

UNIVERSITE KASDI MERBAH - OUARGLA

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Département des Sciences Agronomiques



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences agronomiques

Spécialité : **Protect. de la ressource Sol Eaux Environnement**

Présenté par : Melle BEN CHERAA Assia

Thème

Initiation à la modélisation de l'effet de l'irrigation avec des eaux salées sur la dynamique verticale de la salinité en milieux arides. Cas de l'utilisation de HYDRUS 1D

Soutenu publiquement

Le : Septembre 2020

Devant le Jury :

Mme	SLIMANI	Rabia	M.C.A.	Présidente	UKM Ouargla
M.	LADJICI	Abdelkader	M.A.A.	Examineur	UKM Ouargla
M.	BERKAL	Ismaiel	M.C.A.	Encadreur	UKM Ouargla

Année Universitaire : 2019 / 2020

Remerciements

Avant tout je remercie mon Dieu ALLAH, le tout puissant de m'avoir accordé la force, le courage et la volonté pour mener à terme ce travail. je profite cette occasion pour tenir à exprimer mes vifs remerciements à toutes les personnes qui m'ont aidé tout au long de ce travail.

Ma reconnaissance va plus particulièrement à mon promoteur Mr BERKAL I., merci de m'avoir proposé ce thème et dirigé tout au long de ce mémoire. J'adresse également mes remerciements aux membres du jury de mémoire M. LADJICI A. et Mme SLIMANI R., qui ont accepté d'évaluer ce travail. A tout le corps enseignant de l'Université KASDI MERBAH, particulièrement ceux de la spécialité Protection de la Ressource Sol et Eau et Environnement.

Je voudrais exprimer ma gratitude aux agents de l'Institut Technique de Développement d'agriculture Saharienne (I.T.D.A.S). A Tous les amis et les étudiants, en particulier les camarades de notre promotion.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de cette modeste étude.

Bencheraa, 2020.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents pour leur générosité et leurs sacrifices.

A mes chers frères : Abd Eljalil, Moataz et Mohammed.

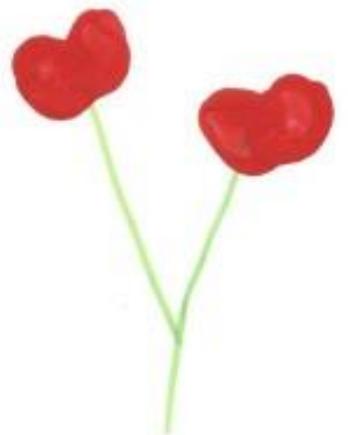
Et chères sœurs : Maïssa.

A mes cousines Radia, Maroua et Chaima.

A mes très chères amies Khaira, Wafa, Soulef, Mbarka, Maroua, Aïcha, Asma, Mounira, Nesrine, Khadra, Houria, Nadjla.

A tous ceux qui m'ont aidé et supportés spécialement Ragheb.

Assia.



Résumé

La salinisation représente un problème planétaire qui conduit à une diminution de la fertilité des sols et donc une diminution des rendements de cultures. Son impact augmente davantage dans les régions arides.

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'effet d'irrigation avec des eaux salées sur la salinisation du sol par la modélisation numérique HYDRUS-1D. Ce modèle mathématique simule les propriétés hydrauliques du sol sur une axe verticale.

La modélisation de la salinité du sol de l'Institut Technique de Développement d'Agronomie Saharienne (ITDAS) à Hassi Ben Abdallah, permet de simuler l'évolution spatiale de la salinité du sol au long de 1008 jours.

Les résultats des analyses du sol montrent qu'il est peu salé ($CE = 0,7$ dS/m), et appartient à la classe texturale sableuse.

Les eaux d'irrigation utilisées représentent une salinité de $2,5$ mS.cm⁻¹. Elles appartiennent à la classe C4 des eaux à très forte salinité.

Les résultats de la modélisation HYDRUS-1D, montrent qu'il y a une augmentation de la salinité du sol dans sa globalité. Elle est en relation directe avec les quantités et la qualité des eaux d'irrigation et aux conditions climatiques.

Mots clés : HYDRUS-1D, modélisation, eaux d'irrigation, salinité, régions arides, ITDAS Hassi Ben Abdallah.

Summary

Salinization is a global problem that leads to a decrease in soil fertility and, in effect, a decrease in crop yields. Its impact increases more in arid regions.

The objective of this study is to evaluate the effect of irrigation with salty water on soil salinization by numerical modelling HYDRUS-1D. This mathematical model simulates the hydraulic properties of the soil on a vertical axis.

The modelling of soil salinity at the Technical Institute for the Development of Saharan Agronomy (ITDAS) in Hassi Ben Abdallah, allowed simulating the spatial evolution of soil salinity over 1008 days.

The results of the soil analyze show that it belongs to the sandy textural class, with a salinity of 0,7 dS/m.

The used irrigation water represents a salinity of 2,5 mS.cm⁻¹, it belongs to class C4 of water with a very high salinity.

The results of the HYDRUS-1D modelling show that there is an increase in the salinity of the whole soil, it's generally linked to the quantities of irrigation water and to the climatic conditions.

Key words: HYDRUS-1D, modelling, irrigation water, salinity, arid regions, ITDAS Hassi Ben Abdallah.

ملخص

التملح مشكلة عالمية تؤدي إلى انخفاض في خصوبة التربة ، وبالتالي انخفاض في غلة المحاصيل. يزداد تأثيرها أكثر في المناطق الجافة.

الهدف من هذه الدراسة هو تقييم تأثير الري بالمياه المالحة على تملح التربة بواسطة النمذجة العددية HYDRUS-1D. يحاكي هذا النموذج الرياضي الخصائص الهيدروليكية للتربة على المحور الرأسي.

سمحت نمذجة ملوحة التربة في المعهد التقني لتنمية الزراعة الصحراوية (ITDAS) في حاسي بن عبد الله بمحاكاة التطور المكاني لملوحة التربة على مدى 1008 يوم.

تظهر نتائج تحاليل التربة أنها تنتمي إلى الطبقة التركيبية الرملية، مع ملوحة تقدر ب $0,7 \text{ dS/m}$. المياه المستخدمة للري تعطي ملوحة بقيمة $2,5 \text{ mS.cm}^{-1}$ وهي تنتمي إلى الفئة C4 للمياه ذات الملوحة العالية.

تظهر نتائج نمذجة HYDRUS-1D أن هناك زيادة في ملوحة التربة ككل، والتي ترتبط بشكل عام بكميات مياه الري والظروف المناخية.

الكلمات المفتاحية : HYDRUS-1D ، النمذجة ، مياه الري ، الملوحة ، المناطق الجافة ، ITDAS حاسي بن عبد الله

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre 1. Présentation de HYDRUS	4
I. Généralité.....	4
I.1 Définition	4
I.2 HYDRUS progiciels	4
II. Estimation des paramètres avec HYDRUS 1D.....	7
II.1 Les paramètres hydrauliques de sol.....	7
II.2 L'écoulement d'eau et le transport de soluté.....	8
II.3 Autres paramètres	8
III. Exemple d'utilisation d'HYDRUS 1D dans la modélisation de transport de solutés .	8
III.1 Les données d'entrée	9
III.2 Données de sortie	14
Chapitre 2. Présentation de la région d'étude.....	16
I. Situation géographique	16
II. Milieu physique.....	17
II.1 Contexte géomorphologique et topographique	17
II.2 Contexte géologique	18
II.3 Contexte pédologique	19
II.4 Contexte hydrographique	19
II.5 Contexte hydrogéologique.....	19
II.6 Contexte climatique.....	21
Chapitre 3. Matériel et méthodes.....	25
I. Matériel d'étude.....	25
I.1 Choix de station d'étude	25
I.2 Présentation de station d'étude	25
II. Méthodes d'étude	26

II.1 Prospection sur terrain	26
II.2 analyses au laboratoire	28
II.3 Simulation numérique	29
Chapitre 4. Résultats et discussions.....	32
I. Résultats d'analyse d'eau	32
II. Caractérisation de l'eau.....	32
II.1 Salinité (CE_w)	32
II.2 Faciès chimique	33
III. Résultats d'analyse du sol.....	34
IV. caractérisation du sol	35
IV.1 Granulométrie	35
IV.2 Salinité (CE).....	35
V. Modélisation Hydrus 1D.....	36
VI. Synthèse de travaux précédents	38
Conclusion générale	41
Références bibliographiques	44

Liste des tableaux

Tableau 1. Données métrologiques de la Wilaya de Ouargla (2008-2018).....	21
Tableau 2. Historique cultural de parcelle étudiée	27
Tableau 3. Résultats d'analyse des eaux d'irrigation	32
Tableau 4. Résultats de l'analyse du sol.....	34

Liste des figures

Figure 1. Historique du développement de HYDRUS-1D et des progiciels associés.	5
Figure 2. La fenêtre de dialogue du processus principale.	9
Figure 3. La fenêtre de dialogue des informations de temps.	10
Figure 4. La fenêtre des propriétés hydraulique de sol.	11
Figure 5. Conditions aux limites d'écoulement d'eau.	12
Figure 6. La fenêtre de transport de solutés.	13
Figure 7. Conditions aux limites de transport de solutés.	14
Figure 8. Carte de la localisation géographique de l'oasis de Ouargla (Idder <i>et al.</i> , 2014). 16	
Figure 9. Esquisse géomorphologique de la région de Ouargla (Bonnard et Gardel, 2004).	18
Figure 10. Coupe hydrogéologique du système aquifère du Sahara septentrional (UNESCO, 1972).	20
Figure 11. Diagramme ombrothermique de Gaussen de la région de Ouargla (2008 - 2018) (ONM., 2018).	23
Figure 12. Localisation de la station de l'ITDAS.	25
Figure 13. Méthodologie de travail.	26
Figure 14. Méthode d'échantillonnage.	28
Figure 15. Classification d'eaux d'irrigation étudiée par le diagramme de Riverside.	33
Figure 16. Classification d'eaux d'irrigation étudiée par le diagramme de Piper.	34
Figure 17. Profil salin de sols étudié.	35
Figure 18. Simulation de l'évolution journalière de la salinité du sol de la parcelle étudiée pour la période 2016-2019.	36
Figure 19. Résultats de simulation de la salinité du sol obtenus par Khemissi et Kemassi (2018).	38

Liste des abréviations

CE: Conductivité Electrique.

CE_w: Conductivité Electrique d'eau.

CI: Continental Intercalaire.

CT: Complexe Terminale.

D: Dimentionnel.

DLL: Dynamically Linked Library.

ETP: Evapotranspiration.

FE: finite element.

ISO: International Organization for Standardization.

ITDAS: Institut Technique de Développement d'Agronomie Saharienne.

N: Nœud.

ONM: Office National de Météorologie.

pH: potentiel Hydrogène.

SAR: Sodium Adsorption Ratio.

SNV: Sciences de la Nature et de la Vie.

Introduction générale

Introduction générale

Les milieux arides, sont des milieux où toutes les conditions hostiles à vie sont réunies. En effet, ces régions sont caractérisées par la rareté de pluies, les températures qui peuvent atteindre facilement les 50°C durant l'été, et les fortes évapotranspirations maximisées par les deux paramètres précédents (Remini, 2019).

Le Sahara septentrional est plus typique et plus expressif par ses événements climatiques extrêmes, et avec la rareté des précipitations (Messen *et al.*, 2014). L'irrigation s'impose comme un choix incontournable pour l'agriculture et pour répondre aux besoins diversifiés de la population agricole (Koull *et al.*, 2013). Les seules ressources en eaux disponibles à exploitées pour l'irrigation dans cette région, sont les eaux souterraines, dont la qualité chimique naturelle dépend essentiellement de leur origine.

La salinité des eaux souterraines présente l'un des grands problèmes dans cette région, vu son effet sur la détérioration de la qualité des eaux (Bekkari *et al.*, 2017). La surexploitation et l'utilisation non rationnelle de ces eaux dans l'irrigation n'est pas sans conséquences sur la dégradation de la qualité des sols. Cette dégradation se manifeste par la salinisation et la baisse de rendement (Koull *et al.*, 2013).

Les différences de la salinité de sol d'un même profil mettent en évidence une variation bidimensionnelle: horizontale et verticale. Dans le sens vertical, la dynamique des remontées capillaires, les fluctuations de la nappe et la nature des matériaux du sol, sont parmi les facteurs de cette variation. Cette variation spatiale de la salinité est un phénomène assez courant traduisant une grande dynamique des sels dans les milieux arides (Niang *et al.*, 2017).

Les déficits pluviométriques et l'intense évaporation provoquée par des températures très élevées ont entraîné une extension de la superficie des terres salées, non seulement en l'Algérie, mais aussi dans le monde entier (Faye *et al.*, 2019).

A l'échelle mondiale, environ 70 Million ha de sols sont affectés par la salinisation (Nunez et Finkbeiner, 2020). Pour cela, la modélisation de la salinisation du sol est devenue une nécessité pour éviter et contrôler les dommages causés par celle-ci.

Elle représente une technique alternative appropriée qui économise du temps, des coûts et des efforts de la surveillance sur le terrain qui nécessite l'application des déférentes

méthodes géophysiques comme la conductivité électromagnétique (EM38) appelée pour décrire la variabilité spatiale de la salinité des sols et la télédétection utilisée pour cartographier des aspects de surface du sol (Berkal, 2016).

Tant d'études comme celle de Šimůnek et Van Genuchten (2008), Ramos (2011), Nassirou (2017), Jha *et al.* (2017), Kanzari *et al.* (2018) et Noshadi *et al.* (2020), ont utilisé HYDRUS-1D dans la modélisation de l'écoulement d'eau et le transport de solutés. Ces études ont confirmé que les valeurs de prédiction de la salinité du sol étaient plus précises dans le modèle HYDRUS-1D qui fournit un outil efficace pour simuler et mieux comprendre les propriétés hydrauliques du sol.

