

ÉCOLE DOCTORALE
ENERGIE, MATERIAUX, SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

Centre d'Etudes et de Recherche de Djibouti (CERD)
Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO)

THÈSE présentée par :
Hami SAID AHMED

soutenue le : **9 avril 2015**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'Université d'Orléans**
Discipline/ Spécialité : Science du Sol

**Etude de l'alimentation hydrique du palmier
dattier (*Phoenix dactylifera L.*) dans le
contexte pédoclimatique de la zone littorale
de la République de Djibouti.**

THÈSE dirigée par :
Yves COQUET

Professeur, Université d'Orléans

RAPPORTEURS :
Patricia GARNIER
Laurent LASSABATERE

Chargée de Recherches, INRA
Ingénieur TPE, ENTPE

JURY :

Ary BRUAND
Yves COQUET
Isabelle COUSIN
Abdourahman DAHER
Patricia GARNIER
Laurent LASSABATERE

Professeur, Université d'Orléans
Professeur, Université d'Orléans
Directrice de Recherches, INRA
Chargé de Recherches, CERD
Chargée de Recherches, INRA
Ingénieur TPE, ENTPE

A la mémoire de mon cher père Said Ahmed Warsama (SAW)



Said Ahmed Warsama
(28 Août 1942 - 14 Juillet 2013)

REMERCIEMENTS

Ce travail de thèse a été effectué à l'Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO) et au laboratoire de Sciences des sols de l'Institut des Sciences de la Vie (ISV) du Centre d'Etudes et de Recherches de Djibouti (CERD).

Mes premiers remerciements vont au Professeur Yves COQUET, qui a dirigé cette thèse. Je lui suis reconnaissant d'avoir accepté l'encadrement de cette thèse, de m'avoir soutenu, donné des bons conseils et, bien sûr, de sa disponibilité et de sa gentillesse. Je remercie Monsieur Yves COQUET de m'avoir accepté en 2008 dans la formation de Master Sol d'AgroParisTech, que j'ai eu la chance de suivre, au cours de laquelle j'ai pu discuter du projet de thèse.

Je ne pourrai oublier Monsieur Pierre VACHIER, qui malheureusement n'est plus avec nous, pour son soutien et son enthousiasme à participer à cette thèse, qui n'était qu'en phase de projet à l'époque de mon année de Master. Ce travail lui est également dédié.

J'exprime ma reconnaissance à Monsieur Ary BRUAND, Professeur à l'Université d'Orléans, de me faire l'honneur de présider le jury de cette thèse

Je remercie sincèrement Madame Patricia GARNIER, Chargée de Recherches à l'INRA et Monsieur Laurent LASSABATERE, Ingénieur TPE à l'ENTPE, d'avoir accepté de rapporter sur ce sujet de thèse.

Mes remerciements vont particulièrement à mes collègues Mohamed, Abdoukarim et Nasser de m'avoir aidé, soutenu et de n'avoir pas ménagé leurs efforts pour la réalisation de cette thèse.

Merci à Madame Isabelle COUSIN, Directrice de Recherches à l'INRA, d'avoir accepté de faire partie du jury de thèse. Merci aussi à Monsieur Abdourahmane DAHER, Chargé de Recherches au CERD et Directeur de l'Institut des Sciences de la Vie (ISV) du CERD, de son soutien, ses conseils et aussi pour sa disponibilité tout au long de ce travail de thèse. Je le remercie aussi d'avoir accepté d'être membre du jury.

Je tiens à adresser un grand remerciement au Président de la République de Djibouti, Monsieur Ismaël OMAR GUELLEH, pour son soutien sans relâche au développement de la

recherche scientifique au service de la société, mais aussi de nous avoir permis d'utiliser la palmeraie présidentielle pour les expériences scientifiques.

J'adresse un grand remerciement à Monsieur Nabil MOHAMED, Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, de m'avoir appuyé et apporté toute son aide pour la réussite de ce projet. Malgré son emploi du temps chargé, Monsieur Nabil MOHAMED a su m'écouter, me conseiller au cours de cette thèse et a toujours montré son attachement au développement de la recherche scientifique.

Je tiens aussi à remercier Monsieur Jalludin MOHAMED, Directeur Général du CERD, pour toute l'aide et soutien qu'il m'a apportés, notamment pour l'obtention de la bourse doctorale.

Je remercie l'Ambassade de France à Djibouti et le Service de Coopération et d'Actions Culturelles (SCAC) de m'avoir accordé une bourse de formation pour mes séjours à Orléans. Je leur adresse un grand remerciement pour l'appui et le soutien qu'ils m'ont apportés, mais aussi pour l'ensemble des actions de développement qu'ils mènent à Djibouti, notamment au profit de la recherche scientifique.

Je dédie ce travail à toute ma famille, et tout particulièrement à ma mère Mariam qui a tant fait pour moi, ma femme Halkama et mes deux petites filles (Deksan et Norhan), pour leurs patiences et leur soutien sans faille tout au long de cette thèse.

Enfin, je dédie cette thèse à la mémoire de mon très cher père Said Ahmed Warsama (SAW) qui a tant fait, tant sacrifié, pour j'arrive à ce niveau. C'est avec ses conseils, son inestimable aide, son écoute et surtout d'avoir consacré toute sa vie pour que je réussisse. Je n'oublierai pas son énorme implication dans cette thèse, en suivant chacune des différentes étapes, même s'il n'était pas du domaine.

Mon cher Papa, je te dédie ce travail. Cette thèse est pour toi.

Introduction générale.....	11
Chapitre 1. Djibouti : Contraintes et enjeux.	14
1.1 Présentation générale de la République de Djibouti	14
1.1.1 Géographie	14
1.1.2 Climat.....	16
1.1.3 Végétation	21
1.1.4 Ressources en eau	22
1.1.4.a Hydrologie	22
1.1.4.b Exploitation et vulnérabilité de la ressource en eau	28
1.1.5 Ressources en sol	30
1.1.6 Désertification et salinisation des sols	32
1.1.7 L'agriculture.....	33
1.1.8 Insécurité alimentaire et pauvreté.....	34
1.1.9 Le système oasien : moyen de lutte contre l'insécurité alimentaire	36
Chapitre 2. Le palmier dattier et les transferts hydriques dans le système sol-palmier-atmosphère	37
2.1 Le palmier dattier	37
2.1.1 Description systématique du palmier dattier.....	38
2.1.2 Description botanique	40
2.1.2.a L'appareil végétatif.....	40
2.1.3 L'appareil de reproduction	45
2.1.3.a Les spathe et les fleurs.....	45
2.1.3.b Le fruit	47
2.1.4 Répartition géographique	49
2.1.4.a Culture du palmier dans le monde.....	49
2.1.4.b Culture du palmier dattier à Djibouti	50
2.1.5 Les multiples intérêts du palmier dattier	51
2.1.5.a Intérêts socioculturels	51
2.1.5.b Intérêts économiques.....	52
2.1.5.c Lutte contre l'insécurité alimentaire	53
2.1.6 Ecologie du palmier dattier	53
2.1.6.a Climat et cycle végétatif	53
2.1.6.b Sol	54
2.1.6.c Besoins en eau et en éléments nutritifs du palmier dattier.....	54

2.2	Bilan hydrique : les transferts d'eau dans le système sol-palmier-atmosphère	55
2.2.1	L'évapotranspiration	55
2.2.1.a	Evapotranspiration potentielle (ET_0)	56
2.2.1.b	Evapotranspiration maximale ETM	57
2.2.1.c	Evapotranspiration réelle ETR	58
2.2.2	Evapotranspiration : évaporation et transpiration	58
2.2.2.a	Méthode de mesure de l'évaporation	59
2.2.2.b	Méthodes de mesure de la transpiration.....	60
2.2.2.c	Partitionnement de l'évapotranspiration.....	61
Chapitre 3.	Matériels et Méthodes.....	62
3.1	Site de l'étude.....	62
3.2	Caractérisation du sol de la palmeraie	68
3.2.1	Analyse granulométrique	68
3.2.2	Mesure de la masse volumique apparente (ρ_b)	72
3.2.3	Propriétés hydrodynamiques : courbes de rétention en eau et de conductivité hydraulique.....	73
3.2.3.a	Echantillonnage	74
3.2.3.b	Protocole de mesure de la courbe de rétention	74
3.2.3.c	Courbes de rétention	77
3.2.3.d	Estimation de la conductivité hydraulique à saturation K_s	78
3.3	Analyse des eaux d'irrigation	79
3.3.1	Protocole analytique	80
3.4	Données climatiques	83
3.4.1.a	Température.....	84
3.4.1.b	Rayonnement solaire.....	84
3.4.1.c	Humidité relative.....	85
3.4.1.d	Vitesse du vent	85
3.4.1.e	Précipitations.....	85
3.4.1.f	Evapotranspiration potentielle (ET_0)	85
3.5	Caractérisation du système racinaire du palmier dattier.....	86
3.6	Suivi de l'état hydrique du sol	88
3.6.1	Mesure de la teneur en eau volumique du sol par la sonde à neutrons	88
3.6.2	Mesure du potentiel de l'eau dans le sol par tensiométrie	91
3.6.3	Dispositif expérimental	93

3.6.3.a	Installation des tubes d'accès de la sonde à neutrons.....	95
3.6.3.b	Etalonnage de la sonde	96
3.6.3.c	Installation des tensiomètres	102
3.7	Expérimentations	103
3.7.1	Expérience de drainage interne : caractérisation hydrodynamique du sol	104
3.7.2	Expérience en sol nu : caractérisation de l'évaporation	106
3.7.3	Expérience avec palmier dattier : caractérisation du puits racinaire.....	108
3.8	Modélisation.....	109
3.8.1	Présentation du modèle HYDRUS-1D	109
3.8.2	Ajustement des données hydrodynamiques avec RETC	111
3.8.2.a	Ajustement des données expérimentales mesurées au laboratoire avec RETC.....	111
3.8.2.b	Ajustement des données expérimentales mesurées <i>in situ</i> avec RETC	112
3.8.2.c	Critères d'évaluation des ajustements.....	112
3.8.3	Modélisation de l'expérience de drainage interne	112
3.8.3.a	Optimisation des paramètres hydrodynamiques du sol	112
3.8.3.b	Définition du système et paramétrage du modèle	113
3.8.4	Modélisation de l'expérimentation en sol nu	114
3.8.4.a	Définition du système et paramétrage du modèle	114
3.8.5	Modélisation de l'expérimentation avec palmier dattier	115
3.8.5.a	Définition du système et paramétrage du modèle	115
3.8.6	Critère d'évaluation des simulations.....	117
Chapitre 4.	Résultats et discussion	118
4.1	Caractérisation du système racinaire du palmier dattier.....	118
4.2	Expérience de drainage interne : caractérisation hydrodynamique du sol	119
4.2.1	Mesures expérimentales	120
4.2.1.a	Période d'infiltration	120
4.2.1.b	Période de redistribution	121
4.2.2	Modélisation.....	123
4.2.2.a	Ajustement des données $\theta(h)$ avec RETC.....	123
4.2.2.b	Résultats de la modélisation avec les paramètres des ajustements RETC.....	128
4.2.2.c	Optimisation des paramètres.....	129
4.2.2.d	Résultats de la modélisation avec les paramètres optimisés.....	131
4.2.3	Bilan hydrique.....	134
4.3	Expériences en sol nu : caractérisation de l'évaporation.....	136

4.3.1	Mesures expérimentales	136
4.3.1.a	Période d'infiltration	136
4.3.1.b	Période de redistribution	137
4.3.2	Modélisation.....	140
4.3.3	Bilan hydrique.....	143
4.4	Expérience avec le palmier dattier : caractérisation du puits racinaire.....	145
4.4.1	Mesures expérimentales	145
4.4.1.a	Période d'infiltration	145
4.4.1.b	Période de redistribution	147
4.4.2	Modélisation.....	148
4.4.3	Bilan hydrique.....	152
4.4.4	Rôle de la compensation racinaire	155
4.5	Discussion générale	156
Conclusion générale et perspectives.....		160
Bibliographie.....		162
Annexe.....		178

Liste des figures

Figure 1.1 : Carte de la République de Djibouti (source : CERD)	14
Figure 1.2 : Carte des régions administratives de la République de Djibouti (source : CERD)	15
Figure 1.3 : Carte des zones climatiques de la République de Djibouti (source : CERD)	18
Figure 1.4 : Carte de la pluviométrie annuelle de la République de Djibouti (source : CERD)	19
Figure 1.5 : Carte des évapotranspirations potentielles de la République de Djibouti (source : CERD)	20
Figure 1.6 : Carte de la végétation de la République de Djibouti (source : http://www.jpbi-imagine.com/djibgeol de Jean-Paul Berger)	21
Figure 1.7 : Schéma du cycle hydrologique du bassin versant de l’oued d’Ambouli (en millions de m3) (CHA, 1982, cité par Bouh, 2006).	23
Figure 1.8 : Cartes simplifiées de la géologie des systèmes aquifères de Djibouti (Gaba, 2009).	24
Figure 1.9 : Carte des teneurs en chlorure des eaux souterraines en République de Djibouti (source : CERD)	26
Figure 1.10 : Carte de la conductivité des eaux souterraines en République de Djibouti (source : CERD)	27
Figure 1.11 : Diagramme de répartition de l’eau en 2000 (FAO, 2005).	28
Figure 1.12 : Carte de l’évolution des besoins en eau de la République de Djibouti (source : CERD)..	30
Figure 1.13 : Carte des sols de Djibouti (DEPHA : Data Exchange Platform for the Horn Africa) (source : CERD).	31
Figure 1.14 : Carte de cultures dans la République de Djibouti (source : CERD)	34
Figure 1.15 : Carte de l’insécurité alimentaire de la République de Djibouti (FAO, 2012)	35
Figure 2.1 : Figure schématique du palmier dattier (Munier, 1973)	41
Figure 2.2 : Palme d’un palmier adulte	43
Figure 2.3 : Les différents types de racines du palmier dattier (Peyron, 2000)	45
Figure 2.4 : Les différents stades de développement des dattes (Munier, 1973)	48
Figure 2.5 : Aire de distribution traditionnelle du palmier dattier (<i>P. dactylifera</i>) (Gros-Balthazard, 2013)	49
Figure 2.6 : Principaux pays producteurs de dattes (en %) dans le monde (FAO, 2008, citée par Khan et Prathapar, 2012).	50
Figure 2.7 : Carte des cultures du palmier dattier dans la République de Djibouti (source : CERD)	51
Figure 2.8 : Sceau cylindre du scribe Zaganita, vers 2250 av. J.-C, Paris, Musée du Louvre (Michel-Dansac et Caubet, 2013)	52
Figure 3.1 : Localisation du site de l’étude à Damerjog et photo satellite de la palmeraie (Google Earth 2013) (flèche rouge : le palmier étudié)	63
Figure 3.2 : Carte géologique de la région de Djibouti (d’après Daoud, 2008)	64

(Étoile rouge : site de Damerjog, C1 : coupe hydrogéologique, voir Figure 3.3)	64
Figure 3.3. Coupe hydrogéologique C1 (voir Figure 3.2)	65
Figure 3.5 : Schéma du système d'irrigation de la palmeraie.....	67
Figure 3.7 : Masse volumique apparente du sol de la palmeraie	73
Figure 3.8 : Schéma d'une presse de Richards (Musy et Soutter, 1991)	74
Figure 3.9 : Caractéristiques de rétention en eau pour les différentes profondeurs échantillonnées du profil de sol de la palmeraie.....	77
Figure 3.10 : Diagramme ombrothermique de la palmeraie, année 2013.	86
Figure. 3.11 : Sonde à neutrons (Source: Campbell Pacific Nuclear (CPN®), 503 DR Hydroprobe – Notice d'utilisation).	89
Figure 3.12 : Représentation schématisée du déploiement des neutrons autour de la sonde (Source : AIEA, 2003).	90
Figure 3.13 : Schéma de la répartition des tubes d'accès de la sonde et tensiomètre sous le palmier. Le nombre associé à chaque tensiomètre indique sa profondeur d'installation (en m).	94
Figure 3.14 : Relation entre comptage neutronique réduits (CR) et teneur en eau volumique (θ) mesurée le jour de l'installation des tubes d'accès de la sonde à neutrons, par niveaux de profondeur.	97
Figure 3.15 : Relation entre comptage neutronique réduits (CR) et teneur en eau volumique (θ) mesurée le jour de l'installation des tubes d'accès de la sonde à neutrons, par tube d'accès.	98
Figure 3.16 : Droite de régression pour toutes les profondeurs de l'ensemble des tubes d'accès....	100
Figure 3.17 : Droite de régression pour les profondeurs 10 cm et les profondeurs ≥ 20 cm.....	101
Figure 3.18 : Les deux droites de régressions : celle des points de surface (10 cm), des points de profondeurs 20 cm des tubes Dd, Da, Fb et celui de la profondeur 30 cm du tube Dd et celle des autres points de profondeur ≥ 20 cm.....	102
Figure 3.9 : Schéma de la fonction de stress hydrique $\alpha(h)$ utilisé par Feddes (Yang <i>et al.</i> , 2013). ...	116
Figure 4.1 : Photo du système racinaire du palmier (a) et schéma des quatre types de racine du palmier dattier (b) (Peyron, 2000).	119
Figure 4.2 : Carte de distribution de la densité racinaire (interpolation à l'aide du logiciel Surfer®) (a) ; profil moyen de densité racinaire (b).	119
Figure 4.3 : Profil hydrique (teneur en eau, θ , (a) et potentiel total, H (b)) durant la phase d'infiltration. Scénario sans palmier dattier et sans évaporation. T0 : début de l'infiltration, Tf : fin de l'infiltration.....	121
Figure 4.4 : Profil hydrique (teneur en eau, θ , (a) et potentiel total, H (b)) durant la phase de redistribution. Scénario sans palmier dattier et sans évaporation. Tf : fin de l'infiltration.	122
Figure 4.5: Profil hydrique à l'état initial T ₀ et 33 jours après la fin de l'irrigation (T _f +33 jours). Scénario sans palmier dattier et sans évaporation.	123
Figure 4.6 (début): Ajustements avec le modèle de van Genuchten - Mualem des relations $\theta(h)$ obtenues avec les mesures laboratoires et avec les mesures <i>in situ</i> , par profondeur.	124

Figure 4.6 (suite): Ajustements avec le modèle de van Genuchten - Mualem des relations $\theta(h)$ obtenues avec les mesures laboratoires et avec les mesures <i>in situ</i> , par profondeur.	125
Figure 4.6 (fin): Ajustements avec le modèle de van Genuchten - Mualem des relations $\theta(h)$ obtenues avec les mesures laboratoires et avec les mesures <i>in situ</i> , par profondeur.	126
Figure 4.7 : Valeurs de potentiel matriciel (a) et de teneur en eau volumique (b) mesurées <i>in situ</i> à la profondeur 20 cm et simulées avec HYDRUS 1-D avec les paramètres hydrodynamiques obtenues avec ajustement RETC au laboratoire et θ_s fixée 90 % de la porosité.	129
Figure 4.8: Discrétisation du profil de sol grâce au profil de teneur en eau mesuré à la fin de l'infiltration de l'expérience 1.	130
Figure 4.9 (début) : Dynamique hydrique simulée à l'aide d'HYDRUS-1D après optimisation par calage des paramètres hydriques du sol pour les différentes profondeurs instrumentées avec les tensiomètres et la sonde à neutrons ; $T_0= 887,42$ j.....	132
Figure 4.9 (fin): Dynamique hydrique simulée à l'aide d'HYDRUS-1D après optimisation par calage des paramètres hydriques du sol pour les différentes profondeurs instrumentées avec les tensiomètres et la sonde à neutrons ; $T_0= 887,42$ j.....	133
Figure 4.10 : Hauteur de la lame d'eau en surface du sol apportée pendant l'irrigation (mesures <i>in situ</i>) et valeurs de cette même hauteur d'eau simulée avec HYDRUS-1D ; $T_0= 887,42$ j.	134
Figure 4.11 : Drainage cumulé simulé avec HYDRUS-1D pour le sol nu sans évaporation ; $T_0= 887,42$ j.	135
Figure 4.12 : Termes du bilan hydrique du sol pour la période sans palmier et sans évaporation simulés avec HYDRUS-1D.	136
Figure 4.13: Profil hydrique (a) et potentiel total (H) (b) durant la phase d'infiltration. Scénario sans palmier dattier avec évaporation. T_0 : début de l'infiltration, T_f : fin de l'infiltration.	138
Figure 4.14 : Profil hydrique (a) et potentiel total (H) (b) durant la phase de redistribution. Scénario sans palmier dattier avec évaporation. T_f : fin de l'infiltration.	139
Figure 4.15 : Profil hydrique de l'état initial T_0 et profil hydrique 32 jours après la fin de l'irrigation (T_f+32 jours). Scénario sans palmier dattier avec évaporation du sol.	139
Figure 4.16 : Hauteur de la lame d'eau en surface apportée pendant l'irrigation (mesures <i>in situ</i>) et valeurs de cette même hauteur d'eau simulée avec HYDRUS-1D (mesures simulées) ; scénario sans palmier avec évaporation; $T_0= 845,42$ j.....	140
Figure 4.17 (fin): Dynamique hydrique simulée à l'aide d'HYDRUS-1D pour les différentes profondeurs instrumentées avec les tensiomètres et la sonde à neutrons pour le scénario sans palmier avec évaporation du sol ; $T_0= 845,42$ j.	142
Figure 4.18 : Flux de surface réel cumulé pour le sol nu avec évaporation ($T_0= 845,42$ j) (a) et flux de surface réel cumulé pour le sol nu et sans évaporation ($T_0= 885,42$ j) (b) simulé avec HYDRUS-1D..	143
Figure 4.19: Termes du bilan hydrique du sol pour la période sans palmier avec évaporation du sol simulés avec HYDRUS-1D.	144
Figure 4.20: Drainage cumulé pour le sol nu avec évaporation simulé avec HYDRUS-1D ; $T_0= 845,42$ j.	144

Figure 4.21: Profil hydrique (a) et potentiel total (H) (b) durant la phase d'infiltration. Scénario avec palmier dattier. T_0 : début de l'infiltration, T_f : fin de l'infiltration.	146
Figure 4.22: Profil hydrique (a) et potentiel total (H) (b) durant la phase de redistribution. Scénario avec palmier dattier. T_f : fin de l'infiltration.	146
Figure 4.23: Profil hydrique avec palmier dattier (a) et profil hydrique sans palmier (b). T_0 : début de l'infiltration, T_f : fin de l'infiltration.	148
Figure 4.24 : Hauteur de la lame d'eau en surface apportée pendant l'irrigation (mesures <i>in situ</i>) et valeurs de cette même hauteur d'eau simulée avec HYDRUS-1D ; scénario avec palmier ; $T_0= 788,42$ j.	149
Figure 4.25 (début): Dynamique hydrique simulée à l'aide d'HYDRUS-1D pour les différentes profondeurs instrumentées avec les tensiomètres et la sonde à neutrons pour le scénario avec palmier ; $T_0= 788,42$ j.....	150
Figure 4.25 (fin): Dynamique hydrique simulée à l'aide d'HYDRUS-1D pour les différentes profondeurs instrumentées avec les tensiomètres et la sonde à neutrons pour le scénario avec palmier ; $T_0= 788,42$ j.....	151
Figure 4.26: Flux de surface réel cumulé simulé avec HYDRUS-1D pour le sol avec palmier ; $T_0= 788,42$ j.	153
Figure 4.27 : Flux cumulé de l'évaporation en sol avec palmier ($T_0= 788,42$ j) (a) et flux cumulé de l'évaporation en sol sans palmier ($T_0= 845,42$ j) (b).	153
Figure 4.28: Termes du bilan hydrique du sol pour la période avec palmier simulés avec HYDRUS-1D.	154
Figure 4.29 : Flux cumulé potentiel et flux cumulé réel de la transpiration du palmier sans compensation racinaire ; $T_0= 788,42$ j.....	154
Figure 4.30 : Flux cumulé potentiel et flux cumulé réel de la transpiration du palmier avec compensation racinaire ; $T_0= 788,42$ j.....	155
Figure 4.31 : Réponse du flux de sève journalier (cercles pleins) à l'arrêt de l'irrigation et évapotranspiration potentielle (ligne) (Sperling <i>et al.</i> , 2012) ; DOY : jours de l'année.	159

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Prévion de l'impact des changements climatiques sur le cycle hydrologique du bassin d'Ambouli (MHUEAT, 2001).	29
Tableau 1.2 : Répartition des terres en République de Djibouti (MAEPH, 2000)	32
Tableau 2. 1 : Classification du genre <i>Phoenix</i> classé, par Chevalier en 1952 (Zaid, 2002).	39
Tableau 2.1 : Caractéristiques des différents stades de développement des dattes (Daher, 2010).....	48
Tableau 3.1 : Composition moyenne granulométrique du sol de la palmeraie	71
Tableau 3.2 : Masse volumique apparente des deux fosses de la palmeraie	72
Tableau 3.3 : Les différentes pressions appliquées aux échantillons	76
Tableau 3.4 : Conductivité hydraulique à saturation K_s estimée avec ROSETTA ; ρ_b : masse volumique apparente (g/cm^3) ; θ : teneur en eau volumique (cm^3/cm^3)	79
Tableau 3.5 : Conditions opératoires utilisées pour les analyses en chromatographie ionique	81
Tableau 3.6 : Résultats des analyses physico-chimiques de l'eau	82
Tableau 3.7 : Données climatiques de la station météo de la palmeraie (période de janvier 2013 à juin 2014).....	84
Tableau 3.8 : Profondeur des tubes d'accès de la sonde à neutrons.	95
Tableau 3.9 : Comparaison des droites de régressions par tubes (niveau du test de Fisher).	99
Tableau 3.10 : Tensiomètres aux différentes profondeurs autour du stipe du palmier	103
Tableau 3.11 : Les différents apports d'eau durant la phase d'infiltration du 6/6/2014 pour maintenir une lame d'eau en surface	105
Tableau 3.12 : Les différents apports d'eau durant la phase d'infiltration du 25/04/2014 pour maintenir la lame d'eau de 10 cm en surface.	107
Tableau 3.13 : Les différents apports d'eau durant la phase d'infiltration du 27/02/2014 pour maintenir une lame d'eau de 10 cm en surface.....	109
Tableau 3.14 : Discrétisation du profil du sol en 9 matériaux.	114
Tableau 4.1 : Paramètres obtenus pour les différents ajustements réalisés avec RETC sur les mesures réalisés au laboratoire ; R^2 est le coefficient de détermination entre valeurs prédites par RETC et celles observées pour $\theta(h)$	127
Tableau 4.2 : Paramètres obtenus pour les différents ajustements réalisés avec RETC sur les mesures réalisées au laboratoire, avec θ_s fixée à 90% de la porosité ; R^2 est le coefficient de détermination entre valeurs prédites par RETC et observées pour $\theta(h)$	127
Tableau 4.3 : Paramètres obtenus pour les différents ajustements réalisés avec RETC sur les mesures réalisées <i>in situ</i> , avec θ_s fixée à 90% de la porosité ; R^2 est le coefficient de détermination entre valeurs prédites par RETC et observées pour $\theta(h)$	128
Tableau 4.4 : Valeurs des paramètres hydriques optimisés par calage du modèle HYDRUS-1D (méthode inverse) par matériau	131

Liste des photos

Photo 1.1 : Bordure orientale du Rift de Djibouti (source : http://www.jpblog.com/djibgeol , photo de Jean-Paul Berger)	16
Photo 1.2 : Photo d'une oasis à Ambabo (Tadjourah, nord du pays).	36
Photo 2.1 : Palmier dattier, variété Barhi, à Damerjog (Djibouti).....	37
Photo 2.2 : Organes reproducteurs femelles (a) et organes reproducteurs mâles (b) (Daher, 2010)..	46
Photo 2.4 : Les dattes de la variété Medjool	47
Photo 2.5 : Palmeraie installée à proximité de l'oued d'Ambouli (a) et palmeraie installée à proximité d'un puits de forage (b) (Nabil, 2010).	50
Photo 3.1 : Photo de la palmeraie avec les palmiers dattiers et les cultures maraîchères, ici le melon.	66
Photo 3.2 : Profil de la fosse dans la palmeraie	70
Photo 3.3 : Échantillons de sol placés sur la plaque poreuse dans la presse de Richards (Photo C. Labat).....	76
Photo 3.4 : Photo de la station météo installée dans la palmeraie	83
Photo 3.5 : Fosse ouverte sous le palmier pour le comptage racinaire.....	87
Photo 3.6 : Division du profil de la fosse en un maillage de 20 cm de côtés pour le comptage racinaire.....	88
Photo 3.6 : Sonde à neutrons Campbell Pacific Nuclear (CPN®), 503 DR Hydroprobe.....	91
Photo 3.7 : Tensiomètres avec bougie poreuse et tensiomètre électronique SMS 2500S de SDEC France.	93
Photo 3.8 : Le dispositif expérimental (tubes d'accès de la sonde à neutrons et tensiomètres) installé dans la cuvette du palmier dattier étudié.....	94
Photo 3.9 : Installation des tubes d'accès de la sonde à neutrons.....	95
Photo 3.10 : Échantillons de sol prélevés pour l'estimation de la teneur en eau massique le jour de l'installation de tubes.	96
Tableau 3.11 : Les différents apports d'eau durant la phase d'infiltration du 6/6/2014 pour maintenir une lame d'eau en surface.	105
Photo 3.11 : Cuvette sous palmier coupé et couverture du sol avec une bâche pour limiter l'évaporation	106
Photo 3.12 : Cuvette sans palmier en phase d'irrigation.....	107
Photo 3.13 : Cuvette avec palmier en phase d'irrigation.	108

Introduction générale

L'accroissement de la population, la raréfaction des ressources en eaux due aux changements climatiques, l'explosion des prix des denrées alimentaires sont autant de problèmes majeurs auxquelles est confrontée la République de Djibouti. Les sécheresses récurrentes de ces dernières années ont poussé les populations rurales du pays vers la ville-capitale Djibouti. Ces populations vulnérables augmentent la pression sociale déjà forte dans la banlieue périphérique de Djibouti, accroissant un peu plus la vulnérabilité de ces populations déjà si fortement éprouvées. Pour lutter contre la pauvreté et l'insécurité alimentaire, le gouvernement djiboutien a décidé de développer l'agriculture afin de permettre aux populations rurales de subvenir à leurs besoins. C'est dans ce cadre que le gouvernement a mis en place un programme de multiplication de palmier dattier appuyé par les biotechnologies, au Centre d'Etudes et de Recherche de Djibouti (CERD). Ce programme consiste à faire une multiplication par embryogenèse somatique du palmier dattier, plante d'intérêt tant écologique qu'économique. Toutefois, en raison d'un climat aride (température moyenne journalière variant de 22°C à 40 °C, précipitation moyenne annuelle de 220 mm, évapotranspiration moyenne annuelle estimée à 2000 mm et absence d'eau de surface pérenne), la pratique de l'agriculture est très difficile à Djibouti, et le secteur agricole reste économiquement marginal (3,4 % du PIB). Les ressources potentielles en eau se concentrent uniquement dans les nappes profondes, rechargées à l'occasion par de rares pluies diluviennes. L'utilisation de façon non contrôlée de ces nappes a conduit à des problèmes de salinisation secondaire des sols, et par voie de conséquence à l'abandon de terres devenues incultes. Ce problème de salinisation constitue de plus en plus un frein à l'augmentation de la productivité agricole. Il est donc stratégique de pouvoir mieux gérer ces ressources en eau limitées, tout en assurant une culture optimale du palmier dattier. C'est pourquoi, il est important d'étudier l'alimentation hydrique du palmier dattier, dans le but de mettre en place une irrigation raisonnée et ainsi mieux maîtriser le risque de salinisation des sols cultivés de la plaine côtière de Djibouti. Pour mieux comprendre l'absorption d'eau et de nutriments par les palmiers et mieux gérer l'irrigation, nous devons savoir où les racines de palmiers sont actives. Cette connaissance de la zone d'absorption racinaire du palmier dattier est très importante pour la mise en place d'une gestion efficace des apports d'eau et de nutriments pour le palmier dattier.

L'objectif principal du travail de thèse est d'étudier **l'alimentation hydrique du palmier dattier**. Etant donné qu'il n'existe aucune donnée scientifique sur l'alimentation hydrique du palmier dattier dans le contexte pédoclimatique de Djibouti, ce travail de thèse est la première étude scientifique sur ce sujet. Pour cela, il a été nécessaire, d'une part de caractériser les **propriétés hydrodynamiques** du sol, et d'autre part de caractériser l'**évapotranspiration** de la palmeraie. En effet, la connaissance des propriétés hydrodynamiques du sol et de l'évapotranspiration du palmier dattier est importante pour comprendre les transferts hydriques entre le sol, la plante et l'atmosphère. Afin de caractériser le sol, une étude granulométrique et de masse volumique apparente du sol ont été réalisées, ainsi que des mesures de la courbe de rétention du sol, $\theta(h)$. La conductivité hydraulique à saturation a quant à elle été estimée à l'aide d'une fonction de pédotransfert. La modélisation du fonctionnement hydrique du système sol-palmier a permis d'établir le bilan hydrique du palmier dattier et ainsi de caractériser l'évapotranspiration. Faute de n'avoir pas pu acquérir le matériel de mesure de flux de sève pour l'estimation de la transpiration du palmier dattier, nous avons opté pour une solution alternative qui a consisté à faire une expérience sans palmier, une expérience sans palmier et sans évaporation et une expérience avec le palmier dattier, afin de quantifier la part d'eau prise le palmier dattier et ainsi estimer la part de la transpiration dans l'évapotranspiration. Une étude de la caractérisation du système racinaire a également été réalisée pour connaître la distribution spatiale des racines du palmier, ainsi que la profondeur d'enracinement.

Ce manuscrit de thèse se structure en plusieurs chapitres :

- Chapitre 1 : ce premier chapitre fait le point sur les contraintes et les enjeux auxquels est confrontée la république de Djibouti.
- Chapitre 2 : ce deuxième chapitre présente la bibliographie du palmier dattier (description, écologie, répartition géographique et aussi ses multiples intérêts), y compris ses interactions avec le sol et l'atmosphère. Une bibliographie sur la notion d'évapotranspiration est aussi traitée dans ce chapitre, ainsi que les différentes méthodes de partitionnement de celle-ci entre évaporation et transpiration.
- Chapitre 3 : ce chapitre est consacré aux matériels et méthodes utilisés pour répondre aux questionnements de la thèse.
- Chapitre 4 : dans ce chapitre vont être présentés les résultats et leur discussion.

Pour les chapitres 3 et 4, la partie expérimentation est tout à d'abord présentée, suivi de la partie modélisation.

Et enfin, une conclusion générale et les perspectives du sujet d'étude sont présentées.

Chapitre 1. Djibouti : Contraintes et enjeux.

1.1 Présentation générale de la République de Djibouti

1.1.1 Géographie

Entre 10°55' et 12°45' de latitude nord et 41°45' et 43°25' de longitude, la République de Djibouti se situe sur la corne de l'Afrique, entre la Somalie (au sud-est), l'Éthiopie à l'ouest, l'Erythrée au nord et la mer rouge à l'est (Figure 1.1).

D'une superficie de 23 200 Km², Djibouti est l'un des plus petits pays du continent africain. Djibouti possède une façade maritime de 314 km, allant de la mer Rouge à l'océan Indien, en passant par le détroit de Bab el Mandeb.

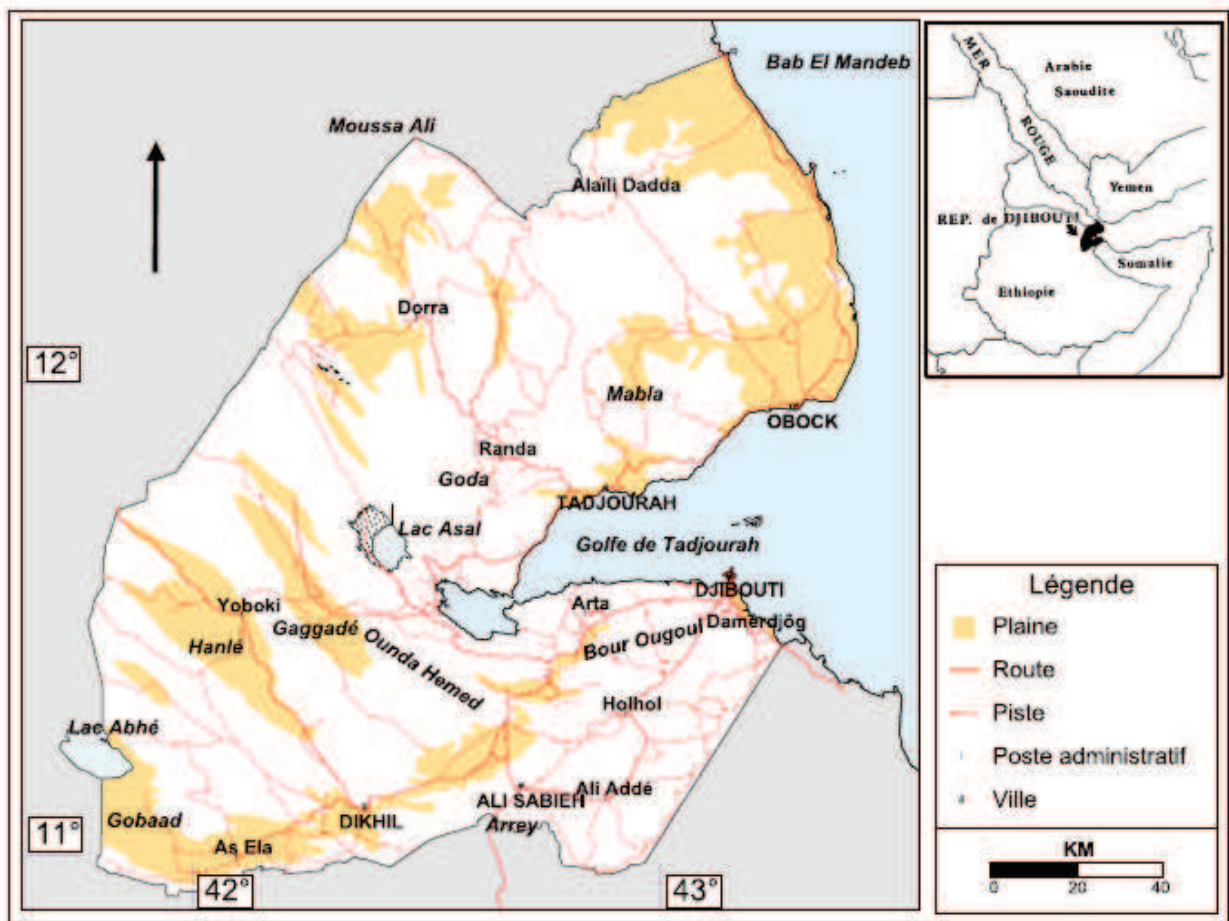


Figure 1.1 : Carte de la République de Djibouti (source : CERD)

La géographie du pays est façonnée par l'activité géologique et sismique de la région. En effet, la République de Djibouti est située dans une région sismiquement active avec l'expansion des plaques continentales africaine et arabique. Ainsi, le volcanisme y est très actif avec des éruptions volcaniques qui recouvrent le territoire de roches effusives (Photo 1.1)

Le relief du territoire djiboutien est caractérisé par une chaîne de montagne au nord culminant à 1700 mètres, par une vaste plaine sablonneuse au nord-est, par des dépressions séparées par des plateaux au sud et par une zone volcanique à l'ouest du Golfe de Tadjourah.

La République de Djibouti se divise en 6 régions administratives : Djibouti, Arta, Dikhil, Ali-Sabieh, Tadjourah et Obock (Figure 1.2).

En 2013, Djibouti comptait 872 932 habitants avec une densité de 35 hab. /km². Plus de 58 % de la population se concentre dans la ville-capitale Djibouti, 70,6% vivent en milieu urbain et 15 % vit dans les zones rurales (Banque Mondiale, 2013). L'urbanisation galopante entraîne une augmentation des bidonvilles à la périphérie de la ville de Djibouti. Le taux d'accroissement annuel de la population est de 2,8 %.



Figure 1.2 : Carte des régions administratives de la République de Djibouti (source : CERD)



Photo 1.1 : Bordure orientale du Rift de Djibouti (source : <http://www.jpb imagine.com/djibgeol>, photo de Jean-Paul Berger)

1.1.2 Climat

La République de Djibouti a un climat de type tropical aride. On distingue généralement deux saisons : une saison fraîche et une saison chaude. La saison fraîche dure d’octobre à avril avec des températures douces entre 22 et 30 °C. Durant cette période, le territoire Djiboutien est soumis aux alizés du nord-est qui ramènent un peu de fraîcheur. De mai à septembre, c’est la saison chaude, avec des températures de 30 à 40 °C (dans certains endroits, ces températures peuvent monter à 50 °C). Au cours de cette période chaude, un vent de sable chaud et sec nommé *Khamsin* souffle pendant une cinquantaine de jours.

Le climat régional est principalement contrôlé par le déplacement saisonnier selon la direction nord-sud de la Zone Intertropical de Convergence, qui régule les différentes saisons (Camberlin et *al.*, 1994). La distinction des saisons se fait non seulement à partir des températures, mais aussi de la position du front intertropical (Ferry et *al.*, 1999).

En 1982, la mission de Coopération Hydrogéologique Allemande (CHA) a défini 5 régions climatiques dans le pays (Bouh, 2006), selon l’analyse des précipitations (Figure 1.3). Les précipitations moyennes annuelles sont faibles (220 mm en moyenne) et varient de 50 mm au nord-est (la zone des plaines côtières) à 340 mm au centre-nord du pays (Figure 1.4). La pluviométrie dans cette région est due à la topographie, car celle-ci est montagneuse (on y

trouve les monts Mabla et Goda). La pluviométrie est beaucoup moins élevée que celle observée dans d'autres régions de l'Afrique située à la même latitude, probablement à cause de la topographie locale et régionale (CHA, 1982, cité par Bouh, 2006). Il n'existe pas à proprement dit une saison de pluie à Djibouti, car les pluies sont réparties sur l'ensemble du territoire en fonction de l'altitude et de l'influence marine. Les pluies tombent de façon orageuse et erratique. Ces fortes intensités orageuses, combinées à une couverture pédologique peu développée et à l'absence de couvert végétal, entraînent un fort ruissellement, provoquant des inondations notamment dans la capitale Djibouti, qui a connu 4 inondations meurtrières en 20 ans (1989, 1994, 2004 et 2005). En 1994, dans la capitale, il est tombé plus de 360 mm en deux jours, de qui a provoqué d'énormes pertes humaines et des dégâts sur les infrastructures du pays.

L'évapotranspiration potentielle moyenne varie de 1700 mm/an sur la façade côtière (est) et à 2500 mm/an à l'intérieur des terres, dans les zones montagneuses de l'ouest (Figure 1.5).

Selon le FAO, l'évapotranspiration moyenne est de 2000 mm/an (FAO, 2005). Cette forte évapotranspiration combinée à une faible pluviosité limite fortement toute culture pluviale.

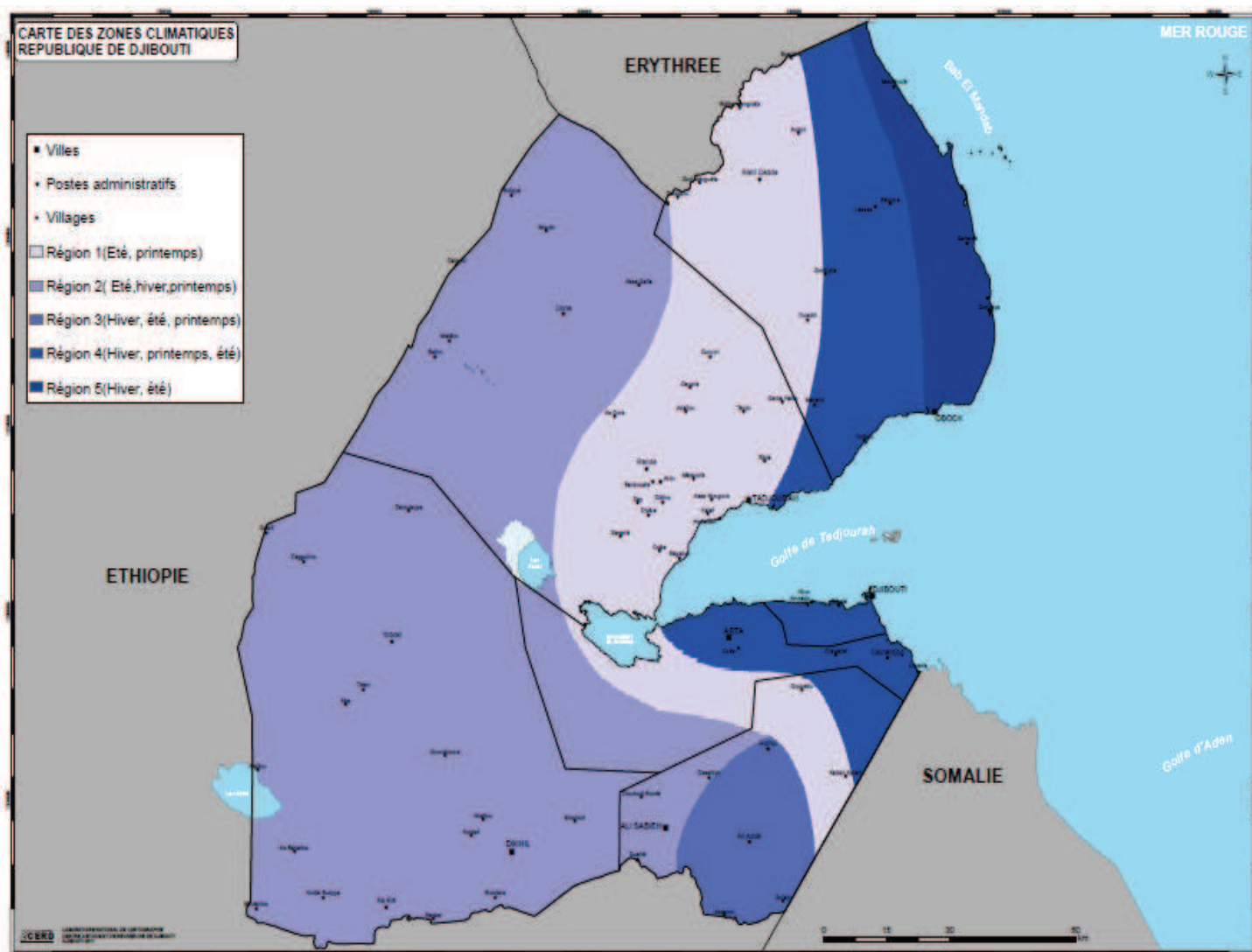


Figure 1.3: Carte des zones climatiques de la République de Djibouti (source : CERD)

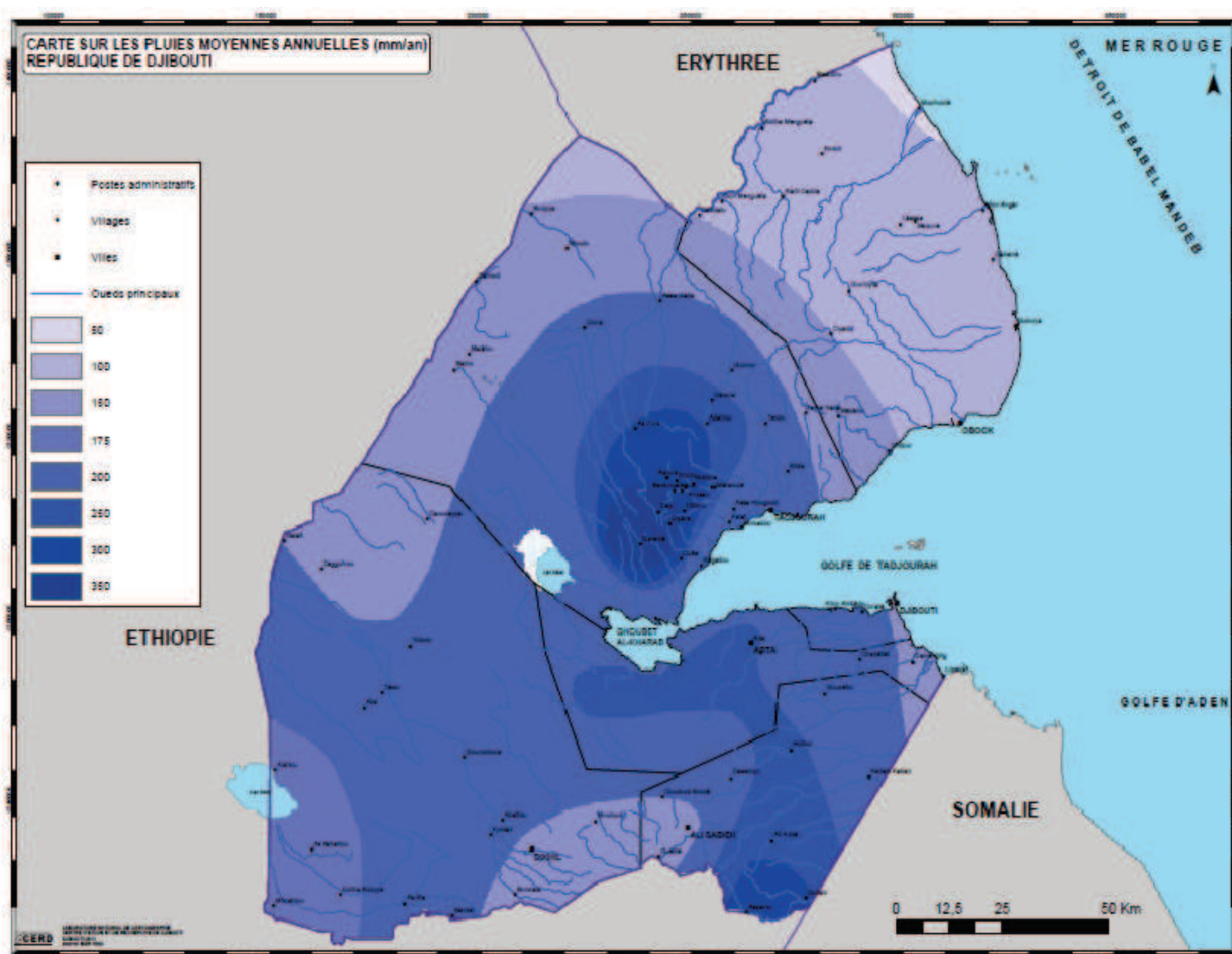


Figure 1.4 : Carte de la pluviométrie annuelle de la République de Djibouti (source : CERD)

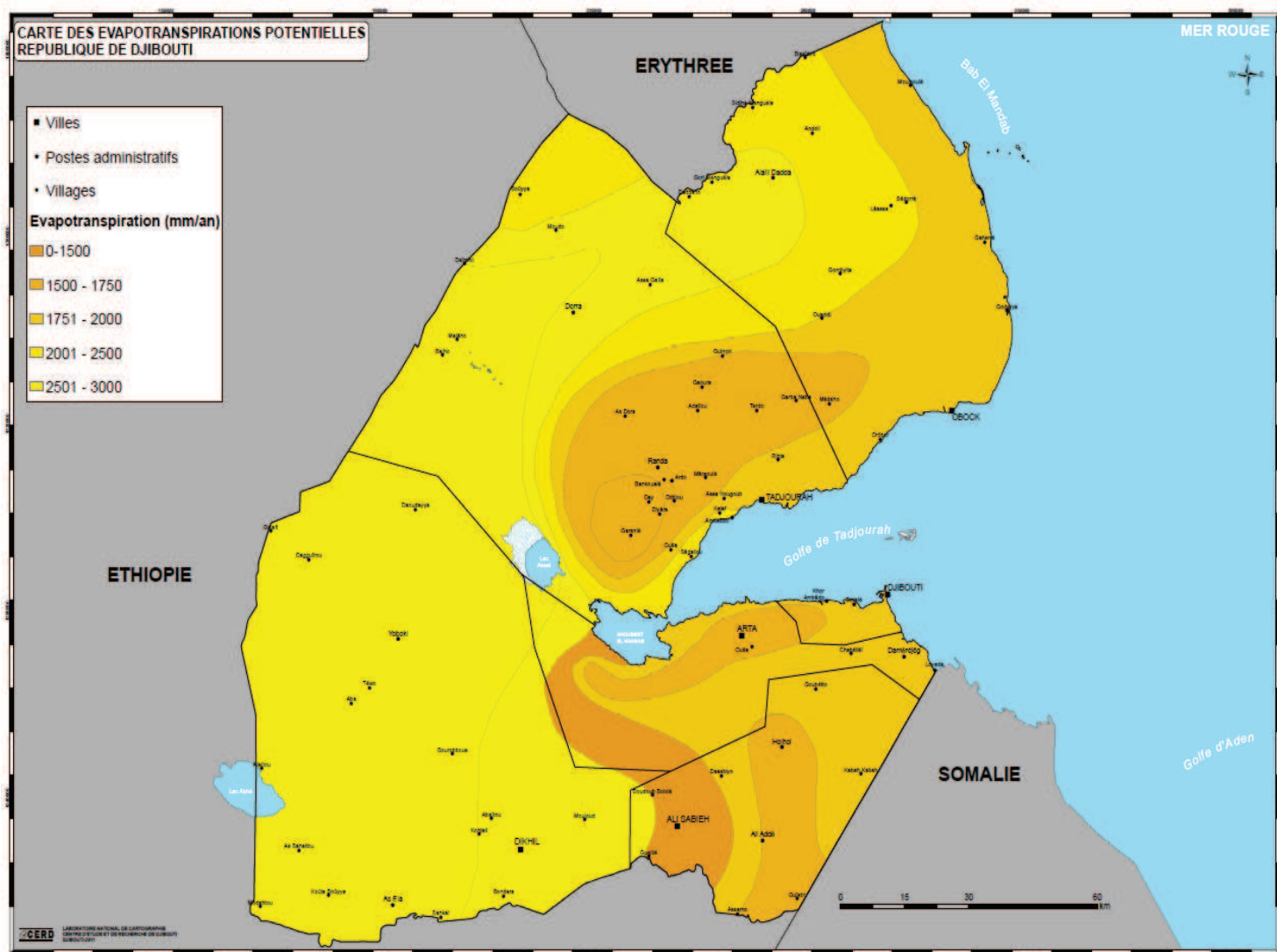


Figure 1.5 : Carte des évapotranspirations potentielles de la République de Djibouti (source : CERD)

1.1.3 Végétation

Malgré sa faible superficie et son aridité, Djibouti a une importante diversité floristique, qui reste cependant fragile et menacée. En 1991, Djibouti disposait de 2000 hectares de forêts principalement situés dans la région montagneuse du Day, dans la région de Randa, et de 68000 hectares de terres boisées (Figure 1.6) (CNE, 1991, cité par MHUEAT, 2008). L'acacia est de loin la plante la plus abondante à Djibouti et constitue un élément important pour l'alimentation du cheptel (Audru *et al.*, 1993). Elle est également utilisée pour le bois de chauffage, le bois de charbon, l'extraction de gomme, de résine et de médicaments dans la médecine traditionnelle. Un exemple emblématique est la dégradation de la forêt du Day, qui a perdu 88 % de ses genévriers (*Juniperus*) au cours des deux derniers siècles, dont 20 % en moins de 50 ans (CNE, 1991, cité par MHUEAT, 2008). Les fortes pressions exercées par l'homme sur l'environnement (déforestation) accélèrent la dégradation des sols (érosion hydrique et éolienne) (MHUE, 2013).

**CARTE DE VÉGÉTATION
SIMPLIFIÉE DE LA
RÉPUBLIQUE DE
DJIBOUTI**



D'après J. Audru, J. César et J-P. Lebrun

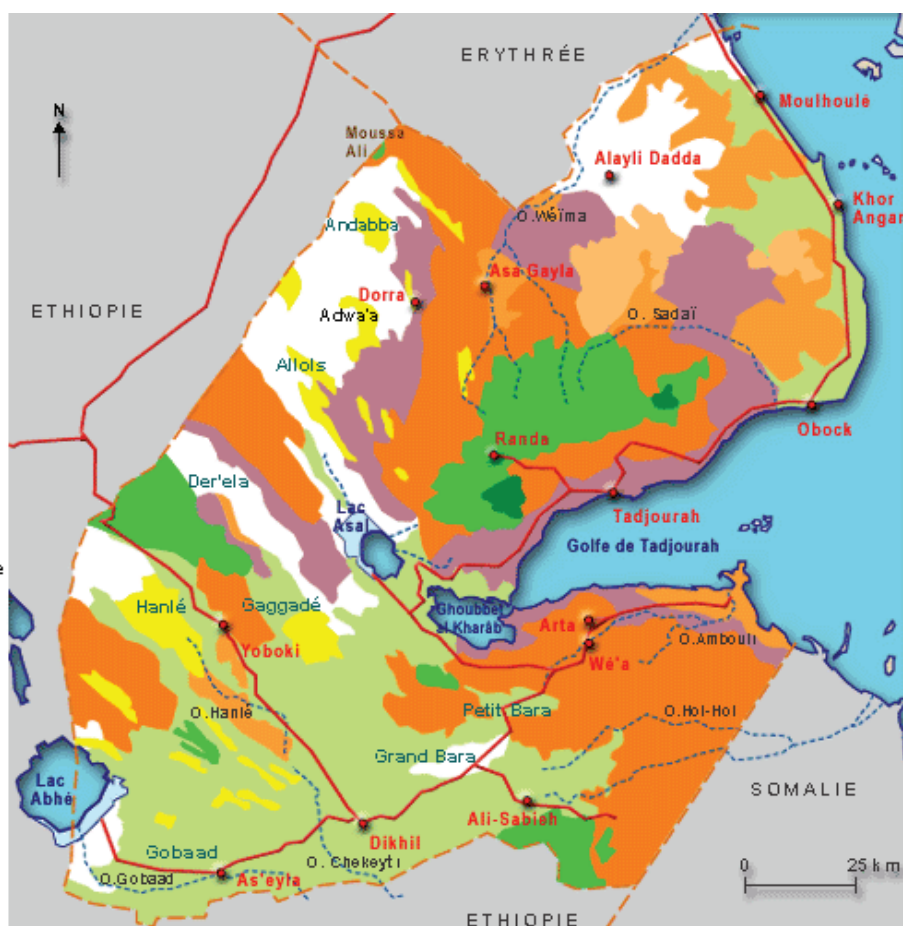


Figure 1.6 : Carte de la végétation de la République de Djibouti (source : <http://www.jpbi-imagine.com/djibgeol> de Jean-Paul Berger)

1.1.4 Ressources en eau

1.1.4.a Hydrologie

Du fait des conditions climatiques difficiles (faibles précipitations, forte évaporation), les eaux de surface sont quasi inexistantes. Les seuls cours d'eau de surface sont des oueds à écoulement intermittent. Le système hydrographique de Djibouti se divise en deux réseaux :

- Le réseau drainé vers la mer rouge (45 %) est constitué par les plateaux sud du pays et les secteurs montagneux au nord et au sud du golfe de Tadjourah (FAO, 2005).
- Le réseau drainé vers les plaines de l'ouest du pays (55%) (FAO, 2005).

Selon la FAO, les ressources en eau renouvelables du pays s'élèvent à 300 millions m³/an (FAO, 2005).

Selon une étude du cycle hydrologique à Djibouti menée par la Coopération Hydrogéologique Allemande (CHA, 1982, cité par Bouh, 2006), la proportion d'évaporation serait de l'ordre de 83% (Figure 1.7). Ceci entraîne une perte importante d'eau, autrement dit une forte quantité d'eau non disponible pour les plantes et pour la recharge des nappes souterraines.

Le ruissellement, estimé à 6 % des précipitations, représente un volume d'eau important qui est évacué vers la mer. On estime entre 8 à 12 millions de mètre cubes d'eau en moyenne l'eau évacuée par les oueds vers la mer (Jalludin et Razack, 2004). Dans ces conditions, l'infiltration efficace ne représente que 5 % des précipitations. Ces faibles infiltrations contribuent à la recharge des systèmes aquifères de Djibouti.

Les eaux souterraines constituant la principale source d'alimentation en eau potable de Djibouti, de nombreuses études hydrogéologiques ont été menées sur ces systèmes aquifères. Plus de 98 % de l'approvisionnement en eau dépend des eaux souterraines des aquifères volcaniques et sédimentaires, dont la recharge est limitée en raison des caractéristiques hydrogéologiques du pays (ISERST, 1984-1992).

Jalludin et Razack (1999, cité par Gaba, 2009) ont identifié trois catégories d'aquifères (Figure 1.8) :

- les aquifères à nappe inféro-flux : situées dans les couches perméables sous les oueds. Elles sont rechargées lors des crues des périodes pluvieuses, et elles alimentent les aquifères des formations volcaniques sous-jacentes à travers les couches perméables

des basaltes (Bouh, 2006). Ces aquifères sont considérées comme les ressources les plus fiables, car facilement accessible et de qualité, adaptée à l'irrigation.

- Les aquifères continus : existant dans toute la partie ouest du pays et au sud entre la ville de Djibouti et Loyada (à la frontière de la Somalie). Ce sont des aquifères volcaniques.
- Les aquifères discontinus : aquifères des dépôts sédimentaires secondaires et des roches volcaniques anciennes.

