

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



LABORATOIRE MATERIAUX DE GENIE CIVIL
ET ENVIRONNEMENT



Département : Hydraulique

Laboratoire matériaux de génie civil et environnement

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en hydraulique

Sur l'estimation du bilan hydrologique en zones urbaines : Evapotranspiration à l'échelle de la ville d'Alger

Auteure : Nour El Houda SLIMANI

Sous la direction de :

M. Mohamed Amine BOUKHEMACHA (MCA ENP)

Présenté est soutenu publiquement le 04/07/2018

Composition de Jury :

Président :	M. Abdelmalek BERMAD	Professeur	ENP
Rapporteur :	M. Mohamed Amine BOUKHEMACHA	MCA	ENP
Examineur :	M. Salah Eddine TACHI	MAB	ENP

ENP 2018

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département : Hydraulique
Laboratoire matériaux de génie civil et environnement

Mémoire de projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en hydraulique

Sur l'estimation du bilan hydrologique en zones urbaines : Evapotranspiration à l'échelle de la ville d'Alger

Auteure : Nour El Houda SLIMANI

Sous la direction de :

M. Mohamed Amine BOUKHEMACHA (MCA ENP)

Présenté est soutenu publiquement le 04/07/2018

Composition de Jury :

Président :	M. Abdelmalek BERMAD	Professeur	ENP
Rapporteur :	M. Mohamed Amine BOUKHEMACHA	MCA	ENP
Examineur :	M. Salah Eddine TACHI	MAB	ENP

ENP 2018

Dédicace

Aux âmes des martyrs de GAZA ...

Palestine

Remerciements

Je tiens avant tout à remercier Allah tout-puissant, car sans son aide et sa bienveillance, rien de cela n'aurait pu être possible.

La première personne que je tiens à remercier est mon encadreur Dr. Mohamed Amine BOUKHEMACHA, pour l'orientation, la confiance, la patience qui a constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port. Qu'il trouve dans ce travail un hommage vivant à sa haute personnalité

Je remercie également l'ensemble du personnel du Service climatologie de (ANRH)

Je remercie Mr Abdelmalek BERMAD, professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique de m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider le jury de ce mémoire

Je remercie Mr Salah Eddine TACHI de nous avoir fait l'honneur d'accepter d'examiner mon travail

Je tiens à exprimer mon entière reconnaissance envers tous les enseignants de L'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, qui ont contribué à notre réussite.

J'aimerais remercier ma famille, et plus particulièrement à mes parents qui par leurs prières et leurs encouragements, j'ai pu surmonter tous les obstacles

Je tiens à remercier toute personne qui a participé de près ou de loin à l'exécution de ce modeste travail.

ملخص

إن التبخر الرشحي مكون هام في الدورة الهيدرولوجية (يمثل 40% من توازن الماء) ، فإن التطور العمراني والتغير المناخي يمكن أن يؤثران بشكل كبير على توازن الماء عن طريق تعديل كمية الماء المتبخر وترشح من ماء الأرض. في هذا السياق ، كان الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو تقدير وتخطيط التبخر في المنطقة الحضرية. ويتم التحليل من وجهة بارجوف التي تجمع بين مناهجها المختلفة التي تعطي تقديرا شاملا للتبخرات الانتقالية على نظر كمية باستخدام طريقة النطاق الحضري (المبني) ومدى عدم بناء مع أخذ مدينة الجزائر كمنطقة دراسة. يتم دراسة النتائج التي تم الحصول عليها من خلال طرق مختلفة ومقارنتها مع بعضها البعض.

الكلمات المفتاحية: التبخر الرشحي، التبخر، النتح، بارجوف، رسم الخرائط، المناطق الحضرية، المناطق الريفية.

Abstract

Since evapotranspiration is an important component of the hydrological cycle (representing 40% of the water balance), urban development and climate change can significantly influence the water balance by modifying the amount of water evaporated and transpired from the Earth. In this context, the main objective of this study was to estimate and map evapotranspiration in an urban area. The analysis is carried out from a quantitative point of view by using the Bargov method combined with different approaches giving a global estimate of evapotranspiration on the urban scale (constructed) and the scale of the non-constructed taking the city Algiers as a study area. The results obtained by the different approaches are studied and compared with each other.

Key words: Evapotranspiration, evaporation, transpiration, Bargov, cartography, urban area, rural area.

Résumé

Etant donné que l'évapotranspiration est une composante importante de cycle hydrologique (représentant 40 % du bilan hydrique), le développement urbain et le changement climatique peuvent influencer d'une façon considérable le bilan hydrique en modifiant les quantités d'eau évaporée et transpirée de la terre. Dans ce contexte, la présente étude a eu comme objectif principal l'estimation et la cartographie de l'évapotranspiration dans une zone urbaine. L'analyse est réalisée d'un point de vue quantitatif en utilisant la méthode de Bargov combinée avec différentes approches et donné une estimation globale de l'évapotranspiration sur l'échelle urbaine (construit) et l'échelle du non-construit en prenant la ville d'Alger comme zone d'étude. Les résultats obtenus par les différentes approches sont étudiés et comparés entre eux.

Mots clé : Evapotranspiration, Evaporation, transpiration, Bargov, cartographie, zone urbaine, zone rurale.

Table des matières

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction générale.....	13
1 PHENOMENE DE L'EVAPOTRANSPIRATION.....	16
1.1 PROCESSUS DE L'EVAPOTRANSPIRATION.....	16
1.1.1 <i>Evaporation</i>	16
1.1.2 <i>Transpiration</i>	16
1.1.3 <i>Evapotranspiration (ET)</i>	16
1.1.4 <i>Les dérivées de l'évapotranspiration</i>	17
1.1.4.1 L'évapotranspiration potentielle et l'évapotranspiration réelle	17
1.1.4.2 Évapotranspiration des cultures de référence (ETo).....	17
1.1.4.3 Évapotranspiration des cultures dans des conditions standard (ETc).....	17
1.1.4.4 Évapotranspiration des cultures dans des conditions non standard (ETc adj)	18
1.2 FACTEURS AFFECTANT L'EVAPOTRANSPIRATION.....	18
1.2.1 <i>Paramètres météorologiques</i>	19
1.2.2 <i>Facteurs de culture</i>	19
1.2.3 <i>Gestion et conditions environnementales</i>	19
1.3 MESURE ET ESTIMATION DE L'EVAPOTRANSPIRATION.....	20
1.3.1.1 Évaporomètre de Piche	20
1.3.1.2 Cases lysimétriques.....	20
✓ Le lysimètre humide	21
✓ Le lysimètre sec.....	22
1.4 METHODES DE CALCUL DE L'EVAPOTRANSPIRATION (ETP, ETR)	23
1.5 L'IMPACT DE L'URBANISATION.....	27
1.5.1 <i>Estimation de l'évapotranspiration en zones urbaines</i>	27
1.6 TELEDETECTION ET L'ET	28
1.6.1 <i>La Méthode d'équilibre énergétique</i>	28
1.6.2 <i>La méthode d'équilibre énergétique simplifié</i>	30
1.6.3 <i>Estimation de l'évapotranspiration régionale en utilisant la relation complémentaire (CR)</i>	32
2 METHODES ET DONNEES.....	34
2.1 INTRODUCTION	34
2.2 PRESENTATIONS DE LA ZONE D'ETUDE	34
2.2.1 <i>Situation géographique et géomorphologique</i>	34
2.2.2 <i>Relief</i>	34
2.2.3 <i>Synthèse Démographique</i>	35
2.2.4 <i>Configuration géologique</i>	35
2.2.5 <i>Climatologie</i>	35
2.2.5.1 Température	35
2.2.5.2 Précipitation	35
2.2.6 <i>Réseau hydrographique</i>	35

2.2.7	<i>Occupation des sols</i>	36
2.3	DONNEES UTILISEES	37
2.3.1	<i>Présentations des données</i>	37
2.3.2	<i>Synthèses des données climatologiques</i> :	37
2.3.2.1	Evolution de la température moyenne, maximale et minimale	39
2.3.2.2	Evolution de l'humidité relative de l'air	40
2.3.2.3	Evolution de la pluie	41
2.3.2.4	Evolution de la vitesse du vent	42
2.3.2.5	Evolution de la radiation solaire.....	44
2.3.2.6	Répartition de la pression atmosphérique quotidienne	45
2.3.2.7	Répartition de l'insolation quotidienne	45
2.3.2.8	Répartition de la durée du jour quotidienne	45
2.3.3	<i>Données cartographiques utilisées</i>	46
2.3.3.1	Carte d'utilisation du terrain	46
2.3.4	<i>Carte des sols</i>	47
2.3.5	<i>La carte d'élévation</i>	49
2.3.6	<i>La carte piézométrique</i>	50
2.4	METHODE ET CALCUL	50
2.4.1	<i>Introduction</i>	50
2.4.2	<i>Description de la méthode de Bargov</i>	51
2.4.3	<i>Approche de calcul</i>	55
3	RESULTATS ET DISCUSSION	65
3.1	INTRODUCTION	65
3.2	L'EVAPOTRANSPIRATION REELLE A L'ECHELLE DE LA WILAYA D'ALGER	65
3.2.1	<i>Variation de l'évapotranspiration réelle dans le temps</i>	65
3.2.1.1	Scenario 1 - Sans irrigations (B=0mm/an)	65
a.	Comparaison avec la précipitation.....	65
b.	Comparaison avec la température.....	66
c.	Comparaison avec la vitesse du vent	67
d.	Comparaison avec l'humidité relative	67
e.	Comparaison avec la Radiation solaire	68
3.2.1.2	Scenario 2 - Avec taux d'irrigation B=320.4 mm/ans	68
b.	Comparaison avec la température.....	70
c.	Comparaison avec la vitesse du vent	70
d.	Comparaison avec la Humidité relative	71
e.	Comparaison avec la radiation solaire	72
3.2.2	<i>Comparaison entre méthodes à l'échelle de la wilaya d'Alger</i>	72
➤	Scenario 1 - Sans irrigation (B=0mm/an)	72
➤	Scenario 2 : avec un taux d'irrigation B=320.4mm/an	73
3.2.3	<i>Comparaison entre scénarios d'irrigation</i>	75
3.3	EVAPOTRANSPIRATION REELLE A L'ECHELLE DU CONSTRUIT DE LA WILAYA D'ALGER	76
3.3.1	<i>Variation de l'évapotranspiration réelle dans le temps</i>	76
a.	Comparaison avec la précipitation.....	76
b.	Comparaison avec la température.....	77
c.	Comparaison avec la vitesse du vent	78
d.	Comparaison avec la Humidité relative	78
e.	Comparaison avec la Radiation solaire	79
3.3.2	<i>Comparaison entre méthodes à l'échelle construite de la wilaya d'Alger (B= 0 mm)</i>	79

3.4	L'EVAPOTRANSPIRATION REELLE A L'ECHELLE DU NON CONSTRUIT.....	80
3.4.1	<i>Variation d'évapotranspiration dans le temps.....</i>	<i>80</i>
3.4.1.1	Scenario 1 - Sans irrigation (B=0 mm/an).....	80
b.	Comparaison avec la température.....	82
c.	Comparaison avec la vitesse du vent.....	82
d.	Comparaison avec la Humidité relative.....	83
e.	Comparaison avec la Radiation solaire.....	84
3.4.1.2	Scenario 2 - Avec un taux d'irrigation B=320.4 mm/an.....	84
a.	Comparaison avec la température.....	86
b.	Comparaison avec la vitesse du vent.....	86
c.	Comparaison avec la Humidité relative.....	87
3.4.2	<i>Comparaison entre méthodes à l'échelle non construit.....</i>	<i>87</i>
3.4.3	<i>Comparaison entre les modèles sans et avec taux d'irrigation.....</i>	<i>89</i>
3.5	COMPARAISONS ENTRE LES RESULTATS OBTENUS A DIFFERENTES ECHELLES.....	90
3.6	DISTRIBUTIONS SPATIALES DE L'EVAPOTRANSPIRATION REELLE.....	92
	Conclusion générale.....	95
	bibliographie.....	96

Liste des tableaux

Tableau 1 : Les équations de l'évapotranspiration potentielle ETp et ses paramètres. 24

Tableau 2 : Les équations de bilan d'énergie avec les équations de ses paramètres 29

Tableau 3 : Les équations du bilan d'énergie modifié et ses paramètres. 30

Tableau 4 : Tableau climatique. 36

Tableau 5 : Occupation des sols de la wilaya d'Alger estimée sur la base des données..... 36

Tableau 6 : Présentation des données climatologiques recueillies. 38

Tableau 7 : Présentation des données cartographiques recueillies. 46

Tableau 8 : Correspondance des classes d'utilisation de terrain pour la méthode de Bargov. 47

Tableau 9 : Correspondance entre les types de sol et la classification selon le modèle de Bargov. 49

Tableau 10 : Les équations et les paramètres utilisées dans la méthode de Bargov 52

Tableau 11 : Tableau de détermination de l'élévation capillaire journalière (KR). 55

Liste des figures

Figure 1 : Les stomates d'une feuille	16
Figure 2 : Evaporation et évapotranspiration potentielle et réelle.....	17
Figure 3 : Evapotranspiration des cultures de référence (ET _o), évapotranspiration des cultures en conditions standard (ET _c) et non standard (ET _c adj)	18
Figure 4 : Facteurs affectent l'évapotranspiration en référence à des concepts d'ET connexes	19
Figure 5 : Evaporomètre de piche.	20
Figure 6 : Schéma des différents types des cases lysimétriques.	21
Figure 7 : Schéma type d'une case lysimétrique	21
Figure 8 : Lysimètre humide (marais mélangé).	22
Figure 9 : Emplacement de la zone d'étude	34
Figure 10 : Répartition des classes d'occupation du sol sur la base de données de	37
Figure 11 : Emplacement des stations climatologiques.	39
Figure 12 : Evolution de la Température moyenne, maximale et minimale des stations de la zone d'étude.	40
Figure 13 : Evolution de l'humidité relative des stations de la zone d'étude.	41
Figure 14 : Evolution de la pluie des stations de la zone d'étude.	42
Figure 15 : Evolution de vitesse du vent des stations de la zone d'étude.	43
Figure 16 : Evolution de la radiation solaire des stations de la zone d'étude.	44
Figure 17 : Répartition des pressions atmosphériques quotidiennes pour toute Alger.	45
Figure 18 : Répartition des insolation quotidiennes pour tout Alger.....	45
Figure 19 : Répartition de la durée des jours quotidiens pour toute Alger.	45
Figure 20 : Carte d'utilisation du terrain	46
Figure 21 : Carte d'utilisation de terrain selon le modèle de Bargov.....	47
Figure 22 : Carte des sols de la wilaya d'Alger	48
Figure 23 : Carte des sols selon le modèle de Bargov.....	49
Figure 24: Modèle numérique de terrain (MNT)	50
Figure 25 : La carte piézométrique de la nappe Mitidjienne.....	50
Figure 26 : Classes et sous classes d'occupation du terrain de la méthode de Bargov	51
Figure 27 : Diagramme pour la détermination du paramètre d'efficacité (n) en fonction de l'utilisation du sol et du type de sol.	53
Figure 28 : Diagramme pour la détermination de le rapport de (ET _r /ET _p) selon la méthode de Bargov	54
Figure 29 : Température mensuelle moyenne et précipitations pour l'Algérie de 1901-2015 avec les seuils d'irrigation B=0mm/an, B=320.4 mm/an.....	56
Figure 30 : Les scenarios d'irrigation considérés pour chaque méthode.	56
Figure 31 : Correction du paramètre d'efficacité n.	57
Figure 32 : Processus de calcul de l'ET _r avec la méthode de Bargov.	57
Figure 33 : Les étapes d'élaboration de la carte de la profondeur jusqu'à la nappe.	59
Figure 34 : Carte des polygones de Thiessen correspondait au 1ere intervalle.....	60

Figure 35 : Carte des polygones de Thiessen correspondaient aux 2 ème intervalles. ...	60
Figure 36 : Carte issue de la superposition des polygones de Thiessen, type de sol, occupation des sols et profondeur jusqu'à la nappe Mitidjienne (2009-2010).....	62
Figure 37 : Carte issue de la superposition des polygones de Thiessen, type de sol, occupation des sols et profondeur jusqu'à la nappe Mitidjienne (2011-2012).....	63
Figure 38 : Variation annuelle de l'ETr à l'échelle de la wilaya d'Alger estimée par les méthodes suivantes : Turc, Penman-FAO, Trabert, Tabari pour un taux d'irrigation de 0 mm comparée avec les précipitations annuelles.....	65
Figure 39 : Variation annuelle de l'ETr à l'échelle de la wilaya d'Alger estimée par les méthodes suivantes : Turc, Penman-FAO, Trabert, Tabari pour un taux d'irrigation de 0 mm comparée avec les températures annuelles.....	66
Figure 40 : Variation annuelle de l'ETr à l'échelle de la wilaya d'Alger estimée par les méthodes suivantes : Turc, Penman-FAO, Trabert, Tabari pour un taux d'irrigation de 0 mm comparée avec les vitesses du vent annuels.	67
Figure 41 : Variation annuelle de l'ETr à l'échelle de la wilaya d'Alger estimé par les méthodes suivantes : Turc, Penman-FAO, Trabert, Tabari pour un taux d'irrigation de 0 mm comparée avec les humidités relatives annuelles.	67
Figure 42 : Variation annuelle de l'ETr à l'échelle de la wilaya d'Alger estimé par les méthodes suivantes : Turc, Penman-FAO, Trabert, Tabari pour un taux d'irrigation de 0 mm comparée avec les radiations solaires annuelles.....	68
Figure 43 : Variation annuelle de l'ETr à l'échelle de la wilaya d'Alger estimé par les méthodes suivantes : Turc, Penman FAO, Trabert, Tabari pour B=320.4 mm/an comparé avec les précipitations annuelles.....	69
Figure 44 : Variation annuelle de l'ETr à l'échelle de la wilaya d'Alger estimé par les méthodes suivantes : Turc, Penman FAO, Trabert, Tabari pour B=320.4 mm comparer avec les températures annuelles.....	70
Figure 45 : Variation annuelle de l'ETr à l'échelle de la wilaya d'Alger estimé par les méthodes suivantes : Turc, Penman FAO, Trabert, Tabari pour B=320.4 mm comparer avec les vitesses du vent annuels.	70
Figure 46 : Variation annuelle de l'ETr à l'échelle de la wilaya d'Alger estimée par les méthodes suivantes : Turc, Penman FAO, Trabert, Tabari pour B=320.4 mm comparer avec les humidités relatives annuelles.	71
Figure 47 : Variation annuelle de l'ETr à l'échelle de la wilaya d'Alger estimé par les méthodes suivantes : Turc, Penman FAO, Trabert, Tabari pour B=320.4 mm comparer avec les radiations solaires annuelles.	72
Figure 48 : Comparaison à l'échelle de la wilaya d'Alger pour un taux d'irrigation nul entre l'ETr estimée par la méthode de Turc, (a) : avec la méthode de Penman-FAO (b) : avec la méthode de Trabert, (c) : avec la méthode de Tabari.....	73
Figure 49 : Comparaison à l'échelle de la wilaya d'Alger pour un taux d'irrigation de 320.4 mm entre l'ETr estimée par la méthode de Turc, (a) : avec la méthode de Penman-FAO (b) : avec la méthode de Trabert, (c) : avec la méthode de Tabari.....	74

Figure 50 : Comparaison à l'échelle de la wilaya d'Alger entre l'ETr calculer avec et sans irrigation,(a): méthode de Turc : comparaison entre B=0 mm et B=320.4 mm (b) : méthode de Penman-FAO : comparaison entre B=0 mm et B=320.4 mm, (c) : méthode de Trabert : comparaison entre B=0 mm et B=320.4 mm, (d) : méthode de Tabari : comparaison entre B=0 mm et B=320.4 mm.....	75
Figure 51 : Variation annuelle de l'ETr à l'échelle construit de la wilaya d'Alger estimée par les méthodes suivantes : Turc, Penman-FAO, Trabert, Tabari comparée avec les précipitations annuelles.....	76
Figure 52 : Variation annuelle de l'ETr à l'échelle construite de la wilaya d'Alger estimée par les méthodes suivantes : Turc, Penman-FAO, Trabert, Tabari comparée avec les températures annuelles.....	77
Figure 53 : Variation annuelle de l'ETr à l'échelle construit de la wilaya d'Alger estimée par les méthodes suivantes : Turc, Penman FAO, Trabert, Tabari comparée avec les vitesses du vent annuels.....	78
Figure 54 : Variation annuelle de l'ETr à l'échelle construite de la wilaya d'Alger estimée par les méthodes suivantes : Turc, Penman FAO, Trabert, Tabari comparée avec les humidités relatives annuelles.	78
Figure 55 : Variation annuelle de l'ETr à l'échelle construite de la wilaya d'Alger estimée par les méthodes suivantes : Turc, Penman FAO, Trabert, Tabari comparée avec les radiations solaires annuelles.....	79
Figure 56 : Comparaison à l'échelle construite de la wilaya d'Alger entre l'ETr estimée par la méthode de Turc, (a) : avec la méthode de Penman-FAO (b) : avec la méthode de Trabert, (c) : avec la méthode de Tabari.....	80
Figure 57 : Variation annuelle de l'ETr à l'échelle du non construit de la wilaya d'Alger estimée par les méthodes suivantes : Turc, Penman FAO, Trabert, Tabari pour B=0 mm comparée avec les précipitations annuelles.....	81
Figure 58 : Variation annuelle de l'ETr à l'échelle du non construit de la wilaya d'Alger estimée par les méthodes suivantes : Turc, Penman FAO, Trabert, Tabari pour B=0 mm comparée avec les températures annuelles.....	82
Figure 59 : Variation annuelle de l'ETr à l'échelle du non construit de la wilaya d'Alger estimée par les méthodes suivantes : Turc, Penman FAO, Trabert, Tabari pour B=0 mm comparée avec les vitesses du vent annuels.	82
Figure 60 : Variation annuelle de l'ETr à l'échelle non construit de la wilaya d'Alger estimée par les méthodes suivantes : Turc, Penman FAO, Trabert, Tabari pour B=0 mm comparée avec les humidités relatives annuelles.....	83
Figure 61 : Variation annuelle de l'ETr à l'échelle du non construit de la wilaya d'Alger estimée par les méthodes suivantes : Turc, Penman FAO, Trabert, Tabari pour B=0 mm comparée avec les radiations solaires annuelles.....	84
Figure 62: Variation annuelle de l'ETr à l'échelle non construite de la wilaya d'Alger estimée par les méthodes suivantes : Turc, Penman FAO, Trabert, Tabari pour B=320.4 mm comparée avec les précipitations annuelles.	85

Figure 63: Variation annuelle de l'ETr à l'échelle du non construit de la wilaya d'Alger estimée par les méthodes suivantes : Turc, Penman FAO, Trabert, Tabari pour B=320.4 mm comparée avec les températures annuelles.	86
Figure 64: Variation annuelle de l'ETr à l'échelle du non construit de la wilaya d'Alger estimée par les méthodes suivantes : Turc, Penman FAO, Trabert, Tabari pour B=320.4 mm comparée avec les vitesses du vent annuels.	86
Figure 65: Variation annuelle de l'ETr à l'échelle du non construit de la wilaya d'Alger estimée par les méthodes suivantes : Turc, Penman FAO, Trabert, Tabari pour B=320.4 mm comparée avec les humidités relatives annuelles.	87
Figure 66 : Comparaison à l'échelle non construite de la wilaya d'Alger pour un taux d'irrigation nul entre l'ETr estimé par la méthode de Turc et (a) la méthode de Penman-FAO (b) la méthode de Trabert, (c) la méthode de Tabari.	88
Figure 67 : Comparaison à l'échelle non construite de la wilaya d'Alger pour B=320.4 entre l'ETr estimé par la méthode de Turc et : (a) la méthode de Penman-FAO (b) la méthode de Trabert, (c) la méthode de Tabari.	89
Figure 68 : Comparaison à l'échelle non construite de la wilaya d'Alger entre l'ETr calculer avec et sans irrigation, (a) : méthode de Turc: Comparaison entre B=0 mm et B=320.4 mm, (b) : méthode de Penman-FAO: Comparaison entre B=0 mm et B=320.4 mm, (c) : méthode de Trabert: Comparaison entre B=0 mm et B=320.4 mm, (d) méthode de Tabari : Comparaison entre B=0 mm et B=320.4 mm.	90
Figure 69 : L'ETr annuel à l'échelle du construit et du non construit estimé par la méthode de Bargov (pour B=0 mm).	91
Figure 70 : L'ETr annuel à l'échelle de la wilaya d'Alger et du non construit estimé par la méthode de Bargov (pour B=320.4 mm).	91

Introduction générale

L'évapotranspiration a une influence importante sur les processus climatologiques, atmosphériques et agricoles locaux; aspect largement étudié au cours du dernier siècle (Ramamurthy & Bou-Zeid, 2014). D'autre part, l'évaporation des surfaces construites dans les zones urbaines reste l'un des sujets les moins étudiés et mal compris dans les domaines de l'hydrologie urbaine et de la microclimatologie. De plus, il est bien connu que l'extension des zones urbaines en générale (et celle de la wilaya d'Alger en particulier), peut affecter le bilan hydrologique d'une façon considérable en modifiant ses différentes composantes (y compris l'évapotranspiration) en augmentant ou diminuant leurs magnitudes. Ces effets peuvent conduire à toute sorte des problèmes (inondation, altération de la recharge des nappes, etc.) et compliquent tous efforts de gestion intégrée des ressources en eau. En conséquence il est primordial de bien quantifier les différentes composantes du cycle hydrologique pour évaluer la disponibilité des eaux dans un territoire habitable et pour comprendre les effets de l'urbanisation et du changement climatique sur le bilan hydrique.

À cet effet notre étude se base sur les deux objectifs suivants :

Le premier objectif, c'est de faire une évaluation de la variabilité spatiale et temporelle de l'évapotranspiration à l'échelle du construit et du non construit et à l'échelle globale de la wilaya d'Alger durant l'intervalle 2009-2012, en se basant sur la méthode de Bargov combinée avec différentes approches (méthode de Turc, Penman-FAO, Trabert et Tabari) pour estimer le volume d'eau évaporé et transpiré et en jouant sur le taux d'irrigation dans les zones agricoles.

Un système d'informations géographiques (SIG) est utilisé pour gérer une base de données spatiale et non spatiale, qui représente les caractéristiques hydrologiques, hydrographiques et morphologiques de notre zone d'étude notamment (la carte d'occupation des sols, la carte piézométrique, la carte du sol et la carte d'élévation). Les données climatologiques et spatiales ont été collectées à partir de différentes sources et auprès de plusieurs organismes tels que le service climatologie de l'Agence Nationale des Ressources Hydrique (ANRH) et l'Institut National des Sols de l'irrigation et du drainage (INSID), ainsi que sur des ressources en ligne. Cette base de données constitue un support de modélisation pour réaliser une évaluation spatiale des évapotranspirations réelle (ETr) et faire une comparaison entre les valeurs de l'ETr estimée à différentes échelles (construit, non construit et à l'échelle globale de la wilaya d'Alger).

Le deuxième objectif de l'étude est de faire une comparaison entre les résultats de différentes approches combinées avec de la méthode de Bargov utilisés dans la quantification d'une des composantes du bilan hydrologique « l'évapotranspiration ».

Le premier chapitre présente le phénomène d'évapotranspiration et l'impact de l'urbanisation sur cette composante essentielle du bilan hydrique, et expose quelques techniques de mesure de l'évapotranspiration, des équations de l'estimation l'évapotranspiration potentielle (ETp) et l'évapotranspiration réelle (ETr) ainsi que l'utilisation de la télédétection dans ce domaine. Le deuxième chapitre donne une présentation de la zone d'étude, l'approche utilisée dans l'étude et une synthèse des données utilisées. Le troisième chapitre présente des résultats de calculs suivis par une conclusion générale.

*Le phénomène de
l'évapotranspiration*

1

1 PHENOMENE DE L'EVAPOTRANSPIRATION

1.1 PROCESSUS DE L'EVAPOTRANSPIRATION

1.1.1 Evaporation

L'évaporation est le processus par lequel l'eau liquide est convertie en vapeur d'eau et retirée de la surface d'évaporation. L'eau s'évapore d'une variété des surfaces, telles que les lacs, les rivières, les trottoirs, les sols et la végétation humide. Le changement d'état des molécules d'eau de liquide à vapeur nécessite de l'énergie. Le rayonnement solaire direct et, dans une moindre mesure, la température ambiante de l'air fournissent cette énergie. Au fur et à mesure que l'évaporation progresse, l'air environnant devient progressivement saturé ce qui va ralentir le processus et pourrait même l'arrêter si l'humidité de l'air n'est pas transférée dans l'atmosphère (Allen & Pereira, 1998).

1.1.2 Transpiration

La transpiration consiste en la vaporisation de l'eau liquide contenue dans les tissus végétaux et évacuation des vapeurs dans l'atmosphère. Les cultures perdent principalement leur eau à travers les stomates. Ce sont de petites ouvertures sur la feuille de la plante à travers lesquelles passent les gaz et la vapeur d'eau (voir la figure 1). La transpiration, comme l'évaporation directe, dépend de l'apport énergétique, du gradient de pression de vapeur et du vent. Par conséquent, le rayonnement, la température de l'air, l'humidité de l'air et les conditions du vent doivent être considérés lors de l'évaluation de la transpiration (Allen & Pereira, 1998).

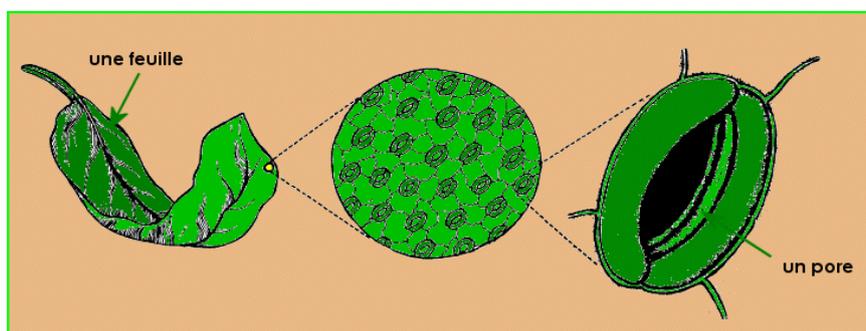


Figure 1 : Les stomates d'une feuille¹

1.1.3 Évapotranspiration (ET)

Le terme évapotranspiration réfère au volume d'eau exsudé par évaporation et transpiration dans une région. Outre la disponibilité de l'eau dans la couche arable, l'évaporation d'un sol cultivé est principalement déterminée par la fraction du rayonnement solaire atteignant la surface du sol. Cette fraction diminue au cours de la période de croissance à mesure que la

¹<http://soutien67.free.fr/svt/vegetaux/nutrition.htm>

culture se développe et que le couvert végétal ombrage de plus en plus de la surface du sol. Lorsque la culture est petite, l'eau est principalement perdue par l'évaporation du sol, mais une fois que la culture est bien développée et couvre complètement le sol, la transpiration devient le processus principal. À l'ensemencement, près de 100% de l'ET provient de l'évaporation, alors qu'à la pleine récolte, plus de 90% de l'ET provient de la transpiration. Le taux d'évapotranspiration est normalement exprimé en millimètres (mm) par unité de temps (Allen & Pereira, 1998).

1.1.4 Les dérivées de l'évapotranspiration

1.1.4.1 L'évapotranspiration potentielle et l'évapotranspiration réelle

On distingue l'évapotranspiration potentielle (ETp) qui est le pouvoir évaporant de l'atmosphère sur un sol avec couvert végétal disposant de l'eau en abondance. L'évapotranspiration réelle (ETr) correspond à la perte en eau d'un sol quand l'eau vient à manquer : ETr est fonction d'ETp et de la quantité d'eau présente dans le sol². (Rijtema, 1965) a montré que, dans des conditions climatologiques arides, l'évapotranspiration maximale peut dépasser ETp d'un facteur aussi élevé que 1,9 (Liamas, 1985).

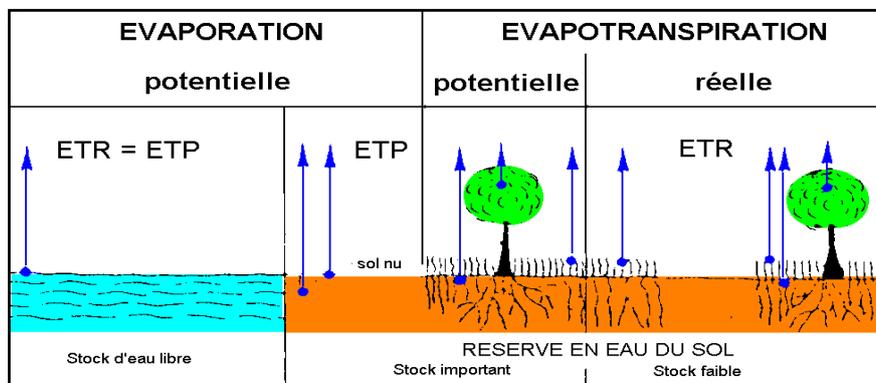


Figure 2 : Evaporation et évapotranspiration potentielle et réelle.³

1.1.4.2 Évapotranspiration des cultures de référence (ETo)

Le taux d'évapotranspiration d'une surface de référence, sans manque d'eau, est appelé évapotranspiration des cultures de référence ou évapotranspiration de référence (noté ETo). La surface de référence est une culture hypothétique de référence d'herbe avec des caractéristiques spécifiques (Allen & Pereira, 1998).

1.1.4.3 Évapotranspiration des cultures dans des conditions standard (ETc)

L'évapotranspiration des cultures dans des conditions standard, dénommée ETc, est l'évapotranspiration de cultures exemptes de maladies et bien fertilisées, cultivées dans des conditions optimales d'humidité du sol, et atteignant la production maximale dans les conditions climatiques d'analyse (Allen & Pereira, 1998).

²<https://www.u-picardie.fr/beauchamp/mst/eau-sol.htm>

³<https://www.u-picardie.fr/beauchamp/mst/eau-sol.htm>

1.1.4.4 Évapotranspiration des cultures dans des conditions non standard (ETc adj)

L'évapotranspiration des cultures dans des conditions non standard (ETc adj) est l'évapotranspiration provenant de cultures cultivées dans des conditions environnementales différentes que celles standard. Lorsque l'on cultive des cultures dans les champs, l'évapotranspiration réelle des cultures peut dévier d'ETc en raison de conditions non optimales telles que :

- la présence de ravageurs et de maladies ;
- la salinité du sol, la faible fertilité du sol ;
- la pénurie d'eau ou l'engorgement.