De ce fait, nous utilisons HYDRUS-1D dans notre étude dans l'objectif de simuler l'effet d'irrigation avec les eaux salées sur l'évolution de la salinisation des sols au Sahara septentrional.

Nous structurons notre travail dans ce document en quatre chapitres :

Le chapitre un, contient la synthèse bibliographique, présentant le modèle HYDRUS et donnant une vue simple de ses codes, fonctions et paramètres.

Le chapitre deux présente la région d'étude et décrit ses différentes caractéristiques naturelles.

Le troisième chapitre présente le matériel et les méthodes utilisées dans la réalisation de la modélisation hydrologique.

Le dernier chapitre quant à lui discute les résultats obtenus de la modélisation.

On clôturera ce travail par une conclusion générale qui inclut l'essentielle des résultats obtenus dans le cadre de cette recherche.

Chapitre 1

Présentation de

HYDRUS

Chapitre 1. Présentation de HYDRUS

I. Généralité

I.1 Définition

HYDRUS est un programme informatique pour résoudre l'équation de Richard de l'écoulement de l'eau et l'équation d'advection-dispersion du transport de chaleur et de soluté dans les milieux souterrains variablement saturés. Les zones saturées de manière variable sont essentielles à la compréhension de nombreux aspects de l'hydrologie, y compris l'infiltration, le stockage de l'humidité du sol, l'évaporation, l'absorption d'eau par la plante, la recharge des eaux souterraines, le ruissellement et l'érosion.

HYDRUS utilise la méthode des éléments finis (FE) pour simuler le mouvement unidimensionnel, bidimensionnel ou tridimensionnel de l'eau, de la chaleur et de plusieurs solutés dans des milieux poreux insaturés, partiellement saturés ou entièrement saturés (Yu et Zheng, 2010).

I.2 HYDRUS progiciels

Il existe trois versions différentes des progiciels HYDRUS actuellement utilisés. Bien que chaque modèle considère des processus de base similaires, leur principale différence réside dans la dimensionnalité des problèmes qu'ils peuvent résoudre (Šimůnek *et al.*, 2008a) :

I.2.1 HYDRUS-1D

Il existe en tant que code Windows gratuit depuis son développement par Šimůnek *et al.* (1998) à des fins académiques (Yu et Zheng, 2010). Il considère les problèmes unidimensionnels associés, par exemple, aux colonnes de sol, aux lysimètres, aux profils de sol et aux parcelles.

HYDRUS-1D puise ses racines dans les premiers travaux de van Genuchten (1978, 1987) et ses modèles SUMATRA et WORM, ainsi que les travaux ultérieurs de Vogel et Kool (1987) et leurs modèles SWMI et HYDRUS.

Quatre versions ont été développées depuis la sortie du modèle (figure 1). Les versions 1 et 2 incluaient à la fois le déséquilibre physique et le déséquilibre chimique de transport de soluté. La version 3 incluait une option pour envisager l'écoulement d'eau à

double porosité et le transport de soluté, alors que la version 4 inclut en outre l'écoulement d'eau à double perméabilité et de transport de soluté.

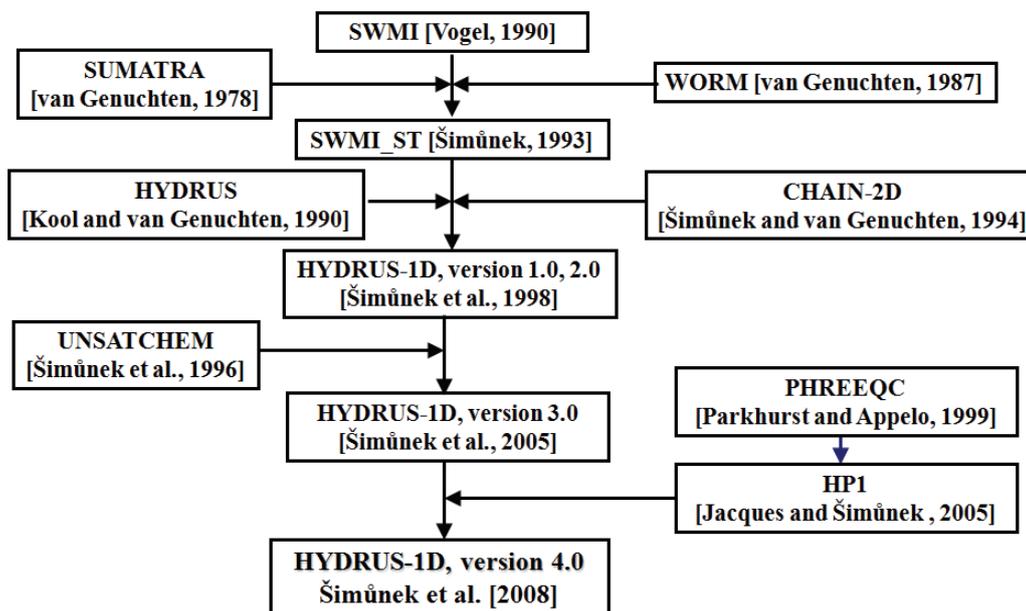


Figure 1. Historique du développement de HYDRUS-1D et des logiciels associés.

Depuis 2008, plusieurs sous-versions ont été publiées, les dernières 4.17 ont été publiées en 2018, elles incluent également; graphique de tous les flux météorologiques / énergétiques (lorsque le bilan énergétique de surface est résolu), les flux de drainage (vers les drains horizontaux) peuvent être soit par le bas soit distribués verticalement, irrigation déclenchée, graphes des ions majeurs, CE et SAR aux nœuds d'observation (Šimůnek *et al.*, 2012).

I.2.2 HYDRUS- 2D

HYDRUS-2D est un solveur d'éléments finis entièrement interactif pour l'eau et le transport de soluté et de chaleur, pour les milieux poreux saturés et insaturés. Le code peut prendre en charge un large éventail de conditions aux limites, y compris un simulateur robuste de précipitation / transpiration / absorption racinaire, le rendant applicable aux simulations «réelles» (Tyler, 2004).

La plupart ou la totalité des processus dans HYDRUS-1D ont été inclus dans HYDRUS-2D, y compris l'absorption d'eau par les racines des plantes en fonction du stress hydrique et salin, une gamme de fonctions hydrauliques du sol, les chaînes de décomposition des solutés, l'hystérésis, les dispositions pour les réactions non linéaires et

de non-équilibre, le transport physique des solutés de type non-équilibre (double porosité) et les capacités d'estimation des paramètres.

HYDRUS-2D, avant d'avoir été récemment entièrement remplacé par HYDRUS (2D/3D), était continuellement mis à jour avec de nouvelles fonctionnalités et de nouveaux processus. De nouvelles conditions limites dynamiques adaptées aux divers systèmes de micro-irrigation mis en œuvre dans HYDRUS-2D ont été facilement utilisées par les utilisateurs. Hansson et al. (2005) ont simulé des schémas d'écoulement de l'eau dans des chaussées souples avec une version de HYDRUS-2D qui prenait en compte, outre l'écoulement souterrain, également le ruissellement de surface décrit à l'aide de l'équation cinématique (Šimůnek *et al.*, 2008b).

I.2.3 HYDRUS- 2D/3D

C'est un produit commercial développé par PC-Progress Compagnie (Yu et Zheng, 2010). La version 1 du progiciel HYDRUS (2D/3D) était une extension et un remplacement de HYDRUS-2D (version 2.0) et SWMS_3D. Ce progiciel était une réécriture complète de HYDRUS-2D et de ses extensions pour les géométries à deux et trois dimensions (Šejna *et al.*, 2018). En plus des caractéristiques et des processus disponibles dans HYDRUS-2D et SWMS_3D, les nouveaux modules de calcul d'HYDRUS (2D/3D) ont été pris en compte :

- (a) L'écoulement de l'eau et le transport du soluté dans un système à double porosité, permettant ainsi un écoulement préférentiel dans les fractures ou les macropores tout en stockant l'eau dans la matrice.
- (b) Les fonctions de distribution spatiale des racines.
- (c) Les modèles de propriétés hydrauliques du sol.
- (d) Le transport des virus, colloïdes et/ou bactéries en utilisant un modèle d'attachement et de détachement, la théorie de la filtration et les fonctions de blocage.
- (e) Un module de zone humide construit (uniquement en 2D).
- (f) Le modèle d'hystérésis pour éliminer le pompage en gardant une trace des points d'inversion historiques.
- (g) De nouvelles options de gestion de l'impression.
- (h) Des conditions limites dynamiques, dépendantes du système.

- (i) Particules en écoulement dans les applications bidimensionnelles.
- (j) Calculs des flux réels et cumulés à travers les mailles internes.

II. Estimation des paramètres avec HYDRUS 1D

II.1 Les paramètres hydrauliques de sol

Les modèles d'écoulement variablement saturés, tels que HYDRUS 1D a été utilisé dans plusieurs études en raison de ses options inverses. Ils ont besoin en entrée des propriétés hydrauliques du sol non saturé comprenant la courbe de rétention d'eau et la fonction de conductivité hydraulique (Šimůnek *et al.*, 2012).

La variabilité verticale du sol est décrite en combinant les fonctions uni-modales de Van Genuchten – Mualem (van Genuchten, 1980) avec les facteurs d'échelle proposés par Vogel *et al.* (1991). En particulier, trois facteurs de mise à l'échelle sans dimension indépendants sont utilisés: φ_θ , φ_h et φ_K pour la teneur en eau, la hauteur de pression et la conductivité hydraulique saturée, respectivement. Ces trois paramètres de mise à l'échelle sont utilisés pour définir un modèle linéaire de la variabilité spatiale réelle des propriétés hydrauliques du sol comme suit:

$$\begin{cases} \theta(h) = \theta_r + \varphi_\theta[\theta^*(h^*) - \theta_r] \\ h = \varphi_h h^* \\ K(h) = \varphi_K K^*(h^*) \end{cases} \quad (1)$$

Où $\theta^*(h^*)$ et $K^*(h^*)$ sont les fonctions hydrauliques du sol de référence, qui sont idéalement celles qui ne sont pas affectées par les activités de gestion de surface.

Cette approche théorique garantit une grande flexibilité de modélisation car elle permet de décrire des profils de sol à la fois homogènes et hétérogènes en utilisant un seul ensemble de fonctions hydrauliques du sol de référence et seulement quelques paramètres supplémentaires. Si le sol est homogène, les facteurs d'échelle sont mis à 1 (Brunetti *et al.*, 2019).

II.2 L'écoulement d'eau et le transport de soluté

Le modèle HYDRUS-1D résout numériquement l'équation de Richards (2) pour un écoulement d'eau variablement saturée et l'équation de convection-dispersion (3) de transport de soluté :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(h) \frac{\partial h}{\partial z} + k(h) \right] - S \quad (2)$$

Avec, z la profondeur sous la surface du sol (positive vers le haut) [L], q le flux d'eau [LT^{-1}], t le temps [T], S un terme de puits représentant l'absorption d'eau par les racines [T^{-1}], et $K(h)$ la conductivité hydraulique du sol [LT^{-1}], qui est fonction de la hauteur de pression h [L] et de la teneur volumétrique en eau θ (Stumpp *et al.*, 2012).

L'équation de convection-dispersion pour le transfert des solutés se présente comme suit :

$$\frac{\partial \theta C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\theta D \frac{\partial C}{\partial z} - v \theta C \right] - \Gamma C \quad (3)$$

Avec, t le temps [T], z la profondeur du sol orientée positivement vers le haut [L], θ la teneur volumétrique en eau, v la vitesse de l'eau [LT^{-1}], C la concentration du soluté [ML^{-3}], Γ le terme puits/source produit par les processus géochimiques (précipitation, dissolution, échanges cationiques) [$ML^{-3}T^{-1}$] et D le coefficient de dispersion [L^2T^{-1}] (Nassirou, 2017).

II.3 Autres paramètres

Plusieurs autres paramètres du modèle, tels que ceux décrivant le transport de chaleur, l'absorption racinaire d'eau et la distribution des racines, ont également été estimés à l'aide d'HYDRUS 1D (Šimůnek *et al.*, 2012).

III. Exemple d'utilisation d'HYDRUS 1D dans la modélisation de transport de solutés

Pour la modélisation du transport des solutés par HYDRUS 1D, l'étude de Saifadeen et Gladnyeva (2012) publiée sous le titre; Effets de l'hystérésis et de la variabilité temporelle des données d'entrée météorologiques dans la modélisation du transport des solutés dans la zone non saturée à l'aide de HYDRUS-1D, représente un bon exemple des descriptions et des utilisations de HYDRUS 1D.

Ils ont décrit précisément les données d'entrée et de sortie impliquées dans la modélisation comme suit :

III.1 Les données d'entrée

III.1.1 Données météorologiques

Pour les données météorologiques, ils ont utilisé les précipitations et l'évapotranspiration pendant la période d'étude 1996-2008 obtenues auprès de l'Institut suédois de métrologie et d'hydrologie.

III.1.2 Propriétés hydrauliques de sol

Pour les propriétés hydrauliques, ils ont utilisé la profondeur, la texture et la densité apparente pour les sols de trois sites étudiés.

La fenêtre de dialogue du processus principal (figure 2) contient les processus qui peuvent être simulés dans HYDRUS tels que l'écoulement d'eau, le transport de soluté et de chaleur, l'absorption racinaire d'eau et la croissance des racines. Seuls l'écoulement d'eau et les options générales de transport des solutés ont été sélectionnés et simulés dans cette modélisation.