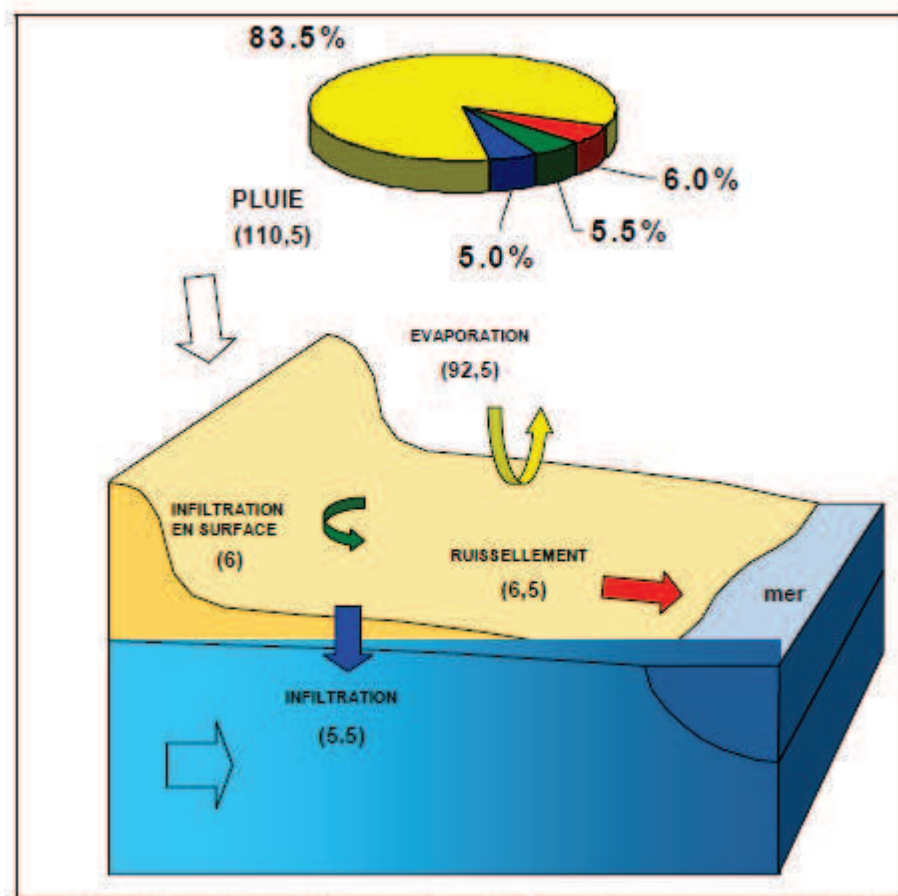


Figure 1.7 : Schéma du cycle hydrologique du bassin versant de l'oued d'Ambouli (en millions de m³) (CHA, 1982, cité par Bouh, 2006).

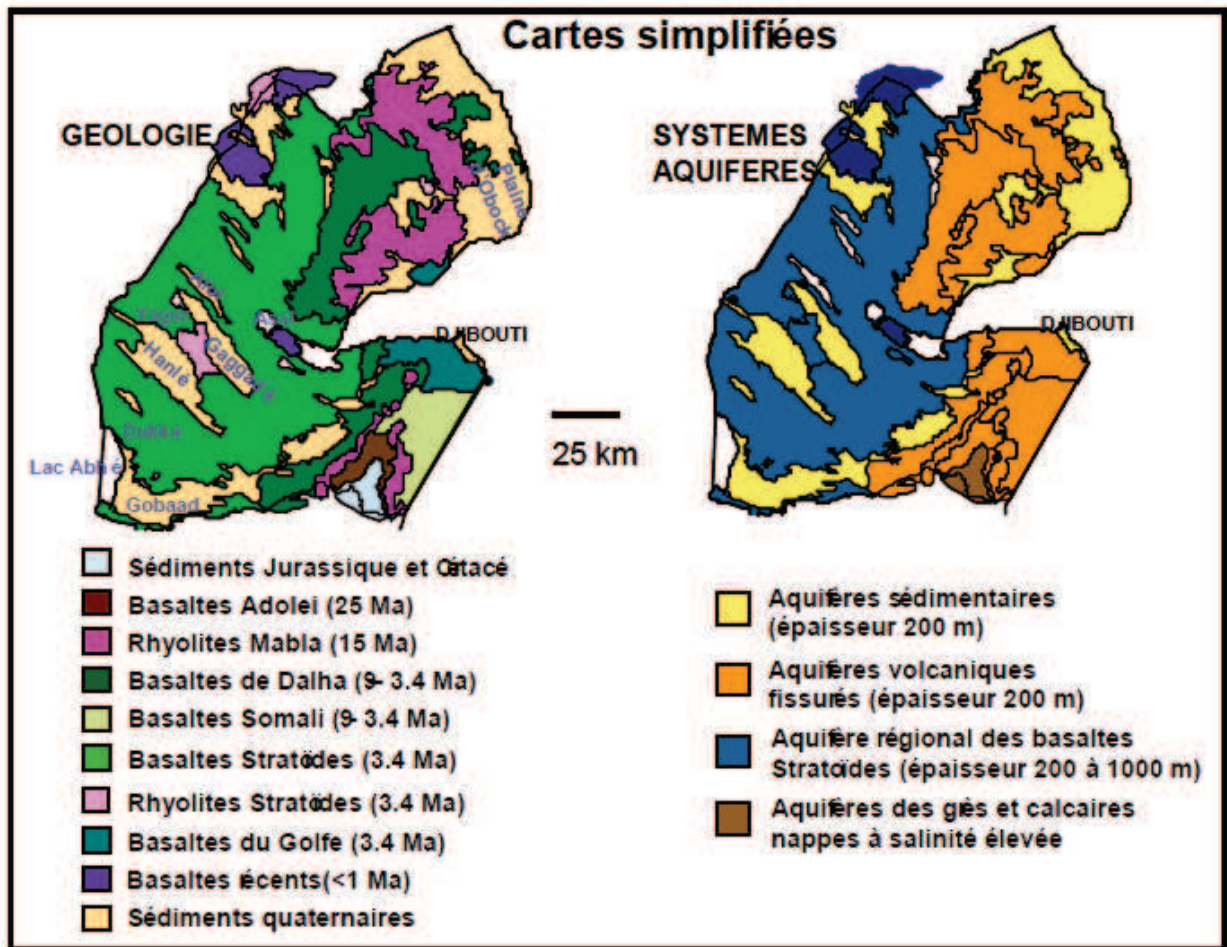


Figure 1.8 : Cartes simplifiées de la géologie des systèmes aquifères de Djibouti (Gaba, 2009).

Le volume exploitable de la nappe de Djibouti est de 10 à 20 millions de m³/an, mais cette ressource est fragile, car elle est soumise à la surexploitation et aux aléas climatiques. En effet, plus de 95 % de l'alimentation de l'eau potable de la ville de Djibouti est assurée par l'exploitation de ces eaux souterraines. Le contexte climatique aride, combiné à la surexploitation, provoque une détérioration de la qualité chimique des eaux des nappes (Bouh, 2006).

Au regard de son importance, plusieurs études isotopiques et hydrochimiques des eaux de l'aquifère de Djibouti ont été menées par de nombreux auteurs (Fontes *et al.*, 1980 ; CHA, 1982, cité par Bouh, 2006 ; Adam, 1984 ; Fontes, 1987 ; Gamal-Eldin, 1988 ; Houssein et Jalludin, 1996 ; Bouh, 2006 ; Gaba, 2009).

Depuis 1985, le Centre d'Etudes et de Recherches de Djibouti (CERD) suit l'évolution chimique des eaux de l'aquifère, dans le cadre d'une optimisation de la gestion de ce dernier.

Ces suivis chimiques ont montré un enrichissement en chlorure de sodium provoquant une augmentation de la conductivité électrique et de la minéralisation totale entre 1962 et 2003 (Bouh, 2006). Ce dernier a montré, dans une étude isotopique de l'aquifère de Djibouti, que l'acquisition de la salinité chlorurée des eaux souterraines était en partie due à un mélange avec de l'eau de mer actuelle, mais également avec une eau de mer plus ancienne. L'analyse des teneurs en chlorures des eaux souterraines du pays révèle que les eaux de Djibouti ont au minimum 500 mg/L, soit deux fois plus de chlorures que la norme autorisée par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) (Figure 1.9). Ces valeurs peuvent monter à plus de 1500 mg/L dans les eaux de l'aquifère de la ville de Djibouti, du fait de la surexploitation (Figure 1.10). La conductivité électrique des eaux de l'aquifère de Djibouti est de l'ordre de 1500 à 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figure 1.10).

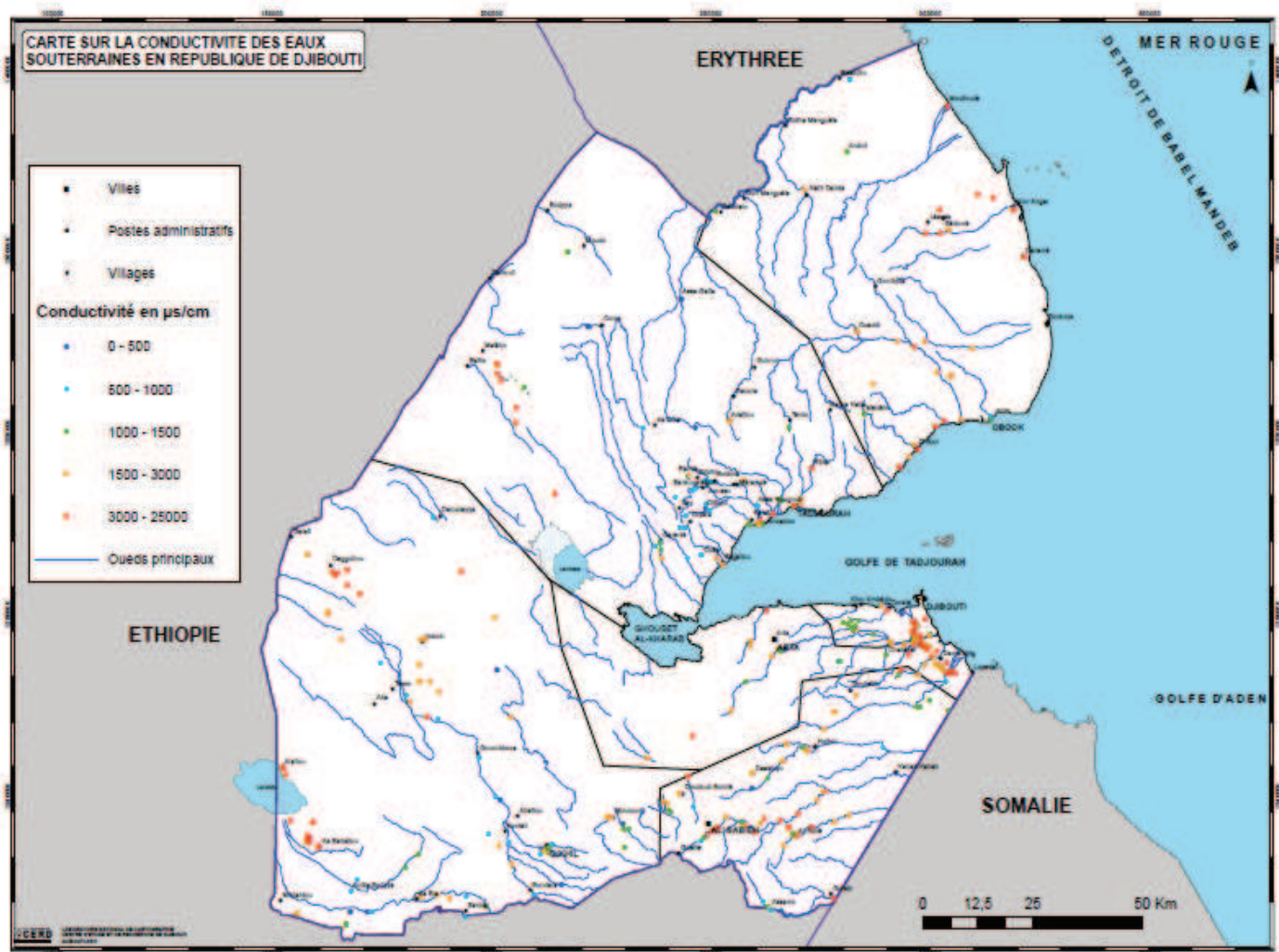


Figure 1.10 : Carte de la conductivité des eaux souterraines en République de Djibouti (source : CERD).

1.1.4.b Exploitation et vulnérabilité de la ressource en eau

Le climat aride impacte la qualité et la quantité d'eau disponible, pour la population, le bétail et l'agriculture. Dans les années 2000, les besoins en eau s'élevaient à 19 millions de m³, dont 13 % pour l'irrigation, 3 % pour l'élevage et 84 % destiné à la consommation humaine (Figure 1.11) (FAO, 2005).

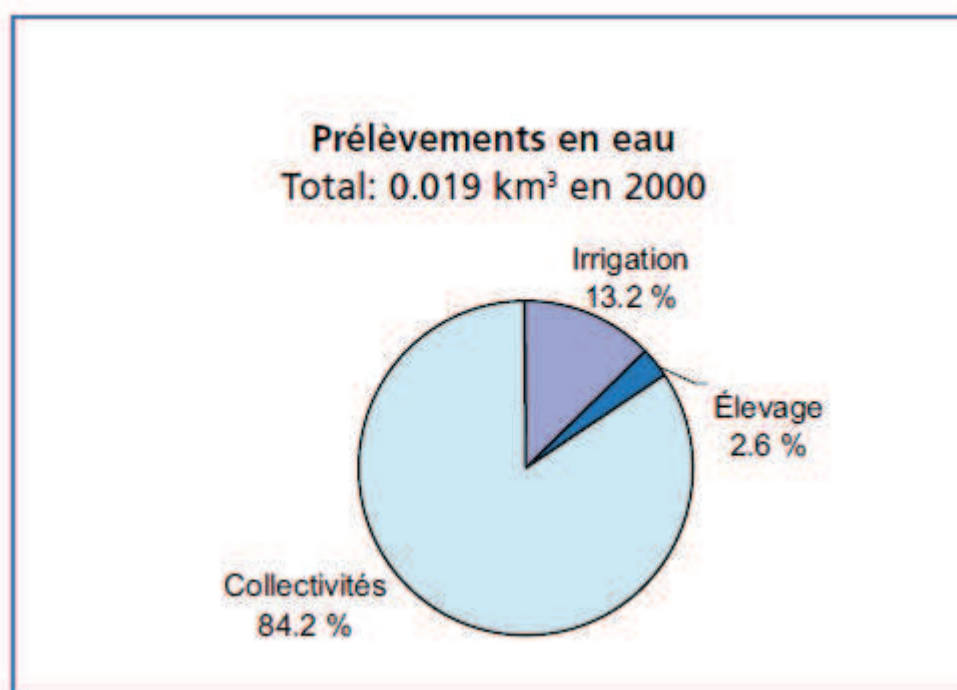


Figure 1.11 : Diagramme de répartition de l'eau en 2000 (FAO, 2005).

En 2015, avec l'accroissement de la population, les besoins en eau ont été estimés à plus de 29 millions de m³ (FAO, 2005). A Djibouti ville, les besoins en eau sont estimés à plus de 17 millions de m³ et le déficit est estimé à plus de 5 millions de m³ par an. En 20 ans, les besoins en eau ont quasiment doublés dans la ville Djibouti, alors qu'ils restent stables pour les autres régions, du fait de l'exode rural, entre autres (Figure 1.12).

Depuis le début de son exploitation en 1962, la nappe de Djibouti a vu sa concentration de chlorure multipliée par trois, poussant à l'abandon de l'exploitation de certains forages (Houssein et Jalludin, 1995). Plus de 50 % des forages de Djibouti enregistrent plus de 900 mg/L et parfois même jusqu'à 1500 mg/L (cf : Figure 1.9) (FAO, 2005). Cette ressource en eau est également menacée par les changements climatiques. En effet, à l'horizon 2050, les précipitations vont diminuer de 4,4 % à 11 % avec une augmentation des températures de 1,7 °C à 2,1 °C, affectant ainsi les volumes d'eau du cycle hydrologique (Tableau 1.1)

(MHUEAT, 2001). La baisse de l'infiltration va avoir un impact sur la recharge et ne fera qu'accentuer le déficit hydrique.

Tableau 1.1 : Prévion de l'impact des changements climatiques sur le cycle hydrologique du bassin d'Ambouli (MHUEAT, 2001).

Paramètre hydro-climatologique	Situation actuelle	Impacts à l'horizon 2050	
		<i>minimum</i>	<i>maximum</i>
	<i>Volume en millions m³</i>	<i>Volume en millions m³</i>	<i>Volume en millions m³</i>
P	110.9	106.0	98.7
ETR	92.6	88.5	82.4
R	6.5	6.4	5.9
I.n.	5.6	5.3	4.9
I.bv.	6.2	5.8	5.4

P: pluie; ETR : évapotranspiration ; R : ruissellement ; I.n. : infiltration; I.bv.: bassin versant

Pour l'irrigation, les eaux des nappes alluviales sont largement utilisées du fait de leur faible salinité, mais reste toutefois limitées, car leur qualité se dégrade rapidement s'il n'y a pas de crue notamment en période de sécheresse. Le potentiel d'irrigation est estimé à 2400 ha et permet à une grande partie des populations rurales de vivre de petites parcelles agricoles (FAO, 2005) (Tableau dans Annexe : Statistique sur l'irrigation).

La seule forme possible d'agriculture à Djibouti est l'agriculture sous irrigation. Cependant, la ressource en eau n'est pas le seul frein au développement de l'agriculture à Djibouti. Le sol, autre ressource naturelle, tout aussi vulnérable, nécessite une bonne gestion et une bonne connaissance pour une agriculture durable.

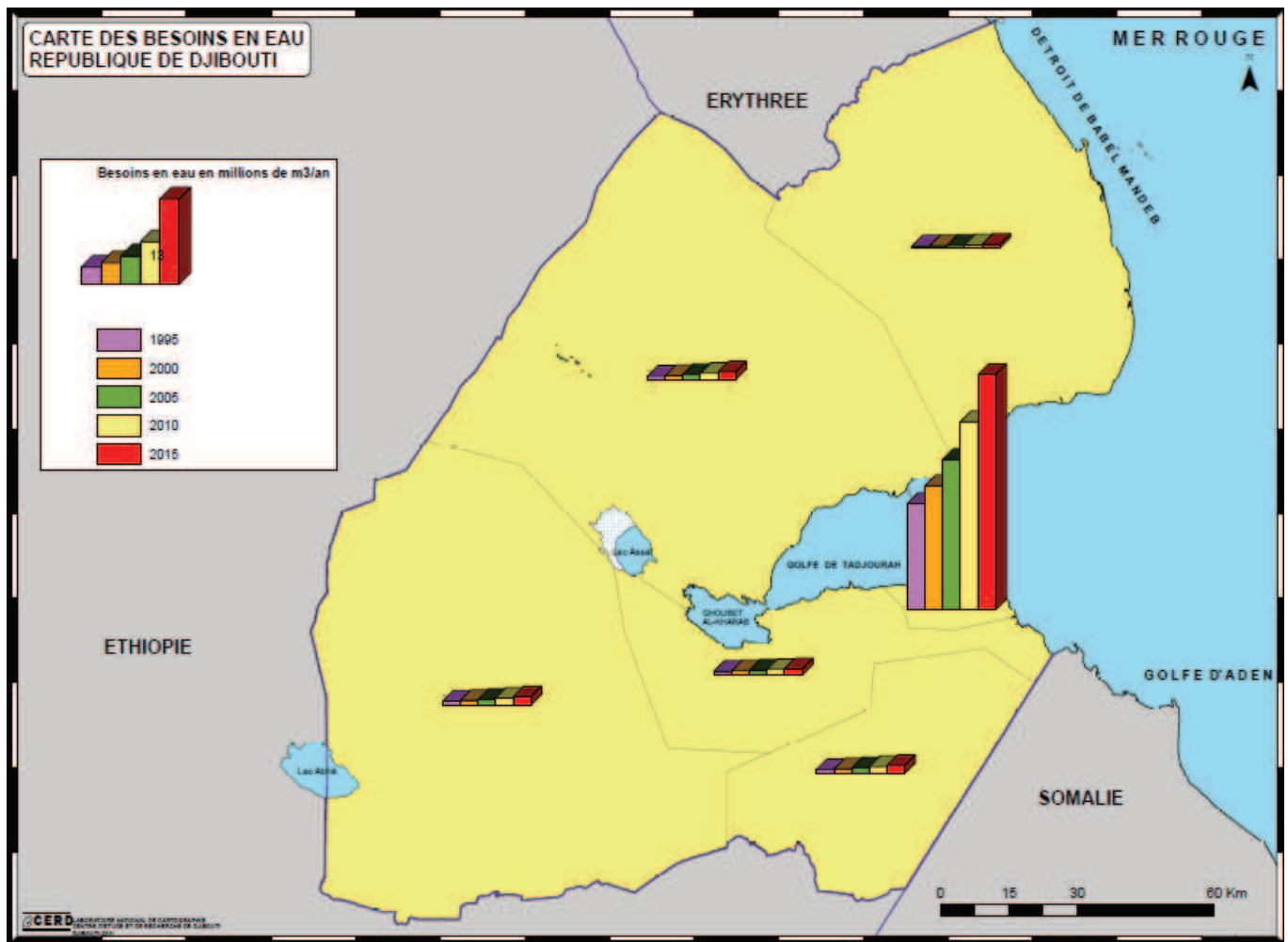


Figure 1.12 : Carte de l'évolution des besoins en eau de la République de Djibouti (source : CERD)

1.1.5 Ressources en sol

Il existe peu de données sur les sols de Djibouti, contrairement aux données géologiques. En général, les sols de Djibouti sont peu évolués, du fait de l'aridité du climat. Ils sont en général peu épais, très pauvres en matières organiques et très caillouteux. Il n'existe qu'une seule étude des sols de Djibouti issue d'une étude morpho-pédologique faite par Goebel (1982). Selon cette étude, il existe trois types de sol à Djibouti :

- Les sols d'apport : ces sols d'apport, très hétérogènes, sont en général des colluvions formés par les dépôts des cônes de déjection et des sols de dépôts alluviaux stratifiés, avec une texture limono-argileuse plus fine que celles des dépôts colluviaux. Les sols alluvionnaires se retrouvent le plus souvent dans les plaines intérieures et les dépressions endoréiques, où ils sont issues de matériaux déposés par les oueds.

- Les sols en place : ces sols sur substratum géologique comportent trois catégories : les sols bruns, les lithosols et les sables calcaires coralliens. Les sols bruns sont issus du basalte et recouvrent en grande partie le territoire djiboutien. Les lithosols sont des sols issus des rhyolites et sont plus acides et pauvres en éléments fins que les sols issus du basalte. Enfin, les sables calcaires coralliens sont issus de l'altération de plateaux madréporiques (Figure 1.13).
- Les sols halomorphes : ces sols, soumis à une nappe d'eau salée, représentent 5 % du territoire.

Les terres cultivables ne représentent que le quart de la superficie du pays (MAEPH, 2000). Les sols cultivés sont estimés à 10500 ha soit 0,6 % de la superficie du pays (Tableau 1.2) (MAEPH, 2000). Ces sols sont vulnérables et sont menacés par les changements climatiques (sécheresse) et les mauvaises pratiques agricoles (salinisation).

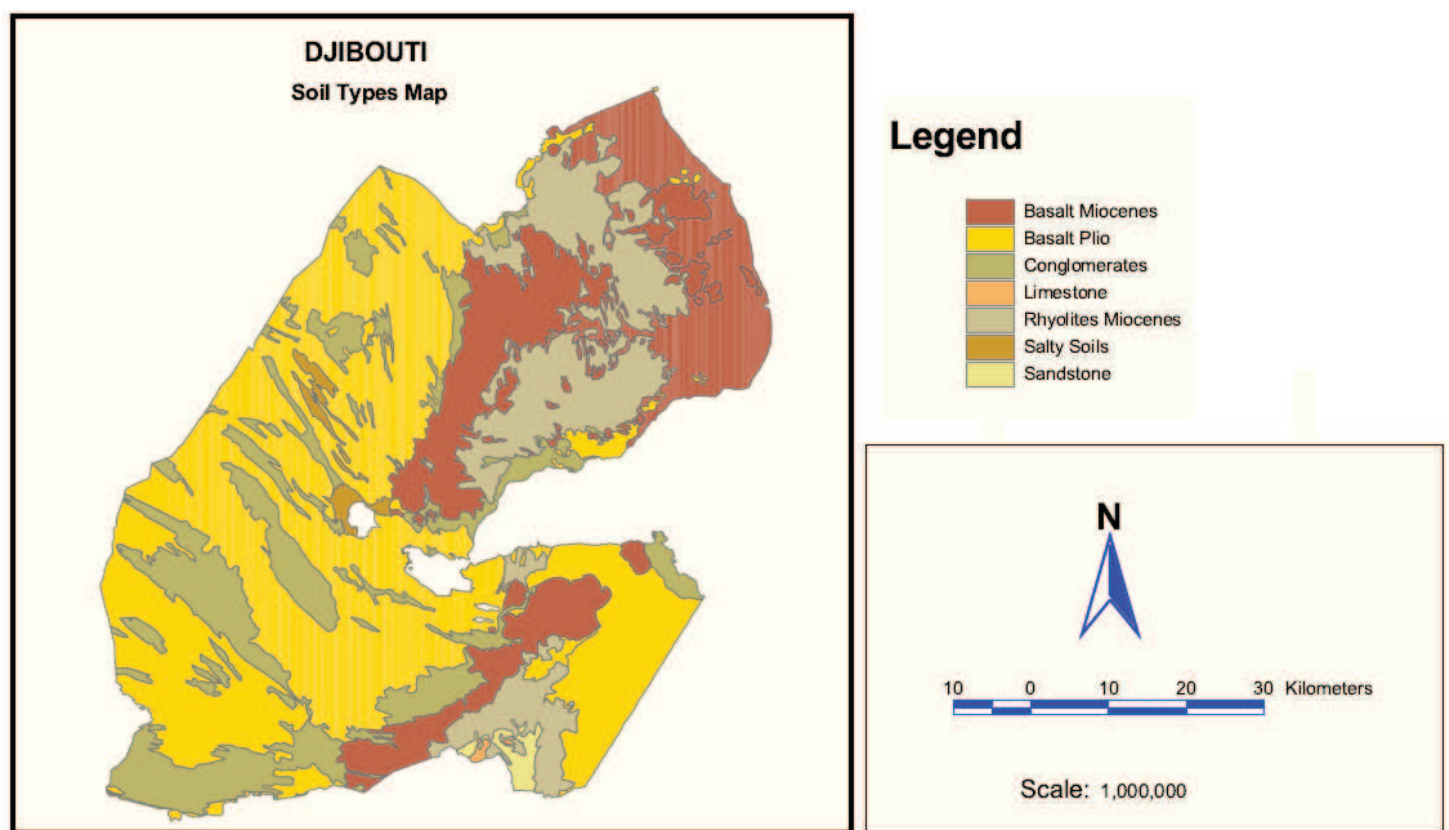


Figure 1.13: Carte des sols de Djibouti (DEPHA : Data Exchange Platform for the Horn Africa) (source : CERD).

Tableau 1.2 : Répartition des terres en République de Djibouti (MAEPH, 2000)

Affectation des terres	Superficies en km ²	Superficies en ha	% de la surface terrestre
superficie totale	23200	2320000	
eaux territoriales et lacs	5208	520800	
superficie totale terrestre	17992	1799200	100
terres à vocation pastorale	16987,4	1698740	94,4
terres à vocation agricole	105	10500	0,6
terres marginales (terres halomorphes, dénudées et falaises)	899,6	89960	5,0

1.1.6 Désertification et salinisation des sols

Selon la Convention des Nations Unies sur la Lutte contre la Désertification (CNULD), *«la désertification est à la fois la cause et la conséquence de la pauvreté. C'est la pauvreté qui pousse les habitants des zones sèches à exploiter au maximum les terres, les conduisant à privilégier leur survie à court terme»*. La désertification est le résultat de facteurs humains et climatiques et menace la fertilité des terres arables et par voie de conséquence accentue la paupérisation des populations rurales. Selon les espaces géographiques, la désertification se manifeste différemment : par exemple, en zone pastorale, elle se manifeste par la dégradation des sols et de la végétation. L'aridité du climat est un facteur aggravant la désertification. En effet, les longues périodes de sécheresse provoquent la disparition de la végétation, exposant ainsi le sol à l'érosion éolienne et hydrique. Sous l'effet des vents et des pluies torrentielles, les sols sont décapés diminuant un peu plus leur fertilité. L'un des exemples les plus frappants est celui de la plaine de Hanlé (au sud du pays) où l'érosion hydrique due aux crues des oueds a créé des ravins de 3 mètres de profondeur sur plus de 20 km (MAEPH, 2000). Les activités anthropiques représentent une cause importante de la désertification, notamment le surpâturage qui est dû, entre autres, à la sédentarisation des éleveurs nomades. Les mauvaises pratiques agricoles accentuent également la désertification. En effet, les installations illégales de parcelles agricoles dans les lits majeurs des oueds modifient l'écoulement des eaux provoquant ainsi le décapage de milliers de mètres cubes de terres fertiles par sapement des berges. On estime la perte de 4 à 5 % du capital sol par an dans les plaines de Gobaad et du Hanlé (MAEPH, 2000). Pour répondre à la demande croissante de logements dans la ville de Djibouti, des milliers de mètres cubes de terres fertiles (limons et sables) sont extraits des lits d'oued, diminuant l'infiltration de l'eau nécessaire à la recharge de la nappe. Combinée aux déboisements, la baisse de l'infiltration provoque des écoulements de surface importants, engendrant des inondations lors des fortes pluies.

La salinisation des sols est une contrainte majeure à Djibouti et provoque la désertification des sols par stérilisation. Les pratiques agricoles et la mauvaise gestion des eaux d'irrigation chargées en sel en sont les principales causes. Dans la plaine côtière d'Attar (au sud-est de la ville de Djibouti), 32,2 % des exploitations agricoles ont été abandonnées depuis 1987 à cause de mauvaises pratiques d'irrigation qui ont provoqué la salinisation des sols (MAEPH, 2000).

1.1.7 L'agriculture

L'agriculture à Djibouti doit faire face à des nombreuses contraintes notamment les conditions d'aridité, les faibles ressources en eau, mais également le manque de traditions agricoles, du fait du caractère nomade et pastoral de la majeure partie de la population. De ce fait, elle ne représentait que 4,12 % du PIB du pays en 2005 (DISED, 2005). Toutefois, ces dernières années, le gouvernement a mis l'accent sur le développement de l'agriculture, en mettant en place des programmes d'aide. L'agriculture djiboutienne est largement tributaire de l'irrigation du fait de l'aridité du climat. On estime que le potentiel des ressources en eau des nappes superficielles (nappes à inféro-flux) ne peut assurer la mise en valeur que de 2000 ha des 10500 ha de surfaces cultivables du pays. Actuellement, il n'y a que 700 ha de terres qui sont réellement cultivés (MAEPH, 2007). Le système oasien représente la principale pratique agricole, avec des jardins de 0,5 ha de superficie, en moyenne. En 2007, selon le Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et des ressources Halieutiques (MAEH), la production agricole en fruits et légumes était de 6000 tonnes, soit 10 à 15 % des besoins du pays. Les principales cultures sont les cultures maraichères (tomates), le fourrage, les vergers et la culture du palmier (Figure 1.14).

Les problèmes de quantité et de qualité de l'eau d'irrigation, la pauvreté des sols, combinés aux mauvaises pratiques agricoles, constituent un frein pour une croissance importante du secteur agricole. Malgré toutes ces contraintes, la part du PIB du secteur agricole a augmenté de 0,9 point entre 2001 et 2005, passant de 3,2 à 4,1 %, notamment grâce aux efforts du gouvernement pour promouvoir ce secteur.

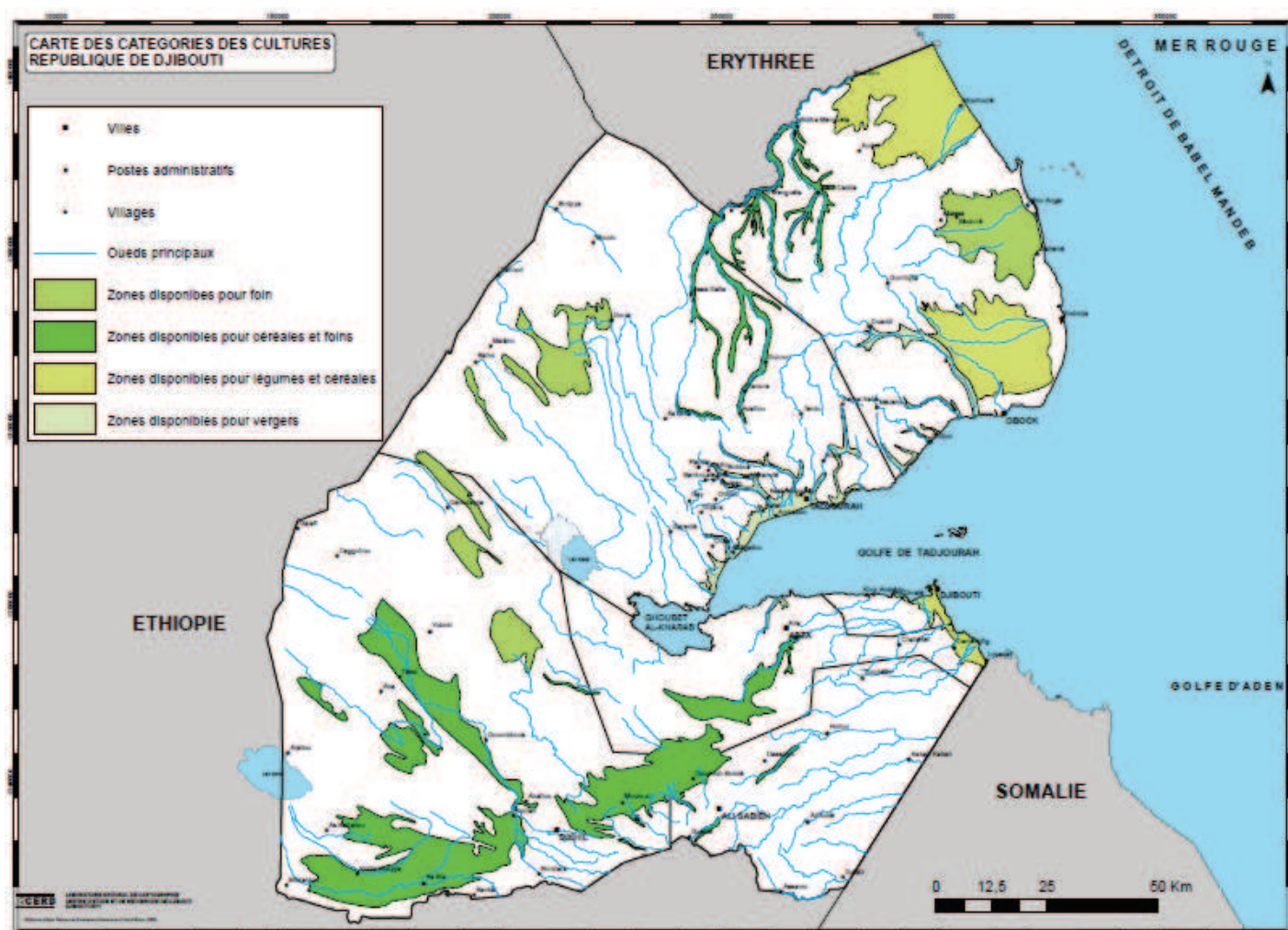


Figure 1.14 : Carte de cultures dans la République de Djibouti (source : CERD)

1.1.8 Insécurité alimentaire et pauvreté

L'insécurité alimentaire constitue un problème majeur à Djibouti et touche aussi bien les populations rurales que les populations urbaines. Les pertes de terres cultivables et de pâturage pour les bétails, à cause de la désertification et des sécheresses récurrentes, l'augmentation des prix des denrées alimentaires accentuent la paupérisation des populations rurales (PAM, 2012). La sécheresse de ces 6 dernières années a décimé une grande partie du cheptel, privant les populations rurales de leurs principaux revenus. Les populations les plus vulnérables restent les enfants, les femmes et les personnes âgées. Cette précarité favorise la malnutrition, les maladies et pousse ces populations à un exode vers les villes, fragilisant un peu plus ces populations vulnérables. Selon le PAM, le niveau de l'insécurité alimentaire des populations rurales est « très critique » et on estime que plus de 49 % des ménages sont en insécurité alimentaire « sévère ». Sur l'ensemble du territoire, la phase d'insécurité alimentaire aiguë est critique (Figure 1.15) (FAO, 2012). Le taux de malnutrition chez les

enfants de moins de 11 mois est de 24,2%, ce qui représente un seuil critique selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Malgré une croissance de 5 % de l'économie du pays, la pauvreté touche 40 % de la population.

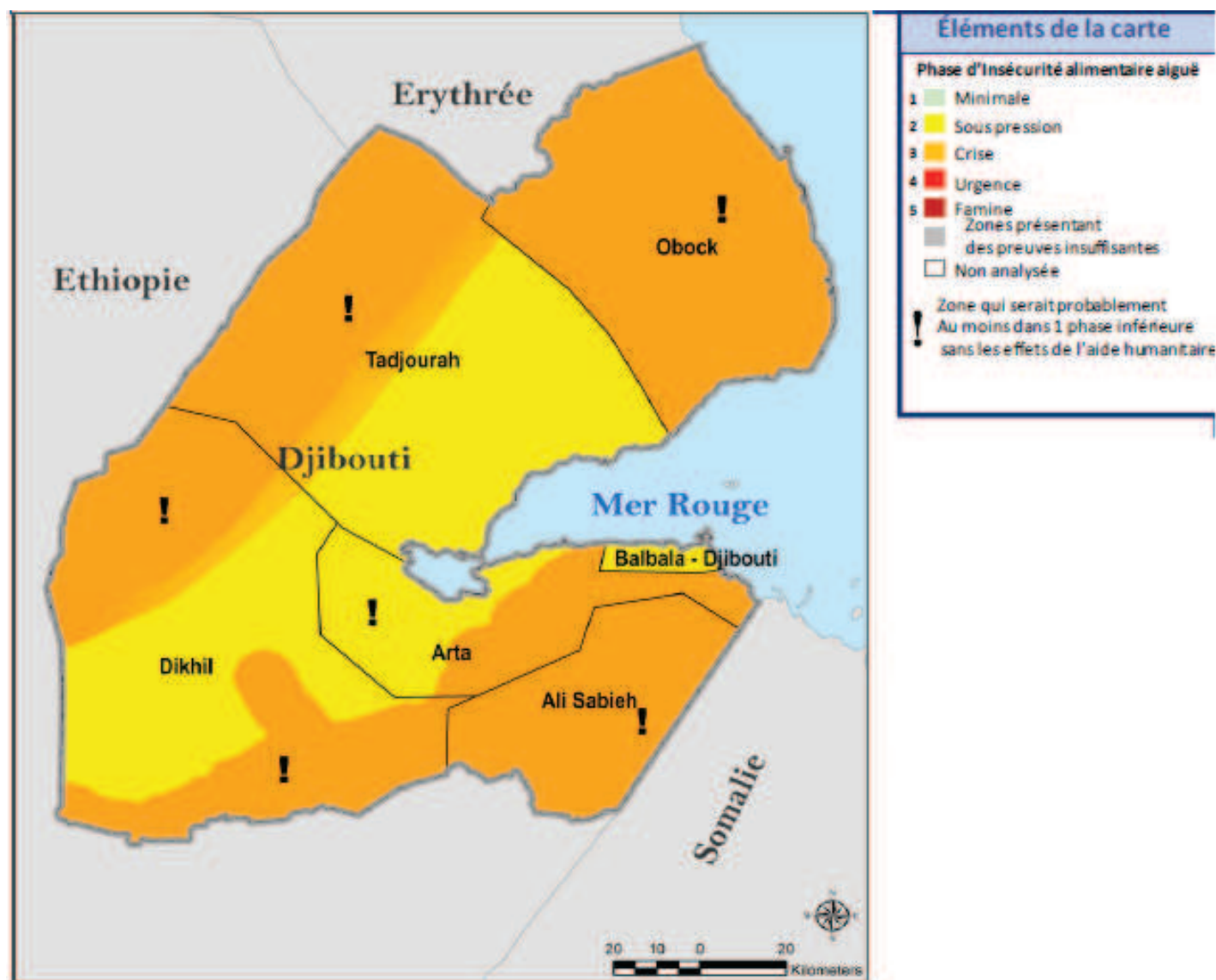


Figure 1.15 : Carte de l'insécurité alimentaire de la République de Djibouti (FAO, 2012)

Pour lutter contre l'insécurité alimentaire, le gouvernement djiboutien a mis l'accent sur le développement de l'agriculture en accordant plus de moyens financiers et humains. Les différents axes de la politique de développement du secteur agricole du gouvernement sont : la mise en valeur des sols, la bonne utilisation des eaux d'irrigation et la diversification des productions pour une meilleure rentabilité. Le choix du gouvernement s'est porté sur le développement du système d'agriculture oasien.

1.1.9 Le système oasien : moyen de lutte contre l'insécurité alimentaire

Le système oasien permet d'associer différentes cultures et l'élevage, c'est pourquoi il constitue un choix pertinent dans la diversification des revenus visée par la politique de développement agricole du gouvernement (Photo 1.2). Ce système permet d'optimiser l'espace, dans un contexte où les terres fertiles et l'eau sont rares. La production de fourrage dans les oasis permet le renforcement du secteur de l'élevage, augmentant ainsi les revenus des paysans. Ce système permet notamment le développement des cultures maraichères. Cependant, le manque d'espace, d'eau de qualité, le manque d'expertise, la salinisation des sols par les mauvaises pratiques d'irrigation et la désertification menacent cet écosystème fragile. Conscient de ces problèmes, le gouvernement a pris un certain nombre de mesures, par exemple la formation des agriculteurs sur les techniques agricoles, l'installation de forages, la fourniture d'équipements pour l'irrigation (motopompe solaire) et d'intrants. Au niveau de la recherche scientifique, le gouvernement a mis en place un programme de développement du palmier dattier, qui est la plante centrale du système oasien. Ce programme concerne la recherche et la multiplication par les techniques de biotechnologie végétale de variétés de palmier dattier à fort rendement adaptées aux conditions édaphiques et climatiques de Djibouti. Parallèlement, la recherche sur les besoins en eau du palmier dattier a été menée dans le cadre de ce travail de thèse.



Photo 1.2 : Photo d'une oasis à Ambabo (Tadjourah, nord du pays).

Chapitre 2. Le palmier dattier et les transferts hydriques dans le système sol-palmier-atmosphère

Dans ce chapitre, nous allons présenter d'abord la bibliographie relative au palmier dattier et ensuite celle relative aux transferts dans le système sol-palmier-atmosphère.

2.1 Le palmier dattier

Selon Alexander von Humboldt, « ce qui distingue surtout les palmiers, c'est une physionomie et un port majestueux qu'il est difficile de représenter par des paroles... La direction des feuilles est, avec l'axe tracé par leur tige, ce qui contribue le mieux à donner aux palmiers cet air de majesté souveraine... ».



Photo 2.1 : Palmier dattier, variété Barhi, à Damerjog (Djibouti).

Le palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.) est une plante « majestueuse » cultivée depuis plusieurs millénaires (un peu plus de 4000 ans) (Photo 2.1). Plante pérenne et dioïque, emblématique des régions arides et semi-arides du globe, le palmier dattier est cultivé principalement pour ses dattes (Munier, 1973).

C'est en 1753 que le botaniste suédois Carl von Linné nomme le palmier dattier *Phoenix dactylifera*, dans le tome 2 de *Species plantarum* (Munier, 1973). «*Phoenix*» proviendrait de

phoenix, nom utilisé par les grecs pour le dattier. En effet, les grecs de l'Antiquité le considéraient comme l'arbre des phéniciens qui l'avaient introduit en Grèce. Selon une autre hypothèse, on suppose que les grecs aient donné le nom de *phoenix* au palmier, en référence à l'oiseau de légende qui était capable de renaître de ses cendres. Ce nom aurait été attribué au palmier en raison de sa capacité à survivre après avoir été partiellement brûlé (Gros-Balthazard *et al.*, 2013). *Dactylifera* dérive du latin *dactylus*, dérivant de l'hébreu *dachel* en référence à la forme des fruits du dattier qui ressemble à des doigts et à « *fero* » signifiant « qui porte » en latin (Gros-Balthazard *et al.*, 2013).

2.1.1 Description systématique du palmier dattier

Le palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.) est une plante pérenne monocotylédone arborescente de la famille des Acéracées (Palmacées). *Palmaceae* est une famille des angiospermes monocotylédones comprenant environ 200 genres et 1500 espèces (Zaid, 2002). Le genre *Phoenix* (*Coryphoideae Phoeniceae*) est l'un de ces 200 genres et il contient une douzaine d'espèces, dont *Phoenix dactylifera* L. (Munier, 1973) (Tableau 2.1).

En 1986, Dransfield et Uhl ont classifié le palmier dattier comme suit :

- Groupe: *Spadiciflora*
- Ordre: *Palmea*
- Famille: *Arecacea (Palmaceae)*
- Sous-famille: *Coryphoideae*
- Division: *Phoeniceae*
- Genre: *Phoenix*
- Espèce: *Dactylifera* L.

Tableau 2. 1 : Classification du genre *Phoenix* classé, par Chevalier en 1952 (Zaid, 2002).

Espèce	Nom commun	Distribution géographique
<i>Phoenix dactylifera</i> L.	Palmier dattier	Les pays méditerranéens, l'Afrique et une partie de l'Asie; introduit en Amérique du Nord et en Australie
<i>P. atlantica</i> A. Chev.		Afrique occidentale et îles Canaries
<i>P. canariensis</i> Chabeaud.	Palmier canari	Îles Canaries et du Cap-Vert
<i>P. reclinata</i> Jacq.	Palmier nain	Afrique tropicale (Sénégal et Ouganda) et Yémen (Asie)
<i>P. sylvestris</i> Roxb.	Palmier sauvage ou palmier à sucre	Inde et Pakistan
<i>P. humilis</i> Royle.		Inde, Birmanie et Chine
<i>P. hanceana</i> Naudin.		Chine méridionale et Thaïlande
<i>P. robelinica</i> O'Brein.		Sri Lanka, Toukan, Annam, Laos et Thaïlande
<i>P. farinifera</i> Roxb.	Palmier pygmé	Inde, Ceylan et Annam
<i>P. rupicola</i> T. Anders.	Rocky Date Palm	Inde
<i>P. acaulis</i> Roxb.	Palmier nain	Bangladesh et Inde
<i>P. paludosa</i> Roxb.	Palmier Hental ou Juliana	Bangladesh, Tenasserim, Andaman, Nikobaren et Thaïlande

Les espèces du genre *Phoenix* sont tellement proches morphologiquement qu'il est même parfois difficile de les distinguer. Cette ressemblance provoque une confusion sur le nombre exact d'espèces. Une confusion qui est également due au fait que tous les *Phoenix* possède 36 chromosomes et qu'ils peuvent ainsi s'hybrider très facilement entre eux (Daher, 2010 ; Gros-Balthazard, 2013).

En l'absence de barrière reproductive entre ces espèces, l'intégrité de différentes espèces de *Phoenix* a été sauvegardée uniquement par l'isolement géographique et écologique (Gros-Balthazard, 2013). Néanmoins, le palmier dattier reste le plus connu des *Phoenix* et est la seule espèce du genre à être cultivée pour ses fruits (Gros-Balthazard *et al.*, 2013). Les autres

espèces présentent chacune d'autres intérêts notamment pour la production de sirop ou de sucre (*Phoenix sylvestris*), l'industrie horticole (*Phoenix canariensis* et *Phoenix roebelenii*) mais aussi pour la construction, l'alimentation animale (Gros-Balthazard *et al.*, 2013).

2.1.2 Description botanique

En observant le palmier dattier, on dirait que c'est un arbre, mais en fait, il s'agit d'une monocotylédone comme le maïs. Il n'a pas de tronc mais un stipe. Le palmier dattier dispose d'un appareil végétatif (stipe et palmes), d'un système racinaire et d'un appareil reproducteur.

2.1.2.a L'appareil végétatif

2.1.2.a-1 Le stipe

Le tronc du palmier est appelé « stipe » (Figure 2.1). Même si sa forme rappelle le tronc d'un arbre, il s'agit des restes lignifiés des fibres végétales des anciennes feuilles, sans ramification. Sa circonférence reste homogène du bas vers le haut et mesure en moyenne de 100 à 110 cm et varie selon les conditions de culture et les conditions climatiques. Pouvant aller à plusieurs dizaines de mètres, le stipe ne possède pas de couche de cambium et la croissance se fait à partir d'un bourgeon terminal appelé « phyllophore » ou « apex » (Munier, 1973). Les faisceaux vasculaires sont distribués de façon dense dans la région corticale lignifiée du parenchyme amylofère et assurent la souplesse et la robustesse du stipe (Bouguedoura, 1991).

Si le bourgeon terminal est endommagé soit par blessure soit par une attaque de ravageur ou encore par maladie, le palmier réagit en développant un ou plusieurs bourgeons axillaires qui vont alors remplacer la « tête » du pied mère en produisant palmes et régimes (Zaid, 1987 ; Peyron, 2000). Les variations du diamètre du stipe témoignent de la vie biologique du palmier (stress hydrique, sécheresse, accidents divers...) (Peyron, 2000). Selon Munier (1973), les zones de rétrécissement du diamètre sur un stipe peuvent être les conséquences d'une perturbation de la croissance suite à une période de stress hydrique.

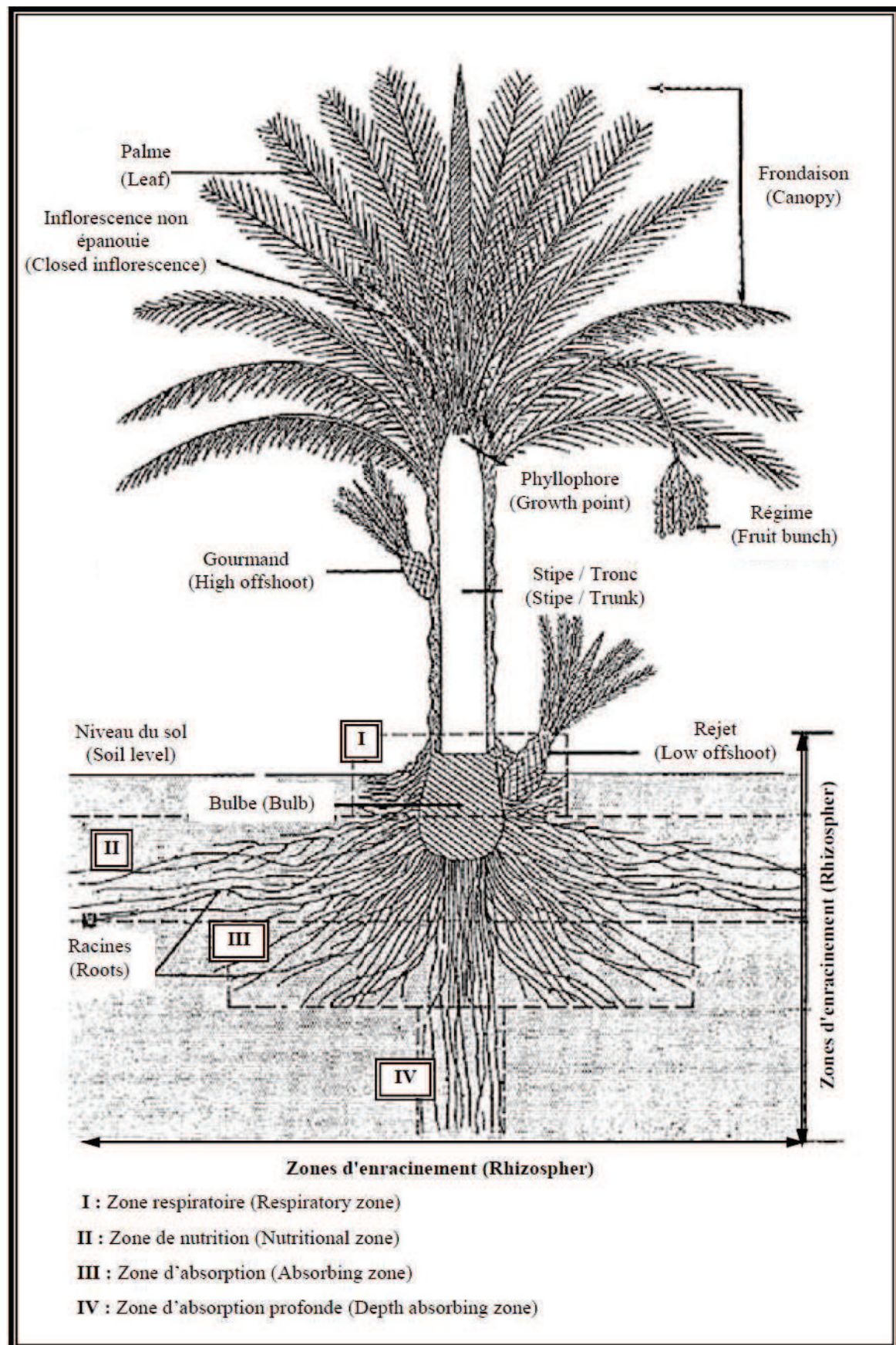


Figure 2.1 : Figure schématique du palmier dattier (Munier, 1973)

2.1.2.a-2 Les feuilles ou palmes

Une palme, ou *djerid*, est une feuille composée et pennée (Figure 2.2). La base pétiolaire, ou *kornaf*, engaine partiellement le tronc et est en partie recouverte par le fibrilium, ou *lif*. (Peyron, 2000). Elle peut atteindre une longueur de 6 à 7 mètres. Il existe trois types de palmes en fonction de leurs positions dans la canopée du palmier :

- A l'extérieur se trouvent les feuilles vertes et photosynthétiquement active,
- Au centre, on trouve les palmes à forte croissance,
- A l'intérieur (au cœur du palmier), les palmes juvéniles, de couleur blanche et inactives sur le plan photosynthétique.

La longueur et le nombre de palmes dépendent de la variété de palmier, du climat mais aussi des conditions de culture (disponibilité en eau et en éléments nutritifs). Le nombre de palmes d'un palmier adulte peut varier de 50 à 200 et forment la couronne (Munier, 1973 ; Peyron, 2000). Leur durée de vie varie de 3 à 7 ans selon la variété et le mode de culture (Peyron, 2000). La longueur et le nombre de feuilles peuvent être utilisés comme descripteurs morphologiques variétaux, car elles varient en fonction des cultivars et des conditions agroclimatiques (Daher, 2010).

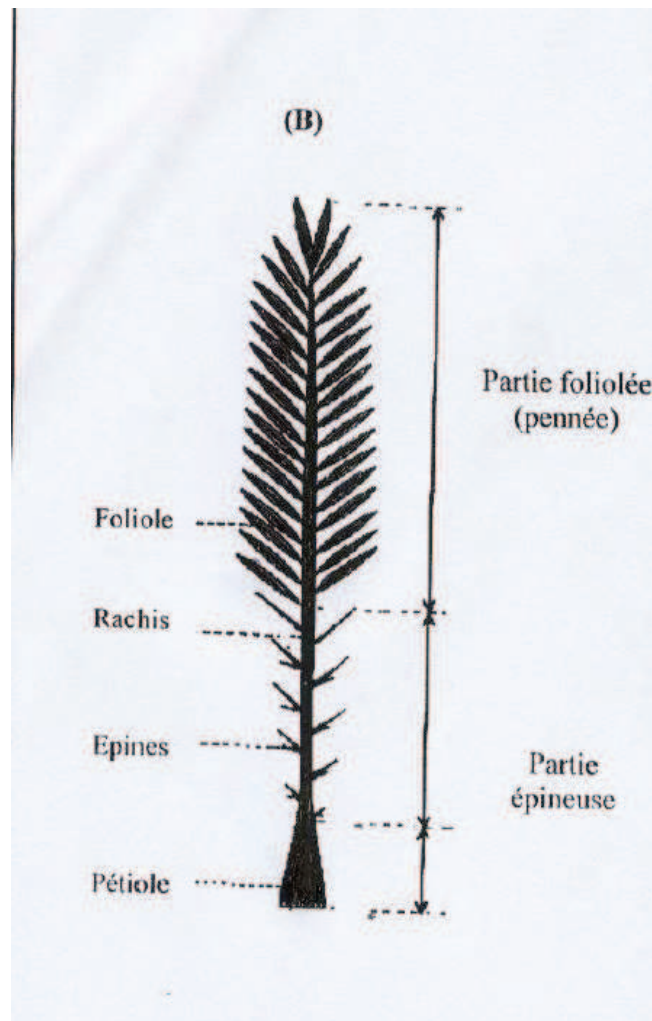


Figure 2.2 : Palme d'un palmier adulte

2.1.2.a-3 Le système racinaire

Le palmier dattier a un système racinaire de type fasciculé, c'est-à-dire disposé en faisceaux de racines, avec parfois des ramifications (Figure 2.3). Ce système racinaire dense est formé de plusieurs types de racines avec des diamètres variables ne dépassant pas 150 mm. Les racines primaires (appelées aussi « auxirhyzes ») apparaissent en premier directement à partir du stipe, ensuite apparaissent les racines secondaires (« mésorhyzes ») à partir des racines primaires. Ces deux premiers types de racines ont la même forme cylindrique. Les racines secondaires produisent des racines latérales : ce sont les racines tertiaires, qui sont similaires aux mésorhyzes mais avec un diamètre plus fin. Selon Munier (1973) et Peyron (2000), les racines du palmier dattier se distinguent en quatre grands types selon leur zone d'occupation (profondeur) et surtout selon leurs fonctions (Figure 2.3).

➤ **Les racines respiratoires**

Comme leur nom l'indique, ces racines jouent un rôle dans la respiration (échanges gazeux) du palmier dattier. Elles se situent en général dans la couche superficielle du sol (0 à 20 centimètres de profondeurs), mais peuvent parfois se retrouver jusqu'à 150 cm au-dessus du sol. Les sols de types limoneux ou argileux peuvent affecter le développement de ces racines, du fait de leurs propriétés asphyxiantes (Daher, 2010).

➤ **Les racines de nutrition**

Situées entre 20 à 100 cm de profondeur, les racines nutritives comptent la plus grande proportion de racines primaires et secondaires. Elles peuvent se développer latéralement au-delà de la zone de projection des palmes du palmier.

➤ **Les racines d'absorption**

La profondeur d'enracinement des racines d'absorption est estimée à plus de 2 mètres et dépend du mode de culture et du niveau de la nappe. La densité des auxyrhyzes dans la zone d'absorption diminue avec la profondeur.

➤ **Les racines pivotantes**

Du fait de son caractère phréatophile, le palmier plonge ses racines pivotantes à plus de 18 mètres. Dans le cas d'une nappe peu profonde (nappe perchée), il est difficile de différencier ces racines pivotantes des racines d'absorption. Ces racines ont également un rôle d'ancrage.

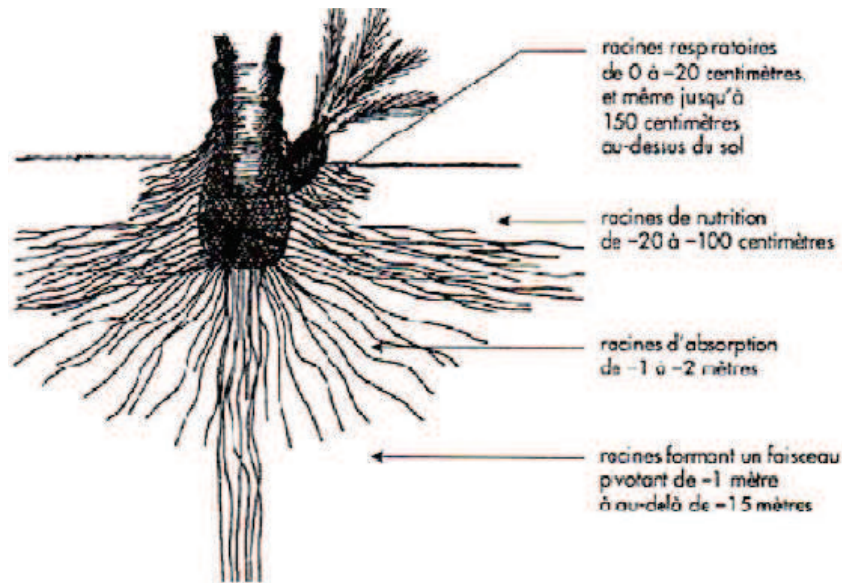


Figure 2.3 : Les différents types de racines du palmier dattier (Peyron, 2000).

2.1.3 L'appareil de reproduction

2.1.3.a Les spathes et les fleurs

Le palmier dattier est une espèce dioïque, c'est-à-dire qu'il existe un palmier mâle et un palmier femelle, ayant chacun des inflorescences ou organes reproducteurs (Photo 2.2). Le développement des bourgeons axillaires situés à l'aisselle des palmes vont donner naissance aux inflorescences qui peuvent atteindre plus de 1 m de longueur. La floraison du palmier intervient après une longue phase juvénile. Tout au long de sa vie, le palmier dattier va fleurir chaque année. Les fleurs mâles sont appelé « staminés » et les fleurs femelles des « pistillats ». Les spathes sont de grandes bractées ligneuses qui ne s'ouvrent qu'à maturité du palmier, c'est à ce moment là que le sexe des organes reproducteurs est identifiable. Il arrive cependant qu'on observe des cas de fleurs hermaphrodites dans l'inflorescence (Mason, 1915 et Milne, 1918, cités par Zaid, 2002). Il arrive parfois même de trouver des palmes portant à la fois des fleurs unisexuées et hermaphrodites. On parle alors de palmier polygame. Afin d'identifier le sexe du palmier assez tôt, une étude sur le déterminisme sexuel du palmier dattier a montré que l'unisexualisation des fleurs du palmier était associée à l'hyperméthylation globale de l'ADN et de l'arrêt des divisions cellulaires dans les inflorescences stériles (Daher, 2010). Cette étude a permis d'améliorer les connaissances sur le processus de différenciation des organes sexuels et permet ainsi de disposer de marqueurs moléculaires du sexe du palmier dattier. La pollinisation se fait soit naturellement par le vent

ou grâce aux insectes, soit par l'intervention de l'homme en plaçant les épillets mâles au sein de l'inflorescence femelle (Photo 2.3).