Cela peut réduire la croissance et la densité des plantes, ainsi que le taux d'évapotranspiration en dessous de ETc.

L'ETcadj est calculée en utilisant le coefficient de stress hydrique K_s et /ou en ajustant K_c pour toutes sortes d'autres contraintes en particulier celles environnementales (Allen & Pereira, 1998).

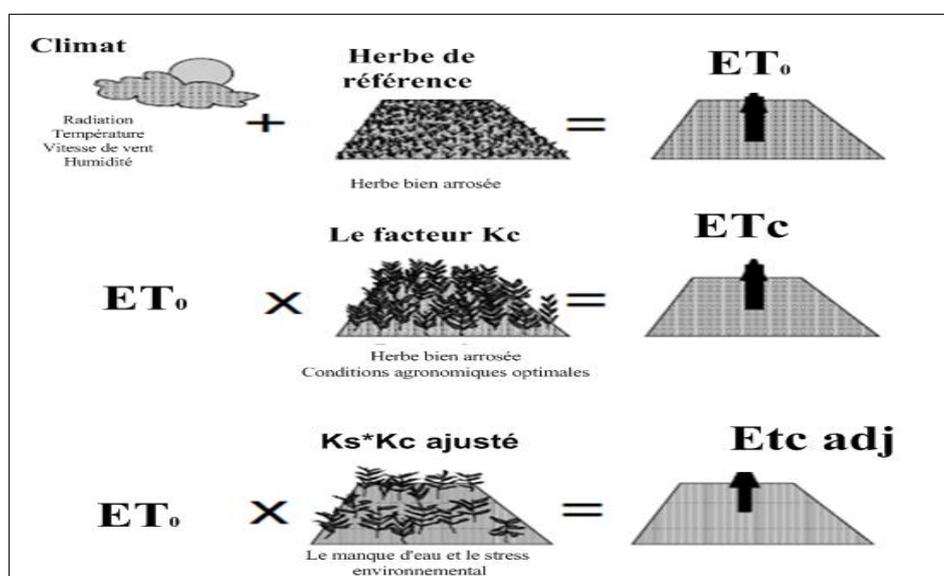


Figure 3 : Évapotranspiration des cultures de référence (ET₀), évapotranspiration des cultures en conditions standard (ET_c) et non standard (ET_c adj) (Allen & Pereira, 1998).

1.2 FACTEURS AFFECTANT L'EVAPOTRANSPIRATION

Les facteurs qui affectent l'évaporation et la transpiration sont les paramètres météorologiques, les caractéristiques des cultures, la gestion environnementale et ses aspects. Les concepts d'ET connexes présentés dans la Figure 4 sont discutés sur les concepts d'évapotranspiration.

1.2.1 Paramètres météorologiques

Le rayonnement, la température de l'air, l'humidité et la vitesse du vent sont les principaux paramètres météorologiques affectant l'évapotranspiration. Plusieurs procédures ont été développées pour évaluer le taux d'évaporation de ces paramètres. Le pouvoir d'évaporation de l'atmosphère est exprimé par l'évapotranspiration des cultures de référence (ET_o) (Allen & Pereira, 1998).

1.2.2 Facteurs de culture

Le type de culture, la variété et le stade de développement doivent être pris en compte lors de l'évaluation de l'évapotranspiration à partir de cultures pratiquées dans de grands champs bien gérés. La différence de résistance à la transpiration, de la hauteur de la culture, de la rugosité des cultures, de la réflexion, de la couverture végétale et des caractéristiques d'enracinement des cultures donnent, sous des conditions environnementales identiques, des niveaux d'ET différents (Allen & Pereira, 1998).

1.2.3 Gestion et conditions environnementales

Des facteurs comme la salinité ou la faible fertilité d'un sol, l'application limitée d'engrais, la présence des horizons de sol durs ou impénétrables, l'absence de contrôle des maladies et des ravageurs et la mauvaise gestion des sols peuvent limiter le développement des cultures et réduire l'évapotranspiration. Autres facteurs à prendre en compte pour évaluer ET sont la couverture végétale, la densité des plantes et la teneur en eau du sol. L'effet de la teneur en eau du sol sur l'ET dépend principalement de l'ampleur du déficit en eau et du type de sol. D'un autre côté, un excès d'eau peut causer l'engorgement qui pourrait endommager les racines des plantes et limiter l'absorption d'eau en inhibant la respiration (Allen & Pereira, 1998).

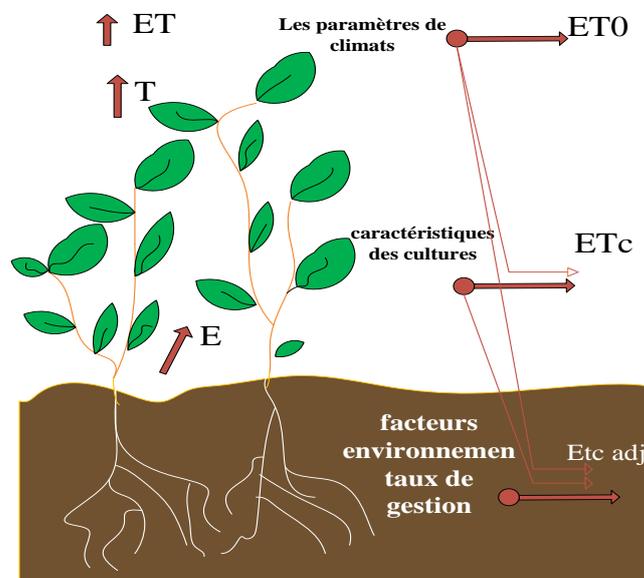


Figure 4 : Facteurs affectent l'évapotranspiration en référence à des concepts d'ET connexes (Allen & Pereira, 1998).

1.3 Mesure et estimation de l'évapotranspiration

1.3.1.1 Évaporomètre de Piche

Description

Cet évaporomètre est constitué d'un tube de mesure droit gradué, rempli avec de l'eau distillée et dont l'ouverture est recouverte d'un papier buvard absorbant (Figure 5). L'évaporation à la surface externe du papier est constamment remplacée par l'eau provenant du tube ce qui laisse un espace vide mesurable du côté scellé. L'opérateur peut alors mesurer la perte de liquide par unité de temps en suivant la descente du liquide (Cosandey & Mark, 2012).

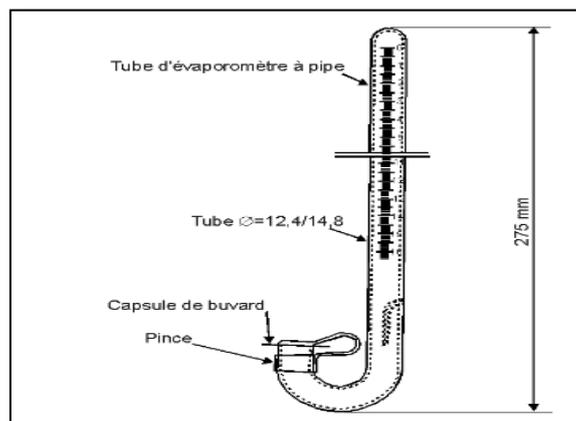


Figure 5 : Évaporomètre de piche.⁴

Avantages et inconvénients

Cet appareil est particulièrement sensible aux apports d'énergie advective dont dépend l'évaporation (Cosandey & Mark, 2012).

1.3.1.2 Cases lysimétriques

Le principe de base de mesure de l'évapotranspiration réelle (ET_r) avec un lysimètre ou Case lysimétrique (voir Figure 7) consiste à isoler hydrauliquement un volume de sol adroitement choisit puis d'en mesurer les entrées et les sorties (essentiellement la pluie) sous forme d'eau de drainage. La différence entre les entrées et les sorties donne une quantification de la variation de stockage de l'eau dans le sol et de l'eau effectivement évaporée. En considérant une période durant laquelle les variations de stock sont négligeables, on obtient une évaluation d'ET_r (Cosandey & Mark, 2012).

⁴https://www.researchgate.net/publication/277221786_Contribution_a_la_determination_d%27un_terme_du_bil_an_hydrologique_dans_la_region_d%27Errachidia-Tafilalet_Evaluation_de_l%27evapotranspiration_de_reference_et_de_l%27evaporation_a_travers_la_zone_non_saturee/figures?lo=1&utm_source=google&utm_medium=organic

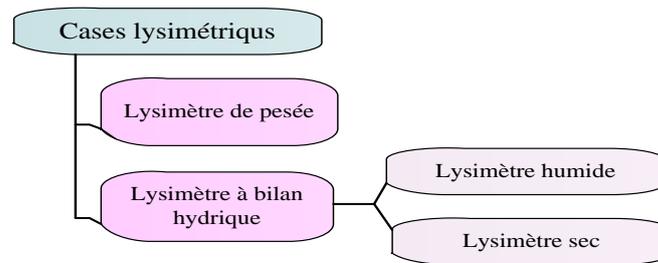


Figure 6 : Différents types des cases lysimétriques.

Différents types de lysimètres

Il existe deux types de lysimètres (voir Figure 6) : (1) le lysimètre de pesée et (2) le lysimètre à bilan hydrique.

Le lysimètre de pesée : Sa configuration permet de mesurer l'évapotranspiration par la différence de son poids. Un trou est creusé dans le sol, et une plate-forme en béton stable (Figure 7) est construite au fond où les capteurs de poids (cellule de charge) reposent sous un grand réservoir rempli de sol et de végétation de la région. La jante du réservoir affleure à la surface pour simuler des conditions sur le site d'installation. Les lysimètres de pesée sont coûteux à installer et à utiliser (Abteu & Melesse, 2013).

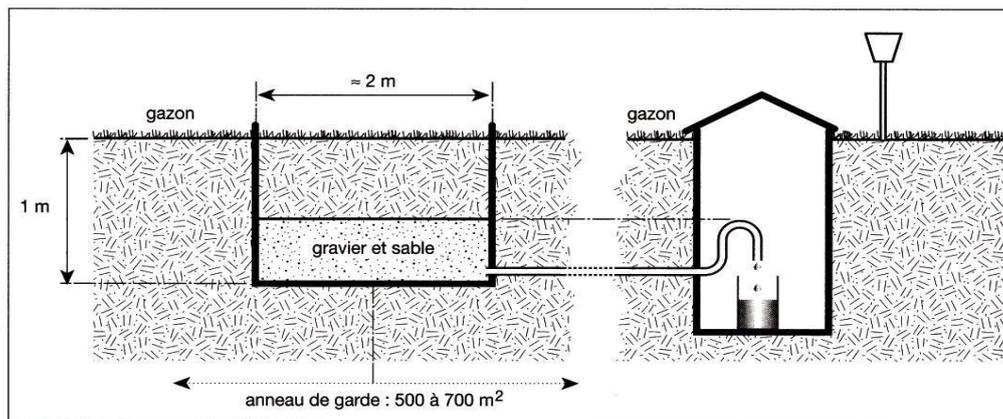


Figure 7 : Schéma type d'une case lysimétrique (Cosandey & Mark, 2012).

- **Le lysimètre à bilan hydrique :**

Un tel lysimètre peut être conçu, implémenté et exploité sous des conditions de saturation et d'étangs simulant un environnement de zone humide. En fonction des conditions hydriques (non saturé ou humide), ce type de lysimètre utilise une instrumentation différente (Abteu & Melesse, 2013).

- ✓ **Le lysimètre humide**

Conçu pour mesurer l'ET dans des conditions humides (la nappe phréatique est au-dessus du sol), ce type de lysimètre (voir Figure 8) est plus facile à utiliser tel que l'entrée et la sortie de

l'eau et le changement de profondeur de l'eau peuvent être relativement mesuré avec facilité (Abtew & Melesse, 2013).



Figure 8 : Lysimètre humide (marais mélangé) (Abtew & Melesse, 2013).

✓ Le lysimètre sec

Ce type est utilisé pour mesurer ET sous des conditions de saturation et non saturation. Dans ce cas, la nappe d'eau est sous la surface du sol. La teneur en eau se mesure indirectement avec un capteur humidité-température du sol (Abtew & Melesse, 2013).

1.4 Méthodes de calcul de l'évapotranspiration (ET_p, ET_r)

L'estimation de l'évapotranspiration des cultures est un grand défi. La plupart des études sur l'ET, concernent l'évapotranspiration potentielle et de référence où l'eau n'est pas un facteur limitant. Le climat, type de sol, emplacement et limitation saisonnière de l'eau sont les facteurs déterminants de l'évapotranspiration réelle d'une culture spécifique. Des efforts ont été faits dans la normalisation de l'estimation d'ET_r. Les études d'évaporation des cultures sont nécessaires pour développer des coefficients de culture (Abtew & Melesse, 2013).

Un grand nombre d'auteurs proposent des formules pour l'estimation ET_p et ET_r. Ces méthodes varient les unes des autres en fonction de (Cosandey & Mark, 2012):

- leurs complexités ;
- le nombre de paramètres climatiques qu'il faut y introduire ;
- la longueur des calculs qu'il faut effectuer.

Le Tableau 1 donne une sélection de quelques méthodes pouvant être utilisées pour estimer l'évapotranspiration potentielle.

Tableau 1 : Une sélection de formule pour estimation de l'évapotranspiration potentielle ETp.

Estimation de l'ETp			
(Cosandey & Mark, 2012)	<p>Formule de Turc (formule mensuelle) :</p> $Etp = 0.4 \left[\left(\frac{t}{(t+15)} \right) (IG + 50) \right]$ <p>Avec :</p> $IG = IgA \left(\frac{18 + 0.62h}{H} \right)$	<p><i>Etp</i> [mm]: évapotranspiration totale du mois considéré ; <i>t</i> [°C]: température moyenne du mois considéré; <i>IgA</i> [cal/cm²]: valeur mensuelle du rayonnement global par ciel clair ; <i>h</i> [h]: durée d'insolation journalière effective moyenne du mois considéré ; <i>H</i> [h]: durée d'insolation journalière maximale moyenne du mois considéré s'il n'y avait aucune nébulosité ;</p>	<p>Pas du temps : mensuel. Donne des résultats fins.</p>
(Abtew & Melesse, 2013)	<p>Formule de Turc (formule journalière) :</p> $ETp = 0.013 \frac{(23.89 * Rs + 50) Tmoy}{(Tmoy + 15)}$	<p><i>ETp</i> [mm/j]: l'évapotranspiration potentielle ; <i>Rs</i> [MJ/m² /j]: le rayonnement solaire ; <i>Tmoy</i> [°C]: la température moyenne de l'air.</p>	<p>Pas du temps : journalier. méthode qui utilise à la fois le rayonnement solaire et la température de l'air.</p>
(Lage et al., 2003)	<p>Formule de FAO Penman-Monteith</p> $Etp = \frac{0.408 \Delta R_n + U_2 \gamma (es - ed) \left(\frac{900}{T + 273} \right)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)}$ <p>La vitesse de vent à la hauteur z (z=2m) :</p> $U_z = u * \frac{4.87}{\ln(67.8 * z - 5.42)}$	<p><i>ETp</i> [mm/ j]: évapotranspiration potentielle ; <i>Rn</i> [MJ/m²]: rayonnement net ; <i>T</i> [° C]: température moyenne ; <i>U₂</i> [m/s]: vitesse de vent au niveau de 2 m; <i>z</i> [m]: la hauteur (z=2) ; <i>es</i> [kpa]: pression de vapeur de saturation à la température moyenne de l'air;</p>	<p>*Donne une approche journalière.</p>

(Abtew & Melesse, 2013)

$$R_n = 0.77R_s - 2.45 \times 10^{-9} \left(273 + \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \right) \times$$

$$\left(0.9 \frac{n}{N} + 0.1 \right) (0.34 - 0.14 \sqrt{e_d})$$

$$e_d = 0.611 * \exp \left(\frac{17.27 * T_{\min}}{T + 237.3} \right)$$

Et

$$e_s = 0.611 \times \exp \left(\frac{17.27 * T}{T + 237.3} \right)$$

$$R_n = R_g (1 - \alpha)$$

$$R_s = R_a * \left(a + b \frac{n}{N} \right)$$

Tel que :

$$a = 0.25$$

$$b = 0.50$$

(Abtew & Melesse, 2013)

$$\Delta = \frac{4098 * e_s}{(237.3 + T)^2}$$

e_d [kpa]: pression de vapeur moyenne de l'air;

Δ [kPa/° C] : la pente de la pression de vapeur ;

γ [kPa/° C]: constante psychrométrique ;

R_s [MJ/m²/j] : rayonnement solaire ;

T_{\max} [° C] : Température quotidienne maximale ;

T_{\min} [° C] : Température journalière minimale ;

n / N : fraction relative de l'ensoleillement ;

n [h]: ensoleillement élevé du jour ;

N [h] : longueur totale du jour ;

α [-] : constant ;

R_s [MJ/m²/j] : rayonnement solaire. ;

R_a [MJ/m²/j] : rayonnement extraterrestre ;

a : fraction de rayonnement extraterrestre (R_a) par temps couvert, pour un climat moyen est égal à 0,25 ;

b : 0,50 pour un climat moyen ;

n / N : fraction relative de l'ensoleillement ;

n [h]: ensoleillement mesurée en heures par jour ;

N [h] : longueur totale du jour.

Δ [kPa/° C] : pente de e_a par rapport à la courbe T;

e_s [K pa]: pression de vapeur de saturation ;

T [°C]: température de l'air ;

	$\gamma = 0.0016286 \frac{P}{\lambda}$ $\lambda = 2.501 - (0.00236 \times T_s)$	<p>γ [kPa/°C]: constante psychrométrique; P [Kpa]: pression atmosphérique; λ [cal.g/m] : Chaleur latente de vaporisation de l'eau; T_s [°C]: température de surface de l'eau.</p>	
(Djaman et al., 2016)	<p>Formule de Trabert</p> $ETp = 0.408 * 0.3075 * \sqrt{u_2} * (e_s - e_a)$	<p>ETp [cm/j] : évapotranspiration potentielle du gazon ; u_2 [m/s] : la vitesse moyenne interannuelle du vent mesurer à 2 mètres de hauteur ; e_s [K pa]: pression de vapeur de saturation ; e_a [KPa] : la pression de vapeur réelle.</p>	
(Hosseinzadehtalaei et al., 2016)	<p>Formule de Tabari</p> $ETp = -0.642 + 0.174 * R_s + 0.0353 * T_a$	<p>ETp [mm/j] : évapotranspiration potentielle ; R_s [MJ/m²/j] : rayonnement solaire ; T_a [°C] : température moyenne de l'air.</p>	<p>* pour régions humides. * avec ETp égal à zéro dans des conditions de gel ($T_a < 0$ °C).</p>

1.5 L'impact de l'urbanisation

Partout dans le monde, les zones urbaines sont en croissance. Les villes mettent les ressources naturelles sous un énorme stress. L'urbanisation affecte de manière significative l'ensemble du cycle de l'eau et introduit de nouvelles sources et voies d'accès aux eaux souterraines, ainsi que de nouvelles sources de contamination (Minnig, 2017).

Le taux croissant d'urbanisation a eu un effet négatif profond sur les écosystèmes naturels dans les bassins versants urbains. L'urbanisation conduit à une imperméabilité croissante qui augmente le ruissellement au détriment de l'évaporation, de l'infiltration et de la recharge, qui sont directement liées à la santé et à la présence de végétations. De plus, les changements climatiques causes des tempêtes extrêmes caractérisées par des hydrogrammes pointés de courte durée, créant de grands volumes de ruissellement pendant les événements de pluie. L'efficace mise en œuvre des politiques et des procédures de gestion des eaux pluviales est étroitement liée à l'équilibre hydrique, car une sous-estimation ou une surestimation de certaines composantes du bilan hydrique conduira à une mauvaise gestion des ressources des bassins versants. L'évapotranspiration (ET) comprend jusqu'à deux tiers des précipitations et elle est la plus difficile à mesurer. Toutefois, les hydrauliciens estiment souvent ET sur la base d'équations et de relations généralisées. Fournir des mesures de l'ETp permettra de calibrer et de valider les modèles de bilan hydrique contribuera de la précision et la fiabilité de ces modèles (Delidjakova et al., 2014).

1.5.1 Estimation de l'évapotranspiration en zones urbaines

Peu de travaux se sont orientés vers l'estimation de l'ET en zone urbaines. Cependant, il est possible de citer les travaux de (Litvak & Pataki, 2016) (Grimmond & Oke, 1999), et la méthode de Bargov (Minnig et al., 2017). Plus de détails sur cette dernière méthode seront donnés dans le prochain chapitre.

1.6 Télédétection et l'ET

Les méthodes d'estimation de l'évapotranspiration en utilisant des données de télédétection sont classiques en principe. La contribution de telle méthodes consiste principalement à acquérir les données nécessaires couvrant de grandes surfaces, et permettant la caractérisation de surfaces hétérogènes avec une résolution acceptable. Ces données remplacent les informations au sol. Jusqu'à présent, les méthodes d'estimation de l'ET à l'aide de données de télédétection nécessitent également les résultats des mesures au sol (Viliam, 2012).

L'évolution des techniques de télédétection a conduit de les utiliser dans les applications d'évapotranspiration. L'une des applications consiste à utiliser le rayonnement de la température de surface (température de surface mesurée par des radiomètres dans la partie infrarouge ; du spectre électromagnétique) pour calculer l'évapotranspiration. Plus tard, divers modèles pour estimer l'évapotranspiration en utilisant la température de surface détectée à distance sont apparus (Viliam, 2012). De nombreux auteurs ont essayé d'utiliser cette technique dès son apparition, cependant le problème qui se pose est de comment utiliser de telles données pour estimer l'ET. Deux méthodes utilisant des données mesurées à distance sont décrites:

- la méthode d'équilibre énergétique simplifiée ;
- la méthode utilisant la relation complémentaire.

1.6.1 La Méthode d'équilibre énergétique

Cette méthode utilise la température de surface détectée à distance (T_s) et la température mesurée de l'air (T) pour calculer les différents termes de l'équation du bilan énergétique :

- Le flux de chaleur sensible (H) ;
- Le flux de transport vertical de chaleur latente (LE) ;
- La résistance aérodynamique pour la chaleur sensible (r_{ah}).

afin d'évaluer le taux d'ET comme terme résiduel. Cette approche a été testée avec succès, principalement pour les champs agricoles (Viliam, 2012). Le Tableau 2 donne les équations pouvant être utilisées dans cette approche basée sur l'équilibre énergétique.

Tableau 2 : Equations du bilan énergétique (Viliam, 2012).

N°	Equations	Paramètres	Observations
(1)	L'équation du bilan énergétique $R = LE + H + G$	R [W/m ²] : le rayonnement net ; LE [W/m ²] : le flux de chaleur latente de l'évapotranspiration; H [W/m ²] : le flux de chaleur sensible ; G [W/m ²] : le flux de chaleur du sol .	*une hypothèse d'égalité est généralement appliquée : $r_{ah} = r_{av} = r_a$ tel que r_{av} est la résistance aérodynamique pour le flux de vapeur d'eau.
(2)	Le flux de chaleur sensible $H = \rho_a c_p \frac{T_s - T}{r_{ah}}$	ρ_a [kg/m ³] : la densité de l'air ; c_p [J/kg/K] : la chaleur spécifique de l'air à pression constante ; T_s [K] : la température de surface mesurée à distance ; T [K] : la température de l'air à la hauteur de référence;	*(1) représente l'approche dite "à une couche", qui suppose que la température de l'air mesurée par radiomètre est égale à la température aérodynamique.
(3)	Le flux de transport vertical de chaleur latente $LE = \frac{\rho_a c_p}{\gamma} \frac{e_s(T_s) - e}{r_{av} + r_s}$	r_{ah} [s/m] : la résistance aérodynamique pour transport de chaleur sensible. γ [kg/m/s ² /K] : la constante psychrométrique; $e_s(T_s)$ [hPa]: la pression de saturation de vapeur d'eau à la température T_s ; e_a [hPa]: la pression de vapeur à la hauteur de référence;	
(4)	La formule semi-empirique de la résistance	r_{av} [s/m] : la résistance aérodynamique pour le flux de vapeur d'eau ; r_s [s/m] : la résistance de surface.	

<p>(5)</p> <p>(6)</p>	$r_a = \frac{\left(\frac{z_0 u_+}{\nu_a}\right) + \ln\left(\frac{z-d_e}{z_0}\right) + \beta\left(\frac{z-d_e}{L_+}\right)}{\kappa \cdot u_+}$ <p>Avec la vitesse de frottement :</p> $u_+ = \frac{u}{\ln\left[\frac{z-d_e}{z_0}\right]}$ <p>la résistance de surface :</p> $r_s = \frac{e_s(T_s) - e}{\gamma \left[\frac{(R-G)}{\rho \cdot c_p} - \frac{(T_s - T)}{r_A} \right]} - r_a$	<p>z_0 [m] : la longueur de rugosité;</p> <p>ν_a [ms] : la viscosité cinématique de l'air ;</p> <p>z [m] : la référence hauteur au-dessus de la surface d'évaporation;</p> <p>d_e [m] : la hauteur de déplacement zéro ;</p> <p>β [-]: le facteur de stabilité de l'atmosphère;</p> <p>L_+ [m] : la longueur d'Obukhov-Monin;</p> <p>κ [-]: constante de Karman ($\kappa = 0,4$).</p> <p>u_+ [m/s]: la vitesse de frottement.</p> <p>u [m/s] : la vitesse du vent à la hauteur standard.</p>	<p>*Eq. (6) est nécessaire pour calculer (7).</p>
-----------------------	--	---	---

1.6.2 La méthode d'équilibre énergétique simplifié

L'idée de cette approche est d'estimer l'ET quotidienne (E_d) en utilisant la température de surface radiante, mesurée à sa valeur maximale T_{sm} (à environ 13:00 heures locales), la température de l'air standard correspondante (T_m) et le rayonnement net intégré sur 24 h (R_d) (Viliam, 2012). Le Tableau 3 donne les différentes équations utilisées par cette méthode.

Tableau 3 : Equations du bilan énergétique modifié (Viliam, 2012).

N°	Equations	Paramètres	Observations
(7)	<p>Equation de bilan d'énergie modifié</p> $R_d - LE_d = B(T_{sm} - T_m)^n$	<p>R [W/m²] : le rayonnement net quotidien ;</p> <p>LE [W/m²] : le flux de chaleur latente de l'évapotranspiration quotidienne ;</p> <p>T_{sm} [°C] : la température de surface radiante maximale ;</p> <p>T_m [°C]: la température de</p>	<p>*L'estimation des paramètres n et B est possible en utilisant des relations évaluées à partir des mesures sur le terrain.</p>

	<p>en négligeant le flux thermique quotidien (7) soit :</p> <p>(8) $R - LE = H = \frac{\rho_a \cdot c_p (T_s - T)}{r_{ah}}$</p> <p>(9) Avec</p> $B = 0.0175 + 0.05 \cdot Fr$ $n = 1.004 - 0.335 \cdot Fr$	<p>surface radiante ;</p> <p>B, n [-] : des paramètres à déterminer empiriquement.</p> <p>R [W/m²] : le rayonnement net ;</p> <p>LE [W/m²] : le flux de chaleur latente de l'évapotranspiration;</p> <p>H [W/m²] : le flux de chaleur sensible ;</p> <p>ρ_a [kg/m³] : la densité de l'air ;</p> <p>c_p [J/kg/K] : la chaleur spécifique de l'air à pression constante ;</p> <p>T_s [K] : la température de surface détectée à distance ;</p> <p>T [K] : la température de l'air à la hauteur de référence;</p> <p>r_{ah} [s/m] : la résistance aérodynamique pour transport de chaleur sensible.</p> <p>Fr [-] : coefficient du couvert végétal fractionnaire estimé par télédétection ($0 \geq Fr \geq 1$).</p>	<p>* L'intégration de l'Eq (8) sur 24h donne une équation identique à (7).</p> <p>* Les valeurs de n et B sont estimées dans $0,013 < B < 0,053$ et $0,88 < n < 1,16$ pour le Fr, et ils sont estimées pour les flux d'évaporation exprimés en cm/j.</p> <p>* la température est mesurée à une hauteur de 50m (Viliam, 2012).</p>
--	---	--	--

Cette méthode peut être utile pour calculer l'évapotranspiration régionale en utilisant des données de télédétection pour couvrir des terres ayant des pixels différents. Cette approche a été vérifiée contre des valeurs mesurées ; donnant une différence standard entre les valeurs mesurées et simulées de $(R_d - LE_d)$ a été trouvé 0,038 cm/j (Viliam, 2012).

1.6.3 Estimation de l'évapotranspiration régionale en utilisant la relation complémentaire (CR)

La relation complémentaire (CR) est basée sur les résultats de mesures, et est exprimée par l'équation (10) (Vilam, 2012).

$$ET_r = 2E_w - ET_p \quad (10)$$

Avec

ET_r : l'évapotranspiration réelle ;

ET_p : l'évapotranspiration potentielle, calculée par l'équation de Penman-FAO ;

E_w : l'évapotranspiration dans l'environnement humide.

Où E_w est donné par l'équation de Priestley-Taylor (Vilam, 2012):

$$E_w = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} Q_a \quad (11)$$

Où

Δ : la pente de la relation pression-température de la vapeur d'eau à saturation ;

γ : la constante psychrométrique ;

Q_a : l'énergie disponible à la surface d'évaporation ;

α : le coefficient Priestley-Taylor (1.2 à 1.3).

L'équation (10) est fréquemment utilisée à l'échelle régionale et continentale avec de bons résultats (Vilam, 2012) ; avec des différences entre les valeurs mesurées et celles calculées inférieures à 15% sur une base mensuelle et à 7% sur une base annuelle. Il est recommandé que l'équation (10) soit utilisée pour une période supérieure à une semaine (Vilam, 2012).

Méthodes et données

2

2 METHODES ET DONNEES

2.1 Introduction

Ce chapitre donne une présentation de la zone d'étude, ainsi que l'ensemble de données utilisées pour la réalisation de ce travail, à la fin une présentation de l'approche suivie pour l'estimation et la cartographie de l'évapotranspiration réelle est donnée.

2.2 Présentations de la zone d'étude

2.2.1 Situation géographique et géomorphologique

La wilaya d'Alger, qui est située au nord de l'Algérie, est prise comme zone d'étude dans le cadre de ce projet. La capitale du pays est limitée par la wilaya de Tipaza à l'Ouest, la wilaya de Boumerdes à l'Est, de la méditerranée au Nord (80 km à la bordure de la mer) et par la wilaya de Blida au sud.

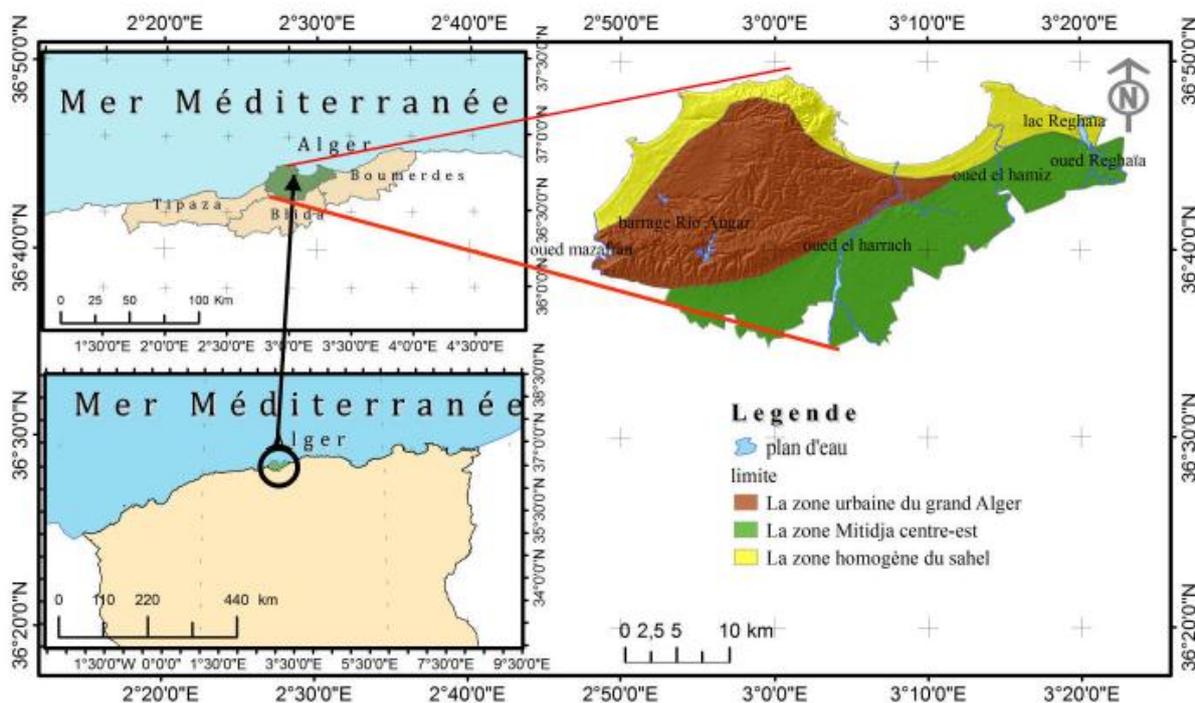


Figure 9 : Emplacement de la zone d'étude (Bachioua, 2017)

2.2.2 Relief

La zone d'étude est caractérisée par un relief physique marqué par trois zones longitudinales : (voir Figure 9):

- Le sahel à l'ouest de la baie d'Alger dont l'altitude moyenne est de l'ordre de 250 mètres. La pente, quant à elle, varie de 3% à 12 % ;
- Le littoral, dominé par le Sahel, est constitué par une ancienne terrasse étroite faible ;

- La Mitidja formée de sols de bonne fertilité favorisant le développement de cultures maraichères, dont l'altitude varie de 0 à 50 mètres, est traversée par les oueds Hamiz et Reghaïa. La pente est quasi nulle soit de 0% à 3%.

2.2.3 Synthèse Démographique

Le nombre de circonscriptions administratives de la wilaya d'Alger est de 13 daïras totalisant 57 communes. Au cours de l'année 2015, la population résidente totale était de 3 154 792 personnes, soit une densité de 50.93 hab/ha.⁵ Durant la période des recensements 2008/2015, la population s'est accrue de 858 000 habitants ainsi le taux d'accroissement moyen de la wilaya d'Alger durant la période des deux recensements 2008/2015 était de 2.15%.⁵

2.2.4 Configuration géologique

La région d'Alger est caractérisée par la présence de trois types morphologiques principaux : (1) la plaine de la Mitidja, (2) le Sahel et (3) la zone littorale (voir Figure 9). Ces trois compositions sont montrées par deux structures, qui sont des déformations à rayon de courbure, datant du post-Astien, l'Anticlinal du Sahel et le Synclinal Mitidjien (Duac, 2010).