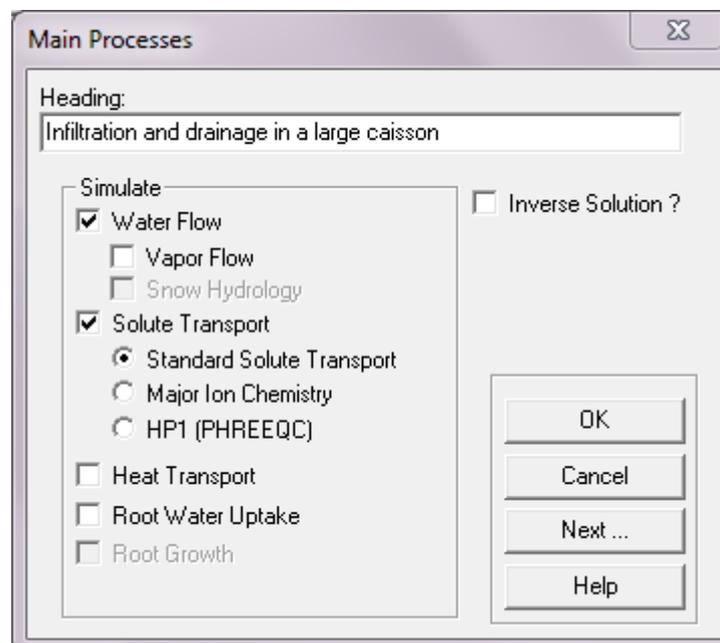


Figure 2. La fenêtre de dialogue du processus principale.

III.1.3 Informations de géométrie

Dans HYDRUS-1D, la géométrie du modèle peut être définie. Tout d'abord, le nombre de types de sol, la profondeur totale du profil du sol et les unités de longueur peuvent être définis dans la boîte de dialogue d'informations géométriques. Ensuite, un modèle d'éléments finis peut être construit en subdivisant chaque région en éléments linéaires au moyen d'un éditeur graphique de profil de sol ou de fenêtres de dialogue de résumé de profil de sol.

III.1.4 Information de temps

Dans cette section des informations de temps (figure 3), les unités de temps et les conditions aux limites variables dans le temps peuvent être définies. L'unité de temps a été choisie en heures dans leurs études, mais souvent elle est choisie en jours.

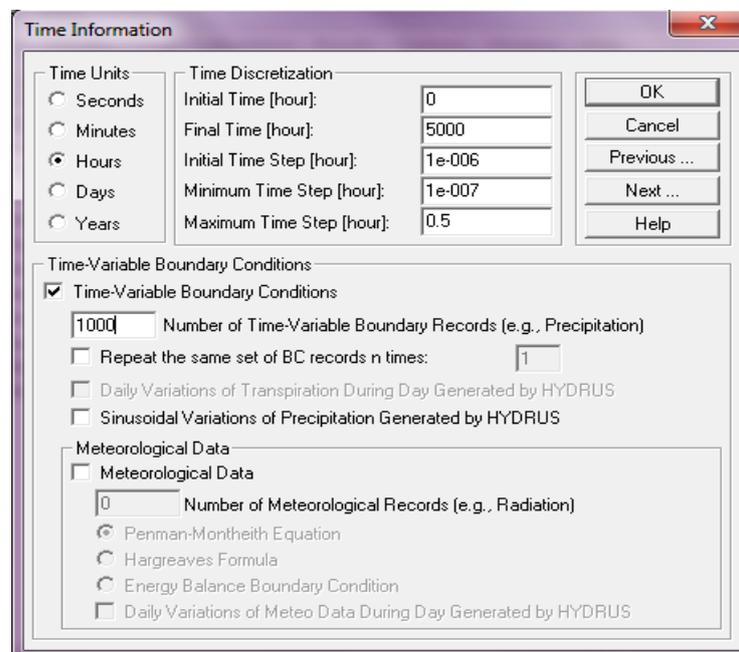


Figure 3. La fenêtre de dialogue des informations de temps.

III.1.5 Ecoulement d'eau

- a- Modèle de propriété hydraulique du sol :** Il existe différents modèles hydrauliques (figure 4) qui peuvent être utilisés pour définir le modèle hydraulique et l'hystérésis. Dans cet exemple, le modèle de porosité unique de Van Genuchten-Mualem a été sélectionné, d'abord avec hystérésis, puis sans hystérésis.

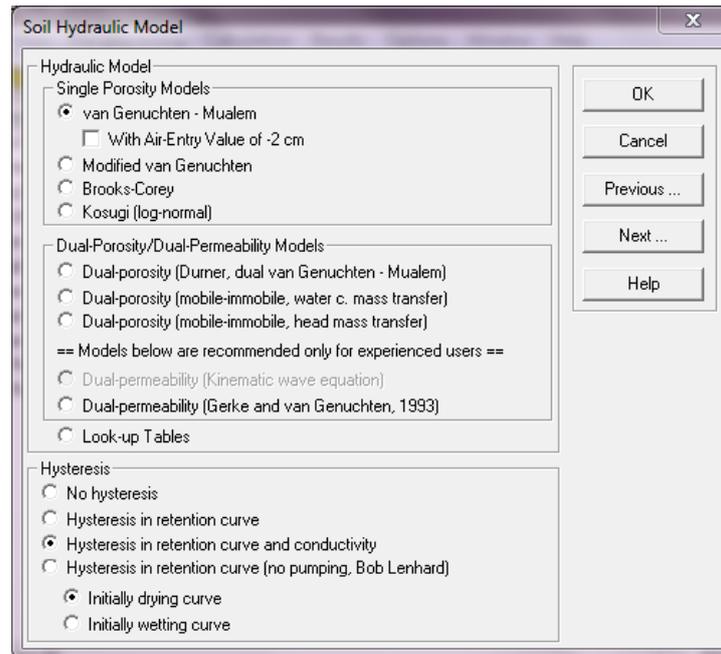


Figure 4. La fenêtre des propriétés hydraulique de sol.

- b- Paramètres hydrauliques du sol :** Les paramètres nécessaires pour cette section sont : les teneurs en eau résiduelle et saturée, la conductivité hydraulique saturée, le paramètre de connectivité des pores et les coefficients empiriques Alpha et n. Pour prédire les valeurs de ces paramètres, HYDRUS-1D utilise Rosetta DLL (Dynamically Linked Library) qui peut être utilisé pour estimer les paramètres de rétention d'eau selon Van Genuchten (1980), les paramètres de conductivité hydraulique saturée et de conductivité hydraulique non saturée selon Van Genuchten (1980) et Mualem (1976), pour ce faire, le modèle utilise une base de données de rétention d'eau mesurée et d'autres propriétés pour une grande variété de supports. Pour la distribution granulométrique d'un milieu donné et d'autres propriétés du sol, le modèle estime une courbe de rétention avec une bonne comparabilité statistique avec les courbes de rétention connues dans d'autres milieux ayant des propriétés physiques similaires (Nimmo, 2006).
- c- Conditions aux limites d'écoulement d'eau :** Les conditions aux limites d'écoulement d'eau (figure 5) sont sélectionnées dans cette section. La fenêtre contient les limites supérieure et inférieure. Pour les besoins de la modélisation 1D, il a été supposé avoir une hauteur de pression constante à la profondeur choisie (250 cm) en tant que condition aux limites inférieures et des conditions

aux limites atmosphériques à la couche de surface en tant que condition aux limites supérieures.

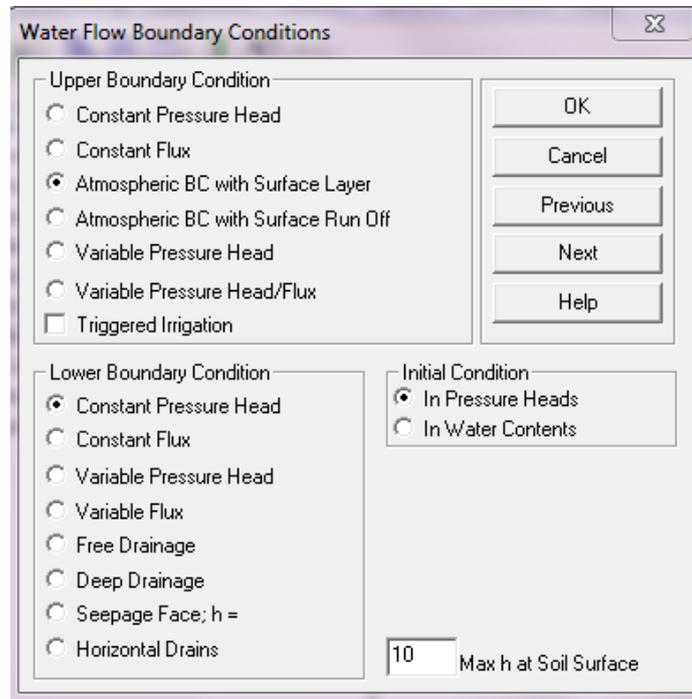


Figure 5. Conditions aux limites d'écoulement d'eau.

III-1-6 Transport de solutés

- a- **Informations générales :** Dans ce sous-menu de prétraitement, peuvent être définis le modèle de transport de soluté indiqué dans la figure 6, le schéma de pondération temporelle, le schéma de pondération d'espace ainsi que certains autres paramètres.

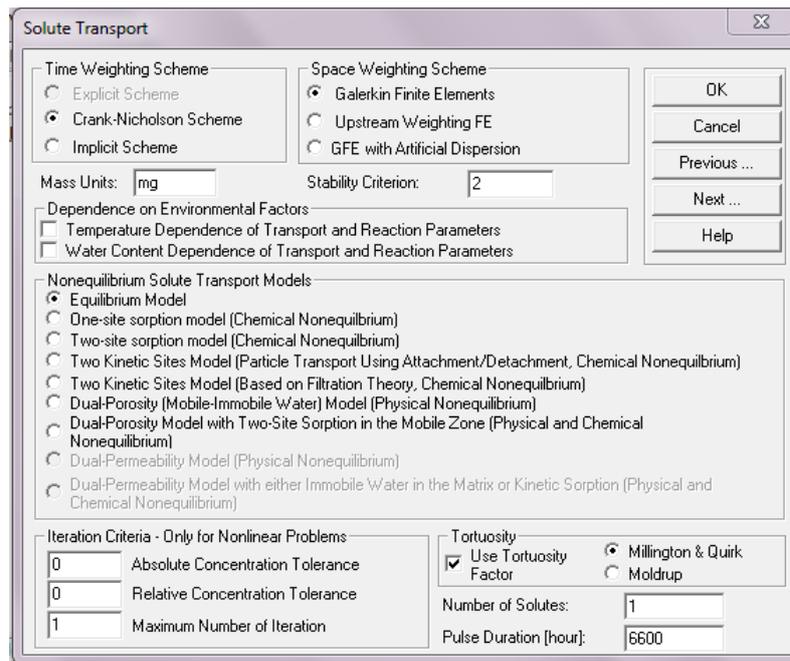


Figure 6. La fenêtre de transport de solutés.

- b- Paramètres de transport de soluté :** Les paramètres de transport de soluté nécessaires sont la densité apparente, la dispersivité longitudinale, la fraction adimensionnelle des sites d'adsorption et la teneur en eau immobile qui est égale à zéro lorsque le non-équilibre physique n'est pas pris en compte. En plus de ces paramètres, certains paramètres spécifiques aux solutés sont nécessaires, tels que le coefficient de diffusion moléculaire dans l'eau libre et le coefficient de diffusion moléculaire dans l'air du sol, qui ont tous deux été fixés à zéro.
- c- Conditions aux limites de transport de soluté :** à des fins de modélisation 1D, un flux de concentration a été utilisé comme conditions aux limites supérieures et un gradient de concentration zéro a été supposé comme une condition aux limites inférieures avec des concentrations en phase liquide comme condition initiale.

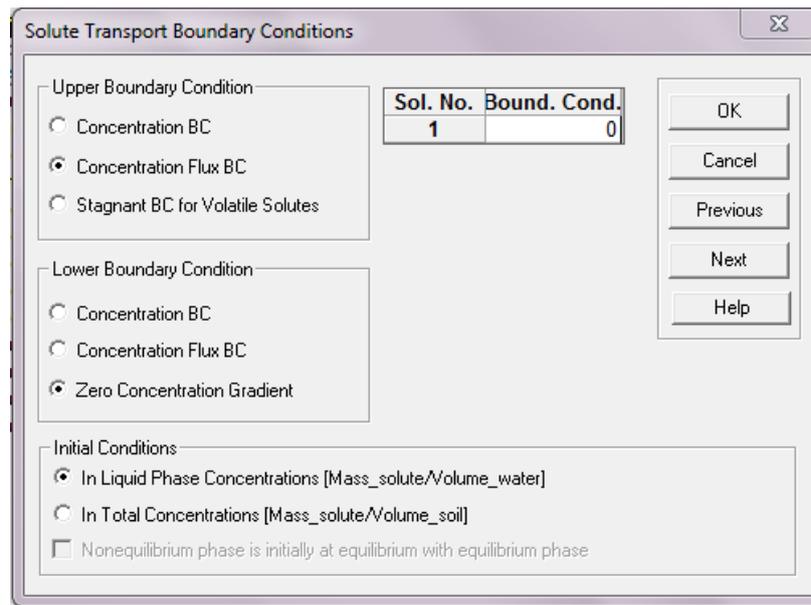


Figure 7. Conditions aux limites de transport de solutés.

III.2 Données de sortie

Une fois les modèles HYDRUS-1D préparés, des simulations vont être effectuées pour obtenir les résultats. En général, HYDRUS fournit trois groupes différents de fichiers de sortie, qui sont; informations de niveau T, informations de niveau P et informations de niveau A.

Les informations de niveau T contiennent des informations qui sont imprimées à la fin de chaque pas de temps. Par exemple, il apporte des informations sur le changement temporel de la hauteur de pression, de la teneur en eau, de la température et la solution et les concentrations absorbées, dans des nœuds d'observation spécifiés.

