

République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Civil et d'Hydraulique
Ref :.....



جامعة محمد خيضر بiskra
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم: الهندسة المدنية والري
المرجع:.....

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de
Doctorat LMD

Spécialité : **Hydraulique**

Option : **Sciences Hydrauliques**

Thème

***Prévision de la salinité de la couche active des sols et
optimisation du régime d'irrigation à caractère
lessivant des terres mise en valeurs dans le sud-est
Saharien : cas de Biskra et l'Oued Righ***

Présenté par : **HARKATI Djihad**

Soutenu le : 20/12/ 2018 Devant le jury composé de

| | | | |
|-----------------|------------|---------------|-------------------------|
| MASMOUDI Ali | MCA | Président | Université de Biskra |
| OUAMANE Ahmed | Professeur | Rapporteur | Université de Biskra |
| MEZA Nouredine | MCA | Co-Rapporteur | Université d'OE Bouaghi |
| LABADI Abdallah | MCA | Examineur | Université de Biskra |

Avant-propos

Je tiens à remercier tous ceux et toutes celles sans qui cette thèse n'aurait pu voir le jour, avancer, rebondir et finalement aboutir :

Dr. Meza Noureddine tout d'abord, personnage central de cette histoire, qui a suivi mon travail pendant ces longues années et qui m'a toujours soutenue.

Je le remercie pour son encadrement bien sûr, mais aussi et surtout pour ses qualités humaines.

Pr. Ouamane Ahmed pour son encadrement, sa disponibilité, sa patience et sa gentillesse qui m'ont amené à réaliser ce travail.

Pr. Masmoudi Ali et Dr. Labadi Abdallah pour avoir accepté les rôles de président et examinateur de ce travail.

M Ghennam Wassim, concepteur du logiciel « salinité 4 » et de tous les logiciels expérimentaux, pour son efficacité, mais surtout pour son amitié. Tout le personnel technique et administratif de l'ONID Djamaa avec une mention spéciale pour M Khaldi Adel.

J'adresse mes vifs remerciements à M Berekbia Mohamed, M Gheriani Sofiane de l'INRA sidi Mahdi (Touggourt).

Mes chaleureux remerciements vont aussi à M Samir Merdaci de l'ITDAS Ain Ben Noui Biskra.

Je suis très reconnaissant aux efforts consentis par tout le personnel de l'ANRH Constantine et Alger notamment Mme Belahreche Mounira pour les innombrables analyses chimiques.

A tous ceux qui m'ont accompagnée pendant ces années, même pour un bout de chemin.

A tout ma famille.

J'ai gardé le meilleur pour la fin. Merci à celui qui a toujours été présents pour me relever lorsque je tombais, Merci à mes parents.

الملخص

في المناطق الجافة ، كما هو الحال في الجنوب الشرقي بالصحراء الجزائرية ، تعاني الأراضي المستصلحة من مشكلة رئيسية تتمثل في الملوحة الثانوية للتربة ، بسبب صعود المياه الجوفية إلى السطح و التي مياها مالحة ، عدم وجود نظام صرف للمياه ملائم وإدارة سيئة للموارد المائية.

يهدف هذا العمل إلى تقييم الوضع المائي الزراعي لإطار الدراسة ، وذلك لعمل تنبؤات للنظام المائي الملحي لطبقة التربة النشطة في منطقة وادي ريغ، أي تقييم كمية مياه الغسيل للحفاظ على التركيز المسموح به. لهذا ، التجأنا إلى نظرية نقل الأملاح القابلة للذوبان في الوسط المسامي الذي يفرض علينا تحديد العوامل التجريبية الهيدروديناميكية (D^* ، λ ، v) و ثابت معدل الذوبان للأملاح الصلبة (γ).

إن تحليل نتائج العمل المنجز في التنبؤ بديناميكية ملوحة التربة مع الموارد المائية التي يتم تعبئتها حالياً للري من المياه الجوفية: الـ CI و CT بتركيز للكلور يقدر بـ 0.255 غ/ل و 1.25 غ/ل على التوالي، ومع وجود كميات مختلفة من جرعات الغسل مع استعمال مصرف مياه مناسب، يظهر أنه على الرغم من وجود كميات كبيرة من المياه الإضافية المستخدمة في كل جرعة من الري، فإن تحلية قسم التربة في منطقة التهوية غير مكتمل مع نهاية 4 سنوات من الري. ويرجع ذلك إلى التركيز العالي جداً للكلور في مياه الري.

ومع ذلك ، فإن إمكانية تعبئة كمية إضافية من المياه من CI ، والتي لا توصي بها الدراسة المعدة حول نظام طبقات المياه الجوفية في شمال الصحراء ، والتي يكون تركيز كلوريتها منخفضاً إلى حد ما ، تسمح الغسيل الكامل لمنطقة التهوية بعد 4 سنوات من الري. ونتيجة لذلك ، لا يمكن تحقيق تحلية كاملة لمتر من التربة إلا بتركيز من مياه الري يساوي 0.35 غ/لتر. خلافاً لذلك ، (بالحفاظ على الموارد المائية المستخدمة حالياً) ، نجد أنفسنا ملزمون بقبول الحد الأدنى للتركيز الذي تم الحصول عليه والاستجابة الزراعية المقابلة في ظل هذه الظروف.

يمكن الاستنتاج أن فكرة التركيز المقبول في وادي ريغ تعتمد على ظروف الري وتختلف من واحة إلى أخرى.

الكلمات المفتاحية: تربة، ملوحة، مناطق الجافة، نظام الري بخاصية الغسل.

Résumé

Dans les zones arides, comme dans le cas de la vallée de l'Oued Righ en Algérie, les terres mises en valeur subissent un problème majeur de salinité secondaire des sols, due à la présence d'une nappe phréatique peu profonde dont les eaux sont salées, à l'absence d'un système de drainage adéquat et à la mauvaise gestion de la ressource en eau.

Ce travail a pour objectif d'évaluer l'état hydroagricole du cadre de l'étude et de faire des prévisions du régime hydro-salin de la couche active des sols dans la vallée de l'Oued Righ, c'est à dire l'évaluation de la quantité d'eau de lessivage pour le maintien d'une concentration admissible. Pour cela, on a recours à la théorie de transfert des sels solubles dans les milieux poreux ce qui nous implique a déterminé des paramètres hydrodynamique expérimentaux (D^* , λ , ν) et de la constante de la vitesse de dissolution des cristaux de sel (γ).

L'analyse des résultats des travaux effectués sur la prévision de la dynamique de la salinité des sols dans la zone d'aération, avec les ressources en eau actuellement mobilisées pour l'irrigation à partir des deux aquifères: le C I avec une concentration en chlore de 0.255 g/l et le C T avec une concentration en chlore égale à 1.25 g/l et avec différentes doses de lessivage sur fond de drainage adéquat montre que malgré les grandes quantités d'eaux supplémentaires utilisées à chaque dose d'irrigation, la désalinisation de la tranche de sol de la zone d'aération n'est pas complète au terme des 4 ans d'irrigation. Cela est dû à la concentration très élevé en Cl^- de l'eau d'irrigation.

Néanmoins, la possibilité d'une mobilisation d'un volume d'eau supplémentaire à partir du Continentale Intercalaire, qui n'est pas recommandé par l'étude de SASS, et dont la concentration en Cl^- est assez faible, permet un lessivage complet de la zone d'aération au terme des 4 ans d'irrigation. De ce fait, une désalinisation complète du mètre de sol ne peut être atteinte qu'avec une concentration des eaux d'irrigation égale à 0.35 g/l. Dans le cas contraire, (en gardant la ressource en eau utilisé actuellement) on est dans l'obligation d'accepter la concentration minimale obtenue ainsi que la réponse agricole correspondante dans ces conditions. On peut conclure que la notion de la concentration acceptable dans la vallée de l'Oued Righ est fonction des conditions d'irrigation et est variable d'une oasis à une autre.

Mots clés : Sol; Salinité ; zone aride ; régime d'irrigation à caractère lessivant ;

Abstract

In arid areas, as in the case of the southeast of the Algerian Sahara, Reclaimed lands suffer from a major problem of secondary soil salinity, due to the presence of a shallow water table whose waters are salty, lack of an adequate drainage system and bad water resources management.

This work aims to evaluate the study framework hydroagricultural status, to make predictions of the hydro-saline regime of the active layer of soils in the Oued Righ valley, that is to say, the evaluation of the amount of leaching water for the maintenance of a permissible concentration. For this, we use the theory of transfer of soluble salts in porous media which involves us determined experimental hydrodynamic parameters (D^* , λ , ν) and the constant dissolution rate of the crystal salts (γ).

The analysis of the results of the work done on the prediction of soil salinity dynamics in the aeration zone, with the water resources currently mobilized for irrigation from the two aquifers: the CI with a chlorine concentration of 0.255 g/l and the CT with a chlorine concentration equal to 1.25 g/l and with different leaching doses on an adequate drainage background shows that despite the large quantities of additional water used at each irrigation dose, the desalination of the soil section of the aeration zone is not complete after 4 years of irrigation. This is due to the very high Cl⁻ concentration of irrigation water.

Nevertheless, the possibility of mobilizing an additional volume of water from the Continental Intercalaire, which is not recommended by the SASS study, and whose Cl⁻ concentration is rather low, allows a complete leaching of the aeration zone after 4 years of irrigation. As a result, a complete desalination of the soil meter can only be achieved with a concentration of irrigation water equal to 0.35 g/l. On the other hand, (keeping the water resource currently used), we must accept the minimum concentration obtained and the corresponding agricultural response under these conditions. It can be concluded that the notion of acceptable concentration in the Oued Righ Valley is a function of the irrigation conditions and varies from one oasis to another.

Key words: Soil; Salinity; Arid area; Leaching irrigation regime.

Table des matières

| | |
|------------------------------|------|
| Avant-propos..... | i |
| المخلص..... | ii |
| Résumé | iii |
| Abstract..... | iv |
| Table des matières | v |
| Liste des figures | ix |
| Liste des tableaux | xi |
| Liste des abréviations | xiii |
| Introduction générale..... | 1 |

Chapitre I: Caractéristiques du cadre de l'étude et évaluation de l'état hydroagricole

| | |
|---|----|
| I.1 Introduction..... | 4 |
| I.2 Présentation des régions d'étude..... | 4 |
| I.3 Caractéristique du cadre de l'étude | 8 |
| I.3.1 Cadre climatiques..... | 8 |
| I.3.1.1 Les précipitations | 8 |
| I.3.1.2 Humidité relative de l'air | 8 |
| I.3.1.3 Températures..... | 8 |
| I.3.1.4 L'évaporation..... | 9 |
| I.3.1.5 L'évapotranspiration potentielle (ETP)..... | 9 |
| I.3.1.6 Les vents | 12 |
| I.3.2 Cadre hydrogéologique..... | 14 |
| I.3.2.1 Le continental intercalaire (nappe de l'Albien) : | 14 |
| I.3.2.2 Le complexe terminal | 14 |
| I.3.2.3 La nappe phréatique | 16 |
| I.3.2.4 Etat actuel des ressources en eau souterraines | 16 |
| I.3.2.5 Etat actuel d'exploitation des forages | 16 |
| I.3.3 Cadre agro-pédologique..... | 18 |
| I.3.3.1 Activités agricoles | 18 |
| I.3.3.2 L'irrigation..... | 18 |
| I.3.3.3 Qualité d'eau d'irrigation | 19 |

| | | |
|---------|---|----|
| I.3.3.4 | Drainage..... | 19 |
| I.3.3.5 | Aspect rendement:..... | 20 |
| I.3.4 | Cadre Pédologique | 22 |
| I.3.4.1 | Texture..... | 22 |
| I.3.4.2 | La densité..... | 22 |
| I.3.4.3 | La porosité | 23 |
| I.3.4.4 | Le complexe absorbant (Capacité d'échange cationique)..... | 23 |
| I.3.5 | Choix de la zone d'étude | 24 |
| I.4 | Evaluation de l'état hydro-agricole des terres et étude de la balance hydrique dans les limites du périmètre..... | 25 |
| I.5 | Conclusion | 35 |

Chapitre II: Analyse Bibliographique

| | | |
|----------|---|----|
| II.1 | Introduction..... | 37 |
| II.2 | Lessivage et régime d'irrigation à caractère lessivant..... | 37 |
| II.3 | Régime de lessivage | 38 |
| II.4 | Détermination de la dose de lessivage..... | 38 |
| II.5 | Méthodes existantes pour la détermination des doses de lessivage | 39 |
| II.5.1 | Formules empiriques et semi-empiriques..... | 39 |
| II.5.1.1 | Autres modèles | 41 |
| II.5.2 | Formules en fonction de l'équation de mouvement des sels..... | 43 |
| II.5.2.1 | L'équation générale de mouvement des sels dans le sol | 43 |
| II.5.2.2 | Relation entre la dispersion et la vitesse d'eau dans les pores | 47 |
| II.5.2.3 | Résolution de l'équation de convection-dispersion | 52 |
| II.5.2.4 | Détermination de la dose de lessivage par des formules analytique | 56 |
| II.6 | Conclusion | 72 |

Chapitre III: Matériels et Méthodes

| | | |
|---------|--|----|
| III.1 | Introduction..... | 74 |
| III.2 | Cadre de la zone d'étude..... | 74 |
| III.3 | Plan d'échantillonnage | 75 |
| III.4 | Analyses de sol et propriétés physico-chimiques..... | 76 |
| III.4.1 | Les analyses physiques | 76 |

| | | |
|------------|--|----|
| III.4.2 | Les analyses chimiques | 77 |
| III.5 | Analyse de l'eau d'irrigation..... | 77 |
| III.6 | Dispositif expérimental | 77 |
| III.7 | Préparation des colonnes de sols | 79 |
| III.7.1 | Mise en condition des colonnes | 79 |
| III.7.2 | Préparation du sol | 79 |
| III.7.3 | Remplissage des colonnes | 79 |
| III.8 | Expérience de lessivage (mode opératoire) | 79 |
| III.9 | Mode expérimental..... | 80 |
| III.9.1 | Méthode d'analyse des données | 80 |
| III.9.2 | Choix d'un ion représentatif pour l'étude | 80 |
| III.9.2.1 | Détermination de coefficient convection-diffusion D^* | 80 |
| III.9.2.2 | Détermination du coefficient de dissolution/cristallisation γ | 80 |
| III.9.3 | Dosage du chlorure | 81 |
| III.9.3.1 | Méthode de dosage de chlorure | 81 |
| III.9.3.2 | La méthode potentiométrique | 81 |
| III.9.3.3 | Le matériel utilisé (caractéristique des électrodes) | 82 |
| III.9.3.4 | Etalonnage de l'électrode sélective d'ion | 84 |
| III.10 | Méthode de détermination des paramètres hydrodynamique du sol | 85 |
| III.10.1 | Modèle choisi | 85 |
| III.10.2 | Méthodes d'ajustements et estimation des paramètres du modèle | 85 |
| III.10.2.1 | Détermination du coefficient D^* | 85 |
| III.10.2.2 | Détermination du coefficient γ | 87 |
| III.10.2.3 | Méthode de prévision de la salinité de la couche active du sol..... | 87 |

Chapitre IV: Résultats et Traitements

| | | |
|--------|---|----|
| IV.1 | Introduction..... | 90 |
| IV.2 | Résultats des essais effectués sur les colonnes de sol (courbe de sortie) | 90 |
| IV.2.1 | Les petites colonnes | 90 |
| | Horizon (0-40 cm) | 90 |
| | Horizon (40-70 cm) | 92 |
| | Horizon (70-100 cm) | 93 |
| IV.2.2 | Les grandes colonnes | 95 |

| | |
|---|-----|
| IV.3 Modélisation mathématique | 97 |
| IV.3.1 Les petites colonnes | 97 |
| IV.3.1.1 Horizon (0-40 cm) | 97 |
| IV.3.1.2 Horizon (40-70 cm) | 99 |
| IV.3.1.3 Horizon (70-100 cm) | 100 |
| IV.3.2 Les grandes colonnes | 103 |
| IV.4 Variation des prévisions de la salinité de la couche active en fonction des régimes d'irrigation et lessivage..... | 104 |
| IV.4.1 Premier cas | 104 |
| IV.4.2 Deuxième cas..... | 108 |
| IV.5 Conclusion | 113 |
| Conclusion générale | 115 |
| Listes des annexes | 119 |
| Annexe I..... | 119 |
| Annexe II | 132 |
| Annexe III | 133 |
| Annexe III.1 Programme pour le calcul du coefficient γ (Problème inverse)..... | 133 |
| Annexe III.2 Programme pour la prévision de la salinité de la couche active en présence des sels en cristaux (Problème directe)..... | 138 |
| Annexe III.3 Programme pour le calcul de la salinité de la couche active de sol en utilisant la formule de L.M Rex | 141 |
| Annexe III.4 Programme pour le calcul de la salinité dans les terres exicive salé $C_0=C_s$ | 145 |
| Annexe IV | 149 |
| Références bibliographique | 153 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure I. 1: Situation géographique de la région de l'Oued R'high et la Wilaya de Biskra | 5 |
| Figure I. 2: Répartition des palmeraies dans la région de Biskra..... | 6 |
| Figure I. 3: Répartition des palmeraies dans la vallée de l'Oued Righ..... | 7 |
| Figure I. 4 Variation des paramètres climatiques moyens mensuels interannuels dans la région de l'Oued Righ | 10 |
| Figure I. 5 Variation des paramètres climatiques moyens mensuels interannuels dans la région de Biskra | 11 |
| Figure I. 6: Rose des vents en fréquence de la vitesse mensuelle moyenne interannuelle du vent (m/s) dans la région de Biskra et l'Oued Righ | 12 |
| Figure I. 7: carte des limites du continentale intercalaire et de complexe terminal | 15 |
| Figure I. 8: Coupe hydrogéologique du Complexe Terminal de la région de l'Oued Righ | 15 |
| Figure I. 9: Evolution du rendement moyen des palmiers dattiers en Algérie durant la période 1990-2011 | 21 |
| Figure I. 10: Position géographique des piézomètres de mesure. | 28 |
| Figure I. 11: Epaisseur moyen de la couche aquifère..... | 29 |
| Figure I. 12: Carte piézométrique de la nappe phréatique, septembre 2010 | 30 |
| Figure I. 13: Périmètre irrigué d'Ourlana | 31 |
| Figure II. 1: Graphique du paramètre de la dispersivité en fonction de la composition granulométrique du sol | 45 |
| Figure II. 2: La relation entre la diffusion moléculaire et la convection | 48 |
| Figure II. 3: Distribution initiale étagée. a) D'après Van Genuchten, 1982 | 53 |
| Figure II. 4: plots calculés à l'aide d'un programme informatique pour la formule $f_2(\tau, \eta)$ en fonction des différentes valeurs de dose de lessivage τ | 66 |
| Figure II. 5: plots calculés à l'aide d'un programme informatique pour la formule $f_2(\tau, \eta)$ en fonction des différentes valeurs de dose de lessivage τ | 68 |
| Figure II. 6: Illustration d'un ajustement d'une courbe d'effluent expérimental (cercle ouvert) avec des courbes théorique d'après un exemple de Van Genuchten | 70 |
| Figure II. 7: Des courbes de percée expérimentales et ajustées pour (a) sable saturé (b) sable insaturé..... | 71 |
| Figure III. 1: Fosse pédologique | 76 |
| Figure III. 2: Schéma du dispositif expérimental..... | 78 |
| Figure III. 3: Multi-paramètres HANNA INSTRUMENT..... | 83 |
| Figure III. 4: Electrode sélective d'ion ELIT | 83 |
| Figure IV. 1 : Courbes de sorties expérimentales de l'essai (a) pour l'horizon (0-40 cm) | 90 |
| Figure IV. 2 : Courbes de sorties expérimentales de l'essai (b) pour l'horizon (0-40 cm) | 91 |

| | |
|--|-----|
| Figure IV. 3 : Courbes de sorties expérimentales de l'essai (c) pour l'horizon (0-40 cm) | 91 |
| Figure IV. 4 : Courbes de sorties expérimentales de l'essai (a) pour l'horizon (40-70 cm) | 92 |
| Figure IV. 5 : Courbes de sorties expérimentales de l'essai (b) pour l'horizon (40-70 cm) | 92 |
| Figure IV. 6 : Courbes de sorties expérimentales de l'essai (a) pour l'horizon (70-100 cm)... | 93 |
| Figure IV. 7 : Courbes de sorties expérimentales de l'essai (b) pour l'horizon (70-100 cm) .. | 93 |
| Figure IV. 8 : Courbes de sorties expérimentales de l'essai (c) pour l'horizon (70-100 cm)... | 94 |
| Figure IV. 9 : Courbes de sorties expérimentales de l'essai (a) pour le profil de 1 mètre | 95 |
| Figure IV. 10 : Courbes de sorties expérimentales de l'essai (b) pour le profil de 1 mètre | 95 |
| Figure IV. 11 : Courbes de sorties expérimentales de l'essai (c) pour le profil de 1 mètre | 96 |
| Figure IV. 12 Ajustement de la courbe expérimentale de l'essai (a) pour l'horizon (0-40 cm) avec les solutions analytiques de l'équation (1)..... | 97 |
| Figure IV. 13 : Ajustement de la courbe expérimentale de l'essai (b) pour l'horizon (0-40 cm) avec les solutions analytiques de l'équation (1)..... | 98 |
| Figure IV. 14 : Ajustement de la courbe expérimentale de l'essai (c) pour l'horizon (0-40 cm) avec les solutions analytiques de l'équation (1)..... | 98 |
| Figure IV. 15 Ajustement de la courbe expérimentale de l'essai (a) pour l'horizon (40-70 cm) avec les solutions analytiques de l'équation (1)..... | 99 |
| Figure IV. 16 : Ajustement de la courbe expérimentale de l'essai (b) pour l'horizon (40-70 cm) avec les solutions analytiques de l'équation (1)..... | 99 |
| Figure IV. 17 Ajustement de la courbe expérimentale de l'essai (a) pour l'horizon (70-100 cm) avec les solutions analytiques de l'équation (1)..... | 100 |
| Figure IV. 18 : Ajustement de la courbe expérimentale de l'essai (b) pour l'horizon (70-100 cm) avec les solutions analytiques de l'équation (1)..... | 100 |
| Figure IV. 19 : Ajustement de la courbe expérimentale de l'essai (c) pour l'horizon (70-100 cm) avec les solutions analytiques de l'équation (1)..... | 101 |
| Figure IV. 20 : Prédiction de la dynamique du chlore dans la couche active ($h_{\text{couche active}} = 1 \text{ m}$) pour une période de rotation de 4 ans..... | 105 |
| Figure IV. 21: Courbe de la dynamique de diminution du taux de chlorure en fonction des volumes d'eau supplémentaires | 108 |
| Figure IV. 22 Dynamique de la salinité de la solution du sol avec une concentration d'eau de mélangeur =0.75 g/l..... | 110 |
| Figure IV. 23 Dynamique de la salinité de la solution du sol avec une concentration d'eau de mélangeur =0.5 g/l..... | 111 |
| Figure IV. 24 Dynamique de la salinité de la solution du sol avec une concentration d'eau de mélangeur =0.35 g/l..... | 112 |

Liste des tableaux

| | |
|--|-----|
| Tableau I. 1: Etat actuel des ressources en eau souterraines..... | 16 |
| Tableau I. 2 Besoin en eau d'irrigation dans la vallée de l'Oued Righ..... | 19 |
| Tableau I. 3: Tableau récapitulatif des résultats d'étude pédologique | 24 |
| Tableau II. 1 Formules empiriques et semi-empiriques existantes pour le calcul de la dose de lessivage..... | 39 |
| Tableau II. 2: Dose de lessivage selon A. A. Shoshin..... | 41 |
| Tableau II. 3: Volume de lessivage utilisé dans la pratique dans certains pays au monde | 42 |
| Tableau II. 4: Importance de la valeur de CEC dans les phénomènes d'échanges | 44 |
| Tableau II. 5: Paramètre de dispersivité λ en fonction de la composition granulométrique | 44 |
| Tableau II. 6: Résultats des expériences réalisé pour la détermination du coefficient de convection-diffusion..... | 46 |
| Tableau II. 7: Les valeurs de b dans la formule (II.32) | 60 |
| Tableau II. 8: Les valeurs de h_1 qui intervienne dans l'équation (II.60) | 69 |
| Tableau III. 1: Répartition des irrigations durant la saison végétative..... | 75 |
| Tableau III. 2: Analyse physique de sol..... | 76 |
| Tableau III. 3: Bilan chimique de sol | 77 |
| Tableau III. 4: Autres analyses physico-chimiques..... | 77 |
| Tableau III. 5: Concentration des eaux d'irrigations | 77 |
| Tableau IV. 1: Tableau récapitulatif des résultats des paramètres hydrodynamiques impliqués dans la modélisation mathématique pour les petites colonnes..... | 102 |
| Tableau IV. 2 : Tableau récapitulatif des résultats des paramètres hydrodynamiques intervenant dans la modélisation dans les grandes colonnes. | 103 |
| Tableau IV. 3: Premier cas (simulation avec les ressources en eau disponible régime d'irrigation à caractère lessivant) | 104 |
| Tableau IV. 4: Diminution de la concentration en Cl^- par rapport à la concentration du cas réel à la fin de la saison végétatif | 107 |
| Tableau IV. 5: Deuxième cas (simulation avec mobilisation d'un volume d'eau supplémentaire de la nappe (C.I) régime d'irrigation à caractère lessivant)..... | 108 |
| Tableau A.I. 1: précipitations moyennes mensuelles interannuelle dans la région de l'Oued Righ, période (1975-2009)..... | 119 |
| Tableau A.I. 2: Humidité moyenne mensuelle interannuelle dans la région de l'Oued Righ, période (1975-2009). | 119 |
| Tableau A.I. 3: Température moyenne mensuelle interannuelle dans la région de l'Oued Righ, période (1975-2009). | 119 |
| Tableau A.I. 4: Evaporation moyenne mensuelle interannuelle dans la région de l'Oued Righ, période (1975-2009). | 119 |

| | |
|---|-----|
| Tableau A.I. 5: ETP moyenne mensuelle interannuelle dans la région de l'Oued Righ, période (1975-2009)..... | 119 |
| Tableau A.I. 6: précipitations moyennes mensuelles interannuelle dans la région de Biskra pour la période (1989-2015). | 120 |
| Tableau A.I. 7: Humidités moyennes mensuelles interannuelle dans la région de Biskra pour la période (1989-2015). | 120 |
| Tableau A.I. 8: Températures moyennes mensuelles interannuelle dans la région de Biskra pour la période (1989-2015). | 120 |
| Tableau A.I. 9: Evaporations moyennes mensuelles interannuelle dans la région de Biskra pour la période (1989-2015). | 120 |
| Tableau A.I. 10: Evapotranspirations moyennes mensuelles interannuelle dans la région de Biskra pour la période (1989-2015). | 120 |
| Tableau A.I. 11: Synthèse hydrogéologique régionale des différentes aquifères | 121 |
| Tableau A.I. 12 : Analyse chimique des eaux de la nappe phréatique | 122 |
| Tableau A.I. 13 Rabattements dans la nappe du CT en Algérie | 122 |
| Tableau A.I. 14 Rabattements dans la nappe du CI en Algérie | 123 |
| Tableau A.I. 15: Etat actuel d'exploitation des forages. | 123 |
| Tableau A.I. 16: Synthèse hydrogéologique régionale des différentes aquifères pour la wilaya de Biskra | 124 |
| Tableau A.I. 17: Caractéristiques des nappes captées à travers la wilaya de Biskra | 125 |
| Tableau A.I. 18: Répartition des cultures par commune | 127 |
| Tableau A.I. 19 : Résultats des analyses détaillée des profils pédologiques de l'Oued Righ | 128 |
| Tableau A.I. 20 Pourcentages et surfaces des sols sablo-limoneux | 130 |
| Tableau A.I. 21 Pourcentages et surfaces des sols limono-sableux | 131 |

Liste des abréviations

AEP: Alimentation en Eau Potable
ANAT: Agence Nationale d'Amenagement du Territoire
ANRH: Agence National des Ressources Hydriques
ASC: Average Salt Concentration
CCIZ: Chambre de Commerce et d'Industrie de Zibans
CEC: Capacité d'échange cationique
CI: Continental Intercalaire
CT: Complexe Terminale
CXTFIT: code for estimating transport parameters from laboratory or field tracer experiments
DSA: Direction des Services Agricole
ETP: Evapotranspirations potentiels
GFC: Groundwater Flow Calculator
GPS: Global Positioning System
ISAB: Ionic Strength Adjustment Buffers
O.N.M: Office National Météorologique
PVC: Polychlorure de vinyle
STANMOD: STudio of ANalitical MODels
USDA: United States Department of Agriculture
USGS: United States Geological Survey
A.I.1: Annexe de chapitre respectivement (I, II, III, IV)

Introduction générale

La vallée de l'Oued Righ et la wilaya de Biskra sont des vastes régions situées au nord-est du Sahara Algérien. Ces deux régions sont historiquement connues comme source de richesse socio-économique et centre d'une importante activité agro-économique lié à la production de dattes (Principales culture commerciale dans la région).

Cette entité regroupe près de 82 oasis occupé par des palmiers et divers cultures sous-jacentes couvrant au total une superficie d'environ 70 000 ha. (Tesco, 1983)

Le climat aride, la mauvaise gestion des ressources en eau, sa surconsommation et l'absence d'un système de drainage efficace dans la région ont entraîné un problème majeur de salinité secondaire des terres. Cela se traduit principalement par un dépôt de cristaux de sel à la surface des sols, conséquence de la remontée de la nappe phréatique, dont les eaux sont salées. Cet état de fait a un impact négatif sur le rendement du palmier et le revenu de l'agriculteur.

La question de la gestion de la salinisation des terres irriguées devient de plus en plus cruciale. Afin de contrôler et de gérer ce risque et garantir un rendement agricole adéquat et durable, un régime d'irrigation à caractère lessivant sur fond de drainage adéquat pour le rabattement des eaux de la nappe phréatique est devenu une exigence primordiale. La dose d'eau nécessaire à appliquer pour le maintien d'un taux optimal de sels solubles dans la couche active est un processus complexe qui a pour conséquence la remise en état des sols. Elle dépend des propriétés physico-hydriques du sol, de la configuration chimique des sels solubles dans la solution de sol, de la méthode d'irrigation et de la disponibilité des ressources en eau. Celles qui sont exploitées dans la vallée de l'Oued Righ et Biskra proviennent de deux systèmes aquifères: la nappe du Complexe Terminal (C.T) situé à une profondeur de dizaine de mètres avec une concentration variable de résidu sec ($RS \approx 3.7 \text{ g/l} \div 6 \text{ g/l}$) et du Continental Intercalaire qui est situé à une profondeur d'environ 2000 m de la surface de sol avec une concentration de sels solubles de résidu sec ($RS \approx 1.5 \text{ g/l} \div 5.48 \text{ g/l}$). D'après l'Observateur du Sahara du Sahel (OSS), cette dernière est en état de surexploitation immense à cause de la multiplication des forages et l'extension des terres irrigables.

La pratique dans plusieurs pays dans les zones arides a montré que les volumes d'eaux consommées pour le lessivage des terres salées sont très importantes à l'exemple de : (Bobtchenko et al. 1981, Kovda 1984, Meza 2001, 2003)

En Egypte, le volume de lessivage est de 30000 à 34000 m³/ha, en Iran le volume de lessivage est de 16000 à 17000 m³/ha et en Ouzbekistan, le volume de lessivage est de 26000 m³/ha,

La gestion et l'optimisation des volumes d'eaux de lessivages et par voie de conséquence le régime d'irrigation à caractère lessivant, (intensité et temps d'application) ne peut être atteinte que par une approche prévisionnel du régime hydro-salin de la couche active des sols pour une période de rotation des cultures agricoles.

Notre objectif dans ce travail est :

- a) la détermination des paramètres de transfert de sels solubles dans les sols et la prévision du régime hydro-salin de la couche active des sols dans la vallée de l'Oued Righ. Adéquation de modèles mathématiques.
- b) l'évaluation de la quantité d'eau de lessivage pour le maintien d'une concentration admissible.
- c) l'évaluation de la dépendance entre les rendements des cultures agricoles et les régimes salins et hydrique des sols.

Chapitre I

**CARACTERISTIQUES DU CADRE
DE L'ETUDE ET EVALUATION DE
L'ETAT HYDROAGRICOLE**

I.1 Introduction

L'analyse et l'évaluation de l'état hydro-agricole du milieu naturel sont des préalables indispensables pour la maîtrise de la gestion des terres mises en valeurs soumise à une salinisation secondaire, car la réponse d'un milieu aux modifications qu'il subit et sa capacité de diminuer les conséquences dépendent de ses caractéristiques climatiques (ETP, précipitations, humidité relative...), hydrogéologiques (profondeur de la couche aquifère...), agro-pédologiques (texture..) et des actions anthropiques.

I.2 Présentation des régions d'étude

La vallée de l'Oued Righ et la wilaya de Biskra sont situées au nord est du Sahara, le long du grand ERG oriental et au sud du massif des Aurès (Fig.I.1). Ces deux régions sont historiquement connues comme source de richesse socio-économique et centre d'une importante activité agro-économique lié à la production de dattes et divers cultures maraichères (Principales cultures commerciales dans la région).

Elles s'étendent sur environ 300 Km et regroupe près de 82 oasis couvrant au total une superficie d'environ 70 000 ha occupé par des palmeraies et divers cultures sous-jacentes (Fig. I.2, I.3). Ces oasis débutent au nord par la palmeraie d'El Kantara et se termine 300 Km plus au sud avec la palmeraie d'El Goug. Sur le plan administratif, la région de Biskra et la vallée de l'Oued Righ partage plusieurs frontières administratives.

