisie) : estimation à partir du stress hydrique de la végétation. Thèse de doctorat de l'Université Aix-Marseille, 181 p + annexes.

FENSHOLT R., 2004 : Earth observation of vegetation status in the Sahelian and SudanianWest Africa, comparison of Terra MODIS and NOAA AVHRR satellite data, Int. *International Journal of Remote Sensing*., **25**(9), pp. 1641-1659.

FOREST F et CORT1ER B., 1991 : Diagnostic hydrique des cultures et la prevision du rendement régional du mil cultivé dans les pays du CILSS. *Soil Water Balance in the SudanoSahettan Zone* (Proceedings of the Niamey Workshop, February 1991). IAHS Publ. no. **199**,1991.

FOIN P, 1987 : *Cartographie topographique et thématique. Télédétection satellitaire*, Mémoire DEA 119 p.

GAFREJ R. L., et PILLET G., 2008 : Projections des ressources en eau de la Tunisie sous l'effet des changements climatiques globaux. *13ème Congrès Mondiale de l'Eau IWRA*.

GALLEGUILLOS M.T., 2010 : *spatialisation du statut hydrique de la vigne sur un bassin versant mediterraneen par teledetection optique.* Thèse de Doctorat de l'Université de Montpellier SupAgro. 282p.

GAMMAR. A.M., et HLAOUI Z., 2012 : Utilisation des indicateurs du déficit hydrique dans les synthèses bioclimatiques méditerranéennes. *Actes du 25ème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie.* Grenoble, pp. 321-326.

GAMMAR A.M., BEN MILOUD. E., et AUCLAIR. L., 2003 : Dynamiques spatiale et environnementale en milieu forestier au nord de Jebel Bargou (Dorsale tunisienne). Communication au colloque « La forêt : enjeux comparés des formes d'appropriation, de gestion et d'exploitation », 16-17 octobre 2003, Poitiers (France), 13 p.

GAMMAR A.M, 2002 : *Végétation.* In Atlas National de la Tunisie, C.E.R.E.S, Carte au 1/1 000 000 + notice.

GAMMAR. A.M., 1999 : La dorsale tunisienne, entre représentation linéaire et réalité régionale. In « La Tunisie du Nord, espace de relation », Faculté des Lettres de Manouba, Tunis, pp. 61-83.

GAMMAR. A.M., 1984 : Défrichements et déprise rurale dans le Haut Tell friguien. *Revue Tunisienne de Géographie*, **n° 13**, pp. 53-76.

GAMMAR. A.M., 1979 : *Étude et carte écologique de la région de Kessra (Dorsale tunisienne).* Thèse, Grenoble, 127 p.

GIORGI F,. 2007 : Le changement climatique en Méditerranée. *Douzième réunion de la Commission Méditerranéenne de Développement Durable* Istanboul, pp. 30-31.

GIRARD M.C. et GIRARD C., 1999 : *Traitement des données de télédétection*, DUNOD, Paris, 529p.

GOND V., et BARTHOLOME E., 2004 : Surveillance et cartographie des plans d'eau et des zones humides et inondables en régions arides avec l'instrument VEGETATION embarquée sur SPOT-4. *International Journal of Remote Sensing*, **vol**. **25**, no. **5**, pp. 987–1004

GOUNOT M., 1995 : Essai de synthèse sur la végétation et la phyto-écologie tunisiennes. Tomes II et III : Le milieu physique et la végétation, écologie végétale appliquée, M.A**.** NABLI édit., Édit**.** Faculté des Sciences de Tunis, Imprimerie Officielle de la République Tunisienne, Tunis, pp. 123-150.

HACHICHA N., 1999 : *l'insolation dans la Tunisie du nord*. Mémoire DEA, FSHC, Tunis, 344 p.

HAJJI M., ACHOURI N., SASSI K., et AJJI, MOHAMED : Effet de régime hydrique sur les paramètres agronomiques de production de cinq variétés de blé dur (Triticum durum L.) conduites en mode biologique et conventionnel

HBAEIB H., et CHIRAZ M., 2003 : Calcul des besoins en eau des principales cultures exploitées au nord de la Tunisie : estimation de l'évapotranspiration de référence par différentes formules empiriques (cas des régions de Tunis, Béja et Bizerte). *Revue Sécheresse.* Volume **14**, Numéro **4**, 257-265.

HALLAIRE M., 1964 : Le potentiel efficace de l'eau dans le sol en régime de dessèchement- l'eau et la production végétale. **Vol.7**, INRA, pp. 27- 62.

HAMMEMI O., 2010 : *Évapotranspiration potentielle, bilan hydrique et agroclimatologie en Tunisie,* Centre de Publication Universitaire, 437p.

HAMMAMI O., 1990 : Variations de l'évapotranspiration potentielle, Bilan de l'eau climatique et agro-climatique en Tunisie. *La Météorologie*, 32, pp. 6–13.

HAMIMED A., LAOUNIA N., KHALDI A., et AZZAZ H., 2014 : Contribution à la spatialisation de l'évapotranspiration d'un agrosystème semi-aride en Algérie par utilisation de la télédétection et du modèle METRIC. *Physio-Géo* **Vol. 8**, pp. 197-213.

HAMIMED A., et RABHA M., 2008 : cartographie de l'évapotranspiration réelle journalière dans les conditions semi-arides en Algérie à partir des données satellitaires Aster. *In Sécheresse **vol. 19** n°4, 293-300.*

HENIA L., 2015 (coordination) : *Contribution à l'étude des aléas et risques climatiques en Tunisie*. Université de Tunis, unité de recherche GREVACHOT, 319 p.

HENIA L., 2008 (sous la direction) : *Atlas de l'eau en Tunisie*, unité de recherche GREVACHOT, 186p.

HENIA L., 2007 : Les impacts probables des changements climatiques sur les ressources en eau en Tunisie, *SCIENCES,* **n° 1** pp24-31.

HENIA L., 1998 : Les situations anticycloniques en Tunisie, *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, **Vol. 11**, pp. 167-174.

HENIA L., BEN BOUBAKER H, et BENZARTI Z., 1998 : Changements Climatiques et ressources en eau en Tunisie, *Rapport établi dans le cadre du projet PNUD-FEM RAB/94/G31,* Ministère de l'Environnement et de l'Aménagement du Territoire, 31p.

HENIA L. et MOUGOU R., 1997 : contribution à l'étude des phénomènes atmosphériques à risques en Tunisie : Le cas du sirocco, *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, **Vol. 10**, pp. 84-92.

HENIA L., et MOUGOU R., 1995 : contribution à l'étude des contraintes climatiques en Tunisie : Le cas de la gelée au sol, *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, **Vol. 8**, pp. 207-215.

HENIA L., 1993 : *Climat et bilan de l'eau en Tunisie : Essai de régionalisation climatique par les bilans hydriques*, Publications de l'Université de Tunis, 391p.

HENIA L., 1980a : Le sirocco et les types de circulation à sirocco en Tunisie, *Revue Tunisienne de Géographie***,** n° **5**, pp. 61-87.

HENIA L., 1980b : *Les précipitations pluvieuses dans la Tunisie tellienne*. Pub de l'Université de Tunis, 263 p.

QUÉNOL H., DUBREUIL V., LECERF R., et ARVOR D., 2008 : Apport des outils de la géomatique pour la spatialisation des risques climatiques. *Climat et risques : changement d'approche*, Lavoisier, pp.43-61.

HLAOUI Z., 2006 : Bilans hydriques agro-climatiques de l'olivier en Tunisie. *Revue Tunisienne de Géographie,* **37**, pp. 43-73.

HUFTY A., 2001 : *Introduction à la climatologie*, Presse de Laval, 542p.

HÜBENER H., SCHMIDT M., SOGALLA M., and KERSCHGENS., 2005: Simulating evapotranspiration in a semi-arid environment. *Theoretical and Applied Climatology*, **n° 80**, pp. 153–167.

HUBER L., et DE PARCEVEAUX S., 2007 : *Bioclimatologie, concepts et applications*. Éditions Quae, 336 p.

I.N.M., 2001-2002 : *Al Manach.* Pub, de l'INM

I.N.M., 1999 : *L'Atlas climatique, 130p.*

ITIER B., Seguin B., 2007 : La sècheresse : caractérisation et occurrence, en lien avec le climat et l'hydrologie. *Fourrages*, n° **190**, pp 147-162.

ITIER B., et BRUNET Y., 1996: Recent developpements and trends in evaporation research: A partial survey. *International Evapotranspiration and Irrigation.* Scheduling Conference, San Antonoi, Texas, pp. 1-20.

JACKSON R.D., 1985: Estimating evapotranspiration at local and regional scales. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Volume **GE-73**, pp. 1086-1096.

JACOB., 1999 : utilisation du modèle SEBAL pour cartographier l'évapotranspiration sur le site Alpilles-ReSeDA à partir de données de réflectance (POLDER aéroporté) et infrarouge thermique.(Caméra IRT aéroportée).

JABLOUN, M. et SAHLI, A., 2008: Evaluation of FAO-56 methodology for estimating reference evapotranspiration using limited climatic data. Application to Tunisia. *Agricultural Water Management* **95**, 707–715.

JAZIRI B., 2010 : *Le Bio et barrage*, *Végétation riveraine et aménagements hydrauliques : eaux libres/eaux contraintes. Structures, fonctionnalités et représentation dans trois cours d'eau de la Tunisie septentrionale*. Thèse de l'ENS-LSH, Lyon, 288 p.

JGUIRIM H., 2000 : *Tendances pluviométriques en Tunisie (1901-1990).* Thèse doct. Univ. De Tunis **I**, 1284 p.

JOUINI R., 2004 : *Étude hydro-climatique de la Medjerda en amont du barrage de Sidi Salem : effets des intensités horaires de pluie.* Mémoire de DEA, FSHST, 149 p, annexe 51 p.

JOUANY C., CRUZ P., DURU M., STROIA C., et THEAU J-P., 2009 : variabilité de la réponse aux stress hydrique et thermique d'une prairie naturelle. *Fourrages*, n°**197**, pp. 85-88.

KAMIL A., 2007 : *Mesure et Modélisation de l'évapotranspiration de l'olivier et de l'oranger dans la région de Tensift Al Haouz.* Mémoire de Diplôme des Études Supérieures Approfondies (DESA). Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences Semlalia – Marrakech. 63 p.

KAICUN WANG., ZHANQING LI., et CRIBB M., 2006: Estimation of evaporative fraction from a combination of day and night land surface temperatures and NDVI: A new method to determine the Priestley–Taylor parameter. *Remote Sensing of Environment* **102**.pp, 293–305.

KERR Y. H., WALDTEUFEL,P., WIGNERON J.-P., MARTINUZZI,J.-M., et FONT J., AND BERGER M., 2001: Soil moisture retrieval from Space : The soil moisture and ocean salinity (SMOS) mission, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **vol.39**(8), pp. 1729-1735.

KINGUMBI AHMADI., 2006 : *modélisation hydrologique d'un bassin affecte par des changements d'occupation. Cas du Merguellil en Tunisie centrale*. Thèse en Génie Hydraulique. École Nationale d'Ingénieurs de Tunis. 199 p.

KHÉMIR EYA., 2011: *Utilisation de deux films antitranspirants avec sept adjuvants dans la lutte contre le stress hydrique et les maladies fongiques du blé dur et de l'orge dans la région du Nord Ouest de la Tunisie*. Institut National Agronomique de Tunisie, mémoire de Master. 118 p

LACOEUR J., 2007 : *influence d'un déficit hydrique sur le fonctionnement d'un couvert végétal cultivé.* Supargo. Montepellier. 12 p.

LAMY C., 2013 : *Impact du changement climatique sur la fréquence et l'intensité des sècheresses en Bretagne.*Thèse de Doctorat de l'Université Rennes 2, 286 p.

LAMY C., et DUBREUIL V., 2011 : Modélisation du bilan hydrique en Bretagne dans le contexte du changement climatique : cas du scénario A1B. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, **24,** pp, 357-362.

LAGOUARDE, J.P. 1991: Use of NOAA AVHRR data combined with an agrometeorological model for evaporation mapping. *International Journal of Remote Sensing. **Vol 12** n°9, 1853-1864.*

LAGROUADE J.P., 1991. Use of NOAA-AVHRR data combined with an agrometeorological model for evaporation mapping. *Int. J. Remote Sens*., **12** :1853-1864.

LAHMER R., 2005 : *Les inondations dans la plaine de Jendouba-Bou Selem*. Mémoire de Master, faculté des Lettres, des Arts et des Humanités Manouba, 111 p.

LEEYA V., 1992 : *Apport de la télédétection et de l'information géographique numérique à la compréhension du fonctionnement hydrologique de bassins versants méditerranéens.* Thèse à l'Université. Des sciences et techniques du Languedoc, Académie de Montpellier, France, 300p.

LEBOURGEOIS F., et PIEDALLU C., 2005 : Comment appréhender le niveau de sécheresse dans le cadre des études stationnelles et de la gestion forestière ? Notion d'indices bioclimatiques, méthode d'estimation de l'évapotranspiration potentielle. *Revue forestière Française LVII*, volume **4**/2005, pp. 331-356.

LECARPENTIER P., 1975 : L'évapotranspiration potentielle et ses implications géographiques » ; Annales de Géographie, **n° 463 et 464**, pp. 257-274 et 385-414.

LEBERTON L. MERGUSIG., 2000 *: Un Système d'Information Géographique comme aide à la gestion intégrée de l'eau en Tunisie Centrale* ; Manuel de l'utilisateur de MERGUSIG.