Les informations de niveau P sont imprimées uniquement aux heures d'impression prescrites. Par exemple, ce niveau donne la quantité totale d'eau, de chaleur et de soluté à l'intérieur de chaque sous-région spécifiée, ainsi que la hauteur de pression moyenne, la température moyenne et la concentration moyenne sur chaque sous-région. Les erreurs absolues et relatives dans les bilans massiques d'eau et de soluté peuvent être également imprimées.

Les informations de niveau A sont imprimées chaque fois qu'une condition aux limites dépendante du temps est spécifiée. Ce niveau donne par exemple, le fichier de sortie des informations météorologiques, la valeur cumulée de la transpiration potentielle et réelle, la valeur cumulée du flux de surface potentiel et réel.

Chapitre 2

Présentation de la région d'étude

Chapitre 2. Présentation de la région d'étude

I. Situation géographique

La région de Ouargla (figure 8) est localisée au Nord-Est du Sahara septentrional, elle couvre un territoire de 163 230 km² (Salhi, 2017).

Selon Ozenda (1983), elle se trouve à une :

Altitude moyenne de 157 m.

Latitude de 31°58' Nord.

Longitude de 5°20' Est.

Elle est limitée par la Wilaya d'El-Oued au Nord, la Wilaya d'Illizi au Sud, les Wilayas de Djelfa Biskra et Ghardaïa au Nord-Ouest et Ouest, la Wilaya de Tamanrasset au Sud-Ouest et par la Tunisie à l'Est (Salhi, 2017).

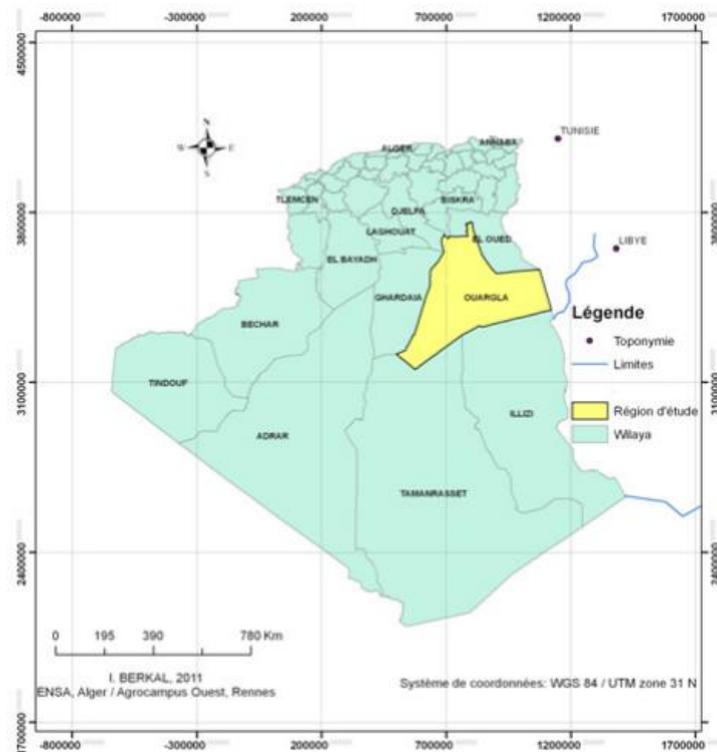


Figure 8. Carte de la localisation géographique de la wilaya de Ouargla (Idder *et al.*, 2014).

II. Milieu physique

II.1 Contexte géomorphologique et topographique

Ouargla est l'une des principales oasis du Sahara algérien. La ville est installée dans une cuvette qui constitue l'aboutissement de l'artère hydrographique de l'oued Mya. Dans la région de Ouargla, le lit de cet oued est d'une largeur variable mais toujours assez modeste. La pente générale moyenne de cette vallée, depuis la ville de Ouargla, est l'ordre de 1 ‰ (Idder, 2007).

La cuvette de Ouargla présente une dissymétrie est-ouest assez nette. La limite vers l'ouest est marquée par une falaise qui domine la vallée à une altitude d'environ 220 mètres (Idder, 2007) et qui termine la hamada Mio-Plio-Quaternaire. C'est une formation continentale détritique qui forme un plateau où affleurent de grandes dalles rocheuses grésocalcaires du tertiaire qui sont couvertes de graviers et de cailloux associés à des sables siliceux rougeâtres (Idder *et al.*, 2014). Ce plateau s'abaisse légèrement d'Ouest en Est où il est très fortement érodé et ne laissant que quelques buttes témoins appelées «goure».

Le côté ouest de la cuvette se caractérise aussi par la présence des glacis qui s'étagent du plus ancien au plus récent, d'Ouest en Est sur quatre niveaux de 140 à 200 m d'altitude. Les glacis situés à 180 et 160 m se caractérisent par des affleurements du substrat gréseux du Mio-Pliocène. L'Est de la cuvette est un vaste glacis alluvial à sable grossier situé à 150 m d'altitude (Medjani, 2016).

La limite est, quant à elle moins élevée (160 mètres), est beaucoup plus diffuse (Idder, 2007). Elle est composée de formations dunaires éoliennes de recouvrement représentées par les vastes étendues de sable fin du grand Erg oriental. Ce grand Erg couvre environ les 2/3 du territoire de la cuvette et prédomine le relief de Ouargla (Salhi, 2017).

Les bas-fonds de la cuvette sont occupés par des alluvions qui sont des terrains inondés ou inondables de la sebkha qui s'allongent en forme de croissant, au nord de la ville. Cette sebkha, qui constitue un élément déterminant dans le paysage morphologique de la cuvette, est composée de sols salés gypseux à croûte gypseuse de surface et de subsurface qui évoluent dans des conditions d'asphyxies prolongées. Le bas fond se

- d. Alluvions regs :** ce sont des formations caillouteuses où le pourcentage de cailloux est dominant. Ces formations occupent la partie Nord Ouest et Sud Ouest de la vallée de Ouargla.

II.3 Contexte pédologique

La région de Ouargla se caractérise par une grande hétérogénéité de sols représentés par les Leptosols (yermic), les Arenosol aridic, les Stagnosols, Gleysols, les Solonchaks et par les Gypsisols (Daoud et Halitim, 1994 ; Berkal, 2016).

Le paysage pédologique de la cuvette est dominé principalement par le caractère salin due à la présence d'une nappe salée fluctuante combinée avec une irrigation mal contrôlée aggravée par un climat très évaporant conduit à la formation et à l'extension de sols salins et salin sodiques, avec parfois des encroûtements gypseux (Rouvillois-Brigol, 1975 ; Berkal, 2016).

II.4 Contexte hydrographique

Le réseau hydrographique est composé de l'Oued M'ya qui est un oued fossile dont la source se situait au sud dans les massifs montagneux du Tademaït. Il traversait lors des dernières périodes pluviales du Pléistocène inférieur et de l'Holocène Ouargla avant de recevoir au niveau de la sebkha Safioune les apports de l'Oued M'zab et de l'Oued N'sa (Berkal, 2016).

II.5 Contexte hydrogéologique

La région de Ouargla repose sur un énorme réservoir d'eaux souterraines, il s'agit du système aquifère du Sahara septentrional (figure 10) qui renferme une série de couches aquifères qui ont été regroupées en deux réservoirs appelés communément: le Continental Intercalaire (CI) et le Complexe Terminal (CT) (Houari *et al.*, 2014).

II.5.1 Continental Intercalaire (CI)

Il est constitué en grande partie par des sables et des grès d'âge Albien. Il s'étend sur tout le bassin sédimentaire du Sahara septentrional (Belksier *et al.*, 2016), la profondeur de cette nappe est environ 1150m. Elle a un débit d'eau de l'ordre de 100 l/s avec une pression d'eau à la tête de forage de presque 15 bars (Bouselsal, 2017).

Les eaux de la nappe du Continental Intercalaire sont relativement peu minéralisées par rapport aux eaux des autres nappes (généralement 1 à 2 mS.cm⁻¹) (Idder *et al.*, 2014).

II.5.2 Complexe terminal

Il renferme, sur le territoire algérien, deux formations aquifères distinctes. La première est contenue dans les sables du Mio-Pliocène (Idder, 2007), leur épaisseur moyenne est de 240m et la conductivité électrique de ses eaux varie de 3 à 6.5 mS.cm⁻¹) (Idder *et al.*, 2014).

La seconde formation se trouve dans le Sénonien et formée de calcaire dolomitique et l'anhydrite, elle est caractérisée par une épaisseur moyenne de 220m et une conductivité électrique qui ne dépasse pas 3 mS.cm⁻¹ au niveau de la cuvette.

Le niveau statique de complexe terminal varie entre 18 et 40m et le débit des forages varie entre 15 et 30 l/s (Bouselsal, 2017, Idder *et al.*, 2014).

II.5.3 Nappe phréatique

Une troisième formation, d'importance plus modeste, s'ajoute aux deux précédentes. Il s'agit de la nappe phréatique, ou nappe superficielle, contenue dans les alluvions de la vallée de l'oued M'ya. Dans l'agglomération, sa profondeur varie entre 0,5 et 1,5 m par rapport au niveau du sol. Mais dans les zones les plus basses, elle se trouve pratiquement à fleur de sol. Les eaux de la nappe phréatique sont quant à elles beaucoup trop minéralisées (CE varie de 6 à 18 mS.cm⁻¹) et leur très mauvaise qualité s'oppose à tout usage (Idder *et al.*, 2014).

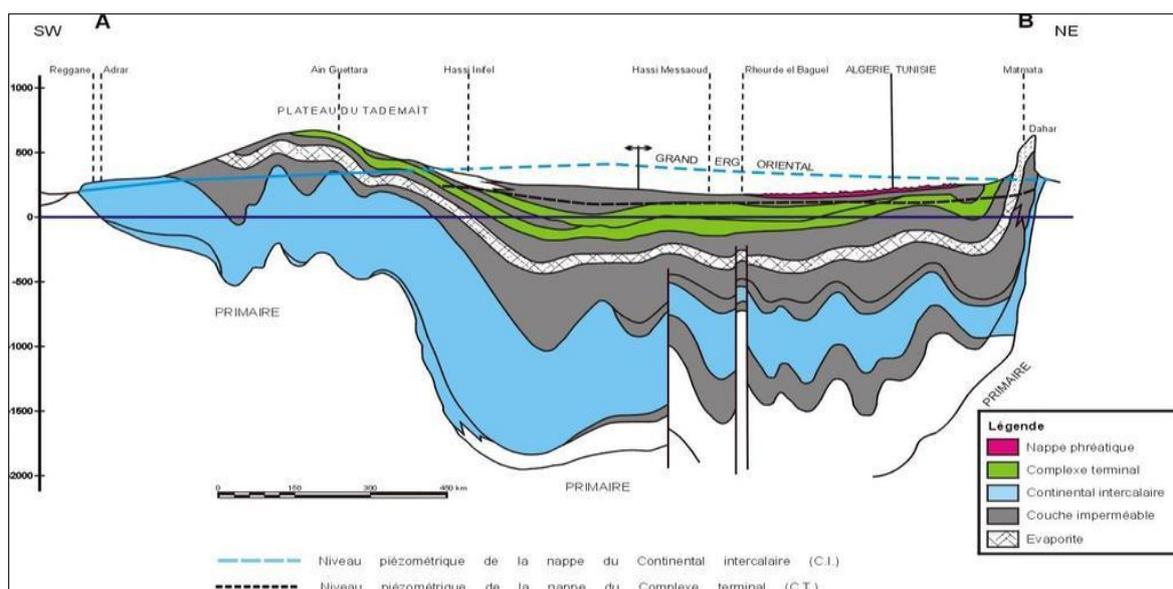


Figure 10. Coupe hydrogéologique du système aquifère du Sahara septentrional (UNESCO, 1972).

II.6 Contexte climatique

Le climat de Ouargla est très contrasté. L'aridité s'exprime par des températures très élevées en été, des précipitations très faibles et par l'importance de l'évaporation due à la sécheresse de l'air (Abdou, 2004). Ce constat est bien illustré par l'étude des données climatiques de l'Office National de Météorologie (ONM) de Ouargla pour la période 2008-2018 (tableau 1).

Tableau 1. Données métrologiques de la Wilaya de Ouargla (2008-2018)

Mois	T min (°C)	T max (°C)	T moy (°C)	H (%)	V max (m/s)	P (mm)	E (mm)	I (h)
Janvier	4,8	17,8	11,3	51,5	7,4	7,1	87,8	228,2
Février	6,3	19,4	12,9	44,5	8,3	3,1	112,0	218,6
Mars	9,8	23,6	16,7	39,0	8,9	4,3	168,1	244,3
Avril	14,1	28,3	21,2	33,0	9,4	1,2	217,1	262,8
Mai	18,4	32,5	25,4	28,4	9,7	1,7	279,1	283,8
Juin	22,7	36,9	29,8	25,4	9,1	0,7	329,6	215,4
Juillet	25,9	40,4	33,2	21,4	8,2	0,3	408,3	290,2
Août	25,1	39,0	32,0	25,0	8,1	0,3	350,2	310,2
Septembre	21,7	35,0	28,3	33,1	8,4	5,2	248,4	243,6
Octobre	15,9	29,0	22,4	39,5	7,3	5,2	187,6	243,1
Novembre	9,5	22,3	15,9	47,9	6,7	2,3	113,2	228,6
Décembre	5,3	18,1	11,7	53,5	6,4	3,2	78,3	215,2
Moyenne	15,0	28,5	21,7	36,8	8,2	34.6*	2579 ,7*	248,7

*: Cumulés annuelle

T min (°C): Température minimal

T max (°C): Température maximale

T moy (°C): Température moyenne

H (%): humidité relative

P(mm) : Pluviométrie

I (h): Insolation

E (mm): Evaporation

V max (m/s): vent maximal

II.6.1 Température

Pour la région d'étude, la température moyenne annuelle est de 21,7 °C. Elle atteint la maximale 40,4 °C le mois de juillet, par contre le mois le plus froid est janvier pour lequel on enregistre la valeur la plus basse de température 4,8 °C.