2.2.5 Climatologie

Le climat de la zone d'étude est typiquement méditerranéen subhumide, avec des hivers doux et pluvieux et parfois enneigés et des étés chauds et ensoleillés.

2.2.5.1 Température

La température moyenne annuelle à la ville d'Alger étant de 18°C, avec des moyens maxima et minima de 32,8°C et 5,7°C.

2.2.5.2 Précipitation

Chaque année, les précipitations sont en moyenne de 707 mm. La pluie dans la zone d'étude tombe principalement durant l'hiver, avec relativement peu de pluie en été⁶.

2.2.6 Réseau hydrographique

La wilaya d'Alger comprend deux bassins versants, le bassin Chélif-Zahrez et le bassin de l'Algérois-Hodna-Soummam. Elle se divise en trois bassins drainants principaux : le bassin de Beni Messous (Ouest), le bassin d'El Harrach (centre) et le bassin de Reghaïa (Est) et englobe la zone humide du lac de Reghaïa et la zone de décantation de Beni Messous forment l'essentiel de l'hydrographie de la wilaya d'Alger (leurs surfaces sont de 789,21 ha soit 1,02% de la surface totale de la wilaya). Ces bassins versants sont caractérisés, à l'ouest, par un réseau complexe associé au système littoral montagneux du Sahel qui intègre un grand nombre de cours d'eau, encaissés le long des vallées, et à l'est, sur la plaine de la Mitidja, par un réseau assis sur de vastes vallées presque plates qui débouchent entre la baie d'Alger et la plate-forme littorale est (Duac, 2010).

⁵<http://www.ons.dz/IMG/pdf/Demographie2015.pdf>

⁶<https://fr.climate-data.org/location/3684/>

Chapitre 2. Méthode et Donnée

Tableau 4 : Données climatiques⁷.

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Température moyenne (°C)	11.5	12.1	13.5	15.5	18.2	21.5	24.3	25.2	23.3	19.4	15.1	12.3
Température minimale moyenne (°C)	8.1	8.3	9.7	11.3	14	17.4	20.2	21	19.6	15.7	11.5	9
Température maximale (°C)	14.9	15.9	17.3	19.7	22.5	25.6	28.5	29.5	27	23.2	18.8	15.6
Précipitations (mm)	91	79	72	53	43	16	3	5	37	78	109	121

2.2.7 Occupation des sols :

Les superficies de l'occupation du sol (voir **Figure 10**) de la wilaya d'Alger sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 5 : Occupation des sols de la wilaya d'Alger estimée sur la base des données (INSID, 2011)

Occupation	Superficie (ha)	taux (%)
Oléiculture	15,69	0,02
Culture arboricole	14147,83	18,3
Culture maraichère	10321,03	13,35
Grande culture	8153,8	10,55
Viticulture	2456,7	3,18
Total agriculture	35095,05	45,4
Zone de parcours	3894,21	5,04
Forêt - maquis – reboisement	5153,84	6,67
Plan d'eau	789,21	1,02
Espace bâti	32361,33	41,87
Total occupation hors agriculture	42198,59	54,60
Superficie totale	77293,64	100

⁷<https://fr.climate-data.org/location/3684/>

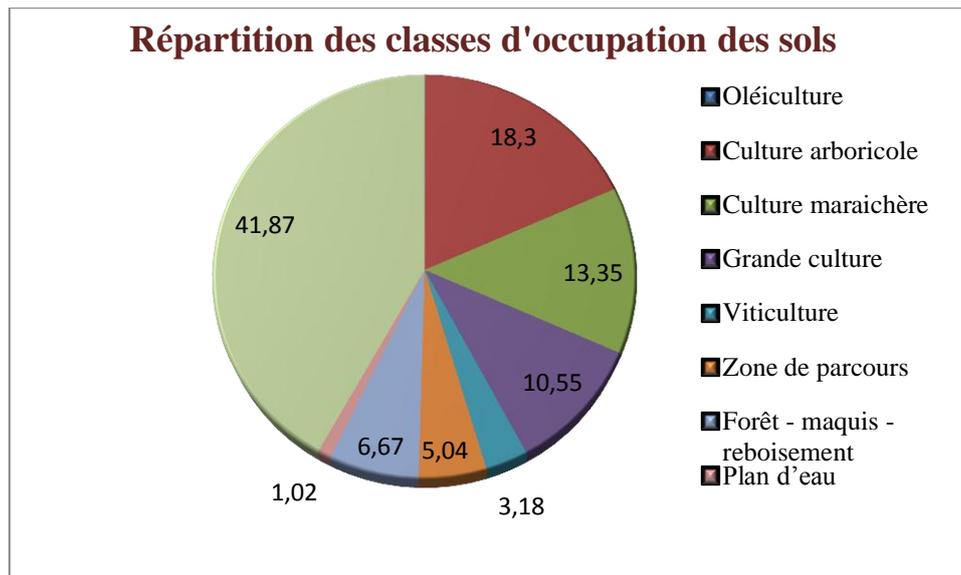


Figure 10 : Répartition des classes d'occupation du sol sur la base de données de (INSID, 2011).

2.3 Données utilisées

2.3.1 Présentations des données

Les données nécessaires pour la réalisation de la présente étude sont :

- Les données climatologiques : pluviométrie, température (moyenne, minimale et maximale), humidité relative, vitesse de vent, radiation solaire des différentes stations existent à la wilaya d'Alger;
- La carte d'occupation de sols ;
- La carte des sols ;
- La carte hydrogéologique ;
- La carte piézométrique.

2.3.2 Synthèses des données climatologiques :

Les données climatologiques collectées dans le cadre de cette étude, sont résumées dans le Tableau 6 (correspondant aux stations schématisées dans la Figure 11).

Chapitre 2. Méthode et Donnée

Tableau 6 : Présentation des données climatologiques recueillies.

Station	Coordonnées	Référence	Période
Alger port	longitude=3,1	Site : infoclimat ⁸	2009
	latitude=36,76	Site : Tutiempo ⁹	2010-2011
	hauteur=12	Site :infoclimat	2012
		Site :rp5.ru ¹⁰	2010-2012
		Arc-Gis ESRI	2009-2012
Cape Caxine	longitude=2,95	Site : Tutiempo	2011-2012
	latitude=36,81	Arc-Gis ESRI	
	hauteur=33		
Borj el Bahri	longitude=3,26	Site : Tutiempo	2011-2012
	latitude=36,81	Arc-Gis ESRI	2009-2012
	hauteur=58		
Baraki	longitude=3,09	Site :infoclimat	2010-2012
	latitude=36,66	Arc-Gis ESRI	2009-2012
	hauteur=20		
Bir Moured Raïs	longitude=3,05		2006-2012
	latitude=36,74	ANRH	2009-2011
	hauteur=140	Arc-Gis ESRI	2009-2012
Dar el Beida	longitude=3,25	Site : Tutiempo	2010-2012
	latitude=36,68	ENSA (Ecole Nationale Supérieure Agronomique)	1990-2016
	hauteur=25		
Tout Alger	Site :rp5.ru ENSA (Ecole Nationale Supérieure Agronomique) Site : accuweather ¹¹	2009-2012	

⁸<https://www.infoclimat.fr/climatologie-mensuelle/60369/janvier/2009/alger-port.html>

⁹<https://fr.tutiempo.net/climat/algerie.html>

¹⁰[https://rp5.ru/Archives_m%C3%A9t%C3%A9o_%C3%A0_Alger_\(port\)](https://rp5.ru/Archives_m%C3%A9t%C3%A9o_%C3%A0_Alger_(port))

¹¹<https://www.accuweather.com/fr/dz/algers/2093/hourly-weather-forecast/2093>

Chapitre 2. Méthode et Donnée

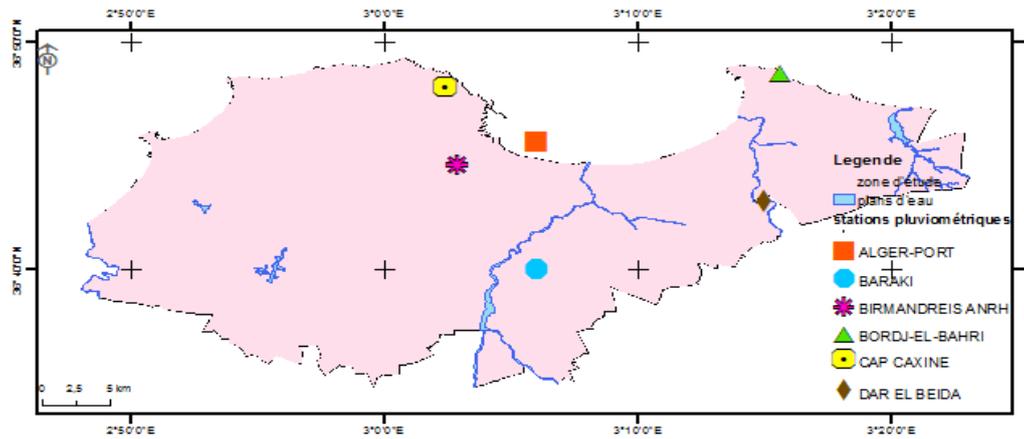
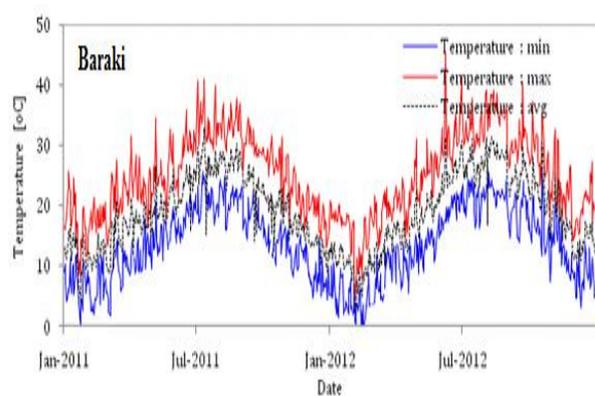
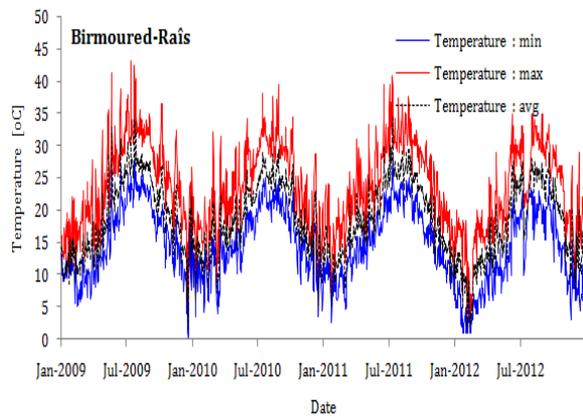
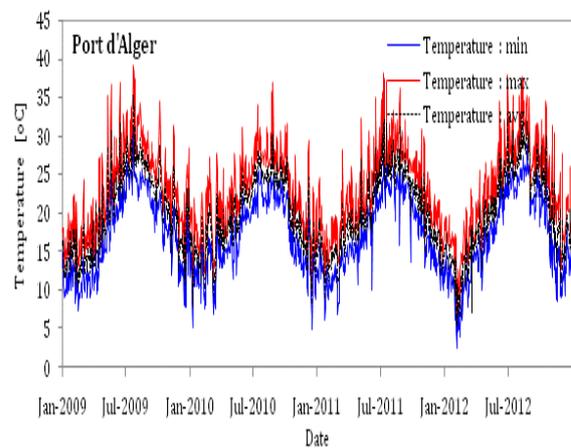
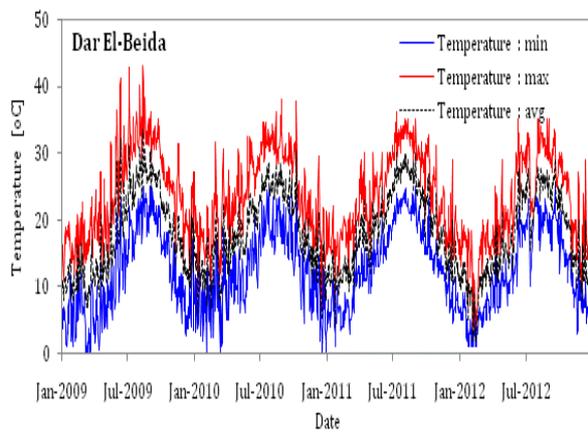


Figure 11 : Emplacement des stations climatologiques.

2.3.2.1 Evolution de la température moyenne, maximale et minimale



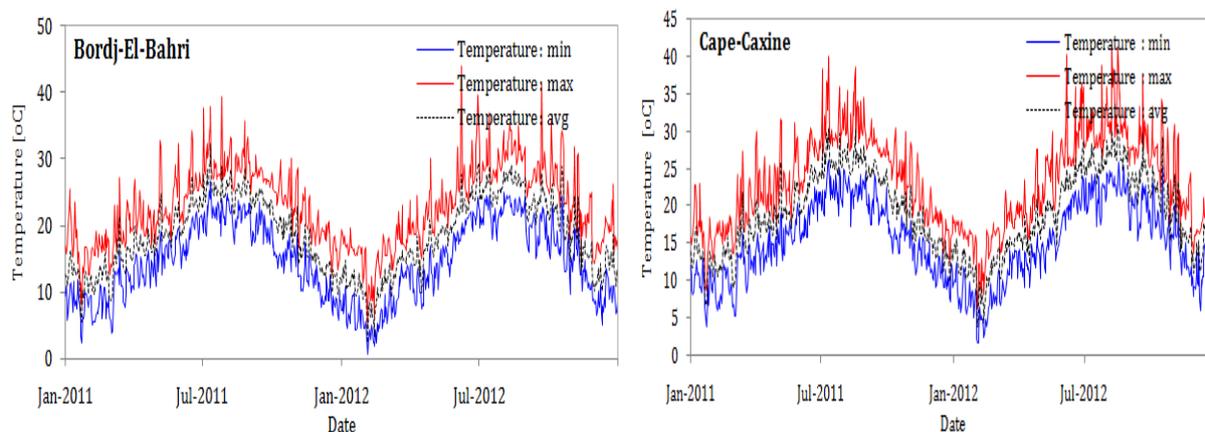
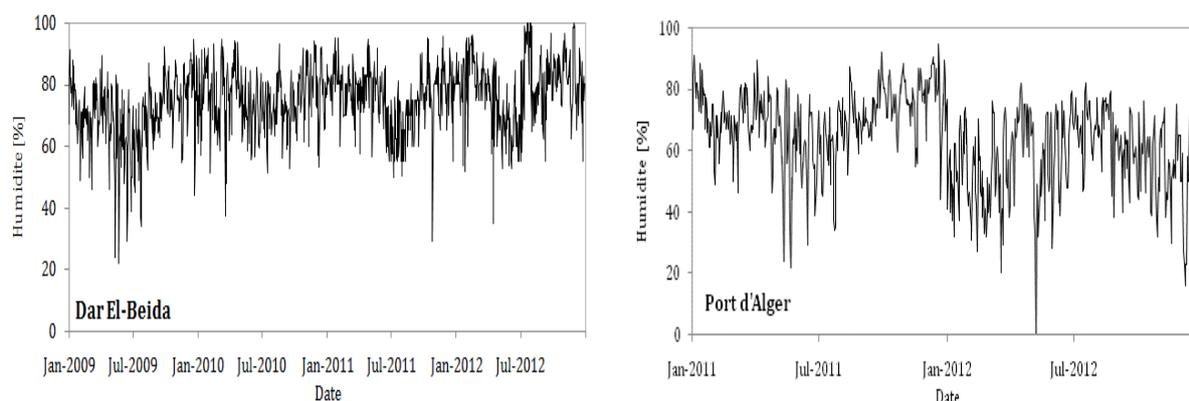


Figure 12 : Evolution de la température moyenne, maximale et minimale des stations de la zone d'étude.

Pour la majorité des stations climatologiques on observe que la valeur moyenne de la température moyenne est de 19.8°C avec une valeur maximale de 35.15°C et une valeur minimale de 5.10°C . Quant à la température maximale, ses valeurs fluctuent autour la valeur moyenne de 22.74°C avec la valeur maximale de 39.0°C et la valeur minimale de 6.3°C . Enfin, pour la température minimale, la valeur moyenne, minimale et maximale sont de 17.02°C , 0°C et 31.3°C respectivement.

2.3.2.2 Evolution de l'humidité relative de l'air



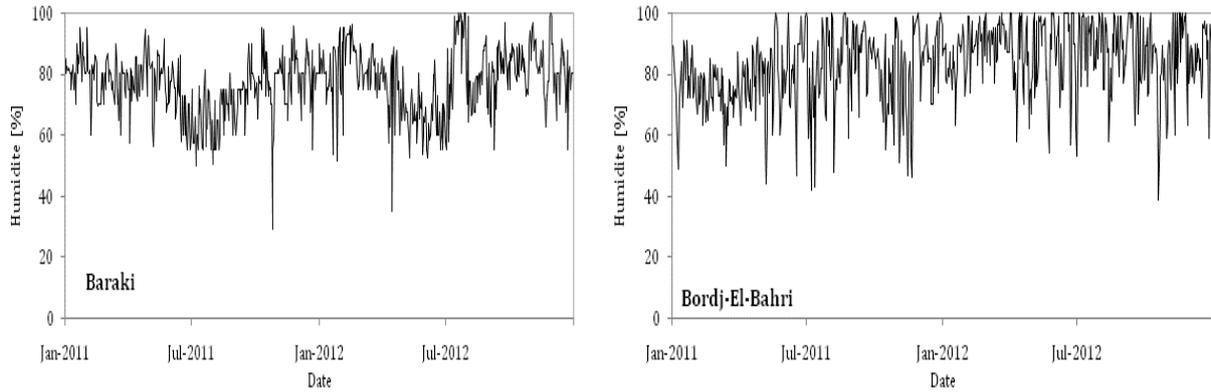


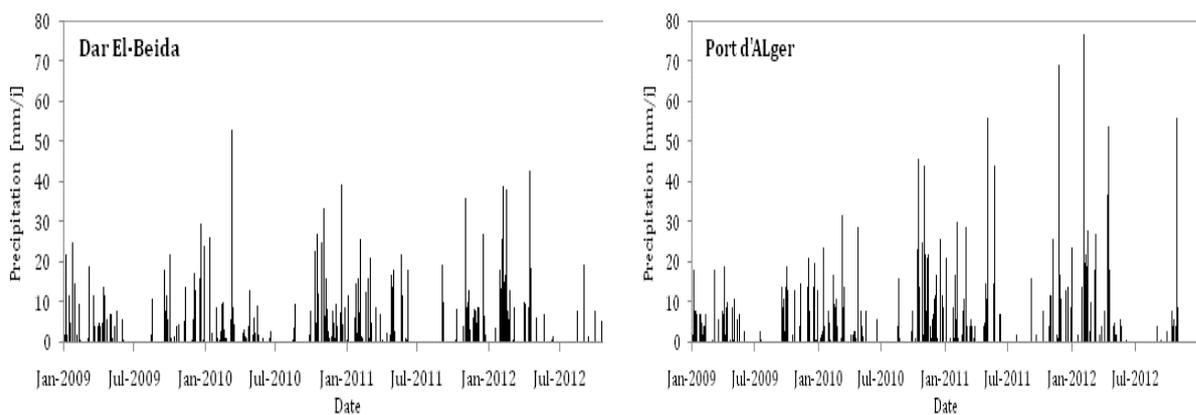
Figure 13 : Evolution de l'humidité relative de l'air des stations de la zone d'étude.

Nous remarquons que dans la plupart des stations météorologiques de la wilaya d'Alger, l'humidité relative fluctue autour d'une valeur moyenne de 85% avec un maximum qui atteint le 99% et un minimum de 20%.

Il est à noter que les données de certaines stations comprennent des vides sur différentes périodes et cela sans créer à des intervalles de temps avec un manque total d'enregistrements dans toutes les stations. De ce fait, la correction des données manquantes pour l'humidité relative a été réalisée de la façon suivante :

- Pour la station d'Alger-Port, on complète les données par les enregistrements de la station la plus proche : station de Dar El Beida pour l'année 2009.
- Pour la station de Birmoured Raïs, on adopte les données de la station de la plus proche: Dar El Beida pour la période 2009-2012.

2.3.2.3 Evolution de la pluie



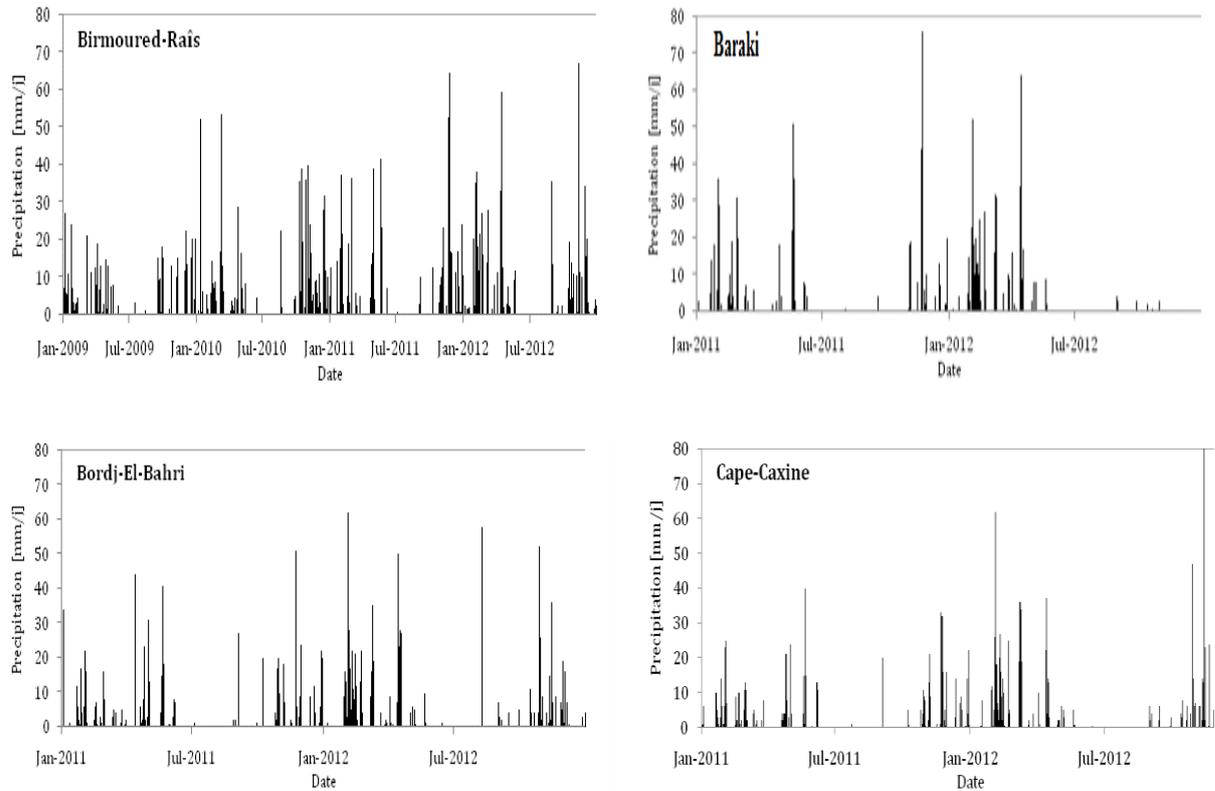
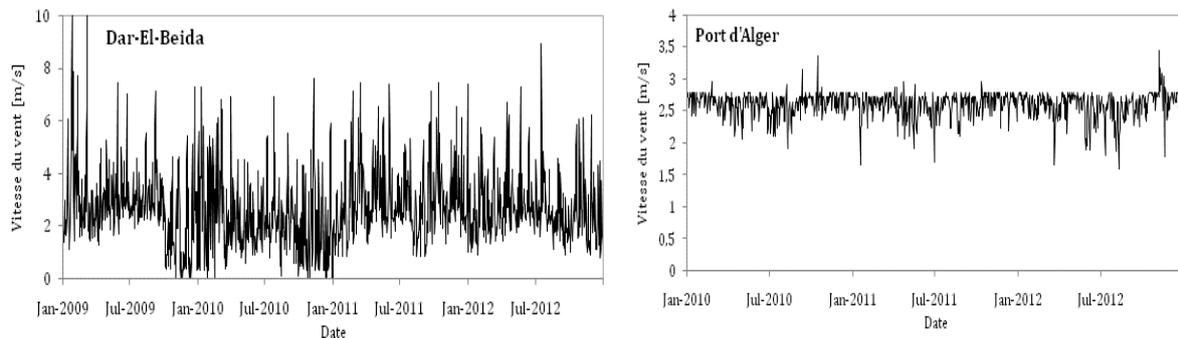


Figure 14 : Evolution de la pluie des stations de la zone d'étude.

Nous remarquons que la pluie est intense pendant les périodes allant d'Octobre à Février. La wilaya d'Alger se situe dans la zone littorale où le climat est méditerranéen soumis à l'influence de la mer, le relief, est caractérisé par un hiver pluvieux qui s'étend de septembre à mai (avec 96.2% de précipitation moyenne annuelle) dont décembre et janvier sont les plus froids et humides. L'été est sec et ensoleillé du mois de juin, jusqu'à mois d'août avec des pluies très faibles.

2.3.2.4 Evolution de la vitesse du vent



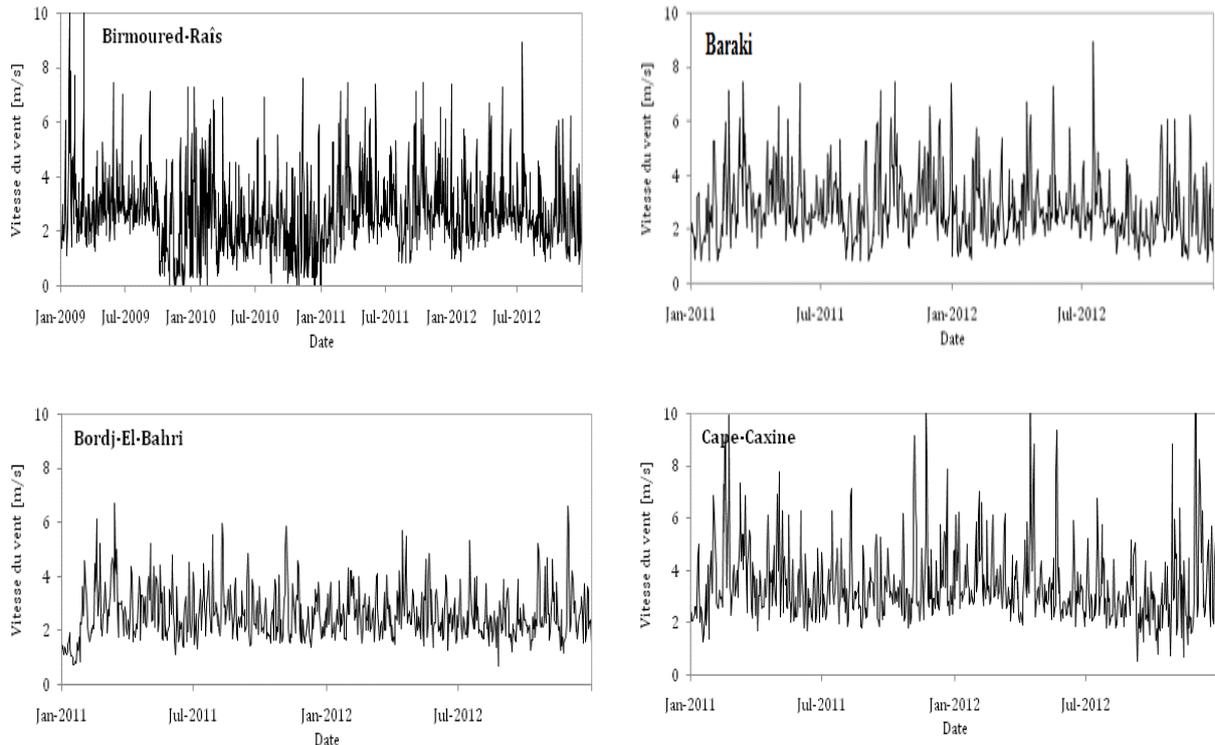


Figure 15 : Evolution de vitesse du vent des stations de la zone d'étude.

Nous observons que la vitesse du vent pour la plupart des stations fluctue autour de la valeur moyenne 6 m/s avec un maximum de 10 m/s et le minimum est 0 m/s.

Il est à noter que les données de certaines stations comprennent des vides sur différentes périodes et cela sans créer à des intervalles de temps avec un manque total d'enregistrements dans toutes les stations. De ce fait, la correction des données manquantes pour la vitesse du vent a été traitée de la façon suivante :

- Pour la station d'Alger-Port, on complète les données par les enregistrements de la station la plus proche; station de Dar El Beida pour l'année 2009.
- Pour la station de Birmoured Raïs, on adopte les données de la station la plus proche; station de Dar El Beida durant la période 2009-2012.

2.3.2.5 Evolution de la radiation solaire

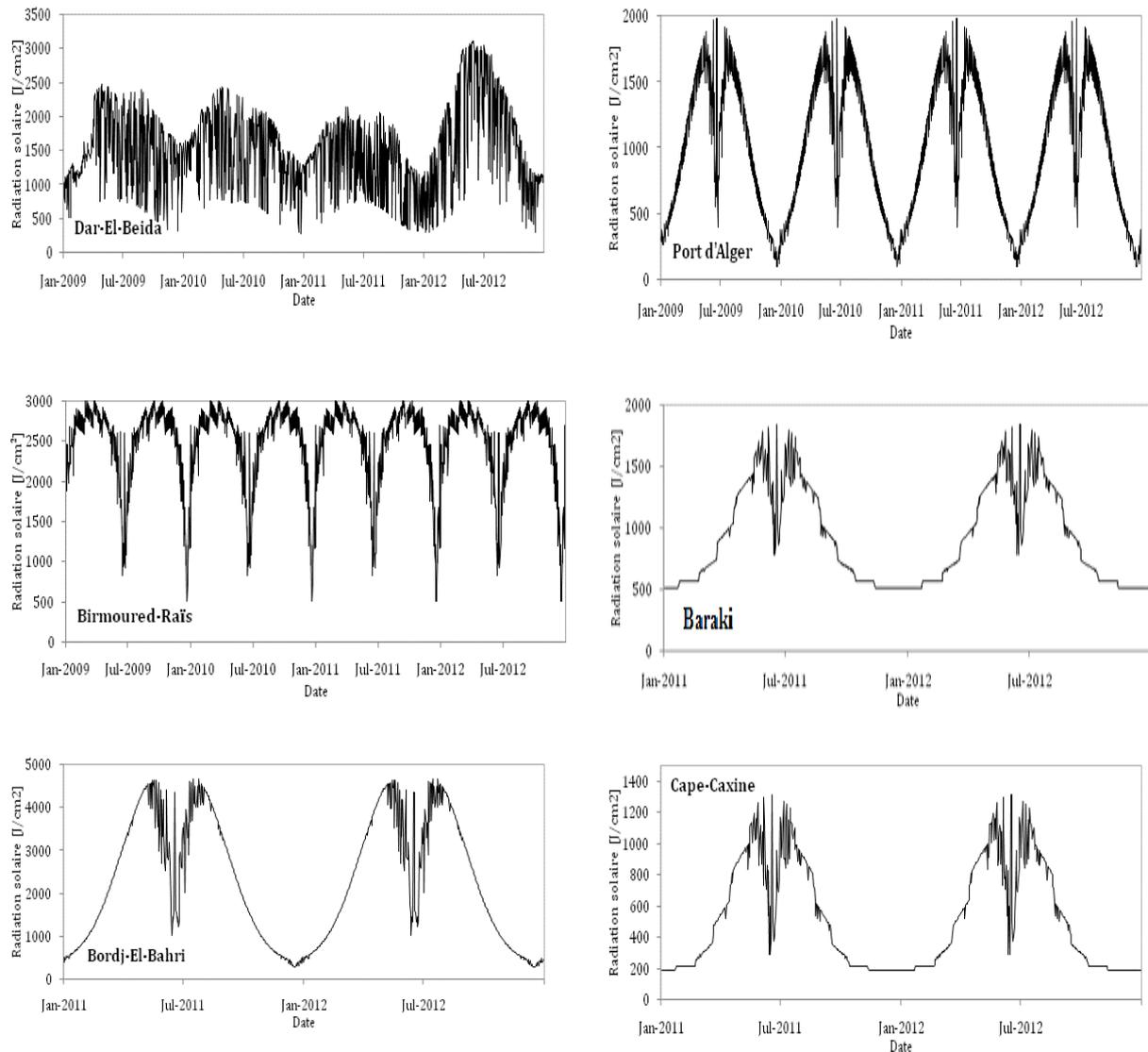


Figure 16 : Evolution de la radiation solaire des stations de la zone d'étude.

La radiation solaire pour la wilaya d'Alger atteint des valeurs extrêmes pendant l'été (de Mars à Septembre) et elle diminue pour atteindre le minimum dans la période de l'hiver (d'Octobre à Février).

2.3.2.6 Répartition de la pression atmosphérique quotidienne

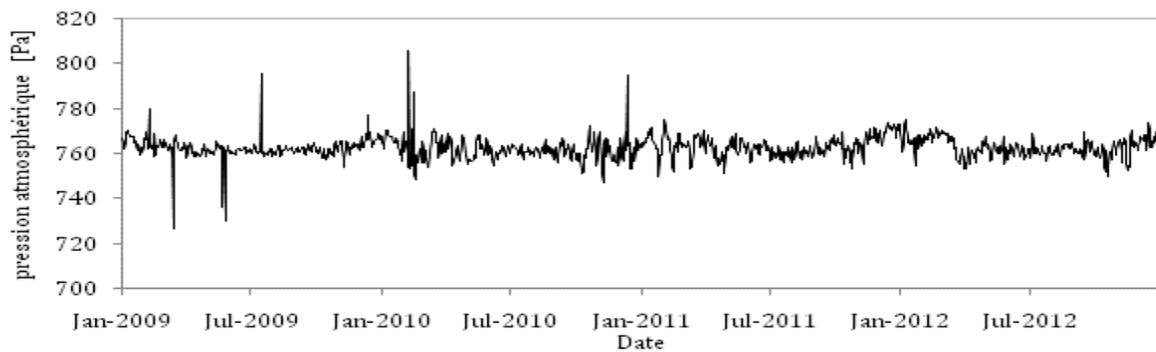


Figure 17 : Répartition des pressions atmosphériques quotidiennes pour la wilaya d'Alger.