LHOMME J P., 1997: Towards a rational definition of potential evaporation. Hydrology and Earth System Sciences, 1(**2**): 257-264.

LE HOUÉROU H.-N., 1995 : Bioclimatologie et biogéographie des steppes arides du Nord de l'Afrique: diversité biologique, développement durable et désertisation. In : Le Ho érou H.-N. (ed.). *Bioclimatologie et biogéographie des steppes arides du Nord de l'Afrique : diversité biologique, développement durable et désertisation*. Montpellier : ***CIHEAM***, (Options Méditerranéennes : **Série B**. Etudes et Recherches; **n.10**), 396 p.

LE HOUÉROU H. N., 1969 : La *végétation de la Tunisie steppique + Carte phyto-écologique de la Tunisie Centrale et Méridionale au 1/500.000 (2 feuilles)*. Annales de l'I.N.R.A.T, Tunis, 42, fasc. 5, 624 p

M.A.R.H, 2007 : Le bassin versant de la Medjerda en Tunisie, PDF, 55p

M.A.R.H, et G.T.Z., 2005 : *Changements Climatiques : Effets sur l'économie tunisienne et stratégie d'adaptation pour le secteur agricole et les ressources naturelles.* Rapport 1 ère étape, 266p.

M.A.R.H., 1998 : *EAU 21 : Stratégie à long terme du secteur de l'eau en Tunisie (2030).* 85p.

M.E.A.T., 2001: *Communication initiale de la Tunisie à la convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques*. Orbis Impression. Tunis, 176 p.

MARGAT J., 2008: Plan Bleu. L'eau des Méditerranéens : situation et perspectives. *Collection Prospective. Paris* : L'Harmattan.

MAHE G., 2006 : *Variabilité pluie-débit en Afrique de l'Ouest et Centrale au 20ème siècle : changements hydro-climatiques, occupation du sol et modélisation hydrologique*. Habilitation à diriger des recherches, ED Terre, Eau, Espace, UM2 Montpellier.

MAKHLOUFI ABDELHAMID., 2010 : Calibrage spatial et temporel de quelques relations d'usage courant pour l'estimation de l'évapotranspiration de l'Algérie du Nord. *Mémoire de Master en Hydraulique,* Université Hadj Lakhdar, Algérie, 117 p.

MEDOULO ET INGE S., 2000 : Utilisation des images TM de Landsat pour estimer la variabilité spatiale de l'humidité du sol destinée aux modèles hydrologiques spatialisés : application au delta du Sénégal, *La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives.* Éd. AUF. pp. 395-403.

MELLOULI H.J., BEN NACEUR M., EL FELAH M., EL GHARBI M.S., KAABIA M., NAHDI H., SLAFER G.A., KARROU M., 2007 : Efficience de l'utilisation de l'eau chez le blé et l'orge sous différents régimes hydriques et de fertilisation azotée dans des conditions subhumides de Tunisie. In: Lamaddalen a N. (ed.), Bogliotti C. (ed.), Todorovic M. (ed.), Scardign o A. (ed.). *Water saving in Mediterranean agriculture and future research needs* [Vol. **1**]. Bari : CIHEAM, pp. 179 -189 (Option s Méditerranéennes : Série B. Études et Recherches ; n ° **56** Vol.**I**)

MELLOULI, H.J., VAN WESEMAEL, B., POESEN J. and HARTMANN R. (2000). Evaporation losses from bare soils as influenced by cultivation techniques in semi-arid regions. *Agricultural Water Management Journal*,**42**, pp. 355-369.

MERDES M., 1997 : Projet AGRIMA : application de la télédétection aux statistiques agricoles, action 4 modèle agro-météorologique de prévision de rendement des céréales, 66 p.

MERLIN O., AL BITAR A. , RIVALLAND V., BEZIAT P., CESCHIA E., and DEDIEU G., 2011: An Analytical Model of Evaporation Efficiency for Unsaturated Soil Surfaces with an Arbitrary Thickness. *Journal of Applied Meteorology and Climatology,* **vol. 50,** pp 457-471.

MERLIN O., CHEHBOUNI A., KERR Y., NJOKU E. and ENTEKHABI D., 2005: A combined modeling and multi-spectral/multi-resolution remote sensing approach for disaggregation of surface soilmoisture: application to SMOS configuration. *IEEE Transaction on Geosciences and Remote Sensing, **vol.*** **43(9)**, pp. 2036-2050.

MERLIER C. 2001 : *Interpolation des données spatiales en Climatologie, et conception optimale des réseaux climatologiques*. Annexe du rapport de Météo-France concernant ses activités en rapport avec la Commission for Climatology (CCI) de l'OMM, 21 p.

MJEJRA M., DUBREUIL V., et HENIA L., 2015 : Suivi de la sécheresse agro-climatique à partir du déficit d'évaporation dans le bassin versant de la mejerda (tunisie). **28^{éme},** *colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Liège.

MJEJRA M. DUBREUIL V. et HENIA L., 2014 : Évaluation de l'évapotranspiration maximale par télédétection à moyenne résolution spatiale : cas du bassin versant de la Mejerda en Tunisie. **27^{éme},** *colloque de l'Association Internationale de Climatologie.*

MJEJRA M., HENIA L., et DUBREUIL V., 2012 : Apport de l'imagerie satellitaire à l'estimation de l'évapotranspiration réelle journalière dans le delta de la Mejerda en Tunisie. **25^{éme},** *colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Grenoble.

MJEJRA M., 2005 : *Estimation du rayonnement global en Tunisie par télédétection et les méthodes statistiques.* Mémoire Master, Faculté des Lettres, des Arts et des Humanités Manouba, 136 p.

MONTEITH, J.L., 1965: Evaporation and environment. *In*: *The state and movement of water in living organisms* (Proceedings of the 19th Symposium of the Society of Experimental Biology, Swansea, 1964), London: Academic Press, pp. 205–234.

MOUNIER, J., 1977. Aspects et fréquences de la sécheresse en Bretagne : essai de définition de la sécheresse en Europe océanique. *Revue de géographie de Lyon,* **52**, pp. 167-176.

MOUNIER, J., 1965. Les besoins en eau d'une région, d'après Thornthwaite. Essai d'application à la Bretagne. N*orois* **48**, pp. 437-448.

MORAN S., CLARKE R., INOUE Y., and VIDAL A., 1994: Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index.*Remote Sensing Environment*, **49**, pp. 246-263.

MORI A., 1970 : Les sols vertiques, les vertisols et les sols tirsifiés de la Tunisie du Nord. Pub, *ORSTOM*, pp. 451-462.

MOUGOU R., et HENIA L., 1996 : La sècheresse agroclimatique en Tunisie : cas de la culture du blé. *Variabilité du climat et stratégies d'adaptation humaines en Tunisie*, publication de l'Université de Tunis, Série colloque 7ème, vol. VI, pp. 231-248.

MOUGOU R., 1978 : Estimation de l'évapotranspiration potentielle : cas de la Tunisie. *Note technique INM*, Tunis, 58 p.

MUSY A., HIGY C., et REYNARD E., 2014 : *Hydrologie 1 une science de la nature, une gestion sociétale.*2éme édition revue et augmentée. Presses polytechniques et universitaires romandes*, 489 p.*

NASR Z. 2002 : *une méthode simple de pilotage de l'irrigation basée sur une estimation simple de ET_0 par tmax. Cas des vergers d'agrumes au nord-est de la Tunisie.* Workshop organised by FAO – ICID. Montreal, Canada

NASR Z., BEN MECHLIA N., OUESLATI T., et ZAIRI A. 1998 : Mesure de la consommation en eau journalière du blé par une méthode microclimatique. *Annales de l'Institut National de la Recherche Agronomique de Tunisie*, n° **71**, pp 141-156.

NICOLA P., 1999 : Modélisation et mesure de l'évapotranspiration (Étude de cas à Meyrin-Genève), thèse de doctorat.

OLIOSO A., 2003: Estimation of surface fluxes in a small agricultural area using the three dimensional atmospheric model meso-NH and remote sensing data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, **vol 29**, pp.741-754.

OLIOSO A., et JACOB F., 2002. Estimation de l'évapotranspiration à partir de mesures de télédétection. *La Houille Blanche*, **n°1**, pp. 62-67.

OLIOSO A., CHAUKI H., COURAULT D., and WIGNERON J.P., 1999: Estimation of evapotranspiration and photosynthetis by assimilation of remote sensing data into SVAT models. *Remote SensingEnvironment*, **vol.68**, pp. 341-356.

OMRANE N., 1982 : Les possibilités de la cartographie d'occupation du sol parl'exploitation des images satellites : exemple de la région de Tunis Bizerte ; *Revue S.S.***n° 70/71**, pp. 111-142.

ORGANISATION MÉTÉOROLOGIQUE MONDIALE., 1966 : *Measurement and Estimation of Evaporation and Evapotranspiration,* WMO-No. 201, Note technique N° 83, p. 102-115, Genève.

OUDIN L., 2004 : recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global. Thèse Cemegref, Sc, eau, 495p.

OZENDA P., 1975 : Sur les étages de végétation dans les montagnes du Bassin Méditerranéen. *Documents de Cartographie Ecologique*, **16**, pp. 1-32.

PAMELA L., JAMES C., EDWARD G., ET DERRICK L., ALFREDO HUETEC, and ZHENGMING WAND,. 2005: Predicting riparian evapotranspiration from MODIS vegetation indices and meteorological data. *Remote Sensing of Environment* n° **94**, pp, 17–30.

PAYAN CH., et SALANC E., 2003 : Outils de diagnostic du stress hydrique et application d'un modèle de bilan hydrique. État actuel des résultats. IFV, *Forum Aredvi*. pp 8-13.

PENMAN, H.L., 1948: Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London A*, 193, pp. 120–145.

PERRIER A., et TUZET A., 1998: Approche théorique du continum sol-plante-atmosphère. In, J.R Tiercelin (Editor). *Traité d'irrigation*. Lavoisier Tec et Doc. Paris, pp 112-146.

PIEDALLU, C., GEGOUT, J.C., PEREZ, V., and LEBOURGEOIS, F., 2013: Soil water balance performs better than climatic water variables in tree species distribution modelling. *Global Ecology and Biogeography,* **22**, pp. 470-482.

PIEDALLU, C., RICHARD, J., GAUDIN, S., et LEGAY, M., 2012. Cartographie de la contrainte hydrique des sols forestiers. Exemple sur les plateaux calcaires du Nord-Est de la France. Forêt entreprise 204 p.

PIEDALLU, C., 2012. *Spatialisation du bilan hydrique des sols pour caractériser la distribution et la croissance des espèces forestières dans un contexte de changement climatique*. Thèse, spécialité sciences forestières et du bois. Agroparistech, Nancy, France, p. 281.

PINDARD A., 2000 : *La relation stress hydrique – rendement du maïs en Bresse : quelle perspective de spatialisation ? Utilisation d'un simulateur de culture (STICS)*. Mémoire d'Ingénieur d'Agronomie. Établissement National d'Enseignement Supérieur Agronomique de Dijon.

PLANCHON O., 2011 : *Les risques climatiques liés aux changements en cours dans la dynamique des masses d'air sur l'Europe Occidentale.* Programme soutenu par la Fondation MAIF. Bilan final des activités, 126 p.

PNUD/UNESCO, 1973 : *Résultats de 6 années de mesures de la consommation d'eau des cultures de la basse vallée de la Medjerda. Station expérimentale de Cherfech 1967-1972*. Projet PNUD/FAO, Tun 29, rapport n° 61, Centre de recherche de génie rural, laboratoire de physique de sol, Tunis, 40 p.

PRIESTLEY C. H. B., et TAYLOR R. J., 1972: On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, **100**, pp. 81-92.

QIAOZHEN MU., MAOSHENG Z.,and STEVEN W., 2011: Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sensing of Environment,* **115,** pp. 1781–1800.

QIAOZHEN MU, LUCAS A., JOHN S., KYLE MCDONALD., and STEVEN W., 2009: Satellite assessment of land surface evapotranspiration for the pan-Arctic domain. *Water Resources research*, **Vol 45**, W09420

RADHOUANE L., 2011 : Accumulations métaboliques en présence de contraintes hydriques chez le mil (Pennisetum (glaucum (L.) R. Br). Revue des Régions Arides n° 25 (1/2011) pp.15-34

RADHOUANE L ., et HAFEDH J M., 2007 : Effets d'un stress hydrique sur les rendements de deux écotypes locaux de mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.). *Cahiers Agricultures* vol. **16**, n° **1**, pp 17-22.

RADHOUANE L., BEN SALEM M., et BEN EL HADJ S., 2003 : Influence du stress salin sur la croissance et le rendement de 6 écotypes de Mil (Pennisetum glaucum (L.) R. Br.). *Ann Inrat 2003* ; **76** : 53-71.

RADHOUANE L., et BEN SALEM M., 1998 : Effet d'une contrainte hydrique appliquée à différents stades de développement sur certains paramètres écophysiologiques chez deus variétés d'orge : Rihane et Martin. *Annales de l'INRAT*, **71**, pp. 119- 140.

RAOUDHA G., et GONZAGUET P., 2008 : Projection des ressources en eau de la Tunisie sous l'effet des changements climatiques, *XIII Wather Congress.* Chap3, 28 p.

RANA G., and KATERJI N., 2000 : Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. *European Journal of Agronomy,***13,** pp 125-153.