II.6.2 Précipitation

Les précipitations sont en effet très irrégulières et rares. La valeur maximale de précipitation (7,1 mm) est enregistrée le mois de janvier, le cumul annuel de pluviosité est de l'ordre de 34,6 mm.

II.6.3 Humidité

L'humidité relative reste très faible, Elle est voisine à 21% en juillet et atteint une valeur maximale de 53% en décembre.

II.6.4 Vent

Le vent dans la région de Ouargla souffle pendant toute l'année. Les vents les plus forts soufflent du Nord-Est et du sud et les plus fréquents du Nord (Rouillois-Brigol, 1975).

Le mouvement de l'air le plus élevé se produit en Mars avec 9,7 m/s. La moyenne annuelle de la vitesse du vent est au alentour de 8 m/s.

II.6.5 Evaporation

L'évaporation est très intense dans la région de Ouargla, elle est de l'ordre de 2579,7 mm/an, avec un maximum mensuel de 408 mm au mois le plus chaud correspondant au mois de juillet et un minimum de 78 mm marqué au mois de décembre.

II.6.6 Insolation

La durée moyenne mensuelle d'insolation dans la cuvette de Ouargla est de 249 heures/mois.

II.6.7 Synthèse climatique

Le diagramme ombrothermique établi pour les données climatiques de la région de Ouargla pour la période 2008-2018 indiqué dans la figure 11, montre que la période sèche s'étale sur toute l'année.

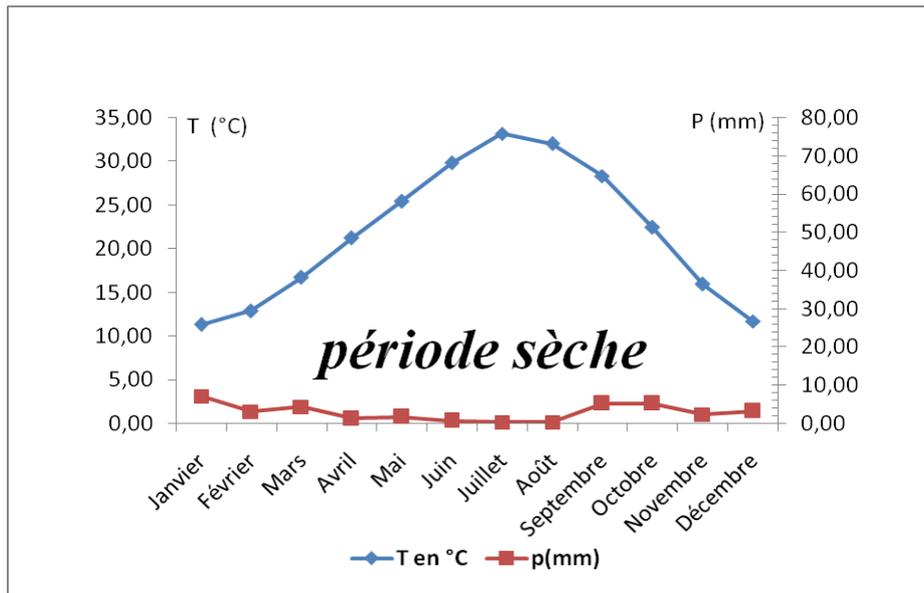


Figure 11. Diagramme ombrothermique de Gaussen de la région de Ouargla (2008 - 2018) (ONM., 2018).

Chapitre 3

Matériels et méthodes

Chapitre 3. Matériel et méthodes

I. Matériel d'étude

I.1 Choix de station d'étude

Dans le cadre de cette recherche, nous avons retenu la station expérimentale de l'Institut Technique de Développement d' Agronomie Saharienne l'ITDAS de Hassi Ben Abdallah. Le choix a été basé sur:

1. la disponibilité des données antérieures et des informations concernant l'historique des travaux dans les parcelles choisies pour l'expérimentation.
2. l'homogénéité des parcelles.
3. l'existence d'une convention de collaboration entre la faculté SNV et la station ITDAS de Hassi ben Abdallah, donc une accessibilité facile à cette exploitation.

I.2 Présentation de station d'étude

La station de l'Institut Technique de Développement de l'Agronomie Saharienne (ITDAS) de Hassi Ben Abdallah (figure 12), est située dans le secteur Sud- Est de la palmeraie de Hassi Ben Abdallah à 27 Km du chef lieu de la wilaya Ouargla. La station couvre une superficie de 21 ha. Elle se trouve à une altitude de 135 m, latitude de 32°30' N et longitude de 5°4' E. La station de l'ITDAS est divisée en trois sous stations : la palmeraie, les serres et le plein champ (Salhi et Bissati, 2016).

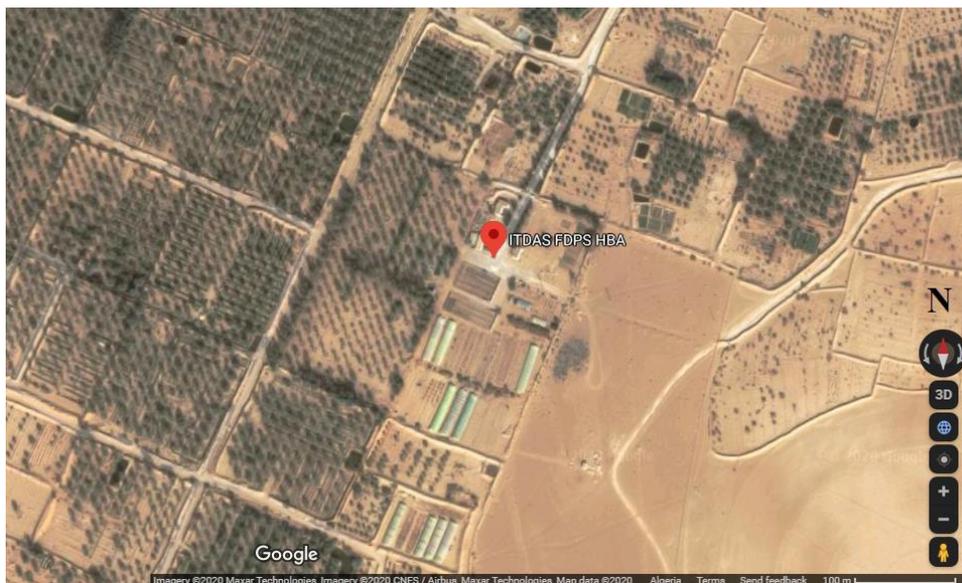


Figure 12. Localisation de la station de l'ITDAS.

II. Méthodes d'étude

La démarche adoptée dans le cadre de cette étude (figure 13), se résume en trois étapes importantes : (i) prospection sur terrain ; (ii) analyses au laboratoire et (iii) traitement des données et modélisation.

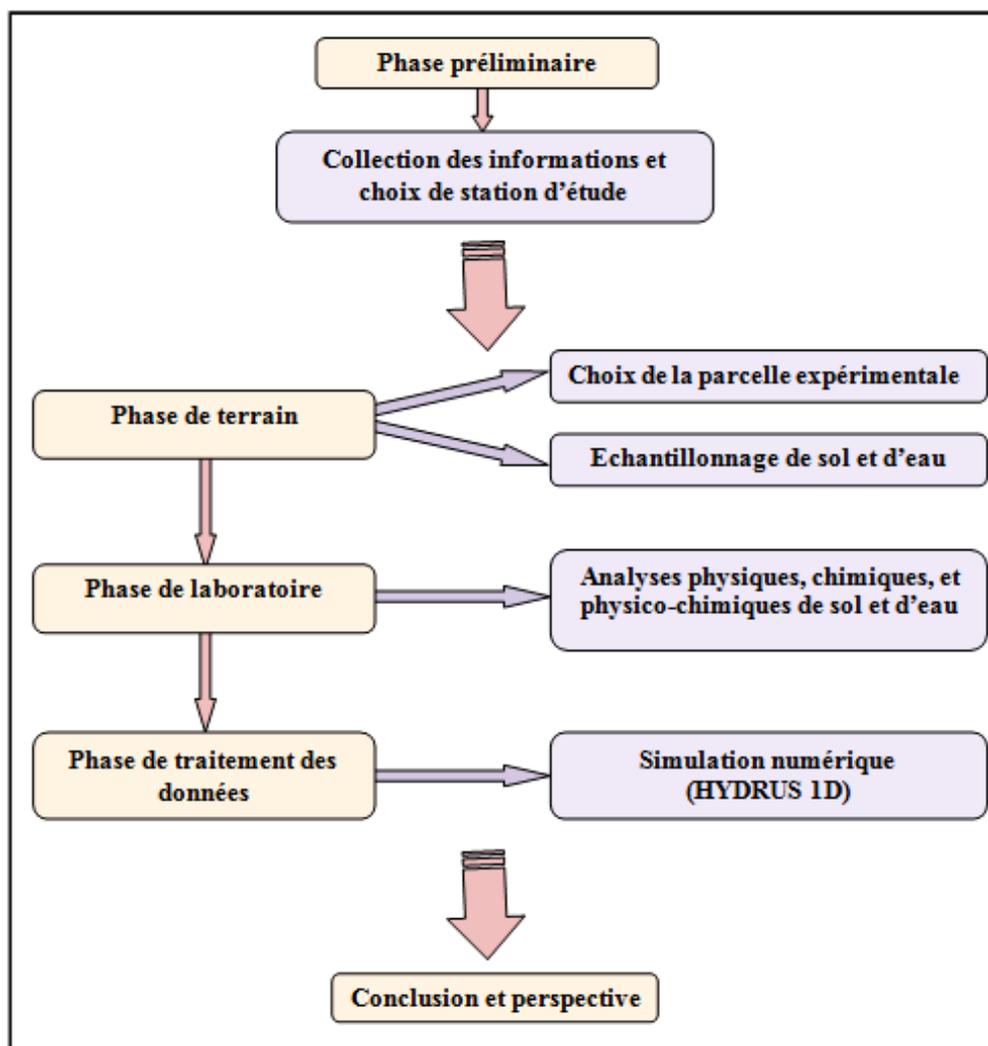


Figure 13. Méthodologie de travail.

II.1 Prospection sur terrain

II.1.1 Choix de parcelle d'étude

La parcelle d'étude choisie occupe une superficie de 36 m². Elle est cultivées avec du blé dur sous une irrigation par aspersion, avec les eaux de la nappe Albienne qui se caractérise par une faible salinité par rapport aux autres nappes d'eau (CE de 2,5 mS.cm⁻¹, SAR= 7,6), et par une température très élevée de 58 °C.

L'historique culturel de cette parcelle est indiqué dans le tableau 2 :

Tableau 2. Historique culturel de parcelle étudiée

Date	Espèce cultivée	Quantité d'eau d'irrigation (cm/jour)	Fréquence d'irrigation (jours)
06/10/2016—23/02/2017	Quinoa (Giza/Q102)	0,8	3
06/10/2017—23/02/2018	Quinoa (Giza/Q102)	0,8	3
15/11/2018—10/07/2019	Blé dur	Nov-Mai=0,8	1
		Mai-Juin=1	
		Juin-Juil=1,2	

Pendant la période de culture du Quinoa, la parcelle a été soumise à une irrigation périodique; un jour avec irrigation d'une quantité de 0.8 cm et deux autres jours sans irrigation. Par contre pendant la période de culture de Blé, l'irrigation a été appliquée chaque jour avec une quantité d'eau variable du 0.8 à 1.2 cm.

Ce qui donne une quantité d'eau d'irrigation totale de 97.33 cm/an pour le Quinoa et de 365 cm/an pour le Blé.

II.1.2 Echantillonnage du sol et de l'eau

Echantillonnage du sol : l'échantillonnage du sol est fait selon la méthode indiquée dans la figure 14, avec une espace de 1m entre chaque deux sondages. On fait dix sondages à la tarière dans la parcelle choisie, pour chaque sondage on prend trois échantillons à raison d'un échantillon dans la couche de surface du sol, un autre au niveau de la zone racinaire et le dernier de la zone sous-racinaire. La parcelle est donc échantillonnée avec un incrément de 15 cm sur trois profondeurs : de 0 à 15 cm, de 15 à 30 cm et de 30 à 45 cm.

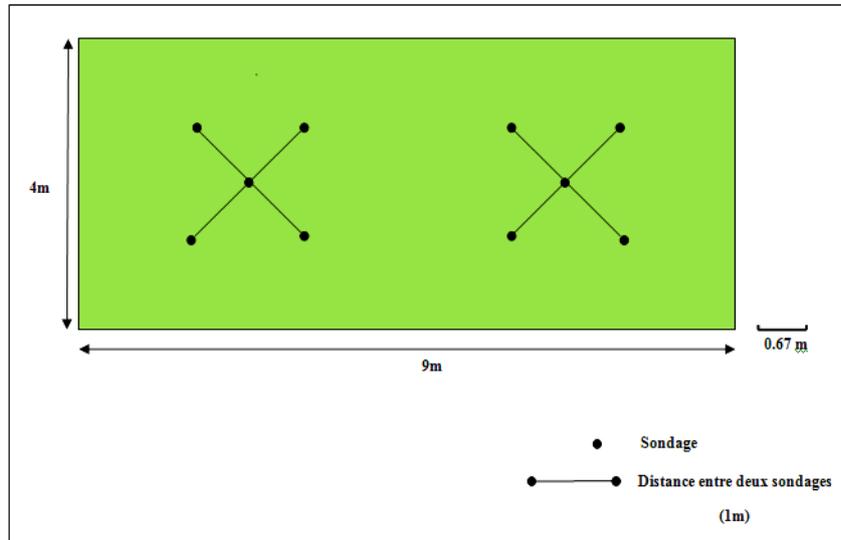


Figure 14. Méthode d'échantillonnage.