Nous observons que la pression atmosphérique de la wilaya d'Alger varie autour d'une moyenne de 761.98pa et elle atteint le maximum de 805.6pa et le minimum de 726.87pa.

2.3.2.7 Répartition de l'insolation quotidienne

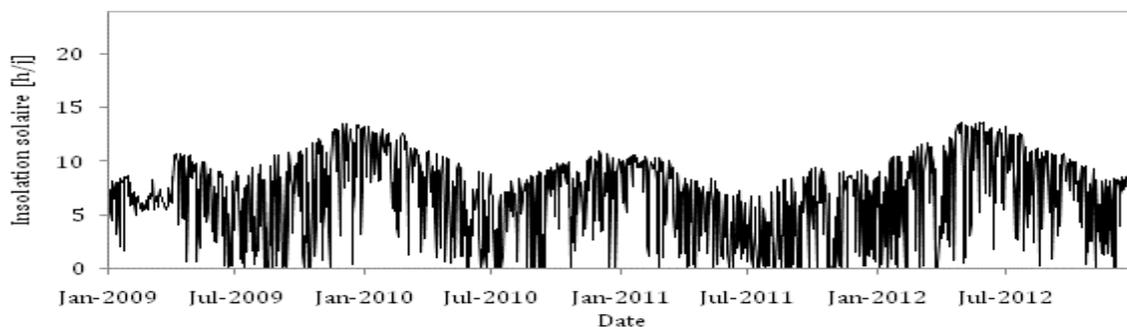


Figure 18 : Répartition des insulations quotidiennes pour la wilaya d'Alger.

L'insolation dans la ville d'Alger fluctue autour d'une moyenne de 6.75h/j avec un maximum de 13.60h/j observée durant l'été.

2.3.2.8 Répartition de la durée du jour quotidienne

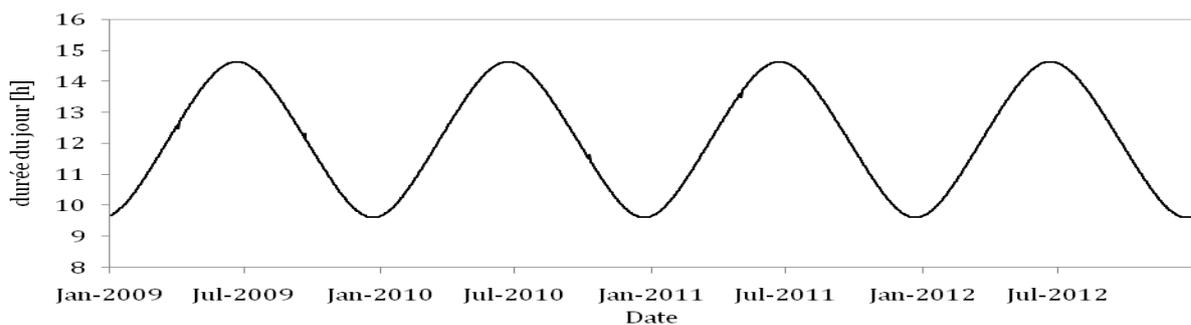


Figure 19 : Répartition de la durée des jours quotidiens pour la wilaya d'Alger.

Chapitre 2. Méthode et Donnée

La durée du jour de la wilaya d'Alger varie d'une façon cyclique en augmentant pendant les mois de l'hiver et en diminuant pendant les mois d'été.

2.3.3 Données cartographiques utilisées

Tableau 7 : Synthèse des données cartographiques recueillies.

Jeu de données	Source	Référence	Date
Carte d'utilisation de terrain	L'institut national des sols de l'irrigation et du drainage	(INSID, 2011)	2011
Carte des sols	European Digital Archive of Soil Maps (EuDASM)	(Selvaradjou, 2005)	1949
Modèle numérique de Terrain (MNT); résolution spatiale : 1 arc second	ASTER GDEM est un produit de METI et de la NASA	(ASTER GDEM, 2011)	Octobre 2011

2.3.3.1 Carte d'utilisation du terrain

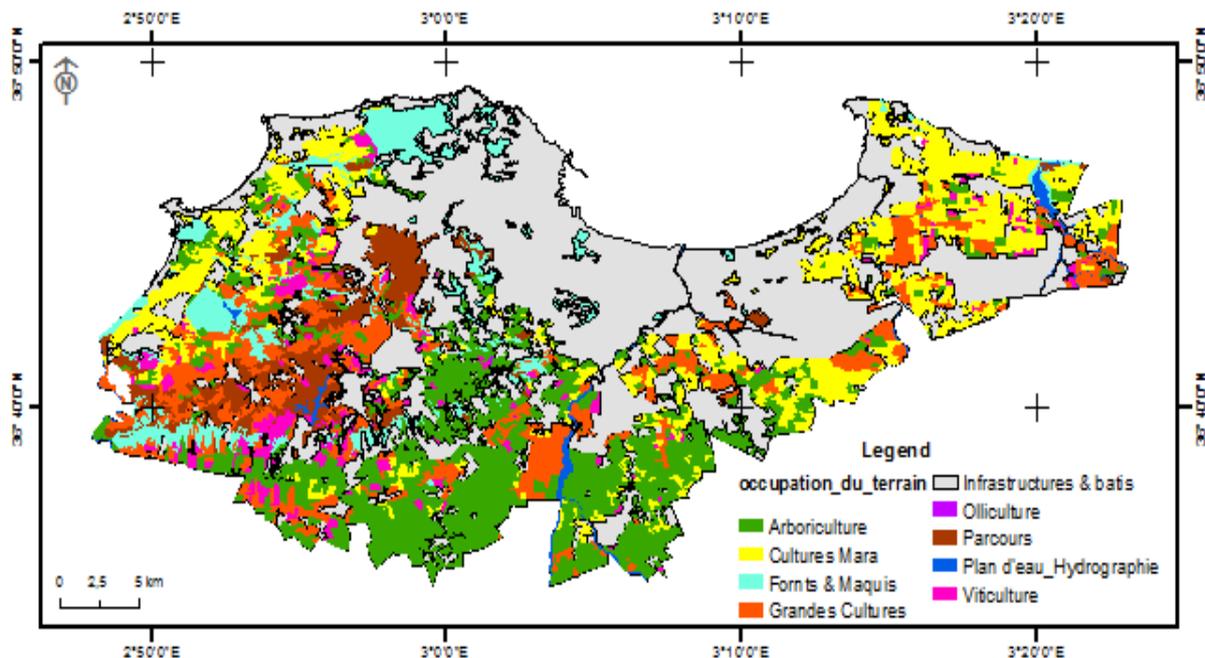


Figure 20 : Carte d'utilisation du terrain (INSID, 2011).

En terme d'utilisation du terrain, la zone d'étude est dominée par les terres urbanisées qui représentent environ la moitié de la superficie totale de la wilaya. Le reste de l'espace est occupée par des terres agricoles et des terres non productives (les parours, plan d'eau, zone humide, etc.).

➤ **Correspondance des classes d'utilisation du terrain pour la méthode de Bargov :**

Une reclassification de la carte d'utilisation du terrain en utilisant le système défini par la méthode de Bargov (Minnig, 2017) été nécessaire. Cela a été réalisé sur la base de la table de correspondance suivante:

Tableau 8 : Correspondance des classes d'utilisation de terrain pour la méthode de Bargov.

Occupation du sol de Bargov	Ancienne carte d'occupation
Agricole	Arboriculture Culture Maraîchères Grande culture Viticulture
Forêt	Forêt et Maquis
Zone urbaine	Infrastructures et bâtis
Jardin	Jardin
Sols sans végétation	Parcours
Plan d'eau	Plan d'eau

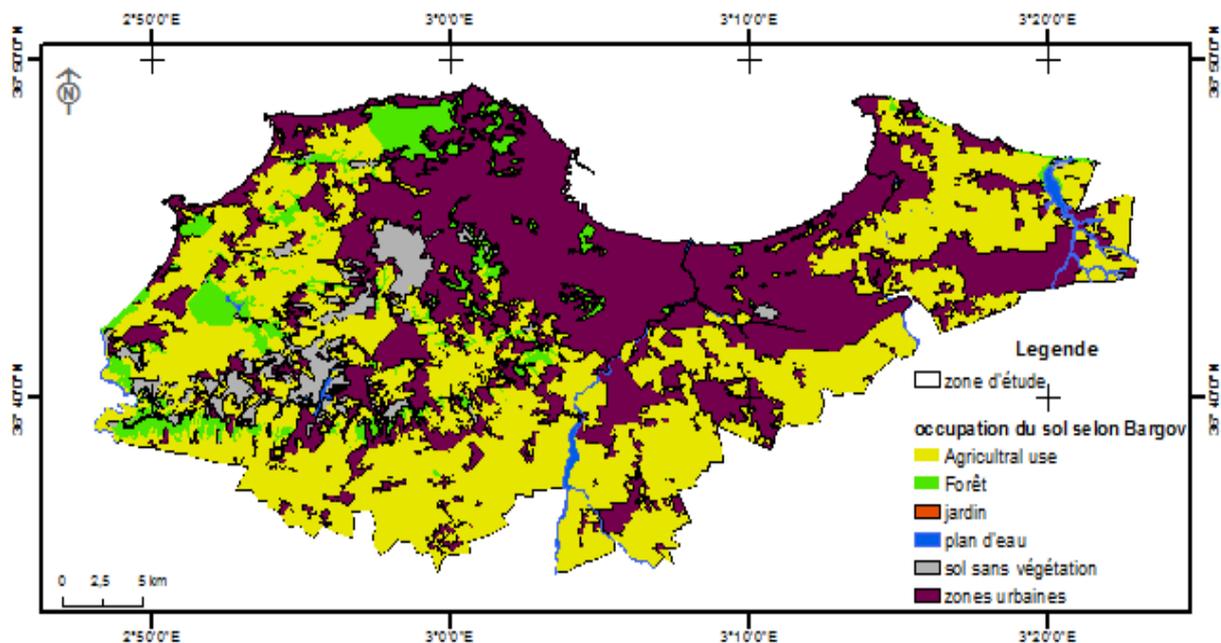


Figure 21 : Carte d'utilisation de terrain selon le modèle de Bargov

2.3.4 Carte des sols

D'après (DURAND, 1954) la pédologie de la zone d'étude comprend les sols suivants (voir Figure 22) :

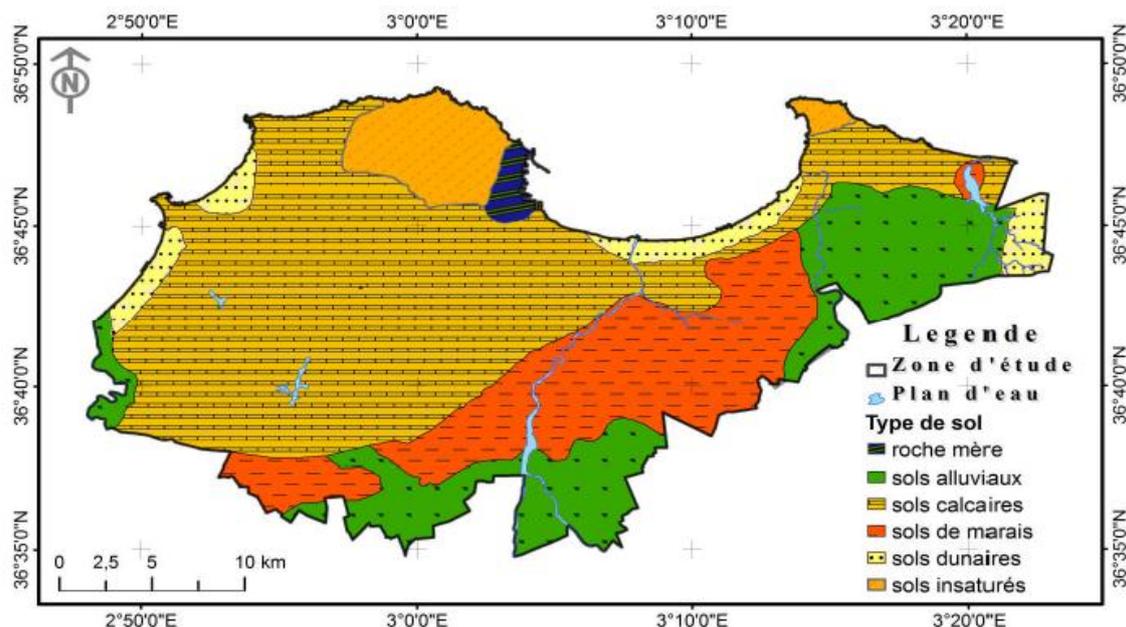


Figure 22 : Carte des sols de la wilaya d'Alger (Selvaradjou, 2005)

- **Sols calcaires** : Ces sols ont généralement une texture légère et sont donc perméables (DURAND, 1954).
- **Les sols insaturés**: Résultent de la décomposition superficielle de roches non calcaires donnant des éléments grossiers (les granites et encore des éléments argileux imperméables (Benchetrit, 2016) pouvant être plus abondantes en surface qu'en profondeur, leurs roches-mères sont généralement imperméables.
- **Sols alluviaux**: Ce sont des dépôts alluviaux relativement récents, présentant une simple accumulation de matières organiques en surface et formé sur des matériaux marins, fluviatiles; généralement humide.
- **Sols dunaires**: Ce sont des sables éoliens fixés ou non, déposés en bordure de mer.

Fixés par une végétation maigre ils peuvent être enrichis en matières organiques en surface.

- **Roches mères** : Les roches-mères sont une roche sédimentaire riche en matière organique, qui va fournir la matrice minérale des sols sont essentiellement les roches de la croûte continentale (Benchetrit, 2016).
- **Sols de marais** : Ce sont des sols d'origine fluviomarine issue de la sédimentation ancienne et présente. Ils sont constitués à 98% d'éléments fins de type limons, sables fins ou argiles.

➤ Correspondance type de sol pour la méthode de Bargov :

Une reclassification de la carte des sol en utilisant le système défini par la méthode de Bargov (Minnig, 2017) été nécessaire. Cela a été réalisé (en fonction de la perméabilité et des caractéristiques physiques des sol) sur la base de la table de correspondance donnée dans Tableau 9.

Chapitre 2. Méthode et Donnée

Tableau 9 : Correspondance entre les types de sol et la classification selon le modèle de Bargov.

Type de sol selon Bargov	L'ancien type de sol
Argile	Sols insaturées Roche mère
Sable	Sols dunaires
Limon	Sols calcaires
Limon sableux	Sols alluviaux
Limon argileux	Sols marais
Plan d'eau	Plan d'eau

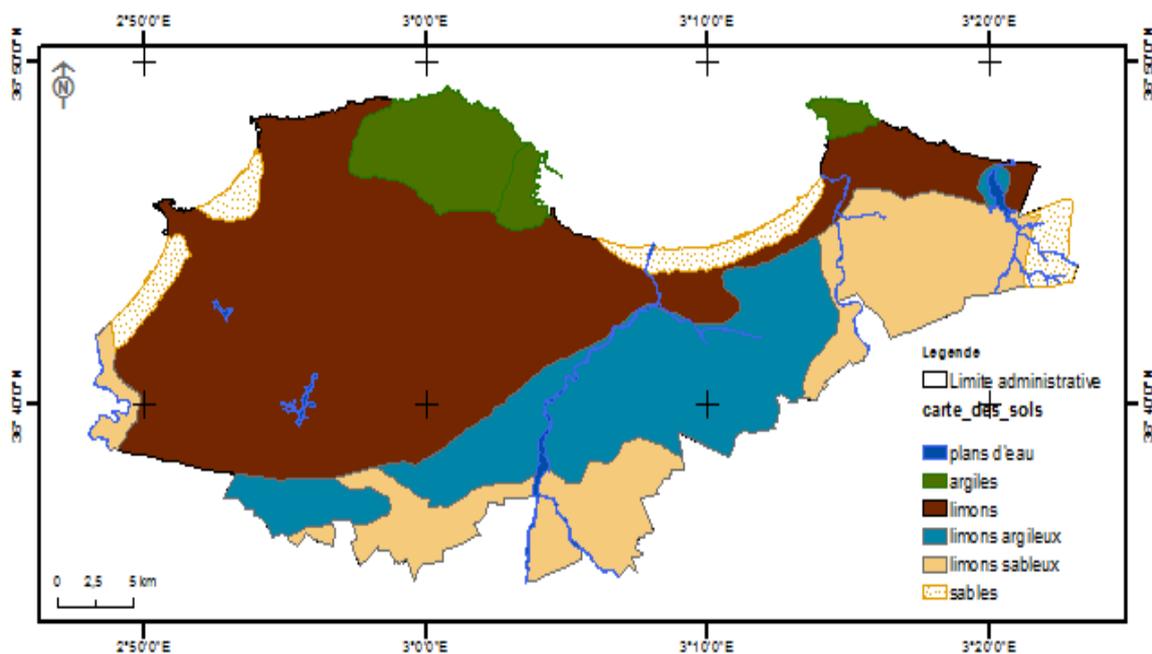


Figure 23 : Carte des sols selon le modèle de Bargov.

2.3.5 La carte d'élévation

La Figure 24 représente une information spatiale (altimétrique) particulière qui nous aide à modéliser, analyser et représenter des phénomènes liés à la surface topographique. Cette carte est intégrée dans le SIG pour l'élaboration de la carte de la profondeur de la nappe aquifère (qui est un paramètre nécessaire pour quantifier le coefficient de la remontée capillaire KR de la méthode de Bargov).

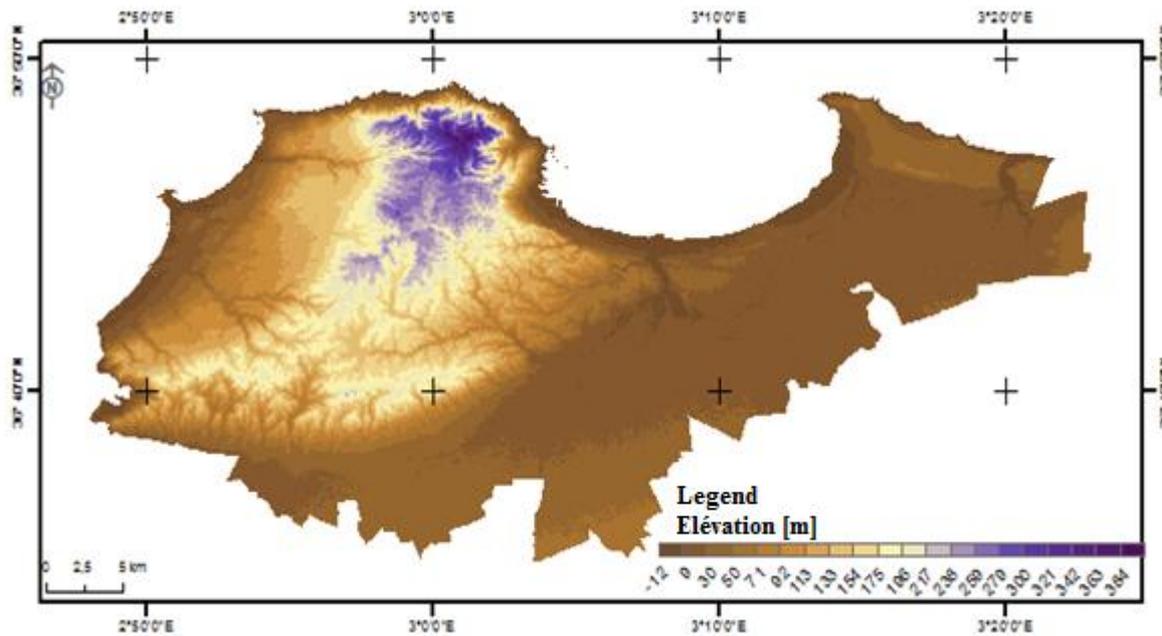


Figure 24: Modèle numérique du terrain (MNT) (ASTER GDEM, 2011).

2.3.6 La carte piézométrique

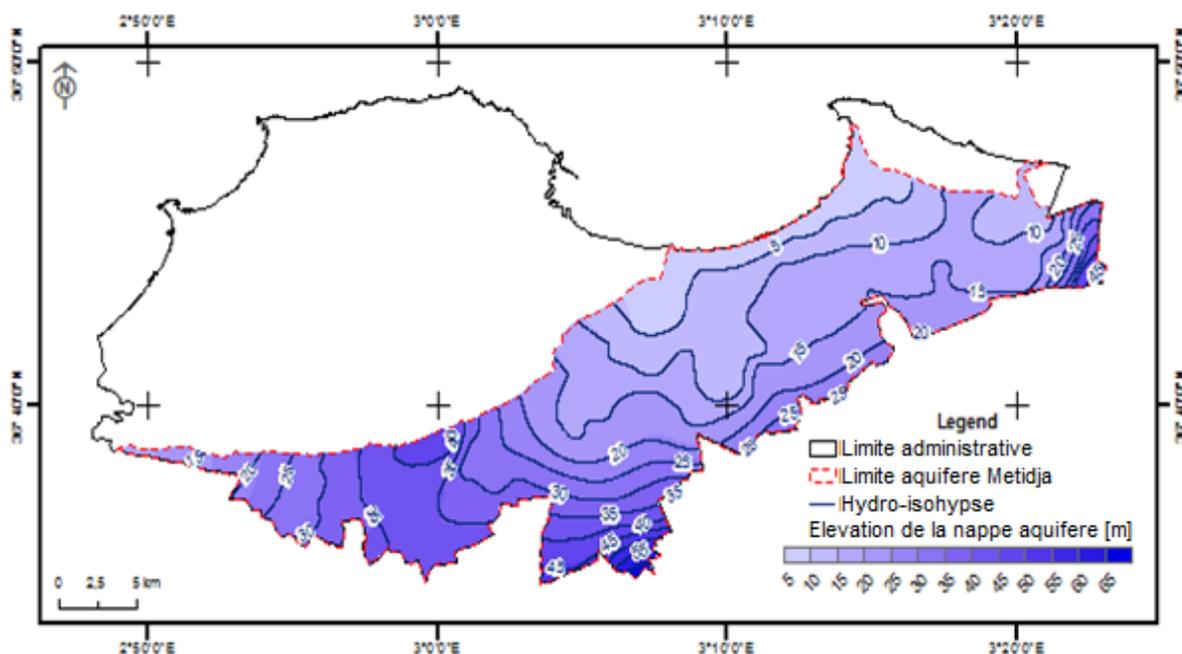


Figure 25 : La carte piézométrique de la nappe Mitidjienne (DEMRH, 1973).

2.4 Méthode et calcul

2.4.1 Introduction

Pour l'estimation de l'ETr dans la zone d'étude tout en tenant compte de l'occupation du terrain (urbaine, batis, agricole, forêt, etc.) nous avons utilisé la méthode de Bargov fusionnée avec différentes méthodes d'estimation de l'ETp.

2.4.2 Description de la méthode de Bargov

La méthode de Bargov permet d'estimer ETr pour les quatre grandes classes d'occupation de terrains suivants (Minnig, 2017)

- zones agricoles ;
- forêts ;
- zones urbaines ;
- non productives.

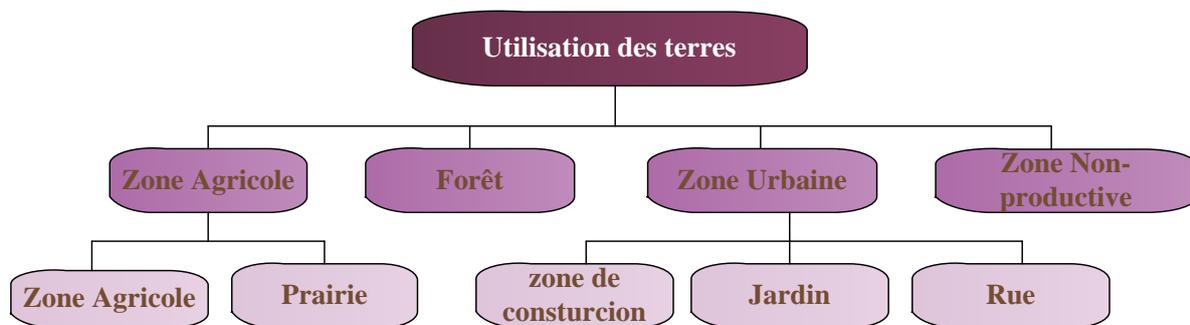


Figure 26 : Classes et sous classes d'occupation du terrain de la méthode de Bargov

(Minnig et al., 2017).

Pour calculer l'ETr avec la méthode de Bargov nous avons utilisé les valeurs d'ETp évaluées avec les formules de Turc, Penman, Trabert et Tabari (voir Tableau 1). Cette méthode permet d'estimer ETr pour les différents types d'utilisations du terrain, y compris les zones urbaines. Il est à noter qu'un facteur de correction de 1.1 est introduit dans le modèle lorsque la formule de Turc est utilisée (Minnig et al., 2017). Les formules nécessaires pour l'application de cette méthode sont synthétisées dans le tableau 10. Les calculs ETr ont été effectués sur des échelles de temps quotidiennes pour chaque type d'utilisation du terrain et puis agrégées pour obtenir des valeurs annuelles.

Chapitre 2. Méthode et Donnée

Tableau 10 : Equations et paramètres utilisés dans la méthode de Bargov (**Minnig et al., 2017**).

N°	Equation	Paramètre
(12)	$ETr = 1.1 * ETp * y$ <p style="text-align: center;"><i>ou</i></p> $ETr = ETp * y$	<p><i>ETr</i> [mm/an] : évapotranspiration réelle ;</p> <p><i>ETp</i> [mm/an] : évapotranspiration potentielle ;</p> <p><i>y</i> [-] : rapport entre <i>ETr</i> et <i>ETp</i> déterminés en utilisant la Figure 28.</p>
(13)	$X = \frac{(1.09 \cdot P + KR + B)}{ETp}$ <p>D=60j pour les cultures céréalières ;</p> <p>D= 90j pour les cultures de racines (pommes de terre, maïs, betteraves, légumes de plein champ) ;</p> <p>D=120j pour les forêts et les prairies ;</p> <p>D= 75j pour les terres cultivées.</p>	<p><i>X</i> [-] : coefficient ;</p> <p><i>P</i> [mm/an] : Précipitation annuelle ;</p> <p><i>KR</i> [mm/an] : montée capillaire annuelle ;</p> <p>L'élévation capillaire journalière peut être déterminée en utilisant le tableau 12.</p> <p>Afin d'obtenir une valeur annuelle, ce nombre doit être multiplié par le nombre de jours (<i>D</i>) dans une année avec des augmentations capillaires ;</p> <p><i>B</i> [mm/an] : Taux d'irrigation,</p> <p><i>ETp</i> [mm/an]: Évapotranspiration potentielle estimée par la formule de Penman, formule de Turc ou autres.</p>

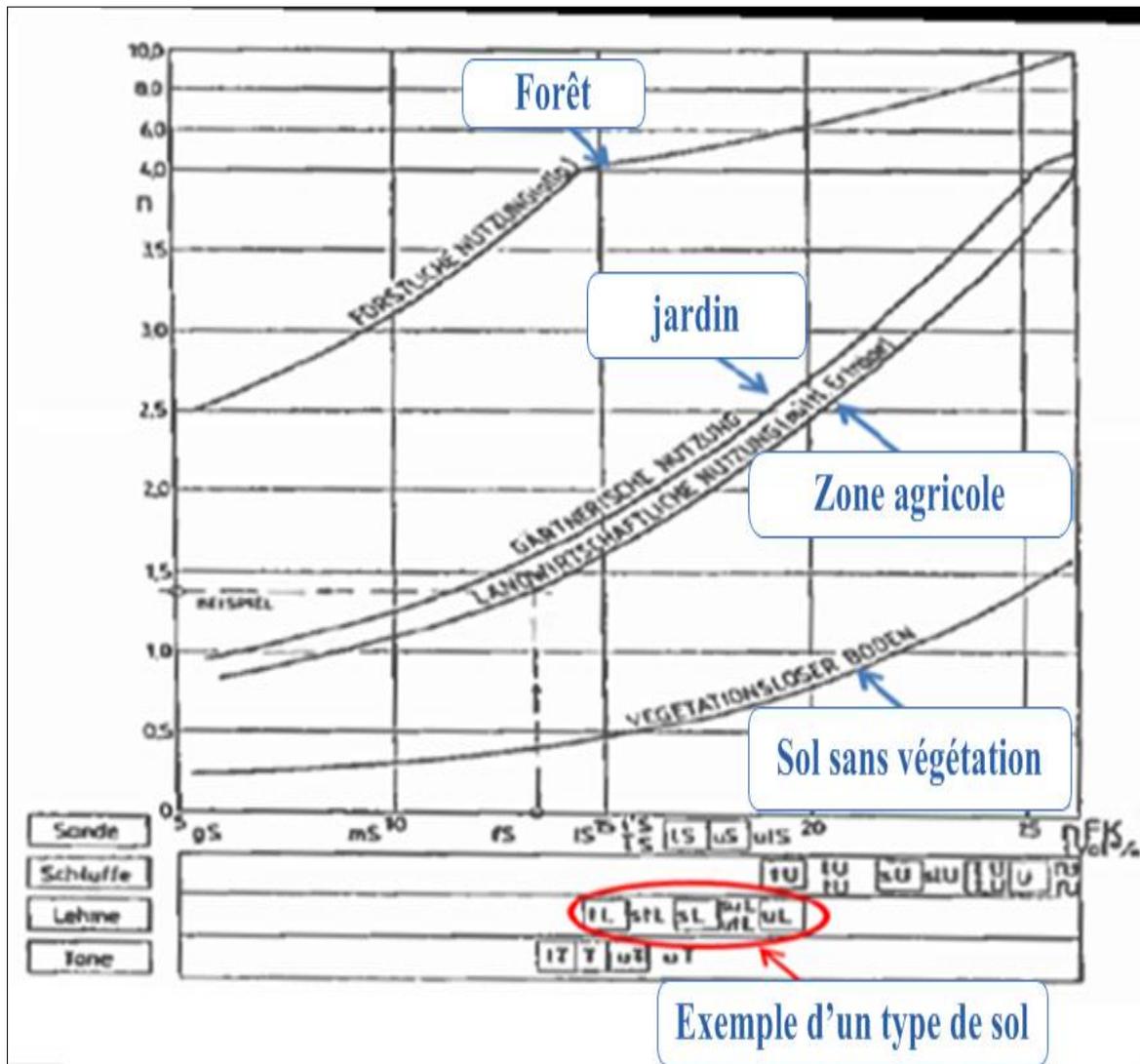


Figure 27 : Diagramme pour la détermination du paramètre d'efficacité (n) en fonction de l'utilisation du sol et du type de sol (Minnig, 2017).

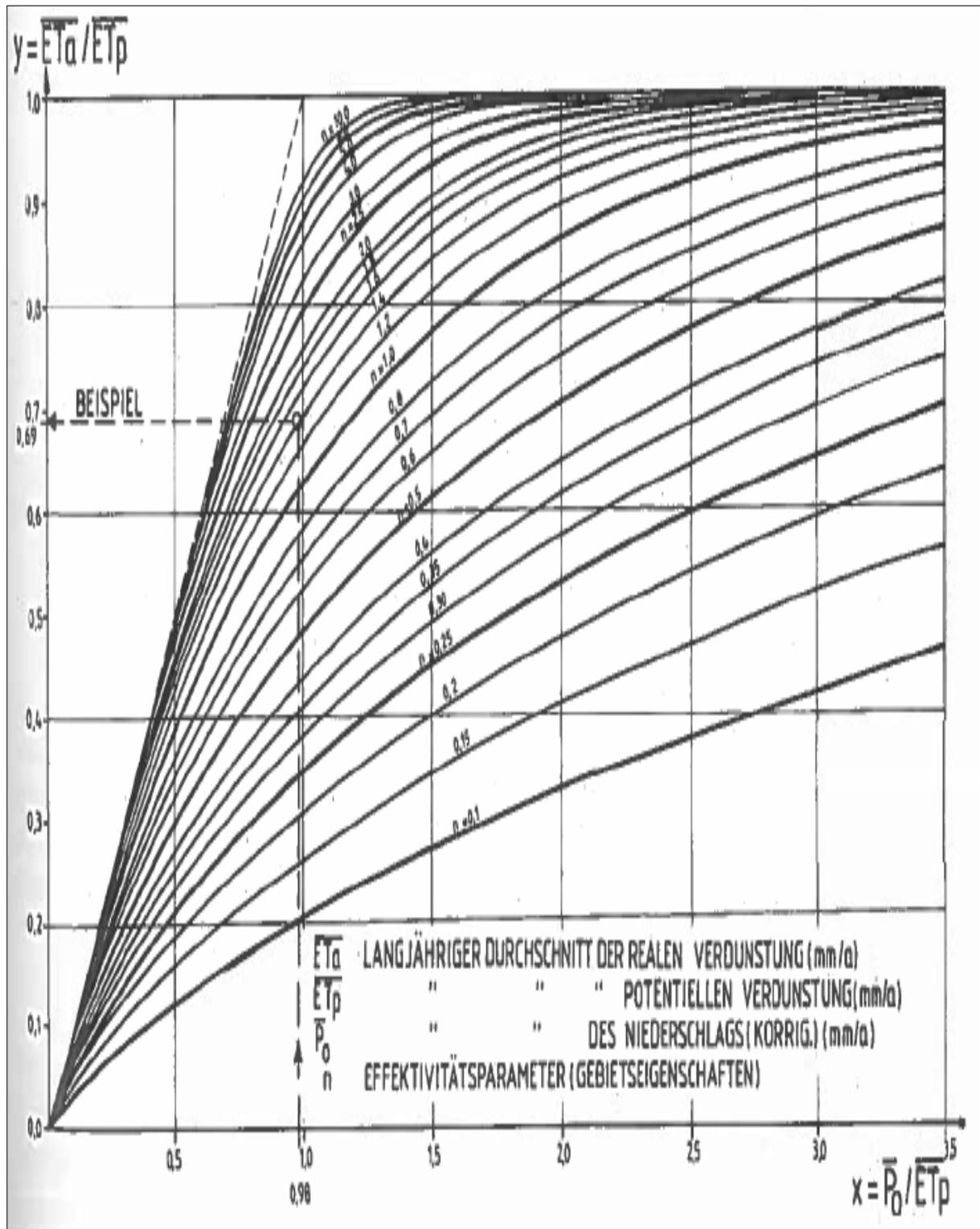


Figure 28 : Diagramme pour la détermination de le rapport de (E_{Tr} / E_{Tp}) selon la méthode de Bargov (Minnig, 2017).