Lors de la pollinisation un seul ovule est fécondé par fleur, conduisant à l'élaboration d'un carpion qui, à son tour, donne un fruit appelé « datte ».

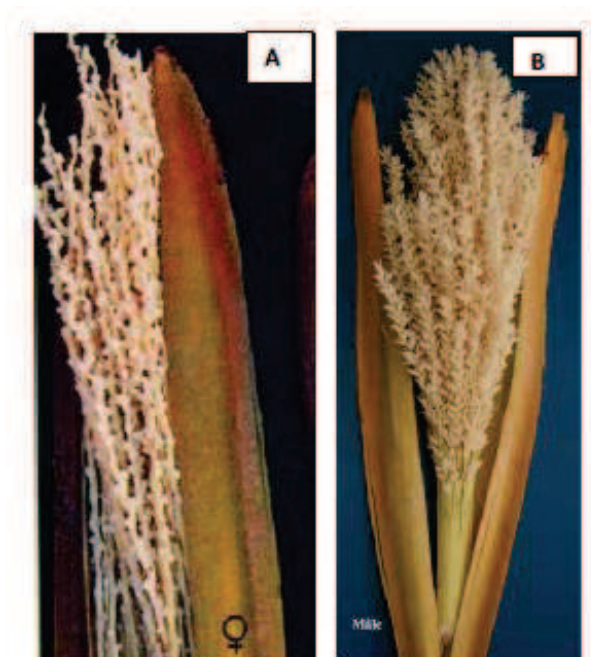


Photo 2.2 : Organes reproducteurs femelles (a) et organes reproducteurs mâles (b) (Daher, 2010)



Photo 2.3 : Pollinisation des fleurs femelles dans une palmeraie de Djibouti. A : pollinisation manuelle ; B : épillets mâles placés au sein de l'inflorescence femelle (Daher, 2010)

2.1.3.b Le fruit

Après la pollinisation, la fleur femelle est fécondée et évolue en fruit : les dattes (Photo 2.4). Les dattes vont ensuite passer par différents stades de développement (Figure 2.4) avec des caractéristiques et des durées différentes (Tableau 2.1) (Munier, 1973 ; Daher, 2010). Les dattes sont constituées de 5 à 40 % d'eau, de 5 à 95 % de sucres (fructose, glucose et saccharose) et de 2 à 35 % d'autres constituants notamment des lipides, des protéines, des vitamines, des fibres et des sels minéraux (Estanove, 1990, cité par Daher, 2010).



Photo 2.4: Les dattes de la variété Medjool

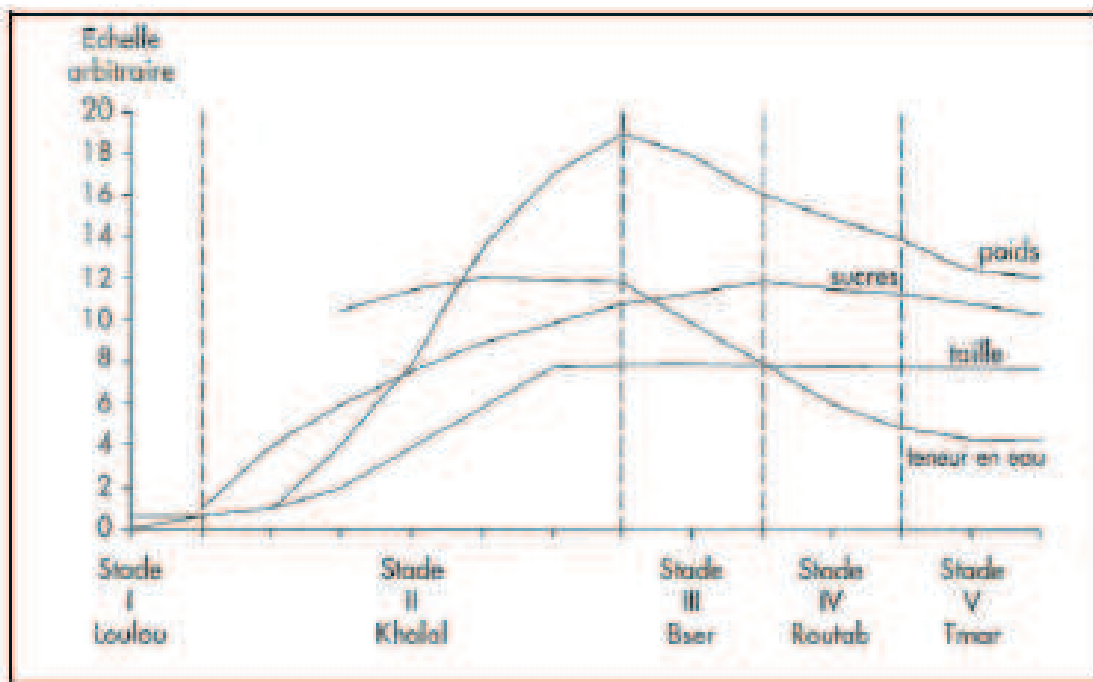


Figure 2.4: Les différents stades de développement des dattes (Munier, 1973)

Tableau 2.1: Caractéristiques des différents stades de développement des dattes (Daher, 2010)

Stade	Stade I Loulou	Stade II Khalal	Stade III Bser	Stade IV Routab	Stade V Tamar
Durée en semaines	1	5 à 17	17 à 25	25 à 28	29
Couleur	entre vert clair et blanc cassé	vert vif	jaune ou rouge	rouge	rouge foncé ou noir
Forme	sphérique	sphérique	ovoïde ou allongé	allongée	allongée
Taille et poids	léger grossissement des fruits jusqu'à atteindre la taille d'un petit pois	grossissement et croissance maximales	diminution de la teneur en eau	diminution de la teneur en eau	teneur résiduelle finale en eau (variable selon les cultivars)
Sucres et autres constituants (minéraux, vitamines, fibres et tanins)	Légère accumulation de sucres	Importante accumulation de sucres	Accumulation maximale des sucres et des autres composés	Concentration des constituants	Datte mature
Consistance		dure	Demi-molle	Molle	Sec, molle, demi-molle
Graine (embryon)		Petit noyau allongé et tendre	Noyau plus allongé et dur	Graine mature et très dur	Graine mature et très dur

2.1.4 Répartition géographique

2.1.4.a Culture du palmier dans le monde

L'origine exacte du palmier dattier est considérée comme perdue dans l'Antiquité. Toutefois, il est certain qu'il a été cultivé dès 4000 avant J.C., car il a été utilisé pour la construction du temple du dieu de la lune près de Ur et en Mésopotamie (Irak du Sud) (Popenoe, 1973 ; Munier, 1973 ; Zohary et Spiegel-Roy, 1975 ; Barrow, 1998 ;). Selon Zohary et Spiegel-Roy (1975), l'aire de culture traditionnelle du palmier se trouve dans les régions arides et semi-arides entre la latitude 15°N et 35°N, soit le Nord de l'Afrique et le Sud de l'Espagne, le Proche et Moyen-Orient, le nord-ouest de l'Inde, le Pakistan (Figure 2.5) (Munier, 1973 ; Barrow, 1998 ; Gros-Balthazard, 2013). Les pays du Moyen-Orient se partagent la majeure partie de la production mondiale de dattes dans le monde (Figure 2.6) (FAO, 2008, citée par Khan et Prathapar, 2012). Cependant, au cours des siècles derniers, l'aire de distribution du palmier dattier s'est élargie, par exemple en Australie, en Californie (USA).

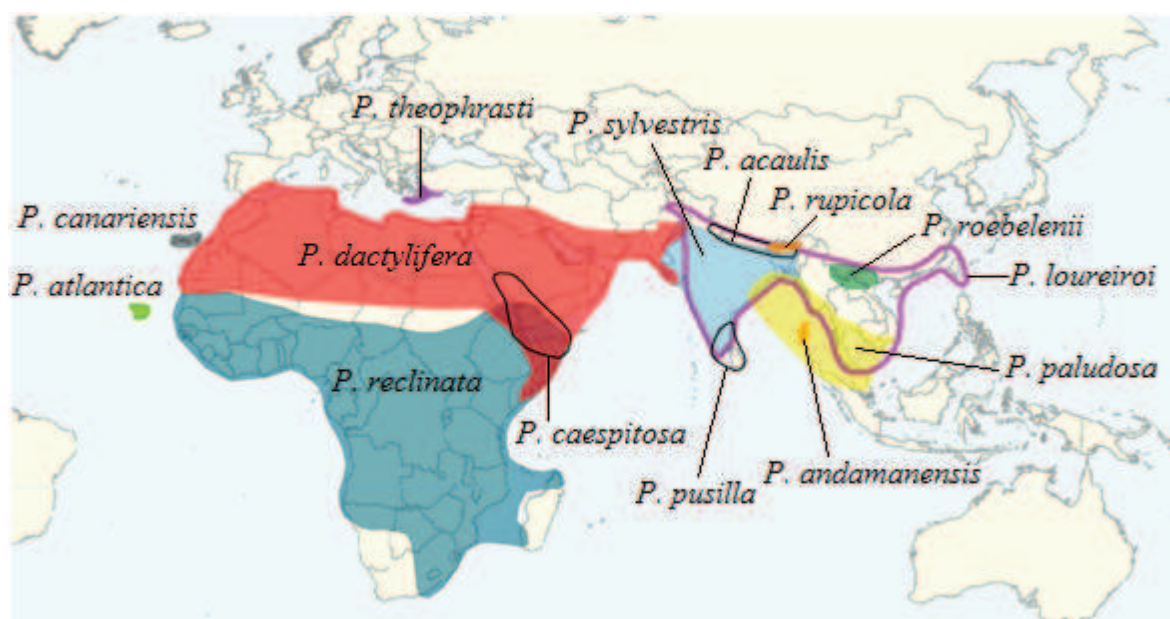


Figure 2.5 : Aire de distribution traditionnelle du palmier dattier (*P. dactylifera*) (Gros-Balthazard, 2013)

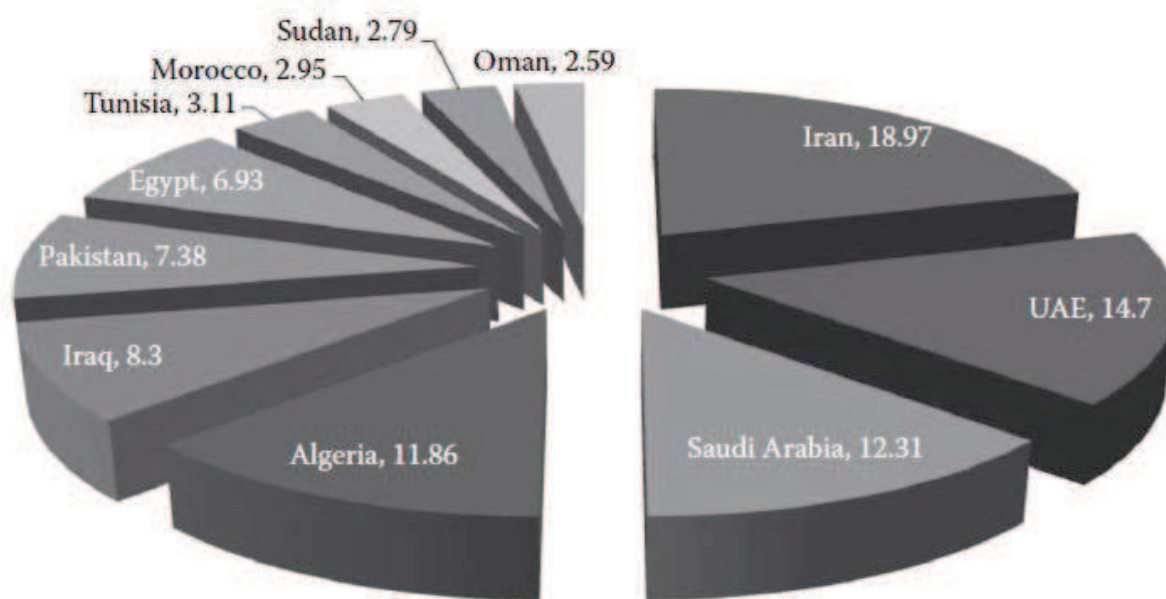


Figure 2.6 : Principaux pays producteurs de dattes (en %) dans le monde (FAO, 2008, citée par Khan et Prathapar, 2012).

2.1.4.b Culture du palmier dattier à Djibouti

Introduit au début du siècle à Djibouti, le palmier dattier se retrouve en général dans les oasis à proximité des lits d'oued ou de points d'eau, comme par exemple les forages (Figure 2.7) (Photo 2.5). A Djibouti-ville, ce sont les migrants yéménites qui ont installé des palmeraies tout au long du lit de l'oued d'Ambouli (Photo 2.5)

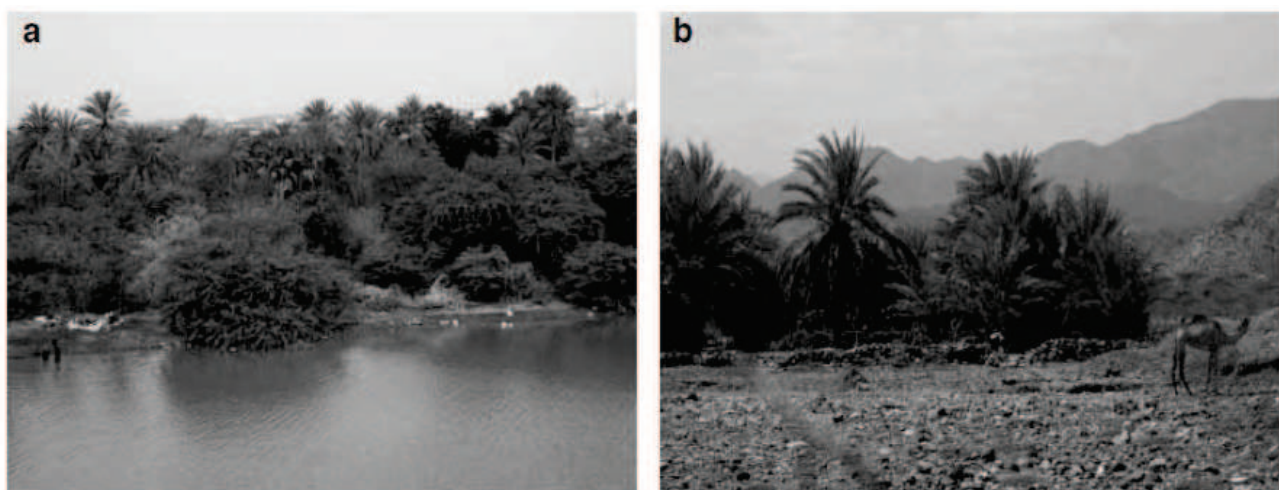


Photo 2.5 : Palmeraie installée à proximité de l'oued d'Ambouli (a) et palmeraie installée à proximité d'un puits de forage (b) (Nabil, 2010).

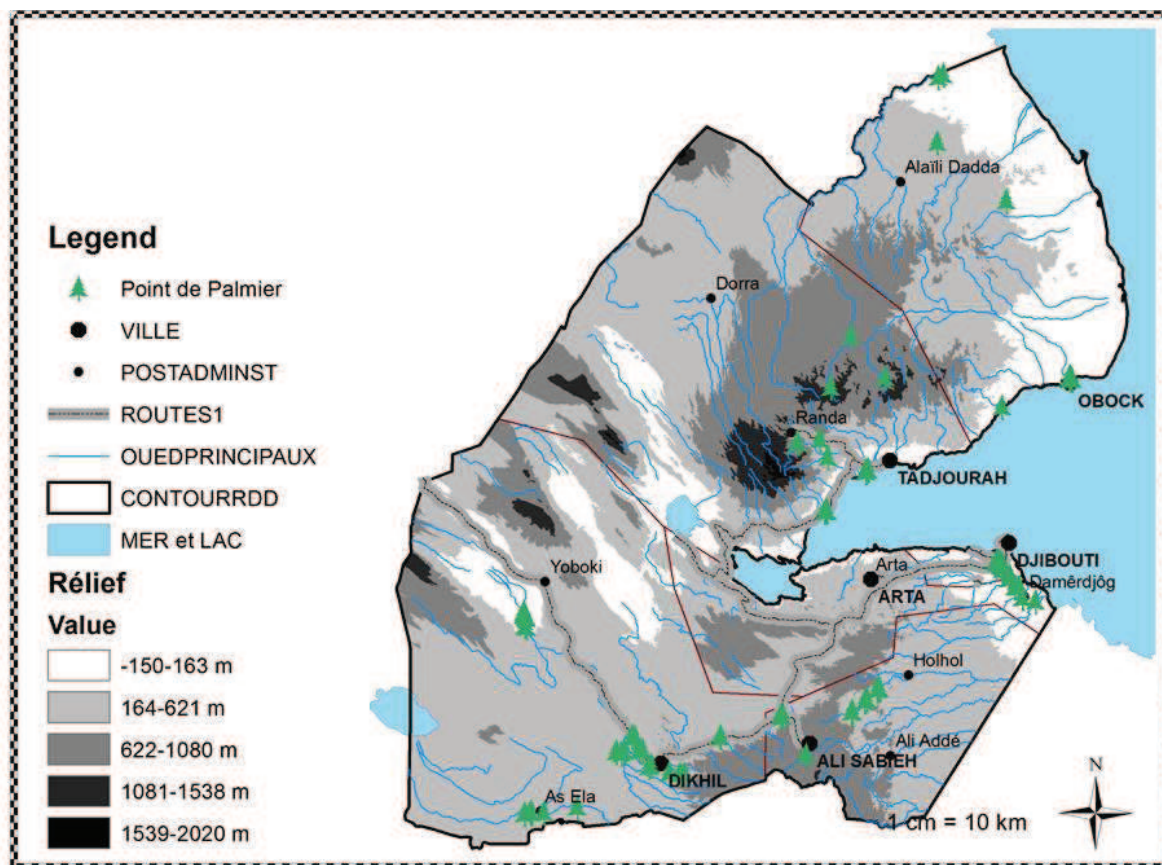


Figure 2.7 : Carte des cultures du palmier dattier dans la République de Djibouti (source : CERD)

2.1.5 Les multiples intérêts du palmier dattier

Pour les régions arides et pauvres du globe, le palmier dattier présente un intérêt socioculturel et économique majeur, mais aussi un atout dans la lutte contre l'insécurité alimentaire notamment à Djibouti.

2.1.5.a Intérêts socioculturels

Depuis l'Antiquité, le palmier dattier est un des symboles les plus représentés, du Proche-Orient à la Méditerranée, preuve de son importance culturel (Michel-Dansac et Caubet, 2013). Les civilisations ont ainsi développé autour du palmier des significations tant religieuses que culturelles. Par exemple, dans l'iconographie mésopotamienne, le palmier dattier est associé à la figure royale, considérée comme le représentant du pouvoir divin sur la terre et garantissant l'abondance des récoltes (Figure 2.8) (Michel-Dansac et Caubet, 2013). Cette iconographie met en scène une assemblée de dieux œuvrant au renouveau de la nature (symbolisée par le palmier dattier chargé de dattes au cours de l'équinoxe du printemps). L'imagerie symbolique du palmier dattier se retrouve également dans la bible : « *Les justes croissent comme le*

palmier, ils s'élèvent comme le cèdre du Liban » (Psaumes 92:12). Dans le coran, le palmier dattier y est mentionné plus de 20 fois : « Nous faisons descendre du ciel une eau bénie avec laquelle nous faisons pousser des jardins et des grains à moissonner, ainsi que des palmiers élancés portant des régimes bien ordonnés » (Sourate 50-Verset 9/10). Dans le judaïsme, avant de manger une datte, il est de tradition de dire : « Qu'il te soit agréable Seigneur notre Dieu et Dieu de nos pères que nous nous élevions comme un palmier dattier et que nos péchés disparaissent ». Ceci montre l'importance du palmier dattier dans la culture des populations aussi bien monothéistes (christianisme, judaïsme et islam) que polythéistes.



Figure 2.8 : Sceau cylindre du scribe Zaganita, vers 2250 av. J.-C., Paris, Musée du Louvre (Michel-Dansac et Caubet, 2013)

2.1.5.b Intérêts économiques

La principale production du palmier dattier est la datte (fruit), qui est consommée soit fraîche, soit séchée ou bien sous plusieurs autres formes. La production de ce fruit constitue un intérêt économique majeur pour les pays producteurs. La production mondiale des dattes est passée de 1,8 millions de tonnes en 1961 à 5,4 millions de tonnes en 2001 (Zaid, 2002). Cependant, la majeure partie de la production est consommée localement. L'Union Européenne constitue l'un des plus gros marchés pour l'exportation, et importe plus de 60000 tonnes chaque année pour une valeur de 110 à 130 millions de dollar US. La France est de loin le plus gros importateur de dattes pour une valeur de 40 à 45 millions de dollar US. En effet, la France réexporte 1/3 de ces importations de dattes vers les autres pays européens (Zaid, 2002).

A Djibouti, il n'existe pas de données fiables sur la production de dattes, et le pays n'a pas une production significative pour pouvoir exporter. Une palmeraie de 1 hectare, avec une très bonne gestion, pourrait générer un revenu de plus de 6340 euro par an (FAO-NEPAD, 2005).

Plusieurs autres parties du palmier dattier représentent des intérêts divers, comme, par exemple, le bois et les palmes, qui peuvent être utilisés dans la construction, les fibres du stipe et des palmes pour confectionner des sacs, des cordes, des selles de chameau.

2.1.5.c Lutte contre l'insécurité alimentaire

Adapté aux conditions climatiques difficiles, le palmier dattier permet la création d'oasis, écosystèmes propices à la diversification de cultures pour les paysans de ces régions où l'agriculture est confrontée à des nombreux obstacles. En effet, plante centrale des oasis, le palmier dattier crée un microclimat permettant la culture maraichère, fourragère et aussi d'agrumes, augmentant ainsi les revenus des exploitants.

Dans un contexte d'insécurité alimentaire aiguë à Djibouti, les dattes représenteraient une source alimentaire de haute valeur nutritionnelle. En fait, riche en nutriments (cf : § 2.1.3.b), les dates ont une valeur nutritionnelle de plus de 3000 calories par kilogramme. A titre de comparaison, d'autres fruits et aliments ont des valeurs nutritionnelles beaucoup plus faibles (abricots : 520 calories/kg ; bananes : 970 calories/kg ; oranges : 480 calories/kg ; riz cuit : 1800 calories/kg ; pain de blé : 2295 calories/kg ; viande (sans matière grasse) : 2245 calories/kg) (Zaid, 2002). En outre, le palmier dattier est l'un des plus grands producteurs de nourriture par hectare.

2.1.6 Ecologie du palmier dattier

2.1.6.a Climat et cycle végétatif

Selon les individus et les cultivars, l'activité végétative du palmier se manifeste à partir de 7 à 10°C, avec une activité maximale à 38°C (Peyron, 2000). De ce fait, à Djibouti, les températures n'étant jamais inférieur ou égale à 10 °C, le palmier n'est pas gêné par les températures basses. Cependant, l'activité végétative décroît rapidement au-delà de 38 à 40°C. Avec des températures allant jusqu'à 39 °C en été (cf : Figure 3.10), l'activité végétative du palmier baisse durant cette période à Djibouti, coïncidant avec la période de croissance et de maturation des dattes, ce qui impacte le rendement. Pour mûrir, les dattes ont besoin de chaleur estivale, sans excès, au risque de casser le cycle d'évolution (cas fréquent à

Djibouti) et d'une hygrométrie relativement faible. Héliophile, le palmier a des folioles sur les palmes facilitant l'activité photosynthétique. En période de floraison, les pluies violentes nuisent à une bonne fécondation des fleurs et favorisent aussi les maladies cryptogamiques (Peyron, 2000). Si les pollens sont légers, les vents favorisent la pollinisation. Mais les vents chauds et desséchant comme le khamsin, qui soufflent en été à Djibouti (cf: §1.1.2) provoquent l'échaudage et sèchent trop rapidement les dattes qui deviennent fripées et perdent de leurs valeurs gustatives et commerciales.

2.1.6.b Sol

Considérée comme une plante peu exigeante et utile, le palmier dattier pousse sur des sols de formation désertique et semi-désertique, là où d'autres plantes ne pourraient pas pousser. Cette robustesse fait qu'on peut trouver le palmier sur des sols très sableux à très argileux. La capacité de drainage des sols est très importante, surtout dans les zones où les eaux d'irrigation sont chargées de sel, comme à Djibouti, pour limiter la toxicité du chlorure de sodium (NaCl) ou du chlorure de magnésium (MgCl), entre autres. Toutefois, le palmier reste une plante résistante à la salinité car il peut tolérer jusqu'à 15 g/L de sel de NaCl. Certaines variétés de palmier tolèrent une salinité de plus de 22000 ppm, soit une conductivité électrique (EC) de 34 dS.m⁻¹. Cependant, la croissance et le rendement sont affectés par une très forte salinité : le rendement baisse de 50 % à 11500 ppm et 100 % à 20500 ppm (18-32 dS.m⁻¹) (Zaid, 2002 ; Erskine *et al.*, 2004).

2.1.6.c Besoins en eau et en éléments nutritifs du palmier dattier

Selon un adage arabe, « le palmier vit les pieds dans l'eau et la tête au feu du ciel », autrement dit, le palmier dattier ne craint pas une atmosphère sèche ou le soleil, à condition que ses besoins hydriques au niveau racinaire soient satisfaits. Du fait de sa présence dans les zones les plus chaudes du globe, il est très important de veiller aux apports d'eau par irrigation pour compenser l'évapotranspiration, qui est importante dans ces régions. Les besoins en eau du palmier dépendent de la qualité des eaux d'irrigation, du type sol (capacité drainante), du niveau des nappes, de la présence ou non de cultures sous le palmier, mais surtout des conditions climatiques. En effet, les conditions climatiques (évapotranspiration) permettent de calculer les besoins en eau du palmier. Il n'existe quasiment aucune donnée scientifique sur les besoins en eau du palmier dattier dans le contexte climatique de Djibouti, mise à part une évaluation qui s'appuie sur le calcul de l'évapotranspiration potentielle. Cette

étude a estimé qu'une palmeraie de 1 hectare, en monoculture et en site protégé à Ambouli (Djibouti-ville), nécessiterait 13000 m³ d'eau douce par an (Peyron, 2000). Selon Toutain (1979), avec une eau salée de 1,4 g/L il faudrait multiplier cette quantité par un coefficient de 1,1 et de 1,4 pour une eau salée de 3,3 g/L.

Le palmier dattier a besoin d'azote, de phosphore et de potassium pour sa croissance et sa production de dattes. Pour un palmier, une production de 40 kg de dattes nécessite 0,6 kg d'azote par an, 0,08 kg d'acide phosphorique par an et de 0,26 kg de potasse par an (Toutain, 1979). A Djibouti, l'apport le plus important en éléments nutritifs reste le fumier organique.

2.2 Bilan hydrique : les transferts d'eau dans le système sol-palmier-atmosphère

Au vu des conditions climatiques difficiles de Djibouti, la culture du palmier dattier ne se fait qu'avec apport d'eau par irrigation. Les faibles réserves d'eau disponibles nécessitent une bonne gestion de l'irrigation afin de limiter les gaspillages. De ce fait, la connaissance du bilan hydrique est l'un des outils les plus fiables pour le pilotage et la réussite de la phoeniciculture à Djibouti. Le bilan hydrique d'un sol se compose de plusieurs termes que l'on peut regrouper dans l'équation classique suivante :

$$P + I - R = \Delta S + ET + D \quad (\text{Equation 2.1})$$

Où P représente les précipitations, I représente l'irrigation, ΔS est la variation du stock d'eau du profil du sol, D représente le flux de drainage et R le ruissellement. L'évapotranspiration ET représente une composante importante du cycle de l'eau. Dans cette partie, nous allons définir l'évapotranspiration, ensuite le partitionnement de l'évaporation et de la transpiration, et enfin sur les méthodes de mesure de ces termes.

2.2.1 L'évapotranspiration

L'évapotranspiration (ET) est la quantité de vapeur d'eau transférée dans l'atmosphère par transpiration des plantes via leur stomates et par évaporation au niveau de la surface du sol. Comme il est difficile de faire la part entre l'eau qui quitte directement la surface du sol par évaporation et de celle qui quitte le sol par transpiration des plantes, il a été convenu de réunir les deux termes sous une dénomination unique, celle d'« évapotranspiration » (Allen et *al.*, 1998).

L'évaporation du sol est principalement déterminée par la fraction du rayonnement solaire qui atteint la surface du sol. Cette fraction diminue au cours de la période de croissance des plantes. En effet, lorsque la culture est peu développée, l'eau est principalement perdue par évaporation du sol, mais une fois que la culture est bien développée et recouvre complètement le sol, la transpiration devient le principal processus (Allen *et al.*, 1998). L'évapotranspiration peut se définir comme un prélèvement d'eau direct au niveau du sol ou indirect par les végétaux pour assurer leur croissance ou leur survie. Dans le cas d'une culture de palmier dattier (culture oasienne), la transpiration du palmier représente 32% du rayonnement global reçu au dessus de l'oasis et 53% du rayonnement net (Sellami et Sifaoui, 2003).

Il existe plusieurs facteurs qui affectent l'évapotranspiration. Parmi ces facteurs on peut citer (Allen *et al.*, 1998):

- Les paramètres climatiques (rayonnement solaire, température de l'air, vitesse du vent)
- Le type de la culture (croissance, stade culturale, taux de couverture du sol)
- Les propriétés du sol (fertilité, salinité, nature du sol, teneur en eau du sol)

Il existe trois concepts à bien identifier :

- L'évapotranspiration potentielle (ET_0 ou ETP)
- L'évapotranspiration maximale (ETM)
- L'évapotranspiration réelle (ETR).

2.2.1.a Evapotranspiration potentielle (ET_0)

L'évaporation potentielle (ET_0) correspond à une caractérisation du pouvoir évaporant de l'atmosphère (demande climatique) à un endroit et à un moment précis de l'année et ne tient pas compte des caractéristiques des cultures et des facteurs de sol (Allen *et al.*, 1998). Les seuls facteurs qui influent sur ET_0 sont des paramètres climatiques. Par conséquent, ET_0 est un paramètre de climat, et peut être calculé à partir des données météorologiques. Il existe de nombreuses formules empiriques (Thornthwaite, Turc, Blannet-Cridde...) pour estimer ET_0 . La FAO a choisi la formule de Penman-Monteith pour l'estimation de l' ET_0 (Pereira *et al.*, 2006). L' ET_0 donnée par la formule de Penman-Monteith utilise une surface de référence hypothétique qui est un gazon. C'est cette méthode de calcul que nous avons utilisée.

La formule de Penman-Monteith adaptée par le FAO est :

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2 (e^0 - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (\text{Equation 2.2})$$

ET_0 : évapotranspiration potentielle journalier (mm/j)

R_n : rayonnement net à la surface de la culture ($\text{MJ m}^{-2} \text{j}^{-1}$)

G : le flux de chaleur dans le sol ($\text{MJ m}^{-2} \text{j}^{-1}$)

T : température moyenne de l'air mesurée à 2 m du sol ($^{\circ}\text{C}$)

U_2 : vitesse du vent à 2 m du sol (m s^{-1})

e^0 et e_a : pression de vapeur d'eau saturante et réelle de l'air à 2 m du sol (kPa)

Δ : pente de la courbe de pression de vapeur ($\text{Pa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

γ : constante psychrométrique ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

L' ET_0 peut également être mesurée par des méthodes directes en utilisant par exemple un bac d'évaporation « classe A » ou « Colorado » ou un évapotranspiromètre ou un lysimètre. Ces méthodes de mesure donnent des résultats comparables à ceux calculés avec la formule de Penman-Monteith (Riou et Chartier, 1985).

2.2.1.b Evapotranspiration maximale ETM

L'évapotranspiration maximale (ETM) est la quantité d'eau perdue sous forme de vapeur par une parcelle végétalisée lorsque l'eau n'est pas un facteur limitant au niveau de l'absorption racinaire ou au niveau de la surface du sol. Dans ce cadre de confort hydrique, la régulation stomatique est minimale et l'évapotranspiration est maximale. L'évapotranspiration maximale d'une culture donnée est définie à différents stades de développement végétatif, et dépend des conditions météorologiques. Le besoin en eau des plantes est équivalent à l'ETM, qui peut être estimée à partir de l'évapotranspiration potentielle, corrigée par un coefficient appelé "coefficient cultural" (k_c).

Ainsi, pour obtenir l'ETM d'une culture, on multiplie ET_0 par k_c , qui dépend essentiellement du type de culture et de son stade de développement (Pereira *et al.*, 2006).

$$ETM = k_c * ET_0 \quad (\text{Equation 2.3}).$$

Des coefficients culturels ont été établis par la FAO expérimentalement à partir de mesures *in situ*. La fiabilité de ces coefficients a notamment été montrée par Allen *et al.* (2005).

2.2.1.c Evapotranspiration réelle ETR

L'évapotranspiration réelle (ETR) correspond à l'évapotranspiration effective d'un couvert végétal d'une parcelle végétalisée dans le cas d'une alimentation en eau éventuellement limitante. Cette fois, la nature du sol intervient au même titre que le type de végétation et le climat. Le facteur limitant peut être aussi bien d'ordre climatique (pluies insuffisantes par exemple) que d'ordre pédologique (faible réserve en eau du sol).

L'ETR est obtenue en multipliant ETM par un facteur de réduction de la transpiration α (Equation 2.4)

$$\text{ETR} = \alpha * \text{ETM} \quad (\text{Equation 2.4})$$

Le facteur de réduction de la transpiration, α , est dépendant de la teneur en eau du sol ou de la succion de l'eau dans le sol et pondère les prélèvements hydriques maximum (Feddes *et al.*, 1978). C'est une variable adimensionnelle variant entre 0 et 1.

Il existe d'autres méthodes d'estimation de l'ETR. Par exemple, les capteurs de flux de sève, qui permettent de mesurer la transpiration réelle d'une plante (Sellami et Sifaoui, 2003 ; Ben Aissa *et al.*, 2009, Madurapperuma *et al.*, 2009). Du point de vue pédologique, on peut déterminer l'ETR en suivant la teneur en eau du sol en utilisant une sonde à neutrons (méthode du bilan hydrique) (Vachaud *et al.*, 1985 ; Mazahrih *et al.*, 2012). Cependant, selon Vachaud *et al.* (1985), la méthode du bilan hydrique pose problème pour l'estimation de l'ETR lors de pluies intenses ou d'irrigations non uniformes conduisant à des ruissellements. Ces auteurs proposent alors de coupler l' ET_0 estimée à partir des données climatiques aux mesures de bilan hydrique dans le sol afin d'estimer le ruissellement.

2.2.2 Evapotranspiration : évaporation et transpiration

Pour améliorer les pratiques de gestion de l'eau, il est important de bien séparer la part d'évaporation de la transpiration. En général, la transpiration est associée à la productivité de la plante (prise d'eau), ce qui n'est pas le cas de l'évaporation. On parle alors du partitionnement de l'eau en composants « désirable » (la transpiration) et « indésirable » (l'évaporation), ce qui permet de définir l'efficacité de l'utilisation de l'eau (Agam *et al.*, 2012 ; van Halsema et Vincent, 2012 ; Kool *et al.*, 2014) . Il existe plusieurs méthodes permettant de mesurer séparément l'évaporation et la transpiration, mais également des méthodes permettant de partitionner l'évapotranspiration.

2.2.2.a Méthode de mesure de l'évaporation

L'évaporation est le passage de l'eau de l'état liquide à l'état gazeux sous l'effet de la chaleur apportée par le rayonnement solaire (cf § 2.2.1). L'évaporation de l'eau d'un sol est généralement décrite en trois étapes (Ritchie, 1972 ; Idso *et al.*, 1974, Kool *et al.*, 2014). La première étape est contrôlée par les conditions atmosphériques : l'évaporation n'est alors limitée que par l'énergie disponible et par le gradient de vapeur entre le sol et l'atmosphère. Dans les phases 2 et 3, l'évaporation est principalement fonction de la teneur en eau du sol, des propriétés hydrauliques du sol et des gradients de température (Allen, 1990 ; Deol *et al.*, 2012). Shahraeeni *et al.*, (2012) a suggéré que les trois étapes sont moins distinctes dans les cas de fortes demandes atmosphériques.

Il existe plusieurs méthodes de mesures de l'évaporation.

2.2.2.a-1 Le micro-lysimètre

Le micro-lysimètre ou évaporimètre consiste en un petit cylindre de 10 à 30 cm de diamètre qui permet de prélever un échantillon de sol non remanié à la surface du sol. Une fois prélevé, l'échantillon de sol est scellé à la base et saturé en eau, et ensuite replacé dans le sol. Après quelques temps, le micro-lysimètre est pesé avant d'être rehumecté. La variation de la masse est proportionnelle à l'évaporation. Cette méthode est simple et économique, mais prend beaucoup de temps (Trambouze *et al.*, 1998) et est peu représentative du fait de la taille de l'échantillon (Daamen, 1997). Le micro-lysimètre sert plutôt à valider les autres méthodes (Kool *et al.*, 2014).

2.2.2.a-2 La sonde d'impulsion de chaleur dans le sol

La sonde d'impulsion de chaleur dans le sol a été développée pour mesurer la teneur en eau du sol à partir des propriétés thermiques de ce dernier (Campbell *et al.*, 1991). L'évaporation est estimée avec les sondes d'impulsion de chaleur en utilisant le bilan énergétique (flux de chaleur entrant et sortant du sol et stockage de chaleur) pour une couche de sol entre deux profondeurs (Heitman *et al.*, 2008a,b). Cette méthode est efficace et est unique dans sa capacité à mesurer en continu le profil d'évaporation sous la surface du sol (Heitman *et al.*, 2008b ; Sakai *et al.*, 2011a,b ; Xiao *et al.*, 2011 ; Kool *et al.*, 2014). Néanmoins, son principal défaut est de ne pas pouvoir mesurer l'évaporation à la surface du sol (Deol *et al.*, 2012).

2.2.2.a-3 La méthode de la chambre

Cette méthode est basée sur la mesure de variation de concentration en gaz dans un volume fermé à partir duquel les échanges gazeux entre l'atmosphère et le sol sont estimés (Musgrave et Moss, 1961 ; Kool *et al.*, 2014). La principale difficulté est la simulation des conditions atmosphériques réelles de l'extérieur.

2.2.2.a-4 Le rapport de micro bilan d'énergie de Bowen (M-BREB)

Le rapport de Bowen (β) est le rapport entre le flux de chaleur sensible H et le flux de chaleur latente λE et peut être dérivé à partir des mesures de température et des gradients de pression de vapeur entre deux hauteurs au dessus de la surface, avec l'hypothèse que les mécanismes de transports atmosphériques de la chaleur et de la vapeur sont identiques (Brutsaert, 1982) (équation 2.5) :

$$\beta = \frac{H}{\lambda E} = \frac{\gamma \Delta T_a}{\Delta e} \quad (\text{Equation 2.5})$$

Où H est le flux de chaleur sensible (W.m^{-2}), λE le flux de chaleur latente (W.m^{-2}), γ la constante psychrométrique ($\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$), ΔT_a ($^\circ\text{C}$) et Δe (kPa), respectivement les différences de température et de vapeur entre les deux hauteurs.

Cette méthode n'est toutefois qu'à ses débuts et nécessite encore plus d'études pour vérifier sa fiabilité dans plusieurs conditions (Holland *et al.*, 2013).

2.2.2.b Méthodes de mesure de la transpiration

La transpiration est un processus de mouvement de l'eau du sol vers l'atmosphère via les racines, le tronc et les feuilles des plantes (Jones et Tardieu, 1998). La transpiration dépend de la demande climatique, de la disponibilité de l'eau dans le sol, des capacités de régulation de la plante (ouverture des stomates, conductance des feuilles). Les méthodes de mesure directes de la transpiration quantifient le flux d'eau à l'interface plante-atmosphère.

2.2.2.b-1 La méthode de mesure du flux de sève

La méthode de mesure du flux de sève est basée sur une mesure de flux thermique dans le tronc. Il existe plusieurs types méthodes de mesure de flux de sève, à savoir : l'impulsion de chaleur, les méthodes de chauffage constant et la méthode du bilan thermique. Les méthodes de bilan de chaleur sont utilisées pour quantifier le débit massique de l'eau en se basant sur le

bilan énergétique dans la tige. Les méthodes d'impulsion de chaleur permettent la quantification de la vitesse de circulation de la sève à partir de courbes de réponse de la température à une courte impulsion de chaleur dans la tige. Le retard dans le temps de réponse est supposé proportionnel à la vitesse de circulation de la sève (Kool *et al.*, 2014). Les méthodes de chauffage constant permettent de quantifier les flux de sève en fonction de la dissipation de la température d'une source de chauffage constante installée dans la tige ou dans le tronc. On installe dans la tige ou le tronc de la plante une aiguille chauffée à puissance constante et une ou plusieurs aiguilles qui mesurent la température à distance (Kool *et al.*, 2014). La différence de température maximum correspond à une condition de flux nul.

2.2.2.b-2 La relation biomasse-transpiration

Il existe une relation linéaire entre le rendement total relatif et la transpiration cumulée relative (De Wit, 1958 ; Hanks, 1974). Cette relation est utilisée pour déterminer le rendement à partir de la transpiration. Ainsi, on peut aussi estimer la transpiration à partir de l'accumulation de biomasse.

2.2.2.c Partitionnement de l'évapotranspiration

Le partitionnement de l'évapotranspiration peut être estimé en utilisant des méthodes de mesures isotopiques ou grâce à différents modèles. La composition isotopique de l'eau peut être directement utilisée pour mesurer directement le rapport entre l'évaporation et la transpiration (Kool *et al.*, 2014). Cette méthode est basée sur la différence entre la signature isotopique de la vapeur de l'eau issue de l'évaporation et celle issue de la transpiration (Horita *et al.*, 2008). Cette méthode reste toutefois assez onéreuse.

Il existe de nombreux modèles permettant de séparer l'évaporation et la transpiration (Kool *et al.*, 2014). On peut citer par exemple le modèle HYDRUS-1D (cf : § 3.8.1) (Simunek *et al.*, 2005), le modèle Shuttleworth-Wallace (Shuttleworth et Wallace, 1985), le modèle ENWATBAL (Lascano *et al.*, 1987), le modèle TSEB (Kustas et Norman, 1999), le modèle Cupid-DPEVAP (Thompson *et al.*, 1993), le modèle SWEAT (Daamen et Simmonds, 1994) et le modèle FAO dual kc (Allen *et al.*, 1998). L'ensemble de ces modèles ont été validés pour le partitionnement de l'évapotranspiration (Kool *et al.*, 2014).

Chapitre 3. Matériels et Méthodes

3.1 Site de l'étude

Le site expérimental (11°29'01.12"N, 43°11'50.39"E) se situe dans une palmeraie de la localité de Damerjog à 15 km au sud de la ville de Djibouti (Figure 3.1). Situé sur la plaine littorale, Damerjog a une population de 4500 habitants constituée principalement de pêcheurs, d'éleveurs et d'agriculteurs. Il existe plusieurs exploitations agricoles, favorisées par la géologie du lieu et surtout par la présence d'eau pour l'irrigation, du fait de sa proximité avec l'aquifère principal de Djibouti. La plaine côtière est constituée de dépôts sédimentaires récents ($\leq 1\text{Ma}$) (Figure 3.2). La coupe hydrogéologique ouest-est C1 montre que la plaine est principalement couverte de sédiments fins d'origine marine : alluvions sableuses ou argileuses et madrépores (Jalludin et Razack, 2004 ; Bouh, 2006) (Figure 3.3). Ces dépôts sédimentaires sont favorables à l'implantation d'activités agricoles.

Différents oueds (cours d'eau non permanents) drainent les eaux du bassin de Damerjog vers la mer (Figure 3.4). L'oued de Damerjog draine un petit bassin de 60 km² sur 15 km de long. Les crues des oueds participent à la recharge de la nappe d'eau souterraine qui représente la principale ressource en eau pour l'irrigation des cultures (Gaba, 2009). C'est pourquoi on retrouve principalement les exploitations agricoles près des oueds.

L'aquifère exploité pour l'irrigation de la palmeraie étudiée est celui de la nappe de Djibouti. Cet aquifère côtier s'étend sur une vingtaine de kilomètres au sud et à l'ouest de la ville de Djibouti et est séparé de la mer par la plaine sédimentaire (bande de sédiments grossiers de 4 à 6 kilomètres de large (Bouh, 2006).

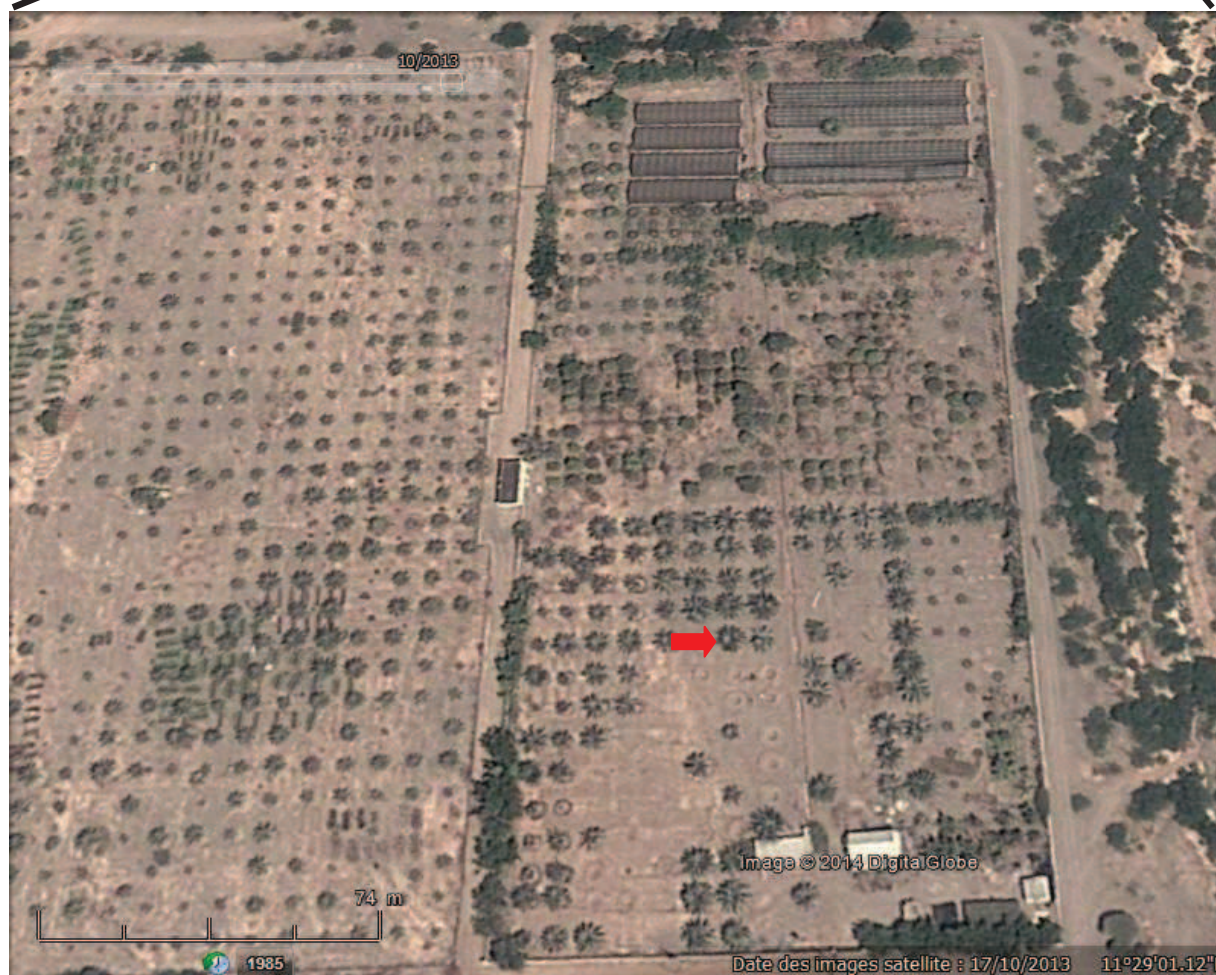
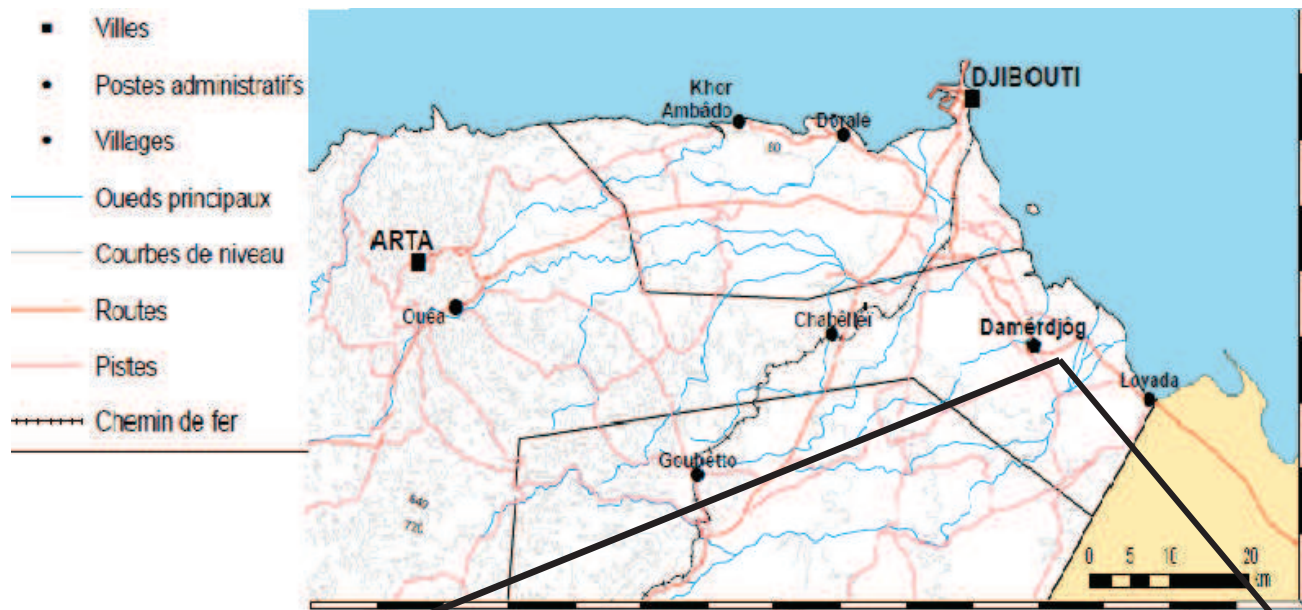


Figure 3.1 : Localisation du site de l'étude à Damerjog et photo satellite de la palmeraie (Google Earth 2013) (flèche rouge : le palmier étudié)

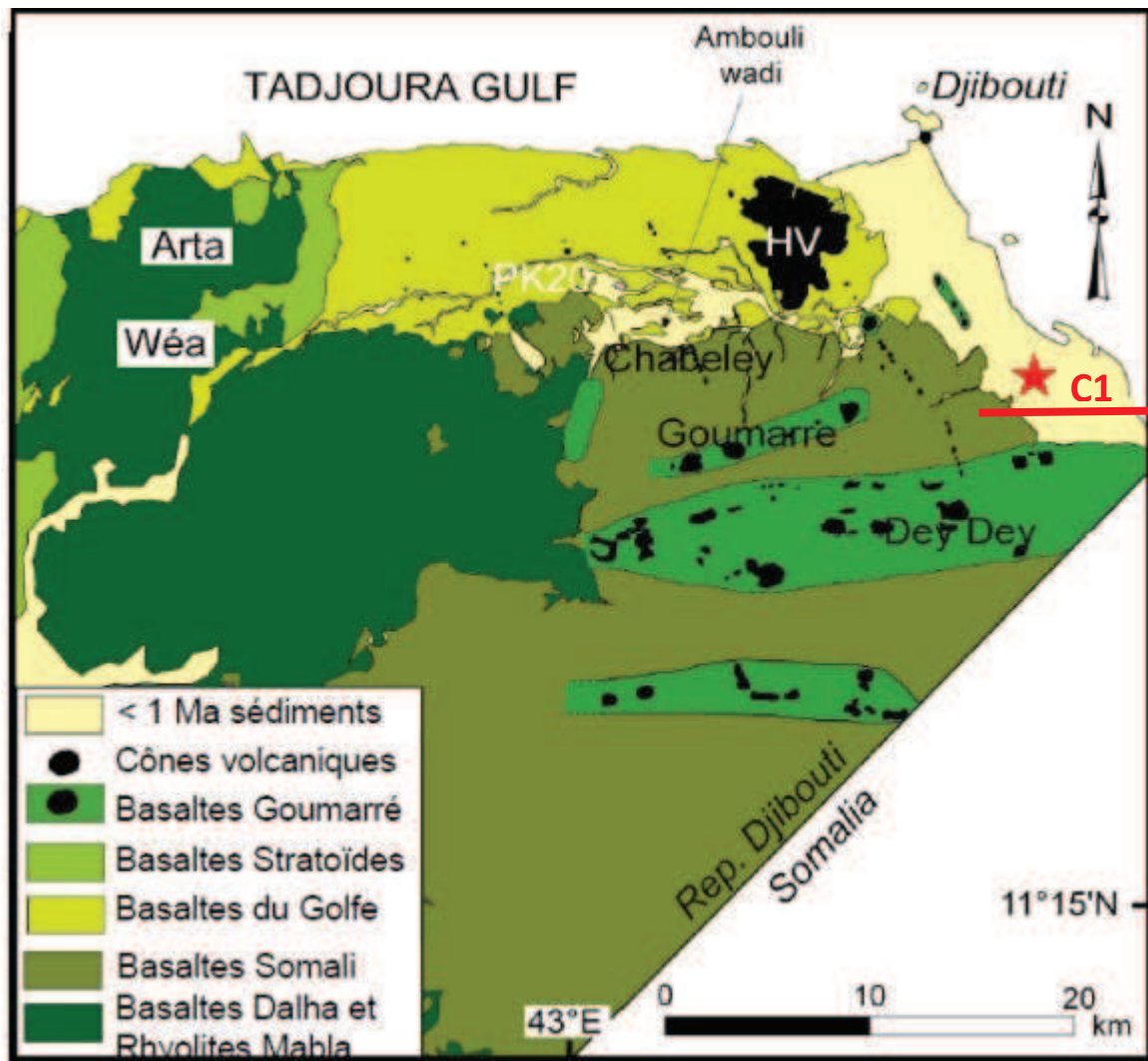


Figure 3.2 : Carte géologique de la région de Djibouti (d'après Daoud, 2008).
(Étoile rouge : site de Damerjog, C1 : coupe hydrogéologique, voir Figure 3.3)

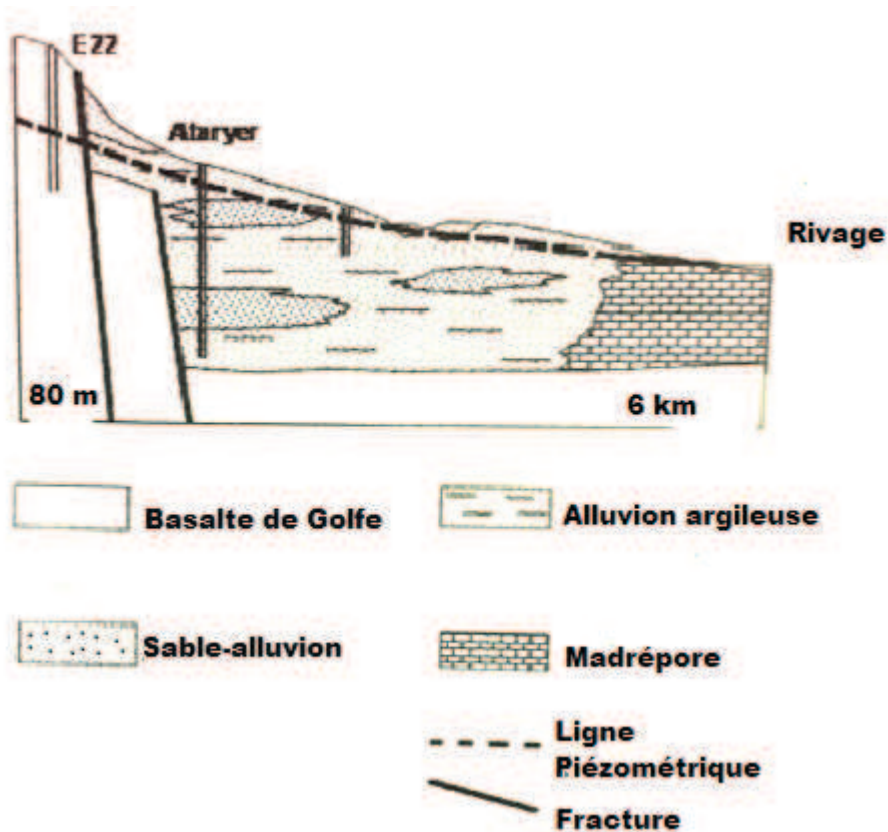


Figure 3.3. Coupe hydrogéologique C1 (voir Figure 3.2)

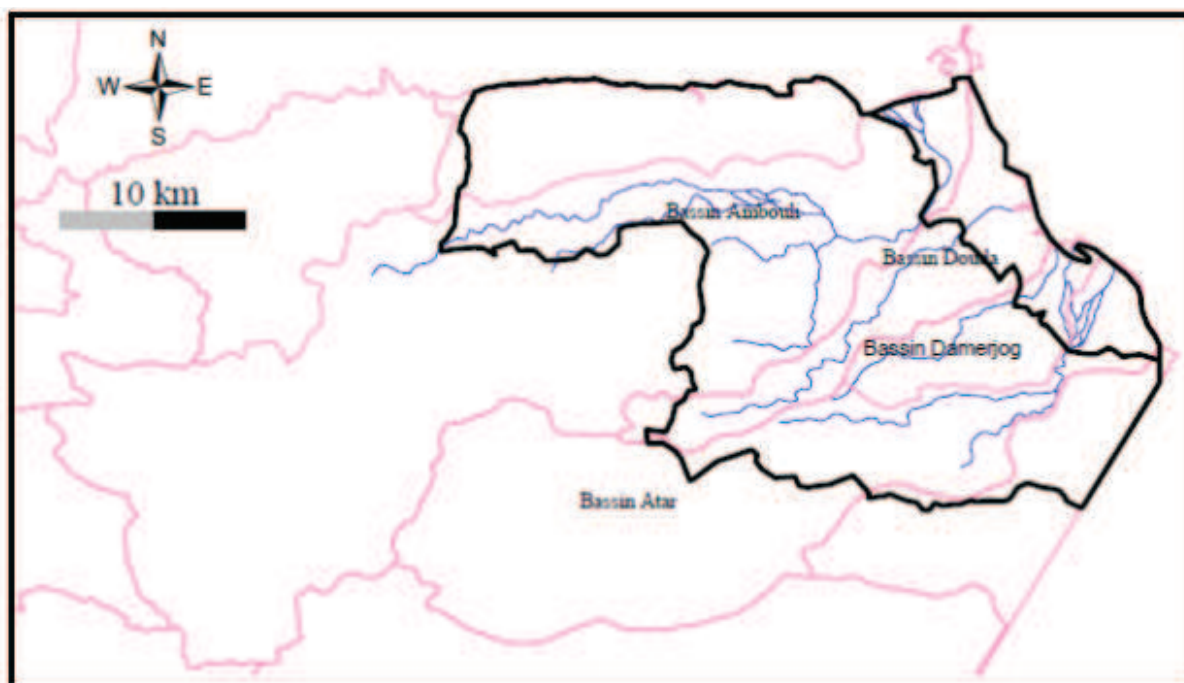


Figure 3.4 : Carte des bassins de la région de Djibouti (d'après Gaba, 2009)

La palmeraie a une superficie de 3,5 hectares. On y cultive principalement du palmier dattier de la variété Barhi, mais on y trouve également des cultures maraîchères et fourragères (Photo 3.1).

L'apport d'eau pour les cultures se fait uniquement par irrigation du fait de la faible pluviométrie. Les précipitations moyennes annuelles de cette zone sont de 100 mm/an, et l'évapotranspiration potentielle de 2000 mm/an. Le système d'irrigation de la palmeraie étudié est assez moderne, comparé à celui des autres exploitations agricoles. En effet, l'eau arrive directement d'un forage et remplit un grand réservoir. Cette eau est ensuite distribuée par un système de pompe-relais situé dans les allées principales, qui redistribue l'eau sur chaque ligne de palmiers via un réseau de petits tuyaux secondaires (Figure 3.5).

La disposition linéaire des palmiers dattiers facilite la mise en place de cultures maraîchères et fourragères. Les cuvettes peuvent être rondes ou carrées avec des ados pour maintenir l'eau d'irrigation dans la cuvette (Peyron, 2000) (Photo 3.1).



Photo 3.1 : Photo de la palmeraie avec les palmiers dattiers et les cultures maraîchères, ici le melon.