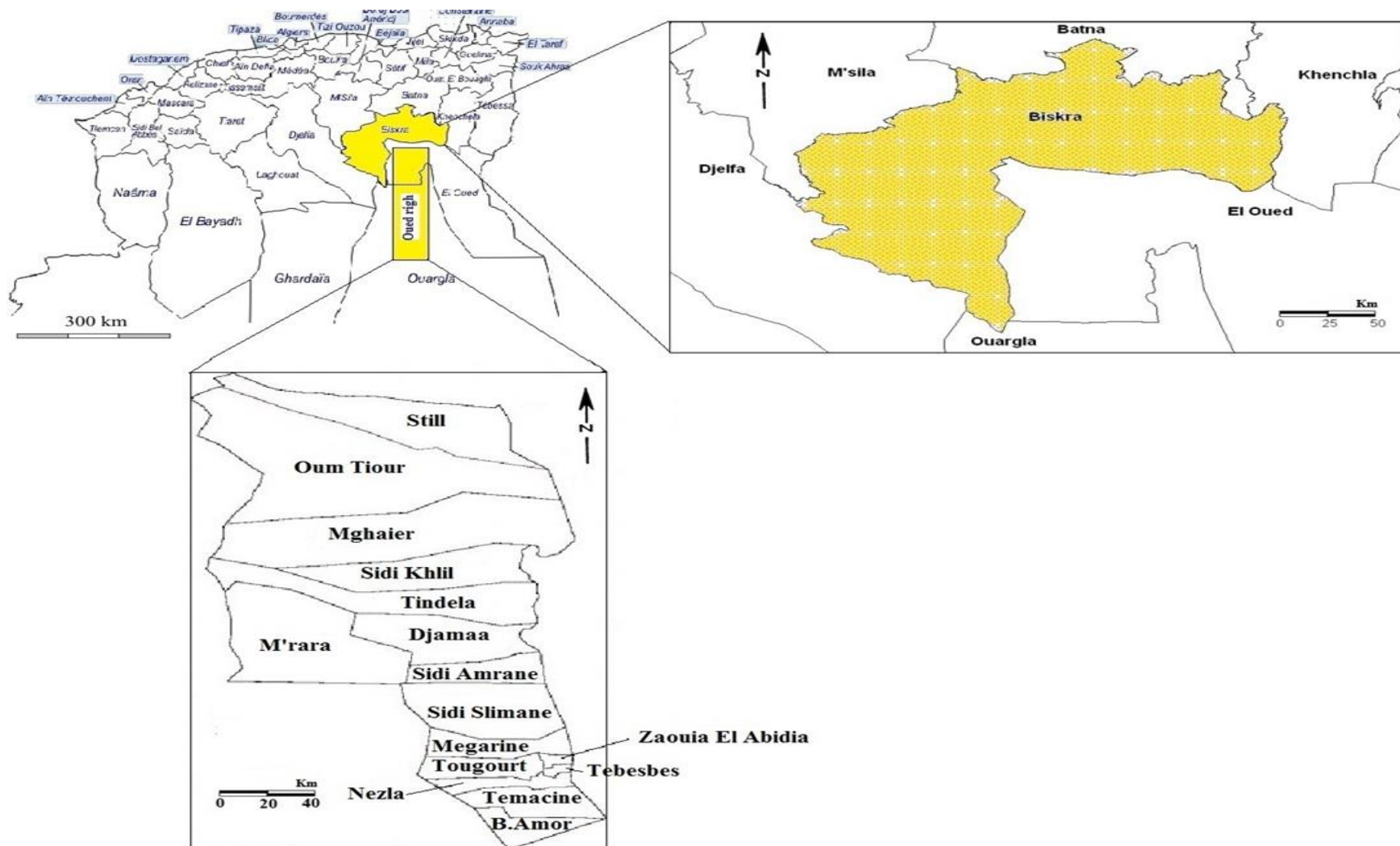


Figure I. 1: Situation géographique de la région de l'Oued R'high et la Wilaya de Biskra (ANRH modifié)

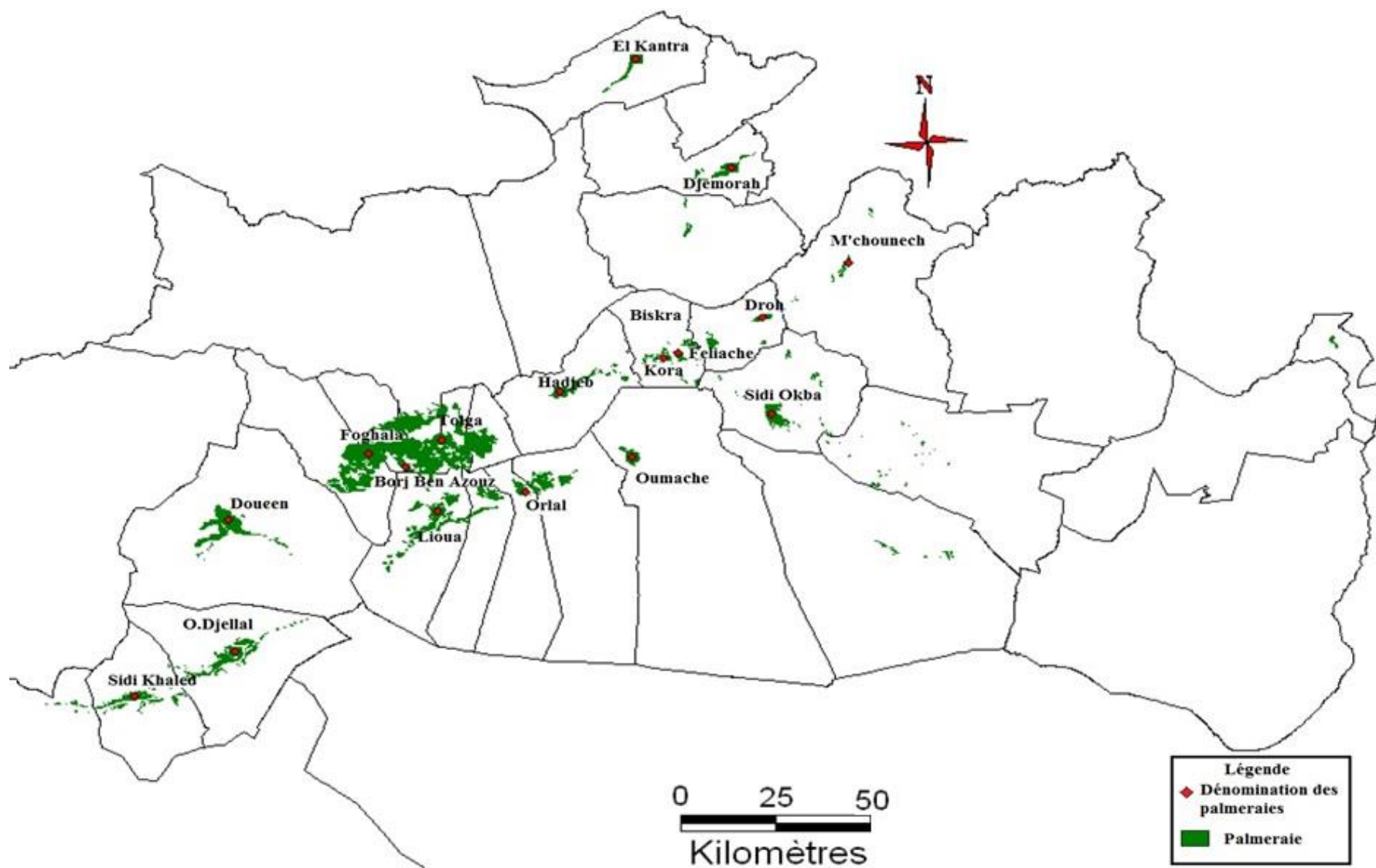


Figure I. 2: Répartition des palmeraies dans la région de Biskra (Farhi, 2014 modifié)

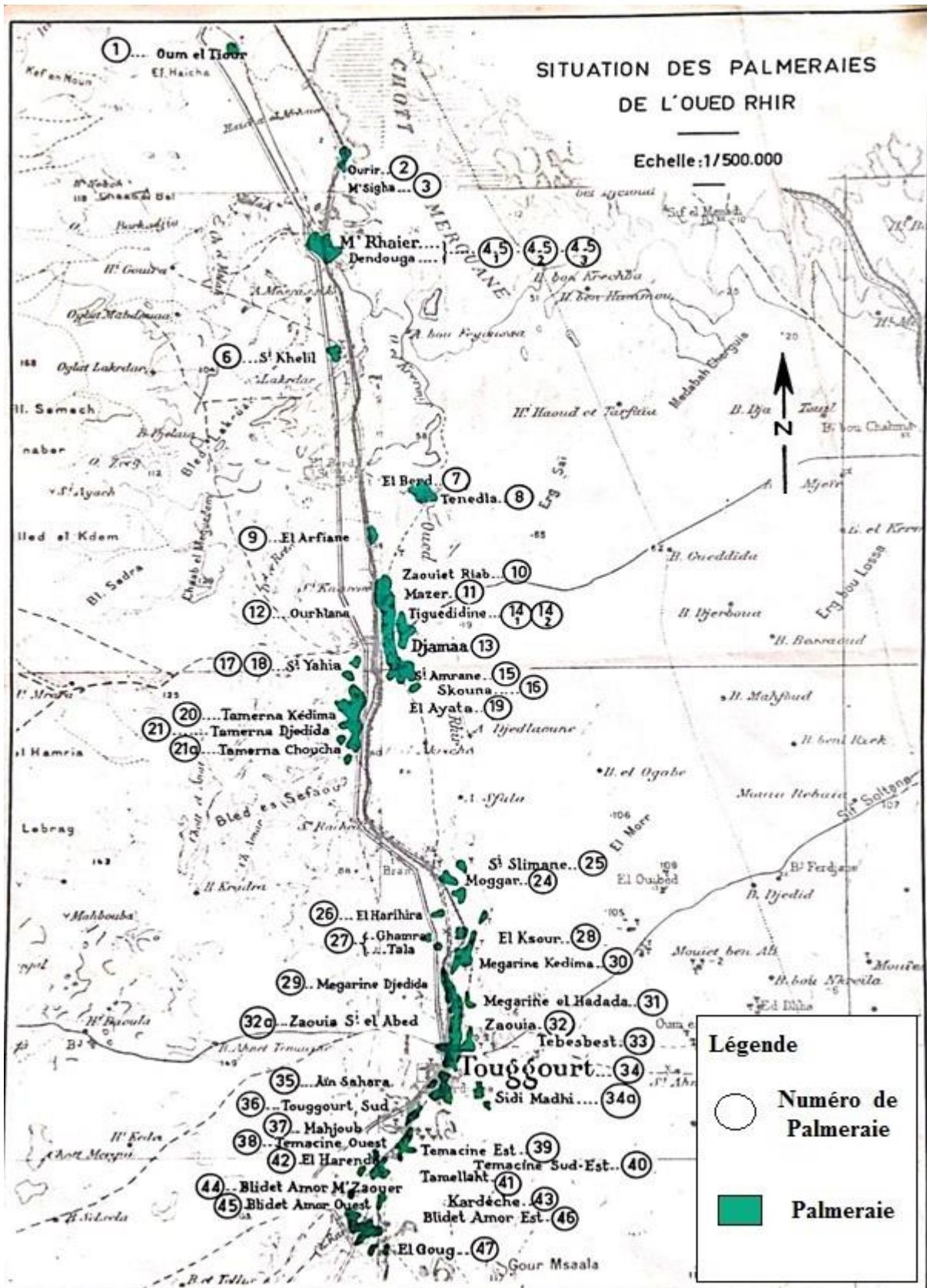


Figure I. 3: Répartition des palmeraies dans la vallée de l'Oued Righ (Tesco, 1986 modifié)

I.3 Caractéristique du cadre de l'étude

I.3.1 Cadre climatiques

L'étude est effectuée à partir des observations météorologiques enregistrées à l'O.N.M Touggourt durant la période (1975-2009) et à l'O.N.M Biskra pendant la période (1989-2015).

I.3.1.1 Les précipitations

D'après les figure I.4 et I.5, On remarque que les précipitations enregistrées pour l'Oued Righ et la région de Biskra enregistrent une précipitation mensuelles interannuelles semblable, elles sont très faible mais surtout très variable. Cette forte variabilité des précipitations est une des caractéristiques du climat saharien. Elles proviennent essentiellement des perturbations orageuses, courtes et violentes. Cependant, le mois le plus pluvieux dans les deux régions est le mois de Janvier, tandis que le mois le plus sec est le mois de Juillet. (Tableau A.I.1 et A.I.6)

I.3.1.2 Humidité relative de l'air

Les valeurs moyennes mensuelles interannuelles de l'humidité relative de l'aire de la vallée de l'Oued Righ et Biskra sont généralement inférieures à 65 %, elles varient entre 26 % et 63 %.

Les mois de Juillet et Août sont les mois les plus secs alors que les mois de Décembre et Janvier sont les mois les plus humides. (Tableau A.I.2 et A.I.7)

I.3.1.3 Températures

Les températures dans les régions d'études se caractérisent par de forts maximums de température en été par contre l'hiver où elle est peut être très basse. Ces régions présentent aussi des écarts thermiques importants, c'est-à-dire la différence entre le maximum pendant le jour et le minimum pendant la nuit, dépasse une vingtaine des degrés Celsius.

L'examen des deux courbes (Fig I.4 et I.5) indique une température moyenne mensuelle qui est approximativement la même dans les deux régions, sauf que durant les périodes juillet-août et novembre-janvier, la région de Biskra indique une courbe plus élevée que la région de l'Oued Righ. En effet, le maximum des températures moyennes mensuelles interannuelles des deux régions d'études est enregistré au mois de Juillet avec une moyenne

de 35 °C, tandis que le minimum est enregistré au mois de Janvier avec une moyenne de 10 °C. (Tableau A.I.3 et A.I.8)

I.3.1.4 L'évaporation

L'analyse des résultats de l'évaporation mensuelle interannuelle enregistrée dans la vallée de l'Oued Righ et la région de Biskra (figs. I.4 et I.5) montrent que la variation de l'évaporation augmente du mois de janvier au mois de juillet et diminue jusqu'au mois de décembre, l'évaporation la plus élevée est atteinte au mois de Juin et Juillet avec un cumul d'environ 622 mm, le minimum pour les deux régions est atteint au mois de janvier avec un cumul moyenne de 45 mm. (Tableau A.I.4 et A.I.9)

I.3.1.5 L'évapotranspiration potentielle (ETP)

Il existe plusieurs méthodes d'appréciation de ce paramètre. Nous avons opté pour notre étude les résultats de la formule empirique de Penman, puisque, c'est une formule universellement reconnue, elle est basée sur la mesure des échanges énergétique participant à l'évapotranspiration en faisant intervenir plusieurs facteurs climatiques tels que la température, humidité, vitesse du vent, insolation... etc.

D'après les figure I.4 et I.5 on observe que les valeurs sont proches entre les deux régions, augmentation en été par 250 mm en moyenne et une diminution en hiver avec 50 mm ce qui indique une similitude climatique dans ce paramètre important. (Tableau A.I.5 et A.I.10)

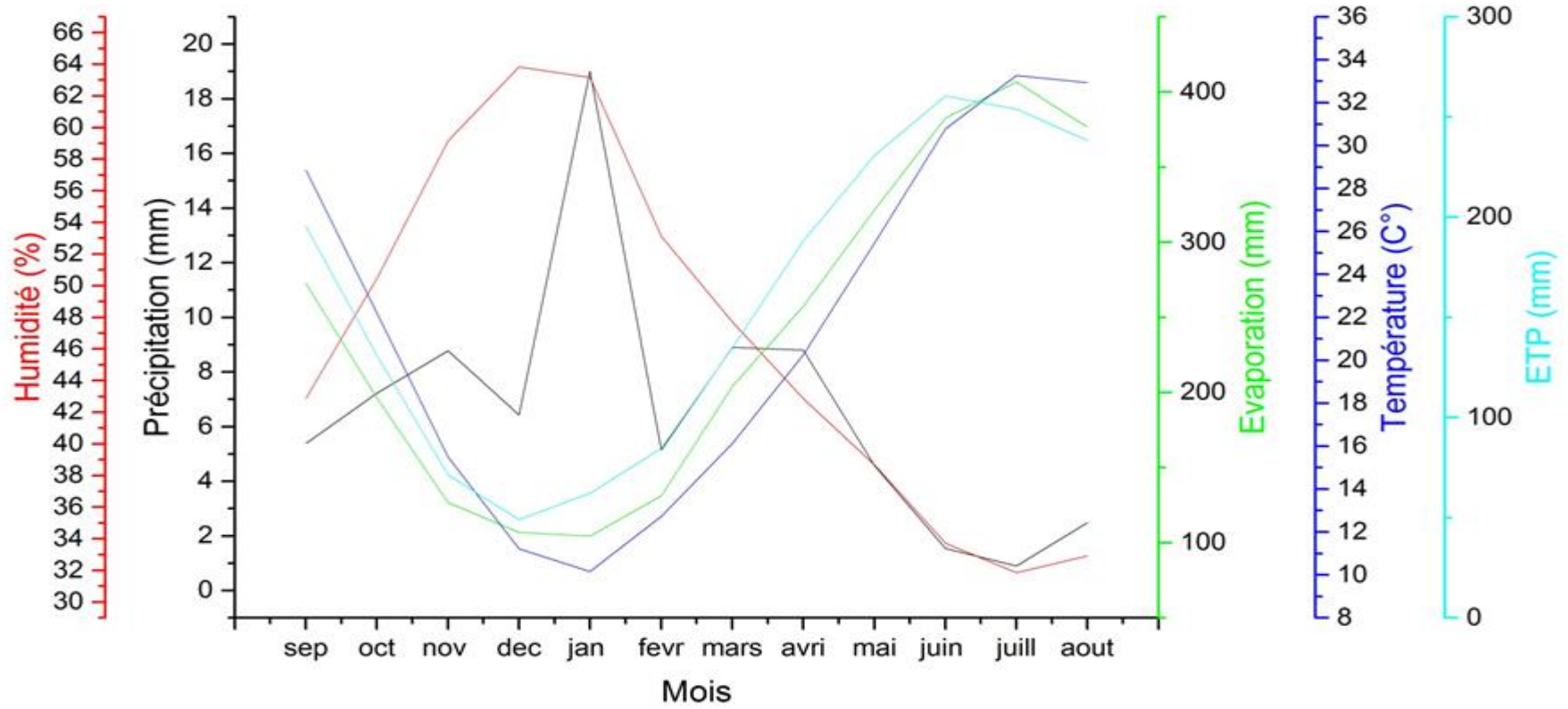
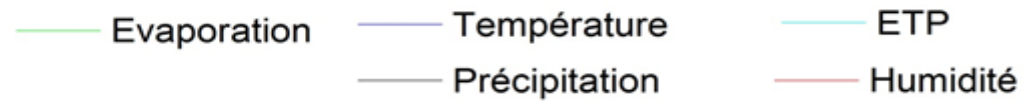


Figure I. 4 Variation des paramètres climatiques moyens mensuels interannuels dans la région de l'Oued Righ



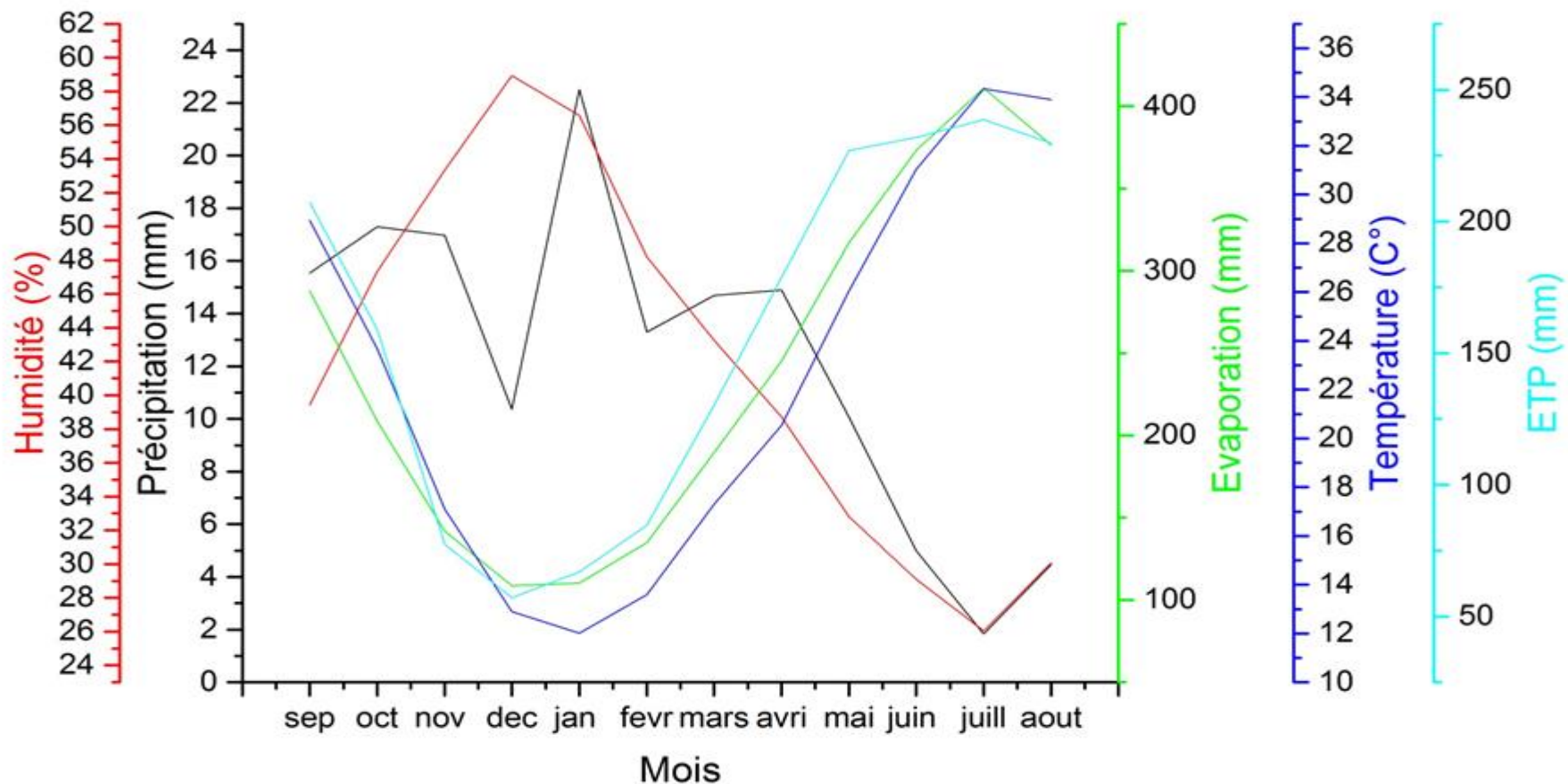
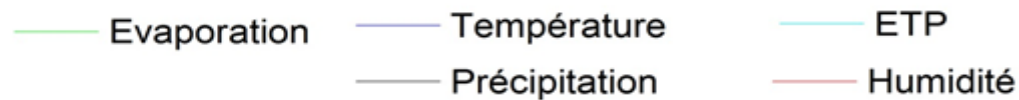


Figure I. 5 Variation des paramètres climatiques moyens mensuels interannuels dans la région de Biskra



I.3.1.6 Les vents

L'analyse des résultats de la vitesse du vent mensuelle des régions de Biskra et l'Oued Righ dans la figure I.6, montrent que les vents sont fréquents et leur vitesse est importante dans le printemps. Ces vents soufflent suivant des directions différentes.

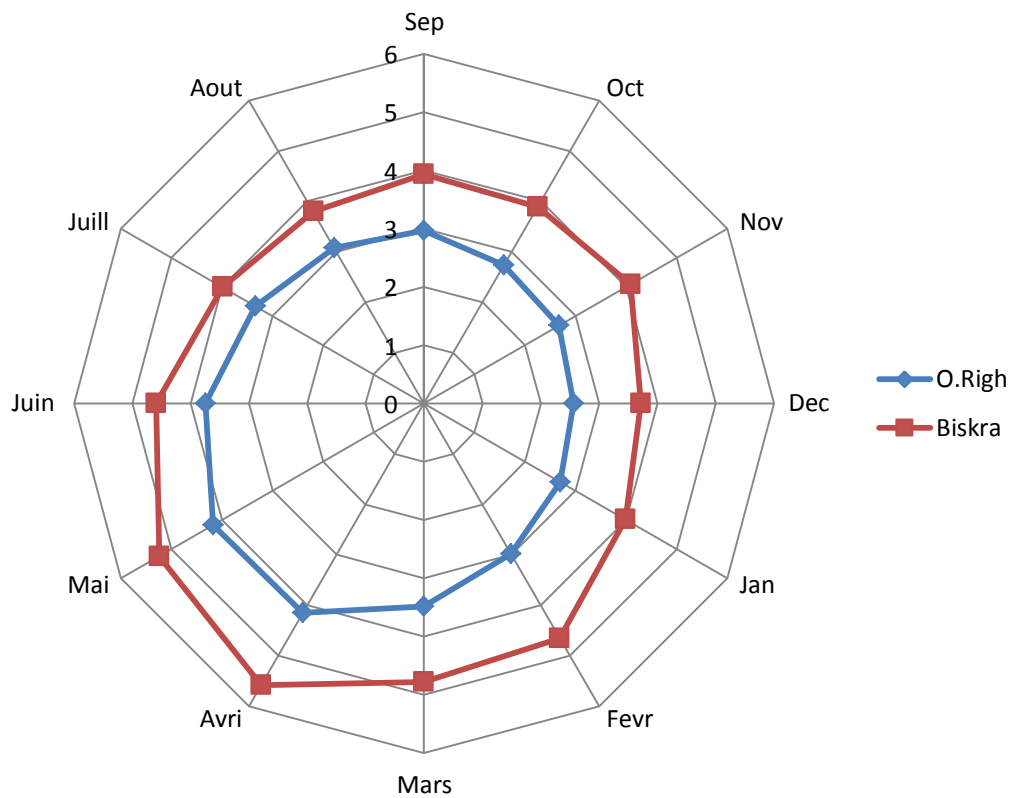


Figure I. 6: Rose des vents en fréquence de la vitesse mensuelle moyenne interannuelle du vent (m/s) dans la région de Biskra et l'Oued Righ

Les figures I.4 et I.5 présentent la variation des paramètres climatiques (Précipitation, humidité relative de l'air, ETP, température et évaporation) mensuelle de la région de l'Oued Righ et Biskra en fonction du temps (mois). On remarque une augmentation et une diminution des paramètres climatiques suivant les saisons. Dans la période d'hiver on constate une augmentation de l'humidité relative de l'air et des précipitations avec une diminution de la température, de l'ETP et de l'évaporation et l'inverse pour le reste de l'année. Cela s'explique par la variation de la température qui est le facteur principal qui contrôle les autres paramètres.

A cet effet, on constate une similitude entre les paramètres climatiques pour les régions de l'Oued Righ et Biskra et on peut conclure que deux régions appartiennent au même type de climat saharien sec et aride avec un hiver froid et un été chaud et sec.

I.3.2 Cadre hydrogéologique

Conformément aux travaux de prospection géophysique et hydrogéologique dans la région de l'Oued Righ et du Ziban commise par l'agence national des ressources hydrique (A.N.R.H), ils ont définis les différents ressources en eau souterraines (Tableaux A.I.11 et A.I.16).

La région de l'Oued Righ et la wilaya de Biskra présente des ressources en eau souterraines importantes, représentées par la nappe phréatique et deux grands systèmes aquifères qui sont respectivement :

- La nappe phréatique du Quaternaire.
- Le système aquifère du complexe terminal qui contient deux grandes nappes :
 - a- Nappe des sables du Mio-pliocène (CT).
 - b- Nappe des calcaires de l'Eocène inférieur et du Sénonien (CT).
- Le système aquifère du continental Intercalaire (CI).

I.3.2.1 Le continental intercalaire (nappe de l'Albien) :

C'est un aquifère profond, son toit se situe généralement à 1000 m et plus, il couvre pratiquement le sud-est Algérien avec une superficie de 600 000 Km². Son capacité en eau a été évaluée à 50 000 milliard m³. Les eaux du continental intercalaire sont de bonne qualités (minéralisation totale généralement < 3,5 g/l). (Tesco, 1983)

Cette nappe est exploitée par peu de forage à cause de son coût d'exploitation très élevé sachant que la profondeur d'un forage peut dépasser les 2000 m et sa température d'eau qui atteint ou excéder les 60° Celsius.

I.3.2.2 Le complexe terminal :

Le complexe terminal est un système moins profond que celle du continental intercalaire (moins de 400 m), il couvre une superficie de 350 000 Km² avec des eaux généralement salé. Il est constitué de trois nappes principales : La nappe des sables du Miopliocène, La nappe des calcaires du Sénono-Eocène (Fig. I.8). Cette nappe est fortement exploitée dans les deux régions.

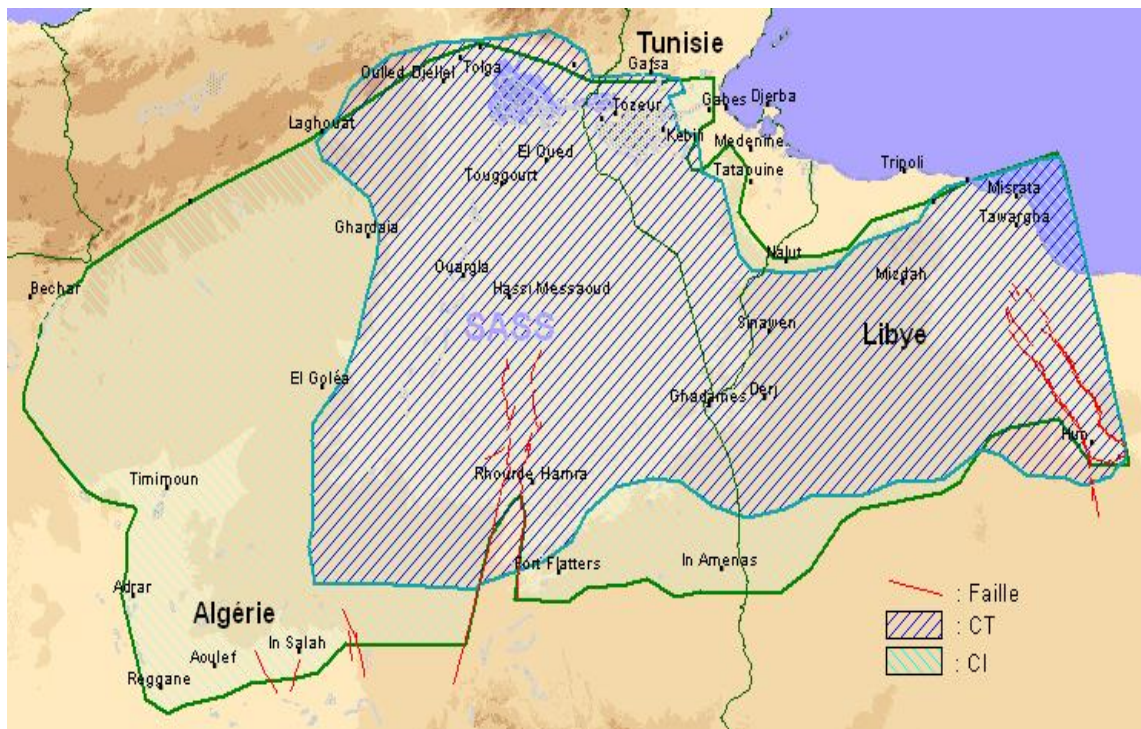


Figure I. 7: carte des limites du continentale intercalaire et de complexe terminal

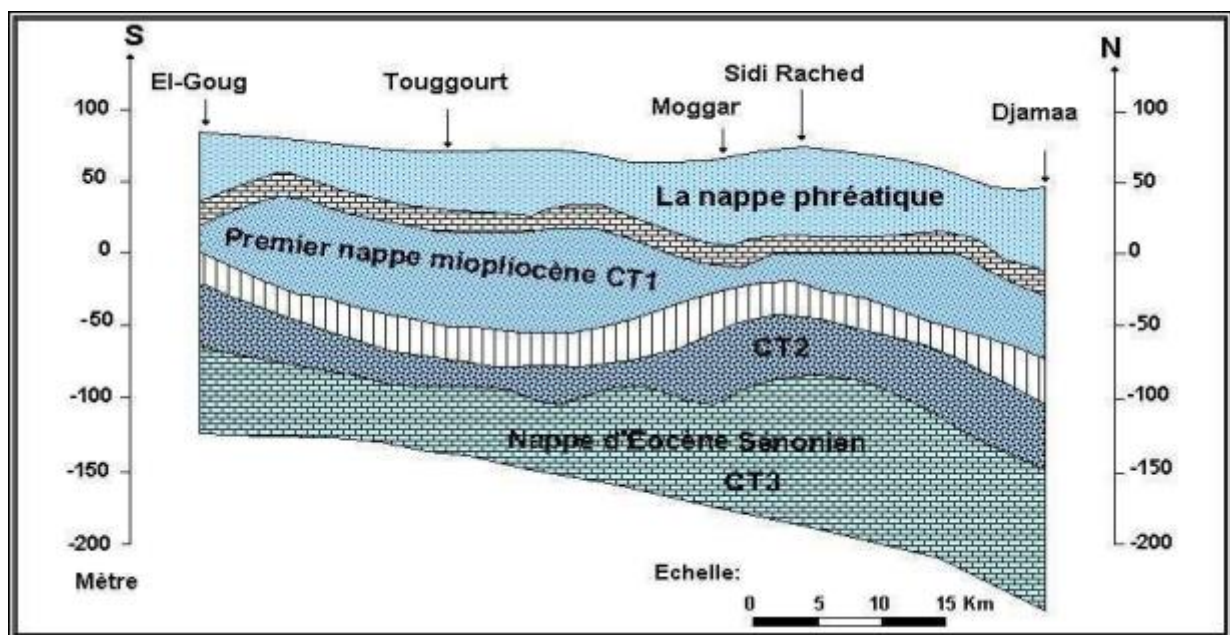


Figure I. 8: Coupe hydrogéologique du Complexe Terminal de la région de l'Oued Righ (ANRH)

I.3.2.3 La nappe phréatique

La nappe phréatique est omniprésente dans toutes les oasis de la vallée de l'Oued Righ. Les variations de la profondeur de la nappe phréatique sont liées à la fréquence des irrigations et à l'efficacité de drainage. Elle est généralement faible, les résultats de calcul de la moyenne des profondeurs montrent que dans les palmeraies **8%** de la nappe se situe à une profondeur de 0-0,50 m, **72%** à 0,50-1,00 m, **19%** à 1,00-1,50 m et **1%** se trouve sous 1,50 m. Cependant, dans la région de Biskra on distingue celle qui se situe généralement dans les accumulations alluvionnaires (inféroflux), et la nappe phréatique dans les autres zones de la wilaya de Biskra se caractérise par une faible profondeur, faible débit et mauvaise qualité d'eau.

Le tableau A.I.17 dans l'annexe 1 présente une récapitulation des caractéristiques des nappes captées à travers la wilaya de Biskra.

I.3.2.4 Etat actuel des ressources en eau souterraines

Le tableau I.1 montre les prélèvements et la disponibilité en eau du C.T et C.I dans la vallée de l'Oued Righ.