Chapitre 2. Méthode et Donnée

Tableau 11 : Elévation capillaire journalière (KR) (Minnig, 2017).

Type de sol	Etat	Coefficient de capillarité KR [mm/j]												
		Distance moyenne estimée entre les racines et la nappe d'eau souterraine [dm]												
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	17	20
Sable gsmS	Moy	5.0	5.0	1.5	0.5	0.2	<0.1	-	-	-	-	-	-	-
	mS	>5.0	>5.0	>5.0	3.0	1.2	0.5	0.2	<0.1	-	-	-	-	-
	IS	>5.0	>5.0	>5.0	>5.0	3.0	1.5	0.7	0.3	0.15	<0.1	-	-	-
	IS,rS	>5.0	>5.0	>5.0	>5.0	4.5	2.5	1.5	0.7	0.4	0.15	<0.1	-	-
	IS	>5.0	>5.0	>5.0	>5.0	5.0	3.5	2.0	1.5	0.8	0.3	0.1	<0.1	-
	uS	>5.0	>5.0	>5.0	>5	>5	>5.0	5.0	3.0	2.0	1.0	0.5	0.15	-
iS	>5.0	>5.0	>5.0	>5.0	3.0	2.0	1.0	0.7	0.4	0.15	<0.1	-	-	
Limon S',sL	Moy	>5.0	>5.0	5.0	3.5	2.0	1.3	0.8	0.5	0.3	0.15	<0.1	-	-
	uL	>5.0	>5.0	>5.0	>5.0	4.5	3.5	2.5	2.0	1.5	0.8	0.4	0.2	<0.1
	uL,uT	>5.0	>5.0	4.0	2.0	1.0	0.7	0.5	0.3	0.2	0.1	<0.1	-	-
	sL,IL, uT	>5.0	5.0	2.5	1.2	0.7	0.5	0.3	0.2	0.15	<0.1	-	-	-
Argile T,IT,u' T	Moy	4.0	2.0	1.1	0.7	0.5	0.4	0.35	0.30	0.22	0.17	0.14	0.10	<0.1
	T,IT,u' T	Haut	1.5	0.7	0.4	0.3	0.25	0.18	0.15	0.12	0.10	<0.1	-	-

S et **s**: les sables ; **T** : les argiles ; **L** : les limons ; **g** : affecté par l'eau capillaire, manquant de pores grossiers ; **m** : fortement humifié ; **I** : éluait par la migration de l'argile ; **t** : illuviation argileuse, différence de teneur en argile à l'horizon Al > 3 (sables), > 5 (limons), > 8 (argile)% ; **u** : la réglementation, le changement de la couleur de sol au rouge du sol par la formation d'hématite.

2.4.3 Approche de calcul

Dans le cadre de ce projet, l'ETr dans la zone d'étude a été estimée en utilisant la méthode de Bargov. Et pour ce faire, deux scénarios liés au taux d'irrigation ont été développés ; (1) sans irrigation et (2) avec irrigation des terrains agricoles. Selon l'ANRH le taux d'irrigation moyen annuel dans les zones agricoles est de 0.4 l/ha/an (c-à-d. 3.56 mm/j). La définition des scénarios s'est principalement basée sur la période durant laquelle l'irrigation de terre agricole a lieu (Figure 29):

- **Scénario 1** : B=0 mm/an (pas d'irrigation). Cela peut également être exprimé comme seuil de précipitation pour l'application de l'irrigation (irrigation durant de mois avec : $P_p \leq 2.4 \text{ mm / mois}$);

Chapitre 2. Méthode et Donnée

- Scénario 2 : $B=320.4$ mm/an : dans ce cas l'irrigation est supposée être appliquée durant 3 mois de la période de croissance des plants (Juin-Août). Ce qui peut être exprimé en matière de seuil de précipitation pour l'application de l'irrigation (irrigation durant de mois avec : $P_p \leq 5.7$ mm/mois).

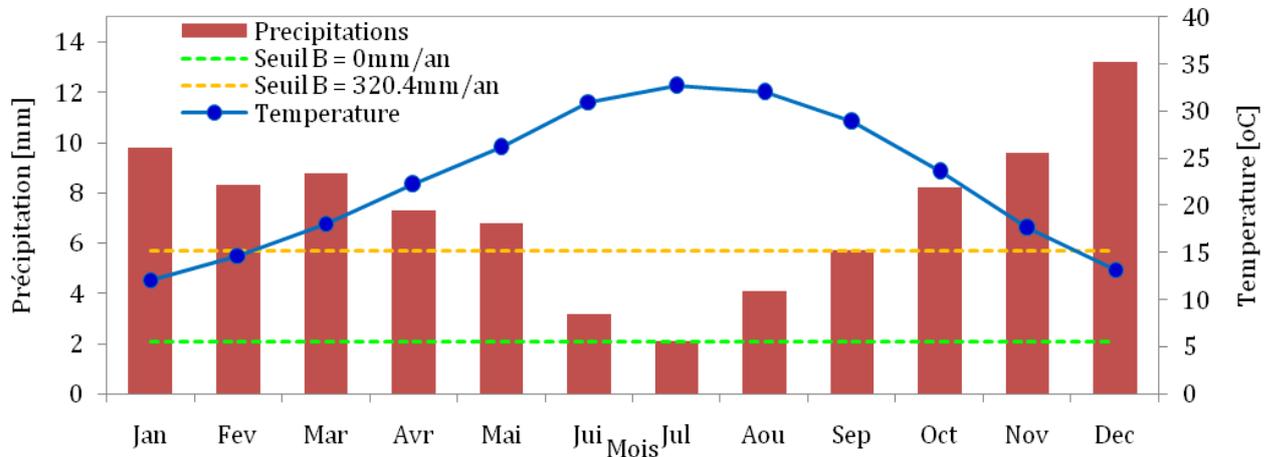


Figure 29 : Température mensuelle moyenne et précipitations pour l'Algérie de 1901-2015 avec les seuils d'irrigation $B=0$ mm/an, $B=320.4$ mm/an¹².

Figure 30 donne l'ensemble des méthodes d'ETp utilisées pour calculer l'ETr par la méthode de Bargov avec différents scénarios d'irrigation développés.

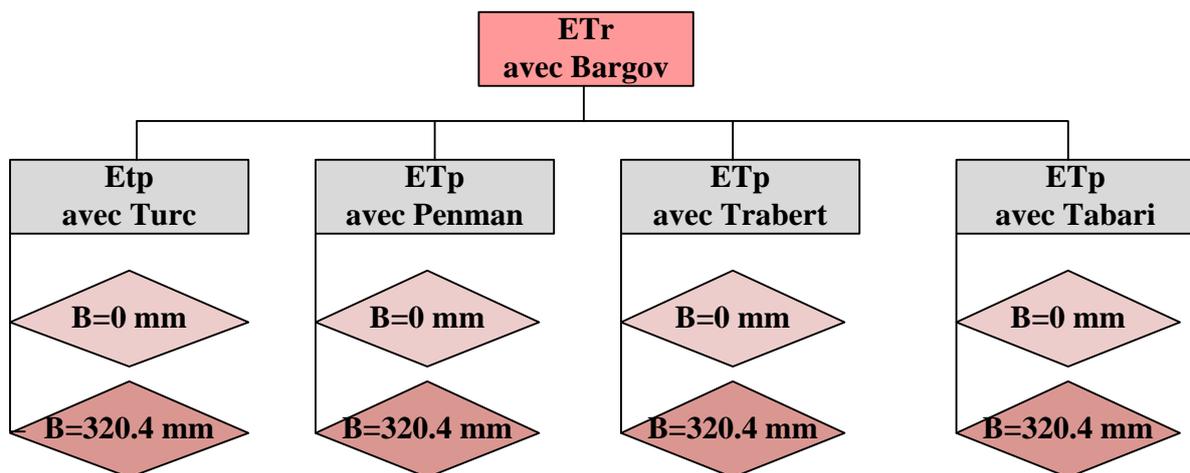


Figure 30 : Les scénarios d'irrigation considérés pour chaque méthode.

Le paramètre d'efficacité n est choisi en fonction de l'utilisation du terrain (voir Figure 27). Pour la zone urbaine, (DVWK-Merkblatt, 1996) propose d'utiliser une valeur de 0,1. Les

Données de base (T et P) de

¹²http://sdwebx.worldbank.org/climateportal/index.cfm?page=country_historical_climate&ThisCCCode=DZA

Chapitre 2. Méthode et Donnée

valeurs ainsi obtenues de n sont ensuite majorées sur la base du coefficient d'irrigation B et le coefficient de montée capillaire KR (voir Figure 31).

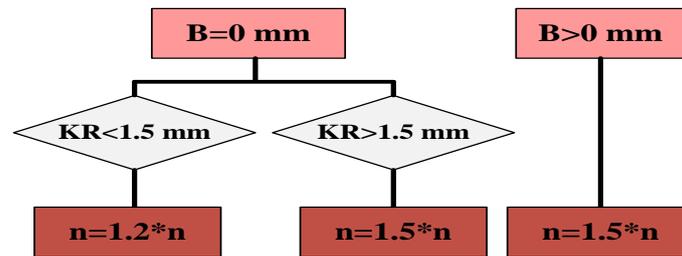


Figure 31 : Correction du paramètre d'efficacité n .

Les étapes de calcul

La Figure 32 donne l'organigramme de calcul de l'ETr utilisé dans notre étude.

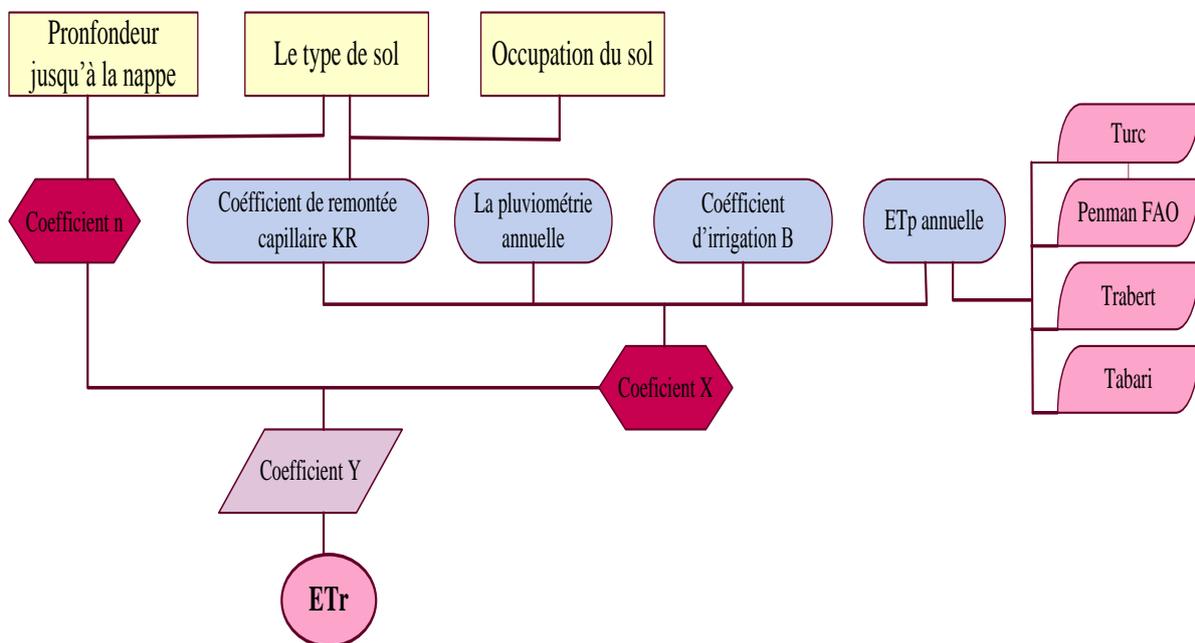


Figure 32 : Approche de calcul de l'ETr utilisée.

Traitement des données spatiales

Etape 1 : Elaboration de la carte de la profondeur jusqu'à la nappe d'eau souterraine

La cartographie du coefficient l'élévation capillaire KR a été obtenue sur la base de la carte de la profondeur jusqu'à la nappe aquifère (Nappe de la Mitidja). Cette dernière carte est calculée à partir de:

Chapitre 2. Méthode et Donnée

- la carte piézométrique de la nappe Mitidjienne (DEMRH, 1973);
- le MNT de la ville d'Alger (ASTER GDEM, 2011);

Sur l'étendue spatiale de la nappe de Mitidja, la différence entre ces deux cartes (réalisée sur ArcGIS (ESRI, 2014)) nous donne la profondeur jusqu'à la nappe. Les profondeurs ainsi obtenues sont utilisées pour calculer KR sur la base de la classification donnée dans le Tableau 11. En dehors de cette zone, KR est pris comme nul ($KR=0$) et de même pour les zones construites (zones urbaines). Le schéma de cartographie de KR à l'échelle globale d'Alger est donné dans la Figure 33.

Chapitre 2. Méthode et Donnée

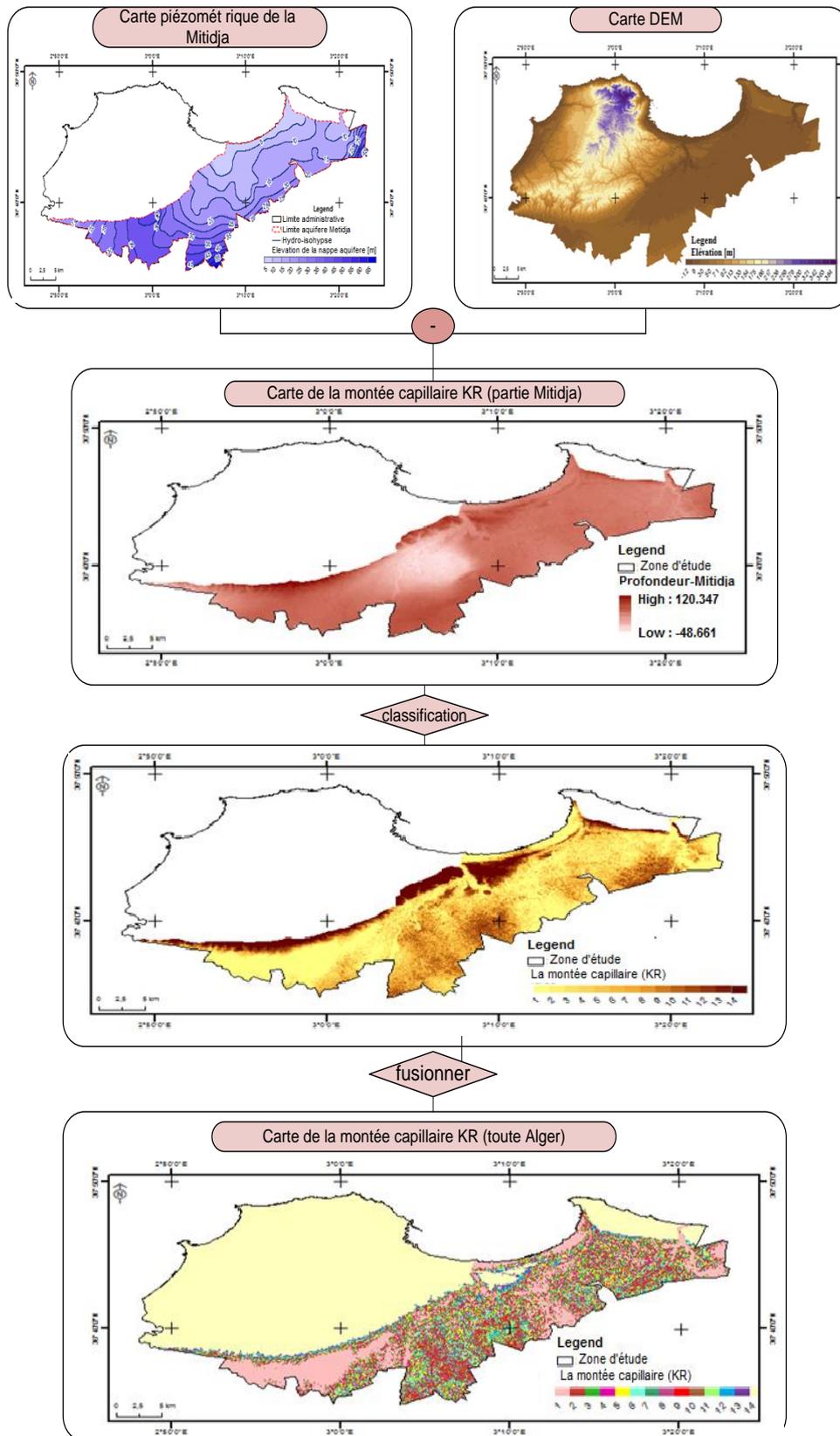


Figure 33 : Les étapes d'élaboration de la carte de la profondeur jusqu'à la nappe.

Etape 2 : Polygones de Thiessen

La méthode des polygones de Thiessen est utilisée pour définir une structure de distribution spatiale des données climatiques provenant des différentes stations de la ville. Les polygones de Thiessen dans la zone d'étude ont été élaboré en utilisant ArcGIS (ESRI, 2014).

- 1 ère intervalle [2009-2010]

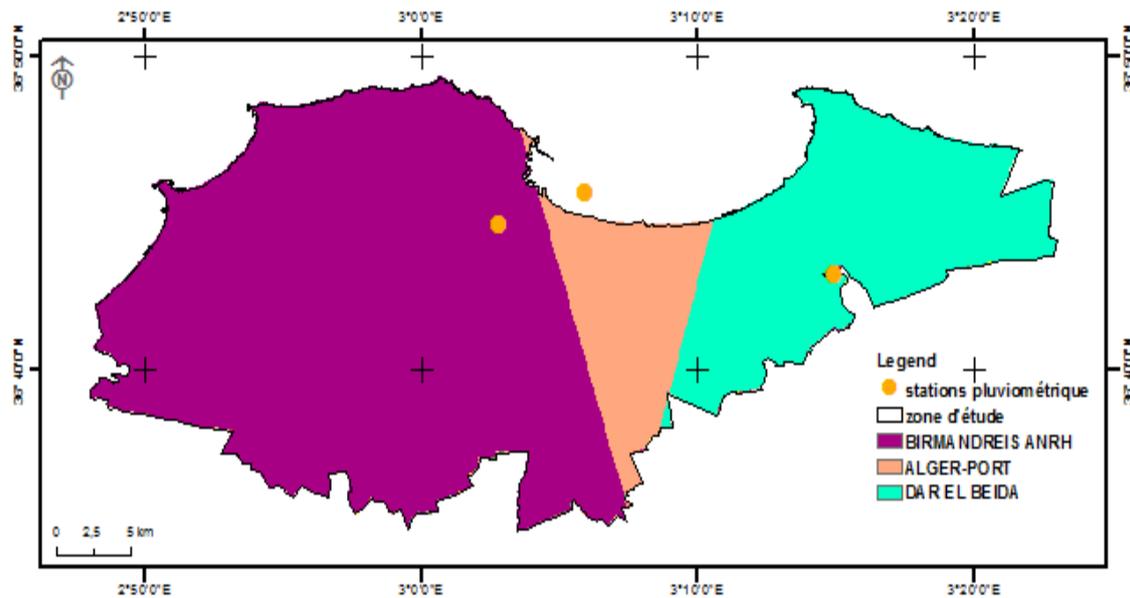


Figure 34 : Carte des polygones de Thiessen correspondant au 1er intervalle.

- 2eme intervalle [2011-2012]

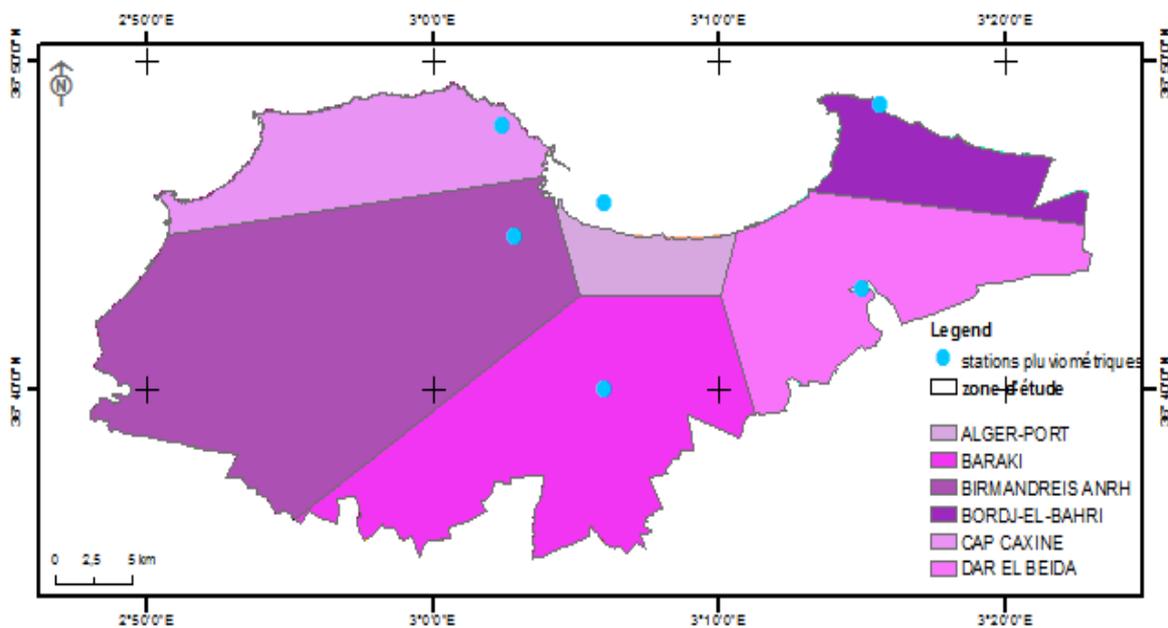


Figure 35 : Carte des polygones de Thiessen correspondant au 2ème intervalle.

Chapitre 2. Méthode et Donnée

Les structures de ces polygones ont été conditionnées par le choix période d'analyse qui, a son tour, a été conditionné par la disponibilité des données. En premier lieu, la carte d'utilisation des terrains utilisé dans cette étude correspond à la configuration urbaine de la ville d'Alger enregistrée durant la période 2009-2012. Quant a la distribution spatial des stations et aux données climatiques, leurs disponibilité correspond à deux intervalles distingués dans lequel on a une couverture complète :

- **1ere intervalle [2009-2010]** : comporte 3 stations pluviométriques {Birmandreis, Alger-Port, Dar El Beida};
- **2eme intervalle [2011-2012]** : comporte 6 stations pluviométriques {Bordj-El-Bahri, Cap Caxine, Birmandreis, Alger-Port, Dar El Beida, Baraki}.

Etape 03 : Superposition des cartes

L'attribution des valeurs de paramètres nécessaire pour le calcul de l'ETr par l'approche proposée aux différentes parcelles (cellules composants les rasters de calcul) de la zone d'étude a été obtenue en superposant les cartes précédentes sur ArcGIS (carte des sols, carte d'occupation du terrain, carte de la profondeur jusqu'a la nappe aquifère et carte des polygones de Theissen). Cela nous a permit définir la structure spatiale donnant la distribution spatiale du coefficient Y(utilisé par la méthode de Bargov) et nous a permit de définir les relations (adresses) entre chaque parcelle de zone d'étude et les tables (données climatiques).

Chapitre 2. Méthode et Donnée

Intervalle 1 :(2009-2010)

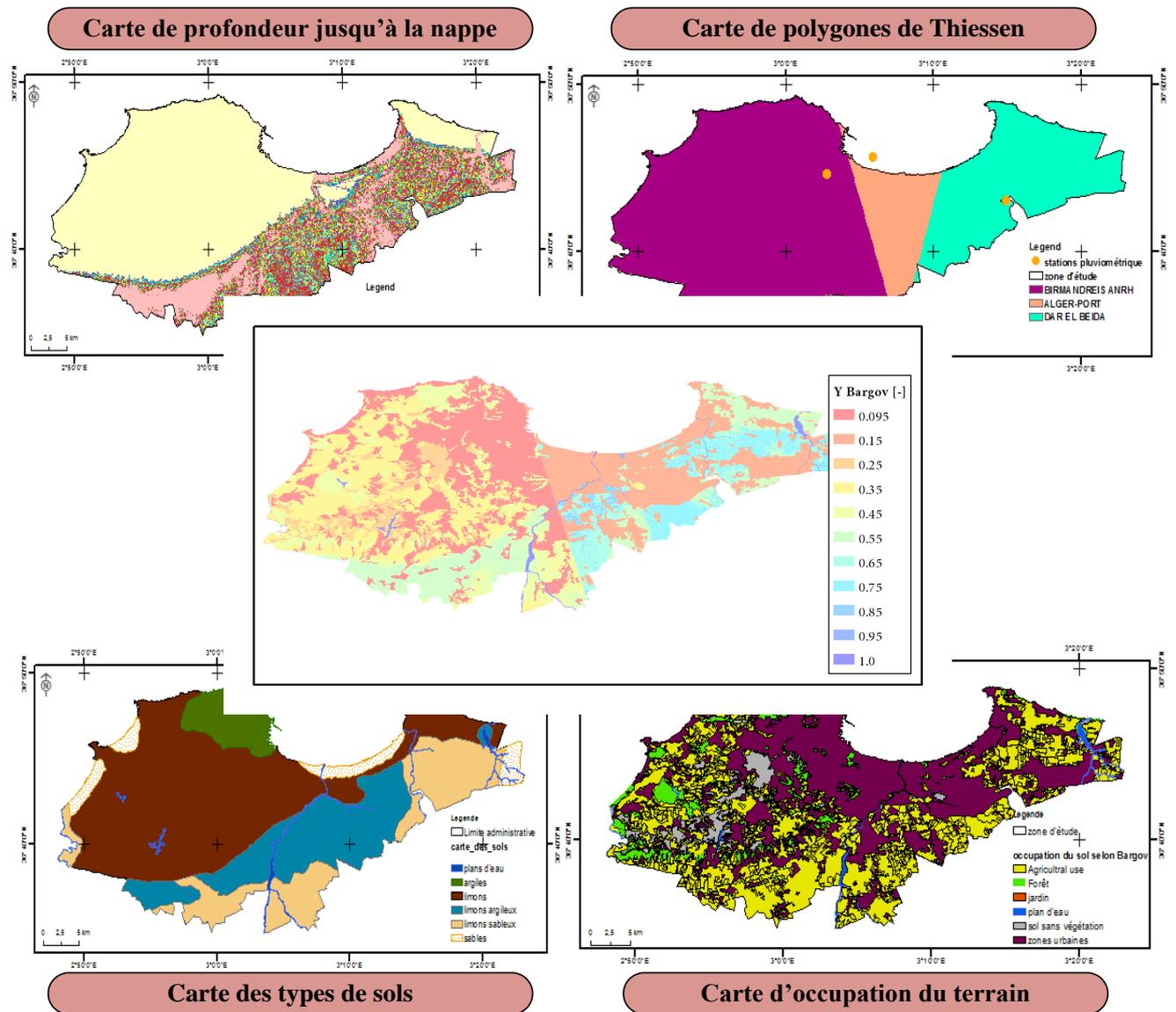


Figure 36 : Carte issue de la superposition des polygones de Thiessen, carte des sols, carte d'occupation des sols et carte de profondeur jusqu'à la nappe aquifère (intervalle 2009-2010).

Chapitre 2. Méthode et Donnée

Intervalle 1 :(2011-2012)

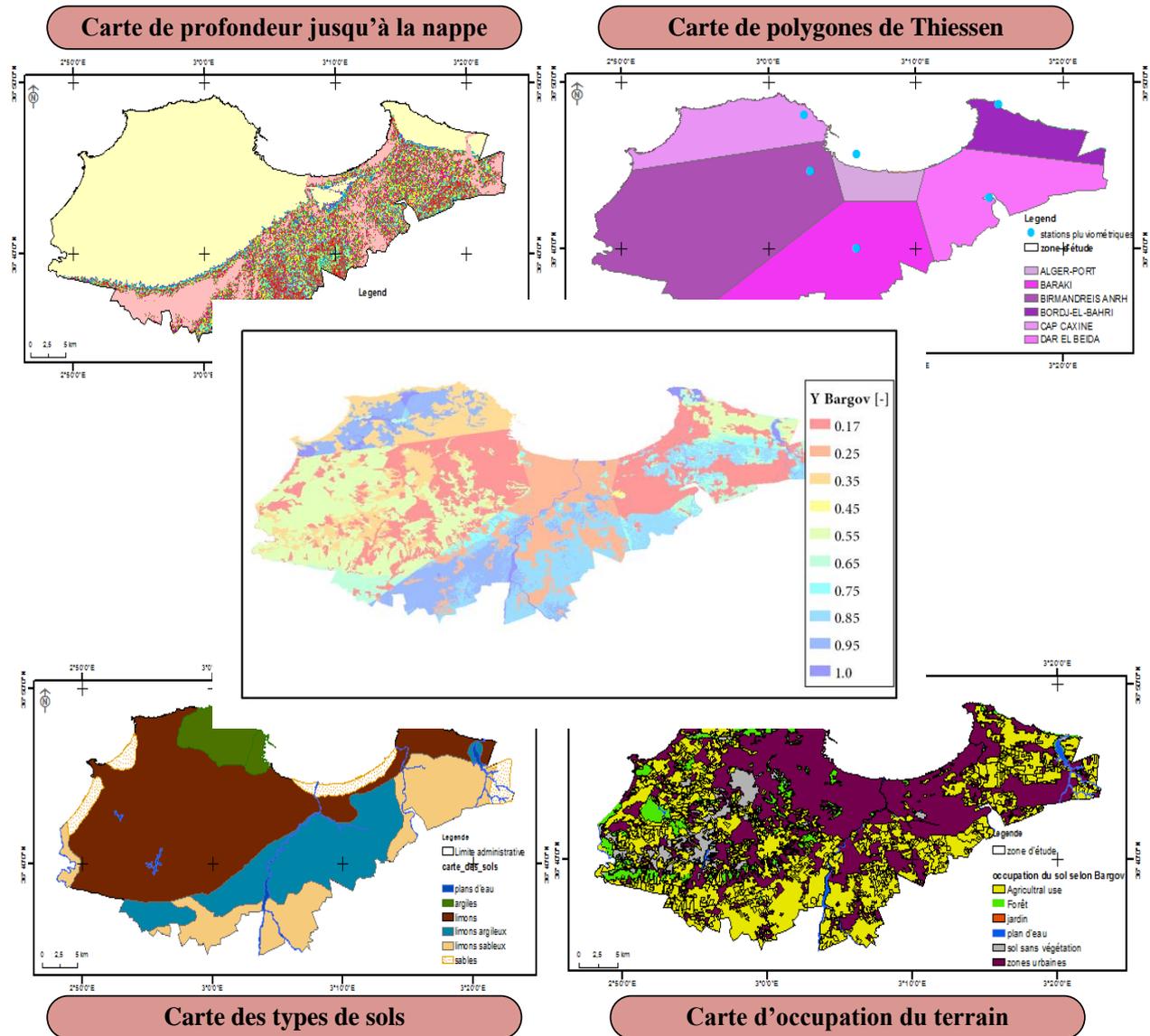


Figure 37 : Carte issue de la superposition des polygones de Thiessen, carte des sols, carte d'occupation des sols et carte de profondeur jusqu'à la nappe aquifère (intervalle 2011-2012).

Résultats et discussion

3

3 RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Introduction

Cette partie est consacrée à la présentation et l'interprétation des résultats obtenus. Les valeurs de l'ETr estimées par l'approche proposée sont évaluées du point de vue variabilité spatiale et temporelle à différentes échelles: l'échelle du construit, du non construit et à l'échelle globale de la wilaya d'Alger durant l'année 2009-2012. Enfin une comparaison entre les résultats des différents modèles utilisés pour notre zone d'étude est présentée.

3.2 L'évapotranspiration réelle à l'échelle de la wilaya d'Alger

3.2.1 Variation de l'évapotranspiration réelle dans le temps

3.2.1.1 Scenario 1 - Sans irrigations (B=0mm/an)

a. Comparaison avec la précipitation

La variation annuelle d'ETr à l'échelle d'Alger représentée dans la Figure 38 conduit aux résultats suivants :

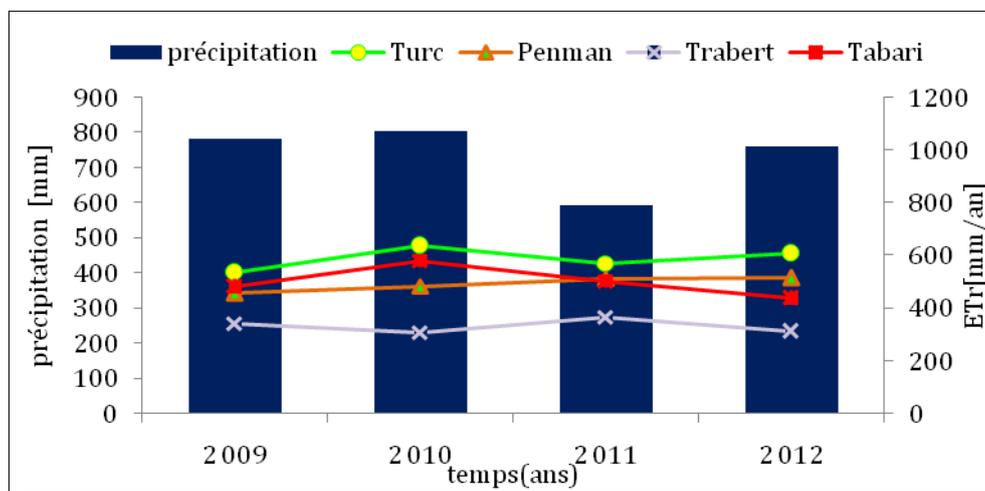


Figure 38 : Variation annuelle de l'ETr à l'échelle de la wilaya d'Alger estimée par les méthodes suivantes : Turc, Penman-FAO, Trabert, Tabari pour un taux d'irrigation de 0mm/an comparée avec les précipitations annuelles.

Méthode de Turc : à l'échelle d'Alger, sans irrigation, les calculs nous donnent des valeurs d'ETr entre 534.83 et 636.56 (mm/an) durant la période 2009-2012 avec une moyenne de 587.30 (mm/an). La valeur maximale est enregistrée en 2010 et celle minimale en 2009.