REZGUI M., ZAIRI A., BIZID E., et BEN MECHLIA N., 2005: Consommation et efficacité d'utilisation de l'eau chez le blé dur (Triticum durum Desf.) cultivé en conditions pluviales et irriguées en Tunisie. *Cahiers Agricultures* vol. **14**, n° **4.** pp 391-397.

RICHARD, J., 2011 : Caractérisation de la contrainte hydrique des sols à l'aide de cartes numériques pour prendre en compte les effets potentiels du changement climatique dans les catalogues de stations forestières - Applications aux plateaux calcaires de Lorraine et de Bourgogne. Rapport de stage de la 3ième année de la FIF, Agroparistech-Engref, Nancy, France.

RICHARD J-F., 1990 : La Dégradation des Paysages en Afrique de l'Ouest, ouvrage publié grâce à la coopération Française. Presses universitaire de Dakar. 310 p

RIOU CH., ITIER B., et SEGUIN B., 1988: The infuence of roughness on daily evaporation and surface temperature. *International Journal of Remote Sensing*, **3**, pp. 1529–1533.

RIOU C., et CHARTIER R., 1985 : Évapotranspiration en zone semi-aride de deux couverts végétaux (gazon, blé) obtenue par plusieurs méthodes. I. Évaluation de l'ETP (conditions hydriques non limitantes). *Agronomie*, **5** (3), pp. 261–266.

RIOU C., 1980 : Évapotranspiration potentielle et bilan hydrique en Tunisie. *Rapport indit, ORSTOM*, 20 p.

RIOU C., 1975 *: La détermination pratique de l'évaporation. Application à l'Afrique centrale. Contribution à la connaissance des climats*. Thèse Doctorat d'État, Paris, 211 p.

RODIER J.A., COLOMBANI J. CLAUDE J. et KALLEL R., 1981 : *Le bassin de la Mejerda, Monographies Hydrologiques*. ORSTOM, N°6 DRES Paris, 451 p.

ROBIN M. 2002 : *Télédétection ; des satellites aux SIG*, Publications Nathan, 2ème édition.

SADRAS V.O., et MILROY S.P., 1996: Soil-water thresholds for the responses of leaf expansion and gas exchange: A review. *Field Crops Research*, **47** (2-3). pp. 253-256

SLAMA A., BEN SALEM M., et ZID E., 2005 : Les céréales en Tunisie : production, effet de la sècheresse et mécanismes de résistance. *Science et changements planétaires/ sècheresse*, 16, pp. 225-229.

SAMBA G., et DIOP, M., 2000. Bilan hydrique dans la région du Pool (République du Congo). *Cahiers Agricultures,* **9**, 47-53.

SAMI F., 1999 : *Le système d'information géographique*, Tunis, 192p.

SAMAALI H., 2011 *: Étude de l'évolution de l'occupation et de l'utilisation du sol dans le delta de Medjerda par télédétection et systèmes d'information géographique*. Thèse de doctorat de géographie. Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis, 377 p.

SANDERS L., 1989 : *L'analyse statistique des données en géographie*. Montpellier, GIP RECLUS (Col. Alidade), 267 p.

SETHOM H. et KASSAB A. 1967 : *Les régions Géographiques de la Tunisie*, Publications de l'Université de Tunis, Faculté des Sciences Humaines et sociales, deuxième série : géographie, **volume XIII**, 1981, 460p.

SEGUIN B., BRISSON N., LOUSTAU D., et DUPOUEY J.L., 2005 : "Impact du changement climatique sur l'agriculture et la forêt", L'homme face au climat, *Actes symp. du Collège de France* (Paris, 12-13 oct 2004), Odile Jacob, Paris, pp 177-203.

SEGUIN B., 1984 : Estimation de l'évapotranspiration à partir de l'infrarouge thermique. *2éme colloque Int. Sig. Spectral d'objets en télédétection, INRA, éd* **n° 23** pp 427-446.

SHABOU M., 2010 : Suivi de l'état hydrique du couvert végétal par télédétection spatiale sur le site semi-aride de Merguellil (Tunisie centrale). *Mémoire de Mastère recherche de l'Institut National agronomique de Tunisie*, 76p.

SIMONNEAUX V., Michel L., Dorian H., Jérome M., Sonia T., Duchemin B., Mohamed C., Hakim K., Brahim B., Chehbouni A ., 2009 : Estimation spatialisee de l'e´vapotranspiration des cultures irriguees par télédétection : application à la gestion de l'irrigation dans la plaine du Haouz (Marrakech, Maroc), *Sécheresse,* **20**, 123-130.

SIMONNEAUX V., DUCHEMIN B., HELSON D., ER-RAKI S., OLIOSO A., and CHEHBOUNI AG., 2007: The use ofhigh-resolution image time series for crop classification and evapotranspiration estimate over an irrigated area in central Morocco. Int *Journal Remote Sensing,* **n° 29**, pp. 95-116.

SOUAD R., JACHY M., et LHOUSSINE B., 2006 : Variabilité hydro-climatique dans les bassins-versants du Haut Atlas de Marrakech (Maroc), *Sécheresse,* **Vol 17**, n°3, pp 43- 49.

SMIEJ F., LACAZE B., et BELABBES K., 2005 : Expérimentation sur l'utilisation des données satellitales de basse résolution pour l'évaluation de l'état hydrique des couverts végétaux. *Geo Observateur* **n° 14** CRTS Maroc, pp.115-138.

STEPHENSON N.L., 1998: Actual evapotranspiration and deficit: biologically meaningful correlates of vegetation distribution across spatial scales. *Journal of Biogeography*, n° **25**, 855- 870.

SOUIDI Z., HAMIMED A., DONZE F., SEDDINI A., et MEDERBAL K., 2010 : Estimation de l'évapotranspiration d'un couvert forestier en Algérie par télédétection. *Revue Télédétection*, ***vol. 9***, n° 3-4, pp. 164-181.

STAMBOULI-ESSASSI., S, ROCHE E., et BOUZID., S., 2007 : Évolution de la végétation et du climat dans le Nord-ouest de la Tunisie au cours des 40 derniers millénaires. *Geo-Eco-Trop***, 31**, pp. 171-214.

TACONET D., 1995 : *Estimation de l'évapotranspiration de différents couverts par assimilation de température de surface dans des modèles TSVA. Des estimations de LAI (réflectance) et d'humidité du sol (micro-ondes) ont pu être forcées en complément du thermique*. Mémoire M.Sc, 132 p.

TABEAUD M., 1980 : quelques aspects des bilans hydriques au Mali. In Annales de Géographie. T.**89**, n°**491** pp 37-56.

TAILLON ANNIE., 1991 : *Classification de l'occupation des sols à des fins hydrologiques.* Mémoire de recherche, Université du Québec, 196 p.

TOUILBI F., 2013 : *Les hydrométéores responsables de mauvaise visibilité en Tunisie littorale/ le brouillard et la brume. Contribution à l'étude climatologique.* Mémoire de Master, Faculté des Lettres, des Arts et des Humanités Manouba, 136 p.

TRAORÉ FARID 2007 : *Méthodes d'estimation de l'évapotranspiration réelle à l'échelle du bassin versant du Kou au Burkina Faso*, mémoire de DEA, Belgique, 133p

TSÉ BI T., 1999 : Mesure de l'évapotranspiration réelle et des coefficients culturaux dans la culture de la pomme de terre à l'aide de lysimètre drainant, Mémoire de maitrise, Canada, 105p.

TURC L., 1961 : Évolution des besoins en eau d'irrigation. Évapotranspiration potentielle formule climatique simplifiée et mise à jour. *Ann. Agr*., **12** (13), pp. 13-49.

THORNTHWAITE C.W., et HOLZMAN B., 1941: «Evaporation and transpiration». *Yearbook of Agriculture*, 1941, United States Department of Agriculture, Washington DC, pp. 545-855.

VACHER J, 2000 : *Quelques résultats des recherches en agro-climatologie dans le programme HYDROMED*. Mission IRD Tunis, Rapport 17p.

VAUCLIN, M., 1983 : L'humidité des sols en hydrologie : intérêt et limites de la télédétection. *Hydrological Applications of Remote Sensing and Remote Data Transmission* (Proceedings of the Hamburg Symposium, August 1983). IAHS Publ. n°**145**.

VENTURINI, V., ISLAM S. et RODRIGUEZ, L., 2008: Esimation of evaporative fraction and evapotranspiration from MODIS products using a complementary based model. *Remote Sensing of the Environment* **112**

VINCENT J., 2011 : *Les lits de séchage plantés de roseaux pour le traitement des boues activées et les matières de vidange : adapter la stratégie de gestion pour optimiser les performances*. Université Montpellier 2, Irstea Lyon. 236 p.

VIDAL A., 1991 : *Estimation de l'évapotranspiration par télédétection : application au contrôle de l'irrigation***,** série Hydraulique agricole, **n° 8**, 180 p.

YADH L., 2002 : changements climatiques et ressources en eau en Tunisie, i*n Table Ronde Régionale de l'UICN en Méditerranée* - Athènes, Grèce.

YANKOVITCH L., 1956 : *Résultats de 22 années d'expériences dans les cases lysimétriques et cases de végétation du service Botanique et Agronomique de Tunisie*. Annales du SBAT, Tunis, **29**, 223 p.

YUYUN BI., 2010 : *Estimation de l'évapotranspiration de surface terrestre à partir des données satellitaires.* Thèse de doctorat d'électronique. École Doctorale Mathématiques, Sciences de l'Information et de l'Ingénieur de Strasbourg, 142 p.

WAGNER, W. 1998: Soil Moisture Retrieval from ERS Scatterometer Data. Vienna, Austria, *Vienna University of. Technology.*

XANTHOULIS D., 2010 : *Calcul ET0-Penman.pdf*. 54 pp.

XU S., MA T., and LIU Y., 2011: Application of amulti cylinder evapotranspirometer method for evapotranspiration measurement sin wetlands. *Aquatic Botany*, **95** (1), pp. 45-50.

ZANIN C. et TREMELO M L., 2003 : *Savoir-faire une carte : aide à la conception et à la réalisation d'une carte thématique univariées*. Imp. *CHIRAT* (France), 199 p.

ZHANG, L., DAWES, W.R. et WALKER, G.R., 2001: Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research*, **37**(3), pp. 701-708.

ZRIBI M., KOTTI R., AMRI R., WAGNER W., SHABOU M., LILI-CHABAANE Z., and BAGHDADI N., 2014: Soil moisture mapping in a semi-arid region, based on ASAR/Wide Swath satellite data. *Water Resources Research*, American Geophysical Union, pp.1-13.

ZRIBI, M., CHAHBI, A., SHABOU, M., LILI-CHABAANE, Z., DUCHEMIN, B., BAGHDADI, N, AMRI, R., and CHEHBOUNI, A., 2011: Soil surface moisture estimation over a semi-arid region using ENVISAT ASAR radar data for soil evaporation evaluation. *Hydrology and Earth System Sciences*., vol.**15**(1), pp. 345-358.

ZRIBI M., 2006 : Télédétection micro-ondes pour l'estimation des états de surfaces continentales, Habilitation à Diriger des Recherches.

Webographie

http://www.fao.org/giews/french/windisp/manuals/WINDIS14.htm

http://www2.ncdc.terra.gov/docs/klm/index.htm

http://stratus.ssec.wisc.edu/products/rtpolarwinds/pwinds_RTdatadescription.html.

http://lpdaac.usgs.gov/main.asp

http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp

http://france.meteofrance.com

http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/learn/terms/glossary/glossary_f.html -

http://members.tripod.com/~afangnik/teled.html

www.Spotimage.fr

LISTES DES FIGURES

Figure 1 : Localisation du bassin versant de Mejerda.....7
Figure 2 : Évaporation et évapotranspiration (Source : Projet SUDMED 2007) 13
Figure 3 Schéma théorique de la variabilité annuelle de l'ET0, ETM et ETR (source : Chahbouni G., 2009).....14
Figure 4: Mesure de l'évapotranspiration réelle par lysimètre (source : Rana et Katerji., 2000) 18
Figure 5: Schéma d'un évapotranspiromètre (source : Capus., 1984).....18
Figure 6: Eddy corrélation, à gauche schéma théorique à droite photo de l'appareil (source : Projet SUDMED 2007).....19
Figure 7: (**a**) Bac d'évaporation (classe A) du Weather Bureau, c'est un bac circulaire d'un diamètre de 120.7cm et d'une profondeur de 25cm, posé sur un support de hauteur de 15cm et à remplir jusqu'à 5 cm en dessous de l'anneau (d'après Capus., 1984) et (**b**) Bac d'évaporation au barrage de Bou Hertma au Nord-Est de Jendouba (Photo : Mjejra., 2011) 20
Figure 8: Evaporomètre Piche (Source : Capuis., 1984) 21
Figure 9 : Stations météorologiques (photo à gauche station agro-météorologique de Cherfech, à droite station synoptique à Béja (crédit photos Mjejra M., 2011).....24
Figure 10: Les cellules de la grille de la projection sinusoïdale de la région étudiée source :(http://modisland.gsfc.nasa.gov/MODLAND_grid.html) 26
Figure 11 : Exemples de quelques campagnes de terrain : les documents fournis (cartes topographiques, extraits google earth, les cartes agricoles des Gouvernorats, et les appareils de mesures météorologiques) (Photos, Mjejra M., 2010 et 2011 30
Figure 12: Carte de localisation de la région d'étude par rapport à l'ensemble du territoire de la Tunisie.....36
Figure 13: Hypsométrie en trois dimensions du B.V de la Mejerda à partir de la carte topographique 1/200000 39
Figure 14: Carte d'exposition dans le B.V de la Mejerda réalisée à partir de la carte topographique 1/200000 (source : réalisation personnelle).....41
Figure 15 : Réseau hydrographique et sous-bassins versants de la Mejerda (Source : carte de réseau hydrographique 1/1000000).....43
Figure 16: les grands barrages dans le B.V de la Mejerda (Sous Dir Hénia L. 2008).....44
Figure 17 : Les sols dans le B.V de la Mejerda (d'après carte des sols 1/500000 et Mtimet A.,1999) 46
Figure 18 : Le couvert végétal dans le B.V de la Mejerda (d'après la carte de la végétation 1/2000000) 48
Figure 19: Variétés du couvert végétal dans le B.V la Mejerda (Crédit photo, Mjejra M., 2010) 49
Figure 20: (a) Champs de fourrage (variété Bersim) et (b) Champs de blé (variété Razzak) dans la plaine de Jendouba (Crédit photo, Mjejra M.,).....51
Figure 21: Quelques spéculations qui caractérisent le maraîchage dans la basse Mejerda : (a) Artichaut, (b) Epinard et (c) Chou rouge (cliché Samaâli H., 2011, avec l'aimable autorisation de l'auteur).....52
Figure 22 : Quelques variétés des arboricultures dans la basse Mejerda : (a) pêchers (b) poiriers (c) pommiers et (d) vigne (cliché, Samaâli H., 2011, avec l'aimable autorisation de l'auteur).....53
Figure 23 : Occupation du sol dans le BV de la Mejerda (2010) 54