Tableau I. 1: Etat actuel des ressources en eau souterraines. (ANRH)

| Nappe | Potentialités (m ³ /an) | Prélèvements (m ³ /an) | Disponibilités (m ³ /an) |
|--------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Complexe Terminal | 308 | 179.5 | 128.5 |
| Continental Intercalaire | 120 | 48 | 72 |
| Total | 428 | 227.5 | 200.5 |

I.3.2.5 Etat actuel d'exploitation des forages

D'après l'Observatoire Du Sahara Et Du Sahel (OSS) qui a mené une étude sur le Système Aquifère du Sahara Septentrional SASS (partagé par 3 pays) depuis 1998 en 3 phase, a montré que la surexploitation des forages n'est que plus évidente et elle est amplement avérée par le tarissement complet de la plupart des sources, la réduction de l'artésianisme, la dégradation de la qualité des eaux (avant et par salinisation et l'interférence négative, par endroits, entre les pays), le rabattement des niveaux piézométriques. Dans ce dernier point, et selon l'étude les forages qui captent à partir du continental intercalaire, elles souffrent un rabattement extrême :

- pour la région de l'Oued Righ, le forage de Sidi Mahdi² pour la période (1959-2000) subit un rabattement de 85.5 m, pour le forage de Sidi Slimane pour la période (1962-2000) subit un rabattement de 133.9 m.

- pour la région de Biskra : le forage d'Ouled Djellal (Hassi Smara) pour la période (1983-2001) subit un rabattement de 131.7 m et pour le forage de Sidi Khaled pour la période (1956-2000) subit un rabattement de 94.2 m. ,

L'exploitation des forages se fait au niveau des trois grandes régions dans l'Oued Righ (Touggourt, Djamaa et el Meghaier). Leurs eaux sont destinées généralement à l'irrigation et l'alimentation en eau potable (AEP) avec un débit s'étendant entre 3000 et 9000 l/s. (Tableau A.I.15). Pour la région de Biskra l'exploitation des forages se fait principalement au niveau des palmerais pour l'irrigation et les communes pour l'alimentation en eau potable .. D'après les résultats de l'étude de l'OSS les volumes d'eaux prélevés à partir du C.I et C.T ont connu une augmentation énorme dans la région de l'Oued Righ et Biskra entre la période (1960-2000) (Tableaux A.I.13 et A.I.14) :

- Pour la région de l'Oued Righ (Wilaya de Ouargla) les volumes d'eaux prélevés à partir du C.I en 1960 était de l'ordre de 10 l/s cependant à l'année 2000 les volumes sont à l'ordre de 3511.8 l/s, et pour les volumes d'eaux prélevés à partir du C.T du 2982 l/s en 1960 à 9313.9 en 2000.
- Pour la région de Biskra les volumes d'eaux prélevés à partir du C.T en 1960 était de l'ordre de 318 l/s cependant à l'année 2000 les volumes sont à l'ordre de 385 l/s.

Selon les estimations de l'OSS et des pays, la recharge annuelle du système aquifère s'élève à un milliard de m³, alors que les prélèvements sont passés de 0,6 milliard de m³ /an, au début des années 1970, à 2,7 milliards de m³/an en 2012 (pour les trois pays). En cinq décennies, l'exploitation des eaux du SASS a quadruplé en faisant basculer le système dans un état de surexploitation, dont le seuil a été franchi au début des années 1980.

L'étude de l'Observatoire Du Sahara Et Du Sahel recommande une gestion et une maîtrise de la demande en eau, avec l'amélioration de sa productivité et la protection de l'environnement. Les efforts doit être concentrés sur le secteur agricole, qui est le plus important usager des eaux souterraines dans le bassin. (OSS, 2015).

I.3.3 Cadre agro-pédologique

I.3.3.1 Activités agricoles

Dans la région de l'Oued Righ et Biskra l'agriculture fournit presque la moitié des emplois pour les habitants. Ces agriculteurs exploitent plus de 110 000 hectares irrigués. Cette grande surface est partagée entre des cultures diverses ; des palmiers, des cultures légumières, céréales, arboriculture (abricotiers, oliviers) et cultures industrielles (tabac...).

Avec plus de 6,8 millions palmiers couvrant au total plus de 75 000 ha (CCIZ Chambre de Commerce et d'Industrie de Zibans et DSA, Ouargla), la phoeniciculture est bien évidemment le centre d'activité principal de la région de Biskra et la vallée de l'Oued Righ. Les deux régions produisent la plus grande partie des dattes algériennes exportées (variété Deglet Nour) et possèdent les plus grandes concentrations d'unités de conditionnement de la datte.

Presque la moitié des palmiers sont de la variété Deglet Nour qui est probablement la datte la plus réputée au monde. La production de cette variété se situe autour de 50 000 tonnes et les pôles les plus dynamiques sont à Tolga et Biskra.

Les cultures fourragères pratiquées sont essentiellement la luzerne et l'orge en vert. Les cultures maraîchères d'hiver concernent en particulier l'ail, l'oignon en vert et avec une moindre importance: carotte, navet, salade, blette, coriandre. Les cultures d'été sont principalement la tomate, le piment, le melon et la pastèque...etc. (Tesco, 1983) (DSA, Biskra) (Tableau A.1.18)

Ces dernières années ont connu l'installation des serres plastiques qui ont bien fonctionné. Mais le grand problème dans les serres c'est l'obligation de changement de place après quelques récoltes voir deux récoltes dans certains places à cause de la salinisation secondaire excessive engendré par les eaux d'irrigation excessivement salée.

I.3.3.2 L'irrigation

Vu le climat saharienne hyper aride, toute les cultures nécessitent absolument l'irrigation ; aucune culture n'est possible sans cela.

L'irrigation dans la région de la vallée de l'Oued Righ et Biskra est généralement pratiquée à la planche sauf quelques plantations irriguées à la cuvette. Les planches ont une largeur variable (0,9 à 1,5 m). Les planches sont généralement branchées directement sur la

séguia, mais il arrive qu'elles soient reliées entre elles par un petit canal. L'irrigation est alors faite en série et les premières planches fonctionnent elles-mêmes comme des séguias.

Ces dernières années avec l'installation des serres en plastiques les deux régions ont connu l'apparition des systèmes de goutte à goutte et l'irrigation par aspersion...

Les besoin en eau d'irrigation brute sur un hectare pour une période d'une année sont donnés dans le tableau I.2

Tableau I. 2 Besoin en eau d'irrigation dans la vallée de l'Oued Righ (Tesco, 1983)

| Mois | jan | fevr | mars | avril | mai | juin | juillet | aout | sep | oct | nov | dec | totale |
|--------------------------|-----|------|------|-------|------|------|---------|------|------|------|-----|-----|--------|
| irrigation brute (m3/ha) | 708 | 967 | 1571 | 2222 | 2691 | 2900 | 2758 | 3104 | 2410 | 1602 | 793 | 553 | 22279 |

I.3.3.3 Qualité d'eau d'irrigation

La qualité d'eau d'irrigation dans la vallée de l'Oued Righ et Biskra dépend directement à la qualité de l'eau extraite de la nappe en question (continentale intercalaire, complexe terminale ou la nappe phréatique particulièrement pour la région de Biskra). En générale on distingue 5 qualités d'eau :

Les eaux du continentale intercalaire ont la plus bonne qualité avec une salinité de l'ordre de 3 mmhos, les eaux de complexe terminal ont 4 niveaux de salinité ça dépend le lieu et la profondeur de forage : le premier avec une eau de salinité de l'ordre de 5,9 mmhos, le seconde avec 7,3 mmhos, le troisième avec 8,1 mmhos, le quatrième avec 9,9 mmhos.

Actuellement et pour la région de l'Oued Righ, les eaux faiblement salées du continental intercalaire et fortement salées du complexe terminal sont mélangées dans des mélangeurs avant de commencer l'irrigation. C'est afin de rendre la qualité de l'eau un peu acceptable et permettre une irrigation avec des concentrations en eau de 6 à 7 mmhos. (Tesco, 1983)

I.3.3.4 Drainage

Tout le réseau de drainage existant dans la vallée de l'Oued Righ est creusé à ciel ouvert à une profondeur variant suivant le rôle ; des drains tertiaires d'une profondeur de 40-60 cm situer à l'extrémité des planches, leur rôle est de drainé directement la palmeraie et

faire ruisseler l'eau vers les drains secondaires, où sa profondeur est de 0,8 à 1,5 m son rôle est acheminer l'eau vers le canal principal de l'Oued Righ (Tesco, 1983).

Les drains sont peu efficaces dans la majorité de la vallée à cause de :

- Le mauvais état des fossés qui sont enherbés, obstrués ou dont les parois s'éboulent et les ouvrages de franchissement sont bouchés ;
- Absence d'exutoire ;
- Absence d'écoulement dû à une pente très faible.

Cependant, pour la wilaya de Biskra elle est dotée d'un réseau de drainage de 1000 m environ réparti sur les palmeraies touché par la remontée de la nappe phréatique.

I.3.3.5 Aspect rendement:

I.3.3.5.1 Dynamique de rendement par rapport au développement du palmier :

La littérature indique une relation rectiligne entre la salinité et les rendements des cultures, l'élévation de la salinité est suivie d'une réduction des rendements des cultures.

Pour ce qui est des rendements déclarés en dattes, bien qu'ils soient supérieurs à ceux enregistrés au niveau national et à ceux enregistrés à Tozeur en Tunisie (41 kg/pied), ils restent néanmoins faibles par rapport aux rendements raisonnablement possibles (70 à 80 kg par pied) (figure.I.9) et par rapport aux rendements enregistrés dans les oasis de la vallée de Coachella en Californie où ils dépassent les 91 kg/pied. Ils sont de 53 kg, 38 kg, 44 kg et 28 kg/pied respectivement pour Deglet Nour, ghars, degla beida, et variétés communes. (Benziouche, 2012)

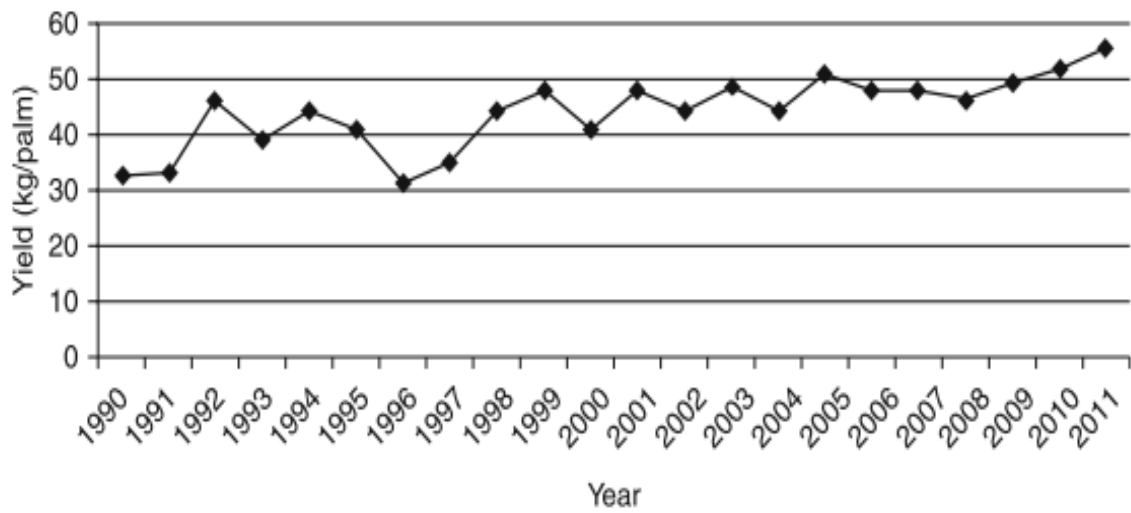


Figure I. 9: Evolution du rendement moyen des palmiers dattiers en Algérie durant la période 1990-2011 (Benzioche, 2012)

I.3.4 Cadre Pédologique

Nous avons basé dans notre recherche sur des études agro-pédologiques précédentes réalisées au niveau de la région de Ziban par l'ANAT (2003) et Khadraoui (2010) mais ces études sont réalisées à des petites échelles (un profil pédologique pour chaque palmeraie) ce qui n'est pas représentatif. Néanmoins, la région de l'Oued Righ a bénéficié de deux études profondes et détaillées, l'étude de Sogetha-Sogreah (1971) et de Tesco-Viziterv (1983).

Afin de faire une analyse détaillée sur la pédologie des régions en question, on a exploité presque 58 profils pédologiques de différentes profondeurs dans la région de Biskra et 601 profils pédologiques de la vallée l'Oued Righ, dont chaque profil est décrit par des propriétés physico-chimiques et hydrodynamiques.

I.3.4.1 Texture

Les résultats d'analyses sur la wilaya de Biskra montrent qu'il y a une hétérogénéité de la composition des sols ; Allant du Nord, caractérisé par des montagnes où les sols sont de texture limono – argileuse ou argilo – limoneuse en passant par le périmètre de l'Outaya jusqu'aux la zone d'El Ghrousse et M'ziraa. Le reste des sols de la région de Ziban sont des sols de texture limono – sableuse comme le cas de El Hadjeb et Mlili ou sablo-limoneuse à sableuse comme dans le cas des palmeraies d'Oumache et El Haouche, Mlili (Mehdjev Lekbir) Lichana..... Tandis que pour la région de l'Oued Righ dans les anciens palmeraies **33,05 %** de la surface sont des sols à texture **limono-sableuse**, **51,51 %** texture **sablo-limoneuse** et **11,64 %** des sols sont à texture **sableuse**, et le reste **3,76 %** sont des sols à texture hétérogène. Pour les jeunes palmerais **64,99 %** de la surface sont des sols à texture **limono-sableuse**, **35,01 %** texture **sablo-limoneuse**.

D'après ces résultats d'analyses obtenus (tableau A.I.19), on constate que pratiquement les sols des deux régions ont une granulométrie similaire c'est-à-dire un très fort pourcentage de particule de sable, avec une texture similaire **limono-sableuse** dans les deux régions.

I.3.4.2 La densité

I.3.4.2.1 Densité apparente

Selon les études pédologiques effectuées la densité apparente des sols est faible dans les horizons superficiels, entre **0-30 cm**. Elle est entre **0,90** et **1,58** et dans les horizons sous-jacents elle est légèrement plus forte : entre **0,88** et **1,73**.

I.3.4.2.2 Densité réelle

La densité réelle de la matière solide est à peu près constante de l'ordre de **2,5-2,7** d'après les données fournies par l'étude de **TESCO-VIZITERV et l'ANAT**.

I.3.4.3 La porosité

La porosité totale des horizons de surface a des valeurs comprises généralement entre 40% et 60%, tandis que celle des horizons plus profonds est en peu plus faible. Cette différence n'est pas due à la variation texturale, car la porosité totale semble être indépendante de la texture, vraisemblablement elle est due à l'accumulation de gypse dans l'horizon et à l'action de l'eau d'irrigation. (Tesco, 1983)

I.3.4.4 Le complexe absorbant (Capacité d'échange cationique)

La capacité totale d'échange ou capacité de saturation (T) correspond à la qualité maxima de cations que le sol est capable de fixer et par conséquent à la limite supérieure de possibilité d'échange est exprimée en milliéquivalents pour 100 grammes de terre sèche. La plupart des sols dans la vallée de l'Oued Righ et Biskra sont sableux, sablo-limoneux ou limono-sableux, c'est à dire, la teneur en argile est faible, au moins dans le profil cultural, ainsi les échanges ioniques sont assez réduits.

La moyenne pondérée de la capacité d'échange pour chaque horizon et pour chaque profil des résultats de l'étude de (Tesco, 1983) montrent que les valeurs de la capacité totale d'échange sont très faibles à cause de la pauvreté de l'humus et d'argile de sol. (Tableau A.I.19)

D'après l'étude de l'ANAT, la plupart des sols dans la région de Biskra sont des sols pauvres en matière organique, au moins dans le profil cultural, ainsi les échanges ioniques sont assez réduits, sauf pour la région de M'ziraa, et la commune d'El Feidh.

Les chiffres montrent que les valeurs de la capacité totale d'échange sont très faibles (**2-5 meq/100g**) dans la majorité de la surface des sols à cause de la pauvreté de l'humus et d'argile de sol.

L'analyse détaillée des caractéristiques de cadre naturelle de l'étude reflète une similitude climatique, hydrogéologique et pédologique pour la région du Ziban et l'Oued Righ. Nous avons choisis la vallée de l'Oued Righ comme région d'étude suite à sa grande

superficie et sa dégradation (salinité secondaire excessive et une nappe phréatique extrêmement salée peu profonde).

I.3.5 Choix de la zone d'étude

L'objet de ce travail est orienté essentiellement vers l'évaluation et l'optimisation du régime d'irrigation à caractère lessivant. Cela nécessite la détermination des paramètres hydrodynamique du sol, ce qui par conséquent nous impose à faire un choix représentatif de la texture du sol et de la composition granulométrique.

Les résultats obtenus de l'analyse du cadre de la région d'étude montrent que pratiquement tous les sols de la vallée de l'Oued Righ ont une granulométrie similaire c.-à-d. un très fort pourcentage de particule de sable, ce qui nous permet de pouvoir choisir les lieux d'échantillonnage de sol d'expérimentation dans la vallée. (Tableau I.3)

Tableau I. 3: Tableau récapitulatif des résultats d'étude pédologique (Tesco,1983)

| Texture du sol | Surface (ha) | palmeraies | Surface (%) | Granulométrie (%) | Capacité d'échange [meq/100g] | Profondeur de la N.P [cm] ≈ |
|-----------------------|--------------|------------------|-------------|---|-------------------------------|-----------------------------|
| Sablo-limoneux | 3132,02 | M'ghaier | 51,51 | Argile= 7,60 Limon= 11,90 Sable= 73,79 | 3,51 | 90 |
| | | Tamerna kedima | | | | |
| | | Tebesbest | | | | |
| Limono-sableux | 2009,91 | Ourlana | 33,05 | Argile= 10,13 Limon= 20,41 Sable= 62,51 | 5,03 | 96,6 |
| | | Tiguedidine Nord | | | | |
| | | Tiguedidine Sud | | | | |
| Sableux | 707,72 | Moggar | 11,64 | Argile= 5,60 Limon= 6,68 Sable= 82,75 | 2,02 | 92 |
| | | Sidi Mahdi | | | | |
| | | | | | | |

Les palmeraies qui ont un pourcentage de particules à granulométrie proche de la moyenne pondérée par rapport à la surface des sols sablo-limoneuse sont : **M'ghaier, Tamerna kedima, Tebesbest**. Tandis que pour les palmeraies qui ont un pourcentage des particules granulométrique proche à la moyenne pondérée par rapport à la surface des sols limono-sableuse sont : **Ourlana, Tiguedidine Nord/Sud**.

Suite à la majorité de la texture des sols de la région de Biskra (limono-sableuse) et une grande partie avec les sols de la vallée de l'Oued Righ. Nous avons choisis la région d'**Ourlana** comme un site représentatif pour l'échantillonnage des sols pour nos expériences.

I.4 Evaluation de l'état hydro-agricole des terres et étude de la balance hydrique dans les limites du périmètre

L'appréciation de l'état technique hydro-agricole des terres est régie par un ensemble de conditions naturelles et anthropiques. Pour une meilleure évaluation de la situation hydro-agricole, on recourt à la détermination de la balance hydrique dans les limites du périmètre.

La méthode de la balance hydrique utilisée pour la mise en valeur des terres est complètement différente de celle utilisée en hydrologie. Les composantes de la balance hydrique d'un système de mise en valeur sont plus complexes. (Averianov, 1978).

Les composantes principales sont l'alimentation artificielle en eau (irrigation) et le drainage des eaux en excès.

Les systèmes de mise en valeur d'habitude occupent des éléments géomorphologiques déterminés et non toute la surface du bassin versant, ce qui ne permet pas d'éliminer de la balance hydrique le flux d'eau superficiel et souterrain sur le périmètre.

Pour la mise en valeur des terres, la balance hydrique globale est insuffisante, il est nécessaire de procéder aux balances hydriques des eaux superficielles, des eaux de la zone d'aération et des eaux de la nappe phréatique. Seulement de cette façon, il est possible de faire ressortir le paramètre principal qui est l'échange des eaux de la zone d'aération avec les eaux de la nappe phréatique, (mouvement ascendant ou descendant de l'eau et des sels solubles).

Enfin, dans les conditions de mise en valeur des terres, il est nécessaire de déterminer les balances hydriques pour des années de fréquence déterminée et pour les périodes critiques de l'année.

On considère que les conditions naturelles du périmètre sont homogènes....

L'équation du bilan hydrique sur 1 ha pour une année :

$$\Delta W_{b.h} = (\bar{F} - \bar{R}) + (\bar{F} - \bar{R}) + I^b + C + P_a - E + P \quad (I.1)$$

Où :

$\Delta W_{b.h}$ La variation des réserves d'eau dans le sol. (m³/ha) (De la surface du sol jusqu'à la couche imperméable).

$(\bar{F} - \bar{R})$ Flux et reflux des eaux superficielles, sur 1 ha, (m³/ha)

$(\bar{F} - \bar{R})$ Flux et reflux des eaux souterrains sur 1 ha (m³/ha)

I^b Alimentation en eau brute d'irrigation. (m³/ha)

C Rejet des eaux d'irrigation. (m³/ha)

P_a Précipitations atmosphériques (m³/ha)

E Somme de l'évaporation et l'évapotranspiration (m³/ha)

P Échange entre les eaux de la nappe phréatique et les eaux des nappes plus profondes (m³/ha)

Le réseau hydrographique de la vallée de l'Oued Righ montre qu'aucun périmètre subir à des eaux superficielles venant du bassin versant, donc le flux superficiel ($\bar{F} = 0$), et du fait que les périmètres ont des pentes très faible ($\bar{R} = 0$).

Le flux et le reflux des eaux de la nappe sont déterminés d'après les conditions hydrogéologiques par la formule :

$$(\bar{F} - \bar{R}) = \frac{k \cdot T_m (y_1 - y_2) L \cdot t}{S_p^b} \quad (I.2)$$

Où :

k Coefficient de filtration moyen de la couche aquifère, m/j.

T_m Epaisseur moyen de la couche aquifère, m.

$(y_1 - y_2)$ Pente de la surface de la nappe phréatique à l'amont et à l'aval du périmètre.

L Largeur du courant des eaux de la nappe, m.

t Période 365 jours.

S_p^b Surface brute du périmètre irrigué, ha.

La détermination du coefficient de filtration moyen ou la vitesse d'écoulement moyenne de la nappe phréatique a été faite par la loi de Darcy :

$$v = -K(\Delta h/\Delta l) \quad (I.3)$$

Où :

v est la vitesse de Darcy [L/T] ; K la conductivité hydraulique [L/T] = 4.01 m/j (Tesco,1983) ; Δh terme d'hauteur d'eau [L] ; Δl terme de distance [L].

Le gradient hydraulique ($\Delta h/\Delta l$) et la direction d'écoulement de la nappe phréatique ont été déterminés par le logiciel (The Groundwater Flow Calculator) développé par (Morrison et Munster, 2015). En réalité le logiciel GFC automatise le processus manuel de la méthode de (Heath, 1987) de la commission géologique des États-Unis (USGS) qui décrit un procédé de détermination du gradient hydraulique et de la direction d'écoulement d'eau souterraine dans un aquifère non confiné en utilisant trois puits (piézomètres) dans une configuration triangulaire.

La méthode consiste à la détermination de :

- 1- La position géographique des puits ou des piézomètres à l'aide d'un **GPS** (coordonnées géographiques) ;
- 2- L'élévation du sol en mètres au niveau du site du puits (par rapport à une donnée constante, niveau de la mer) ;
- 3- La hauteur du tubage de puits en mètres au-dessus de la surface du sol ;
- 4- La profondeur de la nappe phréatique en mètres de la partie supérieure du tubage de puits.

En effet, les développeurs du logiciel GFC ont créé une copie ou une application pour le téléphone mobile (Smartphone) ou ils ont rendu tout la manipulation très facile.

Tous les données nécessaires pour les calculs ont été déterminés à l'aide d'un Smartphone et une sonde de calcul piézométrique.

Les piézomètres existant dans la région de périmètre d'Ourlana sont dans la figure I.10 :



Figure I. 10: Position géographique des piézomètres de mesure. (google earth, 2016)

Les résultats des calculs du logiciel **GFC** sont :

Le gradient hydraulique : **0,00456 m/m.**

La direction d'écoulement : **37,8** degrés dans le sens horaire à partir du vrai Nord.

$$v = -K(\Delta h/\Delta l)$$

$$v = -4.01 \times 0,00456$$

La vitesse de Darcy égale à **0,0182 m/j**

Pour calculer la vitesse d'écoulement moyenne de la nappe phréatique, on divise la vitesse de Darcy sur la porosité active de notre sol :

$$k = 0,0182/0,6$$

$$k \approx 0,030 \text{ m/j}$$

T_m Epaisseur moyen de la couche aquifère, m.

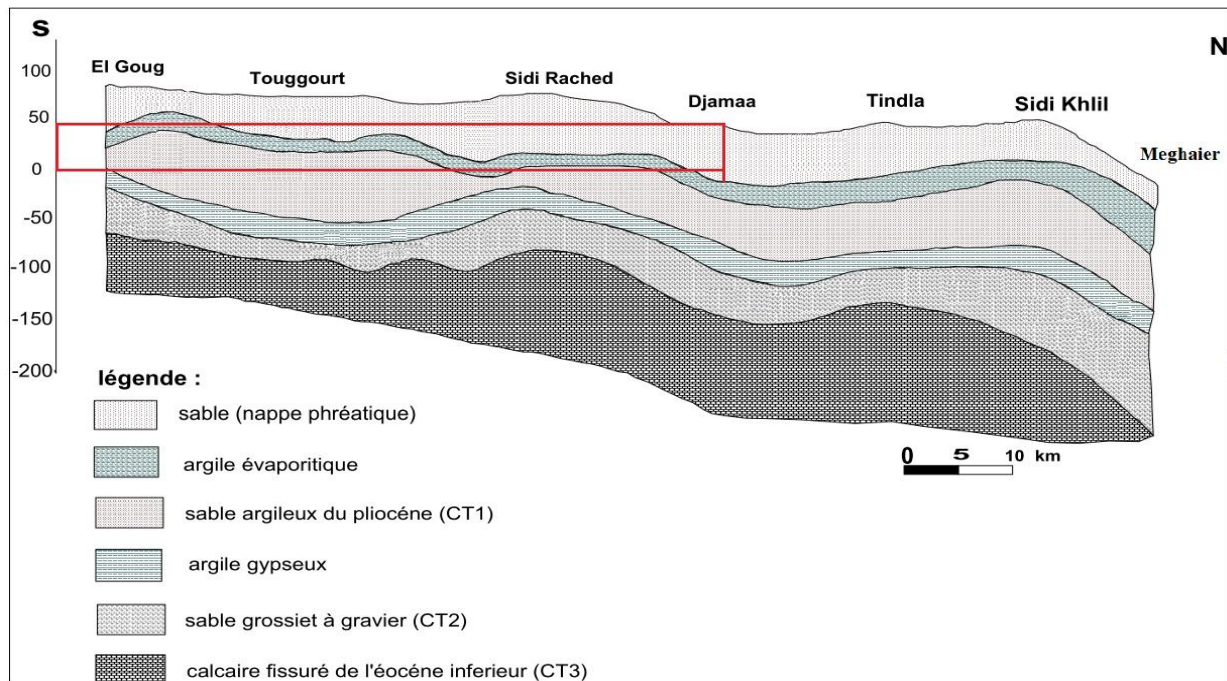
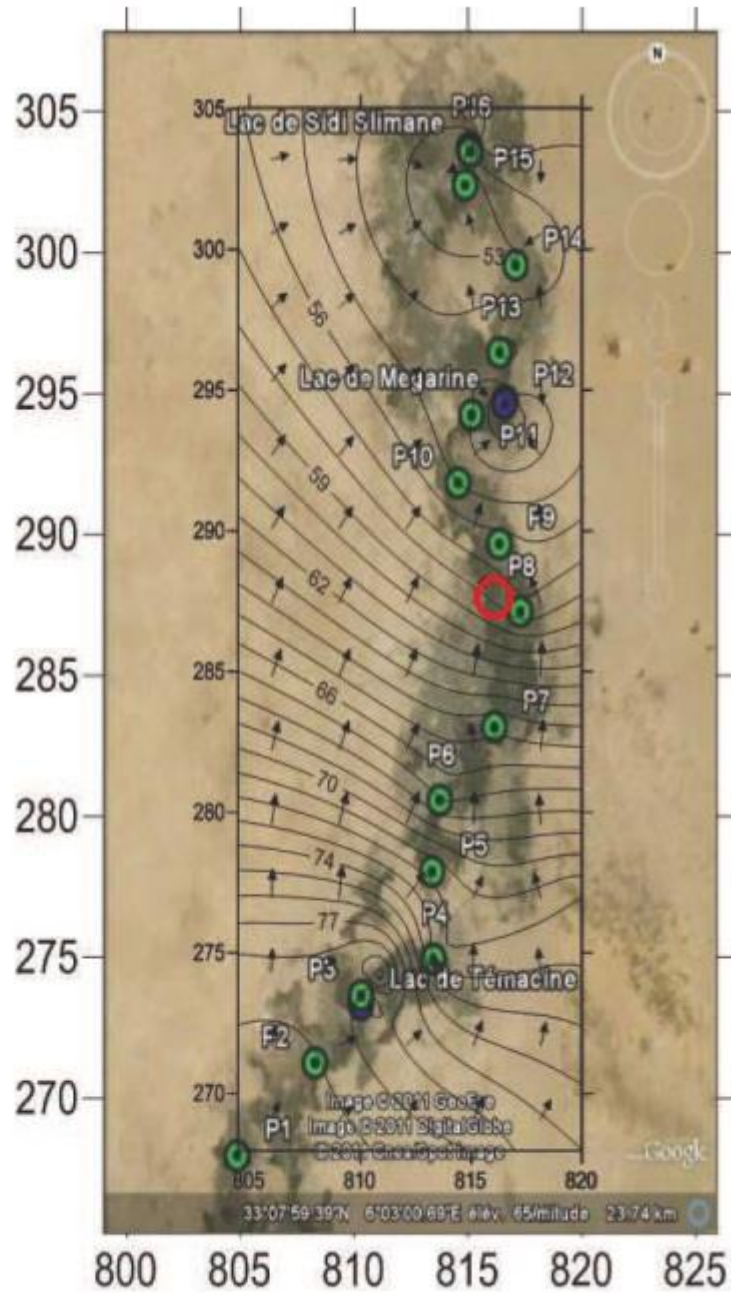


Figure I. 11: Epaisseur moyen de la couche aquifère (ANRH, 2009)

D'après la figure I.11 $T_m \approx 60 m$.

$(y_1 - y_2)$ Pente de la surface de la nappe phréatique à l'amont et à l'aval du périmètre.



Légende

- ▶ : Sens d'écoulement
- P10 : point d'eau
- (rouge) : Périmètre d'Ourlana

Figure I. 12: Carte piézométrique de la nappe phréatique, septembre 2010 (Debbakh, 2012 modifiée)

Pente à l'amont = 0.001 %

Pente à l'aval = 0.004 %



Figure I. 13: Périmètre irrigué d'Ourlana (google maps, 2016)

L Largeur du courant des eaux de la nappe, m. **L = 3480 m.** (Figure I.13)

S_p^b Surface brute du périmètre irrigué, ha. **S_p^b = 536 ha.** (Figure I.13).

t Période 365 jours.

$$(\bar{F} - \bar{R}) = \frac{0,030 \times 60 \times 0.003 \times 3480 \times 365}{536}$$

$$(\bar{F} - \bar{R}) = 12.79 \left(\frac{m^3}{ha} \right)$$

Le rejet des eaux d'irrigation est négligeable, pour une bonne organisation des arrosages ($C = 0$)

Les eaux d'irrigation :

$$I_{cult} = I + \emptyset_c \quad (I.4)$$

I Dose d'irrigation nette sur 1 ha irrigué, (m³/ha)

$$I = K_{ut} \cdot M_p = K_{ut} (\alpha_1 M_1 + \alpha_2 M_2 + \alpha_n M_n) \quad (I.5)$$

Où :

M_p Dose d'irrigation pondérée, (m³/ha)

M_1, M_2, M_n Dose d'irrigation des cultures de l'assolement, (m³/ha)

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_n$ Pourcentage de surface occupée par chaque culture

K_{ut} Coefficient d'utilisation des terres.

$$I_{cult} = 22279 \left(\frac{m^3}{ha} \text{ par an} \right) \quad (\text{Tesco, 1983})$$

\emptyset_c Pertes par filtration des eaux à partir des canaux d'irrigation. Dans notre cas les pertes ne sont pas considérées suite au mode d'irrigation à la parcelle dans la vallée de l'Oued Righ.

L'évaporation de la surface des eaux superficielles est nulle, vu l'absence de retenue d'eau.

L'évapotranspiration pondérée est déterminée par :

$$E = \alpha_1 E_1 + \alpha_2 E_2 + \alpha_n E_n \quad (I.6)$$

Où :

E_1, E_2, E_n évapotranspiration des cultures de l'assolement, (m³/ha)

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_n$ Pourcentage de surface occupée par chaque culture

Les cultures utilisées sont principalement les palmiers dattiers et comme culture sous palmiers ils ont utilisé la luzerne

$$E = \alpha_1 E_1 + \alpha_2 E_2 + \alpha_3 E_3 + \alpha_4 E_4$$

$$E = (1 \times 12646) + (0.1 \times 9670) + (0.1 \times 3290) + (0.05 \times 6810) \\ = 14282 \text{ (m}^3\text{/ha)} \text{ (Tesco, 1983)}$$

P Échange entre les eaux de la nappe phréatique et les eaux des nappes plus profondes est nulle puisque la couche imperméable est importante, $P = 0$

$$\Delta W_{b,h} = (\bar{F} - \bar{R}) + I^b - E \quad (\text{I.7})$$

$$\Delta W_{b,h} = 12.79 + 22279 - 14282$$

$$\Delta W_{b,h} = 8009.79 \text{ (m}^3\text{/ha)}$$

Si $\Delta W_{b,h} > 0$ - augmentation des réserves d'eau dans le sol sur tous le périmètre

Pour estimer la répartition de ces réserves d'eau dans la tranche de sol et l'influence des eaux de la nappe phréatique, on considère la balance hydrique des eaux de la zone d'aération plus les eaux de surface :

L'équation de la balance des eaux de la zone d'aération sur 1 ha pour 1 année :

$$\Delta W_{z,a} = (\bar{F} - \bar{R}) + I^b + \alpha P - E + g \quad (\text{I.8})$$

Où :

g Échange des eaux de la nappe avec les eaux de la couche d'aération, (m³/ha)

$\Delta W_{z,a}$ La variation des réserves d'eau dans la couche d'aération (m³/ha)

αP Précipitation utiles, (m³/ha)

La valeur du volume d'eau échangé entre les eaux de la nappe et les eaux de la couche d'aération "g" est prise avec signe plus dans le sens ascendant (de bas en haut)

Dans les conditions d'une moyenne interannuelle on peut considérer $\Delta W_{z,a} \approx 0$, ce qui permet d'évaluer approximativement l'échange "g" et par conséquent la tendance des processus physico-chimiques dans le sol.