Méthode de Penman-FAO : à l'échelle d'Alger, sans irrigation, les calculs nous donnent des valeurs d'ETr entre 456.21 et 514.20 (mm/an) durant la période 2009-2012 avec une moyenne de 491.88 (mm/an). La valeur maximale est enregistrée en 2012 et celle minimale en 2009.

Chapitre 3. Résultats et Discussion

Méthode de Trabert : à l'échelle d'Alger, sans irrigation, les calculs nous donnent des valeurs d'ETr entre 308.73 et 367.32 (mm/an) durant la période 2009-2012 avec une moyenne de 332.68 (mm/an). La valeur maximale est enregistrée en 2011 et celle minimale en 2010.

Méthode Tabari : à l'échelle d'Alger, sans irrigation, les calculs nous donnent des valeurs d'ETr entre 437.64 et 581.50 (mm/an) durant la période 2009-2012 sur une moyenne de 500.76 (mm/an). La valeur maximale est enregistrée en 2010 et celle minimale enregistre en 2009.

Sur l'échelle globale de la wilaya d'Alger, nous remarquons que les valeurs d'ETr (estimées avec $B=0$ mm/an), obtenues par les méthodes de Turc et Tabari varient linéairement (directement proportionnel) avec la précipitation. Par contre, les valeurs correspondant a la méthode de Trabert indiquent une proportionnalité inverse. Pour la méthode de Penman-FAO, l'ETr ne semble pas être directement influencée par la précipitation comme montre la Figure 38.

b. Comparaison avec la température

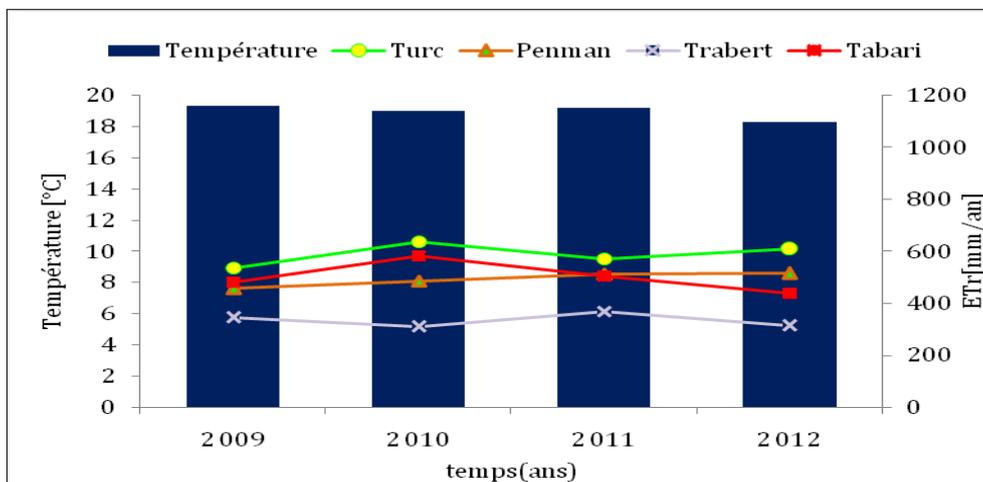


Figure 39 : Variation annuelle de l'ETr à l'échelle de la wilaya d'Alger estimée par les méthodes suivantes : Turc, Penman-FAO, Trabert, Tabari pour un taux d'irrigation de 0mm/an comparée avec les températures annuelles.

Sur l'échelle globale de la wilaya d'Alger, nous remarquons que les valeurs d'ETr (estimées avec $B=0$ mm/an), obtenues par la méthode de Trabert varient linéairement (directement proportionnel) avec la température. Par contre, les valeurs correspondant aux méthodes de Turc et Tabari indiquent une proportionnalité inverse. Pour la méthode de Penman-FAO, l'ETr ne semble pas être directement influencée par la température comme montre la Figure 39 .

c. Comparaison avec la vitesse du vent

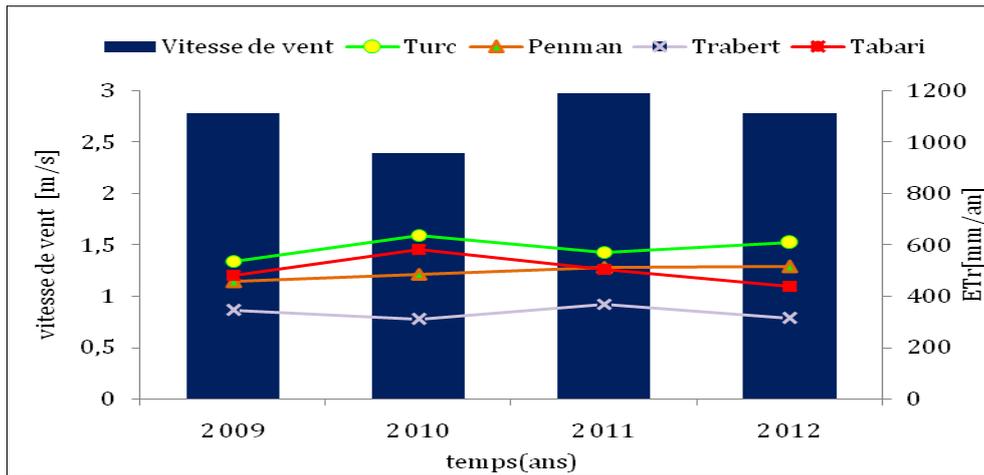


Figure 40 : Variation annuelle de l'ETr à l'échelle de la wilaya d'Alger estimée par les méthodes suivantes : Turc, Penman-FAO, Trabert, Tabari pour un taux d'irrigation de 0mm/an comparée avec les vitesses du vent annuels.

Sur l'échelle globale de la wilaya d'Alger, nous remarquons que les valeurs d'ETr (estimées avec $B=0\text{mm/an}$), obtenues par la méthode Trabert varie linéairement (directement proportionnel) avec la vitesse du vent. Par contre, les valeurs correspondant a les méthodes de Turc et Tabari indiquent une proportionnalité inverse. Pour la méthode de Penman-FAO, l'ETr ne semble pas être directement influencée par la vitesse du vent comme montre la Figure 40.

d. Comparaison avec l'humidité relative

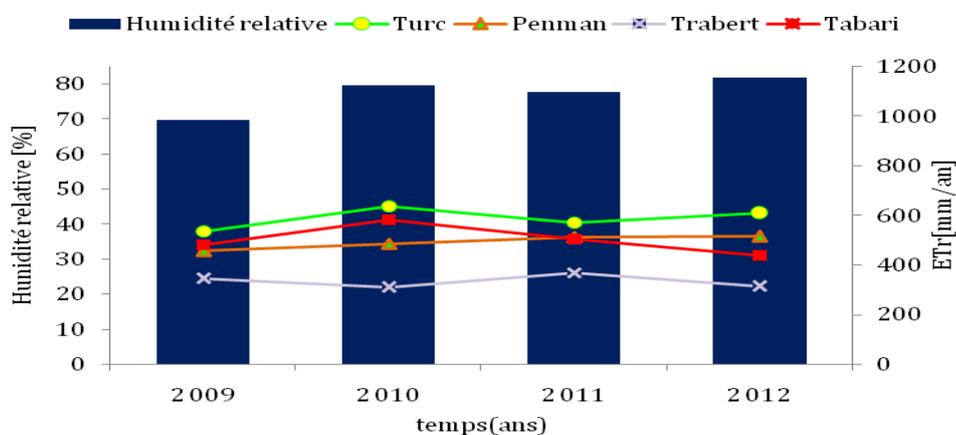


Figure 41 : Variation annuelle de l'ETr à l'échelle de la wilaya d'Alger estimé par les méthodes suivantes : Turc, Penman-FAO, Trabert, Tabari pour un taux d'irrigation de 0mm/an comparée avec les humidités relatives annuelles.

Chapitre 3. Résultats et Discussion

Sur l'échelle globale de la wilaya d'Alger, nous remarquons que les valeurs d'ETr (estimées avec $B=0\text{mm/an}$), obtenues par les méthodes de Turc et Tabari varient linéairement (directement proportionnel) avec l'humidité relative. Par contre, les valeurs correspondant à la méthode de Trabert indiquent une proportionnalité inverse. Pour la méthode de Penman-FAO, l'ETr ne semble pas être directement influencée par l'humidité relative comme montre la Figure 41.

e. Comparaison avec la Radiation solaire

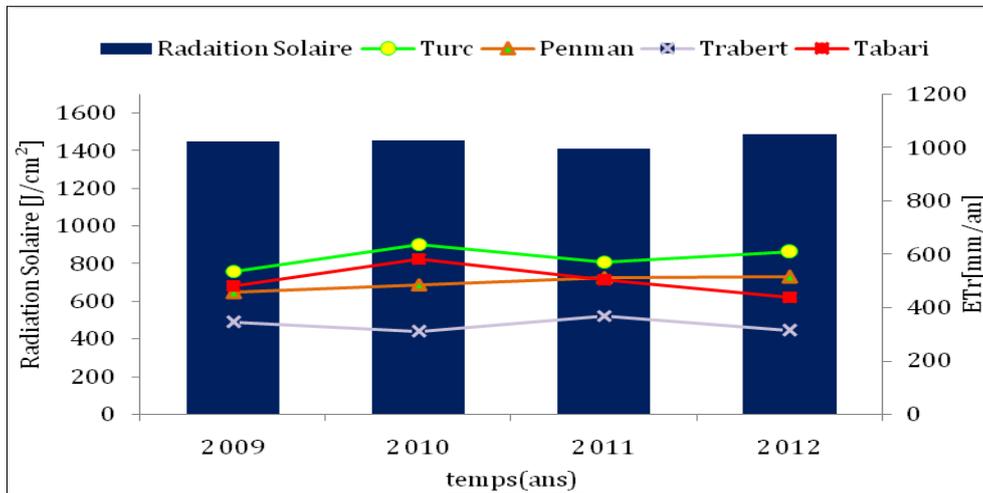


Figure 42 : Variation annuelle de l'ET_r à l'échelle de la wilaya d'Alger estimé par les méthodes suivantes : Turc, Penman-FAO, Trabert, Tabari pour un taux d'irrigation de 0mm/an comparée avec les radiations solaires annuelles.

Sur l'échelle globale de la wilaya d'Alger, nous remarquons que les valeurs d'ET_r (estimées avec $B=0\text{mm/an}$), obtenues par les méthodes de Turc et Tabari varient linéairement (directement proportionnel) avec la radiation solaire. Par contre, les valeurs correspondant à la méthode de Trabert indiquent une proportionnalité inverse. Pour la méthode de Penman-FAO, l'ET_r ne semble pas être directement influencée par la radiation solaire comme montre la Figure 42.

3.2.1.2 Scénario 2 - Avec taux d'irrigation $B=320.4\text{ mm/ans}$

a. Comparaison avec la précipitation

La variation annuelle d'ET_r à l'échelle d'Alger représentée dans la Figure 43 conduit aux résultats suivants :

Chapitre 3. Résultats et Discussion

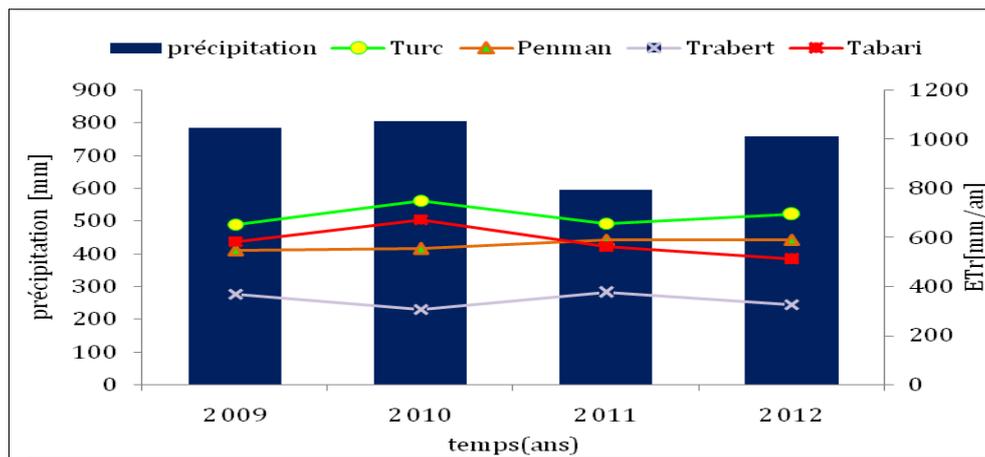


Figure 43 : Variation annuelle de l'ETr à l'échelle de la wilaya d'Alger estimé par les méthodes suivantes : Turc, Penman FAO, Trabert, Tabari pour $B=320.4\text{mm/an}$ comparé avec les précipitations annuelles.

Méthode de Turc : à l'échelle d'Alger, avec un taux d'irrigation de 320.4mm/an , les calculs nous donnent des valeurs d'ETr entre 570.57 et 748.67 (mm/an) durant la période 2009-2012 avec une moyenne de 665.82 (mm/an). La valeur maximale est enregistrée en 2010 et celle minimale en 2011.

Méthode de Penman-FAO : à l'échelle d'Alger, avec un taux d'irrigation de 320.4mm/an , les calculs nous donnent des valeurs d'ETr entre 547.01 et 589.21 (mm/an) durant la période 2009-2012 avec une moyenne de 569.56 (mm/an). La valeur maximale est enregistrée en 2012 et celle minimale en 2009.

Méthode de Trabert : à l'échelle d'Alger, avec un taux d'irrigation de 320.4mm/an , les calculs nous donnent des valeurs d'ETr entre 306.58 et 374.49 (mm/an) durant la période 2009-2012 avec une moyenne de 343.60 (mm/an). La valeur maximale est enregistrée en 2011 et celle minimale en 2010.

Méthode de Tabari : à l'échelle d'Alger, avec un taux d'irrigation de 320.4mm/an , les calculs nous donnent des valeurs d'ETr entre 510.59 et 671.76 (mm/an) durant la période 2009-2012 avec une moyenne de 581.80 (mm/an). La valeur maximale est enregistrée en 2010 et celle minimale en 2012.

Sur l'échelle globale de la wilaya d'Alger, nous remarquons que les valeurs d'ETr (estimées avec un taux d'irrigation de 320.4mm/an pour les zones agricoles), obtenues par les méthodes de Turc et Tabari varient linéairement (directement proportionnel) avec la précipitation. Par contre, les valeurs correspondant à la méthode de Trabert indiquent une proportionnalité inverse. Pour la méthode de Penman-FAO, l'ETr ne semble pas être directement influencée par la précipitation comme montre la Figure 43.

b. Comparaison avec la température

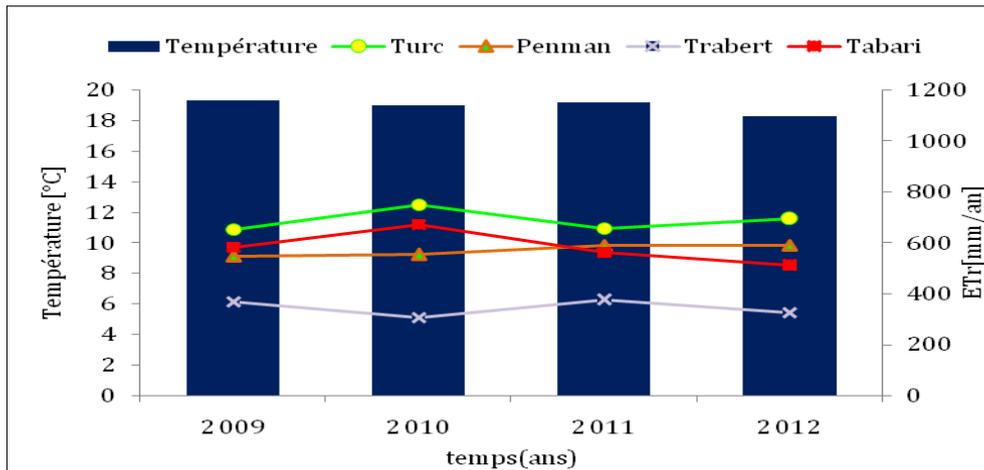


Figure 44 : Variation annuelle de l'ETr à l'échelle de la wilaya d'Alger estimé par les méthodes suivantes : Turc, Penman FAO, Trabert, Tabari pour $B=320.4\text{mm/an}$ comparé avec les températures annuelles.

Sur l'échelle globale de la wilaya d'Alger, nous remarquons que les valeurs d'ETr (estimées avec un taux d'irrigation de 320.4mm/an pour les zones agricoles), obtenues par la méthode Trabert varie linéairement (directement proportionnel) avec la température. Par contre, les valeurs correspondant a les méthodes de Turc et Tabari indiquent une proportionnalité inverse. Pour la méthode de Penman-FAO, l'ETr ne semble pas être directement influencée par la température comme montre la Figure 44.

c. Comparaison avec la vitesse du vent

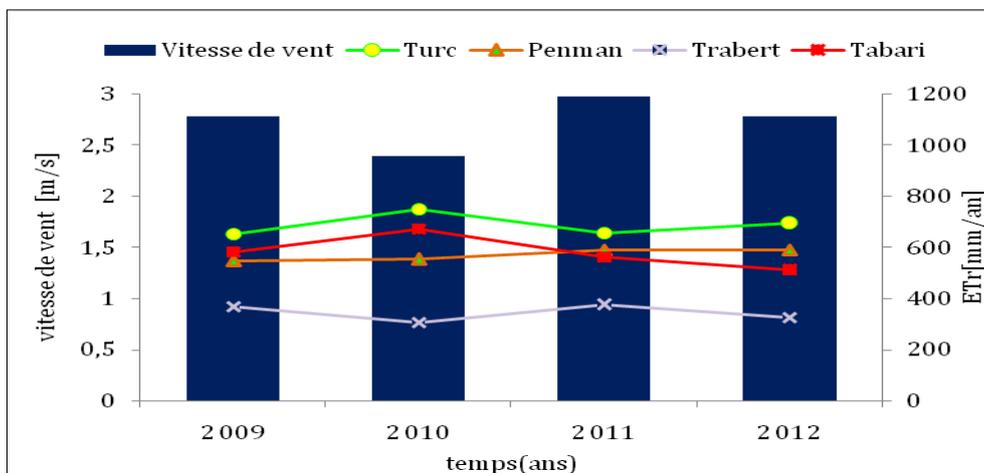


Figure 45 : Variation annuelle de l'ETr à l'échelle de la wilaya d'Alger estimé par les méthodes suivantes : Turc, Penman FAO, Trabert, Tabari pour $B=320.4\text{mm/an}$ comparé avec les vitesses du vent annuels.

Chapitre 3. Résultats et Discussion

Sur l'échelle globale de la wilaya d'Alger, nous remarquons que les valeurs d'ETr (estimées avec un taux d'irrigation de 320.4mm/an pour les zones agricoles), obtenues par la méthode Trabert varient linéairement (directement proportionnelles) avec la vitesse du vent. Par contre, les valeurs correspondant aux méthodes de Turc et Tabari indiquent une proportionnalité inverse. Pour la méthode de Penman-FAO, l'ETr ne semble pas être directement influencée par la vitesse du vent comme montre la Figure 45.

d. Comparaison avec la Humidité relative

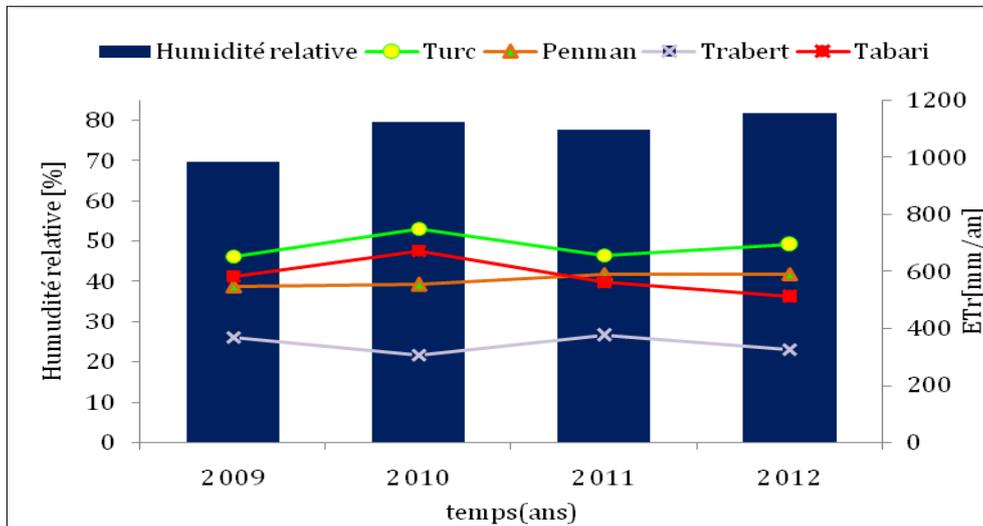


Figure 46 : Variation annuelle de l'ETr à l'échelle de la wilaya d'Alger estimée par les méthodes suivantes : Turc, Penman FAO, Trabert, Tabari pour $B=320.4\text{mm/an}$ comparer avec les humidités relatives annuelles.

Sur l'échelle globale de la wilaya d'Alger, nous remarquons que les valeurs d'ETr (estimées avec un taux d'irrigation de 320.4mm/an pour les zones agricoles), obtenues par les méthodes de Turc et Tabari varient linéairement (directement proportionnelles) avec la vitesse de vent. Par contre, les valeurs correspondant a la méthode de Trabert indiquent une proportionnalité inverse. Pour la méthode de Penman-FAO, l'ETr ne semble pas être directement influencée par l'humidité relative comme montre la Figure 46.

e. Comparaison avec la radiation solaire

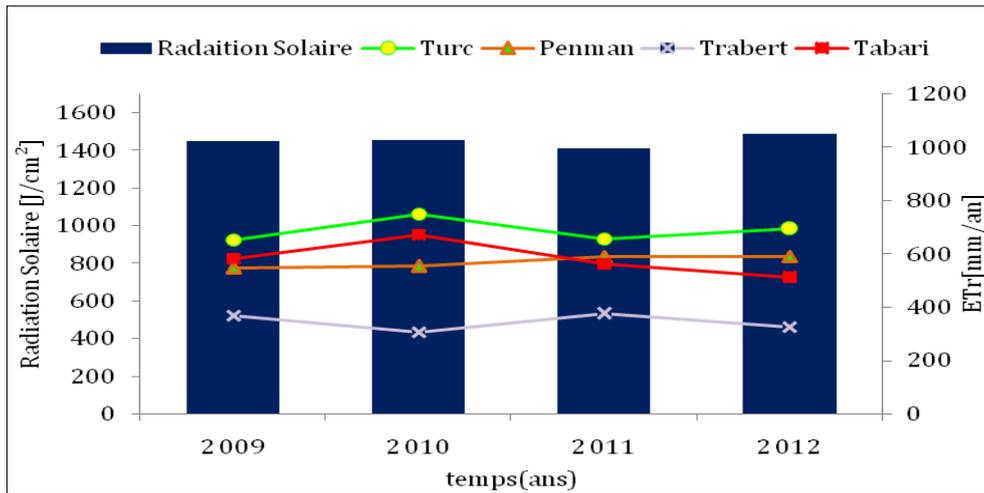


Figure 47 : Variation annuelle de l'ETr à l'échelle de la wilaya d'Alger estimé par les méthodes suivantes : Turc, Penman FAO, Trabert, Tabari pour $B=320.4\text{mm}/\text{an}$ comparé avec les radiations solaires annuelles.

Sur l'échelle globale de la wilaya d'Alger, nous remarquons que les valeurs d'ETr (estimées avec un taux d'irrigation de $320.4\text{mm}/\text{an}$ pour les zones agricoles), obtenues par les méthodes de Turc et Tabari varient linéairement (directement proportionnelle) avec la radiation solaire. Par contre, les valeurs correspondant à la méthode de Trabert indiquent une proportionnalité inverse. Pour la méthode de Penman-FAO, l'ETr ne semble pas être directement influencée par la radiation solaire comme montre la Figure 47.

3.2.2 Comparaison entre méthodes à l'échelle de la wilaya d'Alger

➤ Scenario 1 - Sans irrigation ($B=0\text{mm}/\text{an}$)

La comparaison entre l'évapotranspiration réelle annuelle estimée par les différentes méthodes conduites aux résultats suivants :

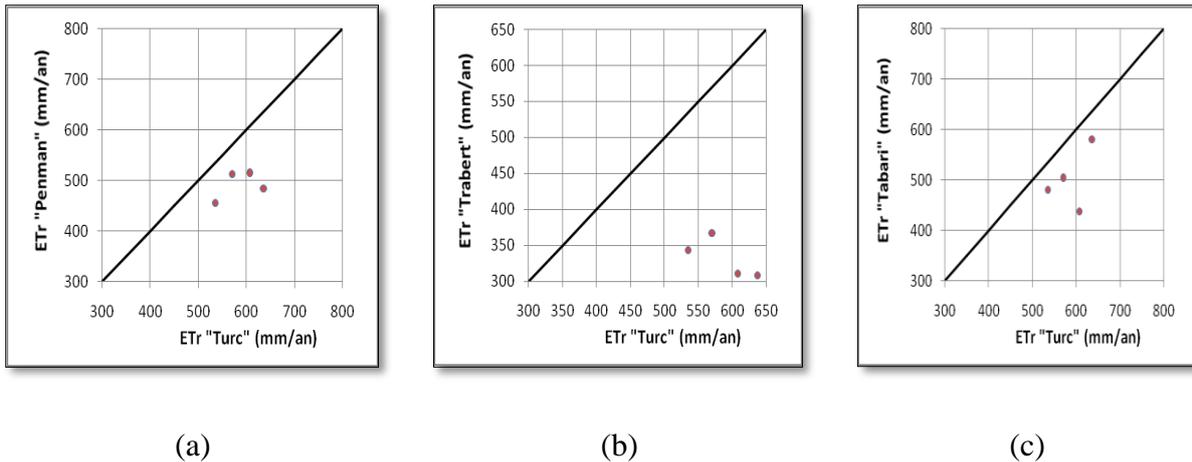


Figure 48 : Comparaison à l'échelle de la wilaya d'Alger pour un taux d'irrigation nul entre l'ETr estimée par la méthode de Turc, (a) : avec la méthode de Penman-FAO (b) : avec la méthode de Trabert, (c) : avec la méthode de Tabari.

En comparaison avec la méthode de Turc, les résultats de la méthode de Penman-FAO (sans irrigation) reflètent une sous-estimation (de 10,08 - 23,95%) de l'évapotranspiration réelle. Les estimations des deux méthodes présentent une assez bonne corrélation.

En comparaison avec la méthode de Turc, les résultats de la méthode de Trabert (sans irrigation), reflètent une sous-estimation (de 35,62 - 51,49%) de l'évapotranspiration réelle. Les estimations des deux méthodes présentent une faible corrélation.

En comparaison avec la méthode de Turc, les résultats de la méthode de Tabari (sans irrigation), reflètent une sous-estimation (de 8,64 - 27,92 %) de l'évapotranspiration réelle. Les estimations des deux méthodes présentent une assez bonne corrélation.

➤ **Scenario 2 : avec un taux d'irrigation $B=320.4\text{mm/an}$**

La comparaison entre l'évapotranspiration réelle annule estimée par les différentes méthodes conduites aux résultats suivants :

Chapitre 3. Résultats et Discussion

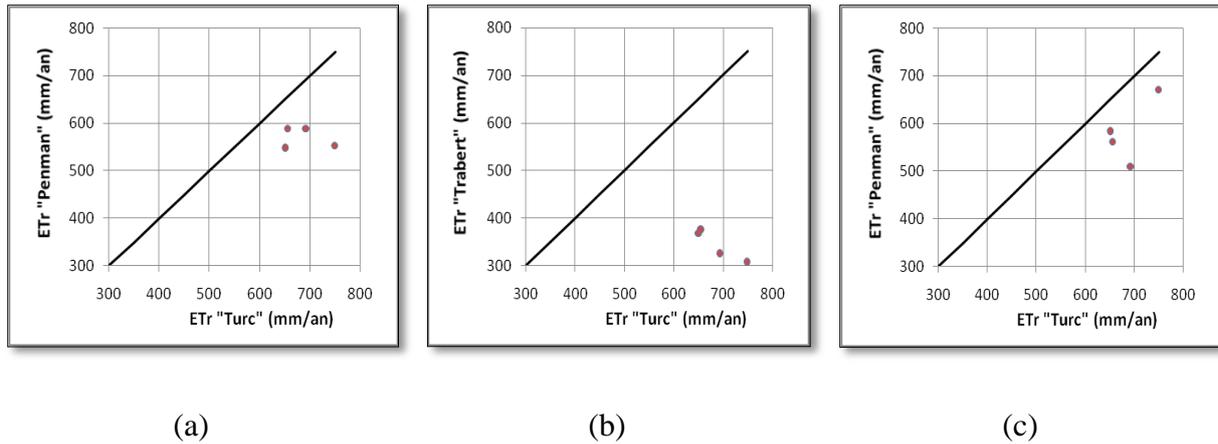


Figure 49 : Comparaison à l'échelle de la wilaya d'Alger pour un taux d'irrigation de 320.4mm/an entre l'ETr estimée par la méthode de Turc, (a) : avec la méthode de Penman-FAO (b) : avec la méthode de Trabert, (c) : avec la méthode de Tabari.

En comparaison avec la méthode de Turc, les résultats de la méthode de Penman-FAO pour un taux d'irrigation de $B=320.4\text{mm/an}$, reflètent une sous-estimation (de 10.17 - 26.12%) de l'ETr. Les estimations des deux méthodes présentent une assez bonne corrélation.

En comparaison avec la méthode de Turc, les résultats de la méthode de Trabert pour taux d'irrigation de $B=320.4\text{ mm}$, reflètent une sous-estimation (de 42.88- 59.05%) de l'ETr. Les estimations des deux méthodes présentent une faible corrélation.

En comparaison avec la méthode de Turc, les résultats de la méthode de Tabari pour taux d'irrigation de $B=320.4\text{ mm}$, reflètent une sous-estimation (de 10.27-26.31%) de l'ETr. Les estimations des deux méthodes présentent une assez bonne corrélation.

3.2.3 Comparaison entre scénarios d'irrigation

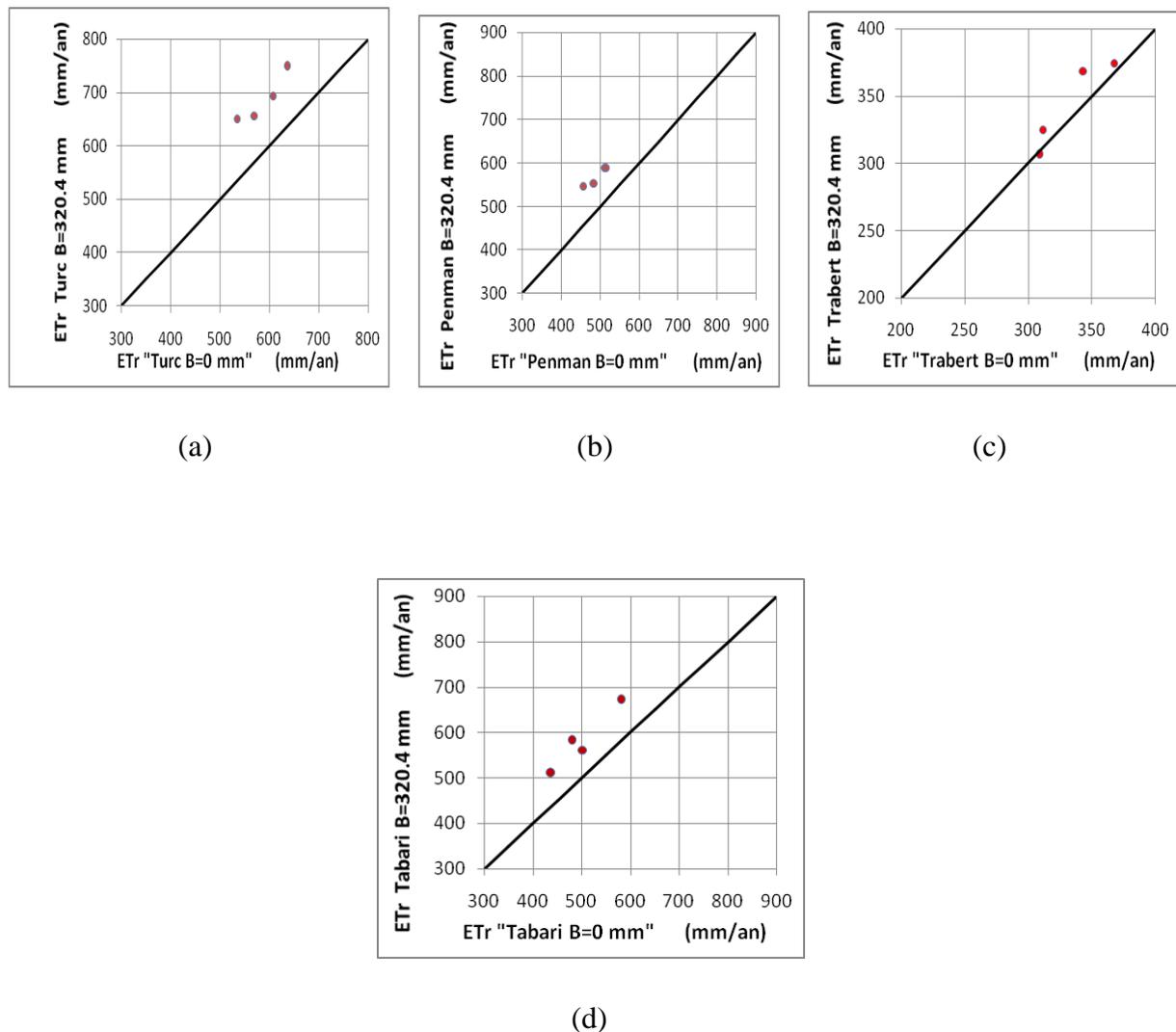


Figure 50 : Comparaison à l'échelle de la wilaya d'Alger entre l'ETr calculer avec et sans irrigation, (a): méthode de Turc : comparaison entre B=0mm/an et B=320.4mm/an (b) : méthode de Penman-FAO : comparaison entre B=0mm/an et B=320.4mm/an, (c) : méthode de Trabert : comparaison entre B=0mm/an et B=320.4mm/an, (d) : méthode de Tabari : comparaison entre B=0mm/an et B=320.4mm/an.

En comparaison avec le scénario sans irrigation (B=0mm/an), les résultats de la méthode Turc avec B=320.4mm/an reflètent une surestimation (de 14.91-21.73 %) de l'ETr.