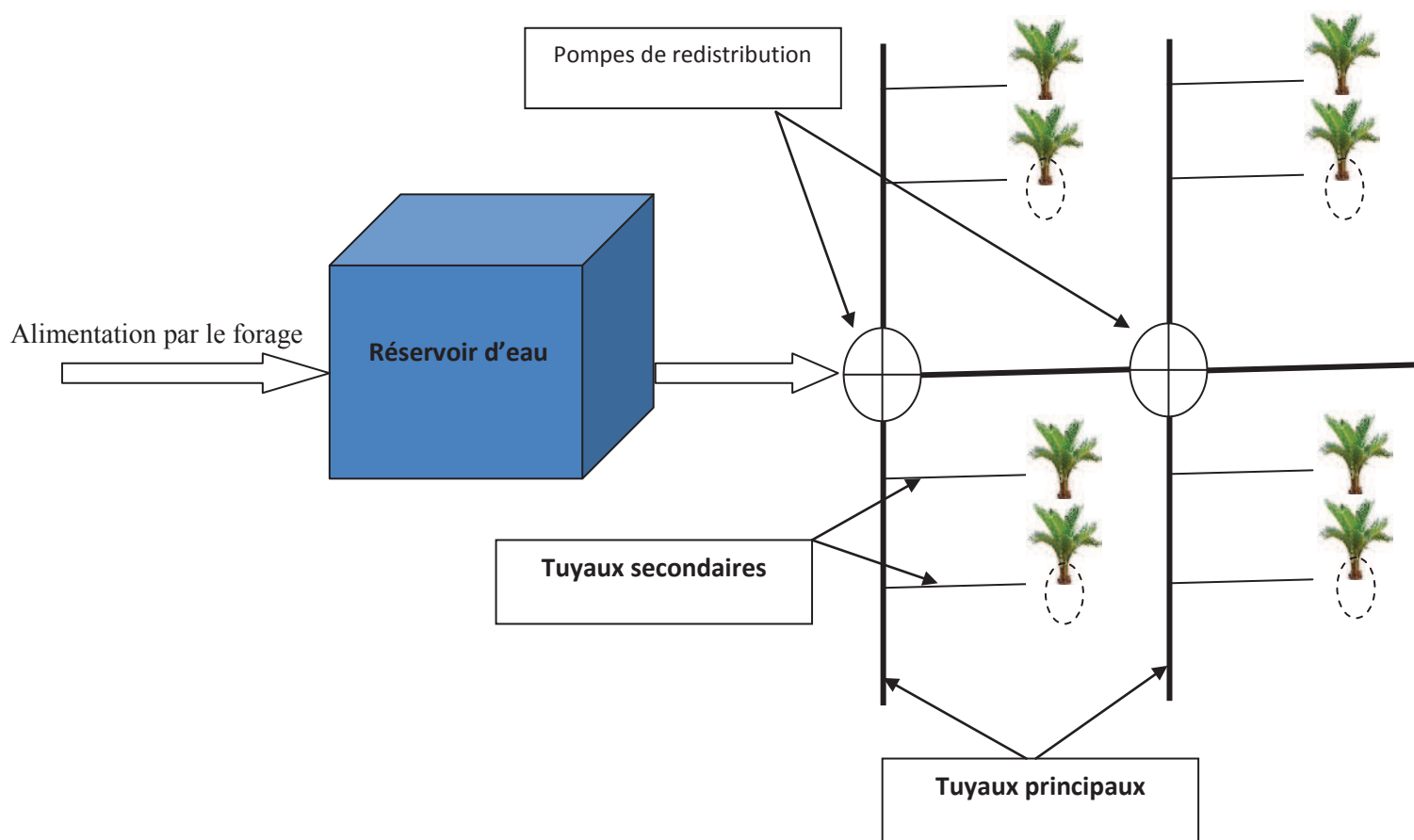


Figure 3.5 : Schéma du système d'irrigation de la palmeraie.

3.2 Caractérisation du sol de la palmeraie

Il n'existe quasiment aucune étude pédologique complète du territoire djiboutien, contrairement aux études géologiques. Par conséquent, nous ne disposons pas de données suffisantes concernant le contexte pédologique de la zone d'étude. Nous avons donc réalisé une analyse pédologique en ouvrant deux fosses pédologiques : une fosse à 4 mètres du palmier et une autre dans une zone sans culture à côté du mur de la parcelle, creusées jusqu'à une couche d'éléments grossiers (150 cm de profondeur) sur le site (Photo 3.2).

Ces fosses ont servi à réaliser des prélèvements en vue de la caractérisation granulométrique et hydrodynamique du sol, mais également à déterminer sa masse volumique apparente.

A première vue, en observant le profil, on remarque une certaine « homogénéité » jusqu'à 150 cm, puis une couche très riche en éléments grossiers. Ce sol est caractéristique des dépôts alluvionnaires. L'analyse granulométrique pourra aider à confirmer ou non l'hypothèse d'homogénéité de l'horizon 0-150 cm observée.

3.2.1 Analyse granulométrique

Une agriculture durable passe par le maintien de la qualité du sol et, de ce fait, il est important de bien connaître les propriétés de ce dernier. L'une des propriétés les plus importantes est la texture qui dépend de la distribution en taille des particules qui composent le sol.

En fonction de leur diamètre, les constituants de la fraction inférieure à 2 mm (terre fine) sont répartis en différentes classes :

- $0 < \text{argiles} < 2 \mu\text{m}$
- $2 \mu\text{m} < \text{limons} < 0,05 \text{ mm}$
- $0,05 \text{ mm} < \text{sables} < 2 \text{ mm}$

La fraction sableuse peut être scindée en deux sous-fractions :

- $0,2 \text{ mm} < \text{sables grossiers} < 2 \text{ mm}$
- $0,05 \text{ mm} < \text{sables fins} < 0,2 \text{ mm}$

La méthode utilisée consiste à déterminer les proportions en taille des constituants du sol en deux phases :

- Dispersion de l'échantillon,
- Séparation et détermination du poids des différentes fractions.

Des prélèvements d'échantillons de sol ont été effectués tous les 10 cm de profondeur dans les deux fosses ouvertes.

Les analyses sont effectuées sur un échantillon de sol séché à l'air, tamisé à 2 mm et qui pèse 10 g. L'échantillon est ensuite mis en suspension dans 10 mL d'hexamétaphosphate de sodium (50 g/l) et environ 200 mL d'eau. L'ensemble de la suspension est placé dans un tube de

sédimentation de 500 mL et d'environ 35 cm de hauteur, à travers un tamis de 0,2 mm, puis ajusté à 500 ml (V_t) et le tube de sédimentation est agité pendant 24h. Le refus du tamis est séché et pesé (S_g).

Trois prélèvements (V_p) sont effectués à une hauteur de 25 cm à des différents temps :

- 1er prélèvement : à 2 mn (A).
- 2ème prélèvement : à 12 mn (B).
- 3ème prélèvement : à 20 h (C).

Les différentes fractions sont ensuite calculées :

➤ Sable grossier (S_g) (%) = $S_g \cdot \frac{100}{P}$

➤ Limon grossier (%) = $(A - B) * \frac{V_t}{V_p} * \frac{100}{P}$

➤ Limon fin (%) = $(B - C) * \frac{V_t}{V_p} * \frac{100}{P}$

➤ Argile (%) = $(C - D) * \frac{V_t}{V_p} * \frac{100}{P}$

Le pourcentage de limon est la somme des deux fractions de limon grossier et limon fin.

P (g): poids de l'échantillon (10 g).

V_p (mL) : volume prélevé.

V_t : Volume total (500 mL).

D : poids du dispersant (0,0101g).

Pour obtenir le poids du dispersant, on prépare une solution fille diluée de 50% de la solution mère d'hexamétaphosphate de sodium, puis on prélève 10 ml de cette solution fille dans une capsule tarée et on la met dans l'étuve à 105°C pendant 12 heures jusqu'à complète évaporation.

Les pourcentages de différentes fractions pour chaque profondeur sont récapitulés dans le Tableau 3.1 et représentés graphiquement dans la Figure 3.6.

Jusqu'à 90 cm de profondeur, le sol a une dominante sableuse (entre 50 et 70 %). Le pourcentage de sable diminue à partir de 90 cm. Le limon est de l'ordre de 20 à 35 % jusqu'à 90 cm de profondeur, et de 35 à 57 % à partir de 100 cm. L'argile reste relativement faible sur l'ensemble du profil, avec une légère augmentation en profondeur.

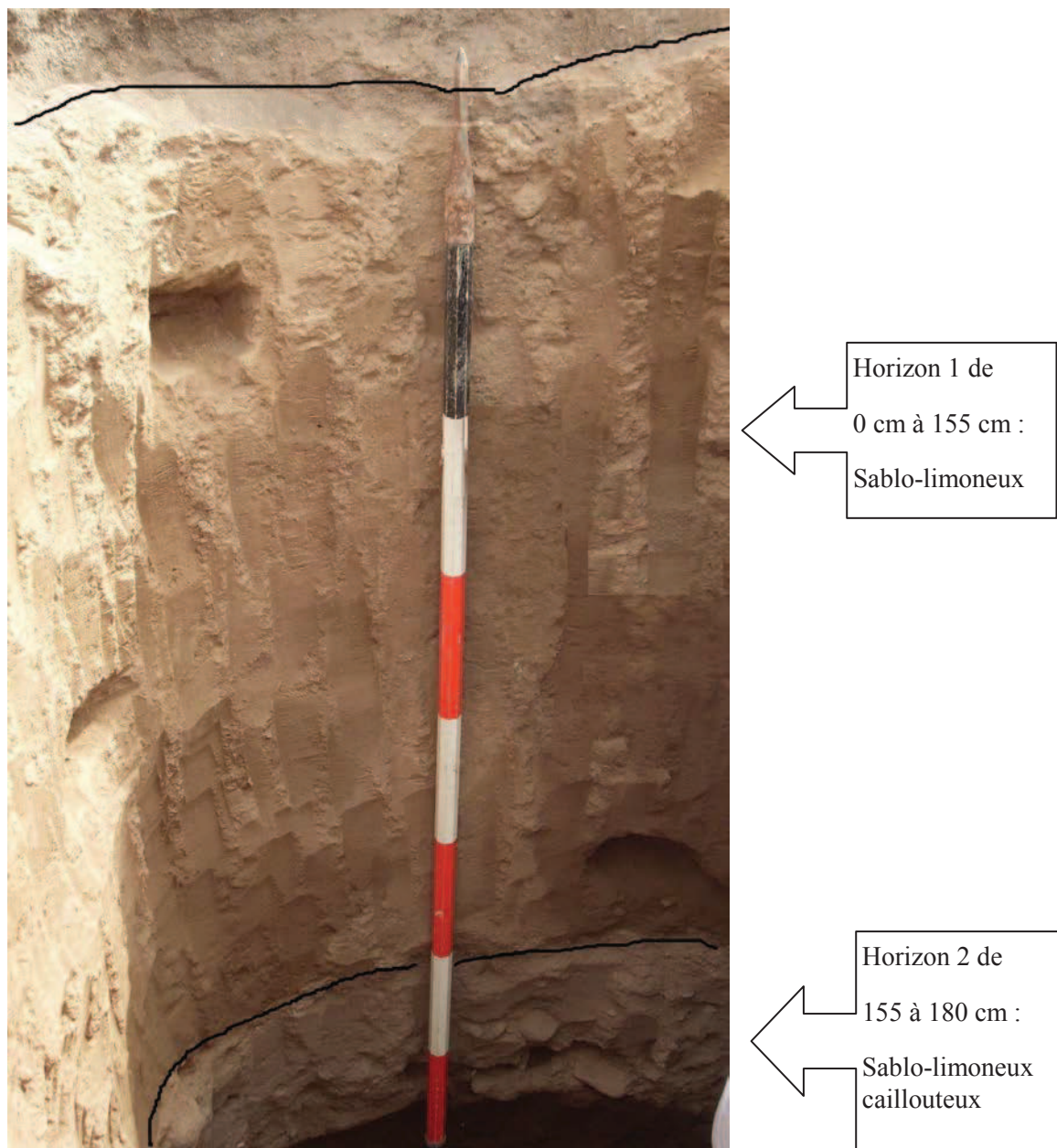


Photo 3.2 : Profil de la fosse dans la palmeraie

Tableau 3.1 : Composition moyenne granulométrique du sol de la palmeraie

Profondeur (cm)	Composition granulométrique		
	% Sable	% Limon	% argile
10	62,15	28	9,85
20	71,5	19	9,5
30	59,55	29,75	10,7
40	56,4	28,5	15,1
50	57,85	30,2	11,95
60	57,8	28,8	13,3
70	61,2	28,25	10,55
80	52,25	33,05	14,7
90	50,35	35,5	14,15
100	35,6	46	18,5
110	26,5	49	24,5
120	36,5	44,2	19,3
130	48,2	34,9	16,92
140	21,85	56,65	21,5
150	30,4	50,75	18,85
160	29,45	48,55	22

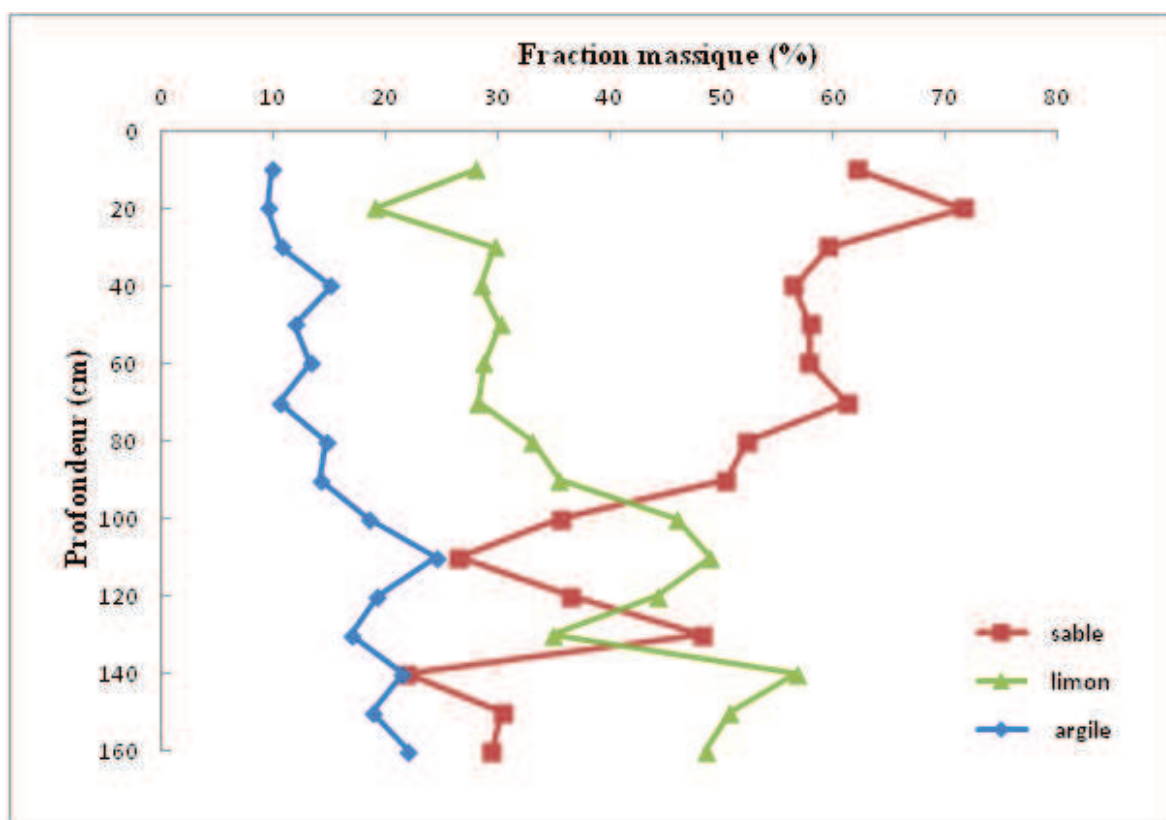


Figure 3.6 : Profil granulométrique du sol de la palmeraie

3.2.2 Mesure de la masse volumique apparente (ρ_b)

Il existe plusieurs méthodes de mesure de la masse volumique apparente (ρ_b). Yoro et Godo (1990) ont montré que la valeur de la masse volumique apparente dépendait à la fois du type de sol et de la méthode utilisée. Nous avons utilisé la méthode du cylindre. On obtient la masse volumique apparente par prélèvement d'échantillons non remaniés à l'aide de cylindres (331,75 cm³) sur le terrain. On a prélevé 1 ou 3 échantillons par couche de sol de 10 cm, pour chacune des deux fosses. Les échantillons sont ensuite placés en laboratoire dans les boîtes en aluminium et mis à l'étuve à 105°C. Le principe de la méthode du cylindre est fondé sur la détermination de la masse sèche d'un volume apparent de sol prélevé. Le volume est estimé sur le terrain lors du prélèvement à l'aide du cylindre, alors que la masse est mesurée au laboratoire après séchage. La connaissance de ces deux variables permet de calculer la masse volumique apparente selon la relation :

$$\rho_b = m/V_b$$

m est la masse sèche de l'échantillon (en g) et V_b , le volume apparent de l'échantillon prélevé (en cm³).

On remarque une homogénéité de la masse volumique sur l'ensemble du profil de sol (Figure 3.7 et Tableau 3.2).

Tableau 3.2 : Masse volumique apparente des deux fosses de la palmeraie

Profondeur (cm)	masse volumique apparente (g/cm ³)		masse volumique apparente moyenne (g/cm ³) ($\pm$ un écart type)
	Fosse 1	Fosse 2	
10	1,29/1,21	1,34/1,58	1,36 $\pm$ 0,05
20	1,12/1,31/1,12	1,13/1,21	1,18 $\pm$ 0,11
30	0,98/1,31/1,02	1,43/1,22/1,27	1,2 $\pm$ 0,18
40	1,23/1,29/1,17	1,52/1,37/1,34	1,32 $\pm$ 0,06
50	1,36/1,08/1,38	1,23/1,30	1,27 $\pm$ 0,17
60	1,38/1,38/1,47	1,35/1,23	1,35 $\pm$ 0,06
70	1,23/1,38/1,38	1,38	1,35 $\pm$ 0,08
80	1,23/1,41/1,18	1,43	1,35 $\pm$ 0,12
90	1,46/1,26/1,36	1,40	1,38 $\pm$ 0,10
100	1,36/1,23/1,16	1,49	1,37 $\pm$ 0,10
110	1,49/1,10/1,46	1,41	1,38 $\pm$ 0,22
120	1,28/1,3/1,23	1,28	1,27 $\pm$ 0,04
130	1,29/1,48/1,38	1,18	1,28 $\pm$ 0,09
140	1,24/1,20/1,27	1,32	1,28 $\pm$ 0,04
150	1,43/1,31	-	1,37 $\pm$ 0,08
160	1,29/1,30/1,25	-	1,28 $\pm$ 0,03

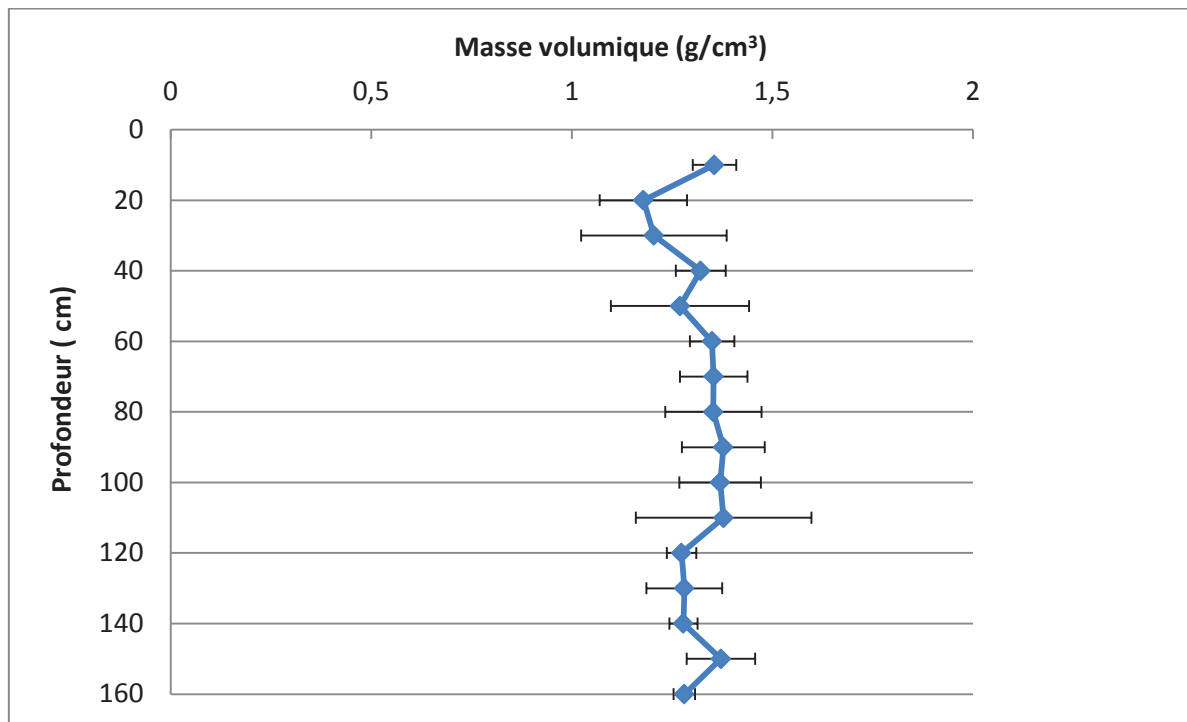


Figure 3.7 : Masse volumique apparente du sol de la palmeraie

3.2.3 Propriétés hydrodynamiques : courbes de rétention en eau et de conductivité hydraulique

La connaissance du fonctionnement hydrique d'un sol passe par l'étude de ses propriétés hydrodynamiques (rétention hydrique, conductivité hydraulique).

L'utilisation de modèles mécanistes pour décrire les flux hydriques nécessite la connaissance des propriétés hydrauliques des sols, c'est-à-dire de la relation entre conductivité hydraulique et potentiel matriciel, $K(h)$, et de la relation entre teneur en eau volumique et potentiel matriciel $\theta(h)$ (Mermoud et Xu, 2006 ; Klute, 1986). La connaissance de ces propriétés est un prérequis pour la résolution de la plupart des problèmes de flux d'eau et de transport de nutriments dans les sols.

De nombreuses méthodes ont été développées pour mesurer ces propriétés sur le terrain et en laboratoire. La caractérisation hydrodynamique du sol de la palmeraie s'appuiera sur des mesures au laboratoire. Pour cela, on va prélever des échantillons sur l'ensemble d'un profil du sol à partir d'une fosse ouverte, pour établir la courbe de rétention $\theta(h)$ des différentes couches du profil. L'obtention de cette caractéristique se fera au laboratoire à l'aide d'une presse de Richards. Cette méthode a l'avantage d'être simple tant au niveau de son principe que du matériel utilisé (Gardner, 1986).

3.2.3.a Echantillonnage

Les échantillons ont été prélevés à l'aide de cylindres rigides calibrés, dont les dimensions sont les suivantes : 2.5 cm de hauteur et 5 cm de diamètre, ce qui fait un volume de 49 cm³. Les cylindres permettent la prise d'échantillons non remaniés et de volume connu. Le prélèvement se fait en différentes étapes. Une fois la fosse creusée, on enfonce le cylindre verticalement sur une surface de sol aussi horizontale que possible, en le frappant doucement à l'aide d'une charge tout en évitant de tasser le sol dans le cylindre, ce qui pourrait perturber les mesures.

3.2.3.b Protocole de mesure de la courbe de rétention

Les différentes méthodes de détermination de la courbe de rétention en laboratoire consistent à établir une série d'équilibres entre l'eau de l'échantillon et une masse d'eau à des potentiels connus. Des presses de Richards sont utilisées pour mesurer les teneurs en eau des échantillons placés à différentes pressions de l'eau.

La presse à plaque, également appelée « presse de Richards », est un appareil qui permet de suivre l'évolution de la teneur en eau d'échantillons de sol en fonction de la pression appliquée sur ces échantillons (Figure 3.8). Le potentiel de l'eau dans le sol est déterminé par application d'une pression pneumatique de plus en plus forte sur des échantillons de sol non remaniés.

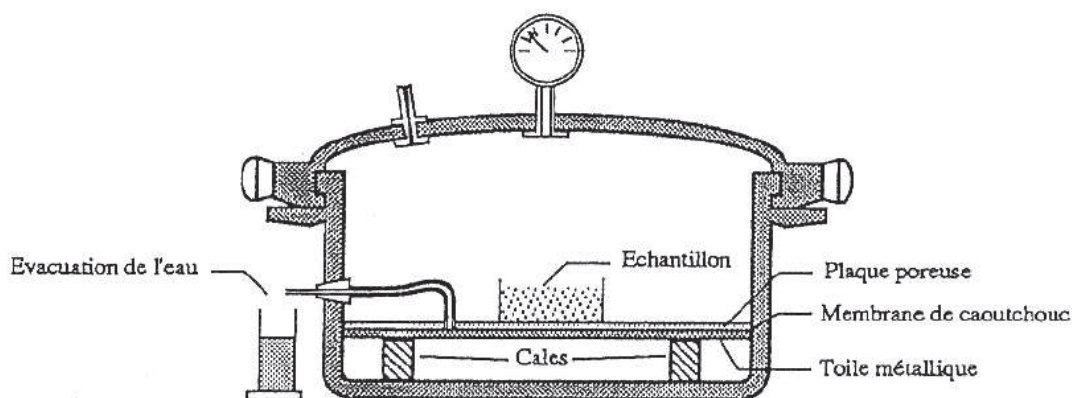


Figure 3.8 : Schéma d'une presse de Richards (Musy et Soutter, 1991)

Les échantillons de sol prélevés sont soumis à une humectation préalable par capillarité afin d'atteindre la saturation. Le système de saturation est composé d'un plateau percé en son bord par un orifice où se loge un tuyau d'alimentation en eau, d'un substrat poreux composé de billes de verres d'une taille de 45 à 90 μm disposé en une couche de 3 à 4 cm recouvert à sa surface par 2 épaisseurs de toile en nylon dont la maille ne doit pas excéder 50 μm pour maintenir les billes de verre en position. Ces toiles en nylon éviteront que les échantillons partiellement submergés soient contaminés par les billes de verre au cours de la saturation. Les échantillons non remaniés sont équipés à leur base d'une toile dont l'ouverture de maille est importante pour assurer le contact à l'interface sol-plaque. Celle-ci est identifiée et pesée. Cette toile assure le maintien des échantillons pour faciliter leur manipulation au cours des différentes opérations de préparation et de pesée. Ces échantillons sont déposés sur le substrat saturant à l'aide d'une spatule (Labat, 2006).

Les échantillons saturés sont pesés et placés sur une plaque poreuse enduite d'une couche de kaolinite afin d'établir une continuité hydraulique entre les échantillons et la plaque. L'ensemble est placé dans l'enceinte à pression, munie d'un manomètre qui permet de réguler la pression d'air appliquée sur les échantillons (Musy et Soutter, 1991 ; Klute, 1986) (Photo 3.3).

On ajuste la pression de l'air dans la marmite. Dès que la pression à l'intérieur de la marmite dépasse la pression atmosphérique, l'eau retenue dans le sol est extraite et s'écoule à travers les pores de la plaque poreuse. Cette plaque poreuse a des pores de rayon très faible ($< 9,37 \cdot 10^{-2} \mu\text{m}$) qui restent saturés jusqu'à des pressions de 16000 cm de hauteur d'eau (pF 4,2). La notion de pF correspond à la valeur absolue du potentiel matriciel exprimé en logarithme décimal de la hauteur d'eau (h) exprimée en cm : $pF = \log_{10} |h|$. L'eau contenue dans l'échantillon va s'évacuer vers l'extérieur via une tubulure d'exhaure. Pour une pression donnée, l'écoulement cesse dès que l'équilibre entre la pression à l'intérieur de la marmite et les forces de succion dans l'échantillon de sol est atteint. On mesure la masse humide au potentiel donné, puis la masse sèche de l'échantillon séché à 105°C pendant 24 heures, ce qui permet d'obtenir la teneur en eau volumique de l'échantillon aux différentes valeurs de pF.

Les différentes pressions appliquées dans le cadre de notre étude sont représentées dans le tableau 3.3.

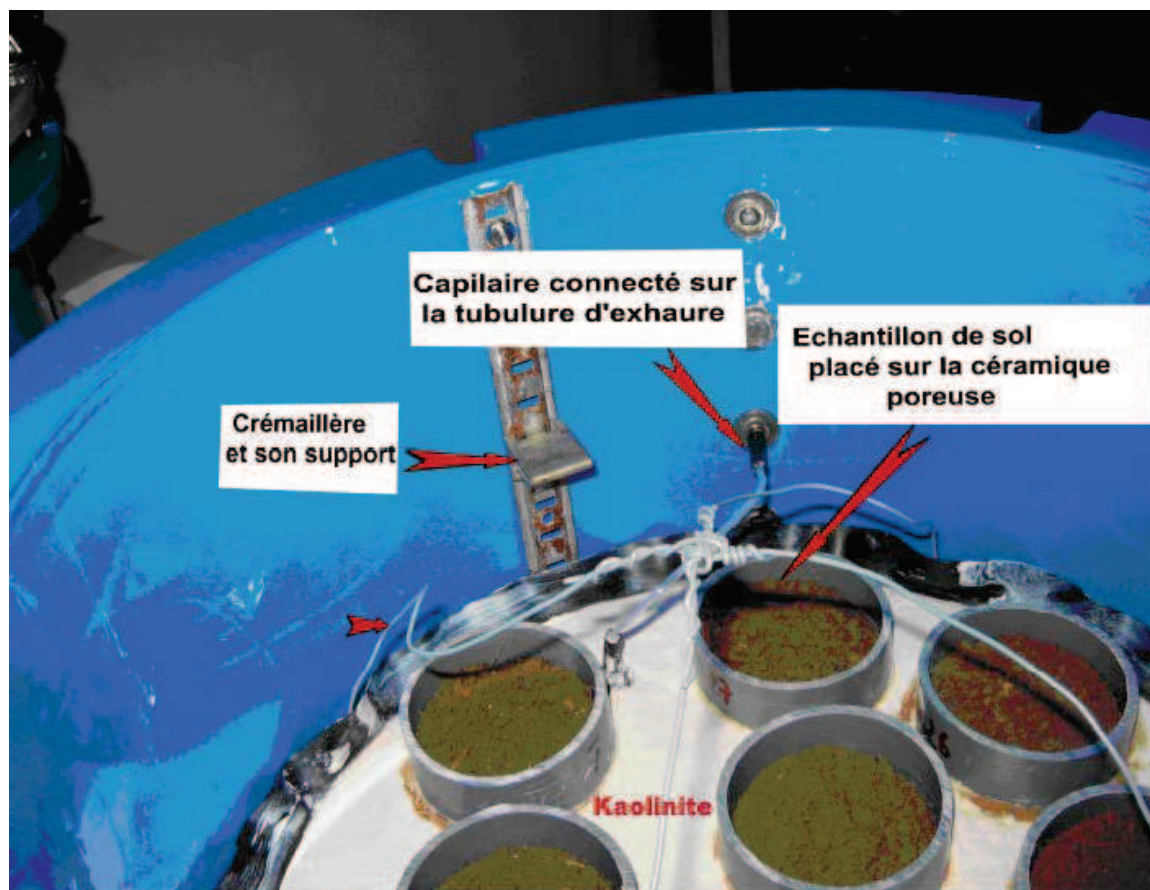


Photo 3.3 : Échantillons de sol placés sur la plaque poreuse dans la presse de Richards (Photo C. Labat)

Tableau 3.3 : Les différentes pressions appliquées aux échantillons

pF	Potentiel matriciel (cm)
1	-10
1,5	-31,5
2	-100
2,2	-160
2,3	-200
2,5	-315
2,9	-1000
3,5	-3160
3,6	-4000
3,8	-6360
4	-10000
4,2	-16000

3.2.3.c Courbes de rétention

La capacité de rétention en eau du sol est traduite par la courbe de rétention qui est la relation entre la teneur en eau du sol d'une part et le potentiel matriciel d'autre part (Figure 3.9). Cette courbe exprime la capacité du sol à retenir l'eau en fonction de l'état énergétique de celle-ci. Dans la figure 3.9, la teneur à saturation est positionnée à $pF=0$.

On observe que le profil de sol présente des caractéristiques de rétention en eau différentes en fonction de la profondeur. Il est aisé de voir que, d'une manière générale, les couches profondes présentent une capacité de rétention plus importante que celles de surface. Ceci peut être lié à une texture plus limoneuse et argileuse en profondeur (Figure 3.6). En effet, le pourcentage de sable diminue en profondeur, ce qui explique une capacité de rétention plus importante en profondeur. A la profondeur 110 cm, la texture du sol est plus argileuse et limoneuse, ce qui pourrait notamment expliquer sa capacité de rétention plus importante que celle des autres profondeurs.

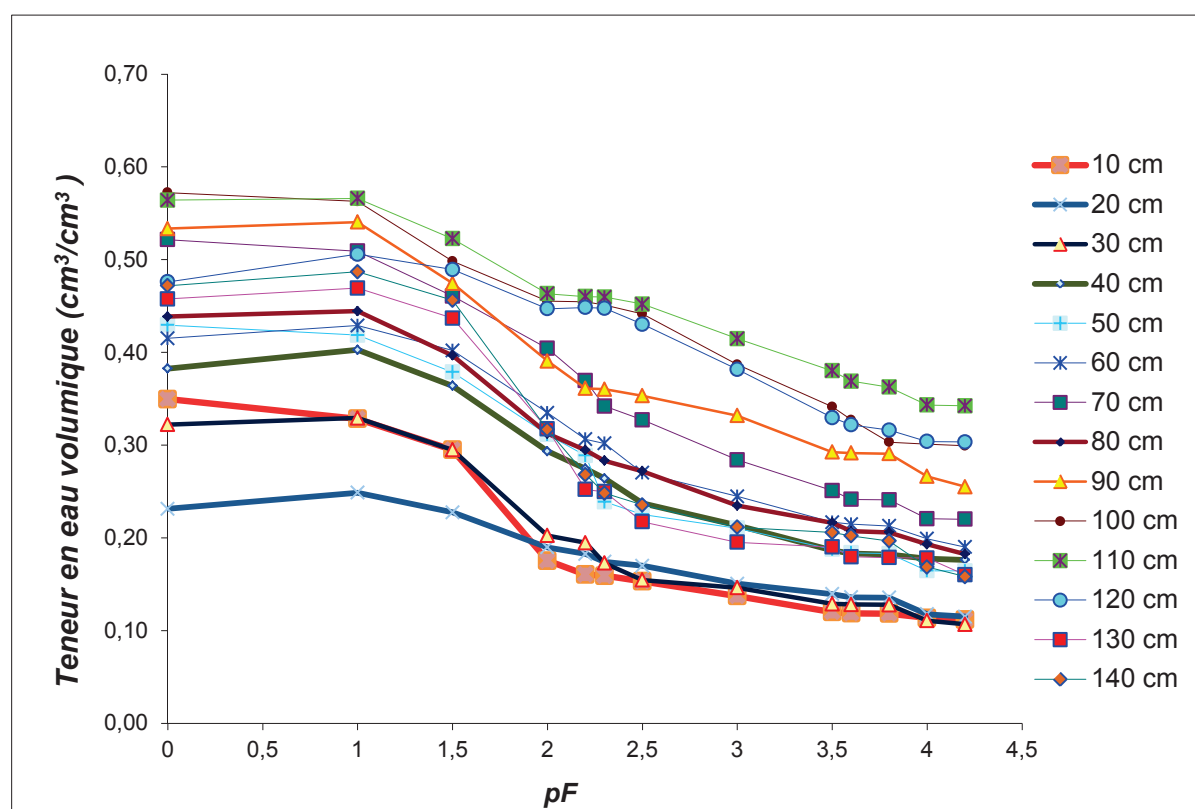


Figure 3.9 : Caractéristiques de rétention en eau pour les différentes profondeurs échantillonnées du profil de sol de la palmeraie.

3.2.3.d Estimation de la conductivité hydraulique à saturation K_s

Dans un sol saturé, le déplacement de l'eau a lieu dans tous les pores interconnectés, alors que dans un sol non saturé, l'eau ne va s'écouler que dans les pores pleins d'eau et interconnectés (Calvet, 2003). La conductivité hydraulique à saturation est une grandeur fondamentale pour la description du transport de l'eau. C'est une grandeur qui caractérise l'aptitude du sol à permettre le déplacement d'une phase aqueuse en son sein. Cette grandeur n'a pas pu être mesurée sur le terrain. Plusieurs facteurs influent sur la valeur de la conductivité hydraulique à saturation K_s , comme la granulométrie, la dimension, la tortuosité et la géométrie des pores (Calvet, 2003). Des corrélations ont pu être établies entre la composition granulométrique du sol et K_s . Ces corrélations sont des fonctions de pédotransferts (PTF) permettant d'estimer les valeurs de K_s d'un sol à partir de sa composition granulométrique et aussi de sa masse volumique apparente (Calvet, 2003).

Dans notre étude, nous avons utilisé l'outil ROSETTA (Schaap *et al.*, 2001) pour estimer K_s . Ce programme prédit K_s en utilisant la classe texturale, la masse volumique apparente (ρ_b) et aussi les teneurs en eau volumiques mesurées aux pF 2,5 et 4,2.

Les K_s estimés avec ROSETTA montrent que la conductivité est plus élevée en surface, là où on a notamment observé un pourcentage élevé en sable (Tableau 3.4).

Tableau 3.4 : Conductivité hydraulique à saturation K_s estimée avec ROSETTA ; ρ_b : masse volumique apparente (g/cm^3) ; θ : teneur en eau volumique (cm^3/cm^3)

Profondeur (cm)	K_s estimée avec Rosetta à partir de la granulométrie et de ρ_b (cm/j)	K_s estimée avec Rosetta à partir de la granulométrie, de ρ_b et de θ mesurée au pF 2.5 et au pF 4.2 (cm/j)
10	62,8	113
20	158	291
30	94,4	144
40	45,1	68,8
50	66,3	102
60	46,3	53,4
70	59,1	38,4
80	33,8	43,9
90	29,1	23,4
100	17,6	7,21
110	12,8	4,81
120	26,7	19,2
130	34,1	61,3
140	27,0	36,3

3.3 Analyse des eaux d'irrigation

Les flacons destinés aux échantillons d'eau pour les analyses d'éléments majeurs sont des flacons de 500 mL en polyéthylène. Ils sont préalablement lavés à l'acide nitrique HNO_3 10% (v/v), solution préparée avec de l'acide nitrique 65% et de l'eau déminéralisée (obtenue par des cartouches de filtration échangeuses d'ions Type R3). Les flacons sont ensuite rincés 2 fois avec l'eau déminéralisée. Sur le terrain, avant remplissage des bouteilles, celles-ci ont été lavées trois fois avec l'eau à prélever. Le remplissage des bouteilles a été fait à ras bord puis

le bouchon vissé afin d'éviter tout échange gazeux avec l'atmosphère. Les échantillons d'eau ont été ensuite transportés dans une glacière à 4°C au laboratoire de chimie du Centre d'Etude et de Recherche de Djibouti (CERD) pour les dosages des ions majeurs et mineurs.

3.3.1 Protocole analytique

Le pH, la conductivité électrique et la température sont mesurés sur le terrain avec un appareil Multi 340i (WTW®) dans le seau de prélèvement (ou directement dans l'eau) après avoir préalablement rincé les électrodes avec l'eau brute. L'étalonnage du pH-mètre et la calibration de la constante de la cellule du conductimètre sont effectués chaque jour de prélèvement, en début de journée. D'une manière générale, les mesures ont été réalisées avec une marge d'erreur égale à $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ pour la température, 1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour la conductivité électrique et 0,01 unité pour le pH.

Les concentrations en cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , K^{+}) et anions (Cl^{-} , SO_4^{2-} , NO_3^{-} , HCO_3^{-}) majeurs ont été déterminées par chromatographie en phase liquide (HPLC) à l'aide d'un chromatographe Dionex™ ICS 3000. Le système d'analyse est constitué d'une pompe, de colonnes (anionique : IonPac AS4A-SC, 4x250mm ou cationique : CS12A, 4x250mm), de surpresseurs et d'une cellule de détection (CSRS) par conductimétrie. Le pilotage des analyses et le traitement des données se font à l'aide du programme Chromeleon® 6.80. Les éluents sont délivrés sous pression d'air sec. La colonne de séparation est protégée par une colonne de garde pour éviter les problèmes de colmatage et de contamination. Le blanc réalisé avec de l'eau Milli-Q et dans les mêmes conditions permet d'apporter des renseignements sur d'éventuelles contaminations lors de la préparation des échantillons. Les conditions opératoires et la composition des éléments utilisés par le système de chromatographie ionique pour les analyses sont résumées dans le Tableau 3.5.

Les protocoles expérimentaux ISO 10304-1:2007 et ISO 14911:1998 ont été appliqués respectivement pour les dosages des anions et des cations dissous par chromatographie ionique. Les seuils de détection sont de 0,06 mg/L pour Ca^{2+} , 0,05 mg/L pour Mg^{2+} , 0,87 mg/L pour Na^{+} , 0,13 mg/L pour K^{+} , 0,02 mg/L pour NH_4^{+} , 0,05 mg/L pour Cl^{-} , SO_4^{2-} et NO_3^{-} .

Tableau 3.5 : Conditions opératoires utilisées pour les analyses en chromatographie ionique.

Paramètre	Anions	Cations
Colonnes	IonPac AS4A SC-4mm analytical column (250 mm × 4 mm I.D.), AG4A SC 4 mm guard	IonPac CS12A analytical column (250 mm × 4 mm I.D.), CG12A guard
Composition de l'éluant	1,7 Mm NaHCO ₃ + 1,8 Mm Na ₂ CO ₃	22 Mm H ₂ SO ₄
Flux de l'éluant	1 mL/min	1 mL/min
Surpresseur ASRS	Surpresseur auto-régénérant ULTRA II (4 mm)	Surpresseur auto-régénérant ULTRA II (4 mm)
Détection	Conductivité surpressée	Conductivité surpressée
Volume d'injection	10 µL	10 µL
Pression	1400 psi	1400 psi

Les solides totaux dissous (TDS) ont été mesurés à 105 °C selon la norme NF T 90-029.

Les carbonates et bicarbonates ont été dosés selon la méthode de Gran (NF EN ISO 9963-2 et NF EN ISO 9963-1).

Pour chaque échantillon d'eau, les sommes des charges des cations (Σ^+) et des anions (Σ^-) analysés ont été calculées en µeq/l. La somme des cations (Σ^+) et des anions (Σ^-) en µeq/l permet de calculer la balance ionique (NICB pour Normalized Ionorganic Charge Balance) selon la formule :

$$NICB = \frac{\Sigma^- - \Sigma^+}{\Sigma^- + \Sigma^+} * 100$$

La balance ionique NICB sert à contrôler la qualité des analyses physico-chimiques en éléments majeurs des échantillons d'eaux.

Les résultats montrent clairement que l'eau utilisée a une salinité non négligeable, avec une conductivité de 3383 µS/cm (Tableau 3.6). Cette forte conductivité est due aux fortes concentrations en ions chlorure (Cl⁻) et sodium (Na⁺) qui dépassent largement les valeurs

maximales admissibles par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Les analyses isotopiques et hydrochimiques de l'aquifère faites par Bouh (2006) ont montré que cette salinité chlorurée des eaux souterraines était en partie due à un mélange avec de l'eau de mer actuelle, mais probablement aussi avec de l'eau de mer plus ancienne.

Tableau 3.6: Résultats des analyses physico-chimiques de l'eau

PARAMETRES	RESULTATS	UNITE	Valeurs maximales et gammes admissibles Norme OMS
PARAMETRES PHYSIQUES			
Température	23	°C	
pH à 23°C	7,27	unité pH	6,5 – 9,2
Conductivité électrique à 21°C	3383	µS/cm	
ANION			
Chlorure (Cl ⁻)	938,15	mg/L	600
Bicarbonate (HCO ₃ ⁻)	177,25	mg/L	-
Carbonate (CO ₃ ²⁻)	-	mg/L	-
Sulfate (SO ₄ ²⁻)	165,55	mg/L	400
Nitrate (NO ₃ ⁻)	20,2	mg/L	50
CATION			
Sodium (Na ⁺)	375,56	mg/L	200
Potassium (K ⁺)	18,8	mg/L	-
Calcium (Ca ²⁺)	121,15	mg/L	200
Magnésium (Mg ²⁺)	153,52	mg/L	150
PARAMETRE GENERAL			
Minéralisation totale calculée	1954	mg/L	
Résidu sec	1854	mg/L	
Déséquilibre (NICB)	3	(%)	

3.4 Données climatiques

Pour le calcul de l' ET_0 selon la méthode du FAO Penman-Monteith, il est nécessaire de connaître plusieurs paramètres climatiques :

- la température de l'air,
- le rayonnement solaire,
- l'humidité de l'air,
- la vitesse du vent.

Pour obtenir l'ensemble de ces paramètres, nous avons installé une station météo dans la palmeraie. La station installée est une station WatchDog 2000 series Model 2900ET (Spectrum Technologies, Inc, 12360 S. Industrial Dr. E Planifield Illinois, USA) (Photo 3.4). La station mesure l'ensemble des paramètres climatiques : vitesse du vent, température, humidité relative, précipitations et rayonnement solaire.

Les mesures sont acquises à des pas de temps de 30 minutes, et l'ensemble des données mesurées par la station sont transférées sur l'ordinateur via un port AUX et sont traitées grâce au logiciel Specware 9 Pro version 9.03 (Spectrum Technologies, Illinois, USA). Le suivi climatique a été réalisé du mois de janvier 2013 au mois de juin 2014 (Tableau 3.7).



Photo 3.4 : Photo de la station météo installée dans la palmeraie

Tableau 3.7 : Données climatiques de la station météo de la palmeraie (période de janvier 2013 à juin 2014)

Mois	Température moyenne (°C)	Rayonnement solaire moyen (W/m ²)	Humidité relative moyenne (%)	Vitesse du vent moyenne (m/s)	Précipitations moyenne (mm)	ET ₀ calculée moyenne (mm)
janv-13	25,90	175,37	61,85	0,61	2,50	163,1
févr-13	25,87	210,23	60,75	0,63	0,00	173,3
mars-13	27,55	195,53	67,27	0,66	54,20	178,5
avr-13	30,33	235,03	62,77	0,67	1,10	214,2
mai-13	32,31	221,93	59,67	0,47	6,70	203,1
juin-13	35,63	197,40	36,10	0,51	0,00	218,5
juil-13	38,31	195,74	26,92	1,28	0,20	290,5
août-13	41,00	336,81	24,57	1,09	0,00	300,0
sept-13	33,81	213,57	52,01	0,50	0,70	163,8
oct-13	30,93	205,21	57,24	0,42	0,00	199,2
nov-13	28,26	187,98	61,41	0,44	5,90	170,7
déc-13	25,97	182,36	58,54	0,44	0,00	169,2
janv-14	25,22	180,00	61,79	0,48	0,20	163,2
févr-14	25,87	173,09	63,29	0,49	0,00	142,2
mars-14	27,50	210,36	63,70	0,56	0,20	191,9
avr-14	29,86	229,31	61,67	0,47	0,00	206,8
mai-14	32,24	216,60	60,11	0,49	0,00	211,8
juin-14	33,86	195,35	42,62	0,47	0,00	149,3

3.4.1.a Température

La palmeraie est caractérisée par une température moyenne annuelle de 31,2°C pour l'année 2013. Les mois les plus chauds sont août et juillet avec des températures moyennes pouvant aller jusqu'à 41°C. Pour la saison fraîche, la température moyenne mensuelle descend à 25,2°C (au mois de janvier, Tableau 3.7). La plus température la plus faible enregistrée sur la période d'étude (janvier 2013 à juin 2014) est de 20,8 °C, et la plus élevée est de 44,6°C.

3.4.1.b Rayonnement solaire

Dans la palmeraie, le rayonnement solaire moyen annuel est de 213,1 W/m² pour l'année 2013 (Tableau 3.7).

Avec un rayonnement solaire moyen de 336,81 W/m², le mois d'août est le plus lumineux. Le plus faible rayonnement solaire moyen est enregistré durant le mois de février 2014 et est de 173,09 W/m².

3.4.1.c Humidité relative

L'humidité relative est assez élevée durant toute l'année 2013. Elle est en moyenne de 52,4 %. Les plus forts taux d'humidité sont enregistrés durant la saison fraîche et varient de 52 à 62 %. Durant la saison chaude, ce taux d'humidité est faible et varie de 24 à 36 % (Tableau 3.7).

3.4.1.d Vitesse du vent

Dans la palmeraie, la vitesse moyenne annuelle du vent reste assez faible (0,64 m/s) pour l'année 2013. C'est durant l'été qu'on enregistre des vitesses plus importantes de l'ordre de 1 à 1,28 m/s (Tableau 3.7). En effet, c'est durant cette période que souffle le vent chaud appelé « *Khamsin* » venant de l'ouest. La vitesse moyenne maximum enregistrée est de 1,3 m/s.

3.4.1.e Précipitations

Comme dans l'ensemble du reste du pays, la palmeraie enregistre une très faible pluviométrie (Tableau 3.7). Durant l'année 2013, on n'a enregistré que 71,3 mm de pluie. Le mois de mars 2013 a été le plus pluvieux avec une précipitation de 54 mm tombée sous la forme d'une grosse averse en une journée. Ces pluies diluviennes provoquent des dégâts énormes sur les cultures situées à côté des lits d'oued.

3.4.1.f Evapotranspiration potentielle (ET_0)

L' ET_0 mensuelle moyenne calculée pour la palmeraie est de 200,6 mm pour la période 2013 (Tableau 3.7). C'est durant l'été, où les températures sont élevées, qu'on enregistre les plus fortes ET_0 : 290 mm au mois de juillet et 300 mm au mois d'août. En 2013, l' ET_0 cumulée enregistrée est de 2444 mm, soit 6,7 mm par jour et correspond aux valeurs d' ET_0 couramment enregistrées dans la zone (entre 2001 et 2500 mm/an) (cf : Figure 1.5).

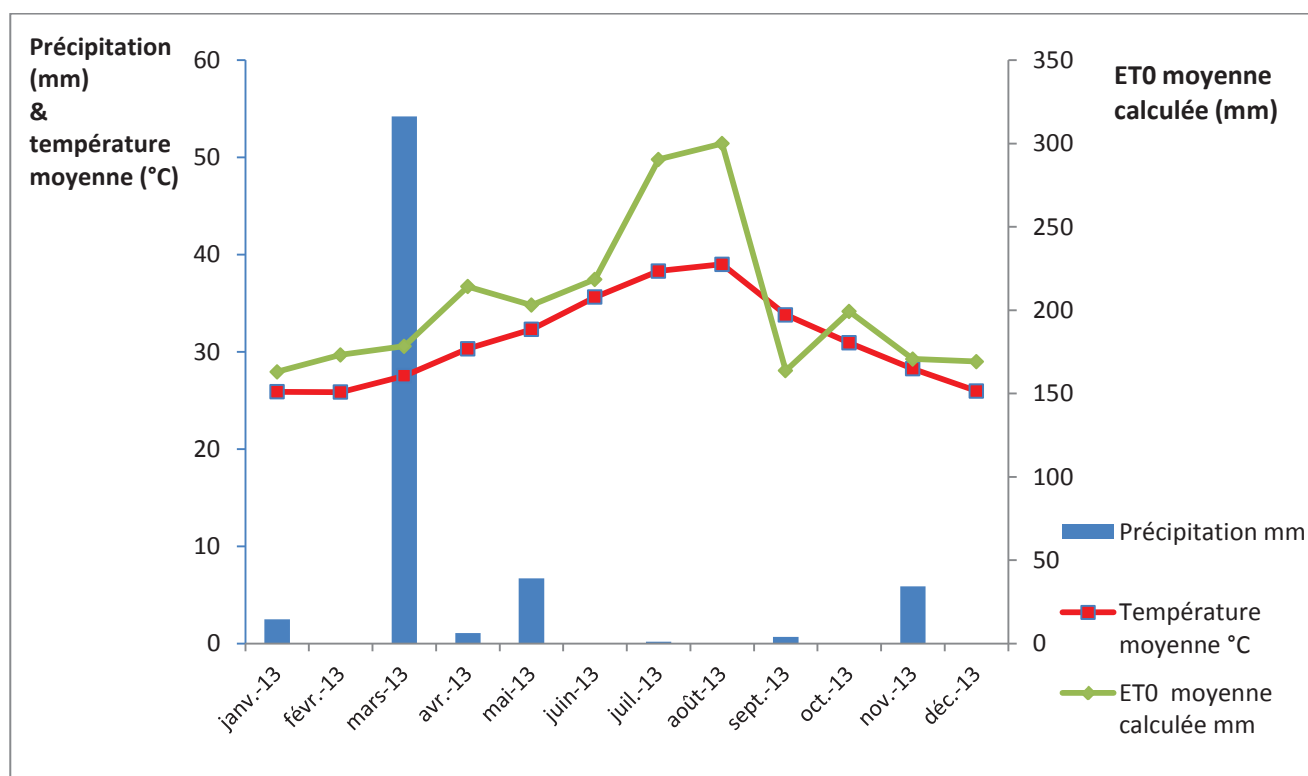


Figure 3.10 : Diagramme ombrothermique de la palmeraie, année 2013.

Classé dans les pays subtropicaux à climat aride à semi-aride, le climat djiboutien est marqué par une faible pluviométrie, des températures élevées et une forte évapotranspiration (Figure 3.10).

3.5 Caractérisation du système racinaire du palmier dattier

Les racines jouent un rôle important dans le fonctionnement et la production des plantes. L’approvisionnement en eau, en nutriments se font grâce aux racines. Il est de ce fait important de connaître la distribution spatiale des racines dans le sol (densité racinaire) pour une gestion efficace des cultures.

Il existe plusieurs méthodes permettant une estimation de la densité racinaire sans effectuer de prélèvements d’échantillons. Une des méthodes consiste à creuser une fosse et à appliquer une grille avec des mailles sur le profil et à faire un comptage (ou d’estimer) le nombre d’impacts racinaires par maille (Bohm, 1979). On obtient alors des données quantitatives (nombre d’impacts racinaires par unité de surface de profil). En partant de l’hypothèse de radialité du système racinaire du palmier dattier, le comptage est fait sur une section verticale de la cuvette au plus proche du stipe du palmier, sur un demi-plan. Nous avons ouvert une fosse d’une longueur de 240 cm et de 200 cm de profondeur sous le palmier (Photo 3.5).

Le comptage racinaire a ensuite été effectué en divisant le mur de la fosse en un maillage de 20 cm de côté dans lequel le nombre d'impacts racinaires a été compté pour obtenir une densité racinaire par unité de surface (Photo 3.6). Toutes les racines sont comptées quelles que soient leurs tailles.

La cartographie racinaire peut alors être établie avec un traitement statistique des données (Tardieu et Manichon, 1986). Pour cela, nous avons utilisé le logiciel SURFER 10, qui permet de convertir les données du comptage en cartes, par interpolation par krigeage.



Photo 3.5 : Fosse ouverte sous le palmier pour le comptage racinaire.



Photo 3.6 : Division du profil de la fosse en un maillage de 20 cm de côtés pour le comptage racinaire.

3.6 Suivi de l'état hydrique du sol

3.6.1 Mesure de la teneur en eau volumique du sol par la sonde à neutrons

La mesure de teneur en eau du sol se fait soit par des mesures directes (par prélèvement et mesures au laboratoire), soit par des mesures indirectes (sur le terrain) (Gardner, 1986).

La méthode directe est la méthode gravimétrique. Cette méthode consiste à prélever des volumes de sol et estimer ensuite au laboratoire leur teneur en eau par mesure de la perte de masse de l'échantillon après un passage à l'étuve (105°C). Cette méthode, certes précise, est destructrice (Dirksen, 1999).

La méthode gravimétrique, étant destructive, pose aussi le problème de la variabilité spatiale du sol. En effet, à chaque échantillonnage, même en prélevant l'échantillon à la "même" profondeur, chaque prise de mesure correspond à un nouveau point (Klute, 1986).

Les mesures indirectes consistent généralement en des mesures de terrain. Parmi ces mesures indirectes, les techniques radiologiques, telles que l'humidimétrie neutronique, ont l'avantage

d'être non destructrices. La sonde à neutrons (Figure 3.11) est un instrument électronique doté d'une source radioactive qui est descendue dans un tube d'accès installé dans le sol. La sonde permet une mesure de la teneur en eau via la détection de la densité d'atomes d'hydrogène présents dans le sol autour de la source.

Cette méthode neutronique offre plusieurs avantages, dont les plus importants sont d'être non destructive et de permettre la répétition des mesures (Chanasyk et Naeth, 1996).

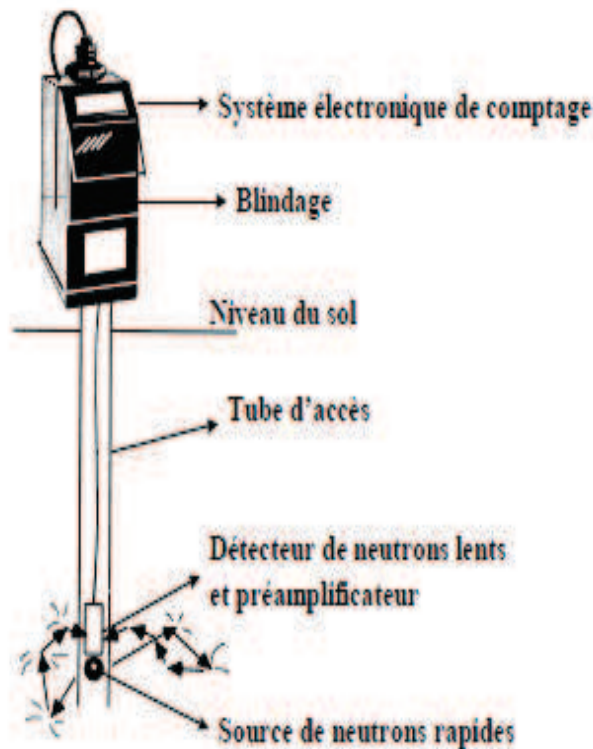


Figure. 3.11 : Sonde à neutrons (Source: Campbell Pacific Nuclear (CPN®), 503 DR Hydroprobe – Notice d'utilisation).

La méthode de mesure avec la sonde à neutrons permet le suivi temporel de la teneur en eau des différentes couches de sol, sur une verticale, matérialisée par le tube d'accès de la sonde placé dans le sol (Coquet, 1995).

La source de neutrons, descendue dans le tube d'accès, émet des neutrons rapides qui vont interagir avec les atomes d'hydrogène présents dans le sol (Figure 3.12). Un "nuage" stable de neutrons lents se forme rapidement autour de la source. Il présente une forme sensiblement sphérique, avec un diamètre de 15 à 25 cm environ, variable selon l'état du sol. Ce diamètre est d'autant plus grand que le sol est plus sec.

Le nombre de neutrons lents par unité de volume est proportionnel à la quantité d'eau présente dans le sol traversé par les neutrons.

Du fait que le détecteur de neutrons lents se situe dans le volume de ce nuage, le comptage est proportionnel à la teneur en eau pour ce même volume de sol. La correspondance entre teneur en eau et comptage résulte d'un étalonnage à partir d'échantillons de sol prélevés dans le volume occupé par le nuage de neutrons et pour lesquels sont effectuées des mesures de teneur en eau par la méthode gravimétrique.

Pour effectuer des mesures, la sonde est descendue dans le sol, à la profondeur désirée, à l'intérieur d'un tube d'accès en aluminium qui est "transparent" aux neutrons rapides. Un système électronique de comptage indique le nombre de neutrons thermalisés détectés (AIEA, 2003).

Dans notre étude, nous avons utilisé une sonde à neutrons CPN 503 Hydroprobe (Campbell Probe Nuclear) à Americium-241/Beryllium d'activité 50 mCi (1.85 GBq) acquise chez ICT International (Photo 3.6).

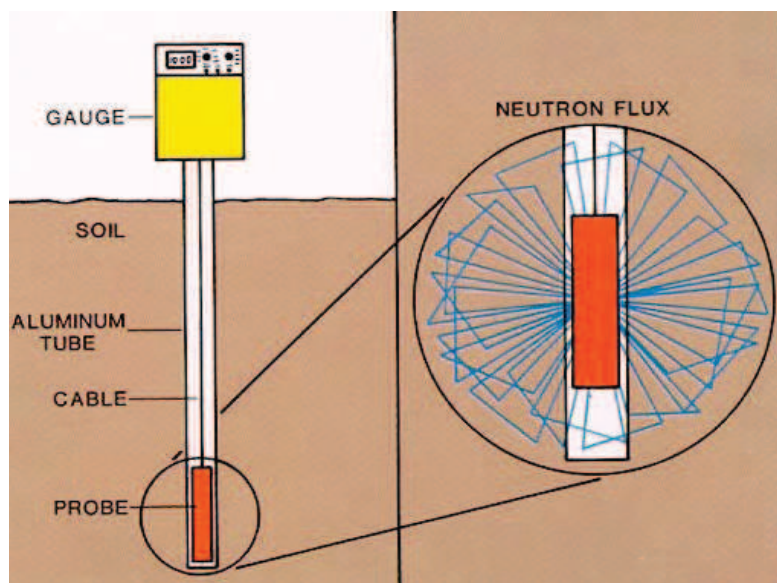


Figure 3.12 : Représentation schématique du déploiement des neutrons autour de la sonde (Source : AIEA, 2003).



Photo 3.6 : Sonde à neutrons Campbell Pacific Nuclear (CPN®), 503 DR Hydroprobe.

3.6.2 Mesure du potentiel de l'eau dans le sol par tensiométrie

Pour de nombreuses études, la teneur en eau du sol représente une information primordiale. Cependant, pour les études impliquant les flux d'eau (stockage et transport) et les relations sol-eau-plante, l'état énergétique de l'eau du sol représente une variable importante à étudier (Cassell et Klute, 1986). Cette variable d'état du sol, qui définit l'état énergétique de l'eau du sol, est appelée « potentiel de l'eau ».