A savoir si $g > 0$ dépôt de sels solubles dans la couche active.

Si $g \leq 0$ lessivage des sels solubles de la couche active.

$$g = E - (\bar{F} - \bar{R}) - I - \alpha P \quad (\text{m}^3/\text{ha}) \quad (\text{I.9})$$

$$g = 14282 - 12.79 - 22279$$

$$g = - 8009.79 \text{ (m}^3/\text{ha)}$$

Si la valeur de 'g' est faible cela veut dire, qu'en moyenne pour 1 année il existe un équilibre mobile des sels solubles dans la couche active du sol.

Enfin, en prenant en considération tous les changements apportés au volume d'irrigation, on procède à la balance hydrique des eaux de la nappe.

La balance hydrique des eaux de la nappe s'écrit :

$$\Delta W_{e.n} = (\bar{F} - \bar{R}) + \phi - g + p \quad (\text{I.10})$$

$$\Delta W_{e.n} = 12.79 - (-8010)$$

$$\Delta W_{e.n} = 8022.6 \text{ (m}^3/\text{ha)}$$

Si $\Delta W_{e.n} > 0$, les réserves de la nappe augmentent chaque année, le niveau des eaux s'élève.

La valeur de la remontée de la nappe est :

$$\Delta h = \frac{\Delta W_{e.n}}{10^4 \cdot \mu} \quad (\text{I.11})$$

μ - coefficient de porosité de drainage de la zone d'aération $\approx 0,6$

$$\Delta h = \frac{8022.6}{6000}$$

$$\Delta h = 1.34 \text{ m}$$

Cette remontée de la nappe salée pour chaque année cause un grand problème de salinité sur la couche active du sol.

I.5 Conclusion

L'étude des conditions naturelles et anthropiques qui contrôle la balance hydrique et salin dans les limites des périmètres montre que les paramètres climatiques, hydrogéologiques, la qualité des eaux d'irrigation et de la nappe phréatique sont les facteurs plus importants.

La vallée de l'Oued Righ avec un climat typiquement désertique est une région idéale pour le développement de la salinité des sols. L'accumulation des sels solubles est due essentiellement à la remontée de la nappe phréatique dont les eaux extrêmement salée avec de fortes températures (évaporation), combinée à la rareté des précipitations.

La remonté du niveau de la nappe, crée une alternation du régime salin des terres. Pendant le processus de remontée, les eaux de la nappe dissolvent les sels solubles et à de faibles profondeurs commençant à s'évaporer ce qui provoque une salinisation des couches supérieures des sols.

Dans les zones arides le sens et l'intensité des processus de variations des conditions hydro agricole en générale se déterminent par la composition initiale des sels solubles dans les sols, les eaux de la nappe, les conditions de drainage, l'intensité du régime de lessivage et la minéralisation des eaux d'irrigation.

Les échanges cationiques n'influent pratiquement pas sur les processus de mouvement des sels solubles et la formation du type de régime salin.

Chapitre II

Analyse Bibliographique

II.1 Introduction

La plupart des terres mises en valeur de la vallée de l'Oued Righ, et d'autres régions du pays contiennent des réserves de salinité initiales importantes, principalement dans la phase solide (sous forme cristalline) dû à une présence d'une nappe phréatique proche de la surface du sol salée, ce qui a pour conséquence une limitation des rendements des cultures.

Afin de prévoir et de gérer le risque de salinisation secondaire des terres irriguées et par voie de conséquence garantir une production agricole élevée et stable, un régime d'irrigation à caractère lessivant est devenu une exigence primordiale. La dose d'eau nécessaire pour le lessivage des sels solubles est un processus important qui régit la remise en état des sols salins.

II.2 Lessivage et régime d'irrigation à caractère lessivant

Le lessivage des terres salées est un ensemble de mesures visant à garantir la réduction des concentrations excessives des sels toxiques dans le sol jusqu'à une concentration limite admissible pour les cultures, en fournissant de l'eau supplémentaire à la surface du sol et l'élimination de la solution salée se tenue à l'aide d'un drainage à l'extérieur de la zone de lessivage qui est la principale méthode de contrôle de la salinité des terres irriguées.

Selon les motifs organisationnels et économiques le lessivage des terres salées se présente généralement en deux types : un lessivage capital (de remise en état) et un lessivage d'exploitation (d'entretien). Les terres avec une salinisation secondaire, fortement salées, ont besoin un lessivage capital, tandis que le lessivage d'entretien est effectué pour des terres salées nouvellement mise en valeur.

Le lessivage capital est un lessivage qui est mis en œuvre pour la remise en état des sols très salins lors de la préparation pour le développement de ces grandes surfaces. Ce lessivage est réalisé selon des conceptions appropriées en appliquant des doses de lessivage de plus de 10.000 m³/ha pour le dessalement de la couche racinaire du sol. Sur les sols anciens irrigués, le lessivage capital est appliqué dans le cas où on a des terres très salées dans l'agriculture.

Cependant, le lessivage d'entretien est un lessivage des sols salins qui signifie un dessalement périodique du sol au cours de la saison végétatif en vue de liquider la salinité saisonnière sur les terres mal drainées.

Le but principal de lessivage d'entretien est le maintien des résultats obtenu pendant la période de mise en valeur (période de lessivage capital) en assurant un régime d'irrigation à caractère lessivant. Si les eaux faiblement minéralisées (**1-2 g/l**) sont utilisés pour l'irrigation, des lessivages doivent être effectués une ou deux fois par an ou au moins à la fin de la saison de croissance. Avec les eaux d'irrigation de concentration de (**4-6 g/l**), il est nécessaire d'effectuer un lessivage à tout autre arrosage, ou même chaque arrosage. La norme d'arrosage qui est capable de produire l'effet de lessivage doit être dépassé le volume correspondant à la capacité de l'humidité du terrain par 20 à 30%. Ce «**surplus**» d'eau, dilue les sels laissés par les arrosages précédents et les transportes vers les eaux souterraines et ensuite vers le réseau de drainage, qui les portent loin du système. L'arrosage plus fréquent à des normes modérées empêche la salinisation saisonnière des sols. La salinité du sol n'augmente pas dans ce cas, car elle correspond finalement à la composition du produit de l'eau d'irrigation et d'évaporation. (Kovda, 1976).

II.3 Régime de lessivage

Pendant la période d'exploitation, la prévention de la salinisation secondaire et le maintien d'une teneur optimale de la quantité et de la composition des sels est exécutée par un approvisionnement en eau d'irrigation avec une quantité supérieure à la nécessité des cultures de 5 à 20%. Ce type de régime d'irrigation est appelé comme **le régime d'irrigation à caractère lessivant**; il crée un mouvement descendant de l'eau et des sels dans la zone d'aération. Le régime de lessivage est mis en œuvre par le lessivage d'exploitation sous forme de lessivage saisonnier en période d'automne-hiver ou printemps où en augmentant la dose d'arrosage d'une fraction de lessivage pendant la saison végétatif.

La nécessité d'un régime d'irrigation à caractère lessivant, son intensité et le temps de l'approvisionnement en eau supplémentaire doit être justifiée par l'élaboration d'une prévision du régime hydro-salin de la couche active des sols pour une période suffisamment longue (période de rotation des cultures).

II.4 Détermination de la dose de lessivage

La détermination de la dose d'eau de lessivage des sols salins dépend particulièrement des propriétés physico-hydriques du sol, de la configuration chimique des sels solubles dans la solution de sol, de la méthode d'irrigation et de la disponibilité des ressources en eau...etc. La détermination de la dose d'eau de lessivage est réalisée par des méthodes empiriques, semi empiriques, analytiques et numériques.

II.5 Méthodes existantes pour la détermination des doses de lessivage

II.5.1 Formules empiriques et semi-empiriques

Actuellement, il existe beaucoup de formule empirique pour le calcul des doses de lessivage qui sont valables pour des différentes conditions des sols. Le tableau II.1 regroupe des diverses formules empiriques et semi-empirique pour le calcul de la dose de lessivage.

Tableau II. 1 Formules empiriques et semi-empiriques existantes pour le calcul de la dose de lessivage (Papadoupoulous, 1972)

| N° | Auteur et année | Formules | Remarques |
|----|-----------------------|---|--|
| 1 | A.N. Kostyakov (1936) | $N = h \cdot w_{max}(w_f - w) + N_I$ | N – dose de lessivage en m^3/ha ; h – la profondeur de la couche lessivée (m) ; w_{max} - capacité totale d'eau en% ; w_f – la capacité de l'eau de terrain en% ; w – l'humidité du sol avant le lessivage en% ; N_I – quantité supplémentaire d'eau au-dessus de la capacité totale en eau du sol nécessaire pour déplacer les sels dissous en m^3/ha . |
| 2 | L. P. Rozov (1936) | $N = wf - w + nwf$ | wf – la capacité de l'eau de terrain en m^3/ha ; w - quantité d'eau dans le sol avant le lessivage en m^3/ha ; n -coefficient compris entre 0,5 et 2 en fonction du degré de salinité, de la structure mécanique du sol, la minéralisation des eaux souterraines ; déterminée expérimentalement ; nwf - quantité d'eau supplémentaire, nécessaire pour déplacer les sels dissous. |
| 3 | S. V. Astapov (1943) | $N = wf - n + 10^4(H - h)/r$ | H – distance entre la surface et les eaux souterraines avant le lessivage ; h – distance entre la surface et les eaux souterraines après le lessivage ; $r = 100 / (m - k)$ m – porosité totale en volume de la couche de sol au-dessus des eaux souterraines %. k – l'humidité capillaire de la même couche %. |
| 4 | V.A. Shaumyan (1944) | $N = nN_0 = 100hn(wf - w)$ | N_0 – volume approximatif d'eau nécessaire pour remplir un hectare à la capacité de l'eau de terrain et à la profondeur de la couche racinaire ; n – nombre de cycles de lessivage (le temps entre les cycles est de 3-4 jours) ; w_f – la capacité de l'eau de terrain en% ; w – l'humidité du sol avant le lessivage en% ; h – épaisseur de la couche lessivée. |
| 5 | V. R. Volobuev (1948) | $N = W_1 + W_2 + W_3 + W_4$ | W_1 partie de dissolution. W_2 partie de déplacement ; W_3 l'évaporation au moment de processus du lessivage ; W_4 évaporation après que l'eau de surface disparaître. |
| 6 | V.M. Legostaev (1953) | $N = W_1 + W_2 + W_3 + n_1 - O_1 - O_2$ | W_1 partie de dissolution. W_2 partie de déplacement ; W_3 l'évaporation au moment du procédé du lessivage ; n_1 perte non productive pendant le lessivage en raison de la fuite de l'eau par les passages non capillaires ; O_1 les précipitations, etc. O_2 l'eau condensée. |

| | | | |
|----|---------------------------------|---|---|
| 7 | A.N. Kostyakov (1936) | $N = 100h\delta[(wf - w) + (c_0 - c_r) / k]$ | <p>h – épaisseur de la couche étant lessivé en m ; δ – poids volumique du sol ; wf – la capacité de l'eau de terrain en% du poids ; w – humidité du sol au moment du lessivage en% du poids ; c₀ – teneur initiale de sel en% du poids ; c_r – teneur en sel admissible après le lessivage ; k – coefficient de déplacement ou du lessivage des sels en tons/ 1 m³ d'eau ; dépend des propriétés physiques du sol, la profondeur des eaux souterraines, la teneur et la nature des sels.</p> |
| 8 | N.A. Besednov (1953) | $N = aS$ | <p>a – volume d'eau, nécessaire pour retirer une unité de sel du premier mètre de sol en m³/ t ; S – est la quantité de sels à éliminer de la couche supérieure du sol.</p> |
| 9 | V. A. Kovda (1971) | $N = 400n_1n_2n_3 \pm 100$ | <p>n₁ coefficient dépend de la structure mécanique du sol (Pour le sable n₁ = 0,5, pour limon n₁ = 1,0, pour l'argile n₁ = 2,0) ; n₂ dépend de la distance aux eaux souterraines h (pour h = 7-10 m n₂ = 1,0, h = 5 m n₂ = 1,5, h = 1,5-2 m n₂ = 3,0) ; n₃ dépend de la minéralisation des eaux souterraines (pour une faible et moyenne minéralisation n₃ = 1,0, pour une minéralisation forte n₃ = 2, pour une très forte minéralisation n₃ = 3,0).</p> |
| 10 | V. R. Volobuev (1959) | $N = a \lg \frac{c_0}{c_r}$ * pour une couche de 1 m. | <p>c₀ – teneur en sel initial en% dans la couche 1 m ; c_r – teneur en sel admissible après le lessivage ; a – coefficient selon le degré et le caractère de la salinité et les propriétés du sol.</p> |
| 11 | V. R. Volobuev (1959) | $N = a \lg \frac{c_0}{c_r} + \frac{\alpha}{\mu} h$ * Pour $h > 1$ m. | <p>h – épaisseur de la couche lessivé. M – coefficient dépendant de la distance entre les drains d et le coefficient de filtration k pour $d = 200$ m et $k = 2$ m / jour $\mu = 2,6$; pour $d = 100$ m $\mu = 3,7$).</p> |
| 12 | P. I. Panin (1962) | $N = 2.3kw_{max} \lg(c_0/c_r)$ | <p>w_{max} la capacité de l'eau de terrain total ; c₀ – teneur en sel initial en% du poids dans la couche 1 m ; c_r – teneur en sel admissible après le lessivage ; k – constante déterminé expérimentalement</p> |
| 13 | N. G. Minashina (1963) | $N = \frac{w_{max} - w_{min}}{\lg w_{max} - \lg w_{min}} \lg \frac{c_0}{c_r - c_w}$ | <p>c₀ – teneur en sel initiale ; c_r – teneur en sel requise (admissible) ; c_w – teneur en sel de l'eau (salinité de l'eau) ; w_{min} – capacité minimale de l'eau dans la couche du sol ; w_{max} – capacité totale de l'eau de la couche lessivé.</p> |
| 14 | A.A Sidko (1963) | $N = nC$ | <p>C est le volume d'eau déterminé pour le type de sol donné d'après la différence de volume entre la capacité de l'eau totale et la capacité de l'eau de terrain dans la couche lessivé ; n est un coefficient déterminé d'après la formule : $n = \frac{\lg C_r - \lg C_0}{\lg q} = \frac{1}{\lg q} \lg \frac{C_r}{C_0}$ c₀ – teneur en sel initiale ; c_r – teneur en sel requise (admissible) ; q égal au rapport du volume d'eau à la capacité au terrain au volume d'eau à la capacité totale ($q < 1$).</p> |
| 15 | U.S. Salinity Laboratory (1954) | $LF = \frac{V_{dw}}{V_{inf}} = \frac{EC_{iw}}{EC_{dw}}$ | <p>V_{dw} (mm) et V_{inf} (mm) sont les volumes d'eau de drainage et d'eau d'irrigation infiltrée, respectivement. EC_{iw} (dS/m) et EC_{dw} (dS/m) sont les conductivités électriques de l'eau d'irrigation et de drainage, respectivement. LF – la fraction de lessivage</p> |

| | | | |
|----|---------------------------------|---|---|
| 16 | U.S. Salinity Laboratory (1956) | $LR = \frac{EC_{iw}}{EC_{dw}^*}$ | LR - besoin en eau de lessivage EC_{iw} (dS/m) et EC_{dw} (dS/m) sont les conductivités électriques de l'eau d'irrigation et de drainage, respectivement. |
| 17 | Rhodes (1974) | $LR = \frac{EC_{iw}}{5EC_e^* - EC_{iw}}$ $EC_{dw}^* = 5EC_e^* - EC_{iw}$ | E_{ce} (dS/m) est la conductivité électrique moyenne de l'extrait de sol saturé pour une culture donnée |

En 1951, Shoshin a traité une grande quantité de données expérimentales, et il a fait le tableau suivant pour la détermination de la dose de lessivage :

Tableau II. 2: Dose de lessivage selon Shoshin (Papadoupoulous, 1972)

| salinité initiale (en% du résidu sec) | | | |
|---------------------------------------|--|-----------------------------------|--|
| Salinité en chlorure | Salinité mixte avec une dominance du sulfate | Salinité en sulfate avec du gypse | Dose de lessivage N en m ³ / ha |
| 0.3 – 0.6 | 0.4 – 0.8 | 1.0 – 1.3 | 2000-2500 |
| 0.6 – 1.0 | 0.8 – 1.2 | 1.3 – 1.7 | 4000-5000 |
| 1.0 – 2.0 | 1.2 – 2.2 | 1.7 – 2.7 | 6000-7000 |
| 2.0 – 3.0 | 2.2 – 3.3 | 2.7 – 3.7 | 8000-10000 |
| > 3.0 | > 3.3 | > 3.7 | 10000 -12500 |

II.5.1.1 Autres modèles :

Il existe aussi des modèles pour le calcul des besoins de lessivage, mais ils sont tous basés sur le modèle du laboratoire de la salinité des Etats Unis (US salinity laboratory) avec des modifications parmi eux :

Le model WATSUIT, SALSODIMAR, SALTIRSOIL et Water-production-function...

Toutes les relations présentées ci-dessus ont en commun le fait qu'ils comprennent des coefficients empiriques dont les valeurs varient sans conformité mathématique stricte, bien que logiquement leurs variations sont explicables. Ainsi, on peut dire que toutes les formules contiennent des coefficients empiriques dont les valeurs dépendent des propriétés de sol et le degré et le caractère de la salinisation. Cela introduit quelques difficultés pour la détermination des doses de lessivage. En plus de ça, ces formules ne tiennent pas compte

autres facteurs importants comme la vitesse de l'écoulement de l'eau la tortuosité du milieu poreux et la durée du processus de lessivage. (Papadoupoulos et Golovanov, 1972).

L'utilisation des formules empiriques pour le calcul de la dose de lessivage des sols salins engendre un surplus et un gaspillage d'eau important (Letey et al. 2011).

La pratique dans plusieurs pays des zones arides a montré que les volumes d'eaux consommée pour le lessivage des terres salées sont très importantes à l'exemple de (Tableau II.3) (Bobtchenko et al. 1981, Kovda 1984, Meza 2001, 2003)

Tableau II. 3: Volume de lessivage utilisé dans la pratique dans certains pays au monde

| Pays | Région | Profondeur de la nappe phréatique (m) | Profondeur des drains (m) | Volume de lessivage (m ³ /ha) |
|-------------|-----------|---------------------------------------|---------------------------|--|
| Ouzbékistan | Boukhara | 1 m | - | 26000 |
| | | 3 m | - | 8000 |
| Iran | Dadjallah | - | 1.2 m | 16000 à 17000 |
| Egypte | Abyss | - | 0.9 m | 30000 à 34000 |

Pour mieux gérer et optimiser ces quantités d'eau de lessivage sur une rotation du plan de culture, on a recours à la théorie de transfert des sels solubles dans les milieux poreux qui permet de mettre en évidence plusieurs types de modèles décrivant le transport des sels solubles dans le sol.

II.5.2 Formules en fonction de l'équation de mouvement des sels (analytiques et numériques)

II.5.2.1 L'équation générale de mouvement des sels dans le sol :

L'équation différentielle unidimensionnelle générale qui décrit le transfert et la dissolution des sels dans des conditions d'irrigation et lessivage est :

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = D^* \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v \frac{\partial C}{\partial z} - \frac{\partial N_1}{\partial t} + \frac{\partial N_2}{\partial t} \quad (\text{II.1})$$

Où : C est la concentration de la solution du sol [ML^{-3}]; t est le temps [T]. D^* est le coefficient de diffusion-convection [L^2T^{-1}], v est la vitesse moyenne réelle de l'écoulement dans les pores [LT^{-1}]; z coordonné spatial [L]; N_1 est la concentration des sels qui peut disparaître de la solution de sol en raison des phénomènes de biodégradations, d'extraction par les racines des plantes ou des réactions chimiques... (négligeable dans le cas d'irrigation et lessivage) N_2 est la concentration de sels sous forme cristalline (ou à la phase solide) [ML^{-3}].

Cette relation présente beaucoup de facteurs qui régissent le transfert des sels dans le sol, parmi eux le phénomène d'adsorption :

R est le facteur de retard :

$$R = 1 + \frac{\rho k}{\theta} \quad (\text{II.2})$$

Où : K est un coefficient de distribution empirique caractérisé la réaction d'échange, θ est l'humidité du sol volumétrique ou la porosité totale [L^3L^{-3}]; ρ est la densité apparente du sol [ML^{-3}]

S'il n'y a pas d'interactions entre le soluté et le sol lorsque la valeur de la capacité d'échange cationique (CEC) est faible (Tableau II.4), k devient nulle et $R = 1$.

Le tableau II.4 présente l'importance de la valeur de la capacité d'échange cationique dans les phénomènes d'échanges.

Tableau II. 4: Importance de la valeur de CEC dans les phénomènes d'échanges (Moudrikh et al, 2011)

| Valeur de CEC mEq/100 g de sol | Niveau de réaction d'échange |
|--------------------------------|------------------------------|
| < 5,0 | Très faible |
| 5,1-15,0 | Faible |
| 15,1-25,0 | Assez faible |
| 25,1-35,0 | Moyen |
| 35,1-45,0 | Assez élevée |
| > 45,0 | Elevée |

A partir des données de tableau II.4, on peut conclure qu'à partir d'une valeur inférieure ou égale à 15 mEq / 100 g de la capacité d'échange cationique, le phénomène n'a pas d'impact sur les propriétés physico-hydrrique du sol, en conséquence les résultats des prévisions de la dynamique de la salinité dans le sol.

L'équation (II.1) prend la forme (II.3) en cas d'absence d'adsorption et la décomposition:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D^* \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v \frac{\partial C}{\partial z} + \frac{\partial N_2}{\partial t} \quad (\text{II.3})$$

Où :

D^* est le coefficient de diffusion-convection [L^2T^{-1}] $D^* = \lambda v^n + D_m$ où D_m est la diffusion moléculaire [L^2T^{-1}] ; v est la vitesse moyenne réelle de l'écoulement dans les pores [LT^{-1}] ; l'exposant "n" est une constante empirique généralement supposé égal à 1 ; λ est la dispersivité [L], la valeur de λ augmente avec l'augmentation de l'hétérogénéité de particules de sols et de la tortuosité des pores du sol. Les expériences d'Aydarov (1985) montrent que le paramètre λ augmente de façon non linéaire avec la pondération de la granulométrie du sol de **0,06 cm** dans le sable jusqu'à **50 cm** dans les limons lourds (Shein, 2005).

Aydarov a fait un travail remarquable au sujet de la dispersivité, il a montré que le paramètre de dispersion hydrodynamique λ peut être évalué à partir d'une courbe en fonction de la granulométrie en l'absence de données expérimentales. (Tableau II.5 et Fig.II.1)

Tableau II. 5: Paramètre de dispersivité λ en fonction de la composition granulométrique

| | | | | | |
|------------------|-------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| $d < 0,01$ mm, % | 10 | 10...20 | 20...40 | 40...60 | 60...80 |
| λ , m | 0,01...0,05 | 0,05...0,1 | 0,1...0,2 | 0,2...0,5 | 0,5...1,0 |

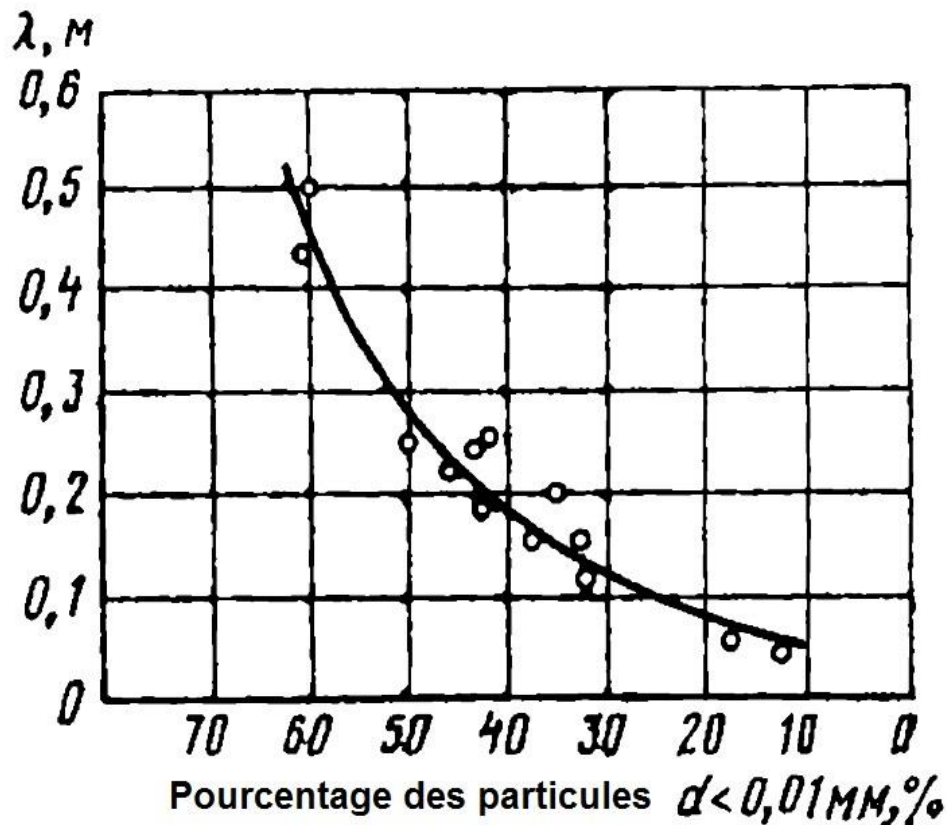


Figure II. 1: Graphique du paramètre de la dispersivité en fonction de la composition granulométrique du sol (d'après Aydarov)

En réalité lorsqu'on combine le vecteur de la vitesse \vec{v} avec l'axe Ox on distingue le coefficient de diffusion-convection longitudinal D_L et transversal D_T .

On trouve D_L dans le cas où la direction de la diffusion coïncide avec la direction de transfert par convection. Et lorsque la direction de transfert est perpendiculaire à la direction de la convection on trouve dans ce cas la diffusion transversale D_T . Selon les données expérimentales des chercheurs, D_L et D_T peut être déterminée par les formules suivantes:

$$D_L = D_m + \lambda_L v^n \quad (\text{II.4})$$

$$D_T = D_m + \lambda_T v^n \quad (\text{II.5})$$

Où : D_m est le coefficient de diffusion moléculaire [L^2T^{-1}]. ; λ_L et λ_T sont les dispersivités longitudinales et transverses, v est la vitesse moyenne réelle de l'écoulement La valeur de λ_L et λ_T dans chaque cas déterminée expérimentalement. Le tableau II.6 présente les résultats des

expériences réalisé pour la détermination du coefficient de convection-diffusion pour des différents types de sols.

Tableau II. 6: Résultats des expériences réalisé pour la détermination du coefficient de convection-diffusion (Borovski, 1974)

| Diamètre des grains (mm) | Porosité (%) | Vitesse de filtration dans le sol (cm/s) | Coefficient de dispersion L et T | | Source bibliographique |
|--------------------------|----------------------|---|---|--|-----------------------------|
| | | | D_L | D_T | |
| 0,10–0,25 | | $1 \cdot 10^{-2}$ $3 \cdot 10^{-2}$ | $1,3 \cdot 10^{-3}$ $3,3 \cdot 10^{-3}$ | | Day (1956) |
| 0,25–0,83 | 33,9 | $1,22 \cdot 10^{-2}$ | $7,32 \cdot 10^{-4}$ | | Lay, Kaufman Todd (1959) |
| | 38,0 | $7,1 \cdot 10^{-2}$ – $1,63 \cdot 10^{-1}$ $4,1 \cdot 10^{-2}$ – $1,35 \cdot 10^{-1}$ $1,62 \cdot 10^{-1}$ – $5,78 \cdot 10^{-1}$ | $3,22 \cdot 10^{-2}$ – $4,48 \cdot 10^{-2}$ $9,15 \cdot 10^{-3}$ – $2,05 \cdot 10^{-2}$ $3,08 \cdot 10^{-2}$ – $4,34 \cdot 10^{-1}$ | | Чжоу-Чэн-Сюнь (1961) |
| 0,92 1,40 0,45 | 40,0 39,0 39,0 | $9,8 \cdot 10^{-3}$ – $1,26 \cdot 10^{-1}$ $8,3 \cdot 10^{-3}$ – $1,24 \cdot 10^{-1}$ $9,8 \cdot 10^{-3}$ – $1,28 \cdot 10^{-1}$ | $4,9 \cdot 10^{-4}$ – $1,03 \cdot 10^{-1}$ $6,3 \cdot 10^{-4}$ – $1,56 \cdot 10^{-2}$ $1,89 \cdot 10^{-4}$ – $4,6 \cdot 10^{-3}$ | | Harleman, Mehlhorn (1963) |
| 0,20 | | $3,2 \cdot 10^{-4}$ – $2,7 \cdot 10^{-2}$ $6,5 \cdot 10^{-3}$ $1,6 \cdot 10^{-3}$ $5,1 \cdot 10^{-4}$ $3,3 \cdot 10^{-4}$ | $2,5 \cdot 10^{-5}$ – $2,5 \cdot 10^{-3}$ | $7,1 \cdot 10^{-6}$ $2,4 \cdot 10^{-6}$ $2,1 \cdot 10^{-6}$ $1,6 \cdot 10^{-6}$ | Baetsle and Soufrian (1967) |

Les résultats du Tableau II.6 montrent que la dispersion transversale est moins dépendante de la vitesse du fluide que la dispersion longitudinal. Quand la vitesse de filtration est élevée (comme le cas de la plupart des terres mis en valeur dans le Sahara) D_L peut dépasser D_T 50 fois ou plus. À faibles vitesses d'écoulement, D_L et D_T ont des valeurs numériques similaires (Borovski, 1974). De cette conclusion, on peut dire que dans le mouvement dans les milieux poreux et dans le cas d'une texture sableuse (un fort pourcentage de sable), on peut négliger la dispersion transversale $D_L \gg D_T$.

Dans la science de la mise en valeur des terres, des divers chercheurs ont montré que le coefficient de dispersion total (diffusion-convection) peut varier de 1×10^{-4} jusqu'à $100 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{jour}$ (Borovski, 1974) (Veriguin et al. 1979).

II.5.2.2 Relation entre la dispersion et la vitesse d'eau dans les pores :

La diffusion moléculaire et la dispersion mécanique ont une importance relative selon les régimes d'écoulements. Dans ce cadre des différentes études ont été réalisées, Pfannkuch a fait un travail remarquable en milieu saturé en eau, et en l'absence d'interaction physico-chimique entre soluté et sol avec l'utilisation des variables adimensionnelles. L'un d'eux est connu comme le nombre de Peclet.

$$P_e = \frac{vL}{D_m} \quad (\text{II.6})$$

Où L est une longueur caractéristique du milieu poreux étudié. Dans notre cas, pour un milieu poreux, elle est souvent prise égale au diamètre moyen des grains ; v est la vitesse réelle moyenne de l'écoulement et D_m le coefficient de diffusion moléculaire du soluté dans l'eau.

Sur la base du nombre de Peclet (P_e) dans la gamme de vitesses d'eau moyennes dans les pores, la diffusion moléculaire domine la dispersion du soluté à des petites vitesses de déplacement et cède la place à la dispersion mécanique à des vitesses plus grandes. (Gaudet, 1978).

La figure II.2 montre la variation de D^*/D_m en fonction de nombre de pecllet. De cette courbe, on peut définir cinq régimes pour la dispersion en fonction de la vitesse d'écoulement. (Bear, 1972)

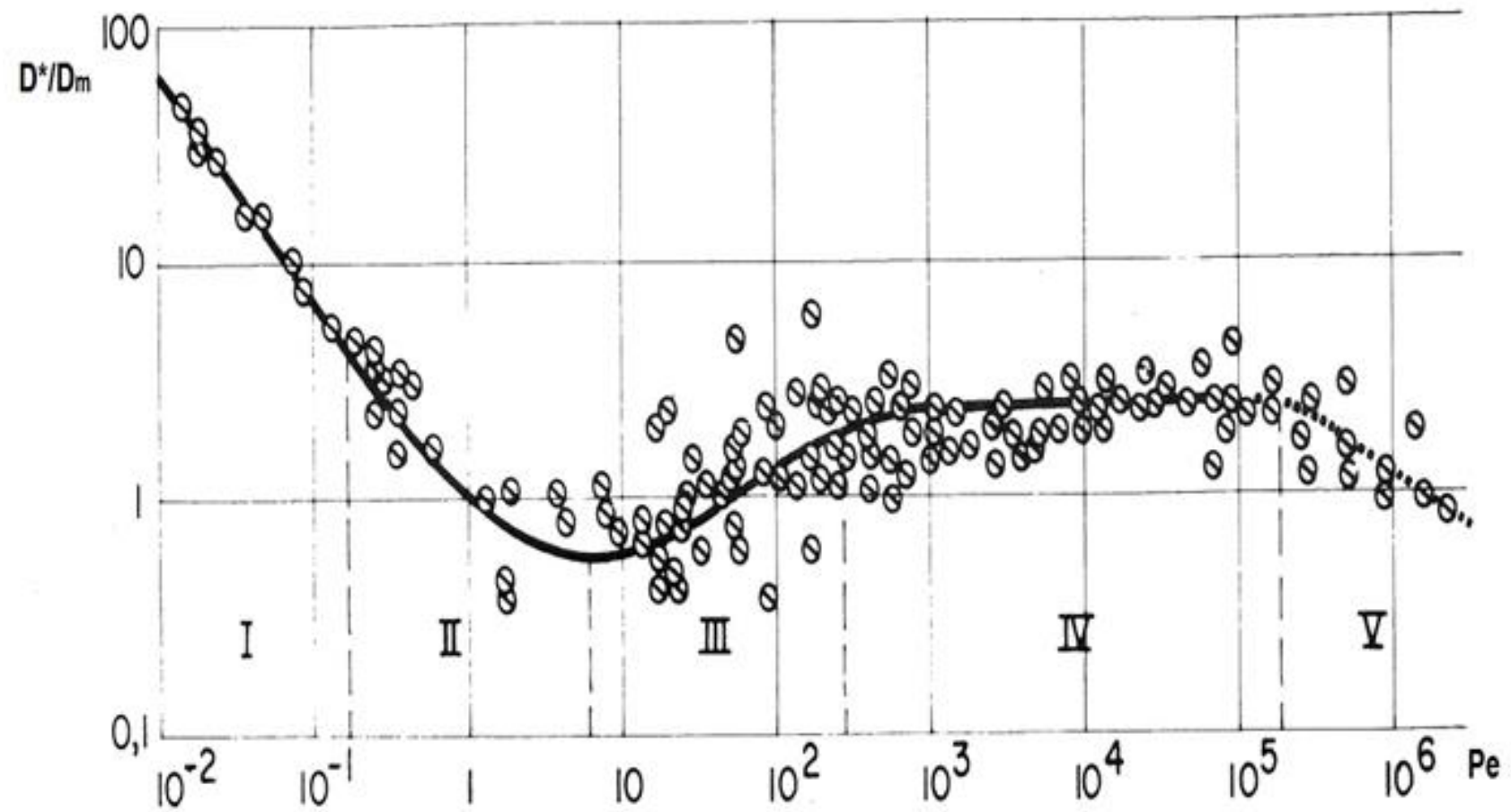


Figure II. 2: La relation entre la diffusion moléculaire et la convection (d'après Pfankuch, 1963 cité dans Gaudet, 1978)

Zone I : La vitesse du fluide est très faible. Ceci est une zone où la diffusion moléculaire prédomine et contrôle la dispersion.