Figure 24: Phénomène de neige dans le BV de la Mejerda : en haut à Ghardimaou, ouest de Jendouba et en bas à Dachret Nabeur, Nord-Est du Kef (Crédit photo : Mjejra M., 2012) 55
Figure 25: Les températures moyennes annuelles dans le B.V de la Mejerda (2000-2011) 56
Figure 26: Durée de l'insolation moyenne annuelle dans le B.V de la Mejerda (2000-2011) .59
Figure 27: Moyenne annuelle de l'humidité relative dans le B.V de la Mejerda 61
Figure 28: Les étages bioclimatiques dans le B.V de la Mejerda (carte de la végétation 1/200000) 64
Figure 29: Schématisation de la démarche retenue dans l'étude 68
Figure 30: Trois types d'évapotranspiration estimés par le modèle FAO-56 : Évapotranspiration de référence (ETo ou ETP), évapotranspiration sous la condition standard (ETc ou ETM) et sous les conditions réelles (ETc adj ou ETR) (Allen et *al.,* 1998).....71
Figure 31: Organigramme de calcul d'évapotranspirations maximale (ETM) et réelle (ETR) par les deux approches du modèle FAO-56 (Allen et *al.,* 1998). 72
Figure 32 : (a) Valeurs décadaires de ETo mesurée par lysimètre à drainage dans la station de Mornag-Tunisie, entre 1980 et 1990 ; (b) corrélation entre les valeurs mesurées (ETo Lys) et valeurs calculées (ETo /FAO-PM) à la station de Mornag-Tunisie entre 1980 et 1990 (Source : Nasr Z. 2002).....76
Figure 33: Cycle de développement d'une culture (In, Er-Raki., S, 2007) 79
Figure 34 : Exemple de forme de la courbe d'ajustement des NDVI pour le blé de variété Razzak dans l'Agro-combinat de Badrouna (Sud-est de Jendouba).....81
Figure 35: Schéma conceptuel de l'indice de sécheresse (TVDI) (In. Medoulo et *al.,* 2000) ..84
Figure 36: Schéma théorique pour ajuster le Ks (inspiré de Allen et *al.,* 1998), (les valeurs de Ks sur l'axe des ordonnées et les valeurs de l'humidité du sol sur l'axe des abscisses représentes des indices sans dimensions, et ce pour faciliter la procédure de l'algorithme calcul de ces deux paramètres par l'outil informatique 85
Figure 37: Organigramme de calcul de l'ETR ajusté pour la région d'étude (inspiré d'Qiaozhen Mu et *al.,* 2011).....86
Figure 38: Le trapèze théorique et les différentes conditions de stress hydrique et de recouvrement de la végétation du continuum sol-plante (d'après Lagacherie Ph., 2010). 90
Figure 39: Organigramme de calcul du déficit d'évaporation 91
Figure 40 : Démarche de zonage de déficience d'évaporation dans le B.V de la Mejerda 92
Figure 41: Procédure de la méthode d'interpolation SEDI.....102
Figure 42 : Valeurs de l'ETP calculée et ETP obtenues dans des études antérieures 104
Figure 43 : Évapotranspiration potentielle et bilan hydrique climatique en Tunisie (Source : Atlas de l'eau sous Dir. Henia., 2008).....104
Figure 44 : Moyenne annuelle de l'ETP (mm) en Tunisie (source : Ben Boubaker et *al.,* 2003). 104
Figure 45: Total annuel de l'ETP dans les stations météorologiques (2000-2011).....106
Figure 46: Total annuel moyen de l'ETP (en mm) dans le B.V de Mejerda (2000-2011) 106
Figure 47: Opposition des versants : exemple des versants de Jbel Ash-Shid situés au Sud-Est de Teboursouk (A : extrait de la carte de l'ETP annuelle et B superposition des niveaux de l'ETP sur le profil des versants).....109
Figure 48 : Variabilité interannuelle de l'ETP dans les stations météorologiques du B.V de la Mejerda (Septembre 2000-août 2011) 112
Figure 49: Les totaux saisonniers de l'ETP dans le BV de la Mejerda (2000-2011), (a) automne, (b) hiver, (c) printemps et (d) été. 116
Figure 50: Le régime mensuel moyen de l'évapotranspiration dans les stations météorologiques du B.V de la Mejerda (2000- 2011) 121
Figure 51: Organigramme de carte d'occupation du sol dans le B.V de la Mejerda.....124

Figure 52 : Principe de la méthode supervisée pour l'identification des signatures pures yj(t) des classes d'occupation du sol (Benhaj., 2008).....127
Figure 53: Localisation des parcelles types 129
Figure 54: A gauche reconstitution de la parcelle type par les photos ; à droite exemple de croquis réalisé lors des campagnes de terrain (Nebeur, gouvernorat du Kef, mai 2010) 129
Figure 55: Les moyennes des signatures des classes pour les différentes parcelles types de la période 2000-2011 (les zones d'échantillonnage : sols nus à Haîdra, cultures annuelles à Kalaât Landalous et plantations arborées à El-Feîja) 130
Figure 56: [A] image des NDVI et [B] Transepts des valeurs moyennes annuelles des NDVI sur le B.V de la Mejerda de la période 2000-2011 131
Figure 57: Occupation du sol dans le B.V de la Mejerda par le satellite LANDSAT (pour les années : **a** 2000-2001 ; **b** 2005-2006 et **c** 2010-2011) 132
Figure 58: Occupation du sol dans le B.V de la Mejerda des saisons agricoles 2000 à 2011 (images satellites MODIS).....135
Figure 59: Les Profils des Kc pour les différentes classes d'occupation du sol dans le B.V de la Mejerda (dans la parcelle de Badrouna au sud-est de Jendouba) 143
Figure 60: Comparaison des coefficients culturaux ajustés pour le B.V de la Mejerda et ceux publiés par la FAO 1998 pour les régions humides. 144
Figure 61: Le niveau annuel moyen de l'ETM (mm) dans le B.V de la Mejerda (2000-2011) 146
Figure 62: Variabilité interannuelle de l'ETM dans le B.V de la Mejrda : (a) la rive gauche de la haute Mejerda ; (b) le Haut Tell ; (c) la moyenne Mejerda et (d) la basse Mejerda (2000-2011) 150
Figure 63: Les niveaux saisonniers de l'ETM (mm) (a) automne, (b) hiver, (c) printemps et (d) été, dans le BV de Mejerda (2000-2011) 153
Figure 64: Végétation à caractère hydrophile le long de l'oued Mejerda (a) au niveau de Jendouda et (b) au niveau de Mjez El-Beb (Mjejra M., mai 2011) 158
Figure 65: Le régime mensuel moyen de l'évapotranspiration maximale dans le B.V de la Mejerda (2000-2011) 160
Figure 66: Cycle de développement d'une culture de pommes de terre (arrière-saison et de saison) à El-Batane, (a) semis novembre 2010 ; et (b) pleine saison mai 2011 (cliché, Mjejra) 161
Figure 67: Schéma de la relation théorique entre Ks et humidité du sol (Benhaj., 2008 166
Figure 68: Humidité du sol moyenne (%) dans le B.V de la Mejerda calculée à l'aide de des images MODIS pour la période 2000-2011.....168
Figure 69: Évolution des deux indices de stress hydrique (cas de Verdun Nord-Ouest de la France ; Pindard A., 2000).....168
Figure 70: Méthode d'ajustement des valeurs de Ks mensuel, par l'algorithme du traçage de la diagonale (exemple station de Béja 2000-2011).....169
Figure 71: Profil du coefficient de stress hydrique dans quelques sites du BV de la Mejerda (moyenne mensuelle de la période 2000-2011).....170
Figure 72 : Évolution des coefficients de stress hydrique dans la région de l'Albacete en Espagne (source : Campos et *al.,* 2012).....171
Figure 73: Le niveau annuel moyen de l'ETR (mm) dans le B.V de la Mejerda (2000-2011) 173
Figure 74: Variation interannuelle de l'ETR (mm) dans le B.V de la Mejerda (2000-2011).178
Figure 75: Les niveaux saisonniers de l'ETR (mm) (a) automne, (b) hiver, (c) printemps et (d) été, dans le B.V de Mejerda (2000-2011).....181
Figure 76 : Surfaces marécageuses aux environs de Ghar Melh. La végétation est constituée ici de *salicornes* (juin 2010 ; Cliché M. Mjejra).....184

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

Figure 77: Le régime mensuel moyen de l'évapotranspiration réelle dans le B.V de la Mejerda (2000-2011).....187
Figure 78 : Cumuls annuels de la DE dans le BV de la Mejerda (2000-2011).....199
Figure 79 : Croquis du gradient altitudinal de la déficience d'évaporation (en mm) dans le BV de la Mejerda.....200
Figure 80 : Croquis du gradient latitudinal de la déficience d'évaporation (en mm) dans le BV de la Mejerda.....200
Figure 81 : Panorama depuis l'amont des versant : à gauche le versant d'El-Feîja – Gardimaou (la photo prise du parc national d'El-Feîja) ; à droite le varsant Jbel Serj-Siliana (la photo prise du pied de Jbel Serj ; avril 2010 ; cliché M. Mejejra) 201
Figure 82: le régime mensuel moyen de la déficience d'évaporation (mm) dans les stations météorologiques du BV de la Mejerda (2000-2011) 204
Figure 83: Evolution des profils des niveaux mensuels moyens du déficit d'évaporation (mm) dans les stations météorologiques du BV de la Mejerda (2000-2011) 205
Figure 84 : Relation DE et humidité des sols dans les stations météorologiques du BV de la Mejerda (moyennes de la période 2000-2011) 207
Figure 85 : Evolution des niveaux cumulés de la DE dans les stations météorologiques du BV de la Mejerda (2000-2011).....209
Figure 86: Typologie des mois selon les niveaux moyens de déficience d'évaporation (mm) dans les stations météorologiques du BV Mejerda (la moyenne de 2000 à 2011) 217
Figure 87: Typologie du déficit d'évaporation mensuel (mm) dans les stations météorologiques du BV Mejerda (2000-2011).....220
Figure 88: Localisation des sites d'étude de la DE selon la variété de l'occupation du sol (NB : les extraits Google Earth on été pris d'altitude de 2 km).....221
Figure 89 : Variabilité de la déficience d'évaporation en fonction de l'occupation du sol pour les points de grille retenus (2000-2011).....223
Figure 90 : L'intensité moyenne (ETR/ETM en %) de la satisfaction en eau de la végétation dans les stations météorologiques du BV Mejerda (2000-2011).....226
Figure 91: Exemples de photos illustrant les phénomènes de brouillard et de rosée à l'environnement du barrage de Sidi Salem (photos Mjejra M., 2010) 227
Figure 92 : La fréquence de l'indice de la satisfaction des besoins en eau selon l'altitude dans les deux versants opposés (la Kroumirie et la Dorsale).....229
Figure 93: Superposition du codage simplifié de la classification des variantes régionales (avec des chiffres) sur la carte des niveaux moyens annuels de la DE en mm (avec des couleurs).....235
Figure 94: Les nauces climatiques par le biais de la régionalisation de la déficience d'évaporation dans le BV de la Mejerda.....237
Figure 95 : Profil topographique et limites de la nuance humide dans le BV de la Mejerda .241
Figure 96: Fréquence (%) de la typologie des mois dans quelques stations de la région des surfaces abritées (2000-2011).....244
Figure 97: Noyaux forts et zones de transition dans la France de l'Ouest : application à la variabilité mensuelle de l'ETP Penman journalière.....248
Figure 98: Identification des limites sèches et humides selon l'indice de déficit hydrique dans le BV de la Mejerda (2000-2011) 250