Echantillonnage de l'eau : On fait l'analyse d'eau d'irrigation afin de caractériser la qualité d'eau de la station d'étude. L'échantillonnage d'eau se fait à l'aide des échantillonneurs en plastique. On prend une quantité suffisante d'eau pour faire toutes les analyses nécessaires.

II.2 analyses au laboratoire

Selon l'analyse faite par Salhi et Bissati (2016), Allali et Hati (2018) et Hamim et Mena (2018). Au laboratoire, ils ont fait toutes les analyses physiques, physicochimiques et chimiques de sol et de l'eau échantillonnés nécessaires.

II.2.1 Analyses physiques et physicochimiques de sol

Avant de commencer à analyser le sol, les échantillons préparés doivent être séchés à l'étuve à 105°C pendant 24 heures.

1. Dans la partie des **analyses physiques**, on réalise une analyse granulométrique de sol par sédimentométrie à la pipette de Robinson (norme ISO 17892-4:2016.), pour déterminer la texture de notre sol.
2. Pour les **analyses physicochimiques**, on mesure la conductivité électrique CE à 25 °C, par un conductimètre dans une solution de sol d'un rapport 1/5, selon la norme ISO 11265:1994.

II.2.2 Analyses physicochimiques et chimiques de l'eau

Pour l'eau, on fait seulement les analyses physicochimiques et chimiques :

1. Pour les **analyses physicochimiques**, on mesure la conductivité électrique CE et le pH de l'eau par l'utilisation d'un conductimètre selon la norme ISO 7888:1985 et par l'utilisation d'un pH-mètre selon la norme ISO 10523:2008 respectivement.
2. Pour les **analyses chimiques** on fait le dosage des **anions solubles** dans l'eau échantillonnée :
 1. Les chlorures sont dosés par titrimétrie au nitrate d'argent en présence de chromate de potassium lors de la préparation selon la méthode de Mohr, la norme ISO 9297:1989.
 2. Les carbonates et les bicarbonates sont dosés par titrimétrie avec du H₂SO₄ de la préparation selon la norme ISO 9963-2:1994.
 3. Les sulfates sont dosés par la méthode gravimétrique par précipitation sous forme de sulfate de Baryum selon la méthode standard ISO 9280:1990.
 4. Les **cations solubles** : le Ca⁺⁺ et le Mg⁺⁺ sont dosés par la méthode d'absorption atomique (ISO 7980:1986) par contre le Na⁺ et le K⁺ sont dosés par la méthode de la spectrophotométrie d'émission de flamme (ISO 9964-3:1993).

II.3 Simulation numérique

La simulation numérique des paramètres hydrodynamiques et de transport de soluté de notre sol sera réalisée par le modèle HYDRUS-1D, qui simule la salinité dans une dimension verticale dans le profil de sol.

Pour le paramétrage du modèle on utilise :

1. **Données climatiques journalières** : pour les données climatiques on utilise les données de l'Office National de Météorologie de Ouargla (ONM, 2018). Le calcul de l'évapotranspiration potentielle se fait en utilisant de la formule de Thornthwaite (1948): $ETP = (0,25^* \text{Evaporation}) + (0,75^* \text{Transpiration})$ (Berkal, 2016).

2. **Quantités d'eau d'irrigation** : étant donné que notre parcelle est située en milieu aride, qui se caractérise par des faibles précipitations, la modélisation hydrologique sera réalisée uniquement par l'utilisation des quantités d'eau d'irrigation précédemment mentionnées dans le tableau 2 de l'historique cultural de la parcelle étudiée.
3. **Qualité de l'eau d'irrigation** : l'irrigation se fait avec les eaux de l'Albien ayant une conductivité électrique (CE_w) de $2,5 \text{ mS.cm}^{-1}$.
4. **Niveau de la nappe** : la parcelle d'étude est située dans une région relativement élevée avec un drainage naturel vers Sebkhath Hassi Ben Abdallah. Le niveau de la nappe phréatique est très loin de la surface de sol, et donc avec un effet négligeable sur la modélisation.
5. **Données du profil** : les données du profil qui devraient être utilisées pour la modélisation sont la profondeur, la granulométrie et la salinité. Comme nous n'avons pas réalisé notre expérimentation à cause de la situation sanitaire (Covid 19), nous utiliserons les données de précédentes études sur la parcelle d'étude choisie.

Le profil choisi a une profondeur de 45 cm. D'après les résultats d'analyse du sol de l'exploitation de l'ITDAS obtenus par Salhi et Bissati (2016), Allali et Hatti (2018) et Hamim et Menaâ (2018), on constate que la texture du sol est dominée par les sables (>89%). Pour la salinité, les trois travaux précédemment mentionnés donnent des valeurs de conductivité électrique mesurées voisines à $0,7 \text{ mS.cm}^{-1}$.

6. **Période de la modélisation** : la simulation HYDRUS-1D de notre parcelle cultivée avec blé dur, sera limitée à 1008 jours et qui s'étale du 6 octobre 2016 au 10 juillet 2019.
7. **Résultats de la modélisation** : les données de sortie seront relatives à différents nœuds préalablement choisis sur le profil. Notre étude s'intéresse particulièrement à l'évolution journalière de la salinité au niveau de trois nœuds localisés à 8, 20 et 40 cm de profondeur correspondant aux milieux des couches de profils étudiés.

Chapitre 4

Résultats et discussions

Chapitre 4. Résultats et discussions

I. Résultats d'analyse d'eau

Les résultats d'analyse des eaux d'irrigation provenant de la nappe, sont tirés des travaux de Hamim et Mena (2018), ils sont indiqués dans le tableau 3 :

Tableau 3. Résultats d'analyse des eaux d'irrigation

Caractéristiques	Eau d'irrigation	
CE (mS.cm ⁻¹) à 25°C	2,50	
pH	8,41	
Bilan ionique	Anions (méq/l)	
	Na ⁺	27
	K ⁺	11,7
	Ca ⁺⁺	18,4
	Mg ⁺⁺	7
	Cations (méq/l)	
	HCO ₃ ⁻	1,7
	Cl ⁻	16,8
	SO ₄ ⁻	12,6
	SAR	7,6

II. Caractérisation de l'eau

II.1 Salinité (CE_w)

L'eau d'irrigation de la parcelle de l'ITDAS représente une eau à très forte salinité (CE_w=2,5 mS.cm⁻¹) (Durand, 1983) qui peut causer des problèmes au niveau de sol. Le diagramme de classification des eaux d'irrigation de Riverside réalisé par le logiciel Diagrammes (figure 15), montre que l'eau échantillonnée appartient à la classe C4 qui représente une qualité des eaux médiocre à l'irrigation.

Selon Durand (1983) (annexe 1), ces eaux sont inutilisables normalement pour l'irrigation exceptionnellement, elles peuvent être utilisées sur des sols très perméables avec un bon drainage et une dose d'irrigation en excès pour assurer un fort lessivage du sol. Les plantes cultivées devront être très tolérantes aux sels.

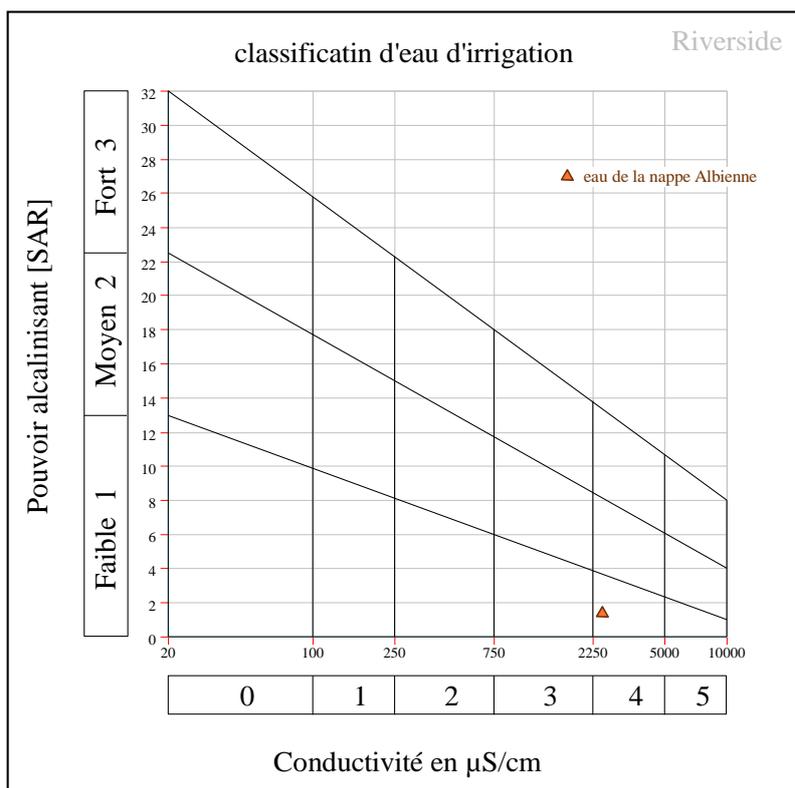


Figure 15. Classification d’eaux d’irrigation étudiée par le diagramme de Riverside.

II.2 Faciès chimique

Le faciès chimique des eaux d'irrigation peut être catégorisé par le diagramme de Piper, la répartition de chaque un des anions et cations est représentée dans deux triangles séparés pour donner enfin le faciès globale de l'eau.

Le diagramme de Piper (figure 16) montre que les eaux de la nappe de l’Albien ont un faciès chloruré sodique.

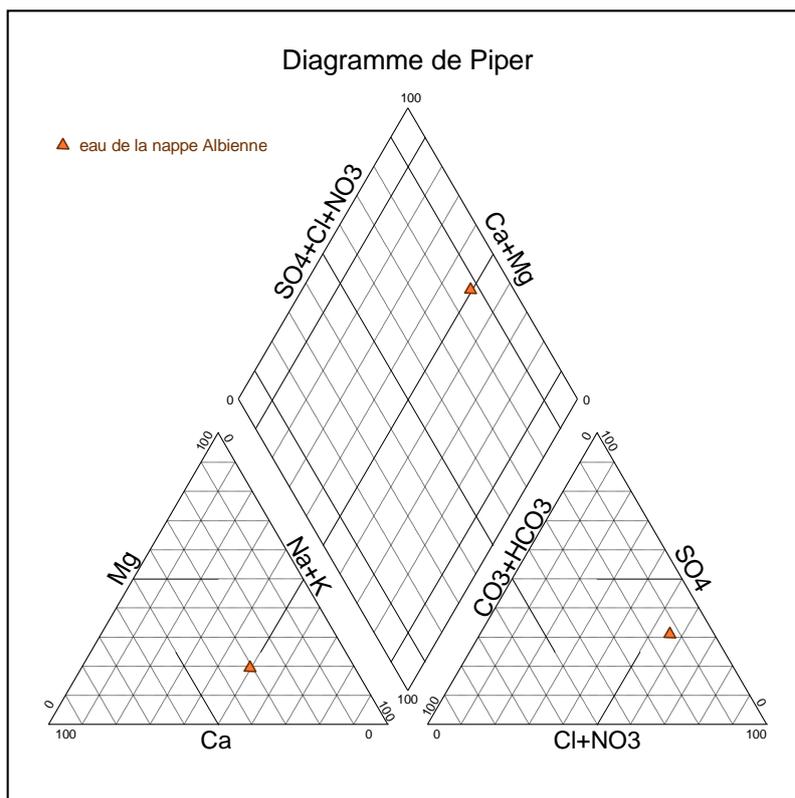


Figure 16. Classification d’eaux d’irrigation étudiée par le diagramme de Piper.

III. Résultats d’analyse du sol

Les résultats d’analyse du sol sont tirés des travaux de Hamim et Mena (2018), Allali et Hati (2018) et Salhi et Bissati (2016), la moyenne des résultats rassemblés est indiqués dans le tableau 4.

Tableau 4. Résultats de l’analyse du sol

Caractéristiques	Valeurs			
Profondeur (cm)	0-15	15-30	30-45	
Densité apparente (g/cm³)	1,3	1,4	1,4	
pH_{eau} 1/5	7,6	7,40	7,7	
CE_{1:5} (dS/m) à 25 °C	0,8	0,7	0,6	
Granulométrie (%)	A	2	3	2
	LF	3	4	3
	LG	6	5	10
	SF	26	27	18
	SG	63	61	67
Classe texturale	sableuse	sableuse	sableuse	

A : Argile ; LF : Limon fin; LG : Limon grossier; SF : Sable fin; SG: Sable grossier.

IV. caractérisation du sol

IV.1 Granulométrie

Les résultats de l'analyse granulométrique synthétisés dans le tableau 4 montrent que la classe texturale prédominante du sol analysé est la texture sableuse (sable fin et grossier), avec un pourcentage plus que 85%.

En effet, la région de Hassi Ben Abdallah est entourée de dunes de sables dont l'effet du vent provoque l'accumulation de sable depuis plusieurs années, ce qui explique la forte dominance de la texture sableuse.

IV.2 Salinité (CE)

La conductivité électrique ($CE_{1:5}$) moyenne du sol s'approche à 0,7 dS/m. D'après l'échelle de salinité donnée par Aubert (1978) (Annexe 2), le sol de la parcelle étudié est peu salé ($0,6 < CE < 1,2$ dS/m).