Zone II : Dans cette zone, l'effet de diffusion moléculaire est du même ordre de grandeur que celle de la dispersion mécanique et la somme des deux doit être envisagée.

Zone III : Ici la principale propagation est causée par la dispersion mécanique mais la diffusion moléculaire ne peut pas être négligée car elle réduit les effets de la dispersion mécanique. Cette zone est appelée régime d'interférence entre les deux phénomènes. Les deux mécanismes ne sont plus additifs, car ils interfèrent l'un avec l'autre.

Zone IV : Ceci est une région où la dispersion mécanique qui prédomine. C'est le domaine de la convection pure. Les effets de la diffusion moléculaire sont négligeables.

Zone V : Ceci est une autre zone de dispersion mécanique pure, mais les effets de l'inertie et de la turbulence ne peut plus être négligé.

A partir des résultats de recherches précédentes, on distingue qu'il y on a beaucoup de paramètres qui dépendent la dispersion totale, mais il s'agit essentiellement de la vitesse de l'écoulement v qui permet de décrire le régime de dispersion. (Veriguin et al. 1979) a indiqué dans ces travaux que les valeurs du coefficient de diffusion-convection peut comprise à partir de $(k \times 10)$ jusqu' à $(k \times 10^{-3}) \text{ m}^2/\text{jour}$ ($1 \leq k \leq 10$), tandis que D_m ne dépasse pas $10^{-4} \text{ m}^2/\text{jour}$. Ainsi, $D_m \ll \lambda v^n$ et D^* sera: $D^* = \lambda v$.

Le transport de soluté peut affecter également par d'autre phénomène tel que la précipitation et la dissolution des minéraux.

N_2 est la concentration de sels sous forme des cristaux (ou à la phase solide) [ML^{-3}] ;

On peut décrit la cinétique de dissolution/précipitation de zéro ordre par l'expression :

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = \theta \gamma \quad (\text{II.7})$$

Où :

$$\gamma = \gamma_e + \frac{\gamma_s \rho}{\theta} \quad (\text{II.8})$$

Où : γ_e constante de vitesse de dissolution/précipitation (production) dans la phase d'eau liquide [T^{-1}]; γ_s constante de vitesse de dissolution/précipitation dans la phase solide [T^{-1}]; θ est la porosité totale [L^3L^{-3}]; ρ la densité apparente [ML^{-3}].

Dans la nature, il y a deux sortes de salinité du sol: 1) une salinité de surface superficiel, ou une salinité sous forme un film autour des grains 2) une salinité volumétrique. (Veriguin et al. 1979). Nous nous intéressons dans notre travail uniquement pour la salinité de surface ou pour les sels facilement soluble.

Pour les minéraux dont les ions sont facilement solvatés, comme le cas du chlorure de sodium (NaCl), la vitesse de dissolution de sels comme tout procédé chimique hétérogène dépend, d'une part, sur la vitesse des réactions chimiques sur la surface de contact du solvant (l'eau de lessivage) avec les sels, et d'autre part sur la vitesse de transport de l'eau par convection et diffusion moléculaire au voisinage des surfaces.

Des chercheurs dans le domaine de milieu poreux ont proposé une autre forme de la cinétique chimique dans le cas de la dissolution et le lessivage des sels facilement solubles qui décrit ce phénomène, parmi eux Koyanderom et Bogusskim (1876), Shukarev (1896) et plus tard Veriguin (1969) :

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = -\gamma(C_s - C) \quad (\text{II.9})$$

Où :

$$\gamma = \frac{\omega D}{\delta} \quad (\text{II.10})$$

Où : D est le coefficient de diffusion dans le film (la pellicule) de sel au tour de la phase solide de sol ; ω est la surface spécifique de sels dans la roche disponible pour la dissolution, la valeur de ω peut être déterminée par la nature de la salinité et les conditions de contact avec les sels de sol et l'eau. (Veriguin et al. 1979) ; δ la densité des sels dans la phase solide [ML^{-3}]; C_s est la concentration de la solution du sol lorsque il est saturée au maximum [ML^{-3}]; C est la

concentration des sels dans la solution de sol [ML^{-3}]. En 2007, Mikayilov a publié une autre forme pour le paramètre γ :

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 \sqrt{v} \quad (\text{II.11})$$

Où : γ est le coefficient de la vitesse de dissolution des sels en phase solide [T^{-1}]; γ_1 et γ_2 étant des constantes en fonction des propriétés physico-chimiques du sol, sel, et le type de salinisation; v est la vitesse moyenne de l'écoulement de l'eau du sol [MT^{-1}].

Pendant la période de lessivage ou sous un régime d'irrigation (c'est à dire, dans le cas de taux élevés d'infiltration), les valeurs de \mathbf{D}_m et γ_1 n'ont pas besoin d'être calculées, en pratique, \mathbf{D} et γ sont déterminés par le taux d'infiltration, et, par conséquent, il peut être suggéré que $\mathbf{D} = \lambda |\mathbf{v}|$ et $\gamma = \gamma_2 \times \sqrt{v}$ (Veriguin et al. 1979), (Shein, 2001) (Bear, 1972) (Pfanckuch, 1963) (Mikayilov, 2007). Seulement au taux d'infiltration très faibles les paramètres \mathbf{D}_m et γ_1 affecte sensiblement la migration des sels.

II.5.2.3 Résolution de l'équation de convection-dispersion :

La résolution de l'équation de convection-dispersion nécessite :

- La connaissance de la loi d'échange et de la fonction de dissolution/précipitation et de décomposition ;
- la fixation des conditions initiales et aux limites ;
- l'utilisation de l'équation nécessite les valeurs des paramètres D^* et v .

Il y a deux grandes méthodes de résolution qui donnent les solutions de transport dans le milieu :

La méthode analytique et la méthode numérique.

II.5.2.3.1 Conditions initiale et aux limites :

Pour obtenir des solutions de forme fermée pour les équations de bilan de soluté et de débit, il faut fournir une formulation mathématique des conditions initiales et aux limites.

II.5.2.3.1.1 La condition initiale :

La condition initiale est une distribution naturelle de la concentration de la substance à travers la couche de sol considéré, elle varie selon le type de sol et la salinisation, les conditions climatiques, les conditions hydrogéologiques...

La condition initiale générale est :

$$C(z, 0) = f(z) \quad (t = 0) \quad (\text{II.12})$$

Où $f(z)$ peut prendre plusieurs formes: une valeur constante avec la distance, une fonction exponentielle de façon croissante ou décroissante avec z ...

II.5.2.3.1.1.1 Distribution initiale de concentration constante ou homogène :

La condition initiale pour les problèmes de transport de soluté et la plus simple est généralement présentée sous la forme de distribution d'une concentration homogène dans le domaine.

$$C(z, 0) = C_0 = \text{constante} \quad (\text{II.13})$$

C'est-à-dire que le milieu poreux contient une solution de concentration constante C_0 pour une profondeur z quelconque.

Presque toutes les solutions analytiques de l'équation de convection-dispersion utilisent cette condition comme une condition initiale vue sa simplicité, tel que les solutions de Lapidus et Amundson (1952), Brenner (1962), Averianov (1978) ...

II.5.2.3.1.1.2 *Distribution initiale de concentration étagée (graduée ou forme d'escalier) :*

Une distribution initiale de concentration étagée, comprenant des fonctions de **n** pas (étape), elle peut être écrite sous la forme où :

$$C_i(Z) = U_i \quad Z_i \leq Z < Z_{i+1} \quad (i = 1, 2, \dots, n ; Z_1=0 \text{ et } Z_{n+1} \rightarrow \infty) \quad (II.14)$$

U_i est une constante.

La figure II.3 montre un exemple d'une telle distribution initiale de concentration étagée

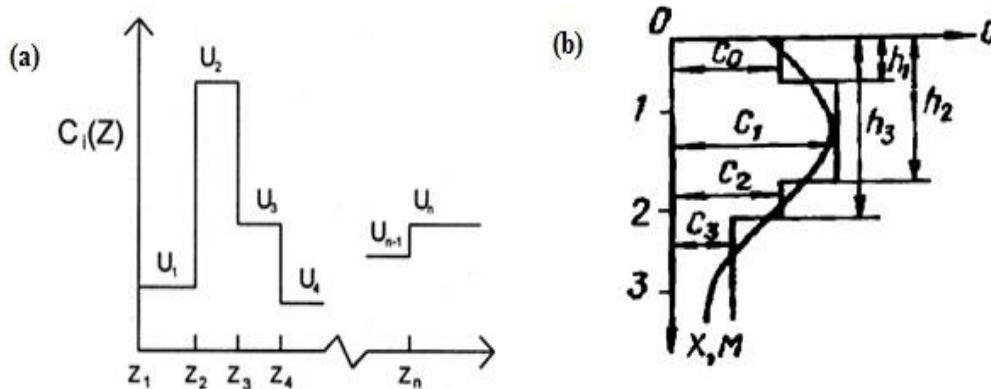


Figure II. 3: Distribution initiale étagée. a) D'après Van Genuchten, 1982

La solution spécifique pour cette condition est donnée par Rex (1967) et par Van Genuchten et Alves (1982).

II.5.2.3.1.1.3 *Distribution exponentiel :*

L'équation de convection-dispersion peut aussi être résolue pour une condition initiale (concentration) qui change exponentiellement avec la distance :

$$C_i(Z) = U_1 + U_2 \exp(-\lambda^1 Z) \quad (II.15)$$

Où : U_1 , U_2 et λ^I sont des constantes. La solution spécifique pour cette condition est donnée par Van Genuchten et Alves (1982), Papadopoulos et Golovanov (1972).

II.5.2.3.1.2 Conditions aux limites :

La condition à la limite dépend de la forme géométrique finie, semi-infini du milieu poreux.

Deux conditions aux limites différentes peuvent être appliquées à $x = 0$ (la limite supérieure):

Une condition aux limites de première type ou type de concentration (condition de Dirichlet) de la forme :

$$C(0, t) = g(t) \quad (z = 0) \quad (\text{II.16})$$

Où : $g(t)$ peut également prendre plusieurs distributions, comme une valeur constante dans le temps (alimentation en solution continu), une distribution de type d'impulsion, ou une fonction exponentielle augmenter ou diminuer avec le temps, nous intéressons dans notre travail que pour une alimentation en solution continu (le cas de lessivage sous un régime d'irrigation)

Ou une condition de troisième type ou type de flux (condition de Cauchy) (Dankvert, 1953) la formulée pour la première fois:

$$-D \frac{\partial C}{\partial z} + vC = v g(t) \quad (z = 0) \quad (\text{II.17})$$

Lorsqu'on résout les problèmes de lessivage des sols sur la surface de la terre on prend :

$$g(t) = C_1 \quad (\text{II.18})$$

Où : C_1 est la concentration en sel de l'eau de lessivage (ou eau d'irrigation) et obtient :

Pour la condition du premier ordre :

$$C(0, t) = C_1 \quad (z = 0) \quad (\text{II.19})$$

Et pour la condition du troisième ordre :

$$D \frac{\partial C}{\partial z} = vC - v C_1 \quad (z = 0) \quad (\text{II.20})$$

La condition de premier ordre ne tient pas compte de l'échange de sel entre l'eau de lessivage et l'eau interstitielle. Une caractéristique particulière de cette condition (condition de première ordre) est que la zone de désalinisation complète est momentanément formée sur la surface du sol (Mikayilov, 2007) et elle peut conduire à des erreurs de bilan de masse lorsqu'elle est appliquée aux expériences de déplacement dans des colonnes (Van Genuchten et Alves, 1982), mais cette condition peut être réalisée dans des expériences de laboratoire, si l'eau est alimentée dans la section d'entrée à partir d'un réservoir dont son volume est sensiblement plus grand que le volume des pores de la colonne ou dans des conditions de terrain (Veriguin et al. 1979).

La condition de troisième ordre qui décrit le bilan de sel dans la section d'écoulement d'entrée : la quantité de sels d'arriver au sol à cause de l'infiltration $v C_1$ est égale à leur quantité sur la surface du sol formé en raison de la diffusion et l'infiltration (convection) (Mikayilov, 2007).

La condition de troisième ordre est une condition plus stricte et plus naturelle sur la surface du sol et elle décrit la désalinisation progressive de la couche superficielle du sol à la concentration C_1 ce qui correspond au processus de dessalement réelle.

Pour la limite inférieure, la condition suivante peut être appliquée :

$$\frac{\partial C}{\partial z}(\infty, t) = 0 \quad (\text{II.21})$$

Cette condition suppose la présence d'une colonne de sol semi-infini. Lorsque des solutions analytiques basées sur cette condition limite sont utilisées pour calculer les courbes d'effluents de colonnes finies, des erreurs peuvent être introduites. Une condition aux limites alternative celle qui est utilisée fréquemment pour les études de déplacement, et celle d'un gradient de concentration égale zéro à l'extrémité inférieure de la colonne (Danckwerts, 1953):

$$\frac{\partial C}{\partial z}(L, t) = 0 \quad (\text{II.22})$$

Où L est la longueur de la colonne. Cette condition est généralement utilisée pour le lessivage des sols salins de longueur finie (frontière d'un sol imperméable à l'eau $z = L$). Et également utilisée lors du lessivage où il existe un drainage ou à la présence d'une nappe phréatique peu profonde. (Mikayilov, 2012)

Les solutions analytiques de l'Equation de Convection Dispersion pour les conditions initiales et aux limites précédentes ont été résumées dans un recueil exhaustif par (Van Genuchten et Alves, 1982) et la recherche des méthodes de résoudre continue.

La solution de beaucoup problèmes de transport nécessite l'utilisation des méthodes numériques en raison de changements dans la saturation de l'eau (à la suite de l'irrigation, l'évaporation et de drainage), la variabilité spatiale et temporelle des propriétés du sol, ou à les conditions initiales et aux la limites compliquées. Les méthodes numériques (méthode implicite et méthode explicite) sont basées sur une discrétisation du domaine spatial et temporel de la solution. La précision des résultats numériques dépend des paramètres d'entrée, l'approximation de l'équation aux dérivées partielles, la discrétisation et l'implémentation de la solution numérique dans un code informatique pour résoudre le problème (Feike et al, 1999). Très peu nombres de textes et modèles (ou programmes) existent sur la modélisation numérique, parmi eux nous citons le programme **HYDRUS 1D** qui est un Pro-logiciel de simulation de mouvement unidimensionnel de l'eau, la chaleur, et de soluté (Simunek et al, 2008).

Nous nous intéressons ici uniquement pour les solutions analytiques vues sa simplicités, et comme il a déjà montré dans plusieurs études que les modèles analytiques sont utiles pour fournir des études initiales ou approximatives sur des scénarios de transport de soluté ou de pollution dans le milieu poreux.

II.5.2.4 Détermination de la dose de lessivage par des formules analytique :

a- Cas d'une couche de sol saturé semi-infini :

Dans le cas où la nappe phréatique se situe à une distance importante, l'équation (II.1) a des solutions analytiques qui permettent de calculer des concentrations à une profondeur arbitraire z dans un temps arbitraire en considérant les conditions aux limites suivante :

$$C(z, 0) = C_0 = \text{constante} \quad (t = 0) \quad (\text{II.23})$$

$$D \frac{\partial C}{\partial z} = vC - v C_1 \quad (z = 0) \quad (\text{II.24})$$

$$\frac{\partial C}{\partial z}(\infty, t) = 0 \quad (z \rightarrow \infty) \quad (\text{II.25})$$

Où : C_1 est la concentration en sel dans l'eau de lessivage, et $C_0(\mathbf{x})$ est la concentration initiale de sel dans le sol.

La solution générale de l'équation (II.1) avec les conditions initiale et aux limites ci-dessus peut être écrite sous la forme adimensionnelle comme suit : (Mikayilov, 2007)

$$n(y, \tau) = \frac{\omega - (y, \tau)}{1 + b} + \frac{\omega + (y, \tau)}{1 - b} + \frac{2\varphi(y, \tau)}{b^2 - 1} - 0,5 \exp(-\sigma\tau) \int_0^\infty n_0(\xi) \left[\frac{\partial M(y, \xi)}{\partial \xi} \right] d\xi \quad (\text{II.26})$$

Où :

$$n(y, \tau) = \frac{C_* - C(y, \tau)}{C_* - C_1}, \quad n_0(\xi) = \frac{C_* - C_0(\xi)}{C_* - C_1}$$

$$C_* = \frac{\sigma_1}{\sigma} C_s, \quad \sigma = \sigma_1 + \sigma_2$$

$$\omega \pm (y, \tau) = \exp [2\eta y(1 + b)] \operatorname{erfc} [(y \pm b\tau)],$$

$$\varphi(y, \tau) = \exp (4\eta y - \sigma\tau) \operatorname{erfc} [(y + \tau)r]$$

$$M(y, \xi) = \operatorname{erfc}(k_-) + [\operatorname{erfc}(k_+) - 4\sqrt{\eta\tau} \cdot \operatorname{ierfc}(k_+)] \exp (4\eta y),$$

$$k_{\pm} = (\tau + \xi \pm y)r$$

$$\operatorname{erfc}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_z^\infty \exp(-k^2) dk,$$

$$\operatorname{ierfc}(z) = \int_z^\infty \operatorname{erfc}(k) dk = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-z^2) - \operatorname{erfc}(z)$$

$$y = \frac{z}{L}, \quad \tau = \frac{vt}{L.R}, \quad b = \sqrt{1 + \frac{\sigma}{\eta}}, \quad r = \sqrt{\frac{\eta}{\tau}}$$

$$\eta = \frac{L}{4\lambda}, \quad \lambda = \frac{D^*}{v}, \quad \sigma_1 = \frac{\gamma_2 L}{\theta\sqrt{v}}, \quad \sigma_2 = \frac{\mu L}{v}$$

erfc est la fonction d'erreur complémentaire (de Gausse) (Likov, 1967).

Des différents cas particuliers utiles peuvent être dérivés de cette solution générale (Mikayilov, 2007) :

a) Lorsque $C_0(\mathbf{z}) \equiv C_0$ (la distribution initiale des sels est homogène ou constante), alors la solution est sous la forme :

$$\begin{aligned} \frac{C_* - C(y, \tau)}{C_* - C_1} &= \frac{\omega - (y, \tau)}{1 + b} + \frac{\omega + (y, \tau)}{1 - b} + \frac{2\varphi(y, \tau)}{b^2 - 1} \\ &+ \frac{C_* - C_0}{C_* - C_1} R(y, \tau) e^{-\sigma\tau} \end{aligned} \quad (\text{II.27})$$

Où :

$$R(y, \tau) = 0.5(\text{erfc}[(\tau - y)r] + \{\text{erfc}[(\tau + y)r] - 4\sqrt{\eta\tau} \text{ierfc}[(\tau + y)r]\} \times \exp(4\eta y)).$$

b) La concentration initiale de sels de la solution de pores dans les sols fortement salins est proche de la saturation, c'est à dire, $C_0(\mathbf{z}) \equiv C_s$. Ensuite, en l'absence de décomposition, c'est-à-dire ($\mu = 0$ et $\sigma_2 = 0$), par conséquent, $\sigma = \sigma_1$ et $C_* = C_s$ on a :

$$\frac{C_s - C(y, \tau)}{C_s - C_1} = n_1(y, \tau, \sigma_1) \quad (\text{II.28})$$

$$= \frac{\omega - (y, \tau)}{1 + b_1} + \frac{\omega + (y, \tau)}{1 - b_1} + \frac{2\varphi(y, \tau)}{b_1^2 - 1}, \quad b_1 = \sqrt{1 + \frac{\sigma_1}{\eta}}$$

c) En l'absence de sels dans la phase solide c'est-à-dire quand $\gamma_2 = 0$ et $\sigma_1 = 0 \rightarrow C_* = 0$ et en présence de la décomposition, on a :

$$\frac{C(y, \tau)}{C_1} = \frac{\omega - (y, \tau)}{1 + b_2} + \frac{\omega + (y, \tau)}{1 - b_2} + \frac{2\varphi(y, \tau)}{b_2^2 - 1} + \frac{C_0}{C_1} R(y, \tau) \exp(-\sigma_2 \tau) \quad (\text{II.29})$$

$$b_2 = \sqrt{1 + \frac{\sigma_2}{\eta}}$$

d) En l'absence de sels dans la phase solide ($\gamma_2 = 0$ et $\sigma_1 = 0$) et en l'absence de la décomposition ($\mu = 0$ et $\sigma_2 = 0$), on a :

$$\begin{aligned} \frac{C(y, \tau) - C_1}{C_0 - C_1} &= 0.5 \{ \operatorname{erfc}[(\tau - y)r] \\ &+ \{ \operatorname{erfc}[(\tau + y)r] - 4\sqrt{\eta\tau} \operatorname{ierfc}[(\tau + y)r] \} \\ &\times \exp(4\eta y) \} \end{aligned} \quad (\text{II.30})$$

La solution de l'équation (II.1) avec les conditions initiales et aux limites ci-dessus est donnée aussi par :

1. Formule de S.F Averyanov :

Pour le cas d'une nappe phréatique profonde ($x \rightarrow \infty$) et une distribution de salinité initiale homogène, Averyanov (1965) a obtenu la solution pour l'équation (II.1) sous la forme:

$$C(x,t) = C_w + (C_0 - C_w) m_0 \quad (\text{II.31})$$

$$m_0 = \operatorname{erfc}(\lambda) + \left[(1 + 4a \cdot u) \operatorname{erfc}(u) - \frac{4a \cdot e^{-u^2}}{\sqrt{\pi}} \right] e^r \quad (\text{II.32})$$

$$\begin{aligned} a &= \frac{v\sqrt{t}}{2\sqrt{D}} = \frac{v \cdot t}{2\sqrt{Dt}} & r &= \frac{v}{D} x \\ \lambda &= a \left(1 - \frac{x}{vt} \right) & u &= a \left(1 + \frac{x}{vt} \right) \end{aligned} \quad (\text{II.33})$$

Où $C(x,t)$ concentration de sel en (x) au moment t ; C_0 est la teneur initiale en sel, C_w - la concentration de sel dans l'eau, **erfc** est la fonction d'erreur complémentaire (de Gausse) (Likov, 1967).

Il est possible à partir de (II.32) de trouver v tel que, lorsque $z = h$ et après t jours, la concentration C sera inférieure ou égale C_r (teneur en sel requis ou admissible) :

$$N = v t \mu \quad (\text{II.34})$$

N est la valeur de la dose de lessivage.

Quand $a \gg 1$ la formule (II.32) peut être résolue par rapport à N :

$$N = (2b\sqrt{D^*t} + h)\mu \quad (\text{II.35})$$

Le coefficient b est en fonction de la répartition initiale de la concentration C_0 et la teneur en sel requis C_r et peut être trouvée à partir de tableau II.7 ; h est la profondeur désirée du lessivage.

Tableau II. 7: Les valeurs de b dans la formule (II.32)

| | | | | | | | | | | |
|-----------|----------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| C_r/C_0 | 0 | 0.001 | 0.005 | 0.10 | 0.02 | 0.04 | 0.06 | 0.08 | 0.10 | 0.12 |
| b | ∞ | 2.19 | 1.82 | 1.65 | 1.45 | 1.24 | 1.10 | 0.99 | 0.91 | 0.83 |
| C_r/C_0 | 0.14 | 0.16 | 0.18 | 0.20 | 0.25 | 0.30 | 0.35 | 0.40 | 0.45 | 0.50 |
| b | 0.76 | 0.70 | 0.65 | 0.60 | 0.48 | 0.37 | 0.27 | 0.18 | 0.09 | 0 |

2. Formule d'Averyanov amélioré par Golovanov

Golovanov a amélioré la formule (II.32) d'Averyanov pour la détermination de la dose de lessivage, en rend les paramètres qui participent dans la formule définis plus précisément:

$$N = P_e (h + 2b\sqrt{\lambda m_a h}) \quad (\text{II.36})$$

Où

m_a - porosité efficace, dont la valeur tient compte des processus d'échange;

h – est la profondeur de la couche étant lessivé (1-2 m);

λ – est le paramètre de dispersion (la dispersivité);

b – est un coefficient, on peut le trouver à partir du tableau II.7.

En outre, la formule (II.36) ne dépend pas d'un paramètre important tel que le temps.

3. Formule de Reks :

Reks a trouvé la solution de (II.1), mais avec différentes conditions initiales (salinité initiale sous forme d'escalier ou étagé):

$$\begin{aligned} t = 0 \quad h_i \leq x < h_{i+1} \quad C = C_i & \quad i = 0, k - 1 \\ t = 0 \quad x \geq h_k \quad C = C_k & \end{aligned} \quad (\text{II.37})$$

Où :

$$\begin{aligned} t = 0 \quad h_i \leq x < h_{i+1} \quad C = C_i + \frac{C_{i+1} - C_i}{h_{i+1} - h_i} (k - h_i) & \quad i = 0, k - 1 \\ t = 0 \quad x \geq h_k \quad C = C_k & \end{aligned} \quad (\text{II.38})$$

Ici, i – est le numéro de la couche, h_i - distance depuis la surface jusqu'à la couche ($i + 1$).

La condition (II.38) suppose la distribution initiale par étapes, la condition (II.39) – suppose une distribution initiale par étape linéaire. La solution de l'équation (II.1) pour la condition (II.38) est la suivante:

$$C(x, t) = C_w + \frac{1}{2} \sum_{i=0}^k C_i \cdot m_i \quad (\text{II.39})$$

$$C_0 = C_0 - C_w \quad C_i = C_{i+1} - C_i \quad (i = 1, k - 1) \quad (\text{II.40})$$

$$m_i = \operatorname{erfc}(\lambda i) + \left[(1 + 4au_i) \operatorname{erfc}(u_i) - \frac{4ae^{-u_i^2}}{\sqrt{\pi}} \right] e^r \quad (\text{II.41})$$

$$a = \frac{v\sqrt{t}}{2\sqrt{D}} \quad r = \frac{v}{D}x \quad (\text{II.42})$$

$$\lambda i = a \left(1 - \frac{x}{vt} \right) + a \frac{h_i}{vt} \quad u_i = a \left(1 + \frac{x}{vt} \right) + a \frac{h_i}{vt}$$

Lorsque $k = 0$ (une seule couche) les expressions (II.32) et (II.40) sont les mêmes.

La formule (II.40) est particulièrement utile pour les prévisions de régime hydro-salin pendant plusieurs années.

b- Cas d'une couche de sol saturé fini :

Les solutions suivantes sont généralement utilisées pour le lessivage des sols salins avec une longueur finie, et également lors du lessivage où il existe un drainage ou à la présence d'une nappe phréatique peu profonde.

L'équation (II.1) a des solutions analytiques qui permettent de calculer des concentrations à une profondeur arbitraire z dans un temps arbitraire en considérant les conditions initiales et aux limites suivantes :

$$C(z, 0) = C_0 = \text{constante} \quad (t = 0) \quad (\text{II.43})$$

$$D \frac{\partial C}{\partial z} = vC - v C_1 \quad (z = 0) \quad (\text{II.44})$$

$$\frac{\partial C}{\partial z}(L, t) = 0 \quad (z \rightarrow L) \quad (\text{II.45})$$

Où : L est la profondeur de la nappe phréatique.

La solution générale des équations. (II.1) avec les conditions initiale et aux limites ci-dessus peut être écrite sous la forme adimensionnelle comme suit : (Mikayilov, 2007)

$$\begin{aligned} \frac{C_* - C(y, \tau)}{C_* - C_1} &= \sum_{n=0}^{\infty} E_n(y, \sigma) [1 - e^{-a(\sigma)F_0}] \\ &+ \sum_{n=0}^{\infty} H_n(y) e^{-a(\sigma)F_0} \int_0^1 \left[\frac{C_* - C(\xi)}{C_* - C_1} \right] X_n(\xi, \eta, h_n) e^{-2\eta\xi} d\xi \end{aligned} \quad (\text{II.46})$$

Où :

$$\begin{aligned} H_n(y) &= \frac{2X_n(y, \eta, h_n)}{h_n^2 + \eta^2 + \eta} \exp(2\eta y), \quad E_n(y, \sigma) = \frac{\eta h_n}{a(\sigma)} H_n(y) \\ a(\sigma) &= h_n^2 + \eta^2 + \eta\sigma, \quad \eta = \frac{L}{4\lambda}, \quad \lambda = \frac{D^*}{v}, \quad \tau = \frac{vt}{L.R}, \quad F_0 = \frac{\tau}{\eta} \end{aligned}$$

$$X_n(y, \eta, h_n) = h_n \cos(2yh_n) + \eta \sin(2yh_n)$$

$$h_n \text{ est la racine de l'équation } \tan(2h) = \frac{2\eta h}{h^2 - \eta^2}$$

Des différents cas particuliers utiles peuvent être dérivés de cette solution générale (Mikayilov, 2007) :

a) Lorsque $\mathbf{C}_0(\mathbf{z}) \equiv \mathbf{C}_0$ (la distribution initiale des sels est homogène ou constante), alors la solution (II.27) est sous la forme :

$$\frac{S_t - C(y, \tau)}{C_* - C_1} = \sum_{n=1}^{\infty} E_n(y, \sigma) [1 - e^{-a(\sigma)F_0}] + \frac{C_* - C_0}{C_* - C_1} \sum_{n=1}^{\infty} E_n(y, 0) (e^{-a(\sigma)F_0}) \quad (\text{II.47})$$

b) Lorsque $\mathbf{C}_0 = \mathbf{C}_S$ et en l'absence de décomposition :

$$\frac{C_S - C(y, \tau)}{C_S - C_1} = n_s(y, \tau, \sigma_1) = \sum_{n=1}^{\infty} E_n(y, \sigma_1) [1 - e^{-a(\sigma_1)F_0}], \quad (\text{II.48})$$

$$a(\sigma_1) = h_n^2 + \eta^2 + \sigma_1$$

c) En l'absence de sels dans la phase solide c'est-à-dire quand $\gamma_2 = \mathbf{0}$ et $\sigma_1 = \mathbf{0} \rightarrow \mathbf{C}_* = \mathbf{0}$ et en présence de la décomposition, on a :

$$\frac{C(y, \tau)}{C_1} = \sum_{n=1}^{\infty} E_n(y, \sigma_2) [1 - e^{-a(\sigma_2)F_0}] + \frac{C_0}{C_1} \sum_{n=1}^{\infty} E_n(y, 0) (e^{-a(\sigma_2)F_0}) \quad (\text{II.49})$$

$$a(\sigma_2) = h_n^2 + \eta^2 + \sigma_2$$

d) En l'absence de sels dans la phase solide et en l'absence de la décomposition, on a : (Brenner, 1962)

$$\frac{C(y, \tau) - C_1}{C_0 - C_1} = \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{2\eta h_n X_n(y, \eta, h_n)}{(h_n^2 + \eta^2)(h_n^2 + \eta^2 + \eta)} \right] \times \quad (\text{II.50})$$

$$\times \exp [2\eta y - (h_n^2 + \eta^2)F_0]$$

Néanmoins, les solutions analytiques publiées présentent habituellement la dépendance de la concentration du soluté en fonction du temps et de la profondeur. Dans le cas d'études sur la

salinité du sol dans des conditions de lessivage, il est peut être avantageux d'utiliser les solutions analytiques de l'équation de convection-dispersion qui présentent des dépendances de la concentration moyenne de sels solubles, dans le profil de sol en fonction de temps (Mikayilov et Pachepsky, 2010).

Et cela pour au moins les raisons suivantes : Premièrement, la teneur totale en sel dans le profil varie dans une moindre grandeur que la concentration en sel à une profondeur spécifique (Mikayilov, 2007). Deuxièmement, la variabilité spatiale de la salinité du sol à des intervalles de profondeur sélectionnés (des horizons) est souvent plus grande que la variabilité spatiale de la salinité du sol dans la couche englobant ces intervalles de profondeur. Par conséquent, les valeurs les plus fiables du paramètre de dispersivité λ peuvent être trouvées à partir de données sur le changement de la salinité dans le profil de sol pour représenter le lessivage du sel dans le champ sous irrigation. Troisièmement, les données historiques sur l'effet de l'irrigation et le lessivage sur la salinité des sols sont souvent présentées pour les profils de sol plutôt que pour des couches de sol séparées. L'analyse de ces données doit être basée sur la masse totale dans le profil du sol. (Mikayilov; Pachepsky, 2010) (Mikayilov, 2012) (Ekberli, 2006).

Plusieurs solutions ont été obtenues de l'équation (II.1) qui décrit la dissolution et le lessivage des sels solubles dans le sol au stade d'un régime transitoire pendant le lessivage.