Concrètement, le potentiel de l'eau du sol traduit la quantité d'énergie qu'il faudrait exercer pour extraire celle-ci du sol. Il est exprimé en quantité d'énergie par unité de poids d'eau, appelée « charge hydraulique (H) », exprimée en unité de longueur (cm). Par convention, le potentiel de l'eau à la pression atmosphérique est nul.

Les différentes composantes du potentiel de l'eau du sol sont :

- Le potentiel osmotique, h_0 , lié à la présence de solutés dans l'eau du sol,
- Le potentiel gravitaire, h_g , lié à la gravité terrestre. Le potentiel gravitaire de l'eau à la surface du sol a une valeur nulle. Le potentiel gravitaire s'exprime, en unité de charge hydraulique, par : $h_g = z$, où z est l'altitude du volume de sol considéré axe orienté vers le haut.
- Le potentiel hydrostatique, h_h , lié à la pression exercée par une colonne d'eau de hauteur h (en cm) en milieu saturé. Cette pression est supérieure à la pression atmosphérique. Le potentiel hydrostatique est donc toujours positif.
- Le potentiel matriciel, h_m , lié en milieu insaturé à l'existence des forces matricielles dues à la fois à la nature poreuse du sol et à la présence de minéraux argileux. Il est le résultat des forces capillaires et des forces d'adsorption. Ce potentiel est toujours négatif.

Le potentiel matriciel, h_m , dont la valeur absolue (positive) est aussi appelée « succion », est mesuré grâce au tensiomètre. Les tensiomètres mesurent le potentiel matriciel sur la base des forces capillaires exercées par le sol sur l'eau (Schmugge *et al.*, 1980). En effet, l'eau contenue dans le tensiomètre se met en équilibre avec l'eau du sol avoisinant. Cette eau est entraînée hors du tensiomètre via la bougie poreuse en cas d'assèchement du sol, ce qui engendre une pression plus faible dans le tensiomètre. En période de rehumectation, l'eau reflue dans le tensiomètre et fait remonter la pression à l'intérieur du tensiomètre. Selon les modèles de tensiomètres utilisés, ces variations de pression sont indiquées soit sur l'appareil de mesure du tensiomètre (manomètre), soit par lecture avec un tensimètre électronique. Dans notre étude, nous avons utilisé le système de tensiomètre à eau avec lecture à l'aide tensimètre électronique SMS 2500S (SDEC France, France) (Photo 3.7).



Photo 3.7 : Tensiomètres avec bougie poreuse et tensimètre électronique SMS 2500S de SDEC France.

Pour plus de fiabilité et pour éviter la formation de bulles dans les tensiomètres, l'eau utilisée a été préalablement dégazée. La lecture se fait en plaçant le tensimètre électronique SMS 2500S sur le tube tensiométrique, nous donnant ainsi accès à la valeur de la charge hydraulique « H » à la profondeur d'implantation « Z » du tensiomètre. Le SMS 2500S restitue des résultats au millibar (ou cm de hauteur d'eau) près sur toute sa gamme (0 à -999 mbar) (SDEC).

3.6.3 Dispositif expérimental

Les instruments de mesures (tubes d'accès de la sonde à neutrons et tensiomètres) ont été répartis axisymétriquement autour du stipe, selon 4 cercles concentriques, noté de a à d, et selon 12 rayons, notés de A à L (Figure 3.13 et Photo 3.8). Six tubes d'accès pour la sonde à neutrons et 27 tensiomètres implantés à différentes profondeurs ont été installés dans la cuvette du palmier.

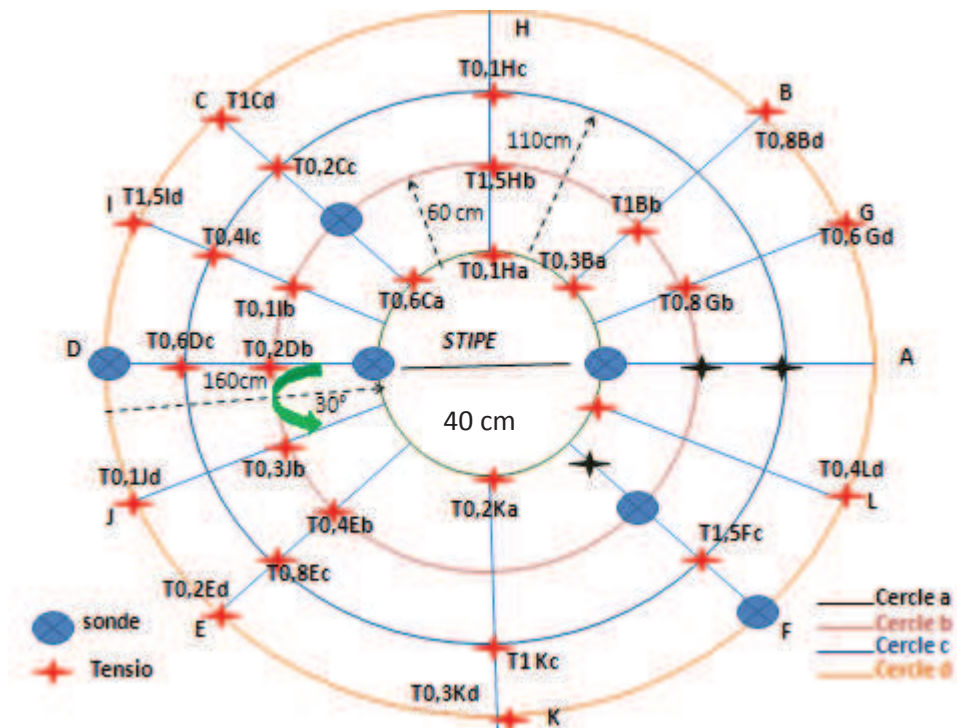


Figure 3.13 : Schéma de la répartition des tubes d'accès de la sonde et tensiomètre sous le palmier. Le nombre associé à chaque tensiomètre indique sa profondeur d'installation (en m).



Photo 3.8 : Le dispositif expérimental (tubes d'accès de la sonde à neutrons et tensiomètres) installé dans la cuvette du palmier dattier étudié.

3.6.3.a Installation des tubes d'accès de la sonde à neutrons

Des trous sont effectués avec une tarière afin d'installer les tubes d'accès (Photo 3.9). Les tubes sont installés à différentes profondeurs (Tableau 3.8). Au cours de l'installation, on a prélevé des échantillons de sols pour les mesures de teneur en eau massique le jour de la mise en place des tubes, afin d'effectuer l'étalonnage de la sonde (Photo 3.10). Ces échantillons de sol sont prélevés par tranches de 10 à 20 cm d'épaisseur jusqu'à la profondeur maximale à laquelle est installé le tube d'accès.

Tableau 3.8 : Profondeur des tubes d'accès de la sonde à neutrons.

Code d'identification des tubes d'accès de la sonde	Profondeur (cm)
Aa	130
Cb	150
Da	160
Dd	140
Fb	140
Fd	130



Photo 3.9 : Installation des tubes d'accès de la sonde à neutrons



Photo 3.10: Echantillons de sol prélevés pour l'estimation de la teneur en eau massique le jour de l'installation de tubes.

3.6.3.b Etalonnage de la sonde

Dans le sol, il existe d'autres molécules que les molécules d'eau, portant des atomes d'hydrogène, notamment dans la matière organique du sol. De ce fait, il est impossible d'établir une relation de proportionnalité unique, valable pour tous les horizons de sol, entre les comptages des neutrons thermalisés et la quantité d'eau contenue dans le sol (Coquet, 1995). Il est donc nécessaire de faire un étalonnage spécifique pour chaque sol et chaque profondeur étudiée. L'étalonnage de la sonde fournit un lien quantitatif entre les comptages de neutrons thermalisés dans le sol et la teneur en eau volumique du sol. La mesure réalisée par la sonde à neutrons n'est pas ponctuelle. Elle mesure la teneur en eau volumique du sol dans une sphère d'environ 15 à 25 cm de rayon, selon l'état hydrique du sol (Coquet, 1995) (Figure 3.12). En conséquence, les prélèvements de sol pour les mesures de teneur en eau massique réalisés pour l'étalonnage de la sonde à neutrons ont été faits sur une tranche de 10 à 20 cm d'épaisseur. Pour obtenir le profil de teneur en eau volumique à partir des mesures de teneur en eau massique, des mesures de masse volumique apparente ont été réalisées par la méthode du cylindre (cf : § 3.2.2). Un profil de mesures à la sonde à neutrons est réalisé simultanément dans le tube d'accès concerné. Cela permet d'obtenir un point d'étalonnage de la sonde par niveau de profondeur. Le protocole peut être répété, pour différents états hydriques du sol, afin d'obtenir plusieurs points d'étalonnage par profondeur. Les mesures d'étalonnage ont été effectuées le 18/11/2012.

3.6.3.b-1 Analyse des données brutes d'étalonnage

La relation entre les mesures de comptages réduits (CR) et les mesures de teneur en eau volumique (θ) est représentée dans les graphiques des figures 3.14 et 3.15. On distingue deux groupes de points : les points de surface (10 cm, 20 cm) et le reste de points (profondeur ≥ 20 cm). On peut donc envisager d'utiliser deux droites d'étalonnage différentes pour ces deux séries de points. On remarque d'autre part que deux points sortent des nuages de points : ce sont les points du tube Aa à 120 cm et 130 cm. Ces deux points seront considérés comme non fiables, et, de ce fait, ne seront pas pris en compte dans le calcul des droites de régression.

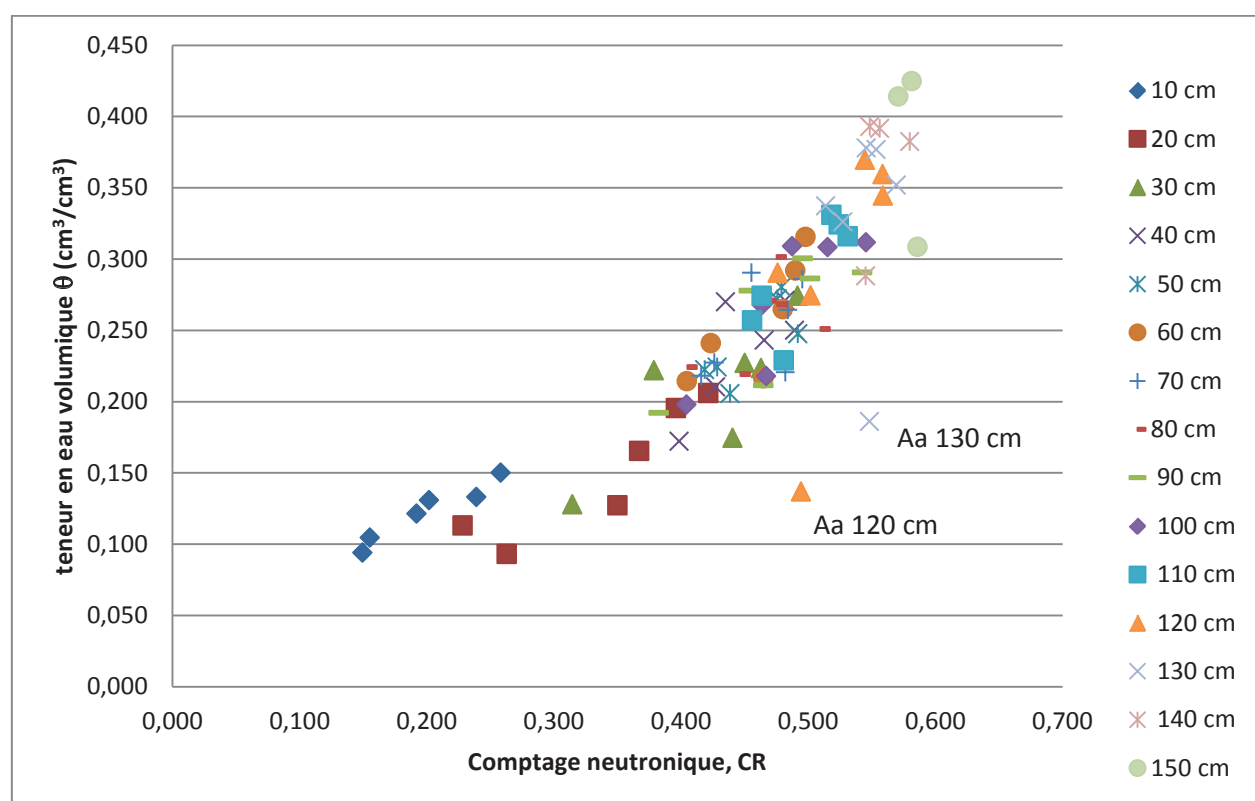


Figure 3.14 : Relation entre comptage neutronique réduits (CR) et teneur en eau volumique (θ) mesurée le jour de l'installation des tubes d'accès de la sonde à neutrons, par niveaux de profondeur.

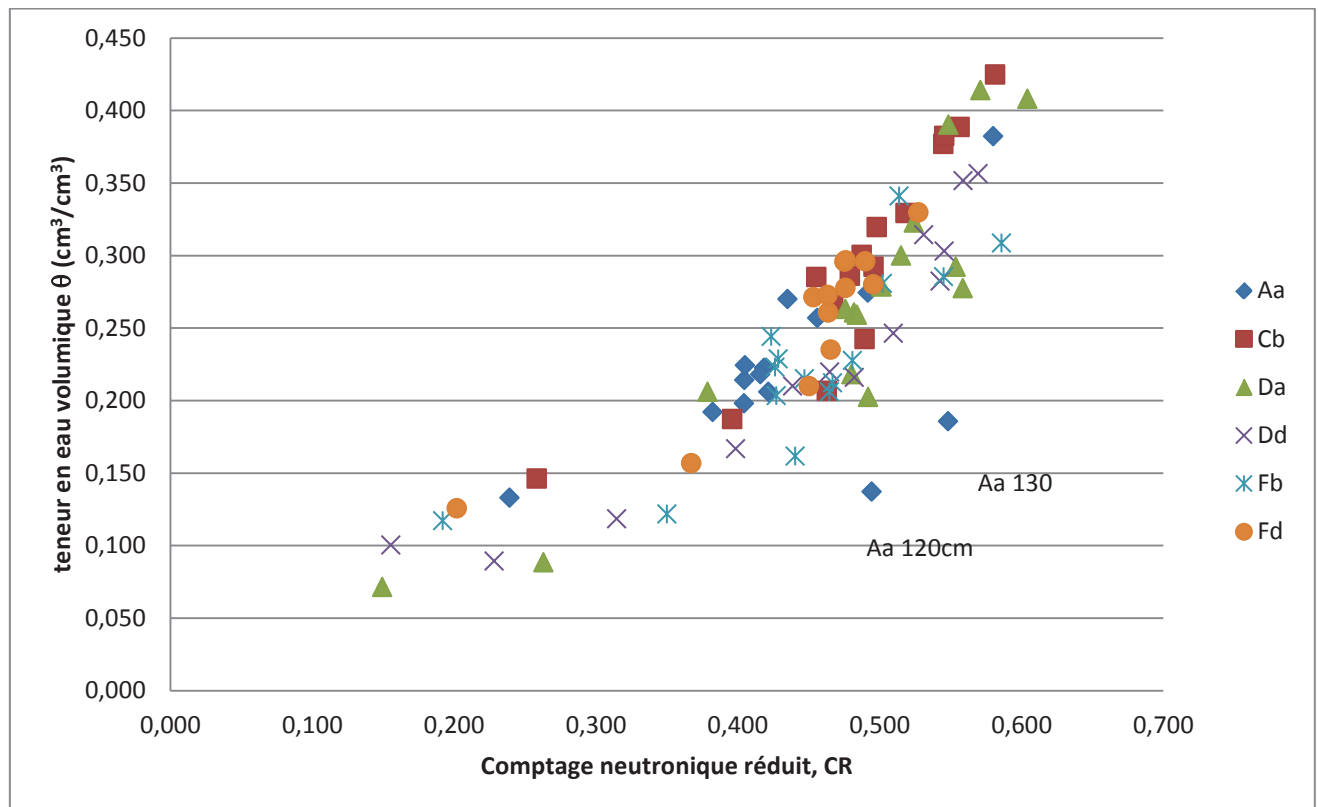


Figure 3.15 : Relation entre comptage neutronique réduits (CR) et teneur en eau volumique (θ) mesurée le jour de l'installation des tubes d'accès de la sonde à neutrons, par tube d'accès.

Des tests statistiques de comparaison des droites de régression ont été réalisés afin de vérifier si l'hypothèse d'une distinction de ces deux droites d'étalonnage était justifiée.

Pour cela, un test d'homogénéité des variances résiduelles des régressions linéaires (test de Fisher- dispersion des points autour de la droite de régression) est d'abord réalisé par tube, puis par profondeur.

3.6.3.b-2 Analyse par tube

Dans le cadre du protocole expérimental, 6 tubes d'accès pour la sonde à neutrons ont été installés autour du palmier (Figure 3.13).

Il est crucial de savoir si l'on peut utiliser une même droite de régression pour l'ensemble des tubes ou au contraire faire une droite de régression pour chaque tube.

La comparaison des deux droites de régression permet de vérifier s'il existe des différences significatives entre les deux séries de résultats dont on a étudié les régressions linéaires. On compare les droites de régressions entre tubes.

Les tests de comparaison des droites de régression entre tubes révèlent que les droites de régression ne sont pas différentes au seuil de 5% (Tableau 3.9). On peut par conséquent regrouper les données afin de retenir une droite de régression unique pour l'ensemble des tubes (Figure 3.16).

Tableau 3.9 : Comparaison des droites de régressions par tubes (niveau du test de Fisher).

Tubes d'accès	Aa	Da	Dd	Fb	Fd
Aa	-	-	-	-	-
Da	0,403	-		-	-
Dd	0,482	0,218	-	-	-
Fb	0,341	0,128	0,610	-	-
Fd	0,421	0,419	0,443	0,235	-
Cb	0,366	0,457	0,140	0,078	0,314

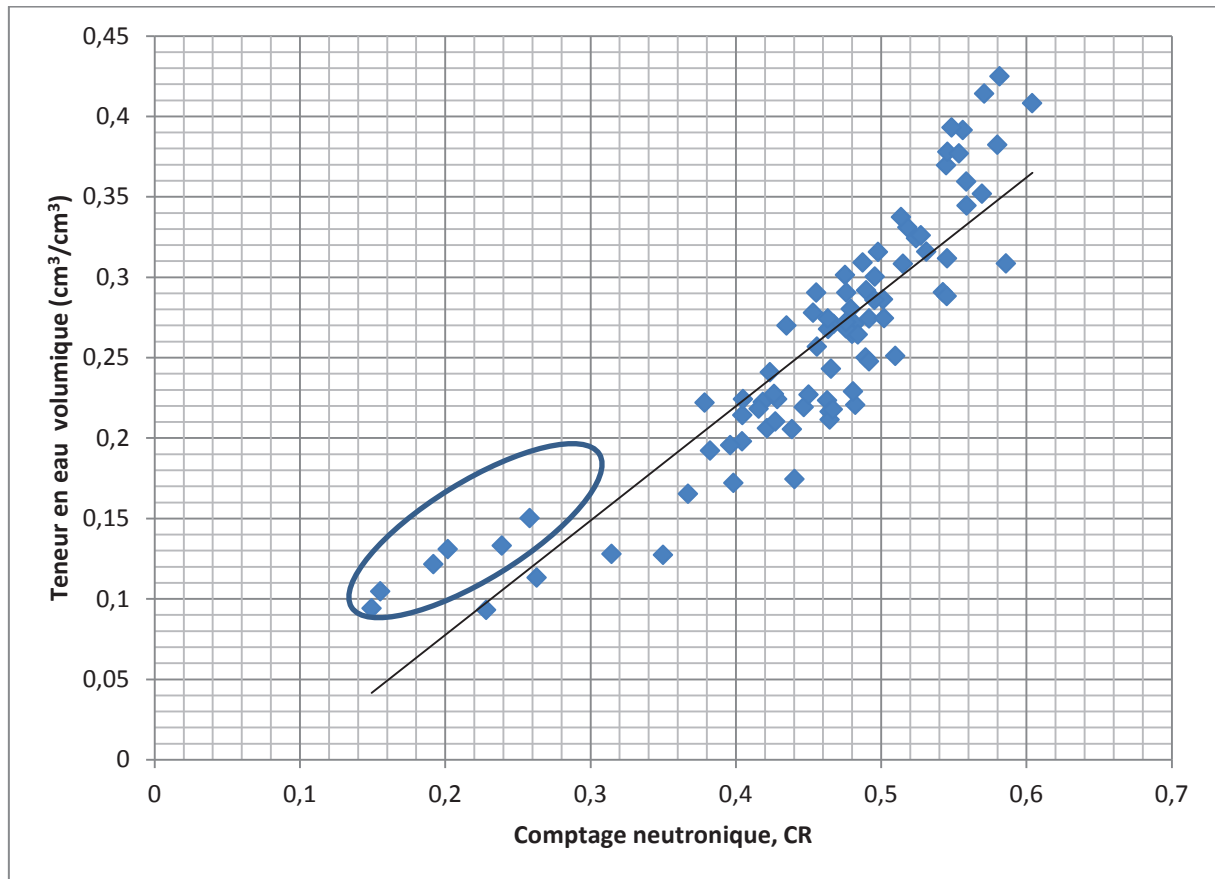


Figure 3.16 : Droite de régression pour toutes les profondeurs de l'ensemble des tubes d'accès.

En observant la figure 3.16, on remarque qu'il y a 6 points qui ont un comportement différent du reste des autres points (points entourés). Il s'agit des points de profondeur 10 cm. Pour vérifier si on doit utiliser une courbe d'étalonnage différente pour ces points, on analyse la variance des droites de régressions pour les points de profondeurs 10 cm et pour l'ensemble des points restants.

3.6.3.b-3 Analyse par niveau de profondeur

Les mesures de suivi hydrique se font à différentes profondeurs grâce à la sonde à neutrons. On vérifie avec le test de Fisher si on doit avoir une droite de régression pour les points de surface (10 cm) et une autre pour l'ensemble des points restants.

Le test de Fisher sur la variance des droites de régressions pour la profondeur 10 cm et l'ensemble des profondeurs ≥ 20 cm nous donne **0,024**. Donc, au seuil de **0,05**, les deux droites de régression sont différentes. On pourra par conséquent utiliser une droite de régression pour les points de surface 10 cm et une droite de régression pour le reste des points (Figure 3.17).

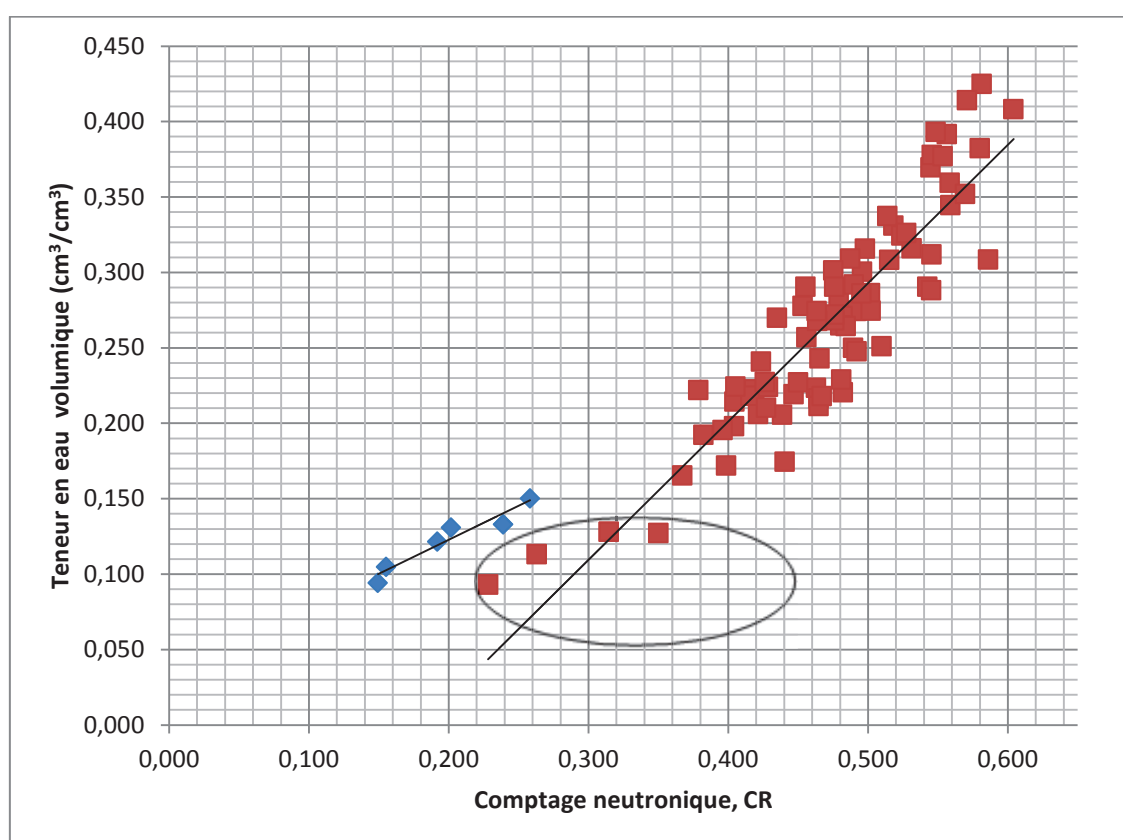


Figure 3.17 : Droite de régression pour les profondeurs 10 cm et les profondeurs ≥ 20 cm

Cependant, on remarque que 4 points se détachent du nuage de points de profondeur ≥ 20 cm. Il s'agit des points 20 cm des tubes Dd, Da, Fb et du point 30 cm du tube Dd. Ces points sont plus proches du nuage de points de la profondeur 10 cm (points rouges entourés Figure 3.17). On va de ce fait utiliser deux demi-droites de régressions différentes pour l'étalonnage de la

sonde : une demi-droite pour les comptages réduits $\leq 0,400$ et une autre pour les comptages $\geq 0,400$ (Figure 3.18).

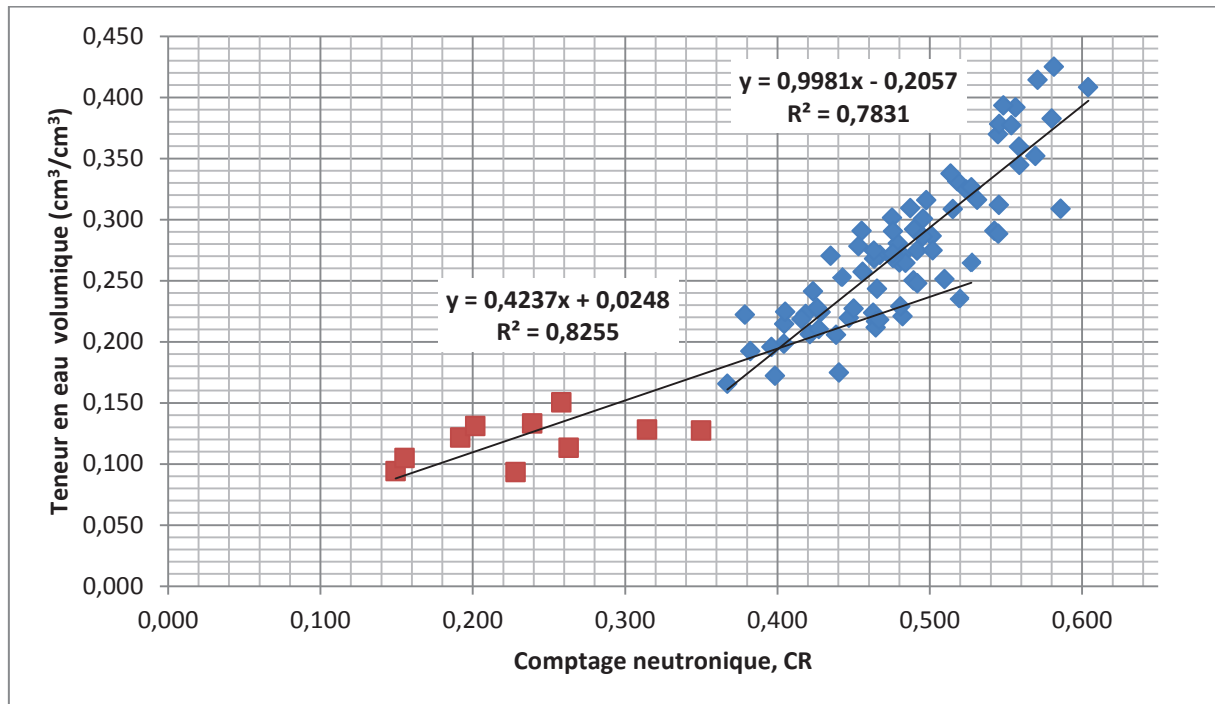


Figure 3.18 : Les deux droites de régressions : celle des points de surface (10 cm), des points de profondeurs 20 cm des tubes Dd, Da, Fb et celui de la profondeur 30 cm du tube Dd et celle des autres points de profondeur ≥ 20 cm.

Les équations des deux demi-droites sont :

- ❖ $y = 0,4237x + 0,0248$: équation de la demi-droite des points de surface (10 cm), des points de profondeur 20 cm des tubes Dd, Da, Fb et celui de la profondeur 30 cm du tube Dd
- ❖ $y = 0,9981x - 0,2057$: équation de la demi-droite des points des autres points de profondeur ≥ 20 cm.

3.6.3.c Installation des tensiomètres

Les tensiomètres ont été répartis axisymétriquement autour du stipe, selon 4 cercles concentriques, noté de a à d et selon 12 rayons notés de A à L (Figure 3.13). Les tensiomètres sont installés à différentes profondeurs à la même date que les tubes d'accès de la sonde (Tableau 3.10).

Tableau 3.10 : Tensiomètres aux différentes profondeurs autour du stipe du palmier

Profondeur (cm)	Code d'identification du tensiomètre
10	Ha
10	Hc
10	Ib
10	Jd
20	Ca
20	Db
20	Ed
20	Ka
30	Ba
30	Jb
30	Kd
40	Eb
40	Ic
40	Ld
60	Dc
60	Gd
80	Bd
80	Ec
80	Gb
100	Bb
100	Cd
100	Kc
150	Fc
150	Hb
150	Id

3.7 Expérimentations

Afin de répondre aux questionnements de la thèse, nous avons réalisé trois expériences différentes :

- Expérience de drainage interne,
- Expérience en sol nu,
- Expérience avec palmier dattier.

Les deux premières expériences nécessitant l'absence de palmier, nous avons d'abord réalisé la troisième expérience en premier. Ensuite, après coupe du palmier, on a réalisé l'expérience en sol nu, puis l'expérience de drainage interne.

3.7.1 Expérience de drainage interne : caractérisation hydrodynamique du sol

Avant la réalisation de cette expérience le palmier dattier a été préalablement coupé (2 mois avant l'expérience, soit le 18/04/2014).

Pour caractériser le fonctionnement hydrique du sol de notre site expérimental, on fait une expérience de drainage interne. Cette méthode a été développée par Hillel *et al.* (1972). Cette méthode consiste à apporter de l'eau pendant une phase d'irrigation massive et à ensuite couvrir le sol, une fois la lame d'eau disparue, avec une bâche, puis à faire un suivi de la redistribution de cette eau en profondeur en fonction du temps (phase de redistribution) (Photo 3.11). La couverture du sol avec la bâche empêche l'évaporation et permet ainsi d'imposer la condition d'absence de transfert d'eau en surface (flux nul en surface). Pendant les phases d'infiltration et de redistribution, la teneur en eau volumique et le potentiel hydrique du sol sont suivis à différentes profondeurs en fonction du temps. Pour les mesures de sonde à neutrons, le tube Da, qui est installé à la plus grande profondeur (cf : Tableau 3.8), a été sélectionné. En ce qui concerne le suivi des potentiels hydriques, l'ensemble des tensiomètres (cf : Tableau 3.10) ont été suivis. Les mesures se sont déroulées du 6/6/2014 à 10 h au 10/07/2014 à 10 h. L'apport d'eau a duré du 6/6/2014 à 10h15 (T_0) au 6/6/2014 à 23h05 (T_f), avec des relevés de mesures toutes les 30 minutes jusqu'au 8/06/2014. Du 6/06/2014 au 10/07/2014, les prises de mesures sont journalières.

Tout au long de la phase d'infiltration, nous avons veillé à maintenir une lame d'eau d'une hauteur maximale de 10 cm. Pour cela, nous avons procédé à plusieurs irrigations successives pour pouvoir maintenir le niveau d'eau quasi constant en surface (Tableau 3.11). Grâce aux profils de charge établis à partir des mesures tensiométriques, on va déterminer les gradients de potentiel. Quant aux profils de teneur en eau, ils vont permettre d'évaluer le stock d'eau contenu dans les différentes couches de sol.

Tableau 3.11 : Les différents apports d'eau durant la phase d'infiltration du 6/6/2014 pour maintenir une lame d'eau en surface.

Apport d'eau	Heure de démarrage	Heure d'arrêt	Lame d'eau apportée (cm)
N°1	06/06/2014 10:15	06/06/2014 11:45	7,54
N°2	06/06/2014 12:18	06/06/2014 12:43	3,49
N°3	06/06/2014 13:43	06/06/2014 14:21	5,30
N°4	06/06/2014 14:55	06/06/2014 15:02	0,98
N°5	06/06/2014 16:04	06/06/2014 17:34	5,97
N°6	06/06/2014 18:35	06/06/2014 19:09	3,18
N°7	06/06/2014 20:05	06/06/2014 21:00	5,15
N°8	06/06/2014 22:14	06/06/2014 23:05	4,30
		Total	35,91



Photo 3.11 : Cuvette sous palmier coupé et couverture du sol avec une bâche pour limiter l'évaporation

3.7.2 Expérience en sol nu : caractérisation de l'évaporation

Cette expérience consiste à faire un suivi de l'état hydrique du sol sans palmier au cours d'une phase d'infiltration et d'une phase de redistribution. Dans cette expérience, le flux d'eau du sol est soumis à l'action simultanée de l'évaporation et de la redistribution en profondeur. Le protocole expérimental est identique à la première expérience, à la différence qu'ici nous n'avons pas empêché l'évaporation par couverture de la surface du sol (Photo 3.12).

Les mesures se sont déroulées du 25/04/2014 à 11 h au 29/05/2014 à 10 h. Comme pour l'expérience en drainage interne, les mesures de sonde à neutrons ont été réalisées sur le tube d'accès Da, tandis que l'ensemble de tensiomètres du dispositif ont été suivis (Figure 3.13). L'apport d'eau a démarré le 25/04/2014 à 11h01 (T_0) et s'est arrêté le 25/04/2014 à 23h05 (T_f) (Tableau 3.12). Les mesures sont faites toutes les 30 minutes durant toute la phase d'irrigation et jusqu'au 27/04/2014. Ensuite, du 28/04/2014 jusqu'au 29/05/2014, les mesures sont prises une fois par jour.



Photo 3.12 : Cuvette sans palmier en phase d'irrigation

Tableau 3.12 : Les différents apports d'eau durant la phase d'infiltration du 25/04/2014 pour maintenir la lame d'eau de 10 cm en surface.

Apport d'eau	Heure de démarrage	Heure d'arrêt	Lame d'eau apportée (cm)
N°1	25/04/2014 11:01	25/04/2014 13:11	11,94
N°2	25/04/2014 13:42	25/04/2014 14:42	6,05
N°3	25/04/2014 15:38	25/04/2014 16:29	5,46
N°4	25/04/2014 17:16	25/04/2014 18:02	4,66
N°5	25/04/2014 18:45	25/04/2014 18:53	0,95
N°6	25/04/2014 20:02	25/04/2014 20:54	4,59
N°7	25/04/2014 22:15	25/04/2014 23:05	4,34
		Total	37,99

3.7.3 Expérience avec palmier dattier : caractérisation du puits racinaire

Pour caractériser l'absorption racinaire du palmier dattier, une expérience d'infiltration et de redistribution avec suivi des teneurs en eau et des potentiels hydriques a été réalisée avec un palmier dattier (Photo 3.13). Le protocole expérimental est identique aux deux précédentes expérimentations. L'apport d'eau démarre le 27/02/2014 à 10 h (T_0) et s'est arrêté le 27/02/2014 à 23h30 (T_f) (Tableau 3.13), avec des relevés des teneurs en eau et des potentiels toutes les 30 minutes jusqu'au 1/03/2014. Du 2/03/2014 au 2/04/2014 à 10 h, les prises de mesures sont journalières.



Photo 3.13 : Cuvette avec palmier en phase d'irrigation.

Tableau 3.13 : Les différents apports d'eau durant la phase d'infiltration du 27/02/2014 pour maintenir une lame d'eau de 10 cm en surface.

Apport d'eau	Heure de démarrage	Heure d'arrêt	Lame d'eau apportée (cm)
N°1	27/02/2014 10:00	27/02/2014 12:15	12,57
N°2	27/02/2014 13:28	27/02/2014 14:18	5,29
N°3	27/02/2014 15:00	27/02/2014 15:40	1,99
N°4	27/02/2014 16:25	27/02/2014 16:47	1,62
N°5	27/02/2014 17:30	27/02/2014 18:56	4,57
N°6	27/02/2014 20:30	27/02/2014 23:30	8,07
		Total	34,11

3.8 Modélisation

Afin d'obtenir un jeu de paramètres hydrodynamiques représentatif du sol, qui permette de bien décrire la dynamique hydrique dans le système sol-palmier-atmosphère, nous avons réalisé une modélisation des transferts hydriques dans le sol en commençant par la simulation de l'expérience de drainage interne avec le modèle mécaniste HYDRUS-1D. Les paramètres hydrodynamiques obtenus ont ensuite été utilisés pour faire la modélisation de l'expérimentation avec évaporation du sol et, ensuite, de celle incluant le puits racinaire du palmier dattier.

3.8.1 Présentation du modèle HYDRUS-1D

Le modèle HYDRUS-1D est un modèle permettant de simuler le mouvement monodimensionnel de l'eau, de la chaleur et des solutés dans les milieux poreux incompressibles et variablement saturés en régime permanent ou transitoire (Simunek *et al.*, 2005). Développé par le Département des Sciences Environnementales de l'Université de Californie à Riverside (USA), HYDRUS-1D résout numériquement l'équation de Richards par la méthode des éléments finis de type Galerkin. Le domaine de simulation peut être constitué d'un profil de sol non uniforme. L'écoulement peut se produire dans une direction horizontale ou verticale, mais aussi dans une direction inclinée. Le flux d'eau peut être décrit

en fixant des limites de flux ou de potentiel, ou encore de gradient de potentiel (drainage libre).

Les transferts d'eau dans un milieu poreux variablement saturé sont décrits par une forme modifiée de l'équation de Richards, en utilisant les hypothèses que la phase d'air joue un rôle insignifiant dans le processus d'écoulement du liquide et que l'écoulement de l'eau dû à des gradients thermiques est négligeable (Simunek *et al.*, 2005).

Cette équation de Richards modifiée s'écrit :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \cos \alpha \right) \right] - S \quad (\text{Equation 3.1})$$

h : potentiel matriciel [L],

θ : teneur en eau volumique [$L^3 L^{-3}$],

t : temps [T],

x : coordonnée spatiale [L],

S : fonction puits racinaire (volume d'eau absorbé par les plantes par volume de sol et par unité de temps) [$L^3 L^{-3} T^{-1}$],

α : angle entre la direction du flux et l'axe vertical (i.e., $\alpha = 0^\circ$ pour un écoulement vertical, 90° pour un écoulement horizontal, et $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ pour un écoulement incliné),

K : fonction de conductivité hydraulique [$L T^{-1}$] donnée par l'équation (Eq.3.2) :

$$K(h, x) = K_s(x) K_r(h, x) \quad (\text{Equation 3.2})$$

K_r : conductivité hydraulique relative [-],

K_s : conductivité hydraulique à saturation [$L T^{-1}$].

Pour résoudre cette équation, il est nécessaire de connaître les deux fonctions décrivant les propriétés hydrodynamiques du sol, à savoir la courbe de rétention hydrique $\theta(h)$ (Eq.3.3) et la courbe de conductivité hydraulique $K(h)$ (Eq.3.4).

De nombreux modèles décrivent de manière appropriée les propriétés hydrauliques de la plupart des sols (Brooks et Corey, 1964 ; van Genuchten, 1980; Rossi et Nimmo, 1994 ;

Kosugi, 1996). Pour la description des relations $\theta(h)$ et $K(h)$, nous avons utilisé les fonctions analytiques de Mualem-van Genuchten (van Genuchten, 1980) :

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} \quad (\text{Equation 3.3})$$

$$K(h) = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (\text{Equation 3.4})$$

$$\text{Avec } S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

θ_r : teneur en eau résiduelle [$L^3 L^{-3}$],

θ_s : teneur en eau à saturation [$L^3 L^{-3}$],

α [L^{-1}] et n [-] : paramètres empiriques ($n > 1$),

$m = 1 - (1/n)$,

K_s : conductivité à saturation [LT^{-1}],

S_e : saturation effective du sol [-],

l : coefficient de connexion des pores [-].

Le logiciel RETC (van Genuchten *et al.*, 1991) a été utilisé pour paramétrer le modèle de Mualem-van Genuchten par calage sur les valeurs de θ et h mesurées *in situ* et les valeurs $\theta(h)$ obtenues expérimentalement au laboratoire (mesures à l'aide des presses de Richards).

3.8.2 Ajustement des données hydrodynamiques avec RETC

Afin de déterminer les paramètres des équations (3.3) et (3.4), nous avons effectué des calages de ces équations aux données mesurées expérimentalement *in situ* et au laboratoire avec le logiciel RETC. Les mesures expérimentales de $\theta(h)$ *in situ* sont issues des trois expériences. Cette courbe $\theta(h)$ a également été déterminée au laboratoire avec la méthode de la presse de Richards (cf. § 3.2.3.c).

3.8.2.a Ajustement des données expérimentales mesurées au laboratoire avec RETC

Les courbes de rétention en eau du sol qui ont été déterminées au laboratoire à l'aide de la presse de Richards (cf. § 3.2.3.c) ont été calées avec RETC afin d'obtenir les différents paramètres de van Genuchten. Nous avons ensuite fait un deuxième calage, cette fois en fixant θ_s à 90% de la porosité.

3.8.2.b Ajustement des données expérimentales mesurées *in situ* avec RETC

Les mesures *in situ* de la relation $\theta(h)$ correspondant aux mesures de teneur en eau et de potentiel obtenues au cours des trois expériences de terrain. La courbe $\theta(h)$ *in situ* n'a pu être déterminée que pour les profondeurs où l'on disposait à la fois de mesures de potentiel et de mesures de teneur en eau, à savoir 10, 20, 30, 40, 60, 100 et 150 cm. Les paramètres qui ont été ajustés sont uniquement α et n . Quant à θ_s , nous l'avons fixée égale à 90% de la porosité et, pour θ_r , nous l'avons fixée à 0.

3.8.2.c Critères d'évaluation des ajustements

La qualité du calage est évaluée par la valeur r^2 de la régression des valeurs mesurées (y_i) et des valeurs calculées à l'aide des paramètres de van Genuchten ($\hat{y}_i$) (Eq.3.5). Plus cette valeur sera proche de 1, plus la corrélation sera parfaite entre les valeurs calculées et observées.

$$r^2 = \frac{\left[\sum \hat{y}_i y_i - \frac{\sum \hat{y}_i \sum y_i}{n} \right]^2}{\left[\sum \hat{y}_i^2 - \frac{(\sum \hat{y}_i)^2}{n} \right] \left[\sum y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{n} \right]} \quad (\text{Equation 3.5})$$

3.8.3 Modélisation de l'expérience de drainage interne

Les paramètres décrivant les propriétés hydrodynamiques du sol, obtenus avec les ajustements RETC, ont été utilisés pour simuler l'expérience de drainage interne (cf: 3.7.1). Afin d'améliorer la description de la dynamique hydrique du sol observée lors de cette expérience, ces mêmes paramètres ont été optimisés manuellement avec HYDRUS-1D par calage sur les données de mesures *in situ* de cette expérience.

3.8.3.a Optimisation des paramètres hydrodynamiques du sol

Cette étape consiste à déterminer les paramètres hydriques par calage du modèle HYDRUS-1D (méthode inverse) sur les données expérimentales mesurées *in situ* lors de l'expérience de drainage interne (expérience 1).

Les paramètres hydrodynamiques sont optimisés manuellement sur la base de la minimisation d'une fonction objective Φ (Eq. 3.6) qui correspond à la différence au carré entre les données observées expérimentalement (les valeurs de teneur en eau volumique mesurées par la sonde à neutrons, les valeurs de potentiels hydriques mesurés par les tensiomètres et les hauteurs d'eau mesurées en surface du sol pendant l'irrigation (cf : Tableau 3.11 à 3.13)) et les données simulées par le modèle HYDRUS-1D :

$$\Phi(\mathbf{b}, \mathbf{q}) = \sum_{j=1}^{m_q} v_j \sum_{i=1}^{n_{qj}} \omega_{i,j} \left[q_j^*(z, t_i) - q_j(z, t, \mathbf{b}) \right]^2$$

(Equation 3.6)

$q_j^*(z, t_i)$: variables mesurées au temps t_i à la profondeur z

$q_j(z, t_i, \mathbf{b})$: variables calculées par le modèle pour le vecteur $\mathbf{b}$ des paramètres à optimiser ($\theta_r, \theta_s, n, K_s, \dots$),

m_q : le nombre de types de mesures,

n_{qj} : le nombre de mesures dans un type j particulier,

v_j et $\omega_{i,j}$: respectivement les poids associés à chaque type de mesure et aux points de mesure dans un type j particulier.

Les paramètres hydriques ($\theta_s, \theta_r, \alpha, n, K_s$ et l) ont été optimisés en utilisant l'évolution au cours du temps des deux variables d'état, teneur en eau volumique et potentiel de l'eau. La procédure d'optimisation a été faite couche après couche en partant de la profondeur vers la surface. Une fois que les « bons » paramètres d'une couche sont obtenus, on les fixe et on optimise les paramètres de la couche suivante. Cette opération est répétée jusqu'à ce que les valeurs des paramètres de toutes les couches ne puissent plus être améliorées. Les paramètres obtenus vont ensuite être utilisés pour simuler les transferts d'eau des trois expériences.

3.8.3.b Définition du système et paramétrage du modèle

Dans HYDRUS-1D, on définit notre modèle en une colonne de sol monodimensionnelle de 180 cm de profondeur (Photo 3.2). Le profil de sol a été discrétisé en 9 matériaux (Tableau 3.14).

On soumet la surface supérieure à une condition de type atmosphérique avec un flux d'évaporation nul. Cette condition permet à l'eau de s'accumuler sur la surface. On maintient une lame d'eau de 10 cm tout au long de l'irrigation (Tableau 3.11). La hauteur d'eau en surface du sol augmente en raison de l'irrigation et diminue en raison de l'infiltration.

A la limite inférieure du domaine, on fixe une condition de drainage libre. La condition de limite « gradient gravitaire » peut être utilisée pour simuler un profil de sol drainant librement. Une telle situation se produit souvent dans les études sur le terrain de l'écoulement de l'eau dans la zone non saturée. Cette condition limite inférieure est la plus appropriée pour la situation où la nappe phréatique se situe bien en dessous du domaine d'intérêt, ce qui est le cas de notre étude.

Les conditions initiales pour l'écoulement des eaux sont définies par les potentiels matriciels à T_0 (soit le 6/6/2014 à 10 h pour l'expérience 1) mesurés aux différentes profondeurs.

Tableau 3.14 : Discrétisation du profil du sol en 9 matériaux.

Matériau	Profondeur (cm)
1	0-5
2	5-15
3	15-35
4	35-75
5	75-105
6	105-145
7	145-155
8	155-165
9	165-180

3.8.4 Modélisation de l'expérimentation en sol nu

Les paramètres hydrodynamiques, obtenus avec les optimisations par procédure inverse sur les mesures expérimentales *in situ* de l'expérience 1, ont été utilisés pour simuler les transferts d'eau en condition de sol nu avec évaporation (expérience 2).

3.8.4.a Définition du système et paramétrage du modèle

La définition du modèle est la même que pour la modélisation précédente.

Les conditions initiales sont définies par les potentiels matriciels mesurés aux différentes profondeurs à T_0 le 25/04/2014 à 11 h, (cf : §3.7.2). La condition à la limite supérieure est de type atmosphérique, avec apports d'eau d'irrigation (Tableau 3.12) et évaporation du sol. L'évaporation potentielle du sol nu est calculée avec la méthode de Penman-Monteith à partir

des données climatiques de la station météo. Une condition de drainage libre est toujours imposée à la base du profil de sol.

3.8.5 Modélisation de l'expérimentation avec palmier dattier

Les transferts d'eau dans le système sol-palmier-atmosphère sont simulés en utilisant les paramètres hydrodynamiques du sol obtenus et validés avec l'optimisation inverse d'HYDRUS-1D sur les mesures expérimentales *in situ* de l'expérience 1.

3.8.5.a Définition du système et paramétrage du modèle

La définition du modèle est la même que pour les deux modélisations précédentes. Les conditions initiales pour l'écoulement des eaux sont définies par les potentiels matriciels à T_0 (soit le 27/02/2014 à 10 h pour l'expérience 3) mesurées aux différentes profondeurs.

3.8.5.a-1 Paramètres de l'absorption racinaire

Pour simuler le prélèvement d'eau par la plante, HYDRUS-1D a besoin de la profondeur du système racinaire et de sa densité en fonction de la profondeur (profil racinaire). Pour cela, nous avons utilisé les données quantitatives du profil racinaire (comptages racinaires, cf : §3.5).

La plupart des modèles mathématiques considèrent l'absorption racinaire comme un puits, représentant dans l'équation de Richards (équation 3.1) l'eau prélevée par un ensemble diffus de racines occupant une couche donnée du sol (Šimunek, *et al.*, 2005).

Pour HYDRUS -1D (Simunek *et al.*, 2005), la transpiration potentielle est forcée à la zone racinaire, et une fonction de stress hydrique est appliquée pour calculer l'absorption d'eau par les racines, ce qui équivaut à la transpiration des plantes.

En raison de leur simplicité, les modèles découplés sont couramment utilisés dans les simulations hydrologiques (van Dam et Feddes, 2000; Simunek *et al.*, 2005). Généralement, dans un modèle découplé, l'absorption d'eau par les racines est définie par (Feddes *et al.*, 1978) :

$$S(h) = \alpha(h) * S_p \quad \text{(Equation 3.7)}$$

Où S et S_p sont respectivement le taux d'absorption hydrique réel et le taux d'absorption hydrique potentiel, $\alpha(h)$ est la fonction de réponse au stress hydrique déduisant le taux

d'absorption hydrique potentiel en taux d'absorption hydrique réel. Cette fonction adimensionnelle est définie par 4 paramètres (h_1 , h_2 , h_3 , h_4) qui fixent la façon dont elle évolue en fonction du potentiel de l'eau du sol (Feddes *et al.*, 1978) (Figure 3.9). En effet, dans le modèle de Feddes, la fonction de stress hydrique est définie linéairement sur trois intervalles de potentiel hydrique $[h_1; h_2]$, $[h_2; h_3]$ et $[h_3; h_4]$. Lorsque le sol est plus humide que h_1 ('point d'anaérobiose'), les racines sont à court d'oxygène et l'absorption d'eau est supposée être égale à zéro. Lorsque le sol est plus sec que h_4 (point de flétrissement), l'absorption d'eau est également supposée être égale à zéro. L'absorption d'eau est supposée être optimale lorsque le potentiel en eau du sol est entre h_2 et h_3 . Pour le potentiel de l'eau du sol entre h_1 et h_2 (ou h_3 et h_4), l'absorption d'eau augmente (ou diminue) linéairement avec h . Les potentiels h_{3h} et h_{3l} représentent respectivement les valeurs de h_3 quand la transpiration potentielle est élevée ou faible.

Les paramètres (h_1 , h_2 , h_3 , h_4) que nous avons choisis dans la base de données d'HYDRUS-1D, sont issues de données de la littérature (Wesseling *et al.*, 1991, cités par Simunek *et al.*, 2005 ; Taylor and Ashcroft, 1972, cités par Yang *et al.*, 2013). Ces paramètres ont été fixés à : $h_1 = -10$ cm ; $h_2 = -25$ cm ; $h_{3h} = -500$ cm ; $h_{3l} = -800$ cm et $h_4 = -16000$ cm.

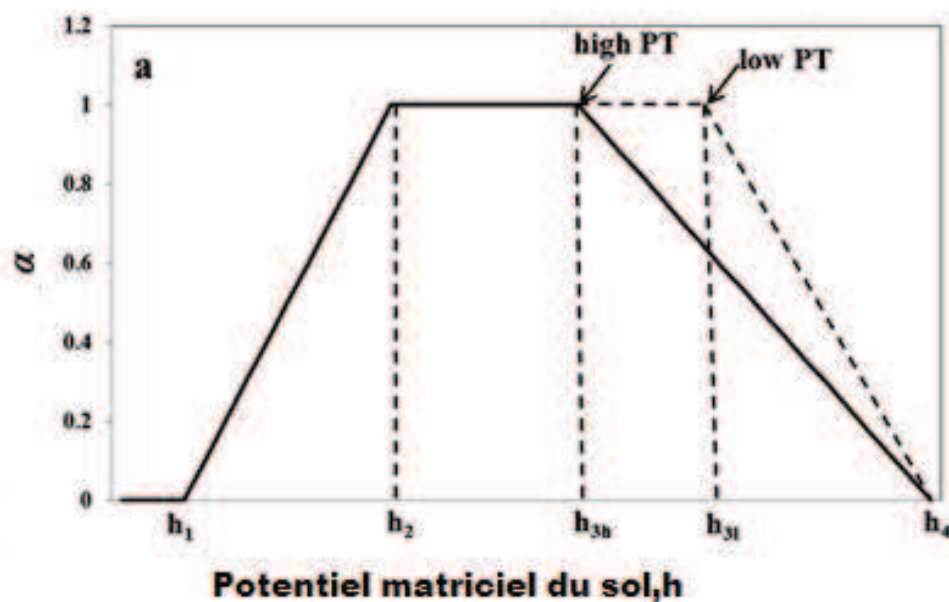


Figure 3.9 : Schéma de la fonction de stress hydrique $\alpha(h)$ utilisé par Feddes (Yang *et al.*, 2013).

L'indice de stress critique, ou facteur de capacité d'adaptation de l'appareil racinaire, représente une valeur seuil à partir de laquelle la diminution de l'absorption hydrique des racines dans les zones de stress hydrique est entièrement compensée par une absorption accrue dans d'autres régions du sol qui sont moins stressées (Šimůnek et Hopmans, 2009 ; Yang *et al.*, 2013). Nous avons fait une simulation avec compensation et une autre sans compensation racinaire.

3.8.5.a-2 Paramètres climatiques

Les paramètres climatiques sont nécessaires pour calculer l'évapotranspiration maximale (ETM) à partir de l' ET_0 (Penman-Montheith) en utilisant les paramètres de la plante telle que le LAI (Leaf Area Index) et le coefficient d'extinction du rayonnement incident. Le LAI du palmier est pris égale à 5 (Corley *et al.*, 1971 ; Sperling, 2013). Le coefficient d'extinction de la radiation correspond au pourcentage de rayonnement net journalier intercepté par le palmier. Il est de l'ordre de 19 % (Sellami et Sifaoui, 1998).

Les données climatiques sont obtenues grâce à la station météo installée dans la palmeraie.

3.8.6 Critère d'évaluation des simulations

La qualité du calage est évaluée par la valeur r^2 de la régression des valeurs mesurées (y_i) et des valeurs optimisées ($\hat{y}_i$) (Eq.3.8).

Chapitre 4. Résultats et discussion

4.1 Caractérisation du système racinaire du palmier dattier

La caractérisation du système racinaire du palmier dattier est réalisée pour connaître la densité racinaire et la profondeur d'enracinement du palmier dattier (Figure 4.1). Ces données sont importantes pour pouvoir caractériser la répartition du puits hydrique racinaire du palmier. Les données de comptage racinaire effectuées ont été converties en carte par interpolation par krigeage avec le logiciel SURFER 10 (Figure 4.2).

La densité maximale d'enracinement se situe entre 0 et 80 cm. Les racines de nutrition et d'absorption (Figure 4.1b) n'ont pas pu être distinguées les unes des autres. La profondeur de cette zone de densité racinaire maximale est faible comparée à celles décrites par Munier (1973), Djerbi (1994) et Peyron (2000), qui sont de 1 m pour les racines de nutrition et jusqu'à 2 m pour les racines d'absorption (cf. § 2.1.2.a-3). Ce faible niveau d'enracinement peut être lié à plusieurs facteurs comme le mode de culture, la disponibilité en eau, mais aussi le cultivar (Peyron, 2000). Daddi-Bouhoun (2010) a observé une faible profondeur d'enracinement du palmier dattier (61 cm) dans des palmeraies en Algérie, à cause de la présence d'une croûte gypseuse entre les profondeurs 46 et 120 cm. En effet, cette dernière impacte la profondeur d'enracinement du palmier (Daddi-Bouhoun, 2010 ; Durand, 1958). La nappe phréatique peut également avoir un impact sur la profondeur d'enracinement du palmier. Ces situations n'ont pas été observées dans notre cas. Ainsi, cette faible profondeur d'enracinement est peut-être liée aux conditions hydriques du site de l'étude : l'apport régulier d'eau d'irrigation place les racines de notre palmier dans un 'confort hydrique' jusqu'à la profondeur 80 cm.

On observe une forte densité racinaire dans les 50 premiers centimètres du profil avec plus de 27 racines/4 dm² au pied du stipe (Figure 4.1a, Figure 4.2a), avec une diminution de celle-ci plus en profondeur (moins de 4 racines/4 dm² au-delà de 80 cm). La densité des racines de premier ordre (auxirhyze) (cf. §2.1.2.a-3) peut aller jusqu'à 40 racines/4 dm² pour les racines de nutrition, et 8 racines/4 dm² pour les racines d'absorption (Oihabi, 1991 ; Djerbi, 1994 ; Daddi-Bouhoun, 2010).

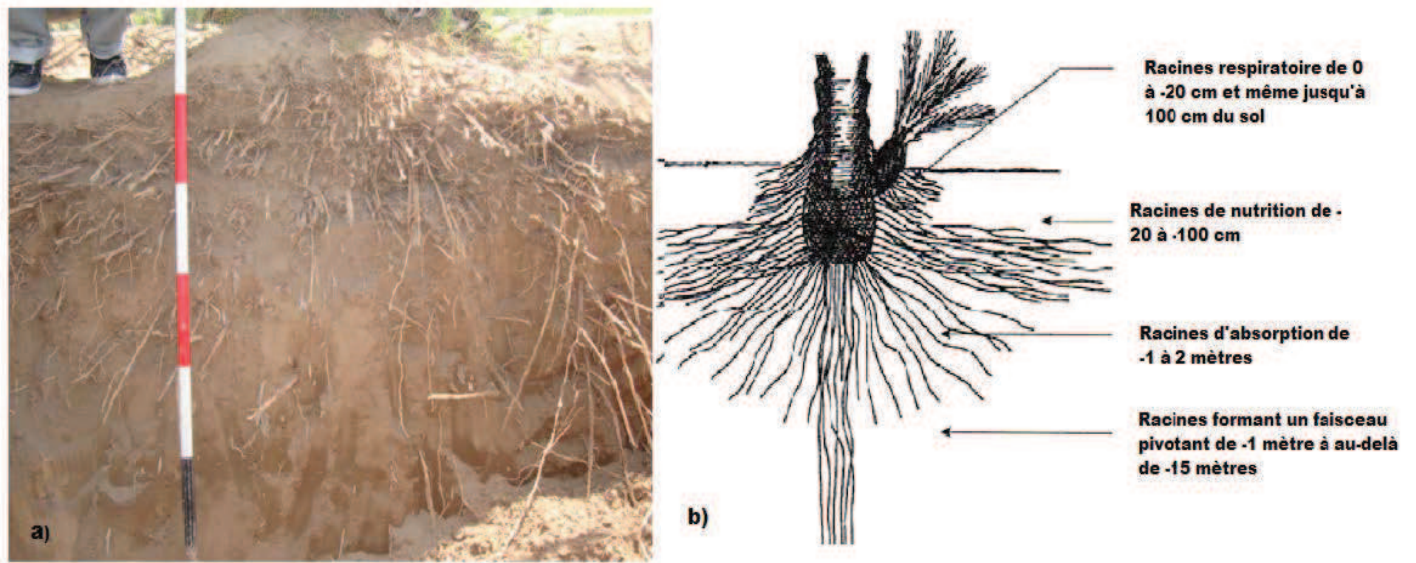


Figure 4.1 : Photo du système racinaire du palmier (a) et schéma des quatre types de racine du palmier dattier (b) (Peyron, 2000).