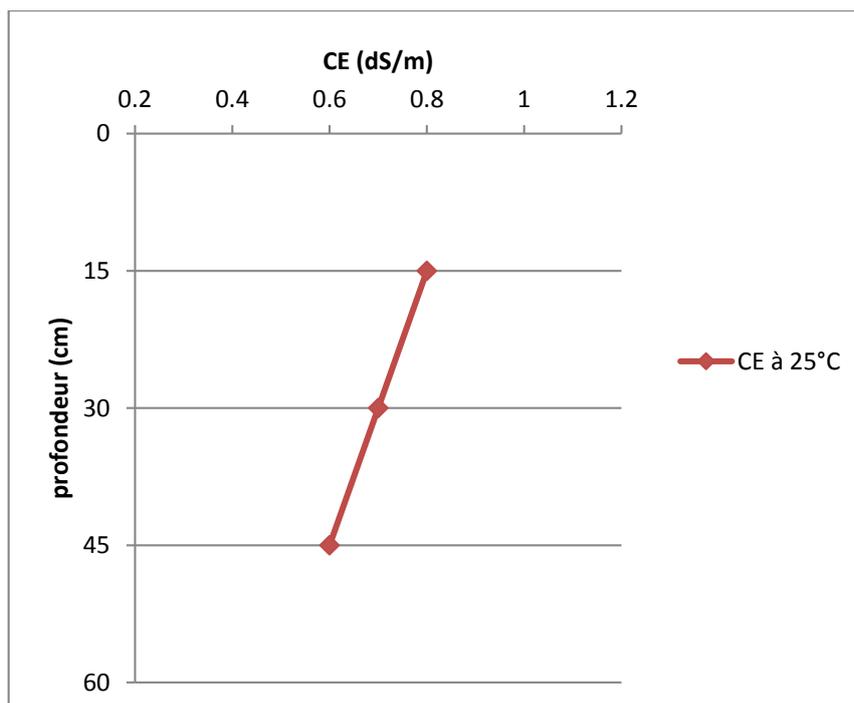


Figure 17. Profil salin de sols étudié.

Le profil salin obtenu (figure 17), montre que le profil du sol étudié est presque homogène, mais montre tout de même une valeur de la CE plus élevée dans la couche superficielle.

Les accumulations salines de la couche de surface ne sont pas expliquées par l'effet de la nappe phréatique, car étant assez profonde dans notre cas, mais par la forte évapotranspiration auquel est exposée la région de Hassi Ben Abdallah.

V. Modélisation Hydrus 1D

Pour la modélisation de l'évolution journalière de la salinité du sol irrigué par les eaux de la nappe d'Albien ($CE_w = 2,5 \text{ mS.cm}^{-1}$), Nous avons choisi trois nœuds d'observations N8, N20 et N40, correspondant respectivement à la couche de surface du sol, la zone racinaire du blé située à 20cm de profondeur, et la zone sous-racinaire à une profondeur de 40 cm.

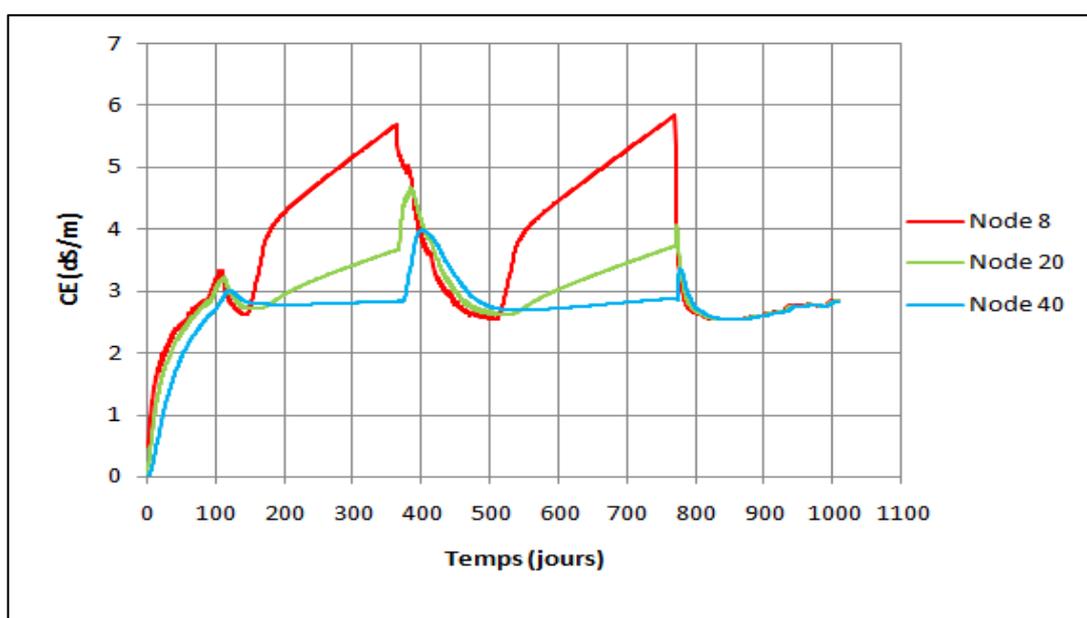


Figure 18. Simulation de l'évolution journalière de la salinité du sol de la parcelle étudiée pour la période 2016-2019.

Les simulations de la conductivité électrique réalisées par HYDRUS-1D (Figure 18), peuvent être divisées en trois grands intervalles du temps.

L'intervalle I, allant du premier jour au 140^{ème} jour. Les trois nœuds d'observation, présentent la même allure de variations de la salinité. Cette t augmentation atteint 3,3 dS/m pour diminuer ensuite à environ 2,8 dS/m pour le nœud N40). Ces variations sont expliquées par l'irrigation périodique du Quinoa où la salinité de l'eau influence négativement le sol par l'augmentation de sa CE.

L'intervalle II, compris entre le 140^{ème} jour et le jour 770, la variation au niveau N8 de la couche superficielle est donnée sur trois sous-intervalles. La variation enregistrée

du jour 140 au jour 360 est une augmentation de la conductivité électrique de 2,7 à 5,7 dS/m. Cette salinisation est due à une période de jachère où le sol n'a pas reçu d'eau, ce qui a provoqué une concentration des sels en surface et par conséquent l'augmentation de la conductivité électrique de ce sol.

Le deuxième sous-intervalle allant du jour 360 au jour 510 est caractérisé par une diminution de la CE de 5,7 à 2,6 dS/m. Cette diminution est expliquée par le retour à l'irrigation périodique du Quinoa avec une quantité d'eau de 0,8 cm/jour.

Dans le dernier sous-intervalle compris entre le 510^{ème} jour au 770^{ème} jour, la CE augmente de 2,6 à 5,9 dS/m à cause d'une deuxième période de jachère où nous avons atteint la valeur la plus élevée de CE simulée (5,9 dS/m).

Pour le nœud de la zone racinaire N20, la variation est aussi donnée sur trois sous-intervalles de temps. Le premier du jour 140 au jour 380 une augmentation de la CE de 2,7 à 4,7 dS/m. Le sous-intervalle deux a connu une diminution de la conductivité électrique du sol de 4,7 à 2,6 dS/m, et le dernier sous-intervalle a duré du jour 530 au jour 770 avec une augmentation de 1,5 dS/m de sa conductivité électrique. Ces variations sont liées à la succession des périodes de jachère et les irrigations périodiques du Quinoa.

Le nœud N40, représentant la couche sous les racines représente une variation de salinité donnée sur trois sous-intervalles du temps. Le premier du jour 140 au jour 400, où la CE était stable entre 2,8 et 2,9 dS/m, puis elle a connu une augmentation de 2,9 à 4 dS/m. Le deuxième sous-intervalle a duré du jour 400 au jour 500 où la diminution de la conductivité est estimé par 1,2 dS/m, pour revenir à la stabilisation dans le troisième sous-intervalle (du jour 500 au jour 770) entre 2,8 et 2,9 dS/m, et enfin augmente de 2,9 à 3,4 dS/m. Les deux périodes de stabilisation de la conductivité électrique sont expliquées par les deux périodes de jachère auxquelles le sol a été exposé.

L'intervalle III, du jour 770 au jour 1008, les variations de la conductivité électrique des trois nœuds d'observation (N8, N20, N40) ont la même allure de diminution de 5,9 à 2,6 dS/m pour le nœud de la couche de la surface (N8), de 4,1 à 2,6 dS/m pour le nœud de la couche racinaire (N20), et de 3,4 à 2,6 dS/m pour le nœud (N40) de la couche sous-racinaire. Cette diminution est liée à l'irrigation journalière du Blé par une quantité d'eau de 0,8 cm/jour ce qui permet de lixivier les sels vers le profond. Et la même allure

d'augmentation de 2,6 à 2,9 dS/m pour tous les nœuds. Cette légère augmentation en CE est liée probablement aux conditions climatiques.

VI. Synthèse de travaux précédents

Les travaux de Khemissi et Kemassi (2018), sur la modélisation Hydrus 1D de la salinité sous blé dans la station de l'entreprise des industries alimentaires céréalières et dérivées (E.R.I.A.D Sétif) à Hassi Ben Abdallah, donnent les résultats de simulation de la salinité du sol indiqués dans la figure 19.

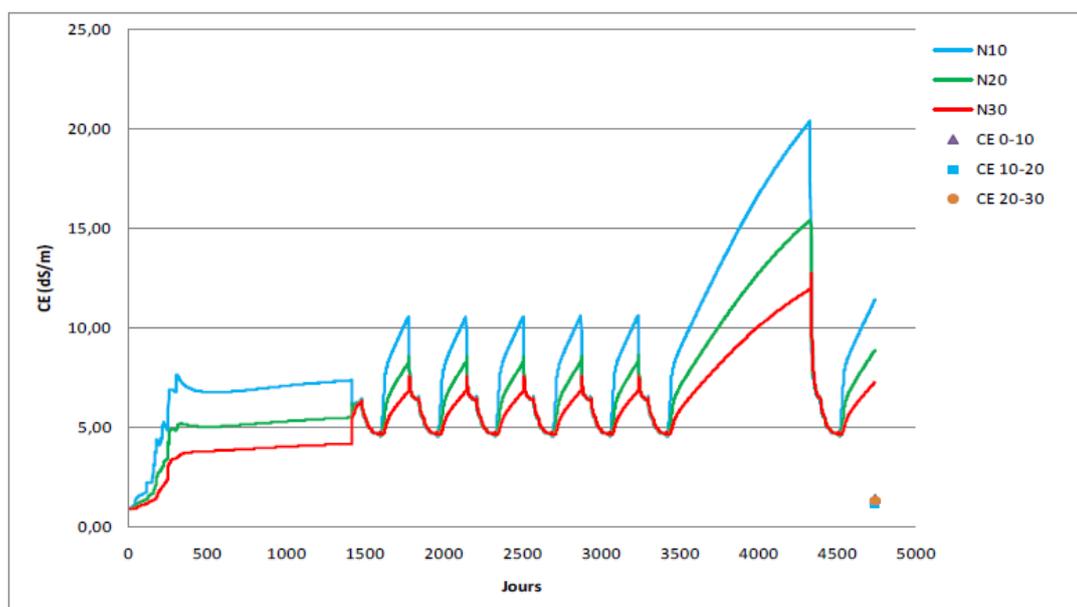


Figure 19. Résultats de simulation de la salinité du sol obtenus par Khemissi et Kemassi (2018).

Malgré que la différence dans la période de la modélisation, les résultats obtenus par Khemissi et Kemassi (2018) étaient très similaires à ceux que nous avons obtenus, et cela est dû à tant de raisons.

Nous avons réalisé notre étude dans la même région (Hassi Ben Abdallah) avec les mêmes conditions édapho-climatiques, qui représentent un facteur essentielle dans la modélisation et nous avons utilisé des quantités d'eau d'irrigation similaires (0,8 cm/jour), avec des périodes de jachère.

La différence des valeurs de CE simulées par Khemissi et Kemassi (2018) et celles simulées dans notre travail, réside dans la qualité des eaux d'irrigation. En effet, les simulations de 2018 (Khemissi et Kemassi, 2018) sont réalisées en utilisant les eaux de Miopiocène à une CE_w de 4,9 $mS.cm^{-1}$, alors que nos données sont obtenues avec

l'utilisation des eaux de l'Albien ayant une CE_w de $2,5 \text{ mS.cm}^{-1}$. C'est cette différence qui montre parfaitement, que Hydrus 1D est capable de détecter un effet de la qualité des eaux d'irrigation.

Conclusion générale

Conclusion générale

A travers le monde, de nombreuses terres irriguées sont menacées par la salinisation qui frappe plus durement les régions arides et semi-aride, où l'accumulation de sels dans le sol abaisse les rendements et détériore les terres de façon irrémédiable. De ce fait la modélisation numérique des variations de la salinité du sol s'est imposée comme une solution alternative aux études à long terme.

L'intérêt de cette étude est l'utilisation de HYDRUS-1D pour la modélisation de l'effet d'irrigation avec les eaux salées sur les variations de la salinité du sol en milieux arides, plus particulièrement dans la région de Ouargla, au long d'une période de 1008 jours (de Octobre 2016 à Juillet 2019).

Notre étude a été réalisée dans une parcelle irriguée avec des quantités variables de 0,8 et de 1,2 cm/jour, par les eaux de l'Albien, à l'Institut Technique de Développement d'Agronomie Saharienne (ITDAS) de Hassi Ben Abdallah (Ouargla). Une série d'analyses physiques, physico-chimiques et chimiques de l'eau et du sol était programmée après l'échantillonnage, pour l'évaluation de leurs qualités et la réalisation de la modélisation numérique. Cependant, à cause de la situation sanitaire actuelle (Covid-19), l'expérimentation a été annulée et nous n'avons utilisé les résultats d'études antérieures.

Les eaux d'irrigation ($CE = 2,5 \text{ mS.cm}^{-1}$, $SAR = 7,6$) ont un faciès chimique chloruré sodique. Selon Durand (1983), elles sont considérées comme des eaux à très forte salinité.

Les résultats de la granulométrie du sol de la parcelle étudiée ont montré une dominance de la texture sableuse (>85%), et ceux de la salinité du sol nous ont permis de le classer comme un sol peu salé, selon la classification de Aubert (1978).