En comparaison avec le scénario sans irrigation (B=0mm/an), les résultats de la méthode Penman avec B=320.4mm/an reflètent une surestimation (de 14.24-19.90 %) de l'ETr.

Chapitre 3. Résultats et Discussion

En comparaison avec le scénario sans irrigation ($B=0$ mm/an), les résultats de la méthode Trabert avec $B=320.4$ mm/an reflètent une sous-estimation de 0.69% et une surestimation de 7.31% de l'ETr. Les estimations des deux méthodes présentent une bonne corrélation.

En comparaison avec le scénario sans irrigation ($B=0$ mm/an), les résultats de la méthode Tabari avec $B=320.4$ mm/an reflètent une surestimation (de 11.74-21.18%) de l'ETr. Les estimations des deux méthodes présentent une bonne corrélation.

3.3 Evapotranspiration réelle à l'échelle du construit de la wilaya d'Alger

3.3.1 Variation de l'évapotranspiration réelle dans le temps

a. Comparaison avec la précipitation

La variation annuelle d'ETr à l'échelle du construit d'Alger représentée dans la Figure 51 conduit aux résultats suivants :

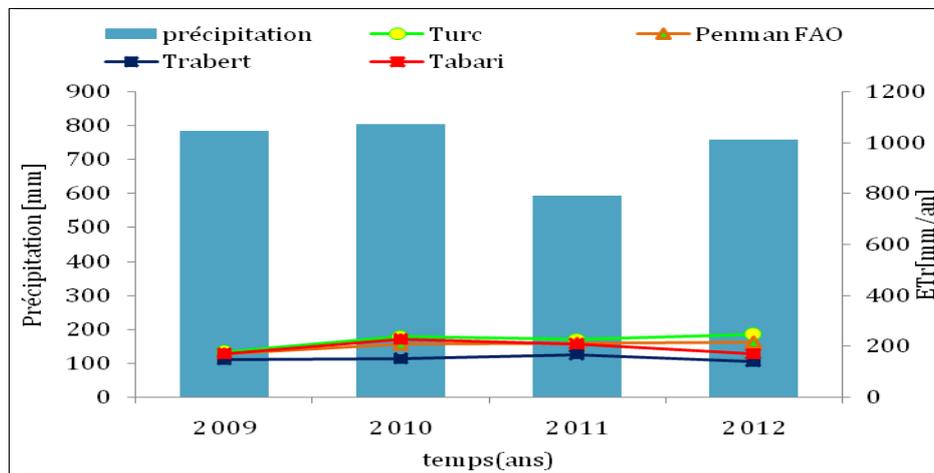


Figure 51 : Variation annuelle de l'ETr à l'échelle construit de la wilaya d'Alger estimée par les méthodes suivantes : Turc, Penman-FAO, Trabert, Tabari comparée avec les précipitations annuelles.

Méthode de Turc : à l'échelle du construit, les calculs nous donnent des valeurs d'ETr entre 176.33 et 243.74 (mm/an) durant la période 2009-2012 avec une moyenne de 221.49 (mm/an). La valeur maximale est enregistrée en 2012 et celle minimale en 2009.

Méthode de Penman-FAO : à l'échelle du construit, les calculs des valeurs d'ETr entre 170.87 et 214.57 (mm/an) durant la période 2009-2012 avec une moyenne de 200.71 (mm/an). La valeur maximale est enregistrée en 2012 et celle minimale en 2009.

Méthode de Trabert : à l'échelle du construit, les calculs d'ETr entre 139.89 et 166.96 (mm/an) durant la période 2009-2012 avec une moyenne de 150.81 (mm/an). La valeur maximale est enregistrée en 2011 et celle minimale en 2012.

Chapitre 3. Résultats et Discussion

Méthode de Tabari : à l'échelle du construit, les calculs d'ETr entre 168.88 et 225.52 (mm/an) durant la période 2009-2012 avec une moyenne de 192.71 (mm/an). La valeur maximale est enregistrée en 2010 et celle minimale en 2009.

Sur l'échelle du construit de la wilaya d'Alger, nous remarquons que les valeurs d'ETr, obtenues par les méthodes de Turc et Tabari varient linéairement (directement proportionnelles) avec la précipitation. Par contre, les valeurs correspondant a la méthode de Trabert indiquent une proportionnalité inverse. Pour la méthode de Penman-FAO, l'ETr ne semble pas être directement influencée par la précipitation comme montre la Figure 51.

b. Comparaison avec la température

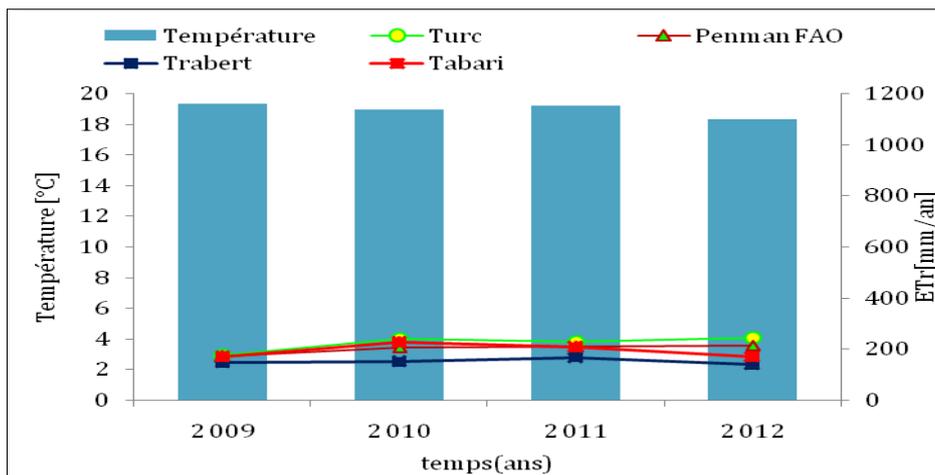


Figure 52 : Variation annuelle de l'ETr à l'échelle construite de la wilaya d'Alger estimée par les méthodes suivantes : Turc, Penman-FAO, Trabert, Tabari comparée avec les températures annuelles.

Sur l'échelle du construit de la wilaya d'Alger, nous remarquons que les valeurs d'ETr, obtenues par les méthodes Trabert varient linéairement (directement proportionnelles) avec la température. Par contre, les valeurs correspondant a les méthodes de Turc et Tabari indiquent une proportionnalité inverse. Pour la méthode de Penman-FAO, l'ETr ne semble pas être directement influencée par la température comme montre la Figure 52.

c. Comparaison avec la vitesse du vent

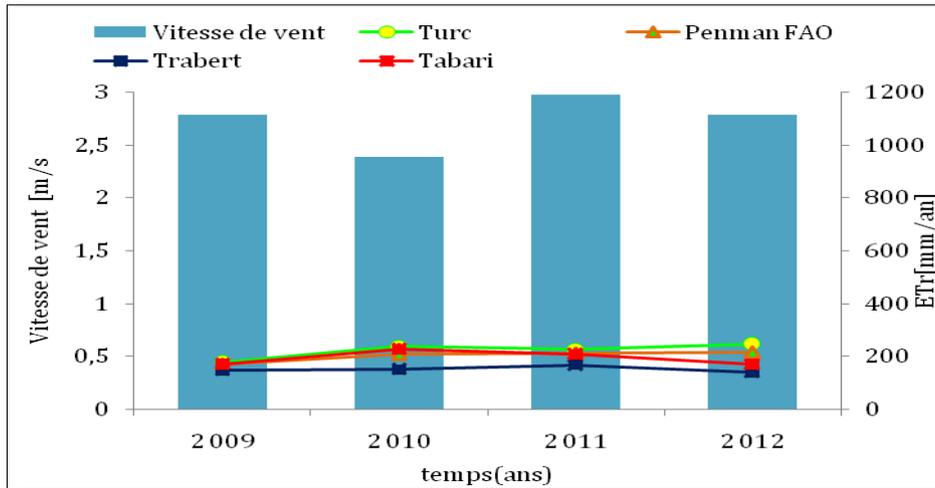


Figure 53 : Variation annuelle de l'ETr à l'échelle construite de la wilaya d'Alger estimée par les méthodes suivantes : Turc, Penman FAO, Trabert, Tabari comparée avec les vitesses du vent annuels.

Sur l'échelle du construit de la wilaya d'Alger, nous remarquons que les valeurs d'ETr, obtenues par les méthodes Trabert varient linéairement (directement proportionnelles) avec la vitesse du vent. Par contre, les valeurs correspondant a les méthodes de Turc et Tabari indiquent une proportionnalité inverse. Pour la méthode de Penman-FAO, l'ETr ne semble pas être directement influencée par la vitesse du vent comme montre la Figure 53.

d. Comparaison avec la Humidité relative

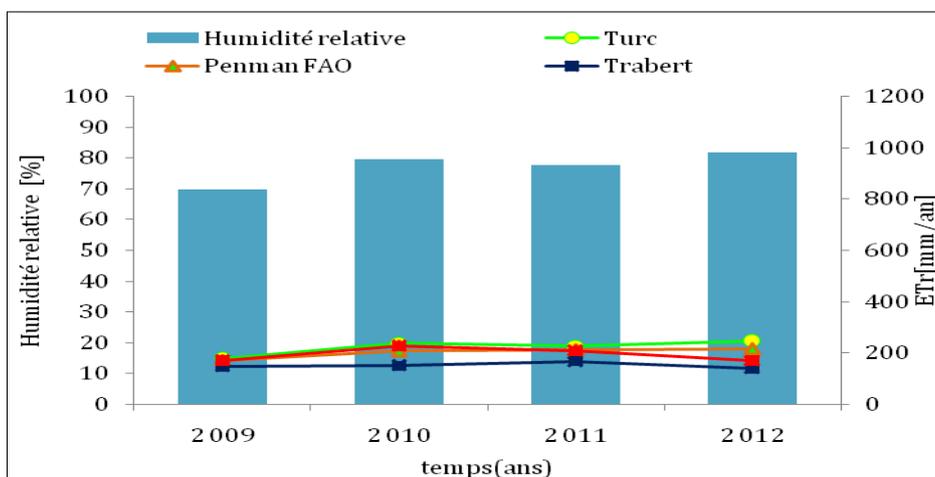


Figure 54 : Variation annuelle de l'ETr à l'échelle construite de la wilaya d'Alger estimée par les méthodes suivantes : Turc, Penman FAO, Trabert, Tabari comparée avec les humidités relatives annuelles.

Chapitre 3. Résultats et Discussion

Sur l'échelle du construit de la wilaya d'Alger, nous remarquons que les valeurs d'ETr, obtenues par les méthodes de Turc et Tabari varient linéairement (directement proportionnelles) avec l'humidité relative. Par contre, les valeurs correspondant à la méthode de Trabert indiquent une proportionnalité inverse. Pour la méthode de Penman-FAO, l'ETr ne semble pas être directement influencée par l'humidité relative comme montre la Figure 54.

e. Comparaison avec la Radiation solaire

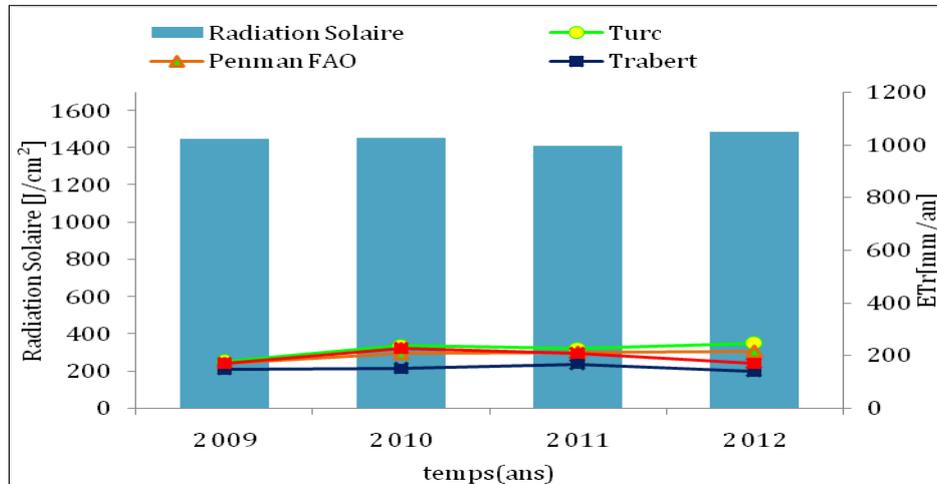


Figure 55 : Variation annuelle de l'ET_r à l'échelle construite de la wilaya d'Alger estimée par les méthodes suivantes : Turc, Penman FAO, Trabert, Tabari comparée avec les radiations solaires annuelles.

Sur l'échelle du construit de la wilaya d'Alger, nous remarquons que les valeurs d'ET_r, obtenues par les méthodes de Turc et Tabari varient linéairement (directement proportionnelles) avec la radiation solaire. Par contre, les valeurs correspondant à la méthode de Trabert indiquent une proportionnalité inverse. Pour la méthode de Penman-FAO, l'ET_r ne semble pas être directement influencée par la radiation solaire comme montre la Figure 55.

3.3.2 Comparaison entre méthodes à l'échelle construite de la wilaya d'Alger (B= 0 mm)

La comparaison entre l'évapotranspiration réelle annule estimée par les différentes méthodes conduites aux résultats suivants :

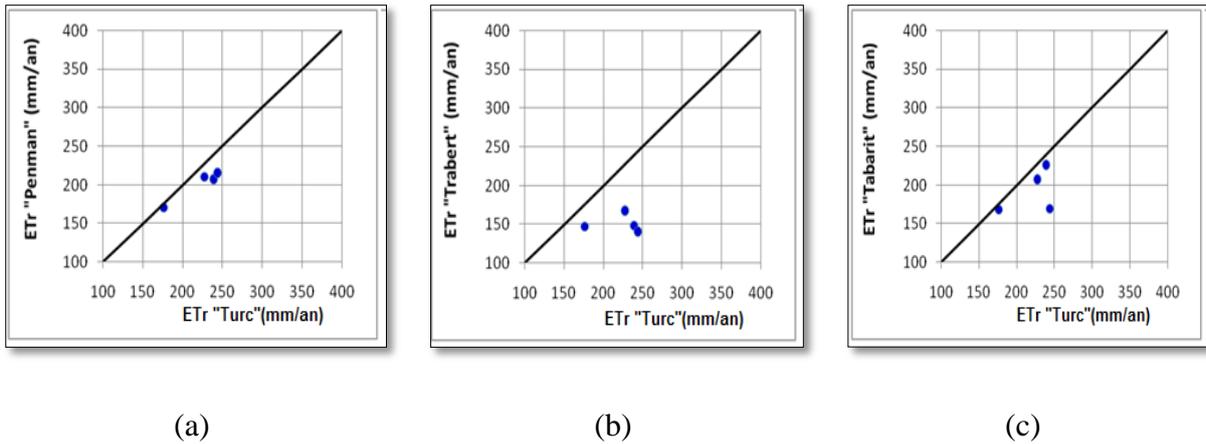


Figure 56 : Comparaison à l'échelle construite de la wilaya d'Alger entre l'ETr estimée par la méthode de Turc, (a) : avec la méthode de Penman-FAO (b) : avec la méthode de Trabert, (c) : avec la méthode de Tabari.

En comparaison avec la méthode de Turc, les résultats de la méthode de Penman-FAO (sans irrigation), reflètent une sous-estimation (de 3.09-13.49 %) de l'évapotranspiration réelle. Les estimations des deux méthodes présentent une bonne corrélation.

En comparaison avec la méthode de Turc, les résultats de la méthode de Trabert (sans irrigation), reflètent une sous-estimation (de 16.36-42.60%) de l'évapotranspiration réelle. Les estimations des deux méthodes présentent une assez bonne corrélation.

En comparaison avec la méthode de Turc, les résultats de la méthode de Tabari (sans irrigation), reflètent une sous-estimation (de 4.22-30.23 %) de l'évapotranspiration réelle. Les estimations des deux méthodes présentent une assez bonne corrélation.

3.4 L'évapotranspiration réelle à l'échelle du non construit

3.4.1 Variation d'évapotranspiration dans le temps

3.4.1.1 Scenario 1 - Sans irrigation (B=0 mm/an)

a. Comparaison avec la précipitation

La variation annuelle d'ETr à l'échelle d'Alger du non construit représentée dans la Figure 57 conduit aux résultats suivants :

Chapitre 3. Résultats et Discussion

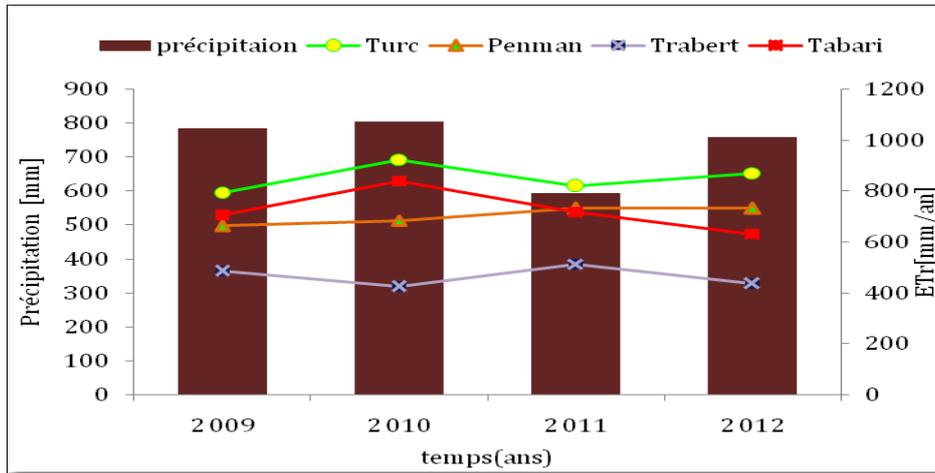


Figure 57 : Variation annuelle de l'ETr à l'échelle du non construit de la wilaya d'Alger estimée par les méthodes suivantes : Turc, Penman FAO, Trabert, Tabari pour $B=0$ mm/an comparée avec les précipitations annuelles.

Méthode de Turc : à l'échelle du non-construit, sans irrigation, les calculs nous donnent des valeurs d'ETr entre 792.72 et 922.61 (mm/an) durant la période 2009-2012 avec une moyenne de 850.51 (mm/an). La valeur maximale est enregistrée en 2010 et celle minimale en 2009.

Méthode de Penman-FAO : à l'échelle du non construit, sans irrigation, les calculs nous donnent des valeurs d'ETr entre 661.47 et 730.58 (mm/an) durant la période 2009-2012 avec une moyenne de 701.39 (mm/an). La valeur maximale est enregistrée en 2011 et celle minimale en 2009.

Méthode de Trabert : à l'échelle du non construit, sans irrigation, les calculs nous donnent des valeurs d'ETr entre 423.68 et 511.52 (mm/an) durant la période 2009-2012 avec une moyenne de 463.55 (mm/an). La valeur maximale est enregistrée en 2011 et celle minimale en 2010.

Méthode de Tabari : à l'échelle du non construit, sans irrigation, les calculs nous donnent des valeurs l'ETr entre 630.24 et 837.57 (mm/an) durant la période 2009-2012 avec une moyenne de 722.41 (mm/an). La valeur maximale est enregistrée en 2010 et celle minimale en 2012.

Sur l'échelle du non-construit de la wilaya d'Alger, nous remarquons que les valeurs d'ETr, obtenues sans irrigation par les méthodes de Turc et Tabari varient linéairement (directement proportionnelles) avec la précipitation. Par contre, les valeurs correspondant a la méthode de Trabert indiquent une proportionnalité inverse. Pour la méthode de Penman-FAO, l'ETr ne semble pas être directement influencée par la précipitation comme montre la Figure 57.

b. Comparaison avec la température

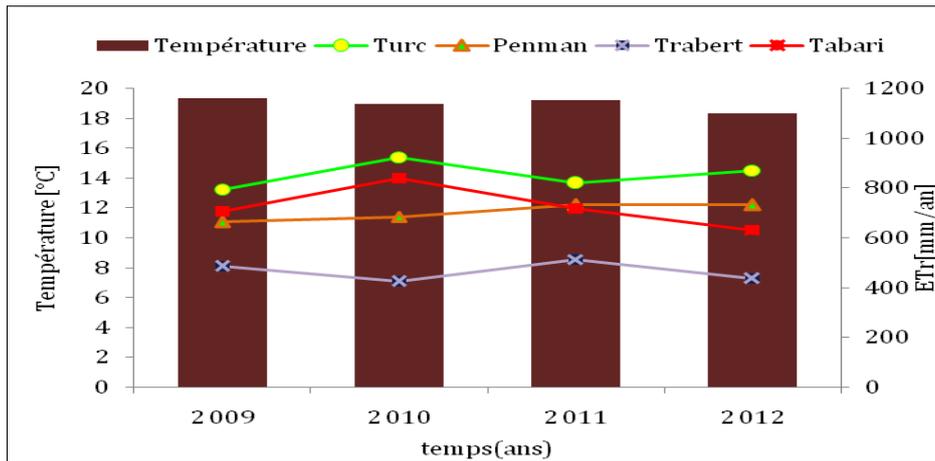


Figure 58 : Variation annuelle de l'ETr à l'échelle du non construit de la wilaya d'Alger estimée par les méthodes suivantes : Turc, Penman FAO, Trabert, Tabari pour $B=0$ mm/an comparée avec les températures annuelles.

Sur l'échelle du non construit de la wilaya d'Alger, nous remarquons que les valeurs d'ETr, obtenues par les méthodes Trabert varient linéairement (directement proportionnelles) avec la température. Par contre, les valeurs correspondant aux méthodes de Turc et Tabari indiquent une proportionnalité inverse. Pour la méthode de Penman-FAO, l'ETr ne semble pas être directement influencée par la température comme montre la Figure 58.

c. Comparaison avec la vitesse du vent

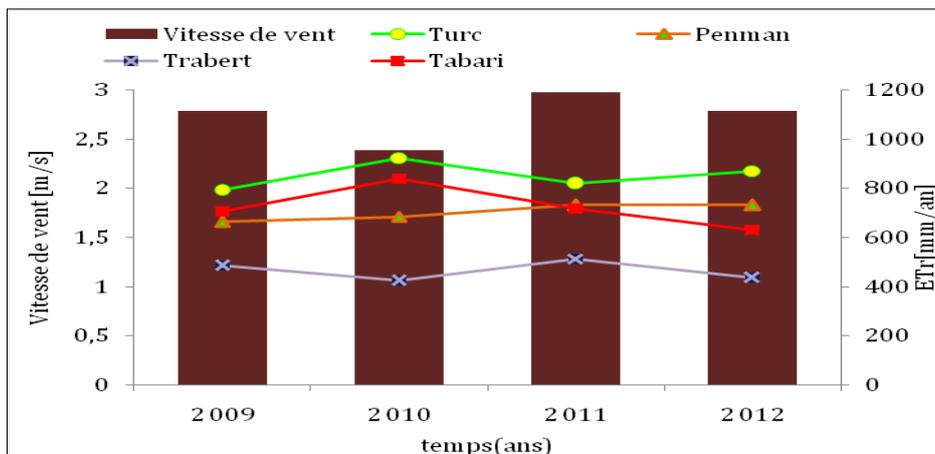


Figure 59 : Variation annuelle de l'ETr à l'échelle du non construit de la wilaya d'Alger estimée par les méthodes suivantes : Turc, Penman FAO, Trabert, Tabari pour $B=0$ mm/an comparée avec les vitesses du vent annuels.

Chapitre 3. Résultats et Discussion

Sur l'échelle du non construit de la wilaya d'Alger, nous remarquons que les valeurs d'ETr, obtenues par la méthode de Trabert varient linéairement (directement proportionnelles) avec la vitesse du vent. Par contre, les valeurs correspondant aux méthodes de Turc et Tabari indiquent une proportionnalité inverse. Pour la méthode de Penman-FAO, l'ETr ne semble pas être directement influencée par la vitesse du vent comme montre la Figure 59.

d. Comparaison avec la Humidité relative

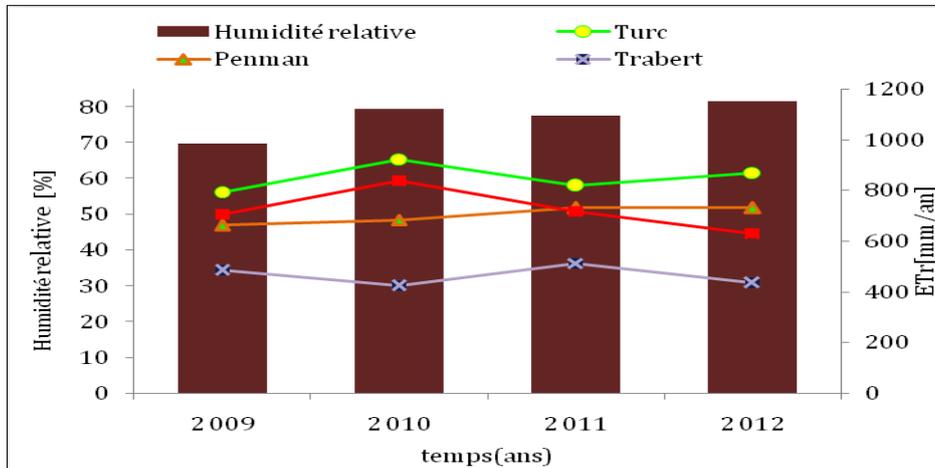


Figure 60 : Variation annuelle de l'ETr à l'échelle non construit de la wilaya d'Alger estimée par les méthodes suivantes : Turc, Penman FAO, Trabert, Tabari pour $B=0$ mm/an comparée avec les humidités relatives annuelles.

Sur l'échelle du non construit de la wilaya d'Alger, nous remarquons que les valeurs d'ETr, obtenues sans irrigation par les méthodes de Turc et Tabari varient linéairement (directement proportionnelles) avec l'humidité relative. Par contre, les valeurs correspondant à la méthode de Trabert indiquent une proportionnalité inverse. Pour la méthode de Penman-FAO, l'ETr ne semble pas être directement influencée par l'humidité relative comme montre la Figure 60.

e. Comparaison avec la Radiation solaire

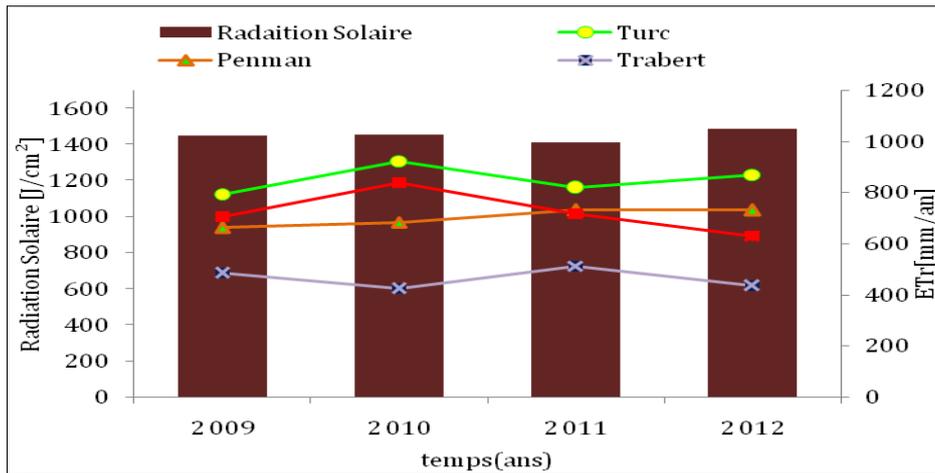


Figure 61 : Variation annuelle de l'ETr à l'échelle du non construit de la wilaya d'Alger estimée par les méthodes suivantes : Turc, Penman FAO, Trabert, Tabari pour $B=0$ mm/an comparée avec les radiations solaires annuelles.

Sur l'échelle du non construit de la wilaya d'Alger, nous remarquons que les valeurs d'ETr, obtenues sans irrigation par les méthodes de Turc et Tabari varient linéairement (directement proportionnelles) avec la radiation solaire. Par contre, les valeurs correspondant par la méthode de Trabert indiquent une proportionnalité inverse. Pour la méthode de Penman-FAO, l'ETr ne semble pas être directement influencée par la radiation solaire comme montre la Figure 61.

3.4.1.2 Scénario 2 - Avec un taux d'irrigation $B=320.4$ mm/an

a. Comparaison avec la précipitation

La variation annuelle d'ETr à l'échelle d'Alger du non construit représentée dans la Figure 62 conduit aux résultats suivants :

Chapitre 3. Résultats et Discussion

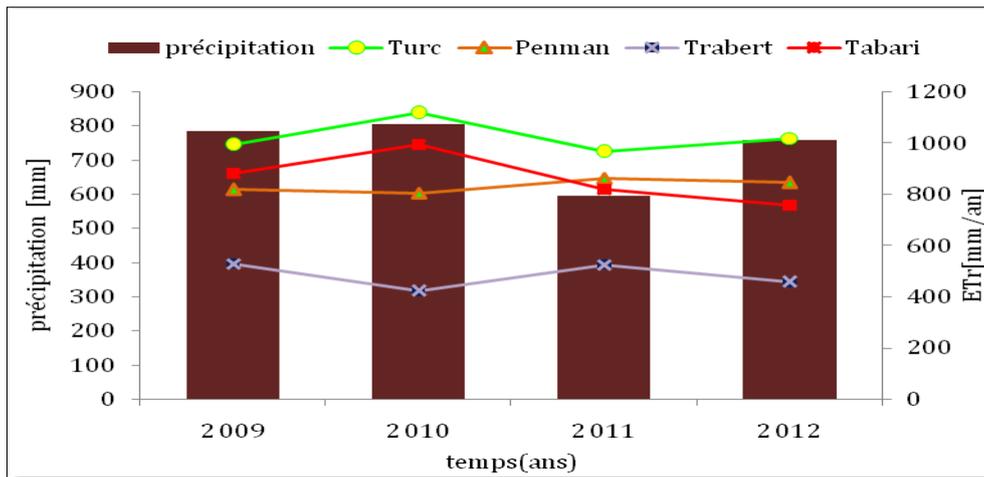


Figure 62: Variation annuelle de l'ETr à l'échelle non construite de la wilaya d'Alger estimée par les méthodes suivantes : Turc, Penman FAO, Trabert, Tabari pour $B=320.4$ mm comparée avec les précipitations annuelles.

Méthode de Turc : à l'échelle non construite, avec un taux d'irrigation de 3.56mm/j pendant 3mois, les calculs nous donnent des valeurs d'ETr entre 964.24 et 1115.37 (mm/an) durant la période 2009-2012 avec une moyenne de 1022.11 (mm/an). La valeur maximale est enregistrée en 2010 et celle minimale en 2011.

Méthode de Penman-FAO : à l'échelle du non-construit, avec un taux d'irrigation de 3.56mm/j pendant 3mois, les calculs nous donnent des valeurs d'ETr entre 802.26 et 861.17 (mm/an) durant la période 2009-2012 avec une moyenne de 831.14 (mm/an). La valeur maximale est enregistrée en 2011 et celle minimale en 2010.

Méthode de Trabert : à l'échelle du non-construit, avec un taux d'irrigation de 3.56mm/j pendant 3mois, les calculs nous donnent des valeurs d'ETr entre 419.98 et 527.49 (mm/an) durant la période 2009-2012 avec une moyenne de 481.54 (mm/an). La valeur maximale est enregistrée en 2009 et celle minimale en 2010.

Méthode de Tabari : à l'échelle du non-construit, avec un taux d'irrigation de 3.56mm/j pendant 3mois, les calculs nous donnent des valeurs d'ETr entre 755.69 et 992.76 (mm/an) durant la période 2009-2012 avec une moyenne de 861.75 (mm/an). La valeur maximale est enregistrée en 2010 et celle minimale en 2012.

Sur l'échelle du non-construit de la wilaya d'Alger, nous remarquons que les valeurs d'ETr, obtenues sans irrigation par les méthodes de Turc et Tabari varient linéairement (directement proportionnelles) avec la précipitation. Par contre, les valeurs correspondant a la méthode de Trabert indiquent une proportionnalité inverse. Pour la méthode de Penman-FAO, l'ETr ne semble pas être directement influencée par la précipitation comme montre la Figure 62.

a. Comparaison avec la température

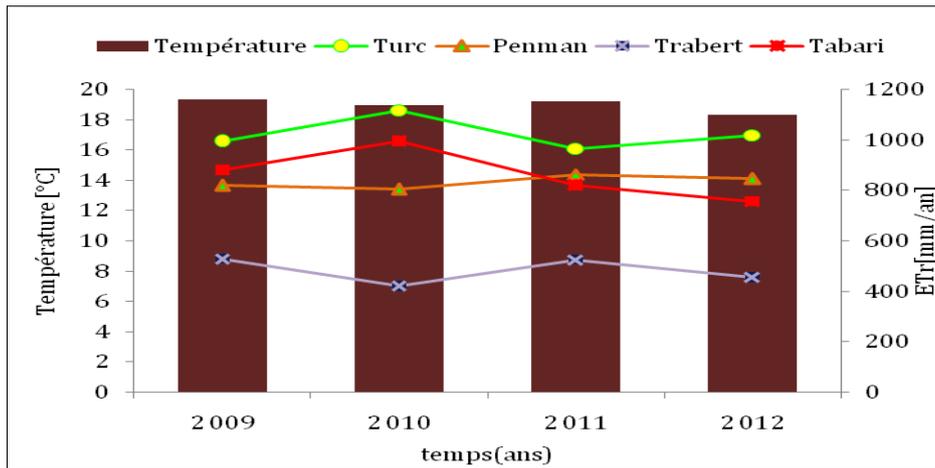


Figure 63: Variation annuelle de l'ETr à l'échelle du non construit de la wilaya d'Alger estimée par les méthodes suivantes : Turc, Penman FAO, Trabert, Tabari pour $B=320.4$ mm comparée avec les températures annuelles.