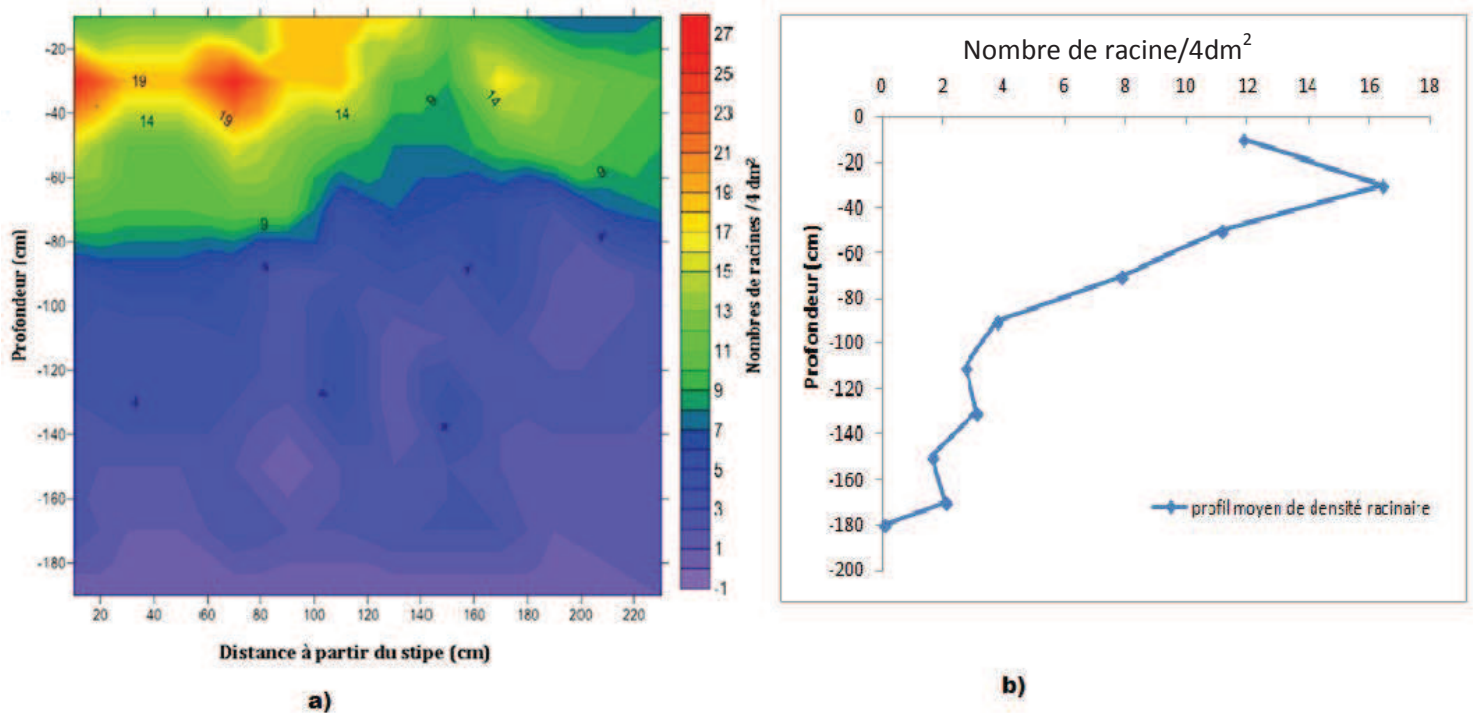


Figure 4.2 : Carte de distribution de la densité racinaire (interpolation à l'aide du logiciel Surfer®) (a) ; profil moyen de densité racinaire (b).

4.2 Expérience de drainage interne : caractérisation hydrodynamique du sol

Afin de caractériser les propriétés hydrodynamiques du sol, une expérience de drainage interne (sans palmier et sans évaporation en surface) a été réalisée. Cette expérience s'est

déroulée après les deux autres expériences (cf : 3.7), car elle nécessitait la coupe du palmier, ainsi que le contrôle du flux hydrique en surface du sol. Après la présentation des résultats expérimentaux, nous allons présenter la partie modélisation.

4.2.1 Mesures expérimentales

Les mesures de teneur en eau volumique ont été réalisées au niveau du tube Da et les mesures de potentiel hydrique ont été faites sur tous les tensiomètres. Cependant, au cours de l'exploitation des données, nous avons sélectionné les tensiomètres 10 Hc, 20 Ed, 30 Kd, 40 Ic, 60 Gd, 100 Cd et 150 Id, comme représentatifs du comportement du profil de sol, et cela pour l'ensemble des expériences.

4.2.1.a Période d'infiltration

La période d'infiltration s'est déroulée du 6/6/2014 à 10h (T_0) au 6/6/2014 à 23h05 (T_f).

Les données de teneur en eau volumique θ et de charge hydraulique H sont représentées dans la figure 4.3 pour la période d'infiltration.

A l'état initial (T_0), on constate, en observant la charge hydraulique, que le sol est relativement humide (Figure 4.3b). Le pF ne dépasse pas 2,5 dans l'ensemble du profil. Cet état relativement humide est dû au fait qu'une expérience d'infiltration sans palmier (expérience en sol nu) a été réalisée avant cette expérience. On observe un plan de flux nul vers 60 cm de profondeur. Le profil de charge hydraulique est hétérogène dans la partie supérieure (entre 10 et 60 cm) vraisemblablement en raison de l'hétérogénéité du sol (stratification d'origine alluviale) (cf. Figure 3.6), mais aussi sans doute en raison de problèmes techniques comme par exemple la stabilisation non homogène de la pression d'eau dans les tensiomètres suite à la purge effectuée avant l'irrigation. La teneur en eau volumique varie entre 13 et 37 % dans l'ensemble du profil, avec une forte hétérogénéité (Figure 4.3a). En surface (entre 10 et 20 cm), la teneur en eau est faible (13 et 20%), à cause de l'évaporation. Entre 40 et 70 cm, la teneur en eau est assez homogène (à peu près 22%). De 80 cm à 100 cm, le profil est un peu plus humide avec une teneur en eau variant entre 27 et 28%. En profondeur (110 à 150 cm), le profil présente une teneur eau plus importante (33 à 37%) que celle des couches supérieures. On observe qu'à 60 cm de profondeur, le potentiel matriciel est légèrement plus élevé ($h = -71$ cm) que dans les couches plus en profondeur (-116 cm $< h < -153$ cm entre 100 et 150 cm) alors même que la teneur en eau y est moins élevée.

Ceci témoigne d'une capacité de rétention plus importante en profondeur, en cohérence avec une texture plus limono-argileuse que dans les horizons plus en surface (cf. Figure 3.9).

Le front d'infiltration atteint 40 cm quatre heures après le début de l'apport d'eau (Figure 4.3.b). Huit heures trente après la mise en eau du sol (T+8,5h), le profil de charge hydraulique se confond avec la droite de potentiel gravitaire jusqu'à 60 cm de profondeur. Le profil de sol est donc à saturation jusqu'à cette profondeur.

A la fin de l'irrigation, les teneurs en eau dans l'ensemble du profil de sol varient de 29 à 38 %. Les teneurs en eau enregistrées dans les couches profondes (120 à 160 cm) varient peu au cours de l'infiltration, principalement du fait qu'elles étaient initialement déjà très humides à cause de l'expérience en sol nu qui a été réalisée avant.

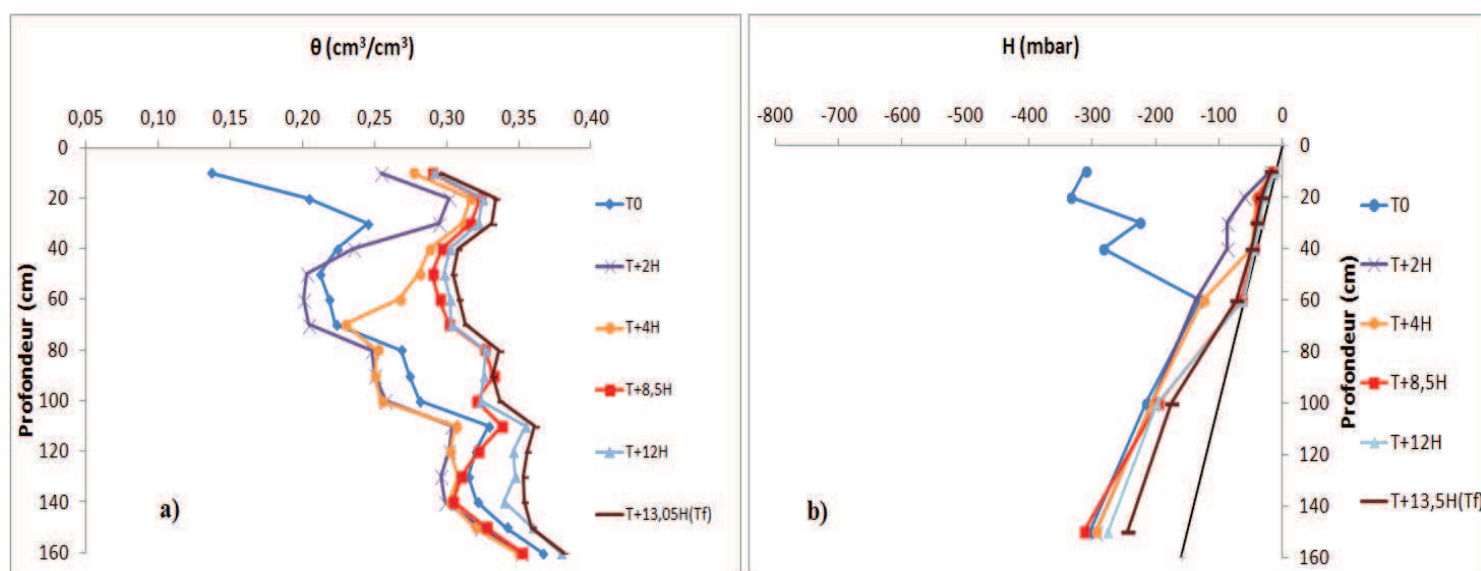


Figure 4.3 : Profil hydrique (teneur en eau, θ , (a) et potentiel total, H (b)) durant la phase d'infiltration. Scénario sans palmier dattier et sans évaporation. T0 : début de l'infiltration, Tf : fin de l'infiltration.

4.2.1.b Période de redistribution

La période de redistribution s'est déroulée du 6/6/2014 à 23h05 (T_f) au 10/7/2014 à 10h (T_f +33 jours). Les données de teneur en eau volumique θ et de charge hydraulique H sont représentées dans la figure 4.4 pour la période de redistribution.

Quatre heures après la fin de l'irrigation (T_f+4h), le profil de charge hydraulique commence à s'éloigner de la droite des potentiels gravitaires dans sa partie supérieure (pour les

profondeurs inférieures à 60 cm), alors qu'on a une rehumectation plus en profondeur. Le profil de charge hydraulique est quasiment parallèle à la droite des potentiels gravitaires (Figure 4.4b). Le pF varie de 1 à 1,5 dans l'ensemble du profil. On a un écoulement gravitaire qui permet de rehumecter le sol en profondeur. Cette variation est moins marquée pour le profil de teneur en eau (Figure 4.4a). Ceci pourrait être dû notamment au fait que les tensiomètres sont plus sensibles au dessèchement que la sonde à neutrons.

Le gradient hydraulique dH/dz est très faible en surface du sol, ce qui confirme l'existence d'un flux nul en surface. Il devient légèrement négatif en surface à partir de $Tf+3$ jours, ce qui laisse à penser que la couverture du sol avec la bâche en plastique n'était pas parfaitement étanche. Guehl (1984) a notamment rencontré cette situation.

A partir de $Tf+3$ jours, le tensiomètre à 60 cm de profondeur ne donne plus de valeurs fiables, à cause d'une défaillance technique du tensiomètre.

Le profil de sol à $Tf+33$ jours a un pF variant entre 2 et 2,5 et une teneur en eau variant entre 15 et 37 %. Cet état hydrique est quasiment identique à celui de l'état initial (Figure 4.5).

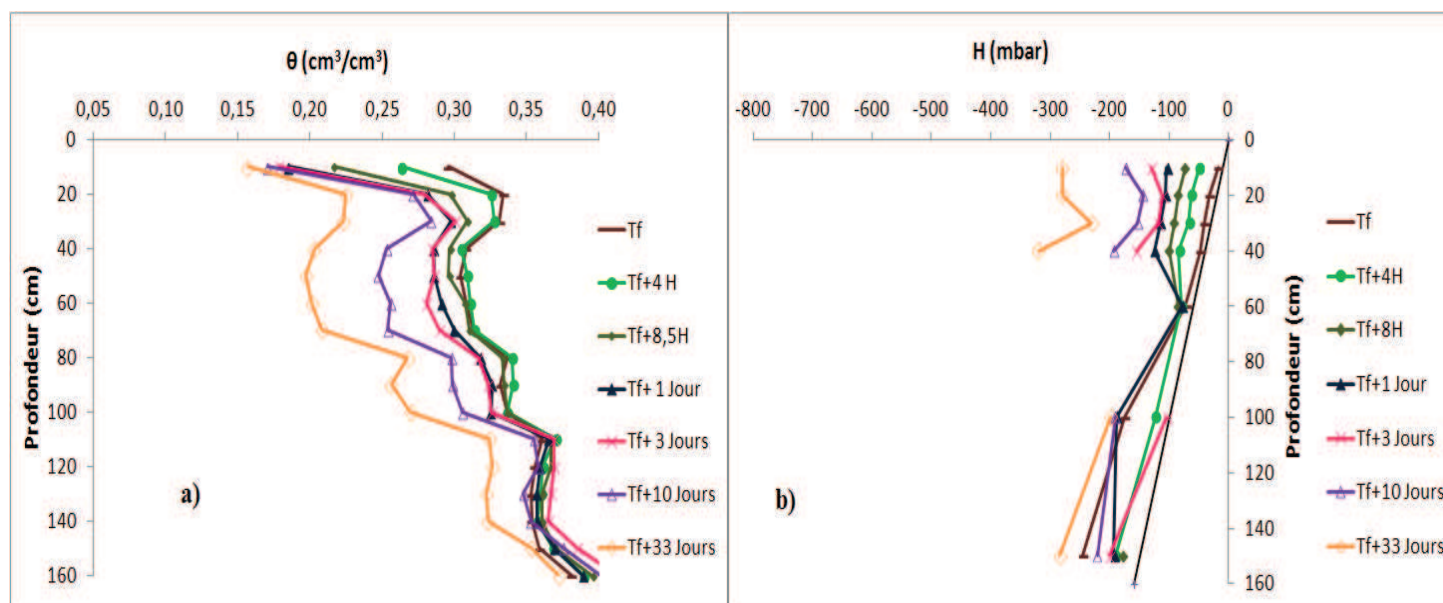


Figure 4.4 : Profil hydrique (teneur en eau, θ , (a) et potentiel total, H (b)) durant la phase de redistribution. Scénario sans palmier dattier et sans évaporation. Tf : fin de l'infiltration.

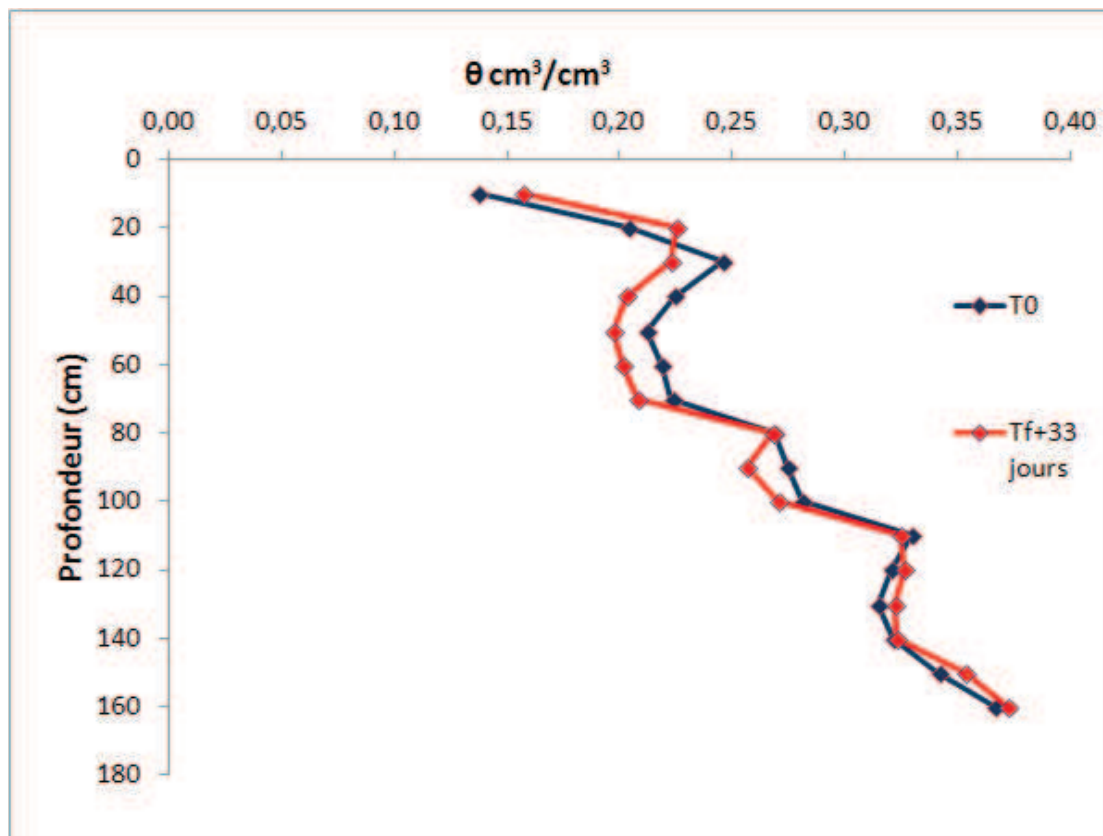


Figure 4.5: Profil hydrique à l'état initial T_0 et 33 jours après la fin de l'irrigation (T_f+33 jours). Scénario sans palmier dattier et sans évaporation.

4.2.2 Modélisation

4.2.2.a Ajustement des données $\theta(h)$ avec RETC

Pour paramétrer le modèle de Mualem-van Genuchten par calage sur les valeurs de $\theta(h)$ mesurées *in situ* et au laboratoire, on a utilisé le logiciel RETC (van Genuchten *et al.*, 1991) (Figure 4.6). Les mesures $\theta(h)$ *in situ* n'ont été déterminées qu'aux profondeurs où l'on disposait à la fois de mesures de potentiel et de teneur en eau (§ 3.8.2.b).

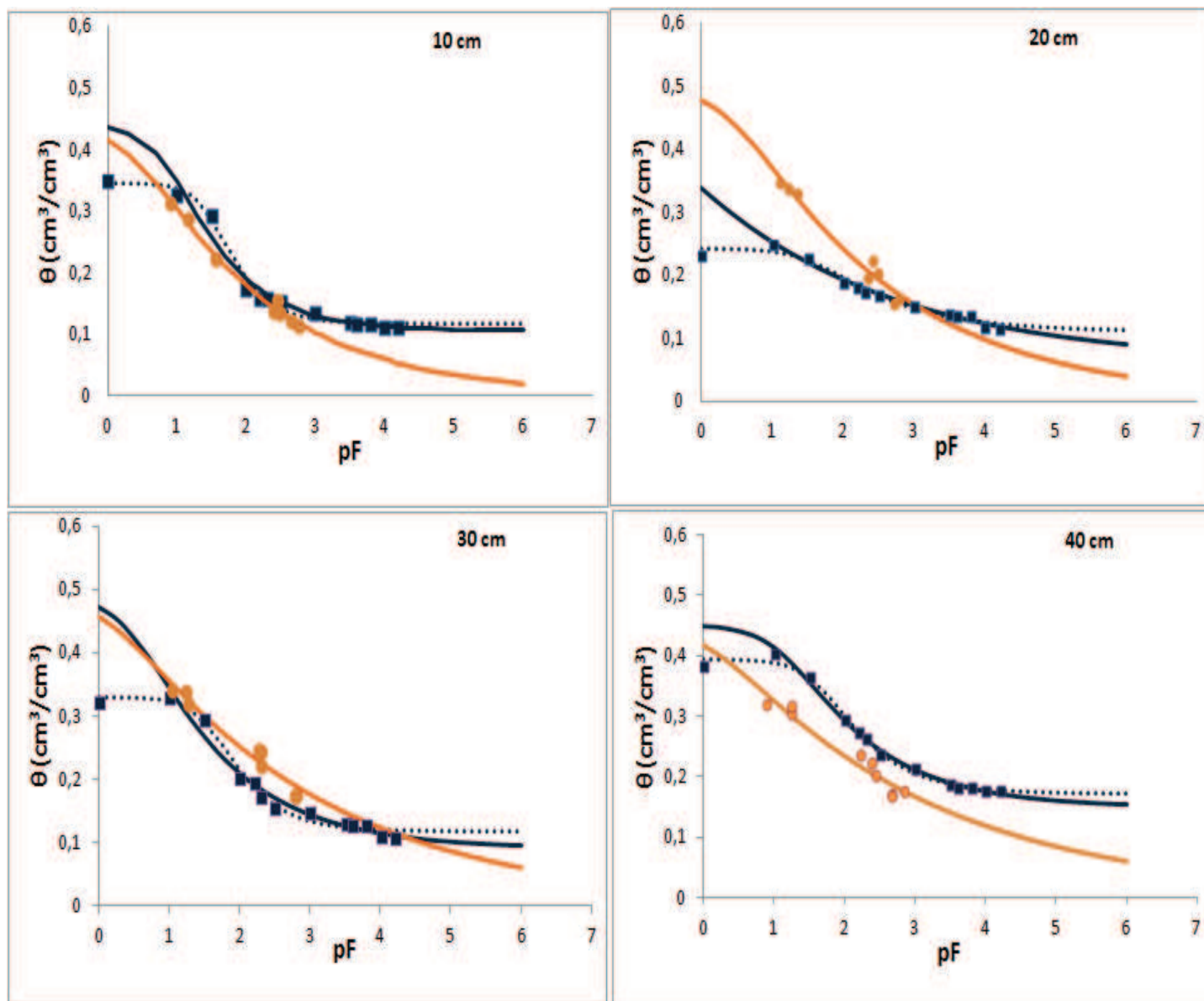
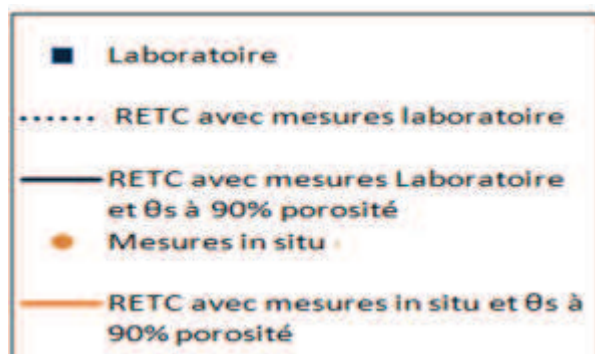


Figure 4.6 (début): Ajustements avec le modèle de van Genuchten - Mualem des relations $\theta(h)$ obtenues avec les mesures laboratoires et avec les mesures *in situ*, par profondeur.

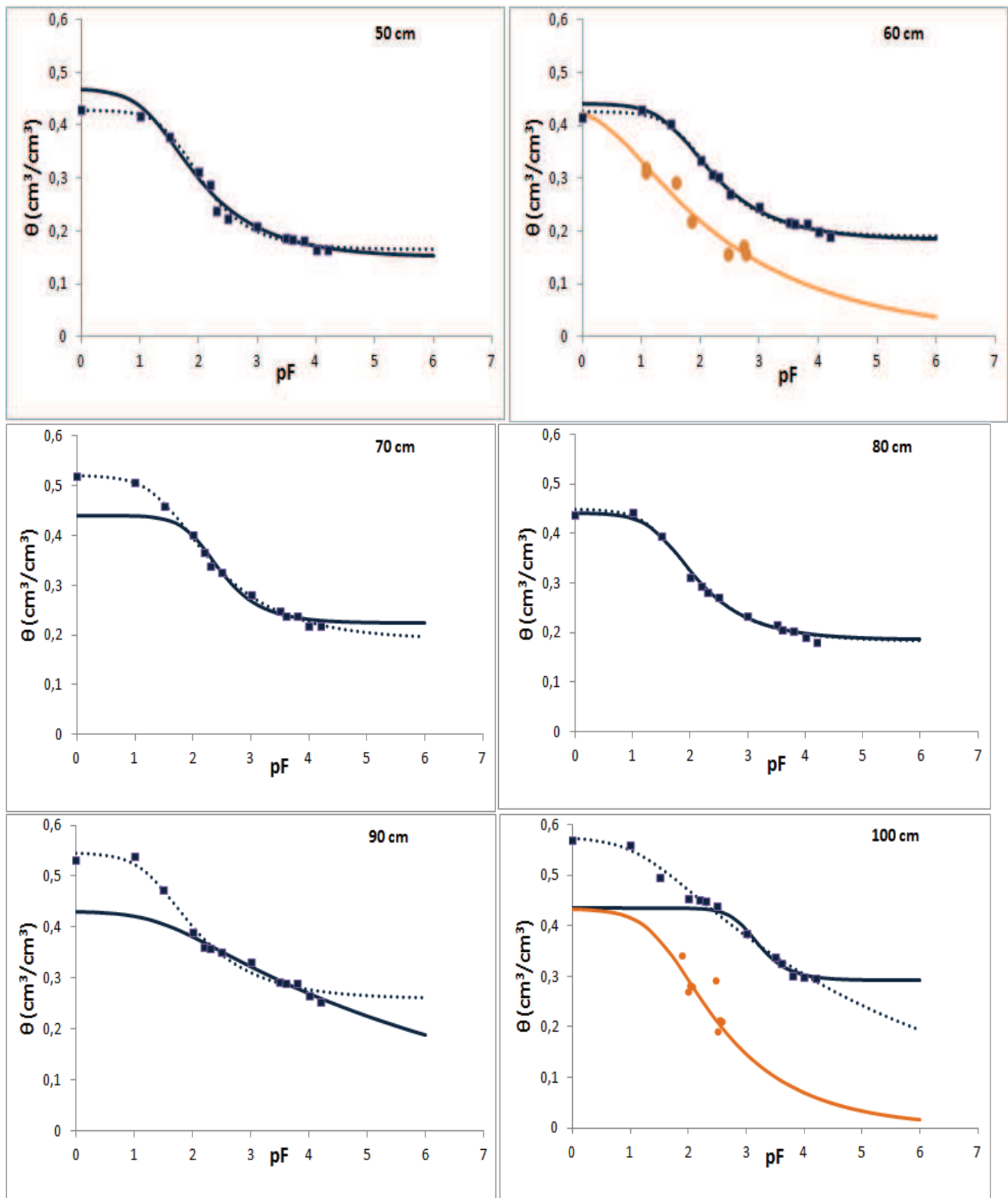


Figure 4.6 (suite): Ajustements avec le modèle de van Genuchten - Mualem des relations $\theta(h)$ obtenues avec les mesures laboratoires et avec les mesures *in situ*, par profondeur.

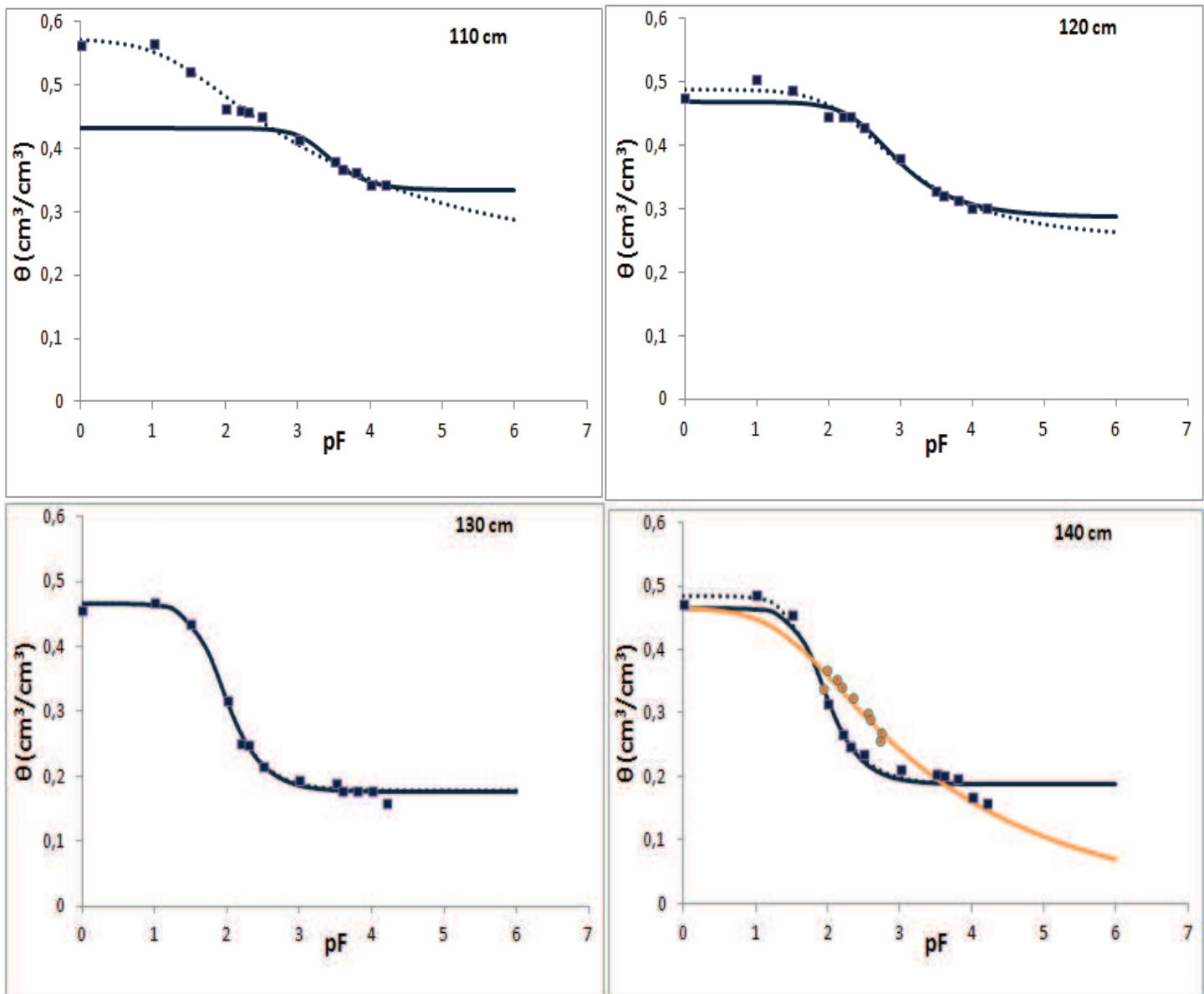


Figure 4.6 (fin): Ajustements avec le modèle de van Genuchten - Mualem des relations $\theta(h)$ obtenues avec les mesures laboratoires et avec les mesures *in situ*, par profondeur.

Les courbes de rétention mesurées au laboratoire et *in situ* ont un comportement assez similaire, excepté pour les profondeurs 20, 60 et 100 cm (Figure 4.6). En effet, à ces profondeurs, les mesures de rétention faites au laboratoire sont très différentes des mesures *in situ*. Pour les profondeurs 60 et 100 cm, la méthode au laboratoire a tendance à surestimer la rétention *in situ*. A 20 cm, la méthode au laboratoire a tendance à sous-estimer la rétention *in situ* au voisinage de la saturation. Ce genre de différences a été observée par d'autres auteurs (Coquet *et al.*, 2005 ; Mermoud et Xu, 2006 ; Chalhoub, 2010). Ceci pourrait être dû au piégeage d'air dans la porosité et un délai de temps plus ou moins important appliqué aux échantillons de laboratoire pour atteindre l'état de saturation. Par conséquent, nous avons

décidé de fixer θ_s à 90% de la porosité mesurée *in situ* (cf: §3.2.2). Les paramètres hydrodynamiques obtenus vont ensuite être utilisés pour essayer de simuler les transferts hydriques avec HYDRUS-1D (Tableau 4.1, 4.2 et 4.3)..

Tableau 4.1: Paramètres obtenus pour les différents ajustements réalisés avec RETC sur les mesures réalisés au laboratoire ; R^2 est le coefficient de détermination entre valeurs prédites par RETC et celles observées pour $\theta(h)$.

Profondeur (cm)	θ_s (cm ³ /cm ³)	θ_r (cm ³ /cm ³)	α (cm ⁻¹)	n	R^2
10	0,346	0,118	0,029	2,022	0,99
20	0,242	0,110	0,025	1,397	0,98
30	0,329	0,117	0,024	1,805	0,99
40	0,395	0,171	0,020	1,629	0,99
50	0,428	0,165	0,023	1,654	0,99
60	0,426	0,190	0,018	1,567	0,99
70	0,522	0,191	0,030	1,390	0,99
80	0,448	0,182	0,032	1,500	0,99
90	0,546	0,258	0,043	1,455	0,98
100	0,575	0,000	0,072	1,097	0,99
110	0,572	0,228	0,059	1,161	0,99
120	0,489	0,255	0,006	1,372	0,97
130	0,465	0,177	0,016	2,210	0,99
140	0,484	0,187	0,018	2,158	0,99

Tableau 4.2: Paramètres obtenus pour les différents ajustements réalisés avec RETC sur les mesures réalisées au laboratoire, avec θ_s fixée à 90% de la porosité ; R^2 est le coefficient de détermination entre valeurs prédites par RETC et observées pour $\theta(h)$.

Profondeur (cm)	θ_s (cm ³ /cm ³)	θ_r (cm ³ /cm ³)	α (cm ⁻¹)	n	R^2
10	0,440	0,105	0,133	1,524	0,96
20	0,500	0,060	17,197	1,161	0,99
30	0,491	0,090	0,328	1,348	0,97
40	0,451	0,149	0,071	1,370	0,99
50	0,469	0,149	0,057	1,427	0,98
60	0,442	0,183	0,026	1,472	0,99
70	0,440	0,224	0,008	1,776	0,94
80	0,440	0,184	0,028	1,529	0,99
90	0,432	0,000	0,040	1,079	0,98
100	0,435	0,293	0,001	2,138	0,74
110	0,432	0,334	0,001	2,177	0,36
120	0,468	0,287	0,003	1,650	0,99
130	0,465	0,177	0,016	2,213	0,98
140	0,466	0,188	0,015	2,312	0,99

Tableau 4.3: Paramètres obtenus pour les différents ajustements réalisés avec RETC sur les mesures réalisées *in situ*, avec θ_s fixée à 90% de la porosité ; R^2 est le coefficient de détermination entre valeurs prédites par RETC et observées pour $\theta(h)$.

Profondeur (cm)	θ_s (cm ³ /cm ³)	θ_r (cm ³ /cm ³)	α (cm ⁻¹)	n	R^2
10	0,440	0,000	0,417	1,241	0,99
20	0,500	0,000	0,395	1,197	0,97
30	0,491	0,000	0,746	1,155	0,96
40	0,451	0,000	0,861	1,147	0,94
60	0,442	0,001	0,379	1,194	0,95
100	0,435	0,000	0,028	1,326	0,89
140	0,466	0,000	0,036	1,182	0,90

4.2.2.b Résultats de la modélisation avec les paramètres des ajustements RETC

Les paramètres obtenus grâce aux différents ajustements RETC (Tableau 4.1, 4.2 à 4.3), le paramètre de tortuosité ℓ (pris égal à -2) et la conductivité hydraulique à saturation K_s (§3.2.3.d) n'ont pas permis de représenter correctement les dynamiques hydriques observées *in situ* pour l'expérience 1. Les paramètres issus de l'ajustement RETC sur les mesures réalisées au laboratoire ne permettent pas de simuler la dynamique hydrique observée *in situ*, vraisemblablement à cause des différences observées entre les mesures obtenues *in situ* et celles obtenues au laboratoire (§ 4.2.2a). Ceci a notamment été observé par Mermoud et Xu (2006) et Chalhoub (2010). De même, les paramètres issus de l'ajustement RETC sur les mesures *in situ* ne sont guère plus pertinents pour simuler les flux hydriques observés *in situ*. Les paramètres issus de l'ajustement RETC avec les mesures obtenues au laboratoire et la teneur en eau à saturation fixée à 90 % de la porosité sont les seuls permettant d'obtenir une simulation, mais avec des R^2 très faibles. On remarque aisément le résultat quand on compare graphiquement par exemple pour la profondeur 20 cm les mesures de potentiels matriciels (h) et de teneur en eau (θ) simulées avec HYDRUS-1D et les mesures observées *in situ* (Figure 4.7).

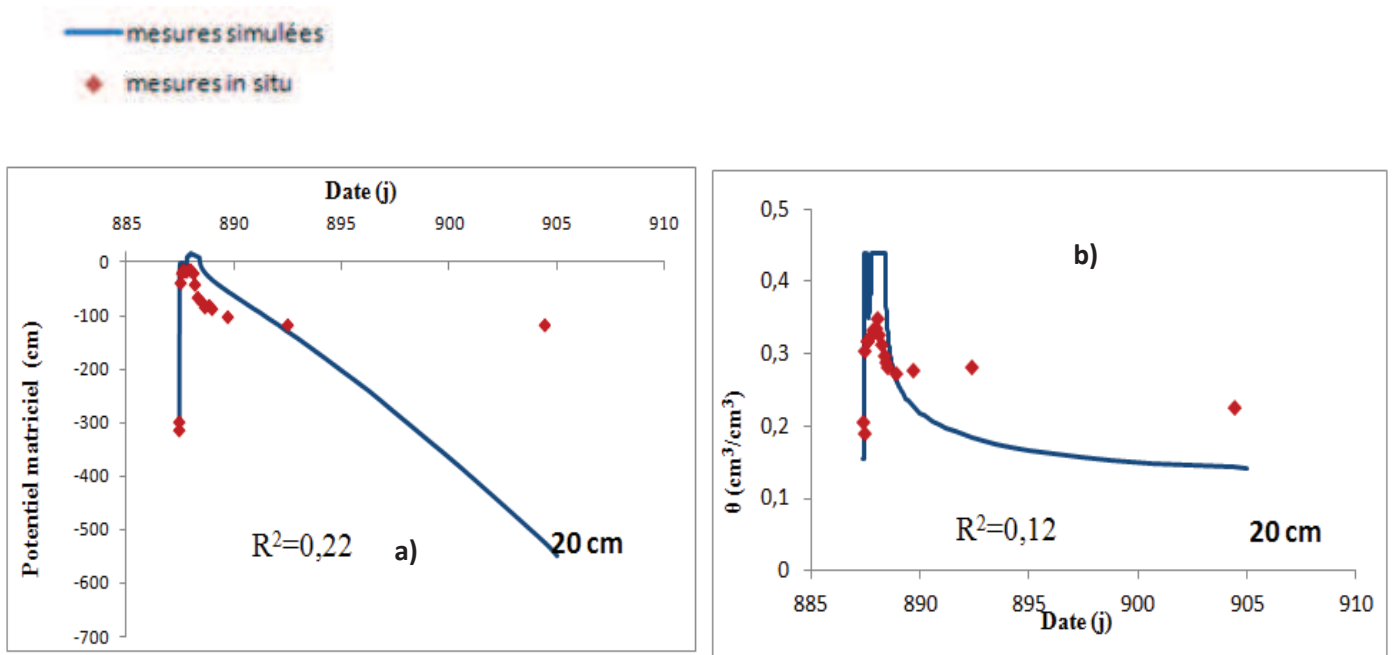


Figure 4.7 : Valeurs de potentiel matriciel (a) et de teneur en eau volumique (b) mesurées *in situ* à la profondeur 20 cm et simulées avec HYDRUS 1-D avec les paramètres hydrodynamiques obtenues avec ajustement RETC au laboratoire et θ_s fixée 90 % de la porosité.

4.2.2.c Optimisation des paramètres

Etant donné que les paramètres hydrodynamiques obtenus avec les ajustements RETC ne prédisent pas correctement les transferts hydriques, nous avons fait une optimisation des paramètres hydriques par calage du modèle HYDRUS-1D (méthode inverse) sur les données expérimentales mesurées *in situ* lors de l'expérience de drainage interne. Pour utiliser le modèle HYDRUS-1D, nous avons d'abord discrétisé le profil de sol en 9 matériaux (cf. Tableau 3.14). Un matériau spécifique a été distingué en surface, entre 0 et 5 cm de profondeur, afin de permettre un meilleur contrôle de la lame d'eau en surface. Les profondeurs matériaux 2 à 8 ont été obtenues en observant les profils de teneur en eau (exemple Figure 4.8). On a ainsi regroupé les couches de sol ayant un comportement hydrique similaire ou proche dans un même matériau. Le matériau 9 est placé aux profondeurs 165 à 180 cm.

L'optimisation des paramètres hydrauliques des différents matériaux est faite manuellement matériau par matériau (Tableau 4.4) en commençant par le matériau situé le plus en profondeur et en remontant vers la surface. La procédure a été répétée une seconde fois, afin de s'assurer de la stabilité des paramètres obtenus. Après optimisation, on remarque que les

teneurs en eau à saturation (θ_s) sont généralement plus faibles, que celles obtenues à l'aide des mesures de rétention au laboratoire ou à l'aide de la porosité mesurée *in situ* que les teneurs en eau résiduelles (θ_r) ne sont généralement pas égales à 0 (cf. Tableau 4.1 à 4.4).

L'optimisation du paramètre de tortuosité ℓ révèle son importance dans la simulation.

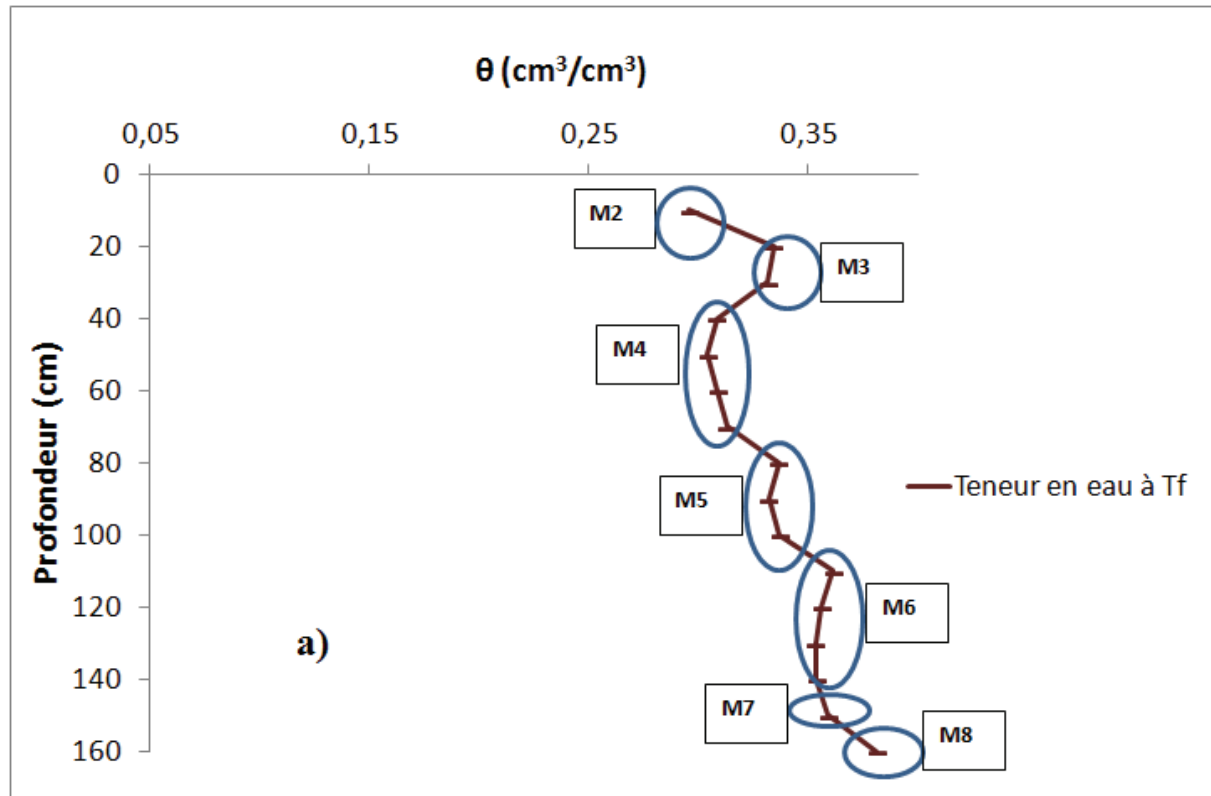


Figure 4.8: Discretisation du profil de sol grâce au profil de teneur en eau mesuré à la fin de l'infiltration de l'expérience 1.

Tableau 4.4 : Valeurs des paramètres hydriques optimisés par calage du modèle HYDRUS-1D (méthode inverse) par matériau.

Matériaux	Profondeur (cm)	θ_s (cm ³ /cm ³)	θ_r (cm ³ /cm ³)	α (cm ⁻¹)	n	l	K_s cm.j ⁻¹
1	0-5	0,300	0,028	0,069	1,058	-2,000	9,000
2	5-15	0,450	0,050	0,480	1,334	-0,263	545,00
3	15-35	0,387	0,050	0,070	1,240	2,545	1172,0
4	35-75	0,350	0,114	0,035	1,400	-0,240	223,60
5	75-105	0,360	0,072	0,014	1,887	2,343	50,733
6	105-145	0,412	0,120	0,134	1,182	7,920	639,60
7	145-155	0,400	0,200	0,036	1,182	12,00	900,00
8	155-165	0,401	0,159	0,009	1,272	5,356	832,74
9	165-180	0,378	0,000	0,060	1,435	10,66	945,24

4.2.2.d Résultats de la modélisation avec les paramètres optimisés

Les résultats obtenus après optimisation permettent de simuler au mieux l'expérience 1 (drainage interne) avec HYDRUS-1D. Les valeurs prédites par le modèle et les valeurs observées sont comparées dans la figure 4.9. Avec des critères de validation R^2 très élevés (proche de 1), le modèle simule bien l'expérience de drainage interne. Le modèle permet également une bonne représentation de la hauteur de la lame d'eau (10 cm) apportée durant l'irrigation en surface (Figure 4.10).

Ainsi, on va simuler l'expérience en sol nu avec évaporation et l'expérience avec palmier grâce ce modèle paramétré avec les paramètres hydriques optimisés manuellement par calage avec la méthode inverse d'HYDRUS-1D.

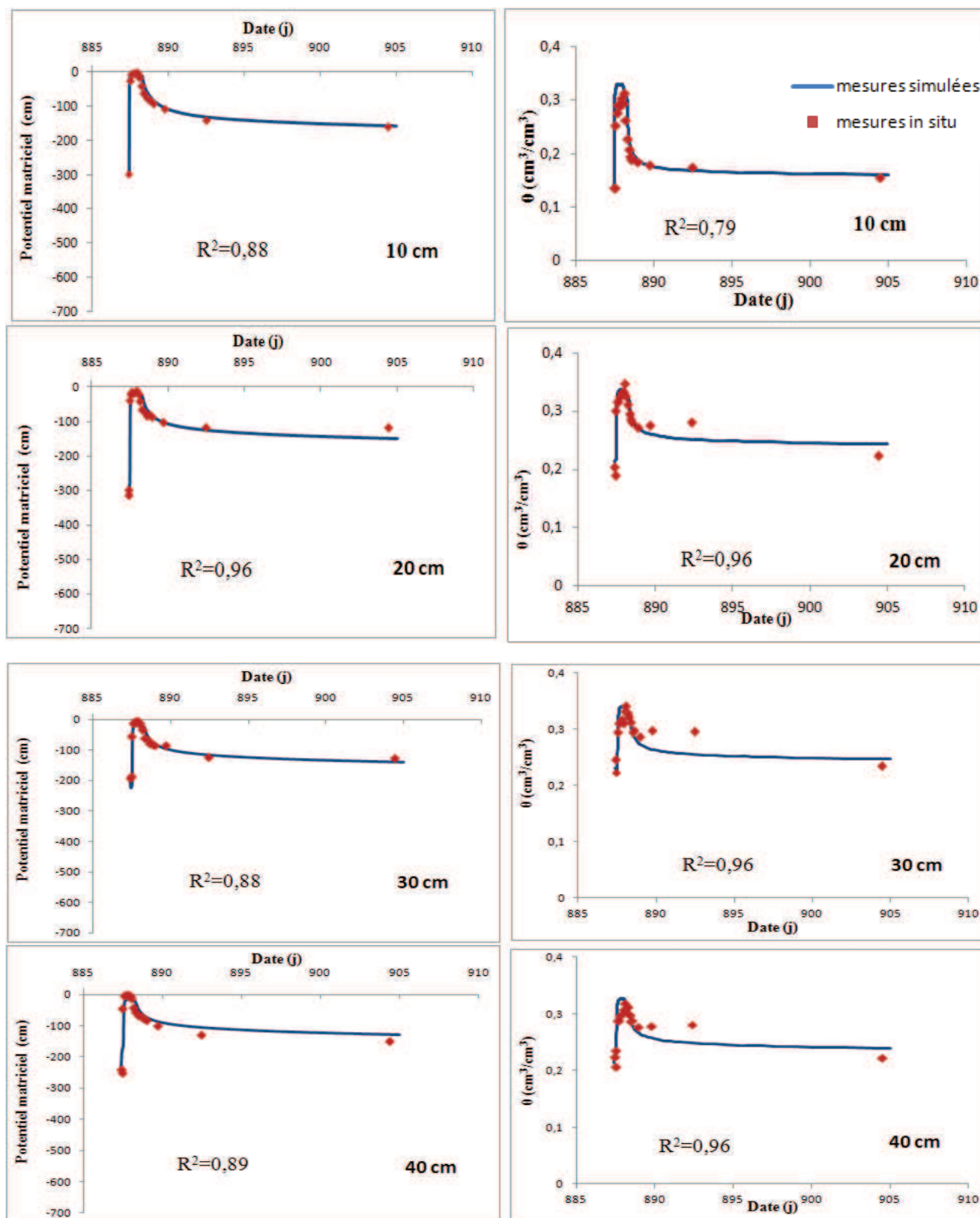


Figure 4.9 (début) : Dynamique hydrique simulée à l'aide d'HYDRUS-1D après optimisation par calage des paramètres hydriques du sol pour les différentes profondeurs instrumentées avec les tensiomètres et la sonde à neutrons ; $T_0 = 887,42$ j.

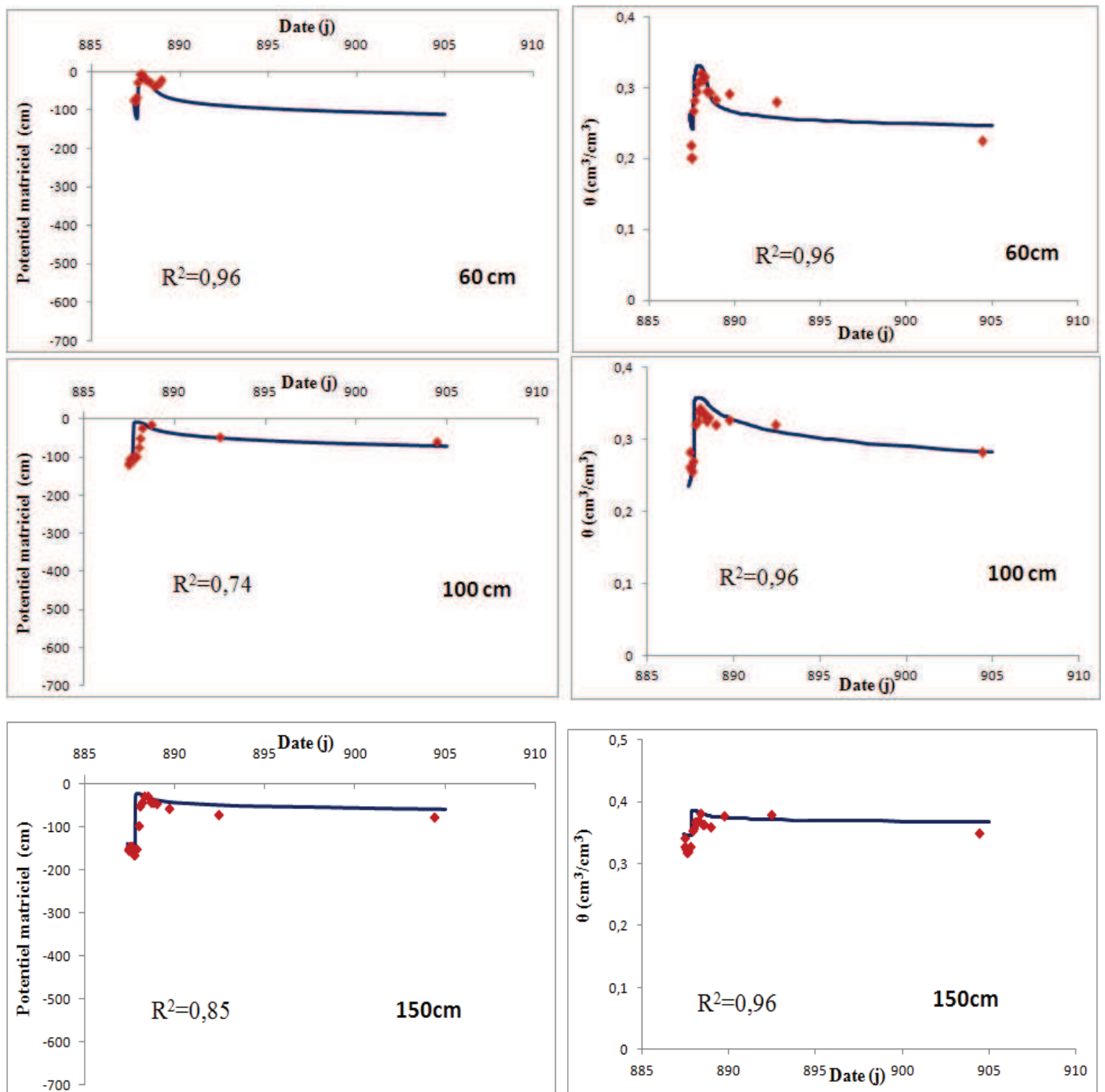


Figure 4.9 (fin): Dynamique hydrique simulée à l'aide d'HYDRUS-1D après optimisation par calage des paramètres hydriques du sol pour les différentes profondeurs instrumentées avec les tensiomètres et la sonde à neutrons ; $T_0 = 887,42$ j.

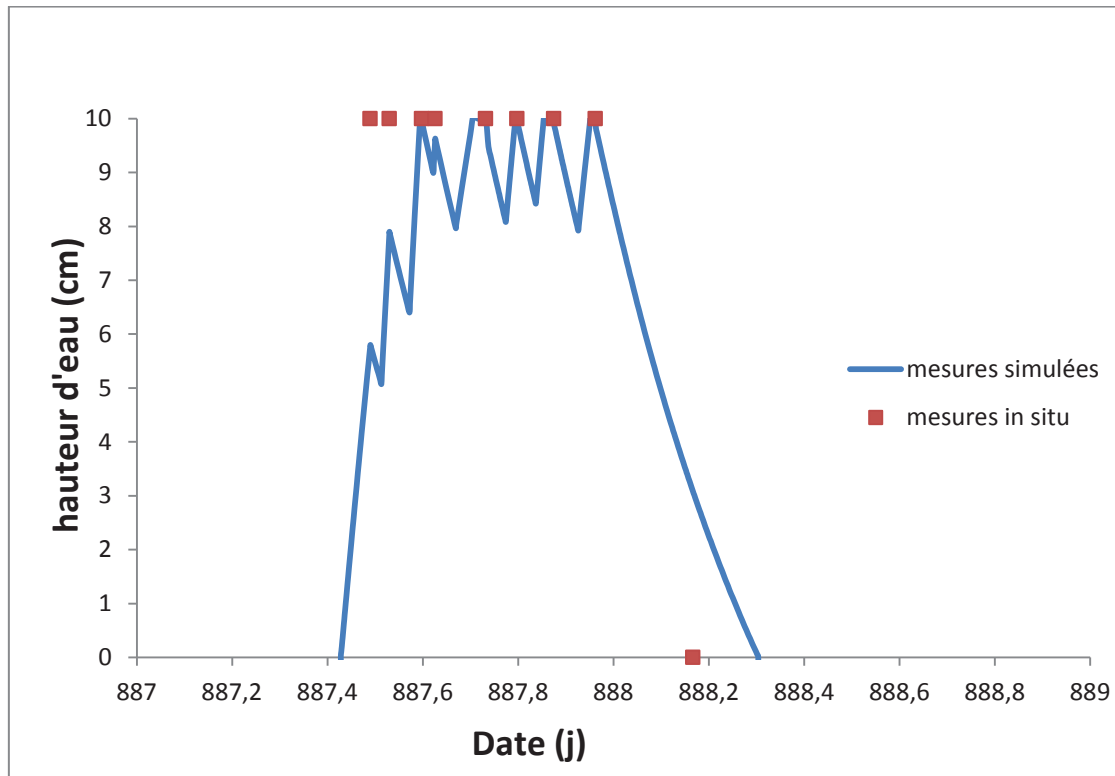


Figure 4.10 : Hauteur de la lame d'eau en surface du sol apportée pendant l'irrigation (mesures *in situ*) et valeurs de cette même hauteur d'eau simulée avec HYDRUS-1D ; $T_0 = 887,42$ j.

4.2.3 Bilan hydrique

Au cours de l'irrigation, une lame d'eau de 359 mm est apportée au sol (cf : Tableau 3.11).

HYDRUS-1D simule un flux de surface cumulé de 298 mm. Cette différence avec la lame d'eau réellement apportée est liée au fait que nous avons fixé au modèle une condition initiale de 10 cm d'eau à ne pas dépasser en surface. Ainsi, pour pouvoir maintenir cette hauteur de lame d'eau, HYDRUS-1D va éliminer, par ce qu'il considère comme du ruissellement, une lame d'eau de 60 mm.

La quantité d'eau sortant en bas du profil (drainage) représente 255 mm d'eau sur toute la période de simulation (Figure 4.11). Pour un sol nu, l'équation complète du bilan hydrique entre la surface du sol et une profondeur z quelconque s'écrit (Daghari *et al.*, 1989):

$$P + I - R = \Delta S + ET + D \quad (\text{Equation 4.1})$$

Où : ET = l'évapotranspiration réelle, en mm; P = la pluviométrie, en mm; I= l'irrigation, en mm ; ΔS = la variation du stock d'eau du profil du sol, en mm ; D= les flux de drainage, en mm ; R = le ruissellement, en mm.

Au cours de l'expérience 1, l'évaporation est égale à 0, par conséquent la variation de stock d'eau est donnée par l'équation 4.2.

$$\Delta S = I - R - D \quad (\text{Equation 4.2})$$

Avec un apport d'eau simulé (I-R) de 298 mm et un drainage de 255 mm, on obtient une variation de stock d'eau de 43 mm. En calculant la variation du stock d'eau du profil simulée entre le début (453 mm) et la fin de l'expérience (496 mm), on retrouve cette variation de stock d'eau de 43 mm. Sur la période sans palmier et sans évaporation, on observe que 85,5 % de la lame d'eau apportée a été drainée vers la profondeur (Figure 4.12). La variation de stock d'eau est de 43,3 mm soit les 14,5 % restant.

Cum Bottom Flux

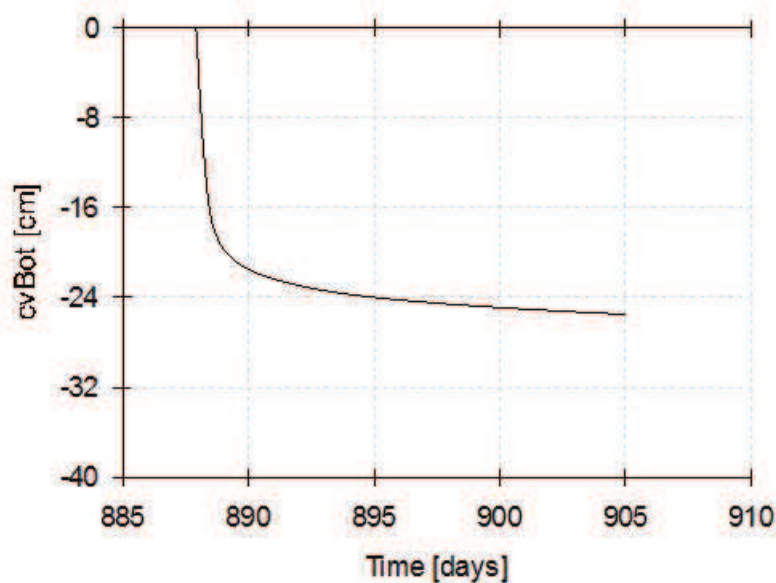


Figure 4.11 : Drainage cumulé simulé avec HYDRUS-1D pour le sol nu sans évaporation ; $T_0 = 887,42$ j.

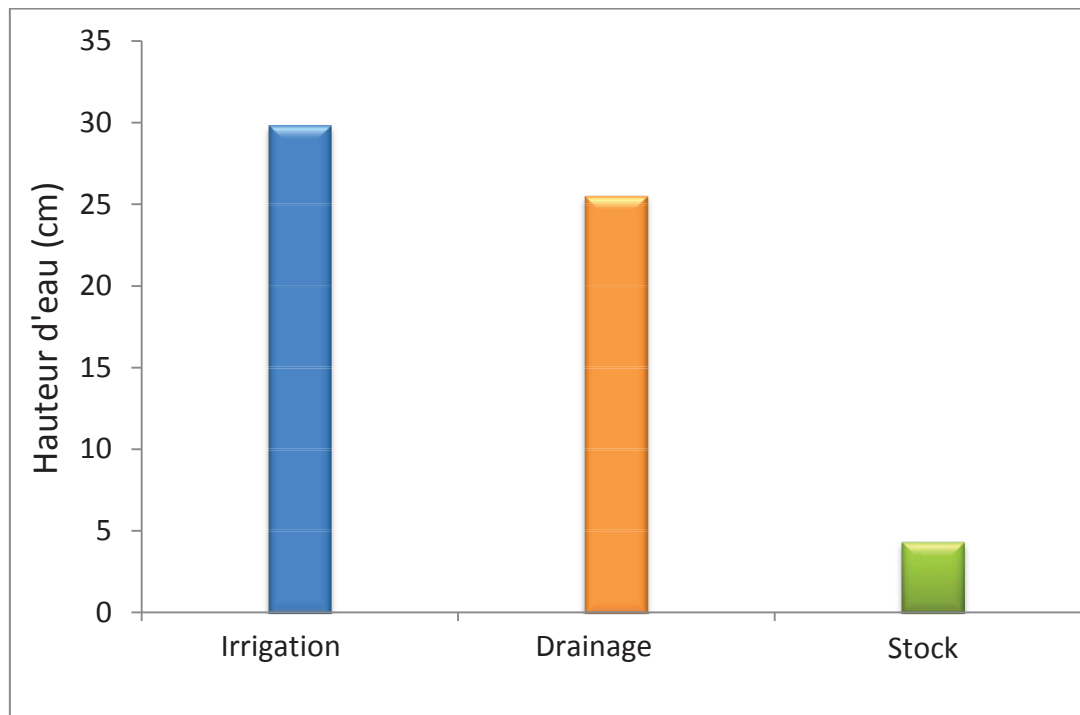


Figure 4.12 : Termes du bilan hydrique du sol pour la période sans palmier et sans évaporation simulés avec HYDRUS-1D.