Les résultats de la modélisation HYDRUS-1D de l'évolution spatiale et temporelle de la salinité du sol effectuée par l'irrigation avec ces eaux salées, montrent que les quantités d'irrigation appliquées dans le sol dans les conditions édapho-climatiques actuelles, peuvent maximiser la salinité pour atteindre facilement la valeur 5,9 dS/m dans la couche superficielle du sol, et cela peut causer des problèmes sérieux au niveau du sol et de la culture, surtout lorsqu'on sait que la parcelle est destinée à la céréaliculture qui est généralement sensible à la salinité.

Par conséquent, nous recommandons de sélectionner soigneusement l'eau d'irrigation en fonction de sa salinité ou au moins de contrôler les quantités d'irrigation et de surveiller son effet sur la salinité du sol.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Abdou, S., Boumaza, M., 2004. Investigation sur l'intégration climatique dans la maison traditionnelle du Ksar de Ouargla. Sciences et technologie, vol. 21, pp 121-129.
- Allali, A., Hati, N., 2018. Étude comparative de l'utilisation de deux systèmes d'irrigation ; l'aspersion et le goutte à goutte sur l'humidité du sol et la production de Quinoa dans la région de Hassi Ben Abdallah. Mém. Master. Université Kasdi Merbah Ouargla, 90p.
- Aubert, G., 1978. Méthodes d'analyses des sols, Marseille, Editions CRDP, 360 p.
- Bekkari, NE., Halis, Y., Benhaddya, ML., Saker, ML., 2017. Étude de l'impact des activités agricoles sur l'environnement Oasien de la région de l'Oued Righ. Journal algérien des régions arides, N°14, pp 49-59.
- Belksier, M.S., Chaab, S., Abour, F., 2016. Qualité hydro chimique des eaux de la nappe superficielle dans la région de l'Oued Righ et évaluation de sa vulnérabilité à la pollution. Sciences et technologie, vol. 32, pp 42-57.
- Benameur, S.H., 2018. Utilisation de *Pharoscymnus ovoideus* et *Pharoscymnus numidicus* (Coleoptera-Coccinellidae) dans une tentative de lutte biologique contre *Parlatoria blanchardi* Targ. (Homoptera-Diaspididae) dans les palmeraies à Ouargla (Sud-est algérien). Thèse Doc. Université Kasdi Merbah-Ouargla, 162p.
- Berkal, I., 2016. Dynamique spatiotemporelle de la salinité de sols sableux irrigués en milieu aride. Application à une palmeraie de la cuvette de Ouargla en Algérie. Thèse Doc. École nationale supérieure agronomique (ENSA, Alger), 170p.
- Bonnard, Gardel, 2004. The valley of Ouargla. Studies remediation of wastewater, rainwater and irrigation. Additional measures to fight against the rising water table. Investigations, pumping tests and water budgets, mapping piezometric diagnosis of water catchment areas and measures for rehabilitation, protection of water resources. Mission II, Final Report, 110 p.
- Bouselsal, B., 2017. Groundwater quality in arid regions: the case of Hassi Messaoud region (SE Algeria). Journal of Fundamental and Applied Sciences, vol. 9 (1), pp 528-541.

- Brunetti, G., Šimůnek, J., Boga, H., Baatz, R., Huisman, J.A., Dahlke, H., Vereecken, H., 2019. On the information content of cosmic-ray neutron data in the inverse estimation of soil hydraulic properties. *Vadose zone journal*, vol. 18, pp 1-24.
- Castany, G., 1983. *Principes et méthodes de l'hydrogéologie*. Ed. DUNOD, Paris, pp 33 -228.
- Daoud, Y., Halitim, A., 1994. Irrigation et salinisation au Sahara algérien. *Sécheresse*, vol. 5 (3), pp 151-160.
- Dubief, J., 1963. *Le climat du sahara*. Mém. Inst. Rech. Sahara. Alger. Tome I. 298p.
- Durand, J., 1983. *Les sols irrigables: Étude pédologique*, presses universitaires de France, Paris, 339p.
- Faye, B., Tine, D., Dethié, N., Cheikh, D., Faye, G., Ndiaye, A., 2019. Evolution des terres salées dans le nord de l'estuaire du Saloum (Sénégal). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 25 (2), pp 81-90.
- Halilat, M.T., 1993. *Etude de la fertilisation azoté et potassique sur le blé dure (variété Aldura) on zones sahariennes (région de Ouargla)*. Mémoire. Magister. Université Hadj Lakhdar Batna. 130p.
- Hamim, A., Mena, H., 2018. *L'effet de deux systèmes d'irrigation aspersion et goutte à goutte sur l'évolution du profil salin du sol le cas de Hassi Ben Abdallah*. Mém. Master. Université Kasdi Merbah Ouargla, 63p.
- Hansson, K., Lundin, L., Šimůnek, J., 2005. Modeling water flow patterns in flexible pavements. *Transportation research record*, vol. 1936, pp 133-141.
- Hébert, S., 1997. *Développement d'un indice de la qualité bactériologique et physicochimique de l'eau pour les rivières de Québec*, Ministère de l'environnement et de la faune, Québec, 20p.
- Houari, I.M, Nezli, I.E, Bouregaa, S. 2014. Description géologique et géométrique des formations aquifères de la cuvette de Ouargla. *Algerian journal of arid environment*, vol. 4 (1), pp 12-19.
- Idder, T., 2007. *Le problème des excédents hydriques à Ouargla, situation actuelle et perspectives d'amélioration*. *Sécheresse*, vol. 18 (3), pp 161-167.
- Idder, T., Idder, A., Tankari Dan-Badjo, A., Benzida, A., Merabet, S., Negais, H. Serraye, A., 2014. *Les oasis du Sahara algérien, entre excédents hydriques et salinité. L'exemple de l'oasis de Ouargla*. *Revue des sciences de l'eau*, vol. 27 (2), pp 155–164.

- Jha, R.K., Sahoo, B., Panda, R.K., 2017. Modeling the water and nitrogen transports in a soil–paddy–atmosphere system using HYDRUS-1D and lysimeter experiment. *Paddy and water environment*, vol. 15 (4), pp 831-846.
- Kanzari, S., Nouna, B.B., Mariem, S.B. and Rezig, M., 2018. Hydrus-1D model calibration and validation in various field conditions for simulating water flow and salts transport in a semi-arid region of Tunisia. *Sustainable Environment Research*, vol. 28(6), pp 350-356.
- Khemissi, C., Kemassi, C., 2018. Effet du système et des eaux d’irrigation sur la salinisation des sols en milieu Saharien le cas d’une exploitation agricole à Hassi Ben Abdallah au Sud-Est Algérien. *Mém. Master. Université Kasdi Merbah Ouargla*, 40p.
- Koull, K., Kherraze, M.H., Lakhdari, K., Benzaoui, T., Helimi, S., Laouissat, M.S., Kherfi, Y., Bougafla, A., Mimouni, F. Lakhdari, K. Mezrag, M., Benazzouz, M T., 2013. Eaux d’irrigation et salinisation des sols des périmètres irrigués dans la vallée de l’Oued Righ. *Journal Algérien des Régions Arides*, pp 97-102.
- Medjani, F., 2016. Variation des paramètres physicochimiques des eaux des sebkhas de la région Ouargla-Touggourt (sud-est algérien). *Thèse Doc., Université Badji Mokhtar-Annaba*, 144p.
- Messen, N., Gaouar, A., Hamdi-Aïssa, B., Hacini, M., Youcef-Ettoumi, F., 2014. Etude du climat paléolithique dans un bassin sédimentaire du sud algérien: sélection du site. *Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les Régions Arides. Biskra*, pp 203-210.
- Nassirou, M., 2017. Evaluation in situ et en conditions contrôlées de la phytodésalinisation des Vertisols irrigués. Cas d’étude du périmètre rizicole de Kollo (Niger) dans la vallée du fleuve Niger. *Thèse Doc. Université Abdou Moumouni-Niamey (Niger)*, 236p.
- Niang, S., Diop, T., Faye, A., 2017. Dégradation chimique des sols dans les systèmes de production du Sénégal: analyse des cas du Haut Saloum, du delta du Sénégal et du Gandiolais. *Revue de Géographie du Laboratoire Leïdi, Université Gaston Berger, Saint Louis (Sénégal)*, pp 246-266.
- Noshadi, M., Fahandej-Saadi, S. Sepaskhah, A.R., 2020. Application of SALTMED and HYDRUS-1D models for simulations of soil water content and soil salinity in controlled groundwater depth. *Journal of Arid Land*, vol. 12, pp 447–461.

- Nunez, M., Finkbeiner, M., 2020. A regionalised life cycle assessment model to globally assess the environmental implications of soil salinization in irrigated agriculture. *Environmental science and technology*, vol. 54, pp 3082-3090.
- ONM, 2018. Données climatiques de la région de Ouargla de la période 2008-2018. Ouargla (Algérie).
- Ozenda, P., 1983. Flore du Sahara. Ed. Centre national de la recherche scientifique (C.N.R.S), Paris, 625 p.
- Ramos, T.B., Simunek, J., Gonçalves, M.C., Martins, J.C., Prazeres, A., Castanheira, N.L., Pereira, L.S., 2011. Field evaluation of a multicomponent solute transport model in soils irrigated with saline waters. *Journal of hydrology*, vol. 07, pp 447-461.
- Remini, B., 2019. La foggara et le Ghout (Algérie) : quand le forage sonne le déclin. *Larhyss journal*, N°39, pp 275-297.
- Rouvillois-Brigol, M., 1975. Le pays de Ouargla (Sahara algérien) : variations et organisation d'un espace rural en milieu désertique. Thèse Doc., Université de Paris-Sorbonne, 389 p.
- Saifadeen, A., Gladnyeva, R., 2012. Modeling of solute transport in the unsaturated zone using HYDRUS-1D. Mem. Master. Lund university, Sweden, 74p.
- Salhi, A., 2017. Transformations spatiales et dynamiques socio-environnementales de l'oasis de Ouargla (Sahara algérien). Une analyse des perspectives de développement. Thèse Doc., Université Aix-Marseille, pp 49-51.
- Salhi, S. et Bissati, S., 2016. Contribution à l'étude de la pollution des sols agricoles par les nitrates dans la région de Hassi Ben Abdallah (exploitation de l'ITDAS). *Revue des BioRessources*, vol. 6 (2), pp 25-34.
- Šejna, M., Šimunek, J., Van Genuchten, M., Th., 2018. The HYDRUS software package for simulating the two- and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated porous media. User manual. 21p.
- Simunek, J., Huang, K., Van Genuchten, M.Th. 1998. The HYDRUS code for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media. Version 6.0, Research Report No. 144, California: U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, 164p.
- Šimunek, J., Köhne, J. M., Kodešová, R., Šejna, M., 2008a. Simulating nonequilibrium movement of water, solutes and particles using HYDRUS: A review of recent applications. *Soil and water research*, pp 42-51.

- Šimůnek, J., Van Genuchten, M, Th., Šejna, M., 2008b. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD Soil ware Packages and Related Codes. Vadose zone journal, vol. 7 (2), pp 587-600.
- Šimůnek, J., Van Genuchten, M.T., 2008. Modeling nonequilibrium flow and transport processes using HYDRUS. Vadose Zone Journal, vol. 7 (2), pp 782-797.
- Šimůnek, J., Van Genuchten, M., Th., Šejna, M., 2012. Hydrus: model use, calibration, and validation. Transactions of the asabe, vol. 55 (4), pp 1261-1274.
- Stumpp, C., Stichler, W., Kandolf, M. and Šimůnek, J, 2012. Effects of land cover and fertilization method on water flow and solute transport in five lysimeters: a long-term study using stable water isotopes. Vadose zone journal, vol 11, pp 258-271.
- Tyler, S., 2004. HYDRUS-2D Software Review. Southwest Hydrology. 37p.
- UNESCO., 1972. Etude des ressources en eau du Sahara Septentrional. In: UNESCO (Ed.), Conclusion et recommandation UNESCO, Algérie, Tunisie, p 116.
- Yu, C., Zheng, C., 2010. HYDRUS: Software for flow and transport modeling in variably saturated media. Ground water, vol. 48 (6), pp 787-791.

Annexes

Annexes:

1- Classement des eaux en fonction de leurs salinités (Durand, 1983) :

Classe	CE à 25 °C (dS/m)	Appréciation	Utilisation
C1	<0,25	Eaux non salines	Utilisables pour l'irrigation de la plupart des cultures sur la plupart des terrains avec peu de chances d'apparition de la salinité dans le sol.
C2	0,25 à 0,75	Eaux à salinité moyenne	Utilisables avec un léger lessivage. Les plantes modérément tolérantes aux sels peuvent pousser dans la plupart des cas sans pratique spéciale de contrôle de la salinité
C3	0,75 à 2,25	Eaux à forte salinité	Inutilisables pour les sols à drainage restreint. même avec un bon drainage, des pratiques spéciales de contrôle de la salinité peuvent être nécessaires et les plantes ayant une bonne tolérance aux sels peuvent seules être cultivées.
C4	2,25 à 5	Eaux à très forte salinité	Inutilisables normalement pour l'irrigation exceptionnellement, elles peuvent être utilisées sur des sols très perméables avec un bon drainage et une dose d'irrigation en excès

			pour assurer un fort lessivage du sol. Les plantes cultivées devront être très tolérantes aux sels.
C5	> 5	Eaux à salinité excessive	Inutilisables sauf sur sable drainé et pour des cultures très tolérantes aux sels.

2- Echelle de la conductivité électrique d'extrait 1/5 du sol (Aubert, 1978) :

CE à 25°C (dS/m)	Sol
<0,6	Non salé
0,6 à 1,2	Peu salé
1,2 à 2,4	Salé
2,4 à 6	Très salé
>6	Extrêmement salé