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Classification des méthodes de mesure-estimation de l'évapotranspiration à l'échelle de la parcelle....17
Tableau 2: Nomenclature des stations....22
Tableau 3: Produits de MODIS utilisés dans l'étude....25
Tableau 4 : Exemple de comparaison des données des stations voisines....31
Tableau 5: Exemple d'interpolation des valeurs aberrantes des NDVI (deuxième décade de mars 2006)....32
Tableau 6 : Radiation globale en cal/cm^2/an, reçue la surface du sol, en fonction de la pente et de l'exposition, sous 36" de latitude Nord (In. Le Houérou., 1995)....40
Tableau 7 : Évapotranspiration potentielle, ETP, en mm/an, en fonction de la pente et de l'exposition sous 36" de latitude Nord (In. Le Houérou., 1995)....40
Tableau 8: Caractéristiques hydrographiques des sous bassins versants de la Mejerda....44
Tableau 9: Volumes des réserves utiles de quelques sols dans le BV de la Mejerda....47
Tableau 10: Occupation actuelle des sols dans le B.V de la Mejerda (2010)....53
Tableau 11: Les températures moyennes saisonnières (2000-2011)....57
Tableau 12: Durée d'insolation saisonnière (2000-2011)....59
Tableau 13: Humidité relative moyenne saisonnière (2000-2011)....61
Tableau 14: Vent moyen quotidien saisonnier dans le B.V de la Mejerda (2000-2011)....62
Tableau 15: Vent moyen quotidien annuel dans le B.V de la Mejerda (2000-2011)....63
Tableau16: Coefficients culturaux et durée (en jours) des différentes phases de développement de quelques cultures pratiquées au Nord de la Tunisie....78
Tableau 17: Les coefficients culturaux simples et la hauteur maximale pour différentes cultures et pour différentes régions pour à climat humide....78
Tableau 18 : Densités apparentes (da) et réserves utiles (RU en % et en mm) dans quelques stations de la région....82
Tableau 19 : Comparaison entre des résultats obtenus de l'ETP calculée et les résultats obtenus dans les études antérieures....103
Tableau 20 : Comparaison de la variation de l'ETP dans la basse Mejerda (transect : Bor Amri-Cherfech- Ghar Meleh)....110
Tableau 21 : Variabilité relative dans le BV de la Mejerda....112
Tableau 22: Matrice de confusion de la carte d'occupation du sol (moyenne des saisons agricoles de références)....133
Tableau 23: Matrice de confusion de la carte d'occupation du sol à basse résolution spatiale (moyenne des saisons agricoles de références)....136
Tableau 24 : Matrice de confusion entre la désagrégation issue des images Landsat et celle des séries temporelles MODIS....137
Tableau 25: Évolution de l'occupation du sol dans les parcelles types suivant les éléments de validation....139
Tableau 26 : Calendrier de développement du cycle de quelques variétés du couvert végétal agricole dans le BV de la Mejerda....142
Tableau 27: Les niveaux mensuels moyens des Kc calibrés pour le B.V de la Mejerda....142
Tableau 28 : Variabilité interannuelle de l'ETM (mm) à quelques stations et parcelles-types dans le BV de la Mejerda (2000-2011)....149
Tableau 29 : Valeurs de l'ETM calculées pour différentes classes d'occupation du sol, en plein saison de développement végétal (NB : les valeurs élevées des couverts forestiers sont surestimées, Taillon A., 1991)....151
Tableau 30 : Valeurs de l'albédo pour différentes surfaces (Source : Cosandey et *al.,* 2012)....152

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

Tableau 31 : Variabilité inter-saisonnière (automne/hiver) de l'ETM dans le BV de la Mejerda (2000-2011).....154
Tableau 32: Hausse de l'ETM de l'hiver au printemps dans les stations du BV de la Mejerda 156
Tableau 33 : Variabilité du régime mensuel de l'ETM dans le BV de la Mejerda (2000-2011) 161
Tableau 34 : Variabilité interannuelle de l'ETR (mm) à quelques stations et parcelles-types dans le BV de la Mejerda (2000-2011).....177
Tableau 35 : Variabilité du régime mensuel de l'ETR dans le BV de la Mejerda (2000-2011) 187
Tableau 36: Synthèse des niveaux moyens mensuels de la déficience d'évaporation (mm) dans quelques stations du BV de la Mejerda (2000-2011) 205
Tableau 37: Classification de l'intensité de la déficience d'évaporation 213
Tableau 38: classification bioclimatique selon le quotient évapotranspiratoire 213
Tableau 39: Classification de l'intensité du déficit d'évaporation dans le BV de la Mejerda214
Tableau 40: Occurrence (% du nombre total des mois) de la typologie des mois dans les stations météorologiques du BV Mejerda (2000-2011).....219
Tableau 41 : Les écarts absolus de la DE (en mm) entre même typologie d'occupation des sols (2000-2011).....223
Tableau 42 : L'intensité mensuelle du déficit d'évaporation (ETR>50%>ETM en %) dans les stations du bassin versant de la Mejerda (2000-2011).....228
Tableau 43: Fréquences (en %) des nuances climatiques et typologies des mois dans la région des versants, des montagnes et des sommets (2000-2011).....239
Tableau 44: Fréquences (en %) des nuances climatiques et typologies des mois dans la région des surfaces abritées (2000-2011).....243
Tableau 45: Fréquence et intensité DE mensuelle dans la station de Tala (2000-2011) 245

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

TABLES DES MATIERES

Fiche présentative de la thèse i
Remerciements ii
Liste des sigles et acronymes v
Sommaire vi
Introduction generale 1
Contexte général et problématique 2
Revue bibliographique et état de la question 4
Choix et objectifs du sujet 5
Plan de la thèse 8
Premiere partie l'evapotranspiration : cadre theorique, region d'etude et methodes d'approche 9
Introduction 11
Premier chapitre : cadre theorique : definition, mesures et donnees de base 12
1.1. l'évapotranspiration : concept, définitions et mesures 12
1.1.1. concept et définitions 12
1.1.1.1. concept 12
1.1.1.2. définition 13
1.1.2. les mesures de l'évapotranspiration 15
1.1.2. 1. les facteurs conditionnels de la mesure de l'évapotranspiration 15
1.1.2. 2. les outils de mesures de l'évapotranspiration 16
1.2. inventaire des données 22
1.2.1. les données expérimentales 22
1.2.1.1. période et réseau d'étude 22
1.2.1.2. données météorologiques 23
1.2.1.2. données satellites 24
1.2.1.3. données cartographiques et statistiques 26
1.2.1.4. le travail de terrain 27
1.2.2. contrôle de la qualité des données 31
1.2.2. 1. les données météorologiques 31
1.2.2. 2.les images satellites 32
Conclusion 33
Deuxieme chapitre : presentation de la region d'etude 35
Introduction 35
2.1. caractéristiques géophysiques du bassin versant de la mejerda : support de l'étude de l'évapotranspiration 37
2.1.1. la topographie 37
2.1.2. le réseau hydrographique 42
2.1.3. les sols 45
2.1.4. le tapis végétal 47
2.1.5. la carte de l'occupation et de l'utilisation des sols 50
2.2. caractéristiques climatiques du bassin versant de la mejerda 55
2.2.1. les températures 56
2.2.1.1 à l'échelle annuelle 56
2.2.1.2 à l'échelle saisonnière 57

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

2.2.1.3 à l'échelle mensuelle....57
2.2.2. la durée d'insolation....58
2.2.2.1 à l'échelle annuelle....58
2.2.2.2. à l'échelle saisonnière....59
2.2.2.3 à l'échelle mensuelle....60
2.2.3. l'humidité relative de l'air....60
2.2.4. le vent....62
2.2.5. étages bioclimatiques....63
Conclusion....65
Troisieme chapitre : demarche methodologique pour l'etude de l'evapotranspiration....67
Introduction....67
3.1 approche de l'évapotranspiration par la télédétection et le système d'information géographique....69
3.1.1. concepts et notions de base....69
3.1.1.1. la télédétection optique,....69
3.1.1.2. …..et le système d'information géographique....70
3.2. présentation des méthodes d'estimation de l'évapotranspiration....70
3.2.1. description du modèle FAO-56....70
3.2.2. estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP) : l'équation de fao penman-monteith et procédure de calcul....73
3.2.3. estimation de l'évapotranspiration maximale (ETM)....77
3.2.3. 1. l'élément conditionnel de l'etm : le coefficient cultural....77
3.2.4. estimation de l'évapotranspiration réelle (etr)....82
3.2.4.1. modèle FAO-56....82
3.2.4.2. apport de la télédétection spatiale....83
3.3. méthodologie pour déterminer de la déficience d'évaporation....87
3.3.1. concept de la déficience d'évaporation....87
3.3.2. l'approche pour déterminer la déficience d'évaporation....88
3.3.2.1. approche directe par l'évapotranspiration (ET....88
3.3.2.2. l'approche indirecte indice du déficit hydrique (WDI)....89
3.3.3. zonage du déficit d'évaporation dans le bassin versant de la mejerda....92
3.3.3.1. démarche suivie....92
3.3.3.2. identification des limites humides et limites sèches....93
Conclusion....94
Conclusion de la premiere partie....95
Deuxième partie: spatialisation de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda....97
Sommaire....98
Introduction....99
Quatrieme chapitre : spatialisation de l'evapotranspiration potentielle (ETP)....100
4.1. approche méthodologique : l'interpolation SEDI....100

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

4.1.1. principe de l'interpolation SEDI....100
4.1.1.1. mise en œuvre l'interpolation SEDI....101
4.1.2. problème de données de l'etp en tunisie....103
4.2. les niveaux annuels de l'évapotranspiration potentielle....105
4.2.1. le niveau annuel de l'évapotranspiration potentielle....105
4.2.2. la variabilité interannuelle de l'évapotranspiration potentielle....111
4.3 les niveaux saisonniers de l'évapotranspiration potentielle....113
4.3.1 en automne....113
4.3.2 en hiver....114
4.3.3 au printemps....117
4.3.4 en été....118
4.4 le régime mensuel moyen de l'évapotranspiration potentielle....119
conclusion....122
Cinquime chapitre : spatialisation de l'evapotranspiration maximale (ETM)....123
5.1. approche méthodologique : les paramètres de base de la cartographie de l'evapotranspiration maximale....123
5.1.1. cartographie de l'occupation du sol....123
5.1.1.1. données et concept....123
5.1.1.2. méthode de classification supervisée....125
5.1.1.3. choix des parcelles types....127
5.1.1.4. analyse des résultats....131
5.1.2. ajustements des coefficients culturaux :....140
5.2. les niveaux annuels de l'évapotranspiration maximale....145
5.2.1. le niveau moyen annuel de l'évapotranspiration maximale....145
5.2.2. la variabilité interannuelle de l'évapotranspiration maximale....147
5.3. l'état saisonnier de l'évapotranspiration maximale....150
5.3.1 en automne....150
5.3.2 en hiver....153
5.3.3 au printemps....155
5.3.4 en été....157
5.4. le niveau moyen mensuel de l'évapotranspiration maximale....159
conclusion....162
Sixieme chapitre : cartographie de l'evapotranspiration reelle (ETR)....163
6.1. approche méthodologique : élément de la cartographie de l'évapotranspiration réelle....163
6.1.1. cartographie du coefficient de stress hydrique (ks)....163
6.1.1.1. concept....163
6.1.1.2. cartographie de l'humidité relative du sol pour le calcul du coefficient de stress hydrique....165
6.1.1.3. ajustements des coefficients de stress hydrique....169
6.2. l'état annuel de l'etr....172
6.2.1. le niveau moyen annuel....172
6.2.2. la variation interannuelle de l'etr....175
6.3. l'état saisonnier de l'etr....179
6.3.1 en automne....179

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

6.3.2. en hiver....180
6.3.3. au printemps....182
6.3.4. en été....183
6.4. le niveau moyen mensuel de l'etr....185
conclusion....188
Conclusion de la deuxieme partie....189
Troisieme partie : suivi de la deficience d'evaporation dans le bassin versant de la Mejerda….
……..……191
Introduction....193
Septieme chapitre : la déficience d'évaporation : spatialisation et niveaux....195
7.1. la démarche adoptée....196
7.2. spatialisation de la déficience d'évaporation dans le bv de la mejerda : définition des secteurs à risque de stress hydrique....198
7.3. variabilité du régime mensuel de la déficience d'évaporation....203
conclusion....210
Huitieme chapitre : deficience d'evaporation : typologie, intensite et frequence....211
8.1. méthodologie....211
8.2. typologie de la déficience d'évaporation....215
8.2.1. classification de la déficience d'évaporation en termes moyenne....215
8.2.2. la déficience d'évaporation en fonction de l'occupation du sol....221
8.3. l'intensité et la fréquence du déficit d'évaporation....225
conclusion....230
Neuvieme chapitre : essai de zonage de la deficience d'evaporation dans le bassin versant mejerda....231
9.1. choix des critères d'analyses et de validation de zonage....232
9.2. analyse et interprétation des résultats de la régionalisation du bv de la mejerda : les variantes régionales....236
9.2.1 la variante humide....237
9.2.2. la variante sub-humide....241
9.2.3. la variante semi-aride....244
9.3. discussion sur la méthode et les résultats....247
9.3.1. évaluation de la méthode....247
9.3.2. augmenter le degré de confiance par le couplage des résultats issus des différentes classifications....248
9.3.3 discussion....249
conclusion....251
Conclusion de la troisieme partie....252
Conclusion generale....253
Conclusion generale....254
Principaux résultats....254
Les perspectives....256
References bibliographiques....257
Listes des figures....273
Liste des tableaux....277

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

Annexes.....285
Resume-. 299

Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

ANNEXES

Annexe 1 : Évapotranspiration _BV de Mejerda_ Fiche d'observation de terrain

Date : Site N° :	Photo N°: Croquis N° :	Localisation géographique : Direction d'observation :
Occupation générale du milieu estimation (%):	**Pente estimation en degré**	**Exposition**
Cultures annuelles Prairies Plantations arborées Surfaces en eau	Nulle Faible Moyenne Forte Très Forte	Nord Sud. N.E. S.E. S.O Est Ouest N.O