4.3 Expériences en sol nu : caractérisation de l'évaporation

Un suivi de l'état hydrique du sol sans palmier au cours d'une phase d'infiltration et d'une phase de redistribution a été réalisé pour caractériser l'évaporation du sol (cf : § 3.7.2). Dans cette expérience, le flux d'eau du sol est soumis à l'action simultanée de l'évaporation et de l'infiltration ou de la redistribution. Les mesures se sont déroulées du 25/04/2014 à 11 h au 29/05/2014 10 h.

4.3.1 Mesures expérimentales

4.3.1.a Période d'infiltration

L'apport d'eau a démarré le 25/04/2014 à 11h01 (T_0) et a été arrêté le 25/04/2014 à 23h05 (T_f) (cf : Tableau 3.12). Les données de teneur en eau volumique θ et de charge hydraulique H sont représentées dans la figure 4.13 pour la période d'infiltration.

A T_0 , on constate que le sol est relativement plus sec en surface à cause de l'évaporation avec un pF compris entre 2,7 et 2,8 (Figure 4.13b). On observe un plan de flux nul assez marqué vers 60 cm de profondeur. En profondeur entre 100 cm et 150 cm, le pF est voisin de 2,5. La teneur en eau varie entre 11,5 et 34 % dans l'ensemble du profil, avec toujours une forte

hétérogénéité (Figure 4.13a). A T_0 , le sol est plus sec que l'état initial T_0 de l'expérience en drainage interne (Figure 4.3) à cause de la présence du palmier dattier avant la réalisation de cette expérience avec évaporation du sol. En effet, ce dernier a eu un effet sur l'état hydrique du sol jusqu'à 110 cm.

Neuf heures après le début de l'irrigation ($T+9h$), le profil de sol est saturé jusqu'à 60 cm de profondeur. La teneur en eau varie entre 27 et 33 % pour la couche de sol compris en 10 et 70 cm. Pour les couches de sol plus en profondeur, entre 110 et 160 cm, le profil de teneur en eau ne varie quasiment pas. Quant au profil de charge hydraulique, il varie légèrement à 100 cm mais reste stable plus en profondeur (Figure 4.13b).

4.3.1.b Période de redistribution

La période de redistribution s'est déroulée du 25/04/2014 à 23h05 (T_f) au 29/05/2014 à 10h (T_f+32 jours). Les données de teneur en eau volumique θ et de charge hydraulique H sont représentées dans la figure 4.14 pour la période de redistribution.

En surface (entre 10 et 60 cm de profondeur), le profil de charge commence à s'éloigner de la droite des potentiels gravitaires dès quatre heures après la fin de l'irrigation (T_f+4h) (Figure 4.14b). Au même moment, pour le profil de teneur en eau, l'assèchement n'est observé que pour les profondeurs 10 et 20 cm (Figure 4.14a). Un jour après la fin de l'irrigation (T_f+1 jour), le profil hydrique s'assèche en surface et le front d'infiltration atteint 100 cm.

Deux jours après la fin de l'irrigation (T_f+2 jours) et jusqu'à la fin de l'expérience (T_f+32 jours), le gradient hydraulique devient de plus en plus négatif en surface du fait de l'évaporation du sol. Le pF en surface est aux alentours de 2,15-2,5. Grâce à la redistribution de l'eau en profondeur, le sol devient plus humide à T_f+2 jours, avec un pF de 1,6 à 100 cm et de 1,8 à 150 cm. A T_f+32 jours, à 100 cm de profondeur, le pF devient égale à 2,17, mais ne varie quasiment pas à 150 cm (1,7). Le tensiomètre à 60 cm ne donne plus de valeurs fiables à partir du T_f+11 jours.

Entre 10 et 30 cm, à T_f+2 jours, la teneur en eau varie entre 14 et 26 % et ne va plus varier jusqu'à la fin de l'expérience à T_f+32 jours. Au niveau de couches 40 à 70 cm, la teneur en eau varie de 26 % à T_f+2 jours à 23% à T_f+32 jours. En profondeur, la teneur en eau maximale, observée à partir de T_f+1 jour, est de 38 % et ne va pas trop varier jusqu'à T_f+32 jours. Ces faibles variations pourraient être dues au fait qu'il n'a pas de plante. Cette hypothèse pourra être vérifiée avec l'expérience 3 (caractérisation du puits racinaires).

Toutefois, on observe une diminution du potentiel dans les couches en profondeur (à 100 cm). Cette différence de la dynamique entre la teneur en eau et le potentiel est liée à l'hétérogénéité spatiale du sol. Trente deux jours après la fin de l'irrigation, le profil hydrique reste plus humide que l'état initial (Figure 4.15), contrairement à l'expérience sans palmier et sans évaporation où le profil était revenu à l'état hydrique avant l'irrigation (cf : Figure 4.5). Cette différence s'explique par l'influence du puits racinaire du palmier dattier exercée sur l'état initial de l'expérience sans palmier avec évaporation.

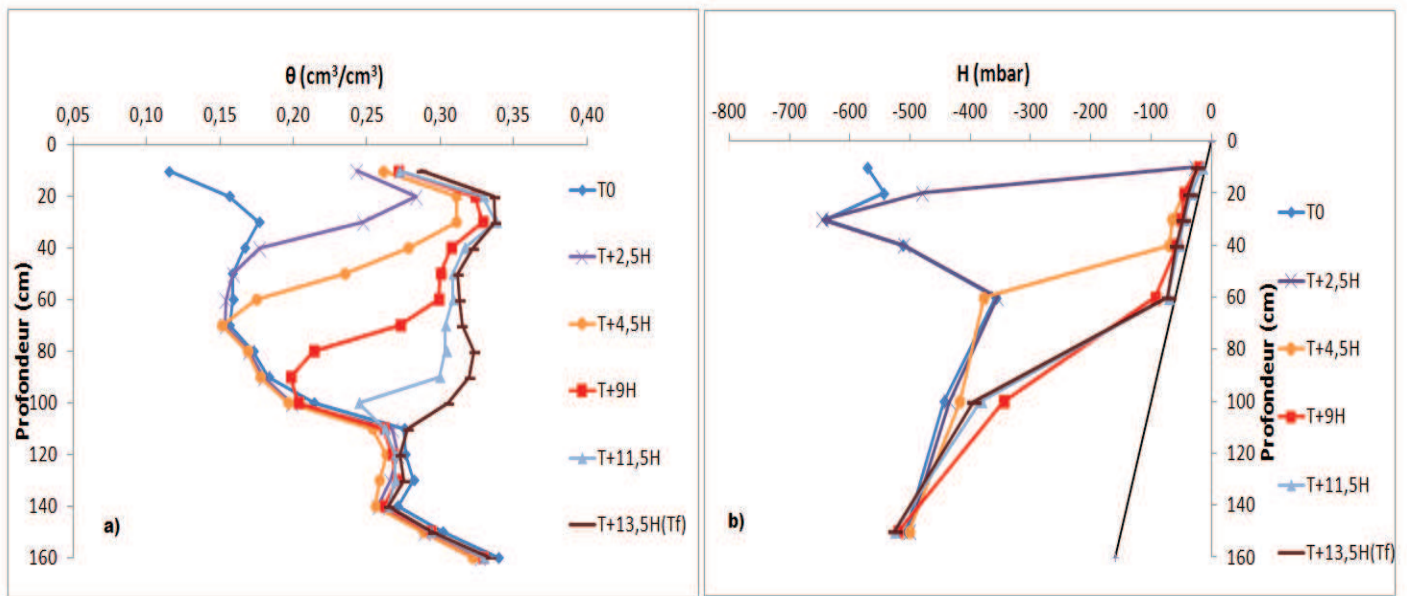


Figure 4.13: Profil hydrique (a) et potentiel total (H) (b) durant la phase d'infiltration. Scénario sans palmier dattier avec évaporation. T_0 : début de l'infiltration, T_f : fin de l'infiltration.

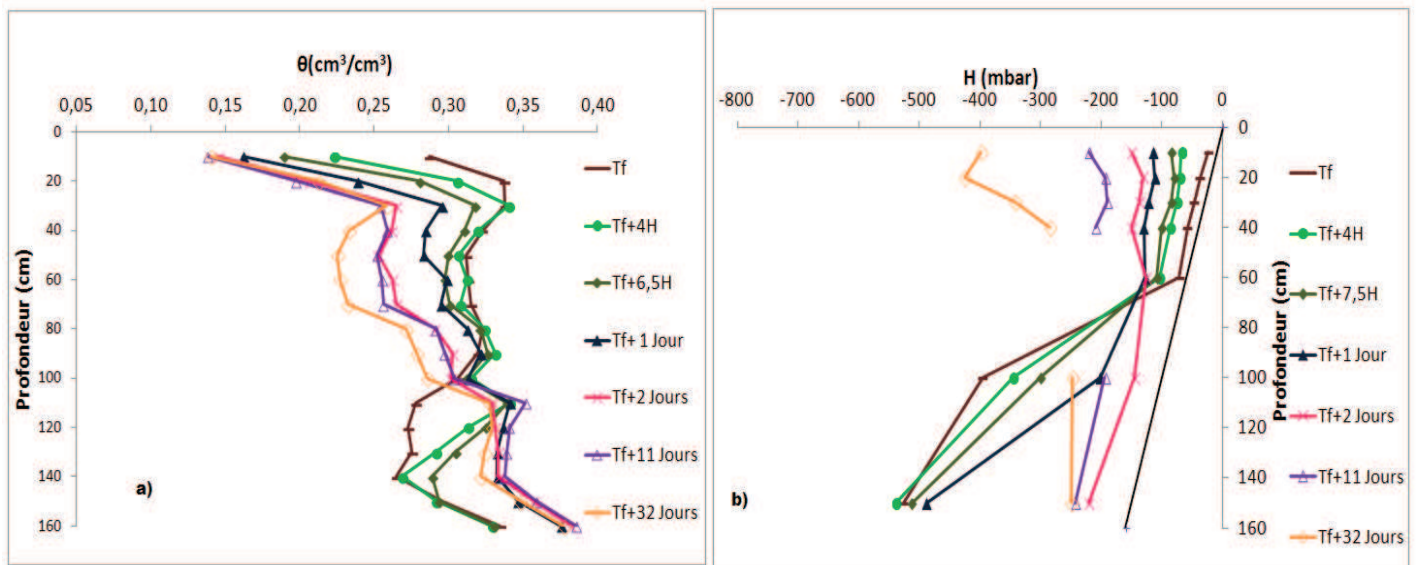


Figure 4.14 : Profil hydrique (a) et potentiel total (H) (b) durant la phase de redistribution. Scénario sans palmier dattier avec évaporation. T_f : fin de l'infiltration.

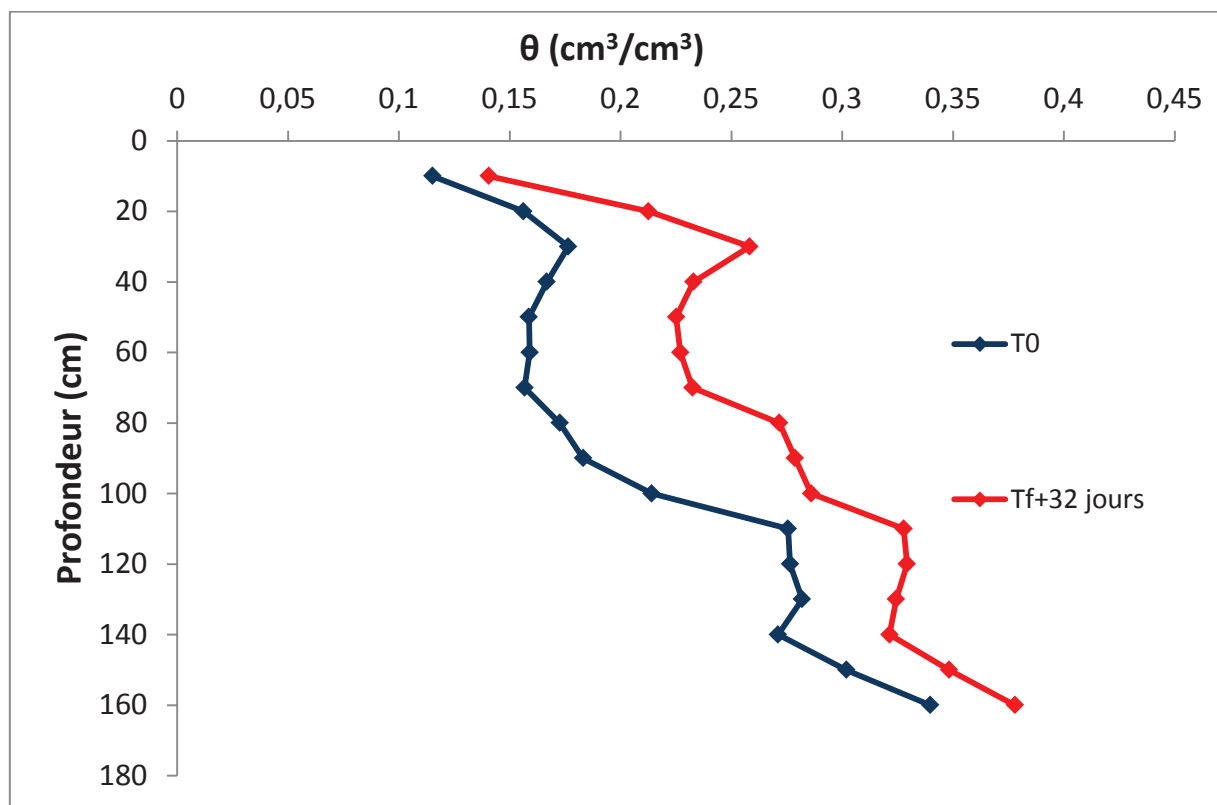


Figure 4.15 : Profil hydrique de l'état initial T_0 et profil hydrique 32 jours après la fin de l'irrigation (T_f+32 jours). Scénario sans palmier dattier avec évaporation du sol.

4.3.2 Modélisation

Le modèle avec les paramètres optimisés lors de l'expérience en drainage interne (Tableau 4.4) permet une bonne représentation de la dynamique de la teneur en eau et de potentiel du scénario sans palmier avec évaporation. Il simule bien la hauteur de la lame d'eau (10 cm) apportée durant l'irrigation en surface (Figure 4.16). Les simulations donnent des R^2 proches de 1 (Figure 4.17). On observe néanmoins que les simulations du potentiel aux profondeurs 10, 100 et 150 cm donnent des R^2 plus faibles que celles aux autres profondeurs. En effet, à 10 cm, le modèle sous-estime le potentiel au cours de la redistribution et surestime celui-ci à la profondeur 150 cm. A cette dernière profondeur, le modèle simule une arrivée du front d'infiltration plus tôt que celle mesurée *in situ*.

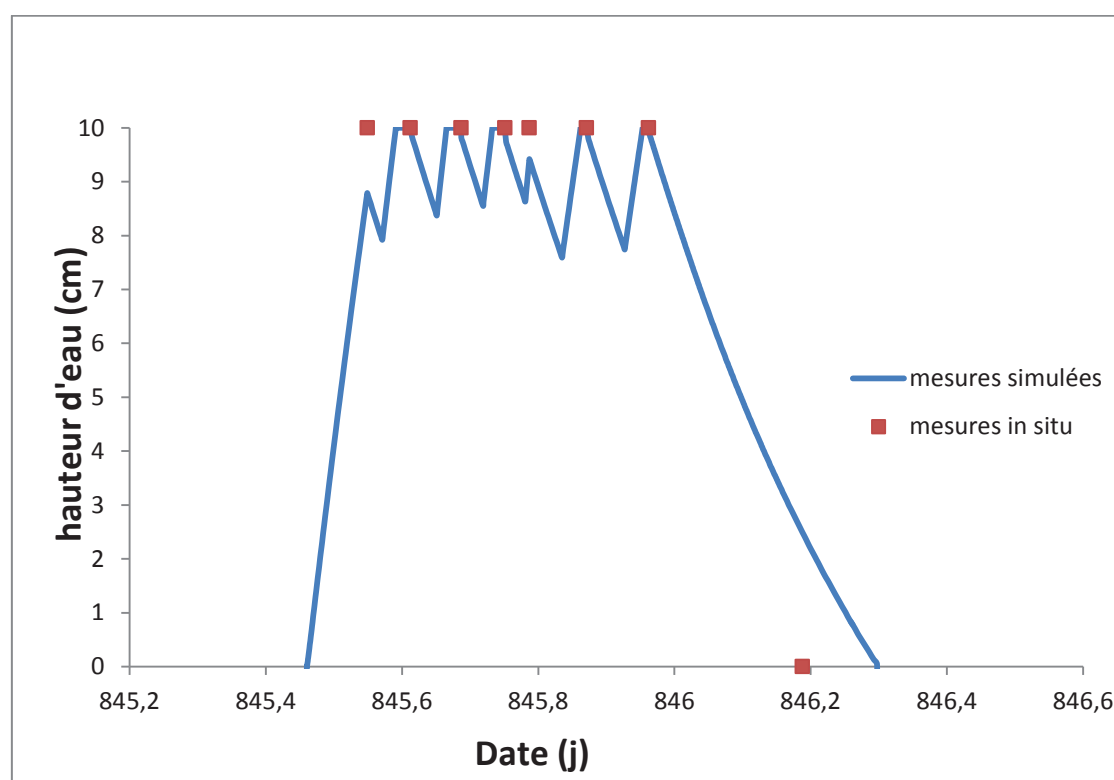
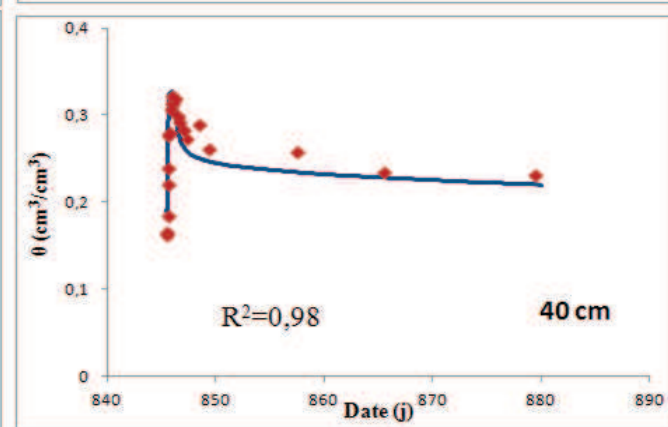
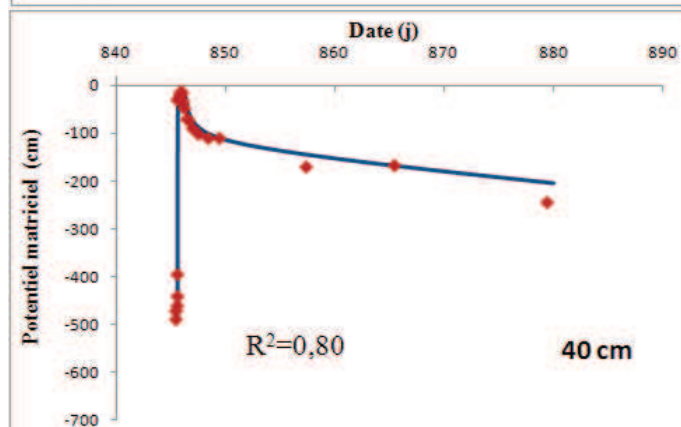
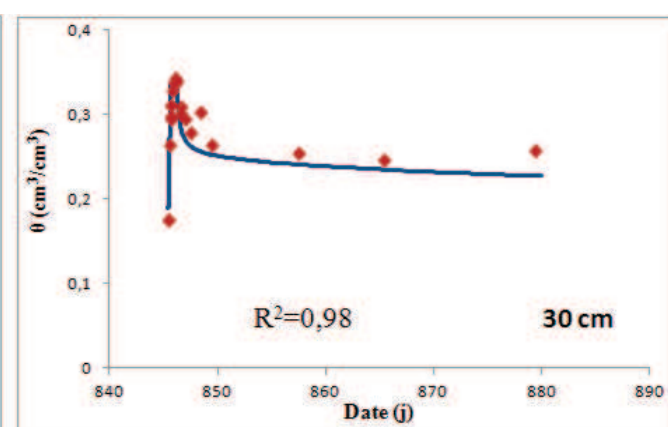
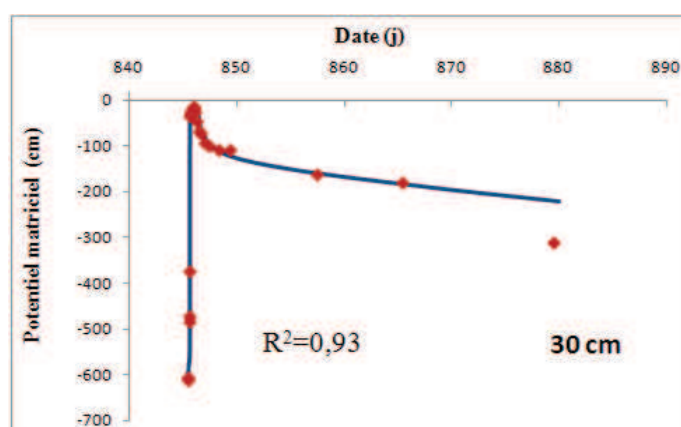
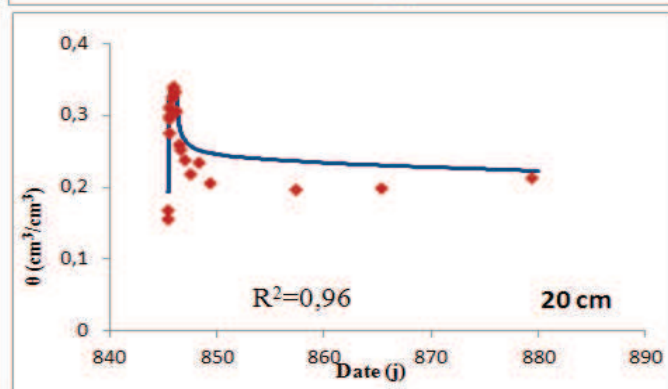
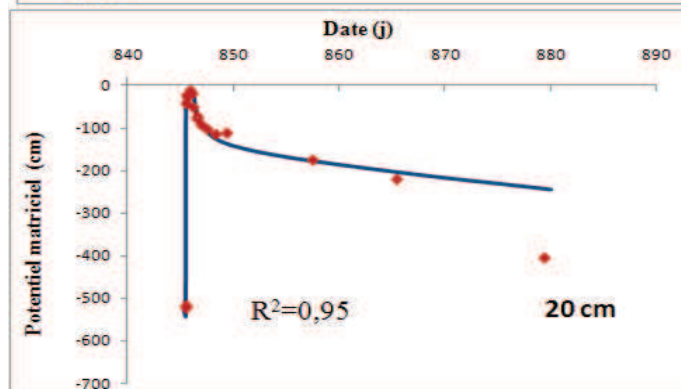
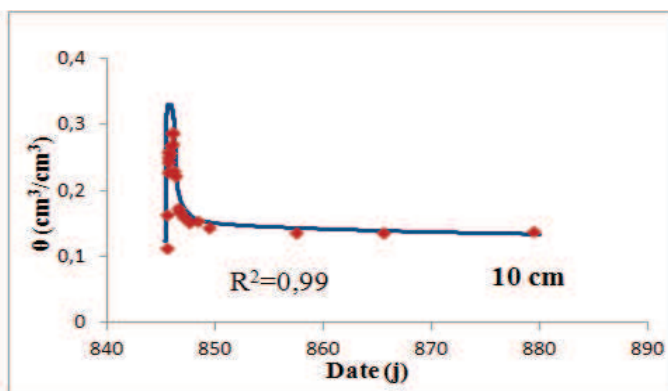
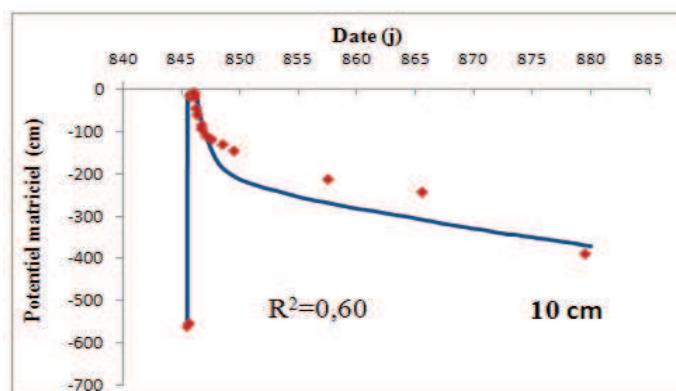


Figure 4.16 : Hauteur de la lame d'eau en surface apportée pendant l'irrigation (mesures *in situ*) et valeurs de cette même hauteur d'eau simulée avec HYDRUS-1D (mesures simulées) ; scénario sans palmier avec évaporation; $T_0 = 845,42$ j.



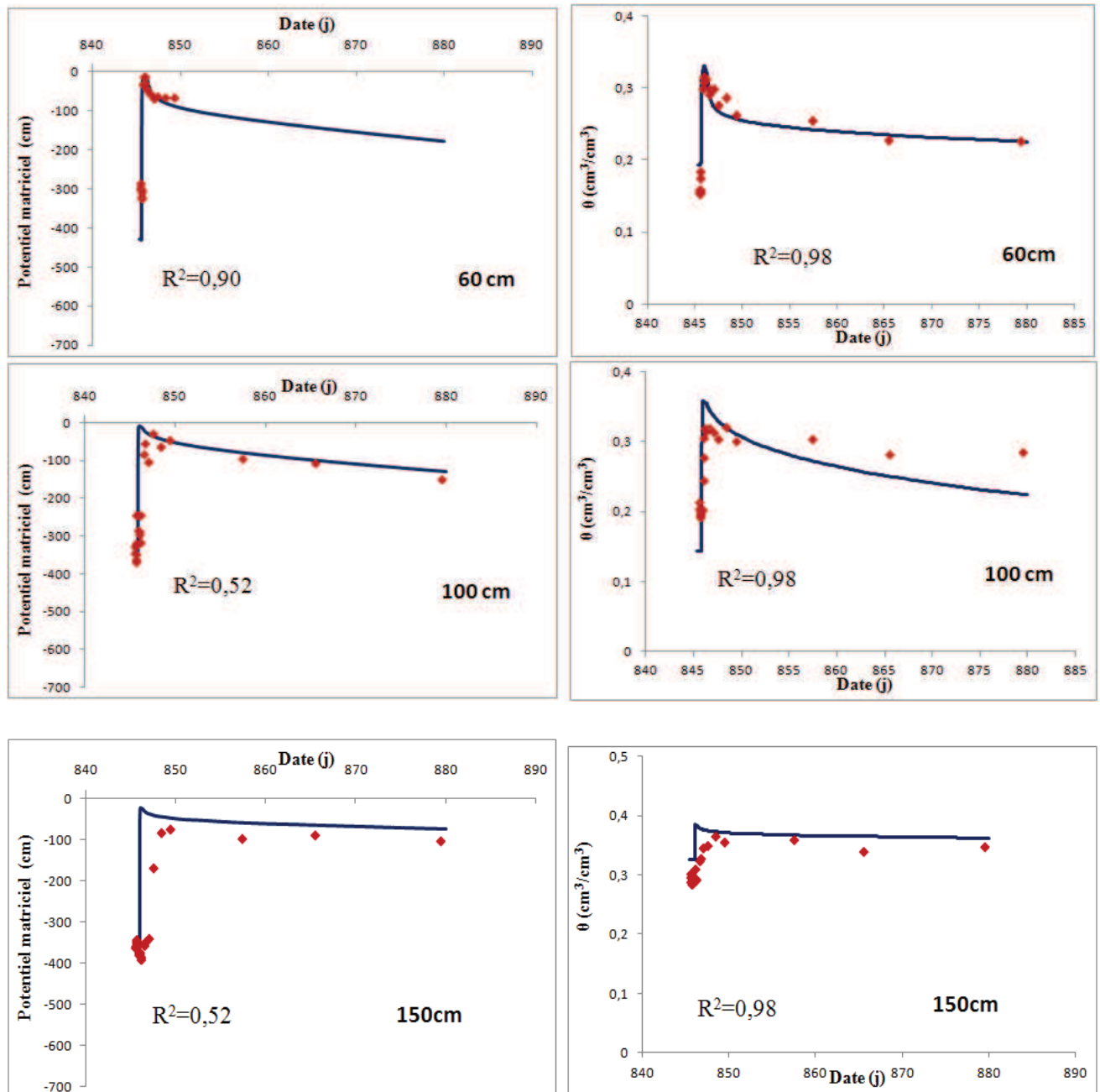


Figure 4.17 (fin): Dynamique hydrique simulée à l'aide d'HYDRUS-1D pour les différentes profondeurs instrumentées avec les tensiomètres et la sonde à neutrons pour le scénario sans palmier avec évaporation du sol ; $T_0 = 845,42$ j.

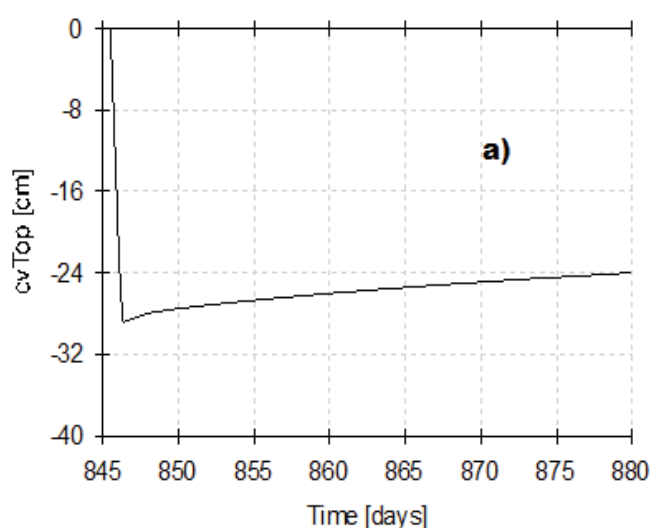
4.3.3 Bilan hydrique

Le flux de surface cumulé au cours de l'expérience en sol nu est de 240 mm d'eau pour une lame d'eau infiltrée de 294 mm. En comparant avec l'expérience sans palmier et sans évaporation, on remarque nettement l'effet de l'évaporation sur le flux de surface (Figure 4.18). Ce flux évaporatoire cumulé est de 54 mm et représente 18,3 % de l'irrigation (Figure 4.19).

Au cours de cette expérience en sol nu, 158 mm d'eau sont drainés en profondeur (Figure 4.20), soit 53,8 % de l'eau apportée par irrigation (Figure 4.19). La quantité d'eau sortant du profil par drainage dans le cas de sol nu sans évaporation est plus grande que celle du sol nu avec évaporation (Figure 4.12).

La variation de stock d'eau simulée à l'aide du modèle est 82 mm (Figure 4.19). Le stock d'eau varie plus, comparé à celui avec le scénario en sol nu et sans évaporation (Figure 4.12). Ce qui s'explique par le fait que la quantité d'eau est perdue à la fois par drainage et par évaporation.

Cum. Actual Surface Flux



Cum. Actual Surface Flux

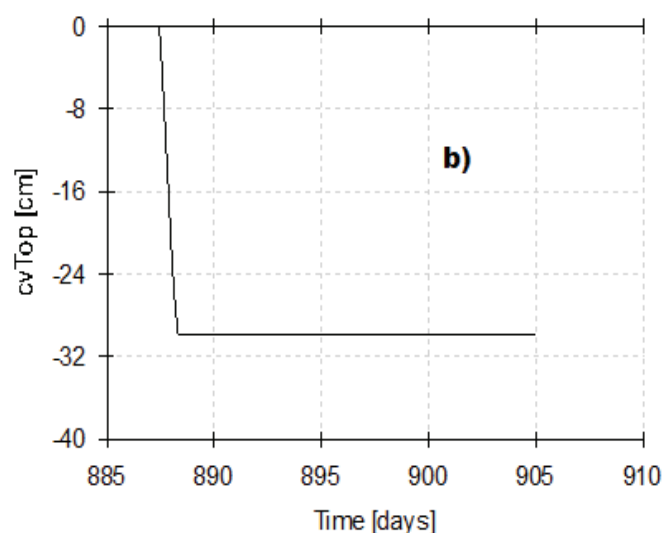


Figure 4.18 : Flux de surface réel cumulé pour le sol nu avec évaporation ($T_0= 845,42$ j) (a) et flux de surface réel cumulé pour le sol nu et sans évaporation ($T_0= 885,42$ j) (b) simulé avec HYDRUS-1D.

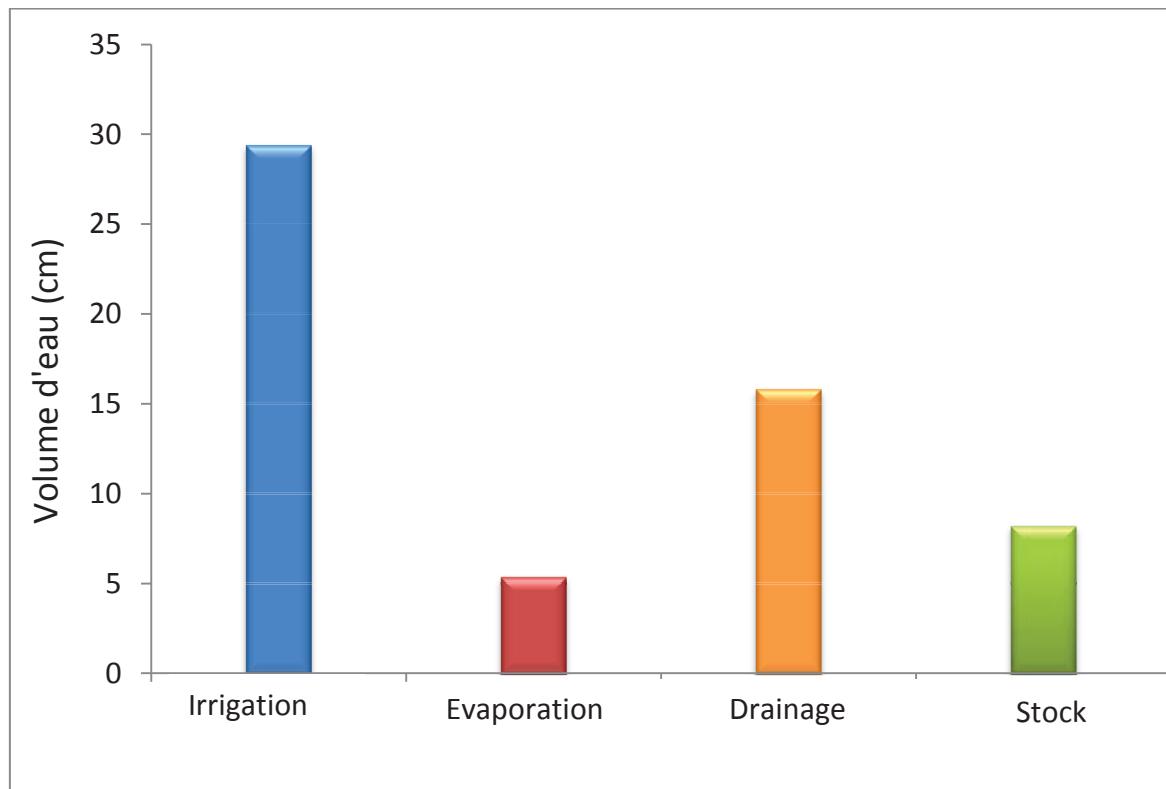


Figure 4.19: Termes du bilan hydrique du sol pour la période sans palmier avec évaporation du sol simulés avec HYDRUS-1D.

Cum. Bottom Flux

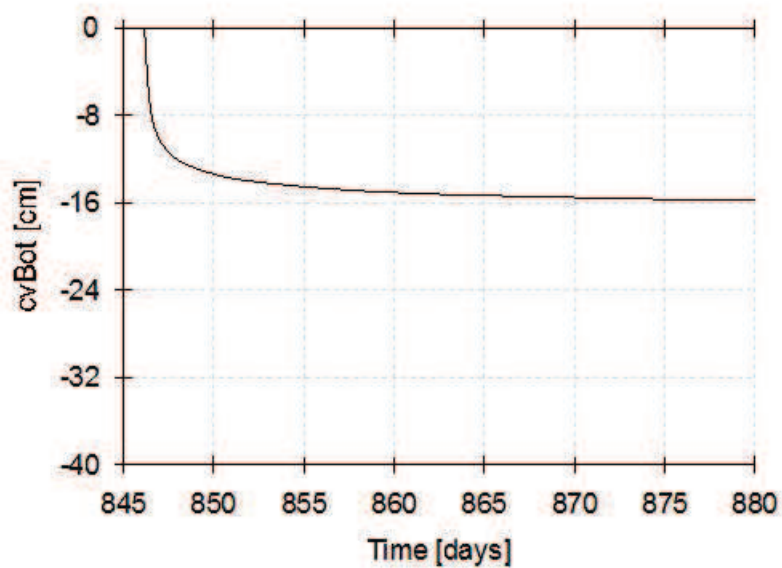


Figure 4.20: Drainage cumulé pour le sol nu avec évaporation simulé avec HYDRUS-1D ; $T_0 = 845,42$ j.

4.4 Expérience avec le palmier dattier : caractérisation du puits racinaire

Afin de caractériser le puits racinaire du palmier dattier, une expérience d'infiltration et de redistribution a été réalisée avec le palmier en place (cf : § 3.7.3). L'expérience s'est déroulée du 27/02/2014 à 10h (T_0) jusqu'au 2/04/2014 à 10h (T_f +32 jours).

4.4.1 Mesures expérimentales

4.4.1.a Période d'infiltration

L'expérience a débuté par un apport d'eau à partir du 27/02/2014 à 10h (T_0) et jusqu'au 27/02/2014 à 23h30 (T_f) (Tableau 3.13). Les données de teneur en eau volumique θ et de charge hydraulique H sont représentées dans la figure 4.21 pour la période d'infiltration.

Le profil de teneur en eau initial est tout à fait similaire à celui de l'expérience en sol sans palmier avec évaporation (cf : Figure 4.13). Au début de l'expérience (T_0), dans la couche de surface (10 à 60 cm), le sol est sec avec un pF entre 2,6 et 2,8 (Figure 4.21b). Plus en profondeur, entre 100 et 150 cm, le pF varie entre 2,5 et 2,7. Dans l'ensemble, le profil de charge indique un sol relativement sec et hétérogène. Après huit heures d'irrigation, la lame d'eau ne sature le sol que jusqu'à la profondeur 60 cm.

A T_0 , la teneur en eau de l'ensemble du profil varie entre 12 % (pour la couche 10 cm) à 30 % (pour la couche 160 cm) (Figure 4.21a). Entre 40 cm et 100 cm, la teneur en eau moyenne enregistrée est de 17 %. De 120 à 160 cm, le profil est plus humide avec des teneurs en eau de l'ordre de 25 à 30 %. Pour le profil de teneur en eau, le front d'infiltration n'arrive à 90 cm de profondeur (teneur en eau de 26,7 %) qu'à la fin de l'irrigation (T_f). Par contre, au niveau des couches de sol plus profondes (entre 100 et 160 cm), aucune variation de teneur en eau n'est observée pendant cette période. A la même période, pour l'expérience en sol nu avec évaporation, le front avait atteint 100 cm avec une teneur en eau de 30 % (Figure 4.13a). Ce décalage pourrait notamment être lié aux prélèvements d'eau du palmier dans les couches supérieures lors de l'expérimentation, ce qui pourrait ralentir la progression du front d'infiltration.

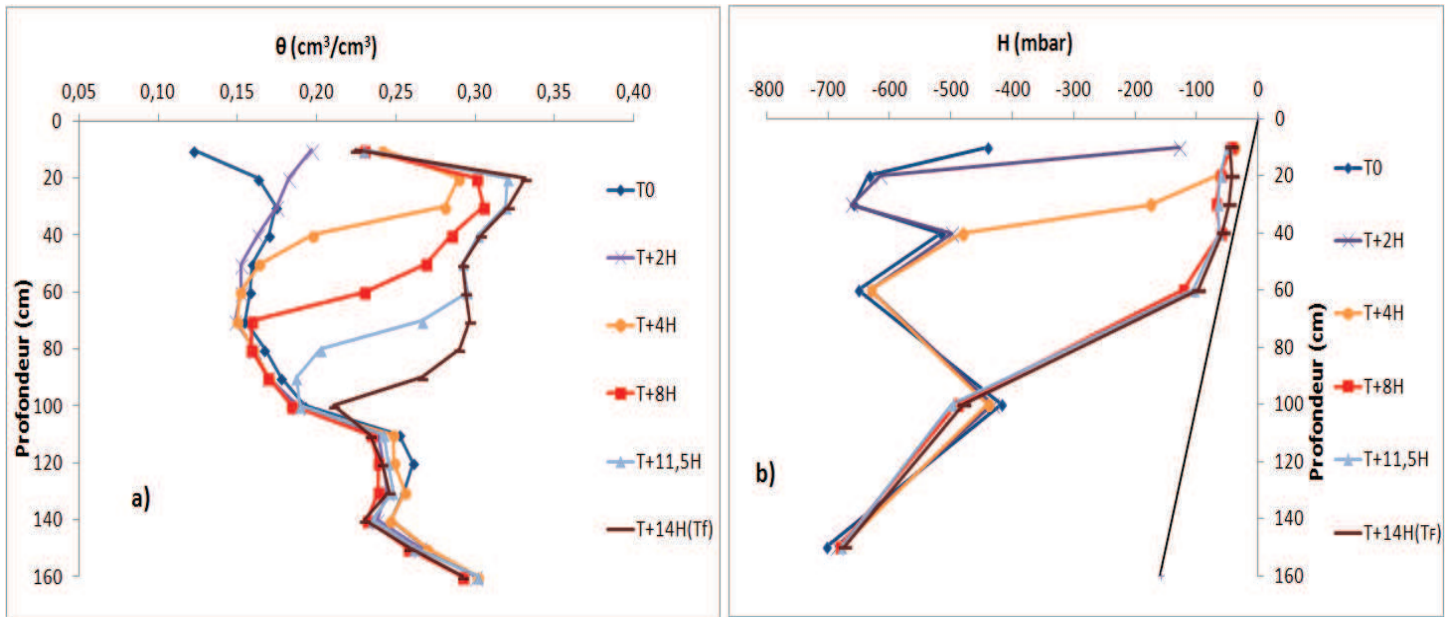


Figure 4.21: Profil hydrique (a) et potentiel total (H) (b) durant la phase d'infiltration. Scénario avec palmier dattier. T_0 : début de l'infiltration, T_f : fin de l'infiltration.

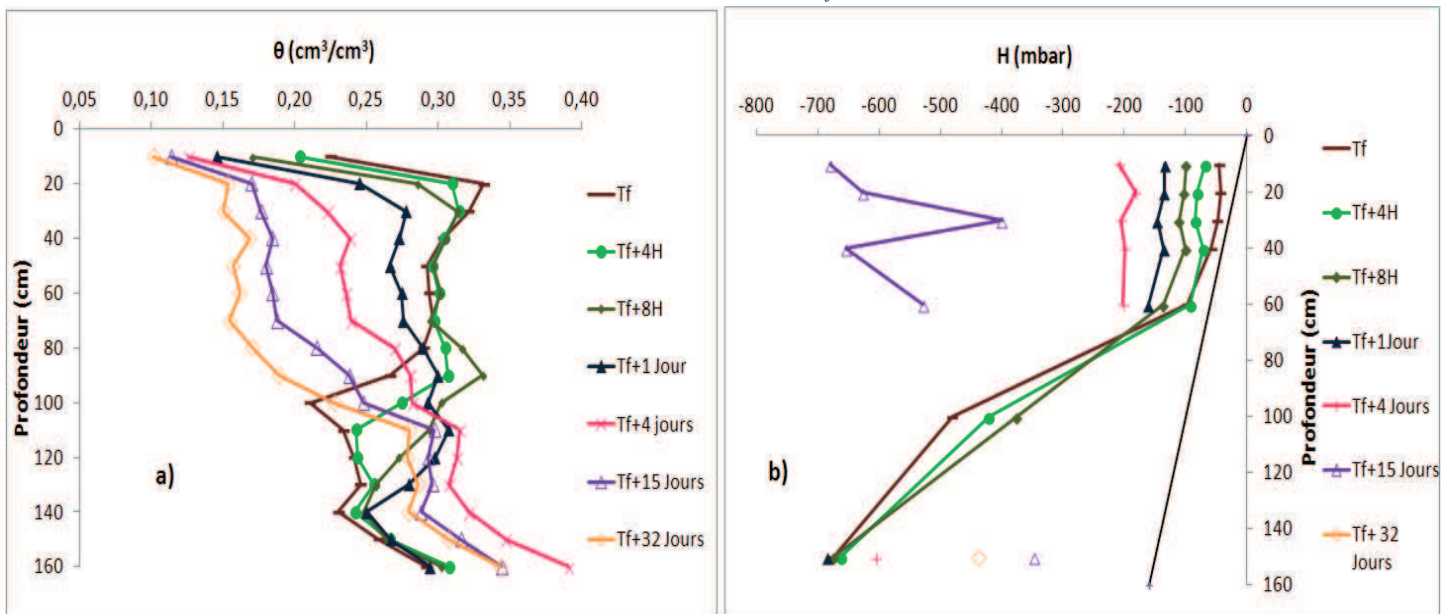


Figure 4.22: Profil hydrique (a) et potentiel total (H) (b) durant la phase de redistribution. Scénario avec palmier dattier. T_f : fin de l'infiltration.

4.4.1.b Période de redistribution

La période de redistribution s'est déroulée du 27/02/2014 à 23h30 (T_f) jusqu'au 2/04/2014 à 10h (T_f+32 jours). Les données de teneur en eau volumique θ et de charge hydraulique H sont représentées dans la figure 4.22 pour la période de redistribution.

Dès quatre heures après la fin de l'irrigation (T_f+4h), le profil de charge hydraulique de la surface du sol (10 à 30 cm) commence à s'éloigner de la droite des potentiels gravitaires, du fait de la redistribution (Figure 4.22b). Quatre jours après la fin de l'irrigation (T_f+4 jours) le pF des couches 10 à 60 cm varient entre 2,15 et 2,3 et, à 150 cm, il est de 2,66. Le tensiomètre à 100 cm ne donne plus de valeurs en raison d'un problème lié au tensiomètre. A T_f+15 jours, le dessèchement des couches de supérieures continue avec des pF autour de 2,8 à 10, 20 et 40 cm et un pF de 2,7 à 60 cm. A 150 cm, le sol se rehumecte et on observe un pF de 2,3. A la fin de l'expérience, à T_f+32 jours, tous les tensiomètres ont décroché du fait du dessèchement du sol, sauf celui de la profondeur 150 cm donne encore des valeurs (pF 2,45).

Pour les profils de teneur en eau, à T_f+4h , les couches de 10 à 70 cm et de 110 à 160 cm varient légèrement. Par contre, on observe une rehumectation entre les couches 80 et 100 cm (Figure 4.22a). A T_f+1 jour, le profil de teneur en eau s'assèche jusqu'à la profondeur 80 cm, se rehumecte de 100 à 130 cm et ne varie pas de 140 à 160 cm. A T_f+4 jours, le profil continue de s'assécher jusqu'à la profondeur 100 cm et continue de se rehumecter au-delà de la profondeur 100 cm, grâce à la redistribution de l'eau vers les couches plus profondes. Quatre jours après l'arrêt de l'apport d'eau (T_f+4 jours), entre 10 et 70 cm, la teneur en eau varie entre 12 et 24 %. Quant aux couches de 80 à 160 cm, leur teneur en eau varie entre 27 et 39 %.

En comparant les profils de teneur en eau à l'état initial (T_0), la fin de l'irrigation (T_f) et la fin de l'expérience (T_f+32 jours) entre le scénario sans palmier et le scénario avec palmier (Figure 4.23), on remarque qu'à la fin de l'expérience avec palmier, le profil hydrique revient quasiment à l'état initial entre les profondeurs 10 et 90 cm, contrairement au profil hydrique du scénario sans palmier. Au niveau de cette tranche du profil de sol, le stock d'eau apporté par l'irrigation a été épuisé par l'absorption racinaire du palmier dattier. En effet, c'est dans cette partie du profil où se situent les densités racinaires les plus importantes (Figure 4.2).

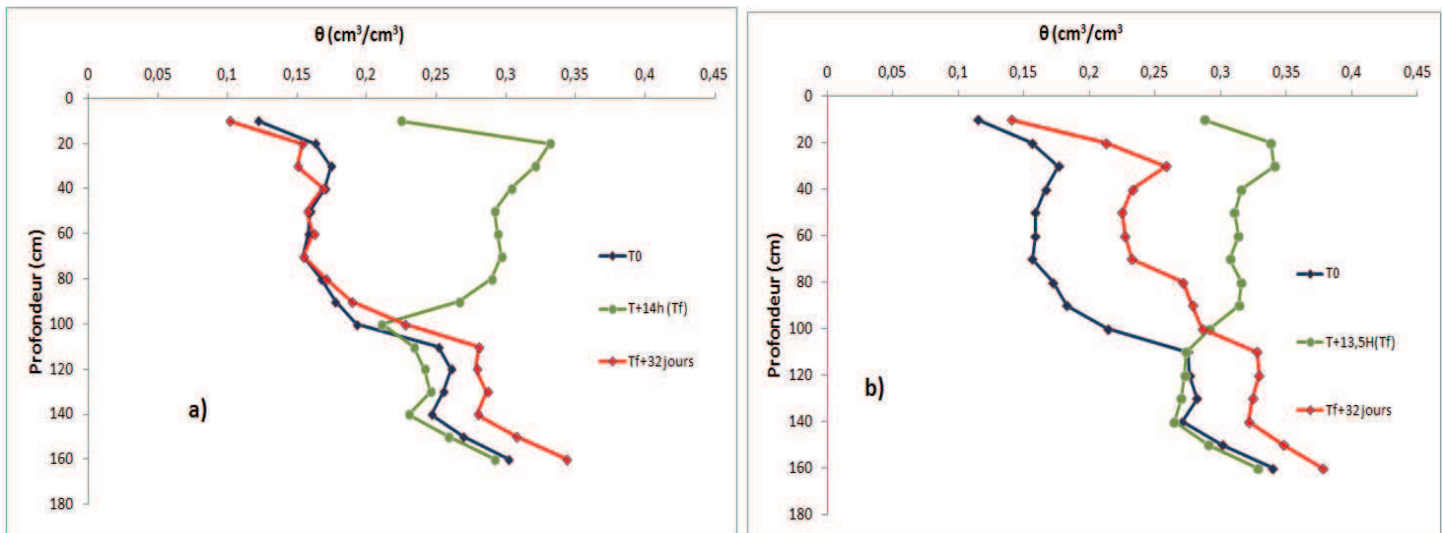


Figure 4.23: Profil hydrique avec palmier dattier (a) et profil hydrique sans palmier (b). T_0 : début de l'infiltration, T_f : fin de l'infiltration.

4.4.2 Modélisation

Le modèle HYDRUS-1D, paramétré avec les paramètres optimisés lors de l'expérience de drainage interne, a permis une bonne représentation de la dynamique de la teneur en eau et du potentiel hydrique des expériences 1 et 2. Pour le scénario avec palmier, le modèle décrit bien la dynamique hydrique en surface du sol (Figure 4.24).

Avec des R^2 proches de 1, le modèle prédit bien les dynamiques de teneur en eau et de potentiel matriciel du scénario avec palmier, pour tous les profils, sauf pour les profondeurs 100 et 150 cm (Figure 4.25). Pour la profondeur 100 cm, la simulation donne un R^2 de 0,38 à cause du manque d'information à cette profondeur lié au problème technique du tensiomètre (cf : Figure 4.22b). A 150 cm, le modèle prédit une arrivée du front d'infiltration trop rapide. Globalement, le modèle prédit bien la dynamique de teneur en eau pour les différentes profondeurs. Toutefois, au cours de la redistribution, le modèle prédit des variations de la teneur en eau à 100 cm plus importantes que celles observées. Pour la profondeur 150 cm, il surestime la teneur en eau.

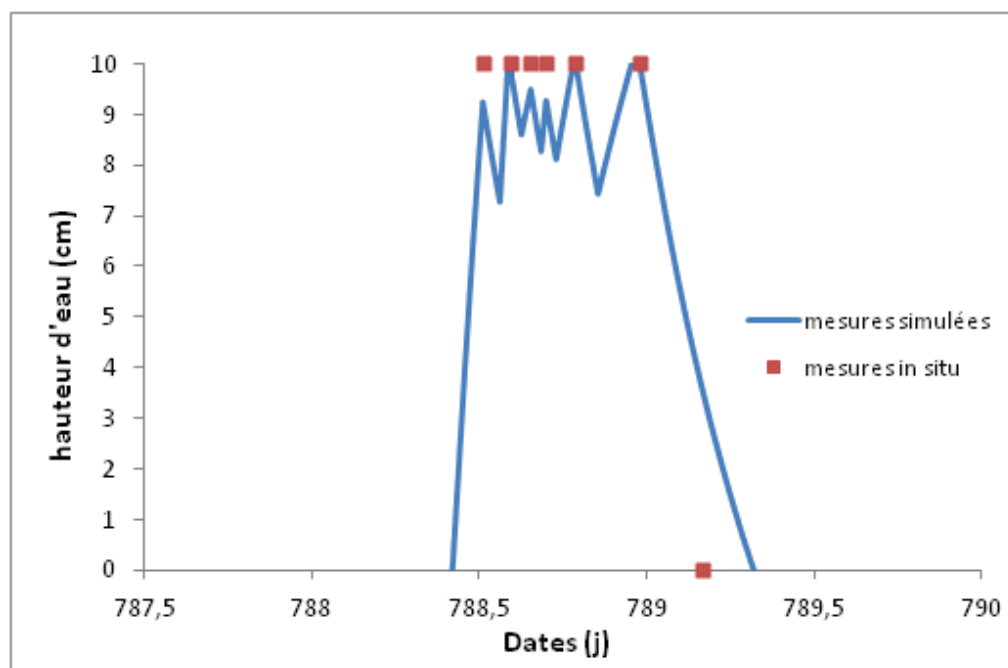


Figure 4.24 : Hauteur de la lame d'eau en surface apportée pendant l'irrigation (mesures *in situ*) et valeurs de cette même hauteur d'eau simulée avec HYDRUS-1D ; scénario avec palmier ; $T_0 = 788,42$ j.

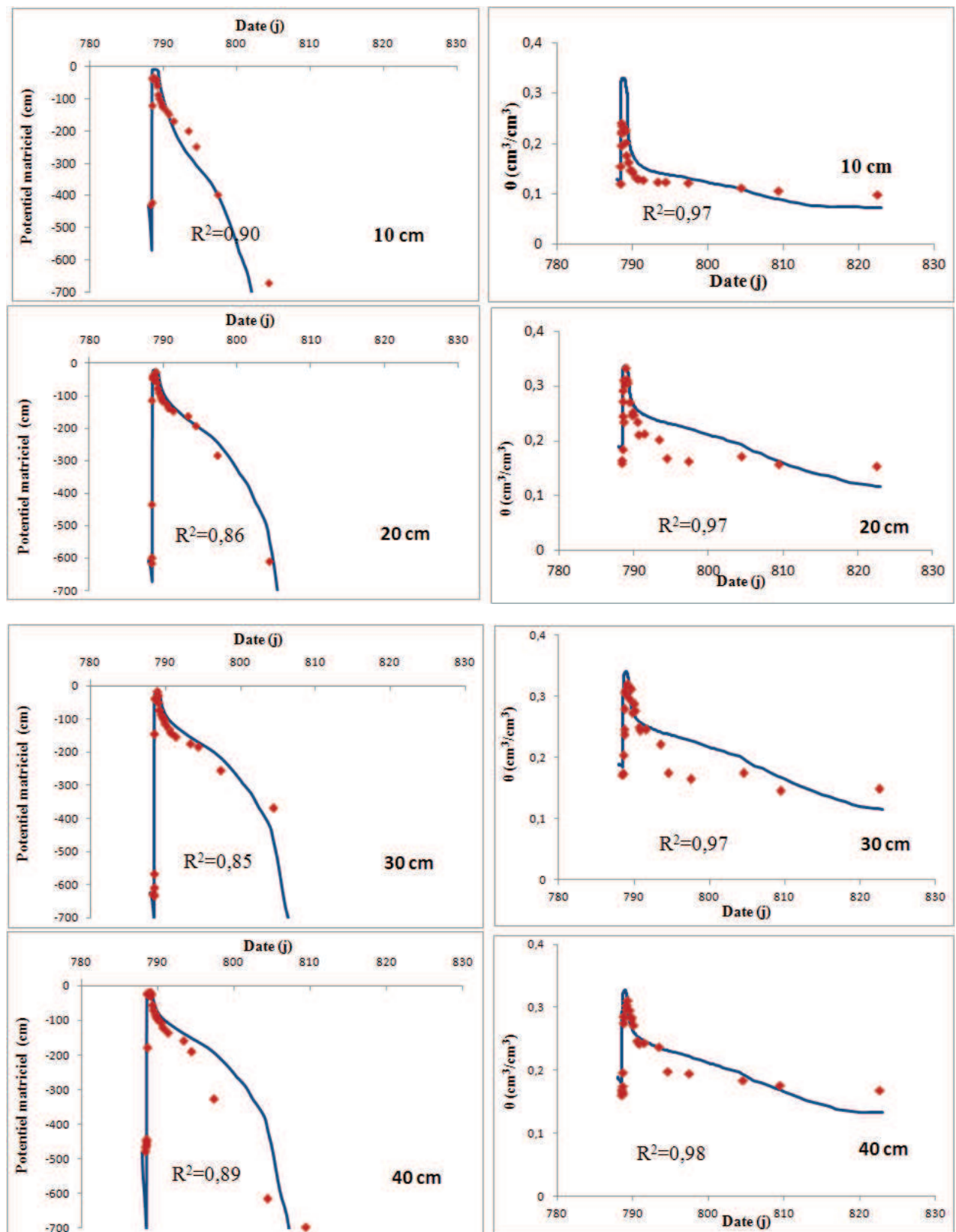


Figure 4.25 (début): Dynamique hydrique simulée à l'aide d'HYDRUS-1D pour les différentes profondeurs instrumentées avec les tensiomètres et la sonde à neutrons pour le scénario avec palmier ; $T_0=788,42$ j.

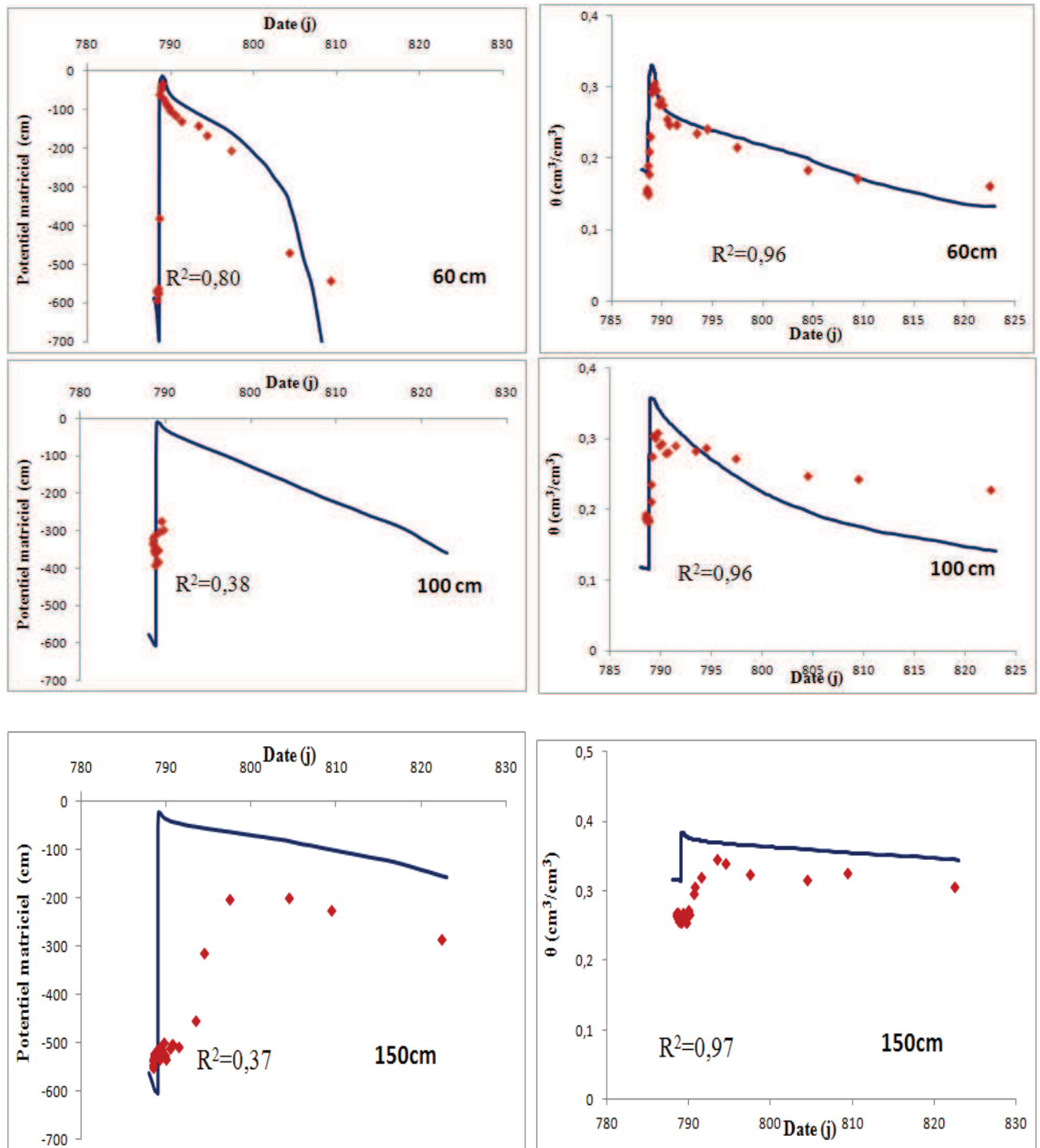


Figure 4.25 (fin): Dynamique hydrique simulée à l'aide d'HYDRUS-1D pour les différentes profondeurs instrumentées avec les tensiomètres et la sonde à neutrons pour le scénario avec palmier ; $T_0=788,42$ j.