Sur l'échelle du non-construit de la wilaya d'Alger, nous remarquons que les valeurs d'ETr, de la wilaya d'Alger avec un taux d'irrigation de 3.56mm/j pendant 3 mois obtenus par la méthode de Trabert se varie linéairement (directement proportionnelles) avec la température. Par contre, les valeurs de l'ETr calculées par les méthodes de Turc et Tabari indiquent une proportionnalité inverse. Pour la méthode de Penman-FAO l'ETr ne semble pas être directement influencée par la température comme montre la Figure 63.

b. Comparaison avec la vitesse du vent

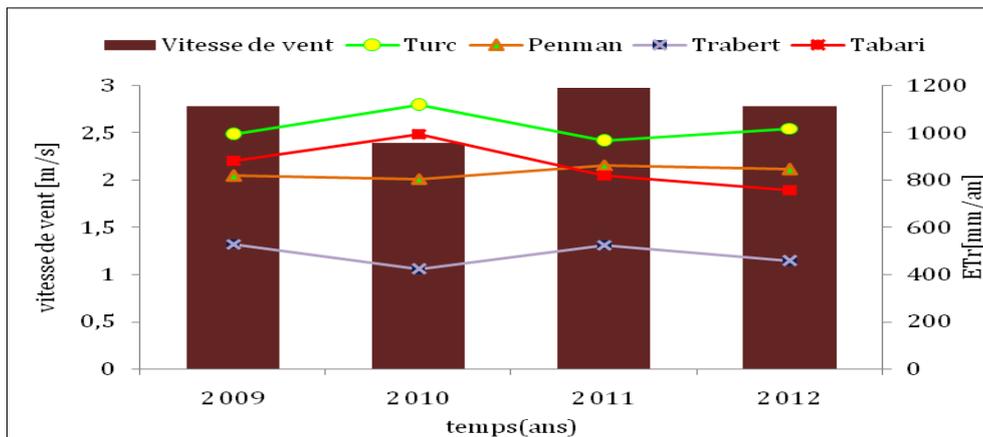


Figure 64: Variation annuelle de l'ETr à l'échelle du non construit de la wilaya d'Alger estimée par les méthodes suivantes : Turc, Penman FAO, Trabert, Tabari pour $B=320.4\text{mm/an}$ comparée avec les vitesses du vent annuels.

Chapitre 3. Résultats et Discussion

Sur l'échelle du non-construit de la wilaya d'Alger, nous remarquons que les valeurs d'ET_r, de la wilaya d'Alger avec un taux d'irrigation de 3.56mm/j pendant 3 mois obtenus par la méthode de Trabert varient linéairement (directement proportionnelles) avec la vitesse du vent. Par contre, les valeurs de l'ET_r calculées par les méthodes de Turc et Tabari indiquent une proportionnalité inverse. Pour la méthode de Penman-FAO l'ET_r ne semble pas être directement influencée par la vitesse du vent comme montre la Figure 64.

c. Comparaison avec la Humidité relative

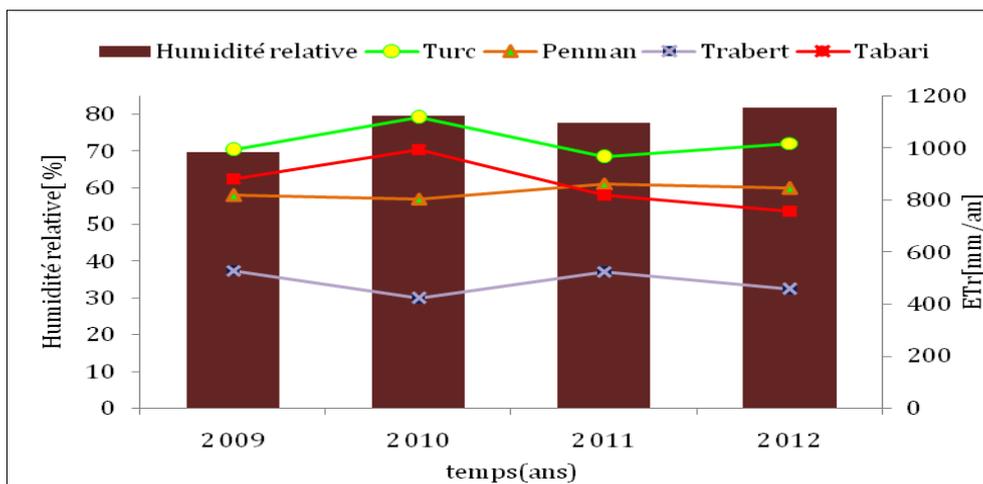


Figure 65: Variation annuelle de l'ET_r à l'échelle du non construit de la wilaya d'Alger estimée par les méthodes suivantes : Turc, Penman FAO, Trabert, Tabari pour B=320.4mm/an comparée avec les humidités relatives annuelles.

Sur l'échelle du non-construit de la wilaya d'Alger, nous remarquons que les valeurs d'ET_r, obtenues avec un taux d'irrigation de 3.56mm/j pendant 3 mois pour les zones agricoles par les méthodes de Turc et Tabari varient linéairement (directement proportionnelles) avec l'humidité relative. Par contre, les valeurs correspondant à la méthode de Trabert indiquent une proportionnalité inverse. Pour la méthode de Penman-FAO, l'ET_r ne semble pas être directement influencée par l'humidité relative comme montre la Figure 65.

3.4.2 Comparaison entre méthodes à l'échelle non construit

➤ Scenario 1 - sans irrigation (B=0 mm/an)

La comparaison entre l'évapotranspiration réelle annule estimée par les différentes méthodes conduites aux résultats suivants :

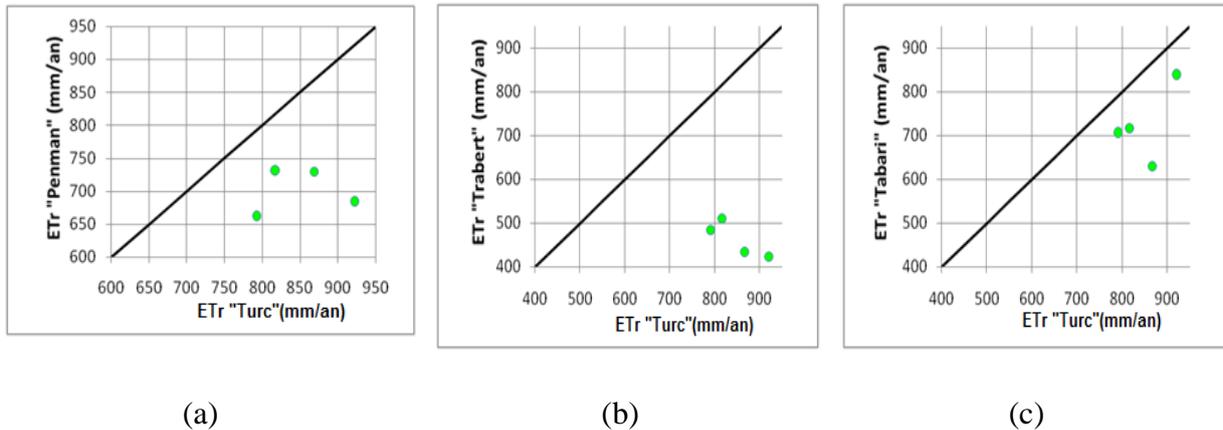


Figure 66 : Comparaison à l'échelle non construite de la wilaya d'Alger pour un taux d'irrigation nul entre l'ETr estimé par la méthode de Turc et (a) la méthode de Penman-FAO (b) la méthode de Trabert, (c) la méthode de Tabari.

En comparaison avec la méthode de Turc, les résultats de la méthode de Penman-FAO, sans irrigation, reflètent une sous-estimation (de 10.66-25.89 %) de l'évapotranspiration réelle.

En comparaison avec la méthode de Turc, les résultats de la méthode de Trabert, sans irrigation reflètent une sous-estimation (de 37.45-49.96%) de l'évapotranspiration réelle. Les estimations des deux méthodes présentent une faible corrélation.

En comparaison avec la méthode de Turc, les résultats de la méthode de Tabari sans irrigation reflètent une sous-estimation (de 9.21-27.46%) de l'évapotranspiration réelle. Les estimations des deux méthodes présentent une assez bonne corrélation.

➤ **Scenario 2 - avec taux d'irrigation B=320.4 mm/an**

La comparaison entre l'évapotranspiration réelle annule estimée par les différentes méthodes conduites aux résultats suivants :

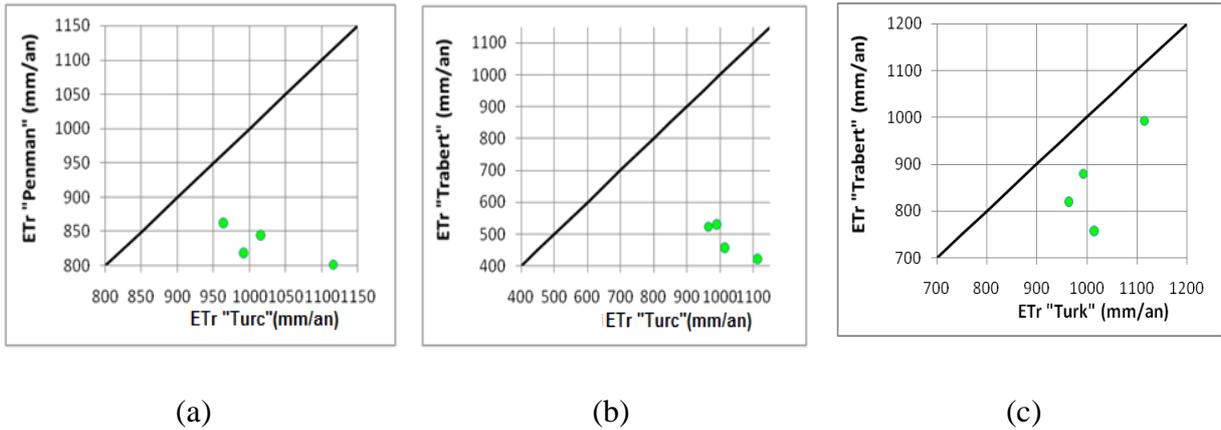


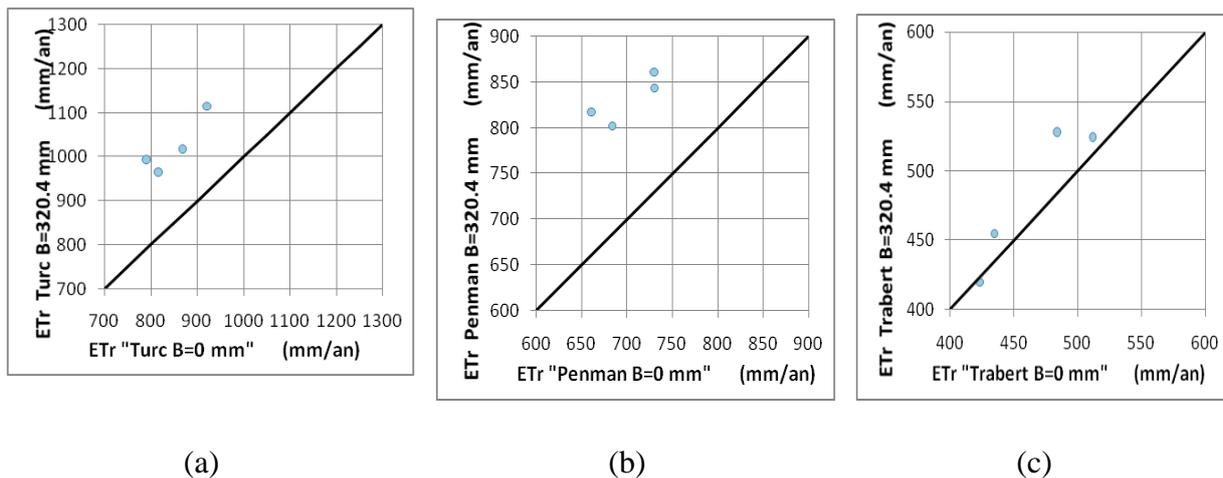
Figure 67 : Comparaison à l'échelle non construite de la wilaya d'Alger pour $B=320.4\text{mm/an}$ entre l'ETr estimé par la méthode de Turc et : (a) la méthode de Penman-FAO (b) la méthode de Trabert, (c) la méthode de Tabari.

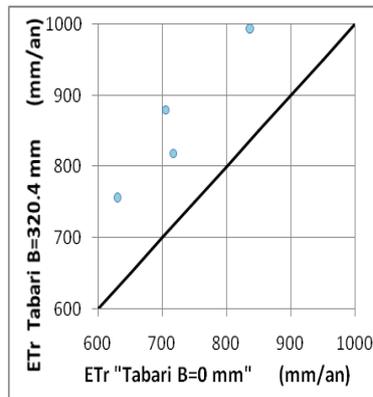
En comparaison avec la méthode de Turc, les résultats de la méthode de Penman-FAO pour un taux d'irrigation $B=320.4\text{ mm/an}$ reflètent une sous-estimation (de 10.68-28.07%) de l'évapotranspiration réelle. Les estimations des deux méthodes présentent une faible corrélation.

En comparaison avec la méthode de Turc, les résultats de la méthode de Trabert pour un taux d'irrigation $B=320.4\text{ mm/an}$ reflètent une sous-estimation (de 45.67-62.34%) de l'évapotranspiration réelle.

En comparaison avec la méthode de Turc, les résultats de la méthode de Tabari pour un taux d'irrigation $B=320.4\text{ mm/an}$ reflètent une sous-estimation (de 10.99-25.63%) de l'évapotranspiration réelle. Les estimations des deux méthodes présentent une bonne corrélation qui diverge du droit $x=y$ pour de grandes valeurs de l'ETr.

3.4.3 Comparaison entre les modèles sans et avec taux d'irrigation





(d)

Figure 68 : Comparaison à l'échelle non construite de la wilaya d'Alger entre l'ETr calculer avec et sans irrigation, (a) : méthode de Turc: Comparaison entre B=0 mm/an et B=320.4 mm/an, (b) : méthode de Penman-FAO: Comparaison entre B=0 mm/an et B=320.4 mm/an, (c) : méthode de Trabert: Comparaison entre B=0 mm/an et B=320.4 mm/an, (d) méthode de Tabari : Comparaison entre B=0 mm/an et B=320.4 mm/an.

En comparaison avec le scénario sans irrigation (B=0 mm/an), les résultats de la méthode Turc avec B=320.4 mm/an reflètent une surestimation (de 16.96-25.21 %) de l'ETr.

En comparaison avec le scénario sans irrigation (B=0 mm/an), les résultats de la méthode Penman avec B=320.4 mm/an reflètent une surestimation (de 15.58-23.60%) de l'ETr.

En comparaison avec le scénario sans irrigation (B=0 mm/an), les résultats de la méthode Trabert avec B=320.4 mm/an reflètent une sous-estimation de 0.87% est une surestimation de 8.92 % de l'ETr.

En comparaison avec le scénario sans irrigation (B=0 mm/an), les résultats de la méthode Tabari avec B=320.4 mm/an reflètent une surestimation de (14.17-24.83 %) de l'ETr.

3.5 Comparaisons entre les résultats obtenus à différentes échelles

- Pour analyser l'impact de l'urbanisation sur le bilan hydrique nous avons fait une comparaison entre l'ETr (valeur moyenne de 4 ans, 2009-2012, pour chaque méthode) estimées à l'échelle construit et a l'échelle du non-construit de la wilaya d'Alger (voir Figure 69) et cela pour le scenario 1: sans irrigation (B=0 mm/an).

Chapitre 3. Résultats et Discussion

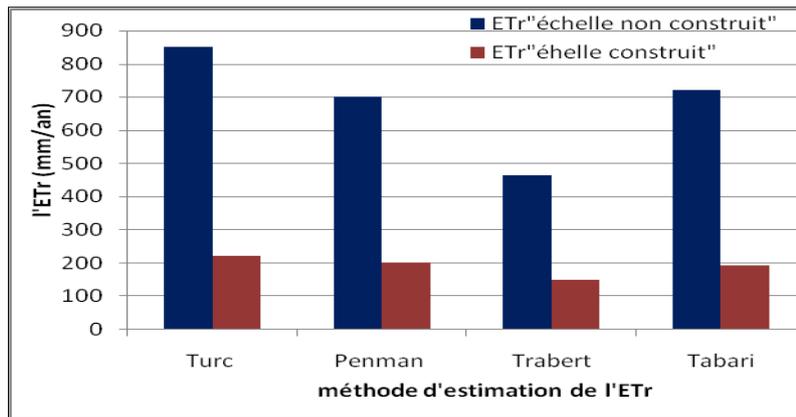


Figure 69 : Comparaison entre les valeur annuelle de l'ETr à l'échelle du construit et du non-construit estimée par la méthode de Bargov (pour $B=0$ mm/an).

En terme de magnitude, l'évapotranspiration réelle estimée à l'échelle non construite est 3 à 4 fois plus grande que l'ETr estimée à l'échelle construite. Cette différence peut être associée avec la réduction considérable des surface végétales et donc de la diminution de la transpiration des plantes. Cette aspect montre l'importance de l'impact de l'urbanisation sur l'évapotranspiration.

- D'une façon similaire, pour analyser l'impact de l'urbanisation sur le bilan hydrique nous avons fait une comparaison entre l'ETr (valeur moyenne de 4 ans (2009-2012) pour chaque méthode) estimées à l'échelle non construite de la wilaya d'Alger et à l'échelle globale de la wilaya d'Alger (Figure 70) pour un taux d'irrigation de 320.4 mm/an.

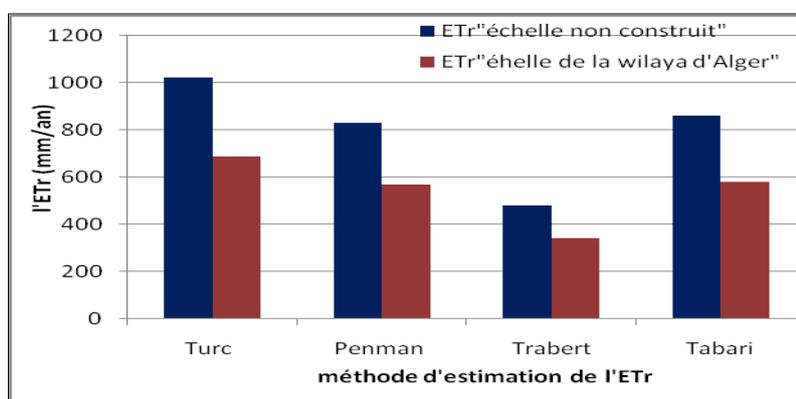


Figure 70 : L'ETr annuel à l'échelle de la wilaya d'Alger et du non construit estimé par la méthode de Bargov (pour $B=320.4$ mm).

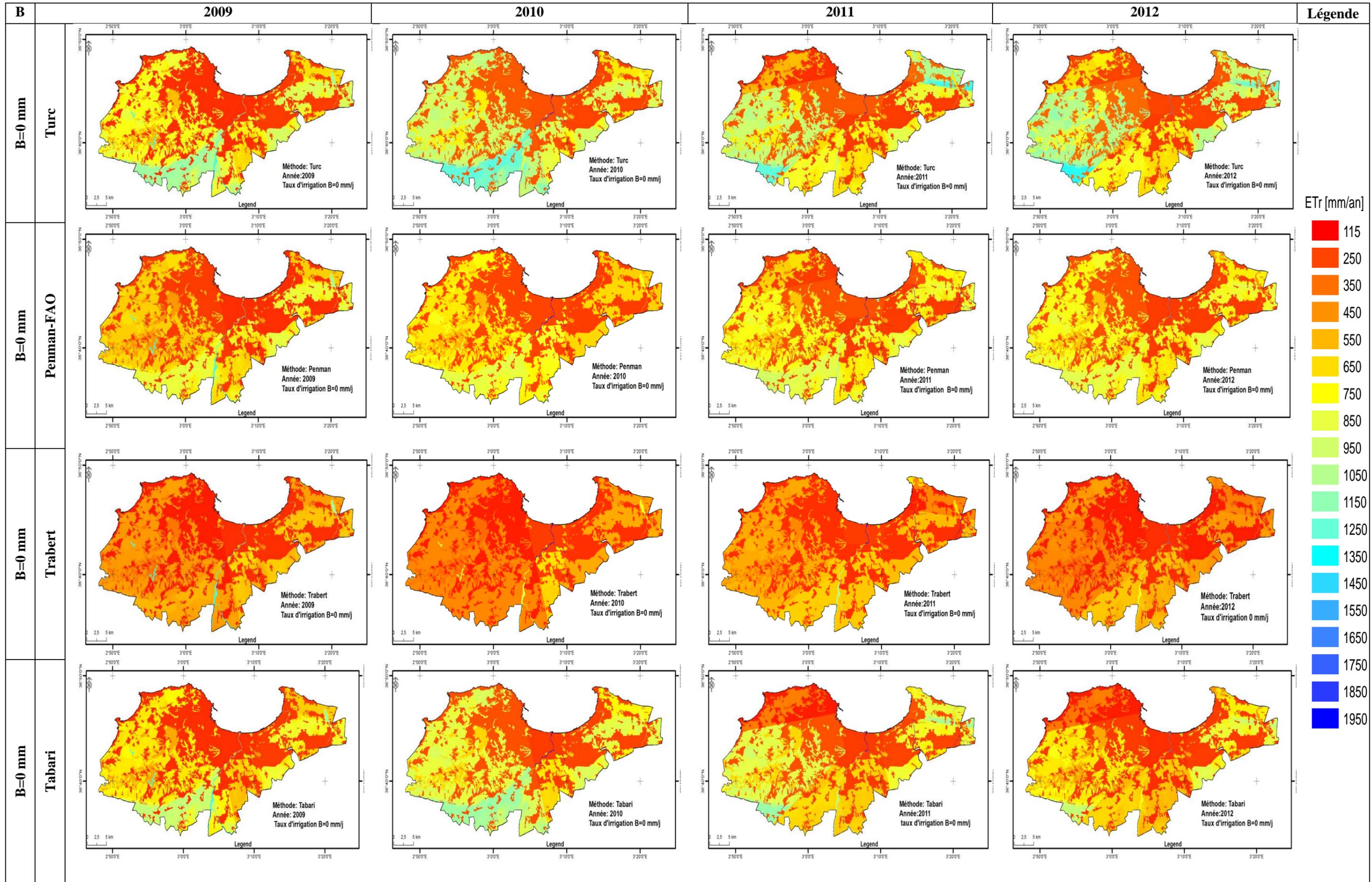
L'ETr estimée à l'échelle du non-construit est jusqu'à 30% plus grande que l'ETr estimée à l'échelle globale de la wilaya d'Alger.

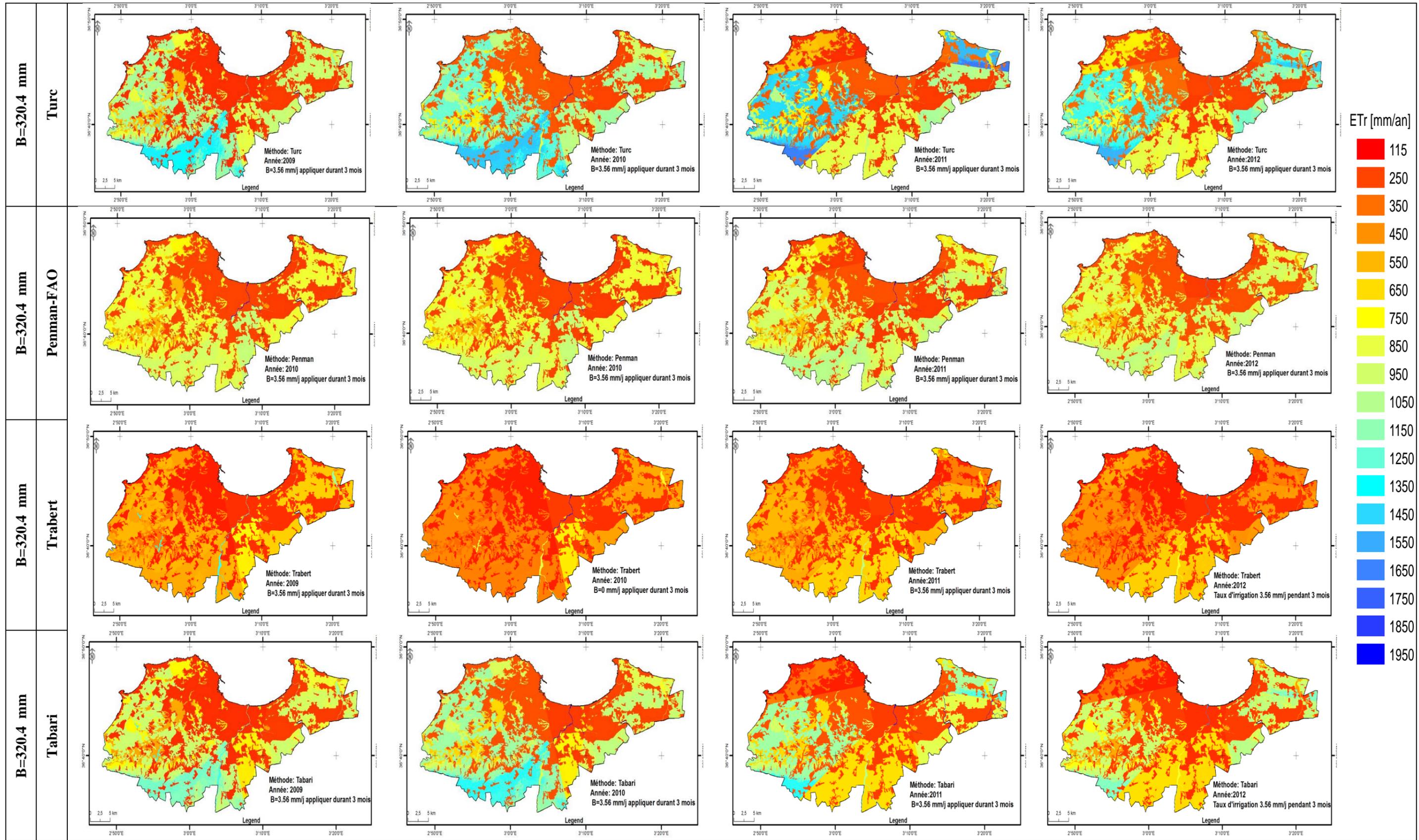
3.6 Distributions spatiales de l'évapotranspiration réelle

Sur la base de la cartographie des valeurs estimées l'ETr (donnée ci-dessous), il est possible d'observer les aspects suivant concernant la distribution spatiale de cette composant du bilan hydrologique:

- Pour un taux d'irrigation donné et pour une période donnée (une année), les quatre méthodes de calcul de l'ETp semblent produire des distributions spatiales des valeurs de l'ETr présentant des tendances similaires. La méthode de Turc est celle qui donne les valeurs maximales et la méthode de Trabert est celle qui donne les estimations minimales.
- Pour une méthode donnée et pour un scénario d'irrigation donné, le changement d'une année à une autre reflète l'impact du changement des conditions climatiques sur la distribution spatiale des valeurs de l'ETr.
- Pour une méthode donnée et pour une période donnée (une année donnée), les deux scénarios en termes du taux d'irrigation indique que plus grand est le taux d'irrigation, plus importantes est l'ETr.

Il est également possible d'observer la grande différence entre les valeurs de l'ETr dans les zones construites (faibles magnitudes) et celle dans les zones non-construites (grandes magnitudes).





ETr [mm/an]



Conclusion générale

La présente étude donne une évaluation de la variabilité spatiale et temporelle d'une des composantes du bilan hydrologique (évapotranspiration) de la wilaya d'Alger dans le but de souligner le potentiel impact de l'urbanisation et des changements des conditions climatiques sur ce bilan. L'évapotranspiration est estimée en utilisant la méthode de Bargov combinée avec quatre approches (Turc, Penman-FAO, Trabert, Tabari). Les résultats obtenus sont utilisés pour réaliser deux analyses comparatives:

- Une analyse spatiale et temporelle en utilisant la couverture de terrain (construit et non-construit) comme critère de comparaison;
- Une autre analyse des résultats des différentes méthodes utilisées.

Concernant l'impact de l'urbanisation, nous avons trouvé que l'évapotranspiration à l'échelle construite est des trois à quatre fois plus faible que l'évapotranspiration estimée à l'échelle non-construite. Cette différence peut être liée au manque du terme de la transpiration dans les zones urbaines.

La comparaison entre les méthodes de calcul de l'ETp utilisées indique des différences entre les résultats de cette composante du bilan hydrique variant entre -3.09% et -54.07% (sous-estimation) et en prenant la méthode de Turc comme référence pour un taux d'irrigation nul. Ces résultats varient entre -10.17% (sous-estimation) et 62.34% (surestimation) et pour un taux d'irrigation de 3.65mm/j appliqué durant 3 mois/an.

De plus, la comparaison entre les valeurs de l'ETr sous différents scénarios de calcul en fonction du taux d'irrigation indique que pour un taux d'irrigation de $B=320.4\text{mm/an}$ (dans les zones agricoles) conduit à des valeurs d'ETr jusqu'à 25.21% plus grandes que celle estimées pour $B=0\text{mm/an}$. Ce comportement est tout à fait logique, puis ce que l'irrigation contribue à réduire le déficit d'eau disponible pour l'évapotranspiration.

Finalement cette étude souligne l'intérêt d'une modélisation hydrologique distribuée (dans l'espace et dans le temps) pour estimer l'impact de l'évolution de l'urbanisation et du changements climatiques sur le bilan hydrologique d'un bassin versant.

Bibliographie

- Abtew, W. & Melesse, A., 2013. *L'estimation et la mesure de l'évaporation et l'évapotranspiration*. Florida, USA: Springer Science+Business Media Dordrecht. DOI 10.1007/978-94-007-4737-1.
- Allen, R.G. & Pereira, L.S., 1998. *Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. USA: FAO Irrigation and Drainage Paper.
- ASTER GDEM, 2011. Modèle numérique de terrain(MNT). ASTER GDEM is a product of METI and NASA, Spatial resolution : 1 arc second, Satellite images acquisition date: 17 oct 2011.
- Bachoua, Y., 2017. *l'estimation du bilan hydrologique en zones urbaines : Infiltration et ruissellement à l'échelle de la ville d'Alger*. Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur. Alger: Ecole Nationale Polytechnique.
- Benchetrit, M., 2016. Les sols d'Algérie. *Revue de géographie alpin*. DOI: 10.3406/rga.1956.1790.
- Berthier, E., Dupont, S., Mestayer, P.G. & Andrieu, H., 2006. Comparison of two evapotranspiration schemes on a sub-urban site. *Journal of Hydrology*, 328, p.635– 646. 10.1016/j.jhydrol.2006.01.007.
- Cosandey, C. & Mark, R., 2012. *Hydrologie Continentale*. paris: Armand Colin.
- Delidjakova, K., Bello, R. & MacMillan, G., 2014. *Measurement of Evapotranspiration Across Different Land Cover Types in the Greater Toronto Area*. Toront ,Ontario.: Toronto and Region Conservation and York University.
- DEMHR, 1973. *carte hydrogéologique de la région d'Alger*. carte. Alger.
- Djaman, K. et al., 2016. Analyses, étalonnage et validation des modèles d'évapotranspiration pour prédire l'évapotranspiration de référence dans le delta du Sénégal. *Journal d'hydrogéologie*, (8), p.82–94. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrh.2016.06.003>.
- Duac, A., 2010. *ATLAS Wilaya d'Alger*. Alger.
- DVWK-Merkblatt, 1996. *Détermination de l'évaporation des surfaces terrestres et aquatiques*. Wasser mbH Bonn, Bonn.
- ESRI, 2010.4. logiciel ArcGis. Licence: ENSSMAL.

-
- Grimmond, C.S.B. & Oke, T.R., 1999. Taux d'évapotranspiration dans les zones urbaines. *IAHS Publ*, (259), pp.235-43.
- H.Chang, J., 1965. l'étude de l'évapotranspiration et de l'équilibre hydrique. *Erdkunde*, (19), pp.141-50.
- Hosseinzadehtalaei, P., Tabari, H. & Willems, P., 2016. Quantification de l'incertitude dans les signaux de changement climatique d'évapotranspiration de référence en Belgique. *recherche en hydrologie*, pp.1-13. doi: 10.2166/nh.2016.243.
- Lage, M., Bamouh, A., Karrou, M. & El Mourid, M., 2003. Estimation de l'évapotranspiration du riz à l'aide d'une technique de microlysimétrie et comparaison avec les méthodes d'évaporation Penman-Monteith et Pan de la FAO dans des conditions marocaines. *HAL*, 23(7), pp.625-31. DOI: 10.1051/agro:2003040.
- Liamas, J., 1985. *hydrologie générale: principe et applications*. CHINICOUTIMI, Québec, Canada: gaëtan morin éditeur.
- l'INSID, 2011. carte d'utilisation du terrain de la wilaya d'Alger.
- Litvak, E. & Pataki, D.E., 2016. Evapotranspiration des pelouses urbaines dans un environnement semi-aride: L'évaluation in situ des conditions microclimatiques et les recommandation de l'arrosage. *Journal of Arid Environments*, (134), pp.87-96. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2016.06.016.
- Minnig, M., 2017. *Impact de l'urbanisation sur la recharge des eaux souterraines: l'étude de cas de Dübendorf, Suisse*. Thèse de master. Dübendorf: la recherche aquatique d'eawag Ecole polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Minnig, M., Moeck, C., Radny, D. & Schirmer, M., 2017. Impact de l'urbanisation sur les taux de recharge des eaux souterraines à Dübendorf. 17(5).
- Musy, A. & Soutter, M., 1991. physique de sol.
- Nikam, B.R. et al., 2014. Évaluation comparative des différentes approches d'estimation de l'évapotranspiration potentielle. 03(06).
- Nilzinski, J.J. et al., 2009. Evapotranspiration réelle et résistance du couvert d'une savane à *Loudetia Arundinacea* (bassin du Kouilou). 6, pp.33-45.
- Ramamurthy, P. & Bou-Zeid, E., 2014. Contribution des surfaces imperméables à l'évaporation urbaine. *AGU Publications*, (50), pp.2890-902. DOI:10.1002/2013WR013909.
-

Rijtema, E.P., 1965. An analysis of actual evapotranspiration. (659), p.107.

Seguin, B., Royer, A. & Lemieux, G., 1996. la télédétection appliquée à l'étude de l'atmosphère et du climat. In Bonn, F. *Précis de télédétection*. Application thématique, Québec: Presse de l'univ. du Québec.

Selvaradjou, S.-K., 2005. *Soil Maps of Africa*. European Digital Archive of Soil Maps ed.

Shuttleworth, W., 1993. Evaporation. In Maidment, D. *Handbook of hydrology*. New York: McGraw-Hill.

Viliam, N., 2012. *Evapotranspiration in the Soil-Plant-Atmosphere System*. Bratislava, Slovakia: Springer Science+Business Media Dordrecht. DOI 10.1007/978-94-007-3840-9.

Zarei, A.R. & Mahmoudi, M.R., 2017. Évaluation des modifications de l'indice de RD_{ist} effectuées par différentes méthodes de calcul de l'évapotranspiration potentielle. *Gestion de l'eau*. DOI 10.1007/s11269-017-1790-7.