Végétations	**Stades de croissance**				**Sols**		**Observations météorologiques**	
	1	2	3	4	**Coleur**		Direction dominante du vent à partir de la strcture de végétation	
Typologie - Arborées - annuelles								
Type dominant					**Texture si connue**		Caractérisation des nuage et nébulosdité	
Recouvrement (%)								
Hauteur (m)					**Humidité** - sec - humide			
Phénologie							Effet des plans d'eau sur le charge de l'atmosphère en vapeur d'eau	
Semis								
Floraison					**Topographie**			
Plein saison					Eléments du relief -plaine - plateau - Jbels…			
Récolte								
État du Site							Mesures si possibele -Température -Humidité	
Homogène								
Hétérogène					Description de la topographie -accidentée - plane..			
Pratique d'irrigation - irrigué - en sec		Prises Vent - hauteur - nature						
Remarques et commentaires								

ANNEXE 2 : Les caractéristiques de satellite MODIS

- Orbite : 705 km, 10:30 am nœud descendant (Terra) ou 1:30 pm nœud ascendant (Aqua), héliosynchrone, quasi polaire, circulaire
- Dimensions Fauchée : 2,330 km (de piste de ski) de 10 km (le long de la piste au nadir)
- Télescope : 17,78 cm de diamètre. hors axe, afocal (collimaté), avec arrêt de champ intermédiaire
- Taille : 1,0 x 1,6 x 1,0 m / Poids : 228,7 kg
- Puissance : 162.5 W (moyenne simple de l'orbite)
- Quantification : 12 bits
- Résolution spatiale : 250 m (bandes 1-2), 500 m (bandes 3-7), 1000 m (bandes 8-36) Durée de vie : 6 ans

Usage principal	Groupe	Bande passante [1]	Spectral Radiance[2]	SNR requis [3]
Terrain / Nuage / Aérosols Boundaries	1	620-670	21,8	128
	2	841 - 876	24,7	201
Terrain / Cloud / aérosols Propriétés	3	459-479	35,3	243
	4	545-565	29,0	228
	5	1230 - 1250	5.4	74
	6	1628 - 1652	7.3	275
	7	2105 - 2155	10	110
Ocean Couleur / phytoplancton / biogéochimie	8	405 - 420	44,9	880
	9	438-448	41,9	838
	10	483 - 493	32,1	802
	11	526 - 536	27,9	754
	12	546-556	21,0	750
	13	662 - 672	9.5	910
	14	673-683	8.7	1087
	15	743-753	10.2	586
	16	862-877	6.2	516
Atmosphérique	17	890-920	10,0	167

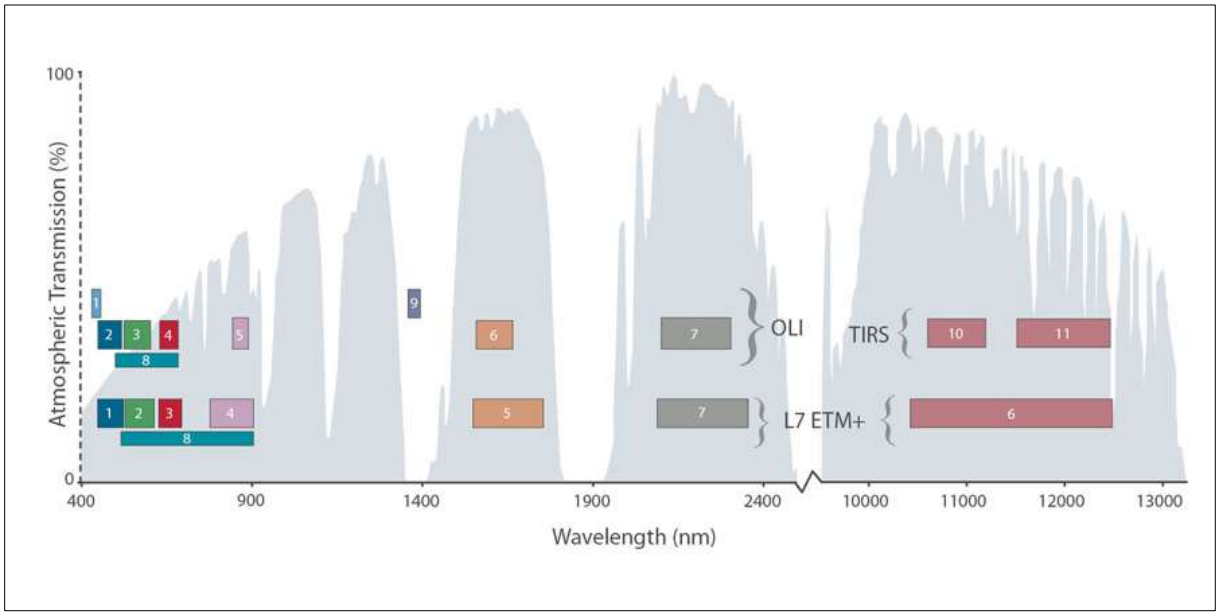
vapeur d'eau	18	931-941	3.6	57
	19	915 - 965	15,0	250
Usage principal	Groupe	Bande passante [1]	Spectral Radiance[2]	Requis NE [Δ] T (K) [4]
Surface / Cloud Température	20	3,660 à 3,840	0,45 (300K)	0,05
	21	3,929 à 3,989	2,38 (335K)	2.00
	22	3,929 à 3,989	0,67 (300K)	0,07
	23	4,020 à 4,080	0,79 (300K)	0,07
Atmosphérique Température	24	4,433 à 4,498	0,17 (250K)	0,25
	25	4,482 à 4,549	0,59 (275K)	0,25
Cirrus nuages de vapeur d'eau	26	1,360 à 1,390	6.00	150 (SNR)
	27	6,535 à 6,895	1,16 (240K)	0,25
	28	7,175 à 7,475	2.18 (250K)	0,25
Les propriétés des nuages	29	8,400 à 8,700	9,58 (300K)	0,05
Ozone	30	9,580 à 9,880	3,69 (250K)	0,25
Surface / Cloud Température	31	10,780 à 11,280	9,55 (300K)	0,05
	32	11,770 à 12,270	8,94 (300K)	0,05
Couverture Top Altitude	33	13,185 à 13,485	4,52 (260K)	0,25
	34	13,485 à 13,785	3,76 (250K)	0,25
	35	13,785 à 14,085	3.11 (240K)	0,25
	36	14,085 à 14,385	2,08 (220K)	0,35

[1] bandes 1 à 19 sont en nm; Groupes de 20 à 36 um sont [2] valeurs spectrales sont Radiance (W / m [2]-µm-sr) [3] rapport SNR = signal-bruit [4] NE (Δ) T = différence de température de bruit équivalente

Source : http://nilerak.hatfieldgroup.com/French/NRAK/EO/html/modis.html

ANNEXE 3 : Les caractéristiques de satellite LANDSAT (7)

	Landsat 7
Altitude	705 km
Résolution au sol	ETM+ 30 m (MS) 15 m (Pan)
Largeur de fauchée	185 km
Méthode de balayage	perpendiculaire
Délai de ré-observation	16 jours
Caractéristiques spectrales (µm)	1) 0.45 - 0.52 Bleu 2) 0.53 - 0.61 Vert 3) 0.63 - 0.69 Rouge 4) 0.78 - 0.90 VNIR 5) 1.55 - 1.75 IRCL 7) 2.09 - 2.35 IRCL 6) 10.4 - 12.5 RIT Panchromatique 0.52 - 0.90



Comparaison des bandes de Landsat 7 ETM+ et Landsat OLI

Source : http://landsat.usgs.gov/ldcm_vs_previous.php

ANNEXE 4 : Tableau explicatif de la méthodologie de calcul de l'évapotranspiration de référence par la formule de Penman-Monteith

	Unité	Paramètre à calculer	Unité
Températures			
Tmax	°C		
Tmin	°C	Tmoy = (Tmax + Tmin)/2	°C
Tmoy	°C	Δ	
Altitude	m	γ	
U2	m/s	(1 + 0,34 U2)	
Δ/(Δ + γ(1 + 0,34 U2))			
γ/(Δ + γ(1 + 0,34 U2))			
(900/(Tmoy + 273)) × U2			
Déficit de tension de vapeur			
Tmax	°C	e^o (Tmax)	KPa
Tmin	°C	e^o (Tmin)	KPa
Tension de vapeur saturante : es = [e^o (Tmax) + (e^o (Tmin)]/2			KPa
ea dérivé de l'humidité relative max et min			
RHmax	%	e° (Tmin) × RHmax/100	KPa
RHmin	%	e° (Tmax) × RHmin/100	KPa
ea : la moyenne			KPa
Déficit de tension de vapeur (es-ea) KPa			
Rayonnement			
Latitude			
Jour		Ra	$MJ.m^{-2}.j^{-1}$
Mois		N	Heure
n	Heure	n/N	
si Rs n'est pas donné : Rs = (0,25 + 0,5 n/N) × Ra			$MJ.m^{-2}.j^{-1}$
Rso = [0,75 + 2 (altitude)/100000] × Ra			$MJ.m^{-2}.j^{-1}$
Rs/Rso			$MJ.m^{-2}.j^{-1}$
Rns = 0,77 Rs			$MJ.m^{-2}.j^{-1}$
Tmax	°C	□ Tmax, K^4	$MJ.m^{-2}.j^{-1}$
Tmin	°C	□ Tmin, K^4	$MJ.m^{-2}.j^{-1}$
(□ Tmax, K^4 + □ Tmin, K^4)/2			$MJ.m^{-2}.j^{-1}$
ea	KPa	$(0,34 – 0,14\ ea^{1/2})$	
Rs/Rso		(1,35 Rs/Rso – 0,35)	
Rnl = (□ Tmax, K^4 + □ Tmin, K^4)/2 × (0,34 – $0,14\ ea^{1/2}$) × (1,35 Rs/Rso – 0,35)			$MJ.m^{-2}.j^{-1}$
Rn = Rns – Rnl			$MJ.m^{-2}.j^{-1}$
T_{mois}	°C	G jour	$MJ.m^{-2}.j^{-1}$
T_{mois-1}	°C	G mois = 0,14 ($T_{mois} – T_{mois} – 1$)	$MJ.m^{-2}.j^{-1}$
Rn – G			$MJ.m^{-2}.j^{-1}$
0,408 (Rn – G)			$MJ.m^{-2}.j^{-1}$
Évapotranspiration de référence			
Δ/(Δ + γ)(1 + 0,34U2) × 0,408 (Rn – G)			mm/jour
[γ/(Δ + γ)(1 + 0,34 U2)] × (900/(Tmoy + 273)) × U2 × (es-ea)			mm/jour
$\frac{0,408\ \Delta\ Rn - G) + [900\gamma/T+273)\times U2\times es - ea)]}{\Delta+\gamma\ 1+0,34\ U2)}$			

ANNEXE 5 : Équation de l'algorithme de calcul de l'ETR par l'approche du bilan d'énergie

ETRj – Rnj = A-B (Ts-Ta) (mm/jour)

Rnj = (1-a) Rgj + £Raj - £Rsj (w/m²)

Avec **Rgj** le rayonnement global, **Raj** rayonnement atmosphérique, **Rsj** rayonnement émis par la surface de la terre, **a** l'albédo et **£** l'émissivité (égal à 0.96).

Ts= produits MODIS MOD11L2

a albédo est calculé selon la formule suivante :

a = produits MODIS : MCD43A3

£ = 1.0094-(0.47*NDVI)

$Raj = 1.20\ \sigma\ Ta^{4} - 171$ (w/m²)

avec Ta température de l'air en k° et σ la constant de Boltzmann ($5.665\ 10^{-8}$ w/m² k^{-4})

$Rsj = £\sigma\ T_s^4$

avec **Ts** température de surface en k° et σ la constant de Boltzmann ($5.665\ 10^{-8}$ w/m² k^{-4})

Par la suite, nous utilisons des formulations qui tiennent compte de la nature de l'occupation du sol

ETRj = Rnj- 0.9 * (Ts-Ta)	surfaces d'eau
ETRj = Rnj- 0.2 * (Ts-Ta)	sol nu
ETRj = Rnj- (a* zo) + (b*U) * (Ts-Ta)	sol couvet cultures annuelles
ETR= [Rnj - (a* zo) + (b*U) * (Ts-Ta)]+ 0,23	sol couvert des arbres

Avec **a** = 0.083, **b** = 0.031 **zo** la rugosité et **U** la vitesse du vent en m/s.

Nous avons considéré que l'ETRj dans les zones urbaines est nulle.