La concentration moyenne dans la couche de sol avec une épaisseur (l) ($0 \leq l \leq L$) se trouve comme :

$$\bar{C} = \frac{S_t - C_1}{C_0 - C_1} = \frac{1}{l} \int_0^l C(z, t) dz = \frac{1}{i} \int_0^i C(y, \tau) dy \quad (\text{II.51})$$

Où $i = \frac{l}{L}$, a est souvent égale à **1 m**.

Donc on a :

$$\int_0^1 \left[\frac{C_* - C(y, \tau)}{C_* - C_1} \right] dy = \frac{C_* - S_\tau}{C_* - C_1}, \int_0^1 C(y, \tau) dy = S_\tau$$

$$\int_0^1 C_0(y) dy = S_0$$

1-- pour une couche de sol Semi-infini :

La solution analytique qui exprime la teneur en sel moyen dans un profil de sol semi-fini est comme suit : (Mikayilov, 2007) (Mikayilov et Azizov, 1985) :

$$\begin{aligned} \frac{C_* - S_\tau}{C_* - C_1} &= \frac{1}{\sigma} [f_1(\tau, \eta, 1) \exp(-\sigma\tau) - f_1(\tau, \eta, b)] + \\ &+ \left(\frac{C_* - S_0}{C_* - C_1} \right) f_2(\tau, \eta) \exp(-\sigma\tau) \end{aligned} \quad (\text{II.52})$$

Où :

$$f_1(\tau, \eta, b) =$$

$$0.5\{\exp [2\eta(1 + b)] \operatorname{erfc} [(1 + b\tau)r] + \exp [2\eta(1 - b)] \operatorname{erfc} [(1 - b\tau)r] - 2\},$$

$$f_2(\tau, \eta) =$$

$$0.5\{(\tau + 1)\exp (4\eta) \operatorname{erfc} [(\tau + 1)r] - (\tau - 1)\operatorname{erfc} [(\tau - 1)r]\}.$$

a) En absence de la décomposition et en l'absence de sels dans la phase solide on a :

$$\begin{aligned} \frac{S_\tau - C_1}{S_0 - C_1} &= f_2(\tau, \eta) \\ &= 0.5\{(\tau + 1)\exp (4\eta) \operatorname{erfc} [(\tau + 1)r] \\ &- (\tau - 1)\operatorname{erfc} [(\tau - 1)r]\} \end{aligned} \quad (\text{II.53})$$

$$\frac{S_\tau - C_1}{S_0 - C_1} = \Theta (\tau, \eta)$$

Où : Θ est la concentration relative.

Cette solution ($f_2(\tau, \eta)$) est illustrée dans le graphe suivant en fonction des différentes doses de lessivages τ (Mikayilov, 2007):

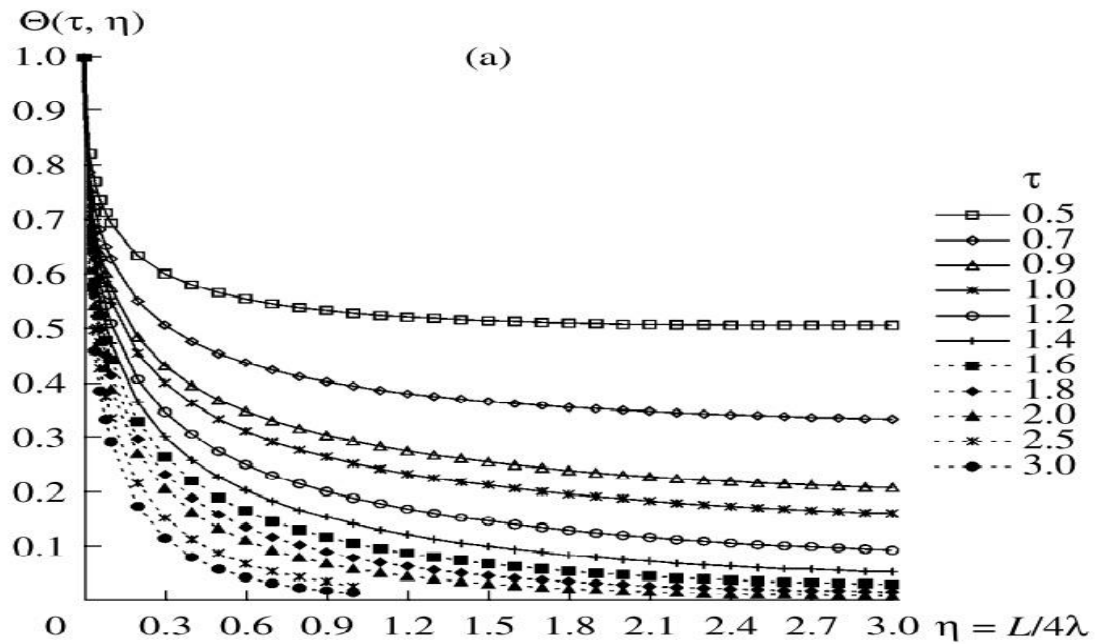


Figure II. 4: plots calculés à l'aide d'un programme informatique pour la formule $f_2(\tau, \eta)$ en fonction des différentes valeurs de dose de lessivage τ . (Mikayilov, 2007)

b) Lorsque la concentration de la solution interstitielle initiale (S_0) des sols très salins est proche de la concentration de saturation ($S_0 \cong C_S$) et (absence de la décomposition) on a :

$$\frac{C_S - S_\tau}{C_S - C_1} = \Theta(\tau, \eta, b_1) = \frac{1}{\sigma_1} [f_1(\tau, \eta, 1) \exp(-\sigma\tau) - f_1(\tau, \eta, b_1)] \quad (II.54)$$

$$b_1 = \sqrt{1 + \frac{\sigma_1}{\eta}}$$

2- pour une couche de sol fini :

La concentration moyenne adimensionnel de sels dans la solution de sol dans une couche $[0, L]$ avec une nappe phréatique peu profonde peut être déterminée par :

$$\begin{aligned} \frac{C_* - S_\tau}{C_* - C_1} &= \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_n(\sigma) [1 - e^{-a(\sigma)F_0}] \\ &+ \left(\frac{C_* - S_0}{C_* - C_1} \right) \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_n(0) e^{-a(\sigma)F_0} \end{aligned} \quad (\text{II.55})$$

Où :

$$\Phi_n(\sigma) = (-1)^{n+1} \left[\frac{(h_n^2 + \eta^2) \exp(2\eta) \sin^2(2h_n)}{2(h_n^2 + \eta^2 + \eta)a(\sigma)} \right],$$

$$\sin(2h_n) = (-1)^{n+1} \frac{2\eta h_n}{h_n^2 + \eta^2}.$$

a) En l'absence de la décomposition on a :

$$\begin{aligned} \frac{S_\tau - C_1}{S_0 - C_1} &= \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_n(0) e^{-a(\sigma_1)F_0} \\ &+ \left(\frac{C_S - C_1}{S_0 - C_1} \right) \sum_{n=1}^{\infty} [\Phi_n(0) - \Phi_n(\sigma_1)] [1 - e^{-a(\sigma_1)F_0}]. \end{aligned} \quad (\text{II.56})$$

b) Lorsque la concentration de la solution interstitielle initiale (S_0) des sols très salins est proche de la concentration de saturation ($S_0 \cong C_S$) et (absence de la décomposition) on a :

$$\frac{C_S - S_\tau}{C_S - C_1} = \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_n(\sigma_1) [1 - e^{-a(\sigma_1)F_0}] \quad (\text{II.57})$$

c) en absence de décomposition ($\mu = 0$) et en et en l'absence des sels dans la phase solide on a : (Veriguin et al. 1986)

$$\frac{S_\tau - C_1}{C_0 - C_1} = f_3(\tau, \eta) = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \left[\frac{\sin^2(2h_n)}{2(h_n^2 + \eta^2 + \eta)} \right] \exp [2\eta - (h_n^2 + \eta^2)F_0] \quad (\text{II.58})$$

$$\frac{S_{\tau} - C_1}{S_0 - C_1} = \Theta (\tau, \eta)$$

Où : Θ est la concentration relative.

Cette solution ($f_3(\tau, \eta)$) est illustrée dans le graphe suivant en fonction des différentes doses de lessivage τ (Mikayilov, 2007):

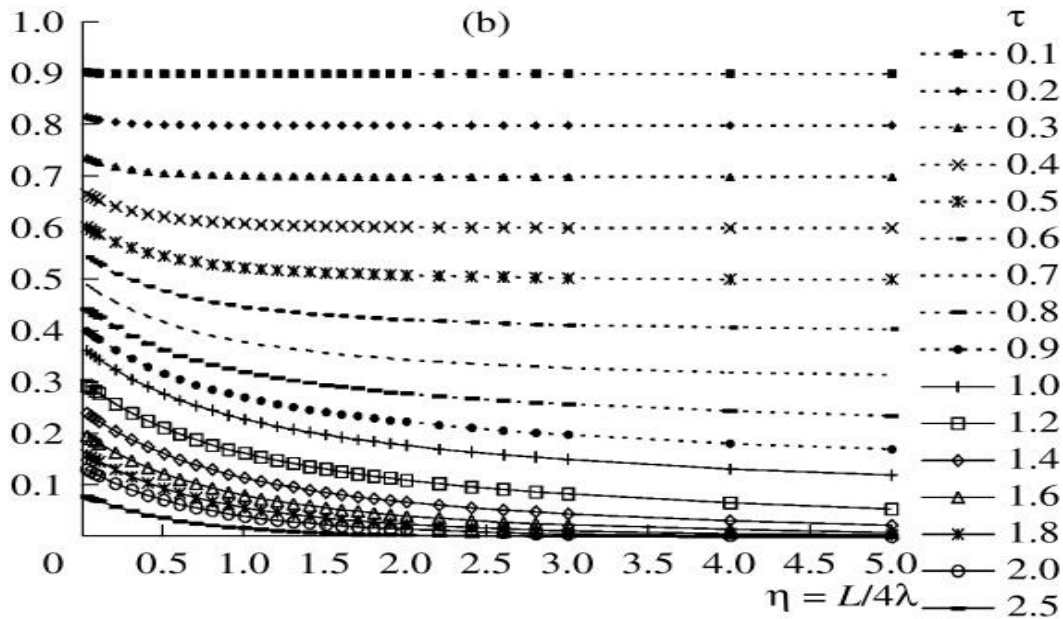


Figure II. 5: plots calculés à l'aide d'un programme informatique pour la formule $f_2(\tau, \eta)$ en fonction des différentes valeurs de dose de lessivage τ . (Mikayilov, 2007)

1.2.3. Formule de Veriguin, Mikayilov et Azizov :

En 1986, Veriguin et Mikyilov et Azizov ont trouvé une solution pour la détermination de la dose de lessivage pour l'équation de transfert (II.59) pour une concentration moyenne intégrale si $\lambda \geq 0.125$.

$$N(L) = \frac{2.303\eta \theta + k\phi L}{h_1^2 + \eta^2} \cdot \lg \left(\frac{C_0 - C_n}{C_t - C_n} \right) \tag{II.59}$$

Où : $N(L)$ est le volume d'eau de lessivage [L], C_0 la concentration initial [ML3] C_n la concentration de l'eau de lessivage [ML3] C_t la concentration admissible [ML3] L est la couche

lessivé, k constante d'adsorption de l'équation de Freundlich, ρ est la densité apparente [ML³], θ est la porosité totale [ML³], $\eta = \frac{L}{4\lambda}$, $\lambda = \frac{D^*}{v}$, h_1 a des valeurs en fonction des valeurs de η (Veriguin et al. 1986).

Tableau II. 8: Les valeurs de h_1 qui intervienne dans l'équation (II.60)

Racines de l'équation $\eta \operatorname{ctg} h_1 = h_1$ pour les différentes valeurs de η

| N° | η | h_1 | N° | η | h_1 |
|----|--------|--------|----|--------|--------|
| 1 | 0,05 | 0,2218 | 27 | 0,625 | 0,7170 |
| 2 | 0,06 | 0,2425 | 28 | 0,65 | 0,7285 |
| 3 | 0,07 | 0,2616 | 29 | 0,675 | 0,7397 |
| 4 | 0,08 | 0,2791 | 30 | 0,70 | 0,7506 |
| 5 | 0,09 | 0,2956 | 31 | 0,725 | 0,7611 |
| 6 | 0,10 | 0,3111 | 32 | 0,75 | 0,7714 |
| 7 | 0,125 | 0,3464 | 33 | 0,775 | 0,7813 |
| 8 | 0,15 | 0,3779 | 34 | 0,80 | 0,7910 |
| 9 | 0,175 | 0,4066 | 35 | 0,825 | 0,8005 |
| 10 | 0,20 | 0,4328 | 36 | 0,85 | 0,8097 |
| 11 | 0,225 | 0,4573 | 37 | 0,875 | 0,8187 |
| 12 | 0,25 | 0,4801 | 38 | 0,90 | 0,8274 |
| 13 | 0,275 | 0,5016 | 39 | 0,925 | 0,8359 |
| 14 | 0,30 | 0,5218 | 40 | 0,95 | 0,8443 |
| 15 | 0,325 | 0,5410 | 41 | 0,975 | 0,8524 |
| 16 | 0,35 | 0,5592 | 42 | 1,0 | 0,8603 |
| 17 | 0,375 | 0,5766 | 43 | 1,05 | 0,8757 |
| 18 | 0,40 | 0,5932 | 44 | 1,10 | 0,8904 |
| 19 | 0,425 | 0,6092 | 45 | 1,15 | 0,9044 |
| 20 | 0,45 | 0,6245 | 46 | 1,20 | 0,9179 |
| 21 | 0,475 | 0,6391 | 47 | 1,25 | 0,9308 |
| 22 | 0,50 | 0,6533 | 48 | 1,30 | 0,9432 |
| 23 | 0,525 | 0,6689 | 49 | 1,35 | 0,9551 |
| 24 | 0,55 | 0,6801 | 50 | 1,40 | 0,9666 |
| 25 | 0,575 | 0,6928 | 51 | 1,45 | 0,9776 |
| 26 | 0,60 | 0,7051 | 52 | 1,50 | 0,9882 |

Comme il est indiqué précédemment l'utilisation de ces solutions analytiques de l'équation de convection-dispersion nécessite la détermination des valeurs des paramètres D^* et γ_2 . Ces paramètres doivent être déterminés à partir des données de terrain spécial et des expériences de laboratoire. Leur détermination est réduite à la solution d'un problème inverse de la physique mathématique dans lequel les paramètres d'équations différentielles doit être trouvé à partir de la solution d'un problème connu (directe).

Il existe aussi des méthodes permettant de déterminer ces paramètres, comme les méthodes de différences finies, qui sont basées soit sur la solution des systèmes d'équations de transfert de sel sous la forme de différences finies ou sur l'optimisation assistée par ordinateur en

utilisons une équation au différence finie, et les procédures basé de la méthode des moments statistique. L'application pratique de la technique de sélection par ordinateur pour le calcul des paramètres hydrochimiques est souvent compliquée par leur ambiguïté. L'utilisation de la méthode des moments nécessite une grande précision dans la détermination des concentrations finales. Les calculs ont montré que lorsque l'erreur de détermination de moment est de **10 %**, l'erreur de détermination du paramètre est supérieure à des centaines de pourcents. (Mikayilov, 2007).

Nous avons choisi la méthode dite (**problème inverse**) pour la détermination des paramètres hydrochimiques de l'équation de transport.

La méthode de problème inverse (résolution de problèmes inverse) est une méthode basée sur l'ajustement de la solution théorique de l'équation de convection dispersion sur une courbe de percée (de restitution ou de sortie) expérimentale. Cet ajustement ce fait par plusieurs méthodes comme la méthode universelle et la plus connue (essai et erreur ou en anglo-saxon Trial and error). Le principe de cette méthode est basée sur une série de comparaisons entre les courbes des effluents observées et calculées jusqu'à un ajustement visuel satisfaisant la courbe observée est obtenu (figure II.6). Il existe d'autre méthode comme la méthode d'ajustement à partir de la pente de la courbe d'effluent expérimental... (Van Genuchten et Wierenga, 1986)

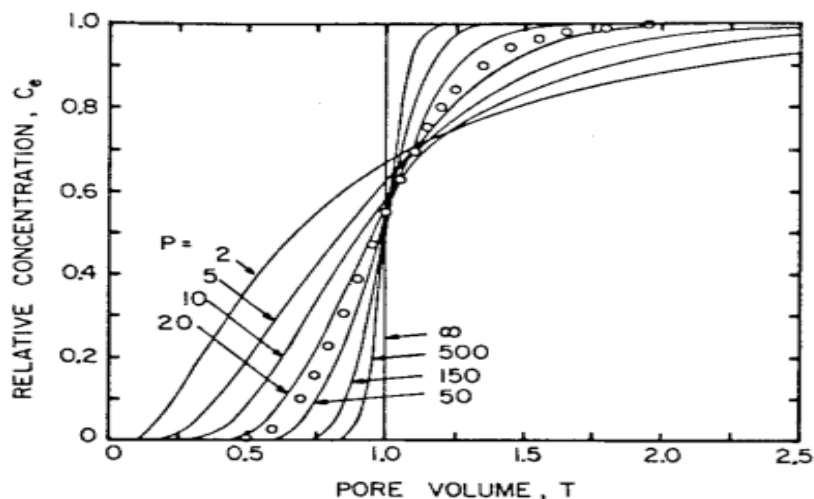


Figure II. 6: Illustration d'un ajustement d'une courbe d'effluent expérimental (cercle ouvert) avec des courbes théorique d'après un exemple de Van Genuchten (Van Genuchten et Wierenga, 1986)

Ces dernières années, avec le développement des ordinateurs et du langage informatique, l'ajustement des paramètres se fait par des logiciels développés : parmi ces logiciels nous avons le logiciel **STANMOD** (**ST**udio of **AN**alitical **MO**dels) développé par l'équipe de Van Genuchten de l'US Salinity Laboratory. Ce logiciel inclut la version **2.0** de **CXTFIT** (Toride et al. 1999). Il permet aussi bien de résoudre des problèmes inverses, c'est à dire d'ajuster le paramètre D^* par la méthode des moindres carrés sur une courbe de percée expérimentale, que de faire une résolution directe pour un paramètre D^* donné.

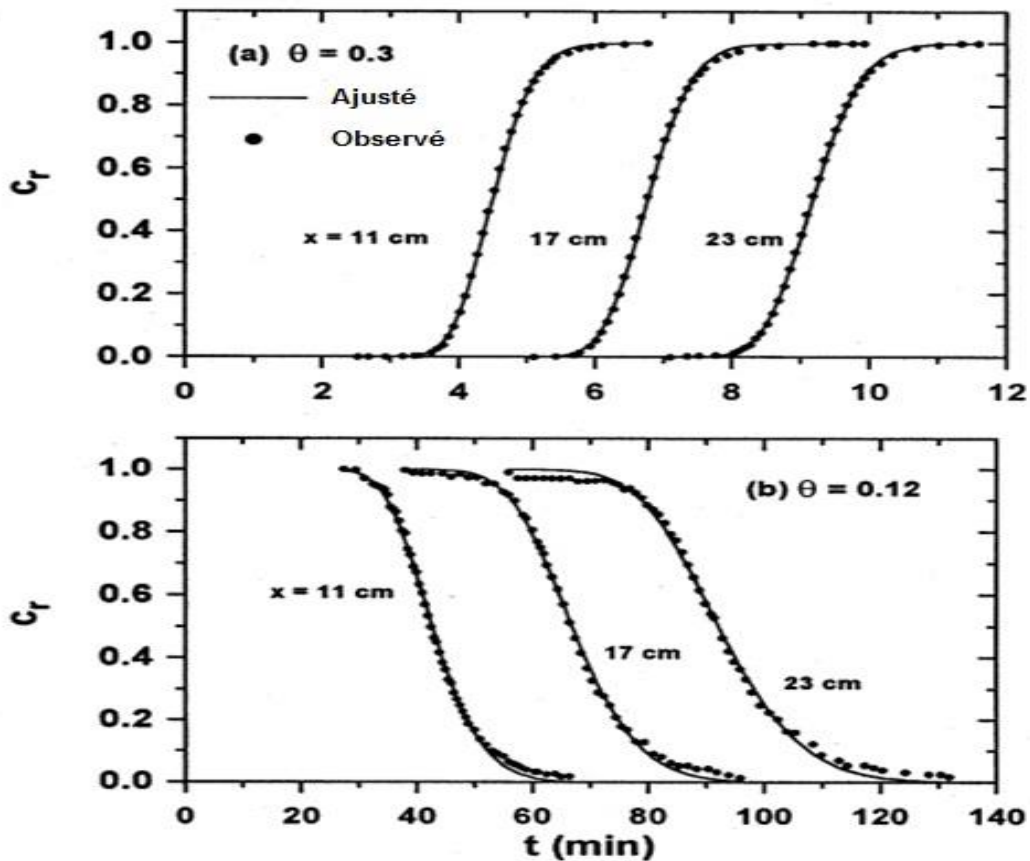


Figure II. 7: Des courbes de percée expérimentales et ajustées pour (a) sable saturé (b) sable insaturé. (D'après un exemple de Van Genuchten)

La figure II.7 montre un ajustement presque identique. La solution de l'équation de diffusion convection est une solution appropriée pour décrire le transport dans cette colonne.

Un autre programme pour la détermination de paramètre de transport dans le sol est le programme **ASC (Average Salt Concentration, 2010)** développé par (Mikayilov et Pachepsky, 2010) pour la détermination des paramètres de transport moyenne pour des couches de sol entière sous condition de lessivage. Le programme permet de résoudre des problèmes inverses et de faire des prévisions pour des conditions de lessivage ou d'irrigation donnés (problème directe).

II.6 Conclusion

L'étude de transfert des sels solubles en milieu poreux dans des conditions de lessivage implique l'utilisation de modèles mathématiques. De cette approche bibliographique, il ressort qu'un volume assez important des expériences a été réalisé en laboratoire, mais peu d'essais ont été consacrés aux transferts dans des conditions de lessivage des sols salins. Les solutions analytiques des modèles mathématiques publiées présentent habituellement la dépendance de la concentration du soluté en fonction du temps et de la profondeur. Dans le cas d'études sur la salinité du sol dans des conditions de lessivage, il est peut être avantageux d'utiliser les solutions analytiques de l'équation de convection-dispersion qui présentent des dépendances de la concentration moyenne de sels solubles, dans le profil de sol en fonction de temps.

Ces modèles mathématiques implique ; de manière obligatoire la détermination des paramètres hydrodynamiques tels que le coefficient de la diffusion-convection, la dispersivité, la constante de la vitesse de la dissolution...)

Chapitre III

Matériels et Méthodes

III.1 Introduction

L'étude expérimentale concernant les paramètres de transfert des sels solubles à travers un milieu poreux (D^* , λ , γ) peut se faire soit en plein champ (in-situ) sur des parcelles appropriées et bien représentative de la zone en question, soit en laboratoire sur des colonnes de sol.

La première méthode présente des expériences qui se font en conditions naturelles, elle a l'avantage de rendre compte de ce qui se passe réellement dans le sol, mais son inconvénient est qu'elle reste sur le plan pratique, très difficile à contrôler à cause de la variation simultanée des plusieurs facteurs.

La deuxième méthode présente la possibilité de reconstituer au mieux les conditions naturelles. Elle a plusieurs avantages tels que le contrôle de différents paramètres physico-hydraulique comme l'humidité du sol, la température ...etc.

Pour notre cas, c'est la deuxième méthode que nous avons adoptée, elle se résume par un montage expérimental simple constitué par des colonnes de sol ; suite à sa simplicité et sa susceptibilité de reproduire au mieux les phénomènes naturels de transfert des sels solubles et de lessivage.

III.2 Cadre de la zone d'étude

L'étude a été effectuée pour un sol non irrigable de la palmeraie d'Ourlana commune de Djamaa (Latitude: 33°33'12N, Longitude: 5°59'51E). La texture du sol du site est limono-sableuse (62% sable, 24% limon, 14% argile) avec présence de couche de sel sous forme cristalline sur la surface composé principalement de chlorure de sodium (NaCl). (Tesco et al. 1986). L'occupation des sols sous-irrigation est majoritairement en palmiers dattiers et luzerne. La ressource en eau pour l'irrigation est la nappe du continentale intercalaire (C.I) et celle du complexe terminal (C.T). D'après nos enquête auprès les services d'exploitation de l'ONID de Tougourt unité de Djamma et une association des irrigateurs et de certains Fellah le régime d'irrigation à caractère lessivant appliquer réellement est : La saison végétative inclue 8 doses d'irrigation par mois., les volumes d'irrigations varient en fonctions des saisons : du mois de janvier à mars 270 m³/ha l'eau provient uniquement de la nappe du (C.I) et du mois d'Avril à Octobre 360 m³/ha l'eau provient d'un ouvrage mélangeur dans lequel les eaux de (C.I) et de (C.T) sont mélangées (Tableau 2).

Tableau III. 1: Répartition des irrigations durant la saison végétative

| Mois | Ressource en eau | Volume (m ³ /ha.dose) |
|-----------|------------------|----------------------------------|
| Janvier | C.I | 8×270 |
| Février | C.I | 8×270 |
| Mars | C.I | 8×270 |
| Avril | C.I + CT | 8×360 |
| Mai | C.I + CT | 8×360 |
| Juin | C.I + CT | 8×360 |
| Juillet | C.I + CT | 8×360 |
| Aout | C.I + CT | 8×360 |
| Septembre | C.I + CT | 8×360 |
| Octobre | C.I + CT | 8×360 |
| Novembre* | C.I | / |
| Décembre* | C.I | / |

* période de récolte et d'entretien de la palmeraie. Le volume d'eau du C.I (2500 m³ est stocké)

III.3 Plan d'échantillonnage :

3.3.4 Choix du lieu et profondeur d'échantillonnage:

Pour prélever les échantillons à la bonne profondeur, le dispositif le plus simple à utiliser est un tube d'échantillonnage ou une tarière que l'on insère dans le sol à la profondeur appropriée, que l'on retire avec l'échantillon prélevé. Dans notre cas, une fosse pédologique de **1m*1m** (fig. III.1) a été creusée, les échantillons souhaités ont été pris à partir de chaque horizon. Le prélèvement a été fait à partir du profil opposé au soleil (à l'ombre) afin de préserver au maximum les propriétés chimiques du sol.

L'échantillonnage est réalisé en 3 fois sur chaque horizon :

3 échantillon --→ 0-40 cm

3 échantillon --→ 40-70 cm

3 échantillon --→ 70-100 cm



Figure III. 1: Fosse pédologique

III.4 Analyses de sol et propriétés physico-chimiques:

Toutes les analyses physico-chimiques ont été réalisées dans le laboratoire de l'agence national des ressources hydriques (Alger et Constantine)

III.4.1 Les analyses physiques:

Tableau III. 2: Analyse physique de sol

| Horizon (cm) | Densité réelle (g/cm ³) | Densité apparente (g/cm ³) | Porosité (%) |
|---------------|-------------------------------------|--|--------------|
| 0-10 | 2.63 | 1.025 | 60.1 |
| 10-40 | 2.59 | 1.036 | 60 |
| 40-70 | 2.48 | 1.054 | 57.5 |
| 70-100 | 2.52 | 1.058 | 58 |

III.4.2 Les analyses chimiques:

Tableau III. 3: Bilan chimique de sol

| Horizon (cm) | Anions (meq/l) | | | Cations (meq/l) | | | |
|--------------|-----------------|------------------------------|-------------------------------|------------------|------------------|-----------------|----------------|
| | Cl ⁻ | SO ₄ ⁻ | HCO ₃ ⁻ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na ⁺ | K ⁺ |
| 0-10 | 1743.4 | 482.2 | 95.31 | 47.81 | 106.9 | 2398.7 | 4.7 |
| 10-40 | 231.1 | 38.61 | 67.8 | 30.83 | 41.67 | 242.5 | 3.1 |
| 40-70 | 233.8 | 41.8 | 71.2 | 45.9 | 50.9 | 224.7 | 4.4 |
| 70-100 | 305.4 | 84.1 | 57.6 | 51.9 | 51.4 | 372.2 | 2.4 |

Tableau III. 4: Autres analyses physico-chimiques

| Horizon (cm) | CEC (meq/100g) | PH | Calcaire Total CaCO ₃ (%) | Conductivité (mmhos/cm) | Pf 4.2 | Pf 3.0 | Pf 2.5 |
|--------------|----------------|------|--------------------------------------|-------------------------|--------|--------|--------|
| 0-10 | 2.54 | 8.15 | 4.51 | 11.18 | 16.50 | 21.63 | 29.27 |
| 10-40 | 6.59 | 7.97 | 3.28 | 10.52 | 16.75 | 20.37 | 28.11 |
| 40-70 | 4.73 | 8.12 | 2.25 | 9.94 | 16.31 | 24.84 | 28.47 |
| 70-100 | 5.01 | 8.06 | 3.48 | 9.94 | 16.24 | 19.70 | 27.97 |

III.5 Analyse de l'eau d'irrigation

Les analyses des eaux d'irrigation ont été réalisées dans le laboratoire de l'agence national des ressources hydriques (Constantine).

Tableau III. 5: Concentration des eaux d'irrigations

| Ressource en eau | Concentration en (Cl ⁻) | Concentration en RS | Unité |
|--------------------------|-------------------------------------|---------------------|-------|
| Complexe Terminal | 1.25 | 7.12 | g/l |
| Continental intercalaire | 0.255 | 1.94 | |
| Mélangeur | 1 | 5.2 | |

III.6 Dispositif expérimental :

Le sol a été mis en place dans 9 petites colonnes verticales de 40 cm, cylindrique et 3 grandes colonnes de (1.2 mètre de longueur et 20 cm de diamètre). Les parois internes des différentes colonnes ont été revêtu par une couche de bitume afin d'éviter les écoulements préférentiels "contact sol-eau", le schéma générale du dispositif expérimental est montré dans la figure (Fig. III.2).

Les colonnes sont équipées dans leur partie inférieure par une plaque en acier galvanisé permettant de retenir le sol et doté d'une petite ouverture à travers laquelle nous recueillons les eaux de lessivage. Sur cette plaque est installé un filtre (grille) en PVC empêchant le colmatage et permettant de retenir les particules fines de sol pour ne pas sortir avec l'effluent. Chaque colonne est mise sur un trépied en acier, le sol de la colonne est irrigué par un système de pulvérisation afin d'obtenir une répartition uniforme du front d'humidité dans le sol (sol sableux).

L'alimentation en eau de la colonne a été assurée par un réservoir suspendu au-dessus pour un maintien d'une pression constante d'alimentation en eau de lessivage.

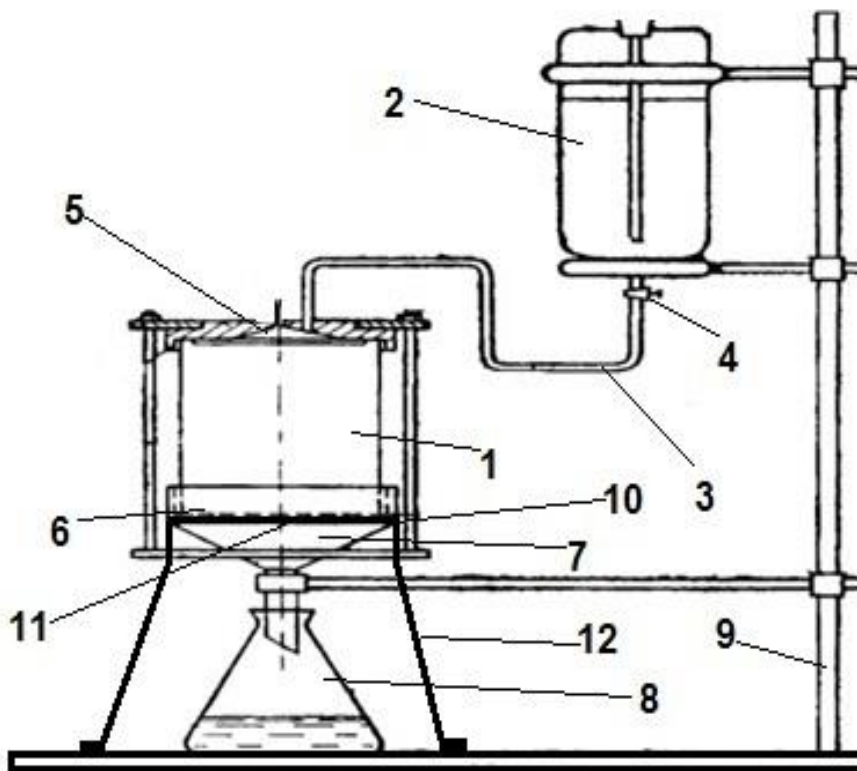


Figure III. 2: Schéma du dispositif expérimental. (Choumakouy, 1990)

1- Colonne en PVC. **2-** Réservoir d'eau de lessivage. **3-** Tube transparent en PVC. **4-** Vanne pour la régularisation du débit. **5-** système de pulvérisation d'eau. **6-** Grille en PVC. **7-** Entonnoir en PVC. **8-** Bicher pour la récupération des eaux de sortie. **9-** Support. **10-** Plaque en acier galvanisé pour retenir le sol. **11-** O-ring (anneau) trou de passage de l'eau. **12-** Trépied.

III.7 Préparation des colonnes de sols

III.7.1 Mise en condition des colonnes :

Pour avoir des conditions proches des conditions réelles naturelles, nous avons fait plusieurs démarches. Parmi eux :

III.7.2 Préparation du sol :

Le sol prélevé reste à l'état naturel déstructurer, nous n'avons effectué ni un tamisage ni un séchage.

III.7.3 Remplissage des colonnes :

Nous avons suivi un mode qui consiste à remplir la colonne par tranche, et entre la mise de deux tranche on vibre la colonne jusqu'au moment où l'on constate une bonne répartition du sol.

Après le remplissage, les colonnes ont été laissées au repos pour une période de 8 mois pour retrouver l'état initial naturel du sol.

III.8 Expérience de lessivage (mode opératoire) :

1- on ouvre la vanne et même temps on déclenche le chronomètre.

2- Après saturation et début d'écoulement à la sortie de la colonne, on récupère $1/40^{\text{ème}}$ de volume du pore de sol à chaque fois pour chaque échantillon. (Choumakov, 1990). Dont chaque échantillon, on détermine la concentration en ion Cl^- à l'aide d'un multiparamètre.

3- Un registre des mesures de suivi des expériences (temps, volume, concentration...) est maintenu.

4- Le lessivage se faire avec une eau non salé d'une concentration de 30 mg/l en Cl^- . Chaque expérience est poursuivi jusqu'à l'obtention à la sortie de la colonne une concentration stable et proche d'une concentration de l'eau d'irrigation.