4.4.3 Bilan hydrique

La hauteur d'eau infiltrée cumulée simulée par le modèle est de 316 mm. En surface, le flux de surface cumulé simulé est de 293 mm (Figure 4.26). Ce flux est supérieur à celui du scénario sans palmier avec évaporation qui était de 240 mm (cf : Figure 4.18a), à cause de l'évaporation qui est plus faible dans le cas du scénario avec palmier (Figure 4.27). En effet, en présence du palmier, l'évaporation cumulée est de 23 mm soit moins de la moitié de celle mesurée dans le cas d'un sol nu (54 mm). Ceci peut s'expliquer par l'effet d'ombre des palmiers du palmier qui diminue l'évaporation potentielle. L'évaporation potentielle sans palmier est de 193 mm, alors que l'évaporation potentielle avec palmier est de 126 mm, ceci montre bien que l'ombrage des palmiers du palmier diminue l'évaporation potentielle à la surface du sol. De plus, avec une évaporation réelle de 23 mm et une évaporation potentielle de 126 mm, l'effet mulch limite fortement l'évaporation à la surface du sol. En effet, le sol étant plus sec en surface va agir comme une « barrière » pour le prélèvement d'eau par évaporation (Brisson et Perrier, 1991).

La quantité d'eau drainée en profondeur est de 131 mm, soit 41,5 % de la quantité d'eau cumulé infiltrée (Figure 4.28). La variation du stock d'eau simulée par le modèle est de -11 mm. L'effet combiné du drainage, de l'évaporation et de l'absorption racinaire a épuisé la réserve en eau du sol. On remarque que 17 jours après la fin de l'irrigation, le palmier n'est plus en confort hydrique et il commence à fermer ses stomates diminuant ainsi sa transpiration (Figure 4.29). La transpiration cumulée réelle du palmier sur cette période est de 170 mm pour une transpiration cumulée potentielle de 200 mm.

Cum. Actual Surface Flux

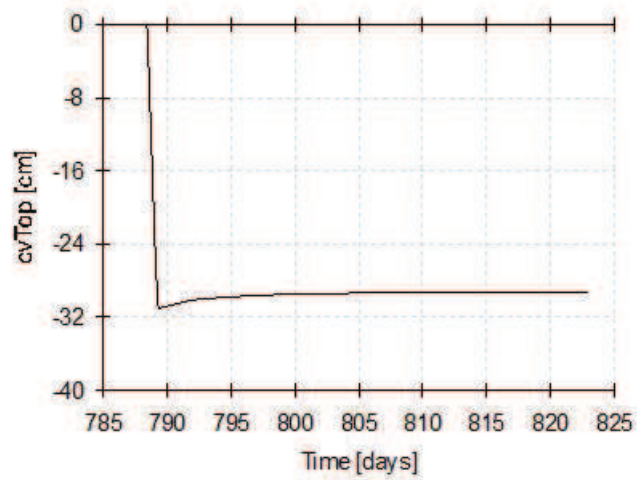
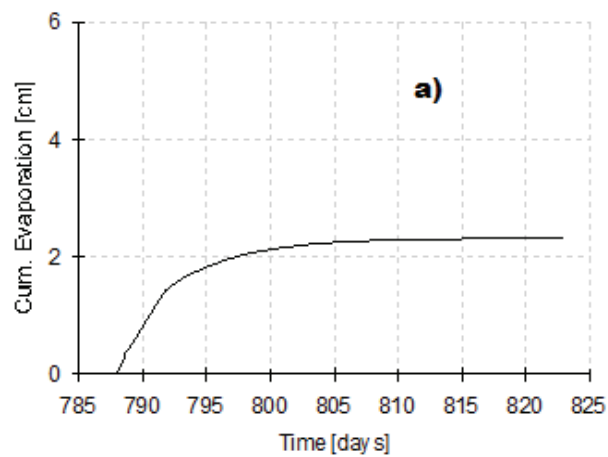


Figure 4.26: Flux de surface réel cumulé simulé avec HYDRUS-1D pour le sol avec palmier ; $T_0 = 788,42$ j.

Cum. Evaporation



Cum. Evaporation

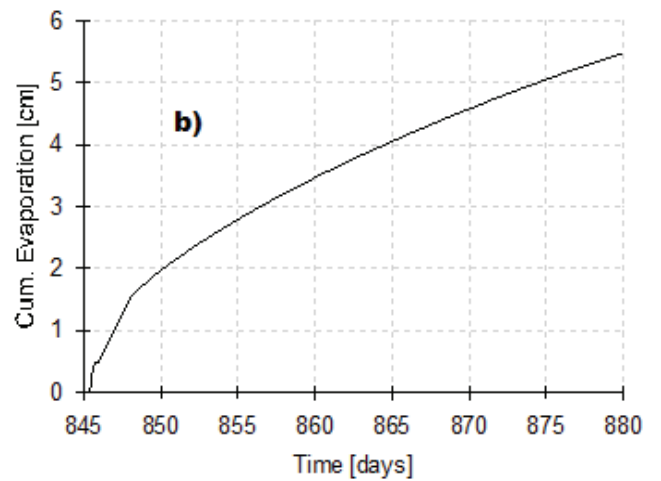


Figure 4.27 : Flux cumulé de l'évaporation en sol avec palmier ($T_0 = 788,42$ j) (a) et flux cumulé de l'évaporation en sol sans palmier ($T_0 = 845,42$ j) (b).

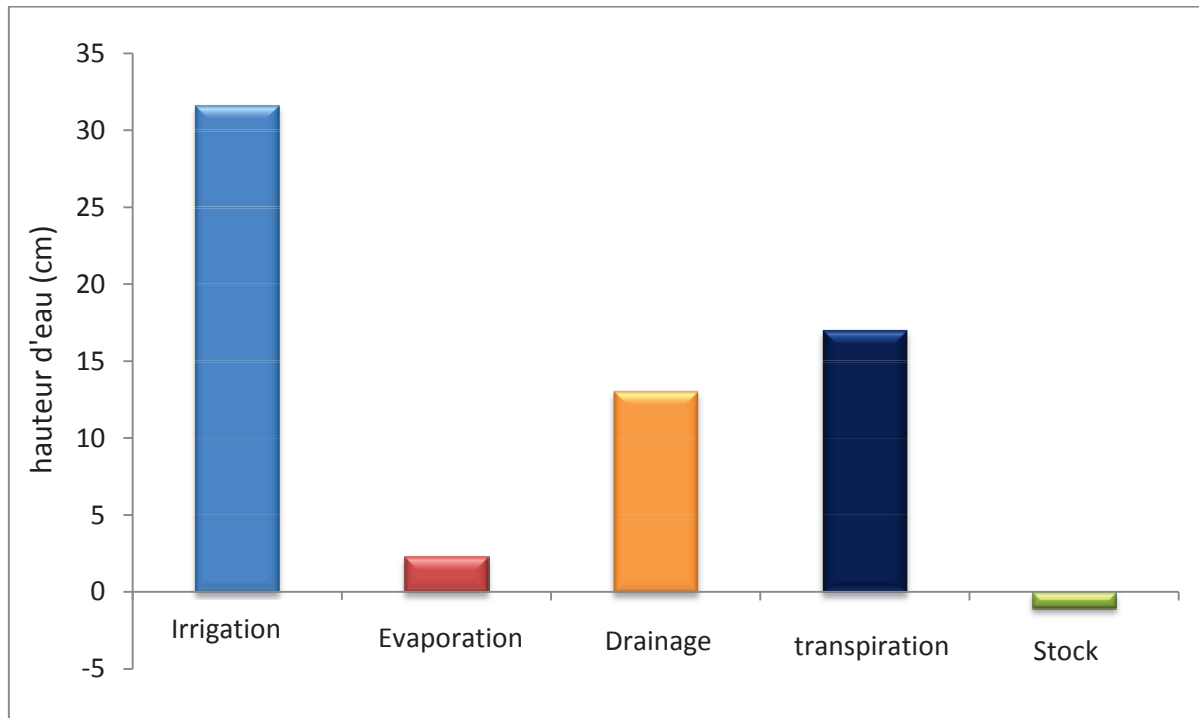


Figure 4.28: Termes du bilan hydrique du sol pour la période avec palmier simulés avec HYDRUS-1D.

All Cumulative Fluxes

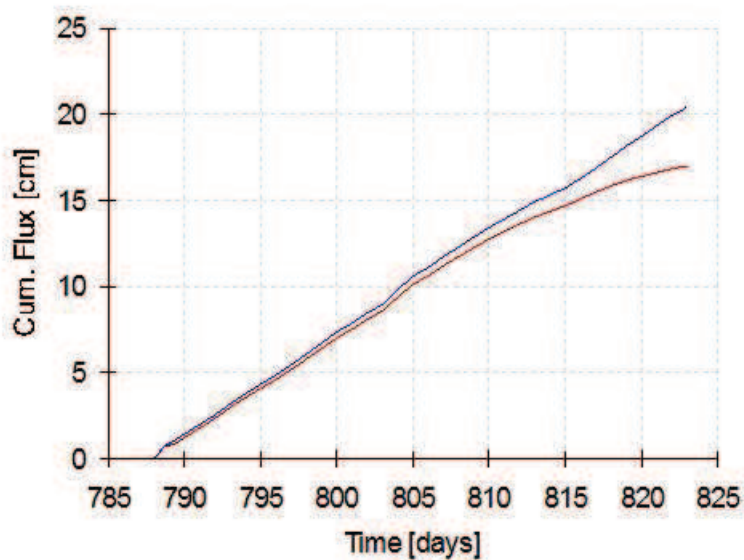


Figure 4.29 : Flux cumulé potentiel et flux cumulé réel de la transpiration du palmier sans compensation racinaire ; $T_0 = 788,42$ j.

4.4.4 Rôle de la compensation racinaire

En simulant la transpiration du palmier avec compensation racinaire, on observe que le palmier n'est en stress hydrique qu'au 28ème jour (Figure 4.30). Dans le scénario avec compensation, la transpiration est de 198 mm, alors que dans le cas sans compensation, elle est de 170 mm. En effet, les racines du palmier se trouvant dans une zone de confort hydrique compensent l'absorption des racines situées en zone plus sèche.

All Cumulative Fluxes

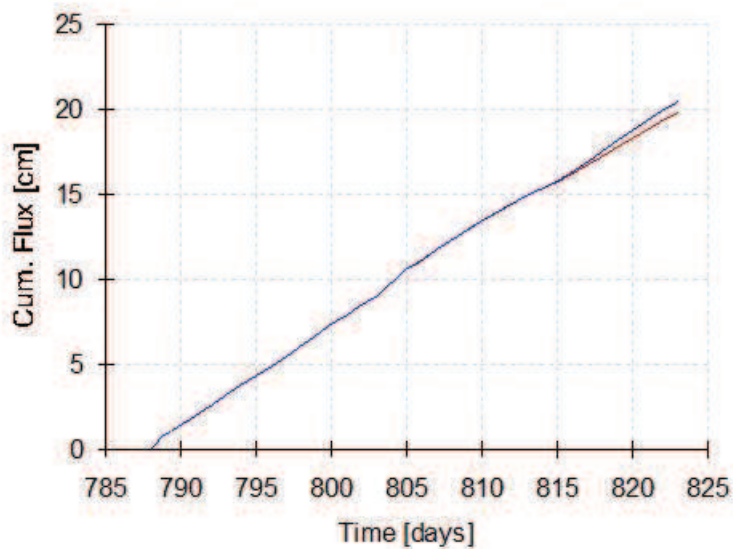


Figure 4.30 : Flux cumulé potentiel et flux cumulé réel de la transpiration du palmier avec compensation racinaire ; $T_0 = 788,42$ j.

4.5 Discussion générale

La profondeur d'enracinement du palmier dattier étudié est faible comparée aux profondeurs citées dans la littérature. Les facteurs impactant la profondeur d'enracinement des palmiers sont nombreux (cf : §4.1). Dans le cas de cette étude, la cause la plus probable est que les racines se sont développées surtout aux profondeurs où elles pouvaient être en confort hydrique à cause des apports réguliers d'eau d'irrigation. Allam *et al.* (1973) ont observé que chez le palmier, l'absorption était localisée entre 60 et 150 cm et que 95 % des racines d'absorption étaient situées dans la couche 0 à 200 cm.

Le modèle a bien prédit les dynamiques hydriques des différents scénarios, notamment la prédiction de l'absorption racinaire. La robustesse du modèle utilisé est remarquable, car il n'a pas été nécessaire d'optimiser les paramètres racinaires du modèle. Ceci souligne bien que la démarche adoptée pour l'optimisation des paramètres hydrodynamiques a été une réussite. Toutefois, le modèle nécessite une amélioration supplémentaire pour une meilleure simulation des dynamiques hydriques aux profondeurs 100 et 150 cm.

Le choix de la mise en place de la couche de surface 0 à 5 cm (matériau 1) s'est avéré indispensable pour le contrôle de la lame d'eau. En effet, les paramètres hydrodynamiques de ce matériau conditionnent la dynamique d'infiltration de l'eau dans le sol.

L'évapotranspiration réelle estimée est de 5,6 mm/j. Dans les conditions climatiques de l'Arabie Saoudite, l'évapotranspiration moyenne du palmier est estimée à 4,5 mm/j (Kaseem, 2007). Dans le climat chaud et aride du Koweït, le taux d'évapotranspiration du palmier varie entre 2,72 et 14,21 mm/j pour la variété Siwi, entre 2,05 et 11,66 mm/j pour la variété Nabusaif et entre 2,46 et 14,62 mm/j pour la variété Khalas (Bhat *et al.*, 2012).

La perte d'eau par drainage représente 41,5 % de l'apport d'eau, alors que la transpiration représente 53,8 %. Une étude sur l'alimentation hydrique du palmier conduite aux Emirats Arabe-Unie (UAE) a montré que 52,5 % de l'irrigation est perdue par drainage et que la transpiration représentait 37,5 % de l'irrigation (Green *et al.*, 2014). Les pertes par évaporation sont plus faibles comparées aux pertes par drainage et à l'absorption par le palmier. Un résultat similaire a été observé par Green *et al.*, (2014).

Avec une transpiration réelle cumulée de 170 mm sur une période de simulation de 35 jours, on estime les besoins en eau journalier du palmier à 0,06 m³/jour. Sans tenir compte du tour d'eau réel et des différences saisonnières, Peyron (2000) préconise un apport de 0,56 m³/jour

pour l'irrigation du palmier à Djibouti, soit neuf fois plus que le besoin en eau journalier que nous avons estimé. Selon Peyron (2000), l'agriculteur doit apporter des quantités d'eau suffisantes afin de mouiller le sol très en profondeur, au-delà de la zone racinaire. Cette approche agronomique de Peyron pour estimer les besoins en eau est moins précise que la démarche expérimentale de notre étude et peut amener ainsi à une perte importante d'eau notamment par drainage. Grâce aux mesures de flux de sève, Green *et al.*, (2014) ont estimé à 50 L par jour la prise d'eau du palmier en saison fraîche, ce qui est relativement proche de la quantité d'eau estimée dans notre étude, soit 60 L par jour. Ainsi, avec 53,8 % de l'irrigation utilisée par le palmier par jour et à peu près 46 % restant perdus par drainage et évaporation, on peut estimer l'apport en irrigation journalière pour satisfaire les besoins du palmier à environ 130 L d'eau par jour, soit 0,13 m³. C'est quatre fois moins que les 0,56 m³/jour d'eau préconisés par Peyron (2000). Ces estimations du besoin en eau sont valables pour la période fraîche au cours de laquelle s'est déroulée l'étude. De ce fait, dans le futur, il sera judicieux de mener des études complémentaires au cours de la saison plus chaude. Selon Green *et al.* (2014), le palmier absorbe 150 L d'eau par jour durant la saison chaude. En supposant alors qu'au cours de la saison chaude le palmier de notre étude consomme 3 fois plus que pendant la saison fraîche (saison de l'étude), on peut alors estimer à 390 L (0,39 m³) d'eau la quantité d'eau qu'il faudrait apporter par jour au palmier au cours de cette saison de forte chaleur.

La transpiration journalière du palmier a été estimée à 4,8 mm/j sur la période d'étude (expérience 3). En Tunisie, la transpiration cumulée sur une journée du palmier calculée avec la mesure des flux de sèves, varie de 0,2 à 3,5 mm/j (Ben Aïssa *et al.*, 2009). Sellami et Sifaoui (2003) ont établi une relation entre la transpiration et le rayonnement net. Ils ont estimé que la transpiration d'un palmier dans une palmeraie avec des palmiers et des arbres fruitiers (abricotiers) était égale à 53% du rayonnement net. Pour les arbres fruitiers, la transpiration a été estimée à 33 % du rayonnement. La somme de ces transpirations (palmier + abricotier) représente 86 % du rayonnement net. Plusieurs autres auteurs ont également trouvé des valeurs similaires pour la canopée forestière (Tournebize, 1994 ; Granier et Loustau, 1994 ; Diawara *et al.*, 1991). Dans notre étude, avec un rayonnement net journalier de 5,5 W/m², la transpiration des palmiers (exprimée en mm/j) équivaut à 88 % du rayonnement (exprimé en W/m²). Cette proportion est proche des 86 % que Sellami et Sifaoui ont obtenus pour l'ensemble des plantes présentes dans leur oasis. Green *et al.* (2014) ont aussi observé que la transpiration était fortement liée au rayonnement solaire. On peut alors dire que la relation transpiration et rayonnement est judicieuse et pourrait être utilisée pour pouvoir

estimer facilement la transpiration du palmier lorsque l'on ne dispose que des données de rayonnement net.

Au cours de l'irrigation et jusqu'à deux semaines après l'arrêt de l'irrigation, il y a une bonne correspondance entre la transpiration potentielle et la transpiration réelle du palmier (cf : Figure 4.29). A partir du 17ème jour après l'arrêt de l'irrigation, la transpiration réelle du palmier diminue par rapport à la transpiration potentielle. Ainsi, on peut conseiller aux agriculteurs d'irriguer le palmier une fois tous les 2 semaines. Ceci a notamment été observé par Sperling *et al.*, (2012). En effet, ces derniers ont montré une correspondance entre le flux de sève quotidien et les conditions climatiques durant la période d'irrigation. Une fois l'arrêt de l'irrigation, ils ont observé une réduction des flux de sève (Figure 4.31). Cette baisse du flux de sève a continué, ainsi que celle de la teneur en eau du sol à cause de l'absorption du palmier. Cette baisse de la transpiration pourrait notamment être due à la fermeture des stomates. Renninger et Phillips (2010) ont démontré que, chez deux genres de palmier, le palmier-bâche (*Mauritia flexuosa*) et le palmier *Iriarteia deltoidea*, la fermeture des stomates permettait de limiter les pertes d'eau durant les périodes sèches. La fermeture des stomates inhibe la photosynthèse dans les conditions de sécheresse (Cornic et Briantais, 1991). Cette fermeture stomatique impacte le rendement des palmiers.

Grâce à cette étude, pour la première fois, le coefficient cultural ($k_c = ET_M / ET_0$) du palmier dattier a pu être calculé dans les conditions climatiques de Djibouti. Il est égal à 1,39, et est plus élevé que celui préconisé par le FAO ($k_c = 0,95$). Cependant, pour la variété Khalas, Saeed *et al.* (1990) ont obtenu un k_c entre 0,85 et 1,37 pour les mois de janvier et février, en Arabie Saoudite. Pour cette même variété, Bhat *et al.* (2012) ont trouvé un k_c compris entre 0,68 et 1,15. Une étude de phylogénie moléculaire a montré que les variétés Khalas et Barhi sont génétiquement proches à plus de 76 % (Askari *et al.*, 2003). Ceci pourrait en partie expliquer que le k_c de Barhi est proche des valeurs de k_c de la variété Khalas. En ce qui concerne la variété de notre étude, à savoir la variété Barhi, il n'a pas été possible de trouver un k_c dans la littérature. Dans une culture en Arabie Saoudite, Kassem (2007) a estimé le k_c de la variété Sukkhair, qui originaire d'Iraq comme la variété Barhi, à 0,6. Pour un palmier dattier mature cultivé dans les régions chaudes et arides, le k_c varie de 0,9 à 0,95 (Allen *et al.*, 1998). Doorenbos et Pruitt (1977) ont suggéré un k_c entre 0,8 et 1. Il est intéressant de noter que ce coefficient cultural varie en fonction de la variété de palmier. En effet, pour la variété Siwi, le k_c varie entre 0,88 et 1,11, pour la variété Nabusaif, il varie entre 0,43 et 1,01.

Il apparaît également que le k_c est sensible à la valeur de LAI. En effet, on utilisant par exemple un LAI de 2 dans notre simulation, le k_c est égal à 1,05.

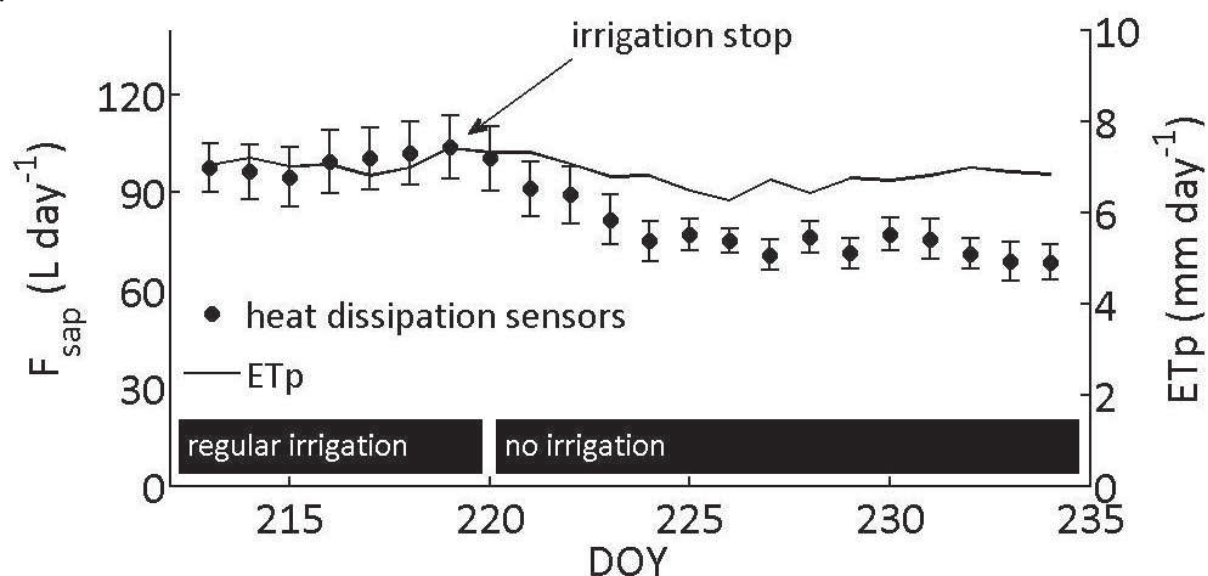


Figure 4.31 : Réponse du flux de sève journalier (cercles pleins) à l'arrêt de l'irrigation et évapotranspiration potentielle (ligne) (Sperling *et al.*, 2012) ; DOY : jours de l'année.

Conclusion générale et perspectives

Avec un niveau d'insécurité alimentaire critique et une pression croissante sur ses faibles ressources en eau, Djibouti doit relever le défi de développer son agriculture pour nourrir sa population tout en évitant d'aggraver les problèmes d'eau. Le choix du système oasien est pertinent pour résoudre cette équation difficile, car il permet de faire une agriculture rentable tout en optimisant les ressources en eau.

Les besoins en eau du palmier dattier dans les conditions édaphiques et climatiques de Djibouti n'ont jamais été étudiés, malgré leur importance considérable au vu des contraintes majeures que représentent les problèmes d'eau pour le développement de la culture de cette plante dans le pays. C'est dans ce contexte que l'alimentation hydrique du palmier a été étudiée pour la première fois au cours de cette thèse. Dans le cadre de cette thèse, un palmier dattier planté dans une palmeraie de la zone côtière au sud de la ville de Djibouti a été instrumenté pour le suivi de la teneur en eau (sonde à neutrons) et du potentiel hydrique du sol (tensiomètres). Ces mesures de terrain et une modélisation avec le modèle HYDRUS-1D ont permis d'établir le bilan hydrique du palmier dattier, ainsi que la zone d'absorption racinaire du palmier dattier dans le profil de sol. Nos résultats de bilan hydrique ont montré que 54 % de l'irrigation étaient utilisés par le palmier dattier et que 42 % sont drainés en profondeur pour un apport d'eau de 316 mm. Les besoins en eau du palmier ont été estimés à 130 L par jour pendant la saison fraîche et à 390 L pendant la période des fortes chaleurs. Les résultats de la modélisation ont démontré que, suite à une irrigation à forte dose (341 mm), le palmier dattier était en confort hydrique jusqu'à 2 semaines. Au vu de ces résultats, on peut établir les fréquences d'irrigation à une toutes les 2 semaines pour la saison fraîche, ce qui est cohérent avec les recommandations de Peyron (2000). En saison chaude, Peyron (2000) préconise une irrigation deux fois par semaine.

La transpiration du palmier représente 88 % du rayonnement solaire. Ainsi, la simple connaissance du rayonnement solaire serait un moyen d'estimer rapidement la transpiration du palmier dattier et par conséquent d'adapter l'irrigation.

Les travaux de cette étude ont montré que la zone d'absorption du palmier dattier se situait dans les 80 premiers centimètres du sol. Par conséquent, les agriculteurs doivent veiller à apporter des volumes d'eau qui permettent de mouiller toute cette profondeur, afin de garantir un confort hydrique aux palmiers dattiers et d'avoir un bon rendement.

La forte capacité de drainage du sol de la palmeraie est importante, car elle permet le lessivage des solutés et évite ainsi la salinisation du sol par les eaux d'irrigation chargées en sel.

Les travaux de cette étude ont également permis d'établir pour la première fois le coefficient cultural du palmier dattier dans le contexte de Djibouti ($k_c=1,39$).

Le modèle HYDRUS-1D a permis de bien simuler les transferts hydriques, mais nécessiterait toutefois une amélioration des paramètres hydrodynamiques des couches profonds à 1 m et 1m50 de profondeur. L'utilisation de ce modèle mécaniste a démontré son efficacité pour l'établissement du bilan hydrique du palmier dattier et permettra à l'avenir d'établir ce bilan hydrique aux différentes saisons climatiques, mais aussi pour différents volumes et fréquences d'irrigation.

Toutefois, il serait judicieux de compléter cette étude par des mesures de flux de sève, qui permettront de mesurer avec précision la transpiration du palmier dattier. Ces mesures de flux de sève associées aux mesures hydrodynamiques et climatiques permettront d'améliorer la connaissance de l'alimentation hydrique du palmier dattier à Djibouti.

Pour permettre une diversification des revenus des agriculteurs, il est impératif d'intégrer d'autres cultures que le palmier dattier dans les oasis, comme par exemple : la culture fourragère, les arbres fruitiers ou les cultures maraîchères. Ceci implique d'élargir l'étude de l'alimentation hydrique du palmier dattier dans un système de culture à étages pour améliorer l'efficacité de l'irrigation.

La salinisation des sols, notamment à cause de la mauvaise qualité des eaux d'irrigation, est un problème majeur à Djibouti. C'est pourquoi, il est important d'étudier l'impact des eaux d'irrigation sur les sols, de suivre l'évolution de la salinité des sols irrigués des oasis djiboutiens. En effet, le développement durable des cultures de palmier dattier passe aussi par la bonne gestion des sols et leur préservation. HYDRUS-1D ou le modèle SWAP (Soil Water Atmosphere Plant) (van Dam, 2000 ; van Dam *et al.*, 2008) seraient notamment des bons outils pour le suivi du transport des solutés dans les sols. A Djibouti, il existe de nombreuses études sur les eaux (suivis de la salinisation, suivis des réserves,...), contrairement aux sols, où pour lesquels il n'existe quasiment aucune étude. La politique de développement de l'agriculture à Djibouti, nécessite de bien identifier les sites potentiels (niveau de salinité, fertilité, occupation des terres...) pour l'installation d'activités agricoles, c'est pourquoi il serait judicieux d'établir une cartographie des sols actuel.

Tous ces questionnements sont des perspectives de recherches intéressantes pour le laboratoire de Science de Sol du Centre d'Etudes et de Recherches (CERD).

Bibliographie

A

Adam A., 1984. Hydrochimie et hydrologie isotopique de la partie septentrionale de la République de Djibouti. Thèse de doctorat, Université de Paris-Sud, 170 p.

Agam N., Evett S.R., Tolk J.A., Kustas W.P., Colaizzi P.D., Alfieri J.G., Mckee L.G., Copeland K.S., Howell T.A., Chavez J.L., 2012. Evaporative loss from irrigated inter rows in a highly advective semi-arid agricultural area. *Adv. Water Res.* 50: 20–30.

AIEA (Agence internationale de l'énergie atomique), 2003. Les sondes à neutrons et à rayons gamma: leurs applications en agronomie. Deuxième édition. 76 p.

Allam H., Hussein M., and Abdalla K. M., (1973). Sesonal requirement of water by "Sakkoti" dates grown at Asswan, High Polytech. Inst., Moshtohor, Cairo, *Res. Bull.* 39: 11 p.

Allen S.J., 1990. Measurement and estimation of evaporation from soil under sparse barley crops in Northern Syria. *Agric. For. Meteorol.* 49: 291–309.

Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M., 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper N°56, FAO ROME, 300 p.

Allen R.G., Clemmens A., Burt C., Solomon K., O'Halloran T., 2005. Prediction accuracy for projectwide evapotranspiration using crop coefficients and reference evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering.* 131(1): 24–36.

Askari E., Al-Khalifa N.S., Ohmura T., Al-Hafedh Y.S., Khan F.A., Al-Hindi A., and Okawara R., 2003. Molecular phylogeny of seven date palm (*Phoenix Dactylifera L.*) cultivars by DNA fingerprinting. *Pak. J. Bot.*, 353: 323-330.

Audru J., Labonne M., Guerin H., Bilha A., 1993. *Acacia nilotica*: its fodder value and exploitation by the Afar pastoralists in the Madgoul valley, Djibouti. Bois et Forêts des Tropiques, 235: 59-70.

B

Banque Mondiale, 2013. <http://donnees.banquemondiale.org/pays/djibouti>. Vérifié le 26/01/2015.

Barrow S. 1998. A monograph of Phoenix L. (*Palmae* : *Coryphoideae*). Kew Bulletin, 53: 513-575.

Ben Aïssa I., Bouarfa S., Perrier A., 2009. Utilisation de la mesure thermique du flux de sève pour l'évaluation de la transpiration d'un palmier dattier. Actes du quatrième atelier régional du projet Sirma, Mostaganem, Algérie, 26–28 mai 2008. Cirad, Montpellier, France, colloques-cédérom, 12 p.

Bhat N.R., Lekha V.S., Suleiman M.K., Thomas B., Ali S.I., George P., Al-Mulla L., 2012. Estimation of water requirement for young date palms under arid climatic condition Kuwait. World Journal of Agricultural Sciences 8(5): 448-452.

Böhm W., 1979: Methods of Studying Root Systems. Ecological Studies 33. Springer, Berlin, Heidelberg, New York. 188 p.

Bouguedoura N. 1991. Connaissance de la morphogenèse du palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.). Etude in situ et in vitro du développement morphogénétique des appareils végétatif et reproducteur. Thèse de doctorat d'Etat de l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB) d'Alger, 201 p.

Bouh H., 2006. Etude de l'aquifère basaltique de Djibouti et des aquifères adjacents: Approche hydrochimique et isotopique. Thèse de doctorat, Université de Paris XI, 205 p.

Brisson N., Perrier A., 1991. A semi-empirical model of bare soil evaporation for crop simulation models. Water Resour. Res., 27, 5: 719-727.

Brooks R. H. and Corey, A. T., 1964. Hydraulic properties of porous media, Hydrology paper no.3, Civil Engineering Department, Colorado State University, Fort Collins, 37 p.

Brutsaert W., 1982. Evaporation into the Atmosphere: Theory, History and Applications. D. Reidel Publishing, Dordrecht, the Netherlands, 299 p.

C

Calvet R. 2003. Le Sol. Propriétés et fonctions. Tome 2. Dunod, 511 p.

Camberlin P., Richard Y., Beltrando G., 1994. Structures spatio-temporelles de la pluviométrie sur la façade orientale de l'Afrique : de l'Ethiopie au Mozambique. Publication de l'Association Internationale de Climatologie, vol. 7: 447-454.

Campbell G.S., Calissendorff C., Williams J.H., 1991. Probe for measuring soil specific heat using a heat-pulse method. Soil Sci. Soc. Am. J. 55: 291–293.

Cassell D.K., and Klute A., 1986. Water potential: tensiometry. In methods of soil analysis. Part1. Physical and mineralogical methods, Klute A. (Eds.), Agronomy Monograph, 9. ASA and SSSA, Madison, WI, p. 536-596.

CHA (Coopération Hydrogéologique Allemande), 1982. Inventaire et mises en valeur des ressources en eau de la République de Djibouti. vol.4.

Chalhoub M., 2010. Effet de l'apport de composts sur la dynamique hydrique du sol, la disponibilité de l'azote pour la culture et le lessivage du nitrate : cas d'un sol limoneux cultivé du bassin parisien. Thèse de doctorat, Université Paris XI, 258 p.

Chanasyk D. S., Naeth M. A., 1996. Field measurement of soil moisture using neutron probes. Can. J. Soil Sci. 76:317–323.

Comité National pour l'Environnement (CNE). 1991. Rapport National Environnement. Secrétariat Technique du Comité National pour l'Environnement ONTA/SPSE, Djibouti.

Coquet Y., 1995. Etudes in situ des phénomènes de retrait-gonflement des sols ; Application à deux sols tropicaux peu gonflants. Thèse de doctorat de l'Université d'Orléans, 395 p.

Coquet Y., Coutadeur C., Labat C., Vachier P., Van Gneuchten M.Th, Pot V., Roger-Estrade J., and Simunek J., 2005. Water and solute transport in a cultivated silt loam soil: 1. Field observation. Vadose Zone J. 4: 573-586.

Corley R., Hardon J., Tan G., 1971. Analysis of growth of the oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) I. Estimation of growth parameters and application in breeding. Euphytica 20:307–315.

Cornic G., Briantais J., 1991. Partitioning of photosynthetic electron flow between CO₂ and O₂ reduction in a C3 leaf (*Phaseolus vulgaris* L.) at different CO₂ concentrations and during drought. Planta 183: 178–184.

D

Daamen C.C., 1997. Two source model of surface fluxes for millet fields in Niger. Agric. For. Meteorol. 83 : 205–230.

Daamen C.C., Simmonds L.P., 1994. Soil Water, Energy and Transpiration (SWEAT): a numerical model of water and energy fluxes in soil profiles and sparse canopies. Department of Soil Science, University of Reading, 119 p.

Daddi-Bouhoun M., 2010. Contribution à l'étude de l'impact de la nappe phréatique et des accumulations gypso-salines sur l'enracinement et la nutrition du palmier dattier dans la cuvette d'Ouargla (Sud-est algérien). Thèse de doctorat de l'Université BADJI MOKHTAR ANNABA, 393 p.

Daghari H., Maalej M., Laroussi Ch., Debacker L.W., 1989. Bilan hydrique sur jachère et sol nu dans les régions semi-arides, *Journal of hydrology*, 105: 197-204.

Daher A. 2010. Détermination du sexe du palmier dattier : Approches hysto-cytologique et moléculaires. Thèse de doctorat Université de Montpellier, 160 p.

Daoud M.A., 2008. Dynamique du rifting continental de 30 Ma à l'actuel dans la partie Sud-est du triangle Afar. Tectonique et magmatisme du Rift de Tadjourah et des domaines Danakil et Ali-Sabieh, République de Djibouti. Thèse de 3^{ème} cycle, Université de Bretagne Occidentale, 157 p.

De Wit C.T., 1958. Transpiration and Crop Yield. Versl. Landbouwk. Onderz. 64.6. Inst. of Biol. and Chem. Res. on Field Crops and Herbage, Wageningen, The Netherlands, 88 p.

Deol P., Heitman J.L., Amoozegar A., Ren T., Horton R., 2012. Quantifying non-isothermal subsurface soil water evaporation. *Water Resour. Res.* 48: 1–11.

Diawara A., Loustaud D., Berbigier P., 1991. Comparaison of two methods for estimating the evaporation of a *Pinus pinaster* stand: sap flow and energy balance with sensible heat flux measurements by an eddy covariance method. *Agric. For. Meteorol.*, 54 : 49-66.

Direction de la Statistique et des Etudes Démographiques (DISED), 2005. Statistiques nationale. Edition DISED, 100 p.

Dirksen C. 1999. Soil Physics Measurements. Catena Verlag, Reiskirchen, Germany, 154 p.

Djerbi M., 1994. Précis de phoeniciculture. F.A.O., Rome, 192 p.

Doorenbos J., Pruitt W.O., 1977. Guidelines for Predicting Crop Water Requirements. FAO, Rome, p. 144 (FAO Irrig. Drain. Paper 24, Revised).

Durand J.H., 1958. Les sols irrigables. Etude pédologique. Impr. Imbert, Alger, 191 p.

Dransfield J., Uhl N.W., 1986. An outline of a classification of palms. *Principles* 30 (1): 3-11.

E

Erskine W., Moustafa A.T., Osman A.E., Lashine Z., Nejatian A., Badawi T., Ragy S.M., 2004. Date Palm in the GCC countries of the Arabian Peninsula. Regional Workshop on Date Palm Development in the Arabian Peninsula. Abu Dhabi, UAE. 29-31 May 2004, 8 p.

Estanove P., 1990 : Note technique : valorisation de la datte. *Options Méditerranéennes*, Sér. A/ n 11. *Les systèmes agricoles oasiens*

F

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nation), 2005. Irrigation in Africa in figures : Djibouti. Aquastat survey, FAO water report, vol. 29, 89 p.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nation)-NEPAD (New Partnership for Africa's Development), 2005. Profil de projet d'investissement bancable, projet de développement de l'agriculture oasienne-PDAO, vol. 2, 28 p.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nation), 2008, Proceedings, Workshop on "Irrigation of Date Palm and Associated Crops". Damascus, Syrian Arab Republic, May 27–30, 2007.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nation), 2012. Cadre intégré de classification de la sécurité alimentaire (IPC) – Analyse de l'insécurité alimentaire aiguë actuelle. Edition FAO, 2 p.

Feddes R.A., Kowalik P.J., and Zaradny H., 1978. Simulation of field water use and crop yield, John Wiley & Sons, New York, NY, 189 p.

Ferry M., Bedrani S., Greiner D. 1999. Agroéconomie des oasis. CIRAD; GRIDAO, Montpellier, 230 p

Fontes J.C., 1987. Composition chimique et isotopique de la nappe de Djibouti. Echantillon CGG. Commentaire sur la première série de résultat. Rapport. 34 p.

Fontes J.C., Pouchan P., Saliege J.F., Zuppi G.M., 1980. Environmental isotope study of groundwater systems in the Republic of Djibouti. In 'Arid zone hydrology: Investigations with isotope techniques', Proceeding of an advisory Group Meeting, 6-9 nov. 1978, International Atomic Energy Agency, Vienne, Autriche, p. 236-262.

G

Gaba H., 2009. Hydrogéologie des milieux volcaniques sous climat aride. Caractérisation sur site expérimentale et modélisation numérique de l'aquifère basaltique de Djibouti (Corne de l'Afrique). Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 220 p.

Gamal-Eldin H.A., 1988. Etude de l'aquifère basaltique de la zone de captage de la ville de Djibouti. République de Djibouti. Thèse de doctorat, Université Albert-Ludwig de Fribourg, Allemagne Fédérale, 159 p.

Gardner W.H. 1986. Water content, pp. In: A. Klute (editor), Methods of Soil Analysis. Part 1-Physical and Mineralogical Methods. Soil Science Society of America, Inc.. Madison, Wisconsin, USA. 1986.

Goebel J.E., 1982. Agricultural resource assessment in tropical arid Djibouti. Proc. Int. Sympos. Remote sensing Env. 9: 31-36.

Granier A., Loustau D., 1994. Measuring and modeling the transpiration of maritime pine canopy from sap flow data. Agric. For. Meteorol. 71: 61-81.

Green S., Mc Cann I., Clothier B., Abdelfattah M., Al Dakheel A., Al Yamani W.F., Pangilina R., 2014. Water Use of Date Palms in the United Arab Emirates. A newsletter about Water in the Soil-Plant-Atmosphere System (WISPAS), Plant and Food Research, 119 ISSN 1176-2292.

Gros-Balthazard M., Newton C., Ivorra S., Tengberg M., Pintaud J.C., Terral J.F., 2013. Origines et domestication du palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.), *Revue d'ethnoécologie*, vol.4, 13 p.

Gros-Balthazard M., 2013. Hybridization in the genus *Phoenix*: A review. *Emirates Journal of Food and Agriculture* 25: 831–842.

Guehl J.M., 1984. Utilisation des méthodes tensio-neutroniques pour l'étude des transferts hydriques dans le sol en milieu ferralitique Guyanais, *Science du sol*. vol.22, 35-49.

H

Hanks R.J., 1974. Model for predicting plant yield as influenced by water use. *Agron. J.* 66 : 660–665.

Heitman J.L., Horton R., Sauer T.J., DeSutter T.M., 2008a. Sensible heat observations reveal soil water evaporation dynamics. *J. Hydrometeorol.* 9: 165–171.

Heitman J.L., Xiao X., Horton R., Sauer T.J., 2008b. Sensible heat measurements indicating depth and magnitude of subsurface soil water evaporation. *Water Resour. Res.* 44: 1–7.

Hillel D., Krentos V.D., Stylianov Y., 1972. Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristic in situ. *Soil Sci.*, 114:395-400.

Holland S., Heitman J.L., Howard A., Sauer T.J., Giese W., Ben-Gal A., Agam N., Kool D., Havlin J., 2013. Micro-Bowen ratio system for measuring evapotranspiration in a vineyard interrow. *Agric. For. Meteorol.* 177: 93–100.

Horita J., Rozanski K., Cohen, S., 2008. Isotope effects in the evaporation of water: a status report of the Craig–Gordon model. *Isot. Environ. Health Stud.* 44: 23–43.

Houssein I., Jalludin M., 1995. The salinity of Djibouti's aquifer. *J. Afric. Earth Sc.* 22 (4): 409-414.

I

Idso S.B., Reginato R.J., Jackson R.D., Kimball B.A., Nakayama F.S., 1974. Three stages of drying of a field soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 38:831–837.

ISERST. 1984-1992. Observations hydrologiques. Rapports annuels émis entre 1984 et 1992.

J

Jalludin M et Razack M., 1999. Les systèmes aquifères de la république de Djibouti. Rapport d'étude.

Jalludin M., Razack M., 2004. Assessment of hydraulic properties of sedimentary and volcanic aquifer systems under arid conditions in the Republic of Djibouti (Horn of Africa). *Hydrogeol. J.* 12 :159–170.

Jones H.G., Tardieu F., 1998. Modelling water relations of horticultural crops: a review. *Sci. Hortic.* 74:21–46.

K

Kassem M.A., 2007. Water requirement and crop coefficient of date palm trees “ Sukariah cultivar”. *Misr J. Ag. Eng.*, 24(2): 339-359.

Klute A., 1986. *Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods*, Second Edition, Soil Science Society of America, Madison, 1188 p.

Kool D., Agama N., Lazarovitcha N., Heitman J.L., Sauer T.J., Ben-Gal A. 2014. A review of approaches for evapotranspiration partitioning. *Agricultural and Forest Meteorology* 184:56–70.

Kosugi, K. 1996. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties. *Water Resour. Res.* 32:2697–2703.

Kustas W.P., Norman J.M., 1999. Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover. *Agric. For. Meteorol.* 94:13–29.

L

Labat C., 2006. Mesure de pF du sol. Fiche technique interne: 01. INRA Grignon. 12 p.

Lascano R.J., Van Bavel C.H.M., Hatfield J.L., Upchurch D.R., 1987. Energy and water balance of a sparse crop: simulated and measured soil and crop evaporation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51:1113–1121.

Linné C. (von) 1753. *Species Plantarum*, tome 2. Stockholm, Impensis Laurentii Salvii, 776 p.

M

Madurapperuma W.S., Bleby T.M., Burgess S.S.O. 2009. Evaluation of sap flow methods to determine water use by cultivated palms. *Environmental and Experimental Botany*, 66:372–380.

MAEPH (Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et des Pêches chargé de l'Hydraulique), 2007. Rapport national sur les ressources phytogénétiques pour l'alimentation et l'agriculture. Edition MAEPH, 63 p.

MAEPH (Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et des Pêches chargé de l'Hydraulique), 2000. Plan d'Action National de Lutte contre la Désertification. Edition du MAEPH, 51p.

Mason S.C., 1915: Botanical characters of the leaves of the date palms used in distinguishing cultivated varieties. USDA, Washington, D.C. Bull. 223.

Mazahrih NT., AL-Zu'bi Y., Ghnaim H., Lababdeh L., Ghananeem M., Abu Ahmadeh H., 2012. Determination Actual Evapotranspiration and Crop Coefficients of Date Palm Trees (*Phoenix dactylifera*) in the Jordan Valley. American Eurasian J. Agric. & Environ. Sci., 12 (4): 434-443.

Mermoud A., Xu D., 2006. Comparative analysis of three methods to generate soil hydraulic functions. Soil & Tillage Research 87: 89-100.

MHUE (Ministère de l'Habitat, de l'Urbanisme et de l'Environnement), 2013. Seconde communication nationale de la République de Djibouti à la convention cadre des nations unies sur les changements climatiques. Edition DATE (Direction de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement), 147 p.

MHUEAT (Ministère de l'Habitat, de l'Urbanisme, de l'Environnement et de l'Aménagement du Territoire), 2001. Communication nationale initiale de Djibouti à la Convention des Nations Unies sur les Changements Climatiques, Edition du MHUEAT, 91 p.

Michel-Dansac F., Caubet A., 2013. L'iconographie et le symbolisme du palmier dattier dans l'Antiquité (Proche-Orient, Égypte, Méditerranée orientale), Revue d'ethnoécologie, vol.4, 17 p.

Milne D., 1918: The Date Palm cultivation in the Punjab. Govt. Printing Press, Lahore.

Munier P., 1973. Le Palmier-dattier. Techniques agricoles et productions tropicales. Maison Neuve et Larose, 217 p.

Musgrave R.B., Moss D.N., 1961. Photosynthesis under field conditions. A portable, closed system for determining net assimilation and respiration of corn. Crop Sci.1: 37-41.

Musy A., Soutter M., 1991. Physique du sol. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Suisse, 335 p.

N

Nabil M., 2010. Le développement du palmier dattier en République de Djibouti. Biotechnologie du palmier dattier, Actes du 3e Séminaire du réseau AUF-BIOVEG « Biotechnologies du palmier dattier » Montpellier (France), 18-20 novembre 2008. Colloques et Séminaire, édition de l'IRD, 55-64.

O

Oihabi A., 1991. Effect of vesicular arbuscular Mycorrhizae on Bayoud disease and date palm nutrition. Ph.D. thesis, University of Marrakech, 199 p.

P

PAM (Programme Alimentaire Mondiale), 2012. Evaluation de la sécurité alimentaire en situation d'urgence en zone rurale. Service de l'Analyse de la Sécurité Alimentaire (VAM), 67 p.

Pereira L.S, Tiercellin J.R, Vidal A., 2006. Méthode pratique du calcul des besoins en eau. Traité d'irrigation. Lavoisier, Paris, 2^e édition : 41 p.

Peyron G., 2000. Cultiver le palmier dattier. Groupe de Recherche et d'Information pour le Développement de l'Agriculture d'Oasis, édition GRIDAO, 109 p.

Popenoe P., 1973. The date palm. Miami, Field Research Projects, 259 p.

R

Renniger H.J., Phillips N., 2010. Intrinsic and extrinsic hydraulic factors in varying sizes of two Amazonian palm species (*Iriartea Deltoidea* AND *Mauritia Flexuosa*) differing in development and growing environment, American Journal of Botany 97(12): 1926–1936.

Riou C., Chartier R., 1985. Evapotranspiration en zone semi-aride de deux couverts végétaux (gazon, blé) obtenue par plusieurs méthodes. I. - Evaluation de l'ETP (conditions hydriques non limitantes). Agronomie, 5(3):261-266.

Ritchie J.T., 1972. Model for predicting evaporation from a row crop with in complete cover. Water Resour. Res., 8:1204–1213.

Rossi C., Nimmo J. R., 1994. Modeling of soil water retention from saturation to oven dryness, *Water Resour. Res.*, 30(3):701–708.

S

Saeed AB., Etewy HA., Hassan O.A., (1990). Watering requirement and scheduling of date palm. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*, Vol. 21, No. 4: 49-52.

Sakai M., Jones S.B., Tuller M., 2011a. Numerical evaluation of subsurface soil water evaporation derived from sensible heat balance. *Water Resour. Res.* 47: 1–17.

Sakai M., Jones S.B., Tuller M., 2011b. Correction to numerical evaluation of subsurface soil water evaporation derived from sensible heat balance. *Water Resour. Res.* 47: 705-901.

Schaap M. G., Leij F. J., and van Genuchten M. Th., 2001. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions, *Journal of Hydrology*, 251: 163-176.

Schmugge T., Jackson T.J., McKim H.L., 1980. Survey of methods for soil moisture determination. *Water Resour. Res.* 16 (6):961–979.

Sellami H.M., Sifaoui S.M. 1998.

Sellami H.M., Sifaoui S.M. 2003. Estimating transpiration in an intercropping system: measuring sap flow inside the oasis. *Agricultural Water Management* (59):191-204.

Shahraeeni E., Lehmann P., Or D., 2012. Coupling of evaporative fluxes from drying porous surfaces with air boundary layer: characteristics of evaporation from discrete pores. *Water Resour. Res.* 48, W09525.

Shuttleworth W.J., Wallace J.S., 1985. Evaporation from sparse crops, an energy combination theory. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 111: 839–855.

Šimůnek J., van Genuchten M.T., and Šejna M., 2005. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Version 3.0. HYDRUS Software Ser. 1. Dep. of Environmental Sciences, Univ. of California, Riverside.

Šimůnek J. et Hopmans J. W., 2009. Modeling compensated root water and nutrient uptake, *Ecological Modeling*, doi:10.1016/j.ecolmodel.2008.11.004, 220(4): 505-521.

Sperling O., Shapira O., Cohen S., Tripler E., Schwartz A., and Lazarovitch N., 2012. Estimating sap flux densities in date palm trees using the heat dissipation method and weighing lysimeters. *Tree Physiol* vol. 32:1171–1178.

Sperling O., 2013. Water Relations in Date Palm Trees: a Combined Approach using Water, Plant, and Atmospheric Data. PhD. Ben-Gurion University of the Negev, 85 p.

T

Tardieu F., Manichon R., 1986. Caractérisation en tant que capteur d'eau de l'enracinement du maïs en parcelle cultivée. II. Une méthode d'étude de la répartition verticale et horizontale des racines. *Agronomie*, 6: 415-425.

Taylor SA., Ashcroft GM., 1972. *Physical Edaphology*. Freeman and Co.: San Francisco; 434–435.

Thompson A.L., Gilley J.R., Norman J.M., 1993. A sprinkler water droplet evaporation and plant canopy model. I. Model development. *Trans. ASAE* 36:735–741.

Tournebize R., 1994. Microclimat lumineux et transpiration d'une association arbuste/herbe, en milieu tropical : mesures et modélisation. Thèse de doctorat, Université Paris XI, 311 p.

Toutain G., 1979. *Eléments d'agronomie saharienne : de la recherche au développement*. Paris, 276 p.

Trambouze W., Bertuzzi P., Voltz M., 1998. Comparison of methods for estimating actual evapotranspiration in a row-cropped vineyard. *Agric. For. Meteorol.* 91:193–208.

V

Vachaud G., Vauclin M., Riou C., Chaabouni Z. 1985. Evapotranspiration en zone semi-aride de deux couverts végétaux (gazon, blé) obtenue par plusieurs méthodes. II. - Méthodes neutroniques et tensiométriques. *Agronomie*, 5(3):267-274.

van Dam J.C., and Feddes R.A., 2000. Simulation of infiltration, evaporation and shallow groundwater levels with the Richards' equation. *J. Hydrol.*, 233: 72-85.

van Dam, J.C., 2000. Field-scale water flow and solute transport. SWAP model concepts, parameter estimation, and case studies. PhD-thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, 167 p.

van Dam, J.C., Groenendijk P., Hendriks R.F.A. and Kroes J.G., 2008. Advances of modeling water flow in variably saturated soils with SWAP. *Vadose Zone J.*, Vol.7, No.2.

van Genuchten M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44: 892-898.

van Genuchten M.Th., Leij F.J., Yates S.R., 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory. Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, ADA, Oklahoma, 83 p.

van Halsema G.E., Vincent L., 2012. Efficiency and productivity terms for water management: a matter of contextual relativism versus general absolutism. *Agric. Water Manag.* 108: 9–15.

W

Wesseling J.G., Elbers J.A., Kabat P. and Van Denbroek B.J., 1991. SWATRE: instructions for input, Internal Note, Winand Staring Centre, Wageningen, the Netherlands.

X

Xiao X., Horton R., Sauer T.J., Heitman J.L., Ren T., 2011. Cumulative soil water evaporation as a function of depth and time. *Vadose Zone J.* 10: 1016–1022.

Y

Yang Y., Guan H., Hutson J.L., Wang H., Ewenz C., Shang S., Simmons C.T., 2013. Examination and parameterization of the root water uptake model from stem water potential and sap flow measurements. *Hydrol. Process.* vol. 27: 2857-2863.

Yoro G., Godo G., 1990. La méthode au sable : protocole et utilisation pratique. *Cahier ORSTOM série Pédologie*, 35, n°4: 423-429.

Z

Zaid A. (Ed.), 2002. Date palm cultivation. Food and agricultural organization of the United Nations (FAO), Rome. Agriculture and Consumer Protection, FAO, 156 p.

Zaid A., 1987. Branching Phenomenon in Date Palm. *Date Palm Journal* 5 (1): 48-58.

Zohary D., Spiegel-Roy P., 1975. Beginnings of fruit growing in Old World. *Science*, 187 (4174): 319-327.

Annexe

Tableau : données sur l'irrigation et drainage (FAO, 2005).

Irrigation et drainage

Potentiel d'irrigation		2 400	ha
Contrôle de l'eau			
1. Irrigation, maîtrise totale/partielle: superficie équipée	1999	1 012	ha
- irrigation de surface		-	ha
- irrigation par aspersion		-	ha
- irrigation localisée		-	ha
• partie irriguée à partir des eaux souterraines	1989	100	%
• partie irriguée à partir des eaux de surface	1989	0	%
2. Zones basses équipées (marais, bas-fonds, plaines, mangroves)		-	ha
3. Irrigation par épandage de crues		-	ha
Superficie totale équipée pour l'irrigation (1+2+3)	1999	1 012	ha
• en % de la superficie cultivée	1999	100	%
• augmentation moyenne par an sur les 10 dernières années	1989-1999	4.1	%
• superficie irriguée par pompage en % de la superficie équipée		-	%
• partie de la superficie équipée réellement irriguée	1999	38	%
4. Marais et bas-fonds cultivés non équipés		-	ha
5. Superficie en cultures de décrue non équipée		-	ha
Superficie totale avec contrôle de l'eau (1+2+3+4+5)		1 012	ha
• en % de la superficie cultivée		100	%
Périmètres en maîtrise totale/partielle	Critère		
Périmètres d'irrigation de petite taille	< ha	-	ha
Périmètres d'irrigation de taille moyenne	> ha et < ha	-	ha
Périmètres d'irrigation de grande taille	> ha	-	ha
Nombre total de ménages en irrigation	1999	1 298	
Cultures irriguées dans les périmètres en maîtrise totale/partielle			
Production totale de céréales irriguées	1989	4	tonnes
• en % de la production totale de céréales	1989	100	%
Superficie totale en cultures irriguées récoltées	1989	407	ha
• Cultures annuelles/temporaires: superficie totale	1989	357	ha
- céréales	1989	2	ha
- légumes	1989	355	ha
• Cultures permanentes: superficie totale	1989	50	ha
- autres cultures permanentes	1989	50	ha
Intensité culturale des cultures irriguées		-	%
Drainage - Environnement			
Superficie totale drainée		-	ha
- partie de la superficie équipée pour l'irrigation drainée		-	ha
- autres surfaces drainées (non irriguées)		-	ha
• superficie drainée en % de la superficie cultivée		-	%
Superficie protégée contre les inondations		-	ha
Superficie salinisée par l'irrigation		-	ha
Population touchée par les maladies hydriques liées à l'eau		-	habitants

Hami SAID AHMED

Etude de l'alimentation hydrique du palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.) dans le contexte pédoclimatique de la zone littorale de la République de Djibouti

Résumé :

Le palmier-dattier constitue une des rares cultures à vocation alimentaire adaptées aux conditions climatiques extrêmes (sécheresse, salinité), telles que rencontrées à Djibouti. Dans un contexte de ressources en eau fortement limitées, la connaissance des modalités de l'alimentation hydrique du palmier dattier est essentielle. L'objectif de ce travail de recherche est d'acquérir cette connaissance, dans le contexte pédoclimatique de Djibouti, par la réalisation d'un suivi in situ du fonctionnement hydrique du système sol-palmier, à l'échelle d'un individu, et la quantification du puits racinaire du palmier-dattier.

Un palmier-dattier, pleinement développé, a été instrumenté à l'échelle de la cuvette d'irrigation, à l'aide de plusieurs tubes d'accès de sonde à neutrons, pour le suivi de la teneur en eau volumique du sol, et de plusieurs tensiomètres, répartis de 10 à 160 cm de profondeur. Trois expériences d'infiltration/redistribution a été réalisées successivement, la première sans altérer le fonctionnement du système sol-palmier, la seconde après avoir coupé le palmier, tout en permettant l'évaporation de la surface du sol, la dernière après avoir couvert la surface du sol afin d'empêcher l'évaporation.

Les résultats mettent en évidence une forte hétérogénéité des propriétés hydriques du sol, avec une stratification liée au contexte sédimentaire littoral. L'impact du puits racinaire sur la dynamique hydrique du sol est observé jusqu'à 80 cm de profondeur. Pour la période fraîche, les besoins en eau du palmier dattier sont estimés à 130 L par jour, avec une fréquence d'irrigation d'une fois toutes les 2 semaines. Pour la première fois, le coefficient cultural du palmier dattier ($k_c = 1,39$) a été établi dans les conditions climatiques de Djibouti.

Les résultats obtenus contribueront à une meilleure gestion de l'irrigation et à une meilleure maîtrise du risque de salinisation du sol dans le contexte pédoclimatique de la République de Djibouti.

Mots clés : palmier dattier, sol, puits racinaire, climat semi-désertique, évaporation, transpiration, transferts hydriques

Study of the date palm (*Phoenix dactylifera* L.) water uptake in the coastal pedoclimatic context of the Republic of Djibouti

Abstract:

Date palm is one of the few food crops adapted to the extreme weather conditions (drought, salinity), such as encountered in Djibouti. In the context of highly limited water resources, knowledge of the date palm water requirements is essential. The objective of this research was to determine the date palm water requirements, in the Djibouti pedoclimatic context, using in situ monitoring of water transport in the soil-plant-atmosphere system, at the scale of a single date palm tree, and to quantify the date palm root water uptake. A fully developed date palm tree was instrumented at the irrigation basin scale, using several access tubes for neutron probe for monitoring the soil volumetric water content, and several tensiometers, installed from 10 to 160 cm depth. Three infiltration/redistribution experiments have been performed successively, the first without alteration of the soil-plant system, the second after cutting off a date palm tree while allowing the surface evaporation, the last with covering the soil surface to avoid evaporation.

The results show large heterogeneity in soil hydraulic properties, with stratification linked to the coastline sedimentary context. The root water uptake is observed up to 80 cm depth. The date palm water requirements in the fresh period are estimated at 130 liters per day with a frequency of irrigation of one time every two weeks. For the first time, the date palm cultural coefficient has been established in the Djibouti climatic conditions ($k_c = 1.39$).

The obtained results will contribute to better management of irrigation and to improve the control of soil salinization in the pedoclimatic context of the Republic of Djibouti.

Keywords: date palm, soil, root water uptake, semi-desert climate, evaporation, transpiration, water transfer.



Institut des Sciences de la Terre d'Orléans, UMR 7327,
Université d'Orléans/CNRS-INSU/BRGM, 45071 Orléans,
France
Centre d'Etudes et de Recherches de Djibouti, route de
l'Aéroport, BP 486, Djibouti, République de Djibouti