ANNEXE 6 : LES ALGORITHMES

(Les algorithmes sont inspirés des travaux du projet SUDMED dans la région de Haouz au Maroc. Et nous avons ajusté ces algorithmes pour les adapter aux données du B.V de Mejerda)

1- Classification occupation sol à base des séries des NDVI

```
pro classif_NDVI
donne la valeur entière représentant un fichier de classification ;
pour la routine ENVI_FILE_TYPE ;
ftype = ENVI_FILE_TYPE('Classification')
Selection du fichier de classification ;
ENVI_SELECT, fid=fid_cla, /no_dims, file_type=ftype, /no_spec, dims=dims_cla, $
pos= pos_cla, title='Choisissez le fichier de classification'
if (fid_cla[0] eq -1) then return
retourne les info geographique du fichier de classification ;
map_info_cla = ENVI_GET_MAP_INFO(fid=fid_cla)
Selection du fichier NDVI ;
ENVI_SELECT, fid=fid_ndvi, pos=pos_ndvi, /no_dims, /no_spec, dims=dims_ndvi, $
title='Choisissez le fichier NDVI'
if (fid_ndvi[0] eq -1) then return
tab_pos=size(pos_ndvi) ; calcul du nombre de bandes NDVI
size_ndvi=tab_pos[1]
information sur le fichier classif ;
ENVI_FILE_QUERY, fid_cla, class_names=class_names, data_type=data_type,nl=nl, $
ns=ns, num_classes = num_classes
choix du nombre de blocs ;
base = widget_auto_base(title='Nombre de blocs de l_image NDVI')
list = ['4', '5', '6', '7','8','9','10']
wm = widget_menu(base, list=list, uvalue='menu', /excl, $ /auto)
result = auto_wid_mng(base)
if (result.accept eq 0) then return
nb_tile=result.menu + 4
calcul du decoupage ;
tile=(nl/nb_tile)+1 ; taille du bloc en nb de lignes
variables de sortie ;
classif=bytarr(ns,nl) ; initialisation du tableau de sortie
ndvi=intarr(size_ndvi) ; initialisation du profil
Lecture du fichier classification ;
data = ENVI_GET_DATA(fid=fid_cla, dims=dims_cla, pos=pos_cla)
FOR c=1, (num_classes-1) DO BEGIN ; boucle de traitement de chaque classe
print, 'processing classe',c,'...' ; affichage d'information
selection des pixels de la classe "c" ;
selection = where(data EQ c) ; *****SELECION CLASSE C*****
size_selec=size(selection)
eotab=size_selec[1] ; nb d'enregisterment de la selection
i=0L ; initialisation du compteur de la sélection
L=longInt
boucle de comparaison des profils ;
```


Mjejra, Mustapha. Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique - 2015

```
FOR t=0, (nb_tile-1) DO BEGIN ; boucle de traitement de chaque bloc
print, ' processing bloc',(t+1),'...' ; affichage d'information
mise en memoire des bandes NDVI ;
ys=tile*t ; ligne de debut
ye=tile*(t+1)-1 ; ligne de fin
IF (ye GT 2747) THEN ye = 2747
chargement des donnees du bloc t ;
tile_ndvi=fltarr(size_ndvi,ns,(ye-ys+1)) ;tableau de stockage (bande, col, ligne)
FOR n=0, (size_ndvi-1) DO BEGIN ; remplissage du tableau
tile_ndvi[n,*,*]= ENVI_GET_DATA(fid=fid_ndvi, dims=[-1, 0, ns-1, ys, ye], pos=n)
ENDFOR
REPEAT BEGIN ; Boucle de traitement des pixels sélectionné dans chaque bloc
nb=selection[i] ; coordonee lineaire du pixel n°i
calcul des coordonnees sur l'image NDVI decoupee ;
lig = (nb / ns) - ys
col = nb - ( (lig + ys) * ns)
IF (lig GT (tile-1)) THEN BREAK
lecture du fichier NDVI pour le pixel i ;
FOR r=0, (size_ndvi-1) DO BEGIN
ndvi[r]=tile_ndvi[r,col,lig]
ENDFOR
calculs sur le profil ;
max_ndvi=max(ndvi)
min_ndvi=min(ndvi)
tri=ndvi[sort(ndvi)]
pal=(tri[0]+tri[1]+tri[2])/3
test sur le profil NDVI pour classification ;
CASE c OF
1: IF (max_ndvi- min_ndvi GT 15) THEN BEGIN
classif[col,nb/ns]=1 ; classe 1 = Annuelles/prairies
ENDIF ELSE BEGIN
classif[col,nb/ns]=4 ; classe 4 = Sol Nu
ENDELSE
2: IF (pal LE 118)THEN BEGIN
classif[col,nb/ns]=4 ; classe 4 = Sol Nu
ENDIF ELSE BEGIN
IF (max_ndvi-pal LE 16) AND (pal LE 135) THEN BEGIN
classif[col,nb/ns]=2 ; classe 2 = plantations Arbrées
ENDIF ELSE BEGIN
classif[col,nb/ns]=3 ; classe 3 = Surfaces en eau
ENDELSE
ENDELSE
3: IF (pal LE 118) THEN BEGIN
IF (max_ndvi-min_ndvi GT 15) THEN BEGIN
classif[col,nb/ns]=1 ; classe 1 = Annuelles/prairies
ENDIF ELSE BEGIN
classif[col,nb/ns]=4 ; classe 4 = Sol Nu
ENDELSE
```

```
ENDIF ELSE BEGIN
IF (max_ndvi-pal LE 16) AND (pal LE 135) THEN BEGIN
classif[col,nb/ns]=2 ; classe 2 = plantations Arbrées
ENDIF ELSE BEGIN
classif[col,nb/ns]=3 ; classe 3 = surfaces en eau
ENDELSE
ENDELSE
4: IF (pal LT 116) THEN BEGIN
IF (max_ndvi-min_ndvi GT 15) THEN BEGIN
classif[col,nb/ns]=1 ; classe 1 = Annuelles/prairies
ENDIF ELSE BEGIN
classif[col,nb/ns]=4 ; classe 4 = Sol Nu
ENDELSE
ENDIF ELSE BEGIN
IF (max_ndvi-pal LE 15) AND (pal LE 135) THEN BEGIN
classif[col,nb/ns]=2 ; classe 2 = plantations Arbrées
ENDIF ELSE BEGIN
classif[col,nb/ns]=3 ; classe 3 = surfaces en eau
ENDELSE
ENDELSE
5: IF (pal LE 118) AND (tri[2] LT 122) THEN BEGIN
classif[col,nb/ns]=1 ; classe 1 = Annuelles/prairies
ENDIF ELSE BEGIN
IF (max_ndvi-pal LE 15) AND (pal LE 135) THEN BEGIN
classif[col,nb/ns]=2 ; classe 2 = plantations Arbrées
ENDIF ELSE BEGIN
classif[col,nb/ns]=3 ; classe 3 = surfaces en eau
ENDELSE
ENDELSE
6: IF (max_ndvi-min_ndvi GT 15) THEN BEGIN
classif[col,nb/ns]=1 ; classe 1 = Annuelles/prairies
ENDIF ELSE BEGIN
classif[col,nb/ns]=4 ; classe 4 = Sol Nu
ENDELSE
7: IF (pal LT 116) THEN BEGIN
IF (max_ndvi-min_ndvi GT 15) THEN BEGIN
classif[col,nb/ns]=1 ; classe 1 = Annuelles/prairies
ENDIF ELSE BEGIN
classif[col,nb/ns]=4 ; classe 4 = Sol Nu
ENDELSE
ENDIF ELSE BEGIN
IF (max_ndvi-pal LE 15) AND (pal LE 135) THEN BEGIN
classif[col,nb/ns]=2 ; classe 2 = plantations Arbrées
ENDIF ELSE BEGIN
classif[col,nb/ns]=3 ; classe 3 = Surfaces en eau
ENDELSE
ENDELSE
8: IF (max_ndvi-min_ndvi GT 15) THEN BEGIN
```

```
classif[col,nb/ns]=1 ; classe 1 = Annuelles/prairies
ENDIF ELSE BEGIN
classif[col,nb/ns]=4 ; classe 4 = Sol Nu
ENDELSE
9: IF (pal LE 116) AND (tri[2] LE 118) THEN BEGIN
IF (max_ndvi-min_ndvi GT 15) THEN BEGIN
classif[col,nb/ns]=1 ; classe 1 = Annuelles/prairies
ENDIF ELSE BEGIN
classif[col,nb/ns]=4 ; classe 4 = Sol Nu
ENDELSE
ENDIF ELSE BEGIN
IF (max_ndvi-pal LE 12) AND (pal LE 135) THEN BEGIN
classif[col,nb/ns]=2 ; classe 2 = plantations Arbres
ENDIF ELSE BEGIN
classif[col,nb/ns]=3 ; classe 3 = Surfaces en eau
ENDELSE
ENDELSE
10: IF (pal LE 118) AND (tri[2] LT 122) THEN BEGIN
classif[col,nb/ns]=1 ; classe 1 = Annuelles/prairies
ENDIF ELSE BEGIN
IF (max_ndvi-pal LE 12) AND (pal LE 138) THEN BEGIN
classif[col,nb/ns]=2 ; classe 2 = plantations Arbrées
ENDIF ELSE BEGIN
classif[col,nb/ns]=3 ; classe 3 = Surfaces en eau
ENDELSE
ENDELSE
11: IF (max_ndvi-pal LE 15) AND (pal LE 135) THEN BEGIN
classif[col,nb/ns]=2 ; classe 2 = plantations Arbrées
ENDIF ELSE BEGIN
classif[col,nb/ns]=3 ; classe 3 = surfaces en eau
ENDELSE
12: IF (pal LE 122) AND (tri[2] LE 124) THEN BEGIN
classif[col,nb/ns]=1 ; classe 1 = A
ENDIF ELSE BEGIN
IF (max_ndvi- pal LE 10) AND (pal LE 133) THEN BEGIN
classif[col,nb/ns]=2 ; classe 2 = plantations Arbrées
ENDIF ELSE BEGIN
classif[col,nb/ns]=3 ; classe 3 = surfaces en eau
ENDELSE
ENDELSE
13: IF (pal LE 124)THEN BEGIN
classif[col,nb/ns]=1 ; classe 1 = Annuelles/prairies
ENDIF ELSE BEGIN
IF (pal LE 136) AND (max_ndvi-pal LE 10) THEN BEGIN
classif[col,nb/ns]=2 ; classe 2 = plantations Arbrées
ENDIF ELSE BEGIN
classif[col,nb/ns]=3 ; classe 3 = Surfaces eu eau
ENDELSE
```

```
ENDELSE
14: IF (pal LE 118) THEN BEGIN
classif[col,nb/ns]=1 ; classe 1 = Annuelles/prairies
ENDIF ELSE BEGIN
IF (max_ndvi-pal LE 15) AND (pal LE 135) THEN BEGIN
classif[col,nb/ns]=2 ; classe 2 =  plantations Arbrées
ENDIF ELSE BEGIN
classif[col,nb/ns]=3 ; classe 3 = Surfaces en eau
ENDELSE
ENDELSE
15: IF (pal LE 135) THEN BEGIN
classif[col,nb/ns]=1 ; classe 1 = Annuelles/prairies
ENDIF ELSE BEGIN
classif[col,nb/ns]=3 ; classe 3 = surfaces en eau
ENDELSE
ENDCASE ; fin du case of = critere suivant classe
i=i+1
ENDREP UNTIL (i GT (eotab-1)) ; fin repeat pour classe "c"
ENDFOR ; fin boucle de chaque bloc
ENDFOR ;fin boucle de chaque classe
choix du nom et de l'emplacement du fichier de sortie ;
sortie = ENVI_PICKFILE(title='Choississez un fichier de sortie')
if (sortie eq '') then return
ecriture du tableau de sortie ds le fichier ;
openw, unit, sortie, /GET_LUN
writeu, unit, classif
FREE_LUN, unit
parametre du fichier *.hdr ;
class_names = ['Unclassified','A','ASN','AVG','SN'] ; nom des classes
lookup = [[0,0,0],[0,255,0],[0,255,255],[255,0,255],[255,255,0]] ; lookup table
bnames = ['Classification']
descrip = 'Example Classification Image'
file_type = ENVI_FILE_TYPE('ENVI Classification')
Creation du header ENVI et ajout de l'image dans : the Available Bands List ;
ENVI_SETUP_HEAD, fname=sortie, $
ns=ns, nl=nl, nb=1, $
interleave=0, data_type=1, $
offset=0, num_classes=5, $
class_names=class_names, $
lookup=lookup, file_type=file_type, $
bnames=bnames, descrip=descrip, $
/write, /open, map_info=map_info_cla
End
```