III.9 Mode expérimental

III.9.1 Méthode d'analyse des données

Pour l'étude expérimentale des processus de transport des sels soluble à travers les colonnes de sol au laboratoire, nous avons le choix entre deux techniques :

- Mesure de l'évolution de la concentration en une série de point à l'intérieure de la colonne (concentration résiduel) ;
- Soit par la mesure de l'évolution de la concentration de l'effluent à la sortie de la colonne suite à un lessivage.

La seconde méthode a été choisie, et ce, pour des raisons de simplicité.

III.9.2 Choix d'un ion représentatif pour l'étude

III.9.2.1 Détermination de coefficient convection-diffusion D^*

L'ion chlorure a été choisi comme l'ion représentatif dans la détermination du coefficient D^* et λ parce que c'est :

- L'ion le plus nocif pour les cultures ;
- Les résultats du coefficient de convection-diffusion D^* d'ion chlorure sont représentatif pour les autres ions. (Viriguin, 1979) ;
- Le plus présent dans les palmerais de l'Oued Righ ;
- La facilité de la détermination de cet ion.

III.9.2.2 Détermination du coefficient de dissolution/cristallisation γ

Dans notre étude, la majorité des sels sous forme cristalline dans la vallée de l'Oued Righ et en particulier dans la palmeraie d'Ourlana sont à prédominance de sels de chlorure de sodium (NaCl) (Tesco, 1983). En ce qui concerne l'ion représentatif pour la détermination du coefficient γ , ce point a été évoqué dans le précédent chapitre, en traitant l'équation du phénomène de dissolution/cristallisation et sa résolution. La détermination de coefficient γ se rapporte principalement à l'aide des ions moyennement solubles tels que (le sodium, le sulfate, le carbonate ...etc.) (Viriguin, 1979). Compte tenu de ce fait, nous avons choisi l'ion sodium (Na^+) pour la détermination du coefficient de dissolution/cristallisation γ .

III.9.3 Dosage du chlorure

III.9.3.1 Méthode de dosage de chlorure

La détermination de l'ion chlorure dans la portion du filtrat a été effectuée par la méthode potentiométrique en utilisant des électrodes sélectives d'ions.

Nous avons choisis la méthode potentiométrique suite à sa rapidité et sa précision...etc.

III.9.3.2 La méthode potentiométrique

Le principe d'un dosage potentiométrique consiste à mesurer la différence de potentiel entre 2 électrodes plongées dans une solution :

- une électrode de référence, qui assure un potentiel constant par rapport à celui de la solution.
- une électrode ionique sélective comportant une membrane perméable au seul composé à analyser.

La mesure spécifique des ions est une méthode que l'on utilise pour déterminer les concentrations d'ions dissous en utilisant un appareillage relativement simple.

III.9.3.2.1 Méthode d'analyse

Il existe un grand nombre de méthodes d'analyse utilisant des électrodes spécifiques. Parmi eux nous citons les méthodes les plus utilisées tel que : la méthode potentiométrique directe, la méthode par ajout dosé, la méthode par addition multiple d'échantillons.... etc. Suite à la disponibilité d'un appareil multi-paramètres moderne doté d'un microprocesseur, nous avons effectué les analyses de filtrats avec la méthode potentiométrique directe.

III.9.3.2.2 La méthode potentiométrique directe

Avec le développement des microprocesseurs, les instruments contrôlés par eux sont programmés pour donner directement la concentration. Le calibrage et la mesure sont exploités automatiquement. On prépare les solutions étalons par dilution en série d'une solution étalon concentrée (solution stock). On ajoute le tampon ionique (ISAB) recommandé à chaque solution étalon ainsi qu'aux échantillons à analyser. Le système est ensuite calibré et l'information est mémorisée par le microprocesseur. On mesure alors le potentiel d'électrode de chacune des solutions échantillons et on lit directement la concentration sur l'appareil de mesure.

III.9.3.3 Le matériel utilisé (caractéristique des électrodes)

Les mesures ont été réalisées à l'aide d'un appareil multi-paramètres de la marque **HANNA INSTRUMENT**¹ de la série **HI 4522** muni d'un microprocesseur, une mémoire et un écran LCD etc. Cet appareil est équipé de deux électrodes de la marque **ELIT NICO2000 Ltd**² :

- une électrode de référence à double jonction remplie d'un électrolyte auxiliaire avec 1.0 KNO₃ M.
- une électrode spécifique d'ions chlorure avec une membrane cristalline (électrode corps fixe) que l'on place directement dans l'eau. Selon le manuel d'utilisation de constructeur, l'électrode a un temps de réponse < 10 secondes sur un intervalle de [1 mg/l ... 35,5 g/l] pour l'activité de l'ion chlorure.

¹ **HANNA Inst France.**, 1 rue du Tanin BP 133 F-67833 Tanneries Cedex.

² **NICO2000 Ltd.**, 62 Pebworth Road, Harrow HA1 3UE, Royaume-Uni.



Figure III. 3: Multi-paramètres **HANNA INSTRUMENT**



Figure III. 4: Electrode sélective d'ion **ELIT**

III.9.3.4 Etalonnage de l'électrode sélective d'ion

Avant de commencer la manipulation et les mesures, le calibrage des appareils de mesure est nécessaire où ils sont utilisés dans des domaines liés à la qualité et précision. L'étalonnage de l'électrode sélective d'ion chlorure se résume dans les démarches suivantes d'après le manuel de constructeur :

- 1- On prépare des solutions étalons de 1, 10, 1×10^2 , 1×10^3 et 1×10^4 ppm de NaCl dans l'eau distillée.
- 2- On ajoute à chacune de ces solutions étalons un volume égal à 2 ml de NaNO_3 5M (tampon ISAB Ionic Strength Adjustment Buffer = tampon pour ajuster la force ionique).
- 3- On connecte l'électrode spécifique et l'électrode de référence à jonction double à l'appareil de mesure et on programme l'appareil à l'aide des valeurs de concentration des solutions étalons.
- 4- On plonge successivement les électrodes dans chaque solution, en commençant par la moins concentrée et calibrer le système.
- 5- La courbe de calibrage est construite et mémorisée par l'appareil. Pente égale à 90 %.
- 6- On plonge les électrodes dans ces solutions et on lit la concentration sur l'afficheur de l'appareil de mesure.

Une fois que le calibrage est terminé, les mesures consécutives sont rapides et cette méthode convient particulièrement bien à l'analyse d'un grand nombre d'échantillons similaires. Des débits jusqu'à 60 échantillons par heure sont possibles. Le volume des échantillons est sans influence pour cette méthode de mesure. La température des solutions étalons et des solutions échantillons ne doit pas différer de plus de 2 degrés.

III.10 Méthode de détermination des paramètres hydrodynamique du sol

III.10.1 Modèle choisi

Pour décrire le transfert des sels solubles (régime de lessivage) pour un milieu poreux saturé, nous utilisons le modèle mathématique de convection dispersion. L'équation de transport de sel sans les phénomènes d'échange ($R = 1$) et en présence de phénomène de la dissolution des cristaux, s'écrit :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D^* \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v \frac{\partial C}{\partial z} + \gamma(C_s - C) \quad (\text{III.1})$$

Il existe un très grand nombre des solutions de l'équation ci-dessus (III.1). En considérant les conditions aux limites ci-dessous, nous choisissons notre solution du modèle mathématique tout dépend le cas : soit en grande colonne ou petite colonne.

$$C(z, 0) = C_0 = \text{constante} \quad (t = 0) \quad (\text{III.2})$$

$$D \frac{\partial C}{\partial z} = vC - v C_1 \quad (z = 0) \quad (\text{III.3})$$

$$\frac{\partial C}{\partial z}(L, t) = 0 \quad (z \rightarrow L) \quad (\text{III.4})$$

Où : L est la hauteur de la colonne de sol.

III.10.2 Méthodes d'ajustements et estimation des paramètres du modèle

Les données nécessaires à l'utilisation du modèle choisi sont la vitesse réelle de l'écoulement v et le coefficient de dispersion hydrodynamique D^* et le coefficient de cristallisation/dissolution γ . La détermination de ces trois paramètres doit se déduire par la résolution du problème inverse.

III.10.2.1 Détermination du coefficient D^*

III.10.2.1.1 Petites colonnes

La détermination des paramètres de transport de sels solubles pour les petites colonnes se fait par l'ajustement de la courbe expérimentale avec les solutions analytiques de l'équation de

diffusion-convection à l'aide de logiciel STANMOD (STudio of ANalitical MODels) développé par l'équipe de Van Genuchten de l'US Salinity Laboratory.

La solution de base utilisé pour l'équation (1) pour ce cas et pour les conditions initiale et aux limites cité ci-dessus:

$$C(z, t) = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\frac{2vL}{D} h_n \left[h_n \cos\left(\frac{h_n z}{L}\right) + \frac{vL}{2D} \sin\left(\frac{h_n z}{L}\right) \right]}{\left[h_n^2 + \left(\frac{vL}{2D}\right)^2 + \frac{vL}{D} \right] \left[h_n^2 + \left(\frac{vL}{2D}\right)^2 \right]} \right] \times \exp \left[\frac{vz}{2D} - \frac{v^2 t}{4DR} - \frac{h_n^2 Dt}{L^2 R} \right] \quad (60)$$

h_n est la racine positive de l'équation :

$$h_n \cot(h_n) - \left(\frac{h_n^2 D^*}{vL} \right) + \left(\frac{vL}{4D} \right) = 0$$

III.10.2.1.2 Grandes colonnes

La détermination du coefficient D^* a été faite en utilisant le programme ASC (Average Salt Concentration) développé par Mikayilov et Pachepsky (2010). Ce programme permet de résoudre les problèmes inverses pour la détermination du coefficient D^* et les problèmes directes pour faire les prévisions de la dynamique des sels solubles pour des conditions de lessivage et d'irrigation à la base de la solution de l'équation (1) (sans le dernier terme $\frac{\partial N}{\partial t}$ de cristallisation) pour les conditions initiale et aux limites cité ci-dessus (Veriguin et al. 1986, Mikayilov 2007).

$$\Theta(\tau, \eta) = \frac{S_\tau - C_1}{C_0 - C_1} = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \left[\frac{\sin^2(2h_n)}{2(h_n^2 + \eta^2 + \eta)} \right] \exp [2\eta - (h_n^2 + \eta^2)F_0] \quad (III.6)$$

Où : Θ est la concentration relative, C_1 est la concentration des eaux de lessivages ou d'irrigation [ML^{-3}], C_0 est la concentration initiale de sel dans le sol [ML^{-3}]. S_τ est la concentration de la salinité de la solution de sol après le lessivage [ML^{-3}] $\eta = \frac{L}{4\lambda}$, $\lambda = \frac{D^*}{v}$, $\tau = \frac{vt}{LR}$, $F_0 = \frac{\tau}{\eta}$,

h_n est la racine de l'équation $\tan(2h) = \frac{2\eta h}{h^2 - \eta^2}$

III.10.2.2 Détermination du coefficient γ

Après la détermination du coefficient \mathbf{D}^* , il est facile de déterminer le coefficient de dissolution γ_2 à l'aide de la solution (3) et la méthode proposé par Mikayilov (2007). La méthode consiste à la sélection du coefficient γ_2 à partir de la condition de coïncidence entre les valeurs prédites de l'équation (3) et les courbes de sorties des expériences. Les valeurs du coefficient de dissolution γ_2 sont déterminées à l'aide d'un logiciel en langue **JAVA** que nous avons développée pour des différentes valeurs du paramètre σ_1 pour lequel $|\Theta_{exp} - \Theta_{calc}| \leq 10^{-5}$. (**Annexe III.1**)

$$\Theta = \frac{S_\tau - C_1}{C_0 - C_1} = \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_n(0) e^{-a(\sigma_1)F_0} + \left(\frac{C_S - C_1}{S_0 - C_1} \right) \sum_{n=1}^{\infty} [\Phi_n(0) - \Phi_n(\sigma_1)] [1 - e^{-a(\sigma_1)F_0}] \quad (\text{III.7})$$

Avec :

$$\Phi_n(\sigma) = (-1)^{n+1} \left[\frac{(h_n^2 + \eta^2) \exp(2\eta) \sin^2(2h_n)}{2(h_n^2 + \eta^2 + \eta)a(\sigma)} \right] \quad (\text{III.8})$$

$$\sigma_1 = \frac{\gamma L}{\theta \sqrt{v}} \quad \text{et} \quad \gamma = \left(\frac{\theta \sqrt{v}}{L} \right) \sigma^*$$

$$a(\sigma_1) = h_n^2 + \eta^2 + \eta \sigma_1 \quad \text{et} \quad \sin(2h_n) = (-1)^{n+1} \frac{2\eta h_n}{h_n^2 + \eta^2}$$

Où :

σ^* Désigne les valeurs du paramètre σ pour lequel $|\Theta_{exp} - \Theta_{calc}| \leq 10^{-5}$

III.10.2.3 Méthode de prévision de la salinité de la couche active du sol

La méthode analytique de prévision de la variation de la salinité de la solution du sol proposé par (Veriguin et al. 1986, Mikayilov 2007, Mikayilov and Pachepsky 2010) nécessite la

connaissance de plusieurs paramètres, entre autre D^* , γ_2 , la concentration moyenne de la salinité du sol initial, la concentration des eaux d'irrigation Etc.

La vitesse de filtration à travers le sol est déterminée sur la base de la balance hydrique par période de la saison végétatif. (Choumakou, 1990. Reks et Kiryicheva, 1981)

$$V = \frac{M + P - (ETP)}{10000 t}$$

Où: M les volumes d'irrigations totale (irrigation +lessivage) (mm ou m³/ha), P précipitations (mm ou m³/ha), ETP Evapotranspirations potentiels (mm ou m³/ha) durant une période t (jours) de la saison végétatif.

La dynamique de la salinité sous un régime d'irrigation à caractère lessivant et sur fond de drainage adéquat est simulé suivant deux cas: simulation avec la ressource en eau disponible (conditions réels), et avec mobilisation d'un volume d'eau supplémentaire de la nappe du continentale intercalaire (C.I). (Tableau 5 et 7)

Chapitre IV

Résultats et Traitement

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les résultats des essais effectués sur les colonnes de sol et le travail de la modélisation mathématique ainsi que la variation des prévisions de la salinité de la couche active en fonction des régimes d'irrigation et volume d'eau de lessivage.

IV.2 Résultats des essais effectués sur les colonnes de sol (courbe de sortie)

Les essais ont été effectués en petites colonnes de 40 cm pour l'horizon (0-40 cm) et en petites colonnes de 30 cm pour les horizons (40-70 cm) et (70-100 cm), au total 8 essais et en grandes colonnes de 1 mètre au total 3 essais. Un des essais a été annulé pour cause de fissuration de la paroi de la colonne.

IV.2.1 Les petites colonnes

Les figures IV.1 à IV.8 présentent les courbes de sorties expérimentales obtenues pour chaque horizon des petites colonnes.

Horizon (0-40 cm)

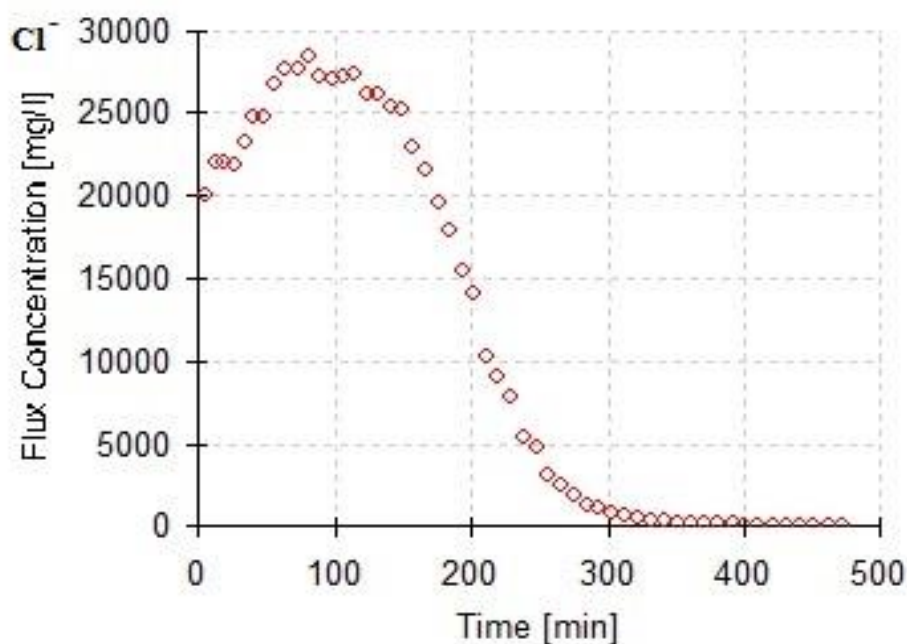


Figure IV. 1 : Courbes de sorties expérimentales de l'essai (a) pour l'horizon (0-40 cm)

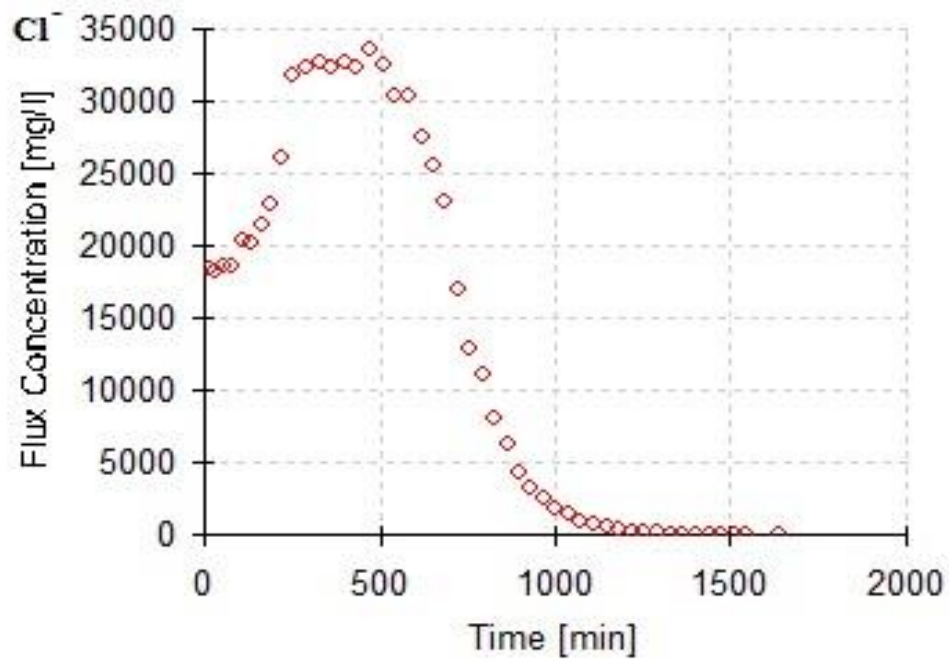


Figure IV. 2 : Courbes de sorties expérimentales de l'essai (b) pour l'horizon (0-40 cm)

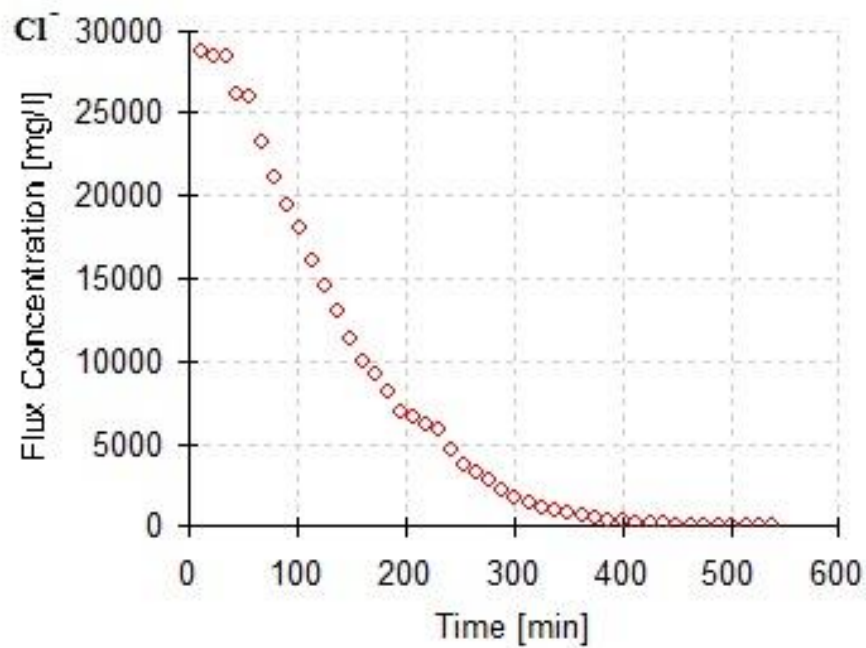


Figure IV. 3 : Courbes de sorties expérimentales de l'essai (c) pour l'horizon (0-40 cm)

Horizon (40-70 cm) :

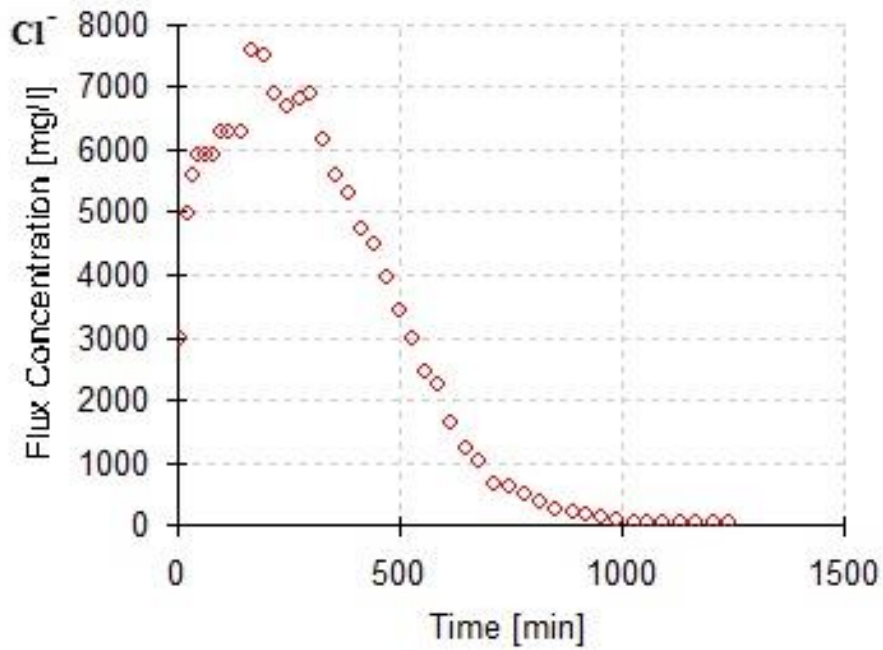


Figure IV. 4 : Courbes de sorties expérimentales de l'essai (a) pour l'horizon (40-70 cm)

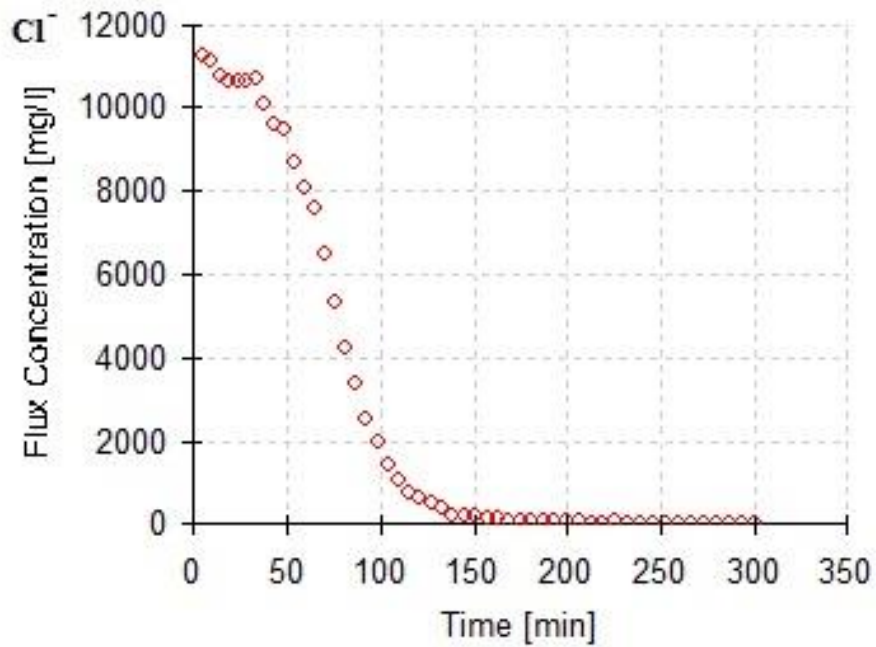


Figure IV. 5 : Courbes de sorties expérimentales de l'essai (b) pour l'horizon (40-70 cm)

Horizon (70-100 cm) :

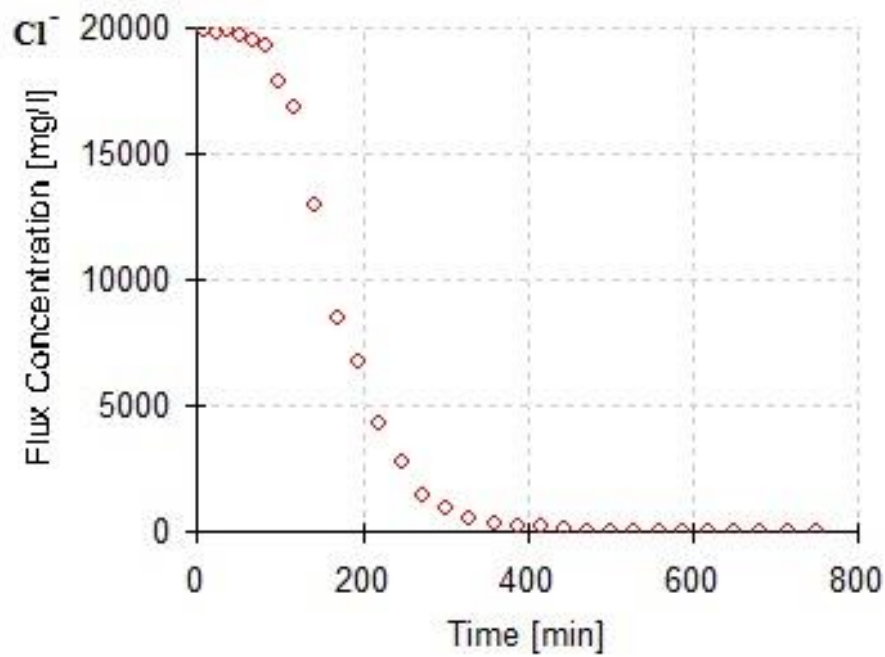


Figure IV. 6 : Courbes de sorties expérimentales de l'essai (a) pour l'horizon (70-100 cm)

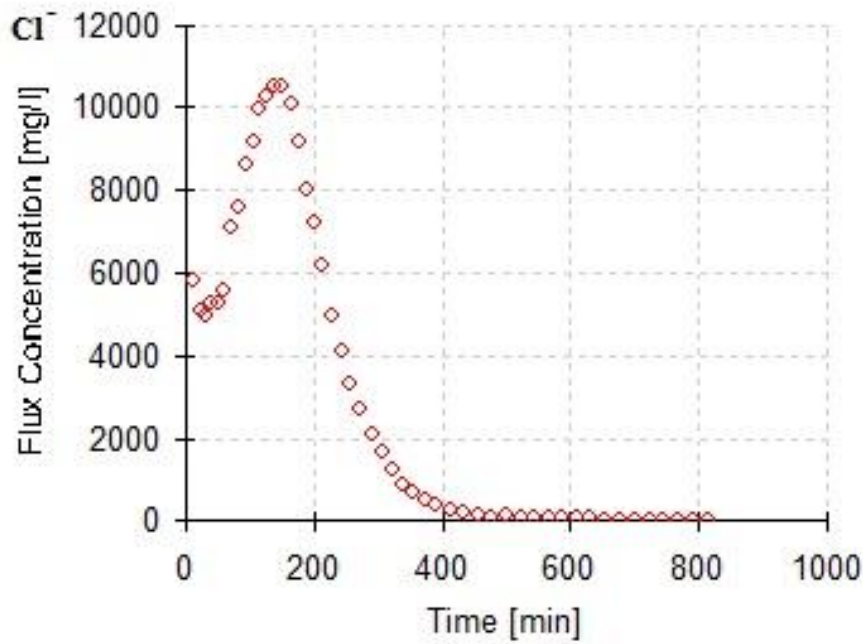


Figure IV. 7 : Courbes de sorties expérimentales de l'essai (b) pour l'horizon (70-100 cm)

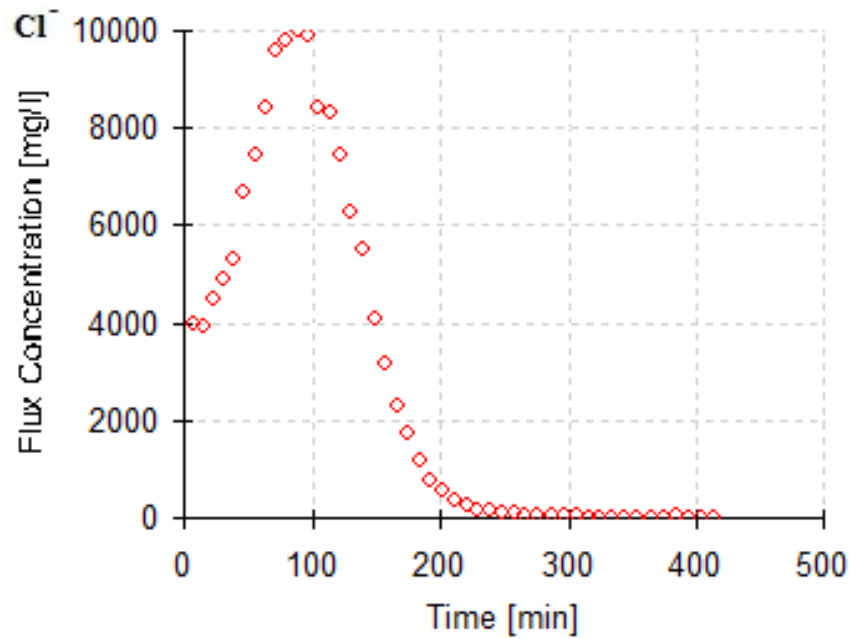


Figure IV. 8 : Courbes de sorties expérimentales de l'essai (c) pour l'horizon (70-100 cm)

D'après les figures **IV.1**, **IV.2**, **IV.4**, **IV.7**, **IV.8**, dans ces essais, au début de l'expérience (début de lessivage), on observe une augmentation de la concentration en chlorure, cela est dû à la présence des cristaux de sels dans le sol. Ensuite, on constate une diminution uniforme de la concentration jusqu'à ce qu'elle devienne constante à environ 30 mg/l ce qui indique la fin de lessivage. Pour les autres essais (figures **IV.3**, **IV.5**, **IV.6**), on remarque que les courbes sont décroissantes en fonction du temps jusqu'à l'état constant et ne présentant pas d'augmentation de la concentration.

IV.2.2 Les grandes colonnes

Les résultats de l'évolution de la concentration en sel dans les eaux d'effluents de la colonne de sol suivant le lessivage est représenté sur les figures IV.9, IV.10, IV.11.

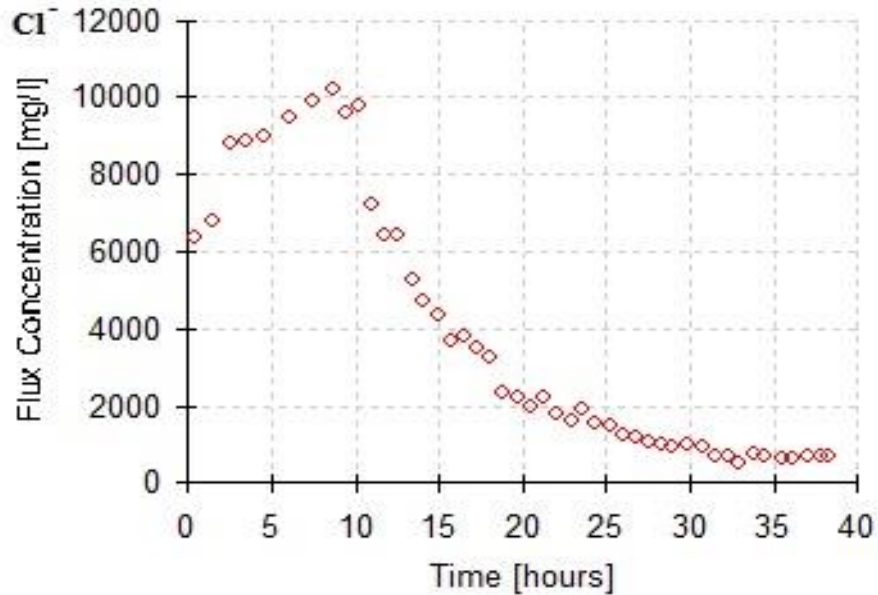


Figure IV. 9 : Courbes de sorties expérimentales de l'essai (a) pour le profil de 1 mètre

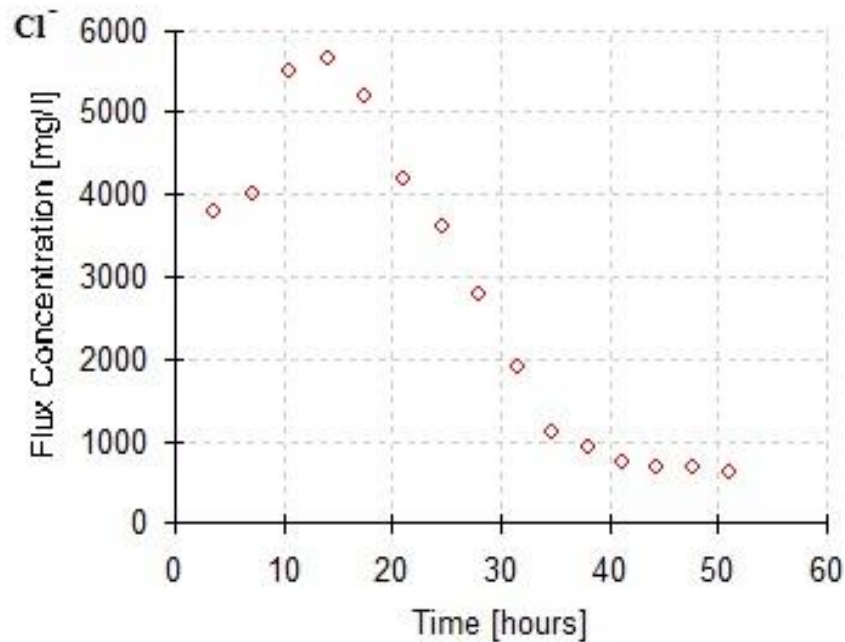


Figure IV. 10 : Courbes de sorties expérimentales de l'essai (b) pour le profil de 1 mètre

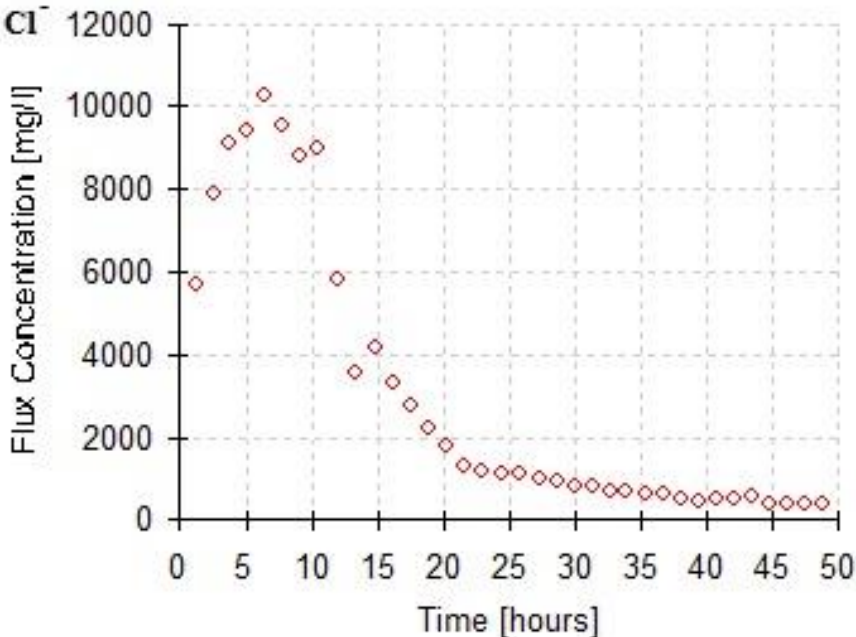


Figure IV. 11 : Courbes de sorties expérimentales de l'essai (c) pour le profil de 1 mètre

IV.3 Modélisation mathématique

L'objectif des résultats du problème inverse est la détermination des paramètres hydrodynamique (D^* , λ , ν) et de la constante de la vitesse de dissolution (γ) qui seront pris comme paramètres moyennes constantes pour les prévisions de la salinité des sols sous régime d'irrigation à caractère lessivant.