2- Calcul de evapotranspiration

```
clear all;
clc;
close all;
load Modis Mejerda 2000'2011.txt % pour lire le fichier les données
M= Modis Mejerda 2000'2011;
nj=length(M(:,2))
jour1=M(:,2); Rs=M(:,3); Tmin=M(:,4); Tmax=M(:,5); HRmin=M(:,7);
HRmax=M(:,8); uz=M(:,9); hv=M(:,10); pluie=M(:,11); irrig=M(:,12);
ETrmes=0.035*M(:,14); Rnmes=M(:,15);
fw=M(:,13);
fw=M(:,17);
fc=0.7;
t=jour1;
Rs=0.0864*Rs;
Za=4;
u2=uz.*4.87/(log(67.8*Za-5.42));
z=506;
T=(Tmin+Tmax)./2; HR=(HRmin+HRmax)./2;
Rn=Rn(Rs,Tmax,Tmin,T,HR,jour1);
P=101.3*((293-0.0065*z)/293)^5.26;
gamma=0.665*P*10^-3;
es=(esat1(Tmax)+esat1(Tmin))./2;
ea=(ea(Tmin,HRmax)+ea(Tmax,HRmin))./2;
x=0.408*Rn.*desat1(T);y=gamma*900./(T+273);z=u2.*(es-ea);
ww=desat1(T)+gamma*(1+0.34*u2);
ET0=(x+y.*z)./ww;
NN(:,1)=jour1;
NN(:,2)=ET0;
NN(:,3)=Rn;

**********Calcul coefficient cultural simple Kc**********

Ltotal=362;
Lini=58; kcini=0.40;
Ldev=90;
Lmid=120; kcmid=0.45;
Llate=94; kcend=0.40;
for j=1;Lini
kc(j)=kcini;
end
ajustement de Kcmid
for j1=Lini+Ldev:Lini+Ldev+Lmid
if (u2(j1)==2 & HRmin(j1)==45)
kcmid(j1)=kcmid;
else
kcmidd(j1)=kcmid+(0.04.*(u2(j1)-2)-0.004.*(HRmin(j1)-45)).*(hv(j1)./3).^0.3;
```

```
end
end%
ajustement de Kcend
u22=u2(length(u2)); HRmin2=HRmin(length(HRmin));hv2=hv(length(hv));
if (u22==2 & HRmin2==45)
kcend=kcbend;
else
kcend=kcend+(0.04.*(u22-2)-0.004.*(HRmin2-45)).*(hv2./3).^0.3; %de meme
end
a1=(kcmid-kcini)/(Ldev); b1=kcini-a1*Lini;
a2=(kcend-kcmidd(Lini+Ldev+Lmid))./Llate;
b2=kcmidd(Lini+Ldev)-a2*(Lmid+Lini+Ldev);
for i1=Lini:Lini+Ldev;
kcdev(i1)=a1*i1+b1;
end
for i2=Ldev+Lini+Lmid:Ldev+Lini+Lmid+ Llate
kcend(i2)=a2*i2+b2;
end
for j=1:Lini
Kc(j)=kcini;
end
for j=Lini:Lini+Ldev
Kc(j)=kcdev(j);
end
for j=Lini+Ldev:Lini+Ldev+Lmid
Kc(j)=kcmidd(j);
end
for j=Lini+Ldev+Lmid:Lini+Ldev+Lmid+Llate
Kc(j)=kcend(j);
end
ETcs=Kc'.*ET0;
Kcs=Kc

**********calcule du stress Ks**********
Zr=1.2;win=0.22;p=0.5 ;
TAW=Zr.*1000*(wfc-wwp);RAW=p*TAW;
Des(1)= Zr*1000*(wfc-win);
if (Des(1)>RAW);
Ks(1)=(TAW-Des(1))./(TAW-RAW);
else
Ks(1)=1;
end
ETr(1)=(Ks(1)*Kcb(1)+Ke(1))*ET0(1); ETrs(1)=(Ks(1)*Kcs(1))*ET0(1);
DPs(1)=-Des(1)+pluie(1)+irrig(1)-ETr(1);
DPs(1)=max(DPs(1),0);
teta(1)=win;
ETrcum(1)=ETr(1);pluiecum(1)=pluie(1);
for j=2:nj
```

```
if Des(j-1)>TAW
Des(j-1)=TAW;
end
if Des(j-1)<0
Des(j-1)=0;
end
if (Des(j-1)>RAW);
Ks(j)=(TAW-Des(j-1))./(TAW-RAW);
else
Ks(j)=1;
end
ETr(j)=(Ks(j)*Kcb(j)+Ke(j))*ET0(j);ETrs(j)=(Ks(j)*Kcs(j))*ET0(j);
ETrcum(j)=ETrcum(j-1)+ETr(j); pluiecum(j)=pluiecum(j-1)+pluie(j);
if xx(j)>=24
DPs(j)=-Des(j-1)+pluie(j)+irrig(j)-ETr(j);
DPs(j)=max(DPs(j),0);
Des(j)=0;
else
DPs(j)=0;
Des(j)=Des(j-1)-(pluie(j)+irrig(j))+ETr(j)+DPs(j);
end
teta(j)=teta(j-1)+(-ETr(j)+pluie(j)+irrig(j)-DPs(j))/(Zr*1000);
end
```

3- Calcul de la déficience d'évaporation

```
1: n=0
2: for Fi in list Fi :
3: date = Fi[2:7]
4: mois = date[0:2]
5: # calcul ETM = ET*Kc
6: cmd="Float(\"ET"+date+"\") * Float(\"kc"+mois+"\")"
 7: print("calcul ETM...")
8: arcpy.gp.RasterCalculator_sa(cmd, "etm"+date)
9: # calcul dru (fonction de ep, ru2)
 10: if mois=="03":
 11: cmd="Con (Float(\"ep"+date+"\") == 0, Con(Float(\"ru2_"+date+"\") – Float (\"ru_sols_de_b\") >
0,Float(\"lndp"+date+"\"), Float(\"ru2_"+date+"\") - Float(\"ru_sols_de_b\")), Float(\"ep"+date+"\"))"
12: else:
13: cmd="Con (Float(\"ep"+date+"\") == 0, Con(Float(\"ru2_"+date+"\") - Float(\"ru2_"+year+"
"+n+" "+jour+"\") > 0, Float(\"lndp"+date+"\"), Float(\"ru2_"+date+"\") - Float(\"ru2_"+year+" "+n+"
"+jour+"\")), Float(\"ep"+date+"\"))"
14: print ("calcul dru...")
15: arcpy.gp.Raster Calculator_sa(cmd, "dru"+date)
16: # calcul du déficit d'évaporation (fonction de etr et etm)
17: cmd="Con (Float(\"etm"+date+"\") - Float(\"etr"+date+"\") < 0, 0, Float(\"etm"+date+"\") -
Float(\"etr"+date+"\"))"
18: print ("calcul de...")
19: arcpy.gp.RasterCalculator_sa(cmd, "de"+date) 20: n=mois
```

Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique

RESUME

L'objectif de ce travail est de réaliser, en premier lieu, une cartographie de l'évapotranspiration à l'échelle régionale et de cerner, en deuxième lieu, un zonage de la déficience d'évaporation dans le bassin versant de Mejerda. Cet objectif s'appuie sur l'amélioration de la performance du modèle de la FAO-PM, et ce par la combinaison de ce modèle avec les données satellitales (MODIS-Terra). Ce travail concerne le bassin versant Mejerda, considéré comme « le château d'eau de la Tunisie », il occupe une place de premier ordre dans la stratégie de mobilisation des ressources en eau et il compte le plus important potentiel agricole.
La cartographie de l'évapotranspiration a permis de caractériser la variation spatiale et la variabilité temporelle de ses trois formes (ETP, ETM et ETR) dans le bassin versant Mejerda et de bien distinguer les sous-régions qui n'étaient connues que de manière très empirique. Les fluctuations temporelles sont assez importantes : les valeurs de janvier représentent en moyenne 15% de celles de juillet. La variation spatiale est surtout liée à la carte de l'occupation des sols dans la mesure où la végétation forestière évapore plus que la végétation annuelle et les effets du relief et du site. Les secteurs abrités se caractérisent par un pouvoir évapotranspérant le plus élevé (plaine de Jendouba, dépression de Siliana).
Le zonage de la déficience d'évaporation, élaboré par la méthode de classification non supervisée, a montré un nouveau découpage du bassin versant de Mejerda. À ce propos, des sous-régions, légèrement différentes à celles connues la plupart du temps, ont été distingué. C'est le cas de la moyenne Mejerda qui se trouve souvent annexée à la haute Mejerda et une opposition très nette entre les versants sud de la Kroumirie et les versants nord de la Dorsale. Cette configuration est associée à l'effet de l'exposition, le comportement de la végétation et l'état de la teneur en eau du sol. Le zonage de la déficience d'évaporation montre aussi deux gradients du stress hydrique den la végétation. En effet, l'intensité du stress diminue du Nord au Sud de la région et des stations d'altitude vers les fonds de vallées.

Mots- clés : Évapotranspiration, la Mejerda, images satellites MODIS, déficience d'évaporation, zonage.

Study of evapotranspiration in the catchment Mejerda (in Tunisia): contributions of remote sensing and geographic information systems

ABSTRACT

The objective of this work is to realize, first, mapping evapotranspiration at the regional level and to identify, secondly, a zoning of the evaporation deficiency in the watershed Mejerda. This objective is based on improving the performance of the FAO model-PM, and the combination of this model with the satellite data (MODIS-Terra). This work concerns the Mejerda watershed, considered "the water tower of Tunisia", it occupies a prime position in the water resource mobilization strategy and it has the largest agricultural potential.
Mapping evapotranspiration allowed to characterize the spatial variation and temporal variability of its three forms (FTE ETM and ETR) Mejerda in the watershed and to distinguish between the sub-regions that were known only to a very empirical. Temporal fluctuations are quite important: the values for January averaged 15% of those of July. Spatial variation is mainly related to the land use map since forest vegetation evaporates more than annual vegetation and the effect of terrain and site. Sheltered sectors are characterized by a power évapotranspérant highest (plain of Jendouba, Siliana depression).
The zoning of the evaporation deficiency, developed by the clustering method, showed a new division of the watershed Mejerda. In this regard, the sub-regions, slightly different to those known for the most part, have been distinguished. This is the case of Mejerda average that is often attached to high Mejerda and a sharp contrast between the southern slopes of Kroumirie and the northern slopes of the Dorsal. This configuration is associated with the effect of exposure, vegetation behavior and the state of the soil water content. The zoning of the evaporation deficiency also shows two gradients den water stress vegetation. Indeed, the stress intensity decreases from north to south of the region and altitude resorts to valley bottoms.

Keywords : Evapotranspiration, Mejerda, MODIS satellite images, disability evaporation, zoning.

Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie) : apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique

RESUME

L'objectif de ce travail est de réaliser, en premier lieu, une cartographie de l'évapotranspiration à l'échelle régionale et de cerner, en deuxième lieu, un zonage de la déficience d'évaporation dans le bassin versant de Mejerda. Cet objectif s'appuie sur l'amélioration de la performance du modèle de la FAO-PM, et ce par la combinaison de ce modèle avec les données satellitales (MODIS-Terra). Ce travail concerne le bassin versant Mejerda, considéré comme « le château d'eau de la Tunisie », il occupe une place de premier ordre dans la stratégie de mobilisation des ressources en eau et il compte le plus important potentiel agricole.

La cartographie de l'évapotranspiration a permis de caractériser la variation spatiale et la variabilité temporelle de ses trois formes (ETP, ETM et ETR) dans le bassin versant Mejerda et de bien distinguer les sous-régions qui n'étaient connues que de manière très empirique. Les fluctuations temporelles sont assez importantes : les valeurs de janvier représentent en moyenne 15% de celles de juillet. La variation spatiale est surtout liée à la carte de l'occupation des sols dans la mesure où la végétation forestière évapore plus que la végétation annuelle et les effets du relief et du site. Les secteurs abrités se caractérisent par un pouvoir évapotranspérant le plus élevé (plaine de Jendouba, dépression de Siliana).

Le zonage de la déficience d'évaporation, élaboré par la méthode de classification non supervisée, a montré un nouveau découpage du bassin versant de Mejerda. À ce propos, des sous-régions, légèrement différentes à celles connues la plupart du temps, ont été distingué. C'est le cas de la moyenne Mejerda qui se trouve souvent annexée à la haute Mejerda et une opposition très nette entre les versants sud de la Kroumirie et les versants nord de la Dorsale. Cette configuration est associée à l'effet de l'exposition, le comportement de la végétation et l'état de la teneur en eau du sol. Le zonage de la déficience d'évaporation montre aussi deux gradients du stress hydrique den la végétation. En effet, l'intensité du stress diminue du Nord au Sud de la région et des stations d'altitude vers les fonds de vallées.

Mots- clés : Évapotranspiration, la Mejerda, images satellites MODIS, déficience d'évaporation, zonage.

Study of evapotranspiration in the watershed Mejerda (in Tunisia): contribution of remote sensing and geographic information systems

ABSTRACT

The objective of this work is to realize, first, mapping evapotranspiration at the regional level and to identify, secondly, a zoning of the evaporation deficiency in the watershed Mejerda. This objective is based on improving the performance of the FAO model-PM, and the combination of this model with the satellite data (MODIS-Terra). This work concerns the Mejerda watershed, considered "the water tower of Tunisia", it occupies a prime position in the water resource mobilization strategy and it has the largest agricultural potential.

Mapping evapotranspiration allowed to characterize the spatial variation and temporal variability of its three forms (FTE ETM and ETR) Mejerda in the watershed and to distinguish between the sub-regions that were known only to a very empirical. Temporal fluctuations are quite important: the values for January averaged 15% of those of July. Spatial variation is mainly related to the land use map since forest vegetation evaporates more than annual vegetation and the effect of terrain and site. Sheltered sectors are characterized by a power évapotranspérant highest (plain of Jendouba, Siliana depression).

The zoning of the evaporation deficiency, developed by the clustering method, showed a new division of the watershed Mejerda. In this regard, the sub-regions, slightly different to those known for the most part, have been distinguished. This is the case of Mejerda average that is often attached to high Mejerda and a sharp contrast between the southern slopes of Kroumirie and the northern slopes of the Dorsal. This configuration is associated with the effect of exposure, vegetation behavior and the state of the soil water content. The zoning of the evaporation deficiency also shows two gradients den water stress vegetation. Indeed, the stress intensity decreases from north to south of the region and altitude resorts to valley bottoms.

Keywords : Evapotranspiration, Mejerda, MODIS satellite images, disability evaporation, zoning.

Discipline: GEOGRAPHIE

Laboratoire LETG Rennes COSTEL, UMR 6554 CNRS OSU
Université de Rennes 2,
Place du Recteur Henri Le Moal, CS 24307,
35043 RENNES cedex, France
Tél. : +33 (0)2 99 14 10 00

UR-GREVACHOT
Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis
Université de Tunis
94, BD du 9 avril 1938, 1007 - Tunis, Tunisie
Tél.: +216 71 560 840