IV.3.1 Les petites colonnes

Les figures IV.12, IV.13, IV.14, IV.15, IV.16, IV.17, IV.18, IV.19, présentent l'ajustement des courbes théoriques de modèle de l'équation (1) à des courbes de sorties expérimentales pour les trois horizons (0-40 cm), (40-70 cm), (70-100 cm) respectivement.

IV.3.1.1 Horizon (0-40 cm) :

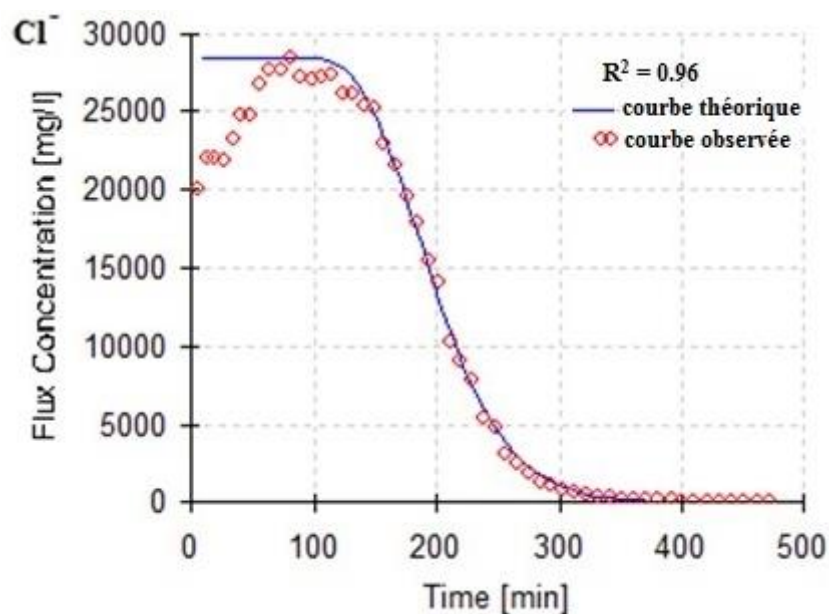


Figure IV. 12 Ajustement de la courbe expérimentale de l'essai (a) pour l'horizon (0-40 cm) avec les solutions analytiques de l'équation (1)

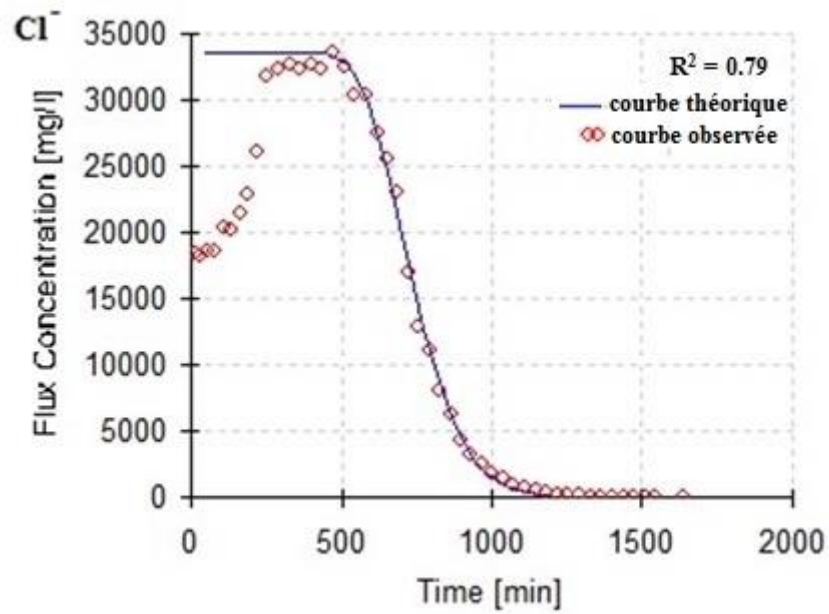


Figure IV. 13 : Ajustement de la courbe expérimentale de l'essai (b) pour l'horizon (0-40 cm) avec les solutions analytiques de l'équation (1)

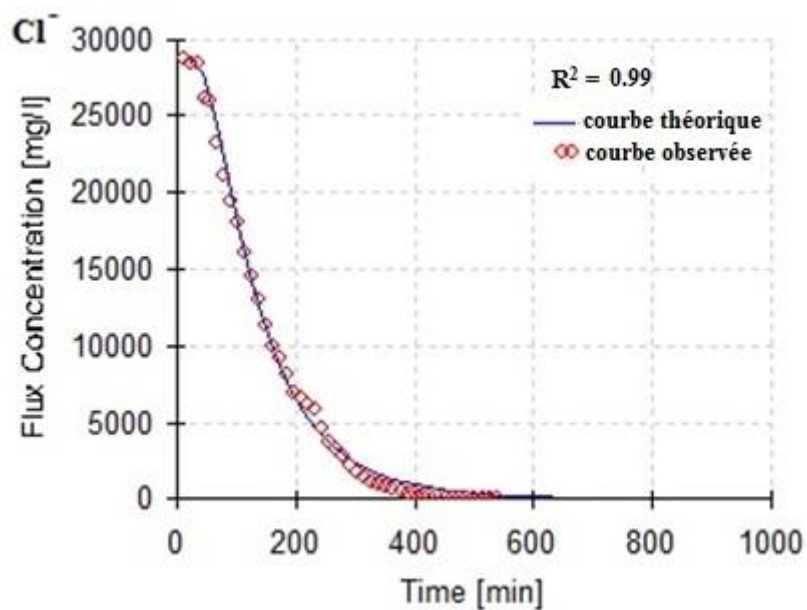


Figure IV. 14 : Ajustement de la courbe expérimentale de l'essai (c) pour l'horizon (0-40 cm) avec les solutions analytiques de l'équation (1)

IV.3.1.2 Horizon (40-70 cm) :

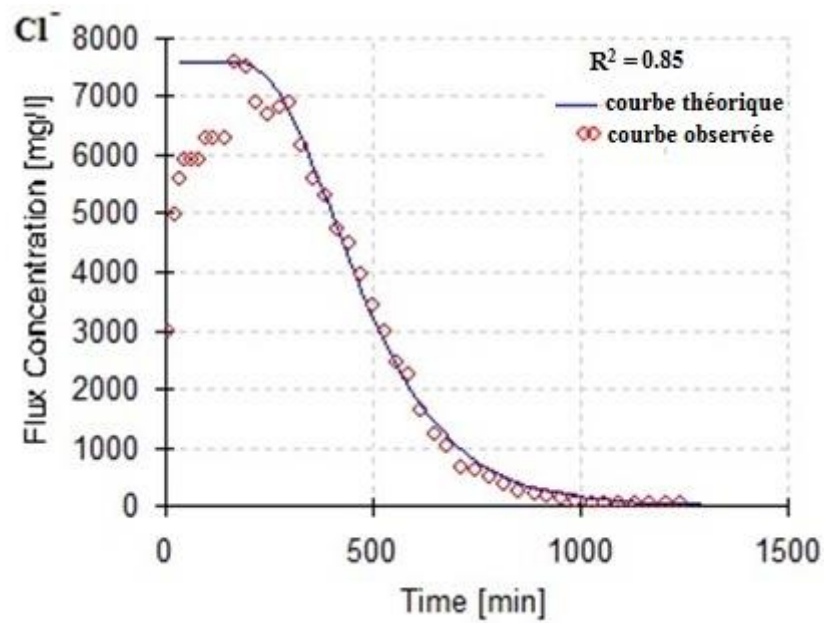


Figure IV. 15 Ajustement de la courbe expérimentale de l'essai (a) pour l'horizon (40-70 cm) avec les solutions analytiques de l'équation (1)

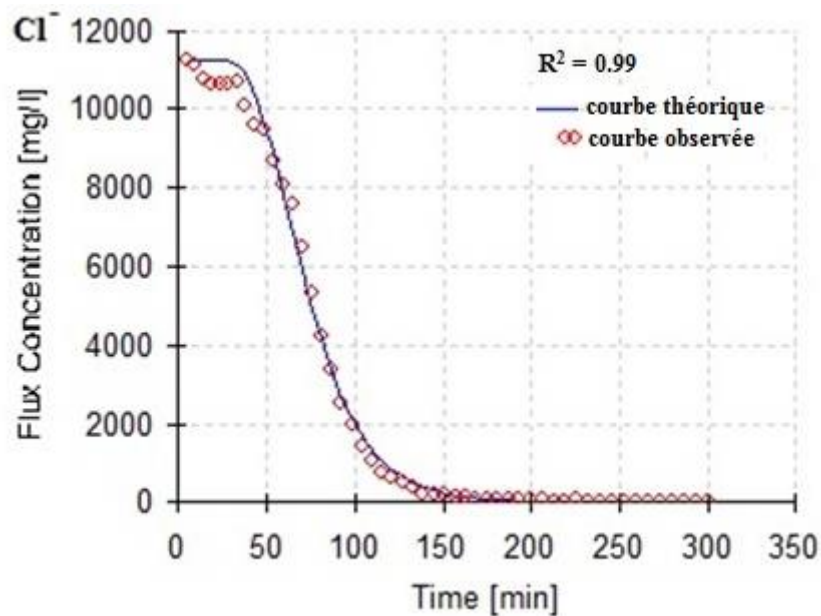


Figure IV. 16 : Ajustement de la courbe expérimentale de l'essai (b) pour l'horizon (40-70 cm) avec les solutions analytiques de l'équation (1)

IV.3.1.3 Horizon (70-100 cm) :

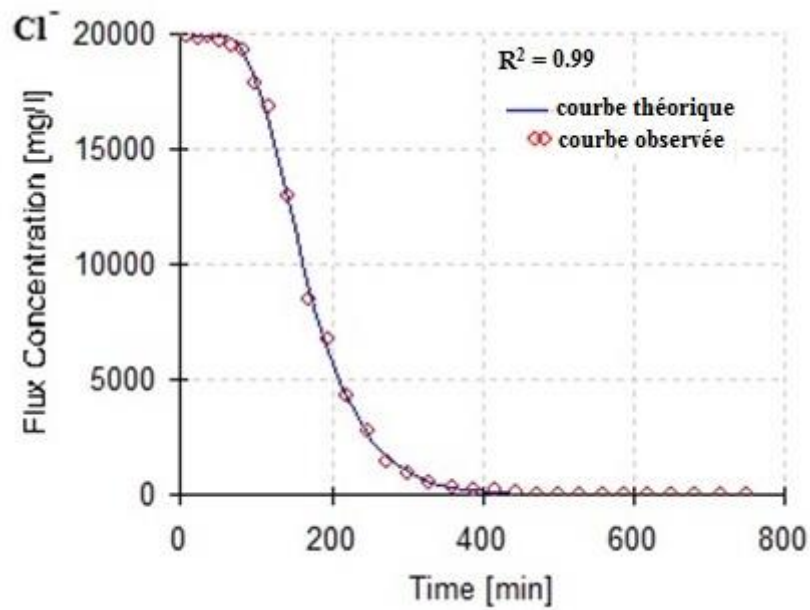


Figure IV. 17 Ajustement de la courbe expérimentale de l'essai (a) pour l'horizon (70-100 cm) avec les solutions analytiques de l'équation (1)

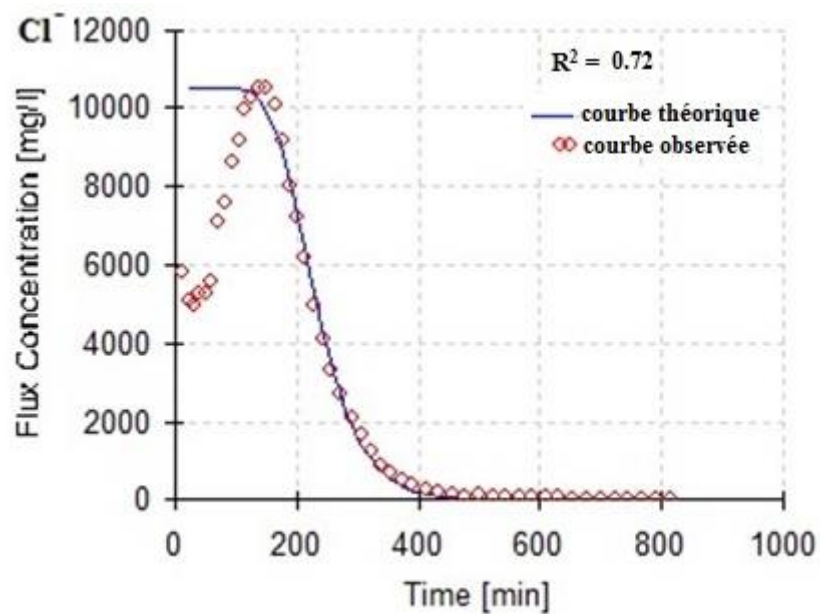


Figure IV. 18 : Ajustement de la courbe expérimentale de l'essai (b) pour l'horizon (70-100 cm) avec les solutions analytiques de l'équation (1)

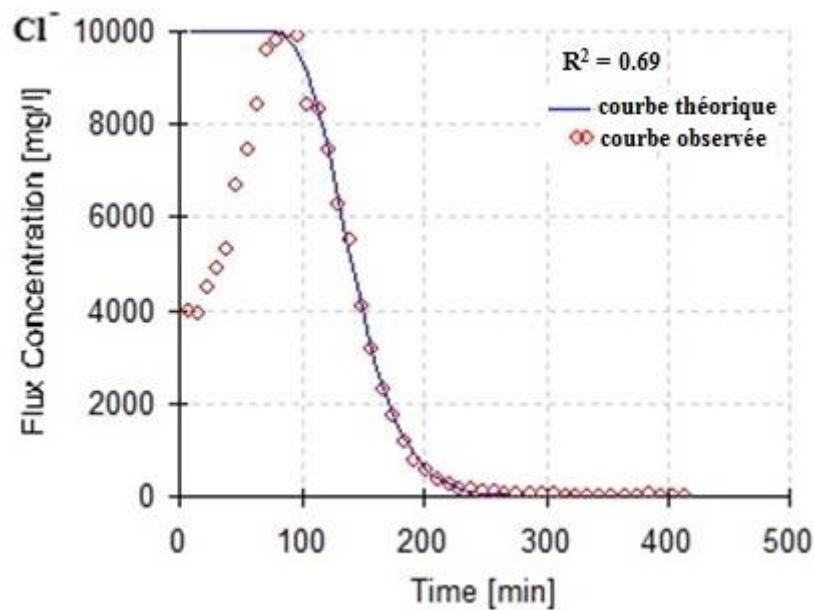


Figure IV. 19 : Ajustement de la courbe expérimentale de l'essai (c) pour l'horizon (70-100 cm) avec les solutions analytiques de l'équation (1)

Comme on peut le voir, les courbes théoriques ont été bien ajustées aux courbes des données observées, ce qui nous donne un pouvoir prédictif du modèle avec un coefficient de détermination (R^2) variant entre 0.69 et 0.99. Les courbes ont montré aussi la validité des solutions de modèle de l'équation (1) à notre sol.

Les ajustements démarre après les cumules et la dissolution complète des sels en cristaux, du fait qu'on est dans une process d'évolution de la salinité sous régime d'irrigation à caractère lessivant (process de lessivage). Les ajustements des courbes auront comme donnée initiale la concentration maximale en chlore (après dissolution complète des cristaux de sels présents dans le sol)

Le tableau IV.1 montre les résultats des paramètres hydrodynamiques D^* pour chaque horizon des huit essais pour les petites colonnes.

Tableau IV. 1: Tableau récapitulatif des résultats des paramètres hydrodynamiques impliqués dans la modélisation mathématique pour les petites colonnes

| Horizon (cm) | Essais | D^* (m^2/j) | v (m/j) | λ (m) |
|--------------|--------|-------------------|-----------|---------------|
| 0-40 | a | 0.033 | 2.85 | 0.011 |
| | b | 0.004 | 0.68 | 0.006 |
| | c | 0.088 | 1.92 | 0.045 |
| 40-70 | a | 0.017 | 0.87 | 0.02 |
| | b | 0.078 | 4.72 | 0.016 |
| 70-100 | a | 0.054 | 2.45 | 0.022 |
| | b | 0.02 | 1.83 | 0.011 |
| | c | 0.023 | 2.88 | 0.008 |

D'après le tableau IV.1, on constate que les valeurs du coefficient de convection – diffusion D^* et de la dispersivité λ , pour les différentes essais et horizons varient dans un intervalle de 4.10^{-3} à 8.10^{-2} (m^2/j) et 6.10^{-3} à 4.10^{-2} (m). Ces résultats sont dans le même ordre de grandeur que dans les travaux de (Borovski, 1974) (Aidarov, 1991) (Veriguin, 1979) pour le même type de sol.

IV.3.2 Les grandes colonnes

Le tableau 2 montre les résultats des paramètres hydrodynamiques du transfert des sels dans le sol (coefficient de convection - diffusion D^*) ainsi que la constante de la vitesse de la dissolution des cristaux de sels γ des trois essais pour les grandes colonnes de sol.

Tableau IV. 2 : Tableau récapitulatif des résultats des paramètres hydrodynamiques intervenant dans la modélisation dans les grandes colonnes.

| Essais | 1 | 2 | 3 | moy |
|-----------------------|---------|---------|----------|----------|
| D^* (m^2/j) | 0,029 | 0,061 | 0,033 | 0,041 |
| v (m/j) | 0,24 | 0,66 | 0,37 | 0,42 |
| λ (m) | 0,12 | 0,092 | 0,089 | 0,1 |
| γ (j^{-1}) | 1,05E-4 | 2,46E-4 | 2,83 E-4 | 2,11 E-4 |

Les résultats montrent une légère différence, et varient pour le coefficient de convection - diffusion dans un intervalle de (0.029 à 0.061 m^2/j), et pour la constante γ entre (1.05E-4 à 2.83 E-4 j^{-1}), comme pour les essais en petites colonnes, l'ordre de grandeur de la variation de D^* et λ et γ est le même que dans les travaux de (Veriguin et al., 1979)

L'analyse des différents travaux sur l'utilisation des valeurs expérimentale de coefficient de diffusion-convection D^* dans la prévision de la salinité du sol dans des conditions de lessivage, a montré qu'il est préférable d'utiliser celles obtenues pour les colonnes de 1 m (Mikayilov et Pachepsky, 2010).

IV.4 Variation des prévisions de la salinité de la couche active en fonction des régimes d'irrigation et lessivage

Après l'obtention des coefficients D^* et γ , les prévisions de la dynamique de sels solubles de la solution de sol pour une période de rotation des cultures à l'aide du modèle mathématique (1) sont réalisés pour les deux cas suivants. (Tableau IV.3 et IV.5)

IV.4.1 Premier cas

Tableau IV. 3: Premier cas (simulation avec les ressources en eau disponible régime d'irrigation à caractère lessivant)

| Cas | | Concentration des eaux d'irrigation en Cl^- (g/l) | | Volume de la dose de lessivage (m^3) |
|-----|-----------------------------|---|--|--|
| | | CI (Janvier à Mars son lessivage d'entretien) | Mélangeur (CI+CT) (Avril à Octobre avec lessivage d'entretien) | |
| 1 | Ressource en eau disponible | 0.255 | 1 | 100.....700 |

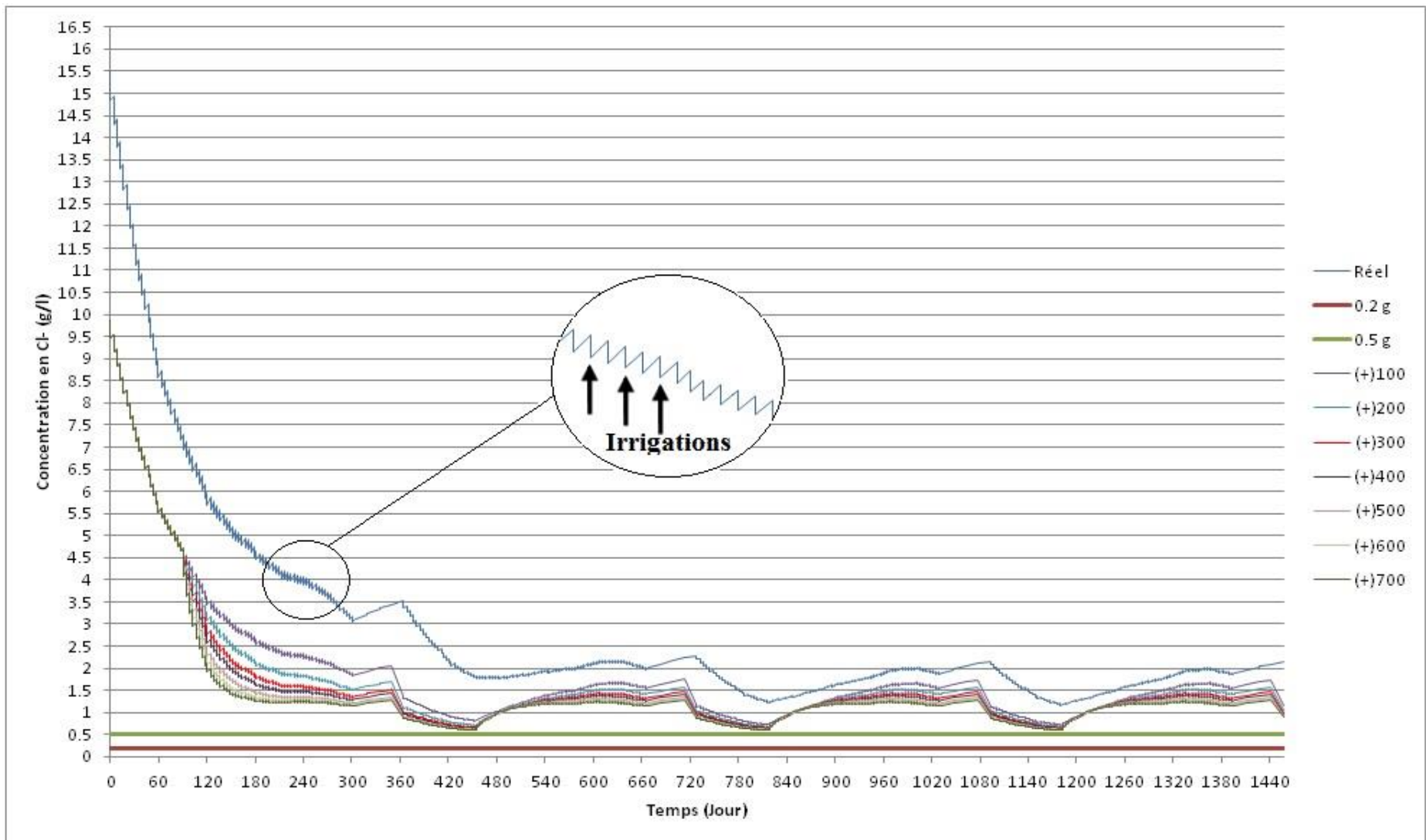


Figure IV. 20 : Prédiction de la dynamique du chlore dans la couche active ($h_{\text{couche active}} = 1 \text{ m}$) pour une période de rotation de 4 ans

La figure IV.20 présente la dynamique de la salinité dans les conditions réelles d'irrigation et avec différentes doses d'eau de lessivage (d'entretien et saisonnier) pour une période de rotation des cultures (4 ans).

L'analyse de la courbe dans les conditions réelles sans lessivage montre qu'à partir de la 2^{ème} année, on observe une stabilité dans la dynamique de la salinité de la solution du sol en Cl⁻. Dans les 3 premiers mois (période d'hiver) on constate une diminution de la concentration suivie par une augmentation pour le reste de l'année. Cela s'explique par le fait que les concentrations des eaux d'irrigation sont passées de 0.255 g/l à 1 g/l. L'analyse des courbes qui illustrent la dynamique de l'ion chlorure dans la couche active du sol avec des différentes quantité supplémentaire d'eau pour une période de rotation des cultures, montrent qu'au début de la saison végétatif de la première année et lorsque il y a une présence de sels en cristaux, le lessivage saisonnier fait diminuer la concentration moyenne initiale de la solution de sol en Cl⁻ de 15 g/l à 9.9 g/l avec un volume total de 2500 m³ (volume stocké). La 2^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème} année, la simulation est réalisée en l'absence de sels sous forme cristalline avec un lessivage saisonnier et d'entretien. On constate que lorsqu'on augmente la dose de lessivage d'entretien, la concentration diminue. La dynamique de cette diminution est représentée sur le tableau IV.4 et la figure IV.21. On observe une diminution rapide puis progressive de la concentration. La stabilisation du processus de désalinisation survient à la dose (+300 m³/ha) avec une diminution de (0.55 ÷ 1.73 g/l) par rapport à la concentration du cas réel à la fin de la saison végétatif. Pour la séquence de lessivage dans l'intervalle de (+300 m³/ha à +700 m³/ha), la diminution est presque négligeable, ce qui n'a aucun effet pratique et significatif sur le processus de désalinisation. A cet effet, on peut conclure que la dose optimale de lessivage est de (+300 m³/ha) mais la concentration reste toujours supérieure à la concentration admissible pour les sols moyennement salés (0.65 ÷ 1.47 > 0.1 ÷ 0.5 g/l). (Scripchinskaya et al. 1977)

Vu les conditions existantes, il est impossible d'arriver à une désalinisation complète du mètre de sol malgré les quantités supplémentaires d'eau de lessivage. Cela est dû à la concentration très élevé des eaux d'irrigation en chlorure provenant de mélangeur (1 g/l). Par conséquent, pour atteindre l'objectif de diminution de la concentration en Cl⁻ du sol jusqu'à la concentration admissible (C_{ad}= 0.5 g/l), il y a nécessité d'une possible mobilisation supplémentaire des eaux de la nappe (C.I), ce qui est contraire aux recommandations de l'OSS.

Tableau IV. 4: Diminution de la concentration en Cl^- par rapport à la concentration du cas réel à la fin de la saison végétatif

| Volume d'eau supplémentaire par dose (m^3/ha) | Diminution de la concentration en Cl^- par rapport à la concentration du cas réel (g/l) | | | |
|---|--|----------------------------------|----------------------------------|--|
| | (Octobre 1 ^{ère} année) | (Octobre 2 ^{ème} année) | (Octobre 3 ^{ème} année) | (Octobre 4 ^{ème} année) (g/l) |
| +100 | 1.24 | 0.43 | 0.32 | 0.31 |
| +200 | 1.58 (0.34) | 0.58 (0.15) | 0.47 (0.15) | 0.46 (0.15) |
| +300 | 1.73 (0.15) | 0.67 (0.09) | 0.56 (0.09) | 0.55 (0.09) |
| +400 | 1.8 (0.07) | 0.72 (0.05) | 0.61 (0.05) | 0.60 (0.05) |
| +500 | 1.88 (0.08) | 0.78 (0.06) | 0.67 (0.06) | 0.66 (0.06) |
| +600 | 1.92 (0.04) | 0.82 (0.04) | 0.71 (0.04) | 0.70 (0.04) |
| +700 | 1.95 (0.03) | 0.84 (0.02) | 0.73 (0.02) | 0.72 (0.02) |

(---) : diminution de la concentration en Cl^- entre les différents volumes de lessivage et pour différents années.

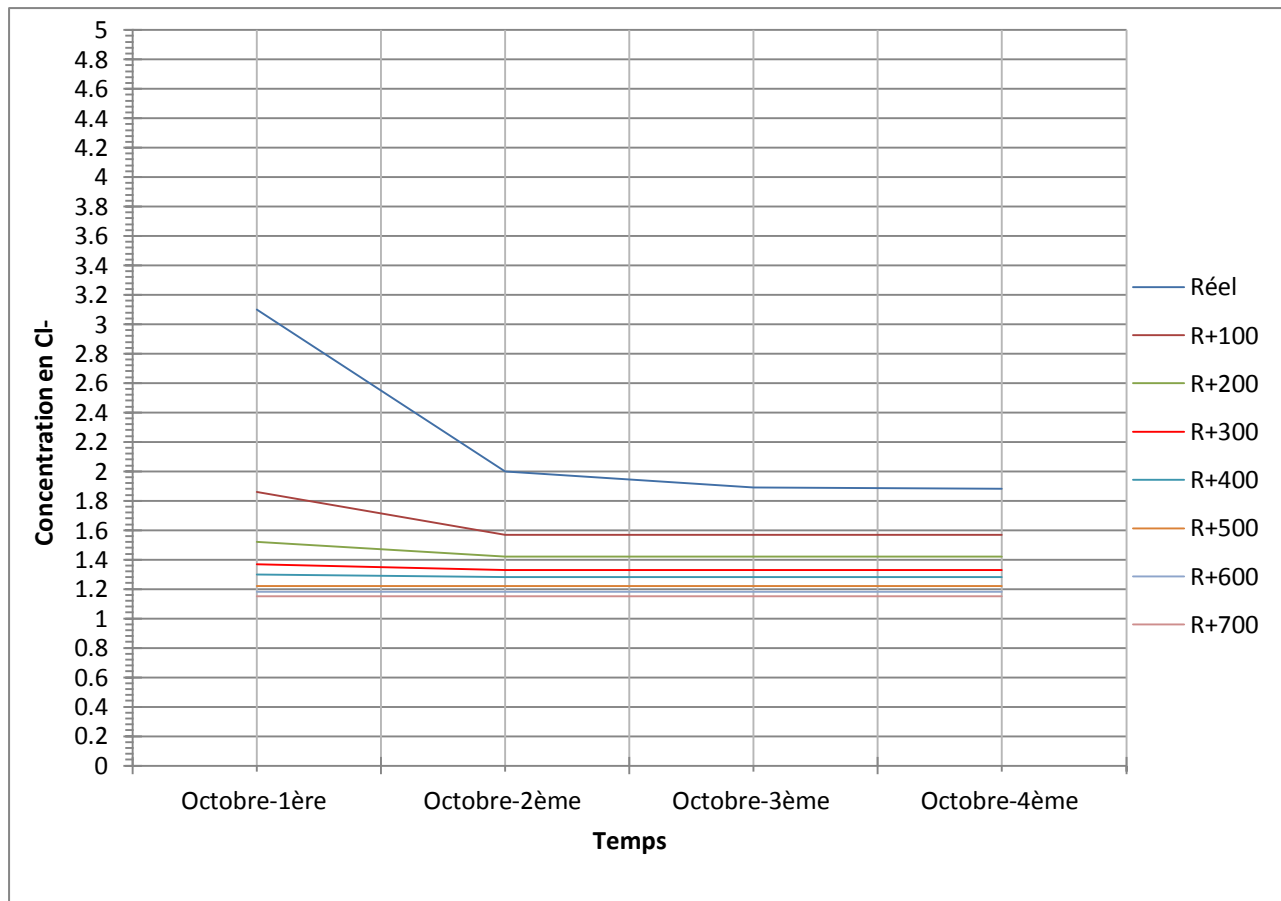


Figure IV. 21: Courbe de la dynamique de diminution du taux de chlorure en fonction des volumes d'eau supplémentaires

IV.4.2 Deuxième cas

Tableau IV. 5: Deuxième cas (simulation avec mobilisation d'un volume d'eau supplémentaire de la nappe (C.I) régime d'irrigation à caractère lessivant)

| Cas | | Concentration des eaux d'irrigation en Cl ⁻ (g/l) | | Volume de la dose de lessivage (m ³ /ha) |
|-----|---|--|--|---|
| | | CI (Janvier à Mars son lessivage d'entretien) | Mélangeur (CI+CT) (Avril à Octobre avec lessivage d'entretien) | |
| 2 | Variation de la Concentration de l'eau du mélangeur + lessivage | 0.255 | 0.75 | 100.....700 |
| | | | 0.50 | 100.....700 |
| | | | 0.35 | 100.....700 |

Suite au résultat précédents du premier cas, on constate qu'il est nécessaire de modifier la concentration des eaux du mélangeur en augmentant le volume des eaux provenant des forages C.I qui ont une plus faible concentration en Cl^- (0.255 g/l).(Tableau IV.5)

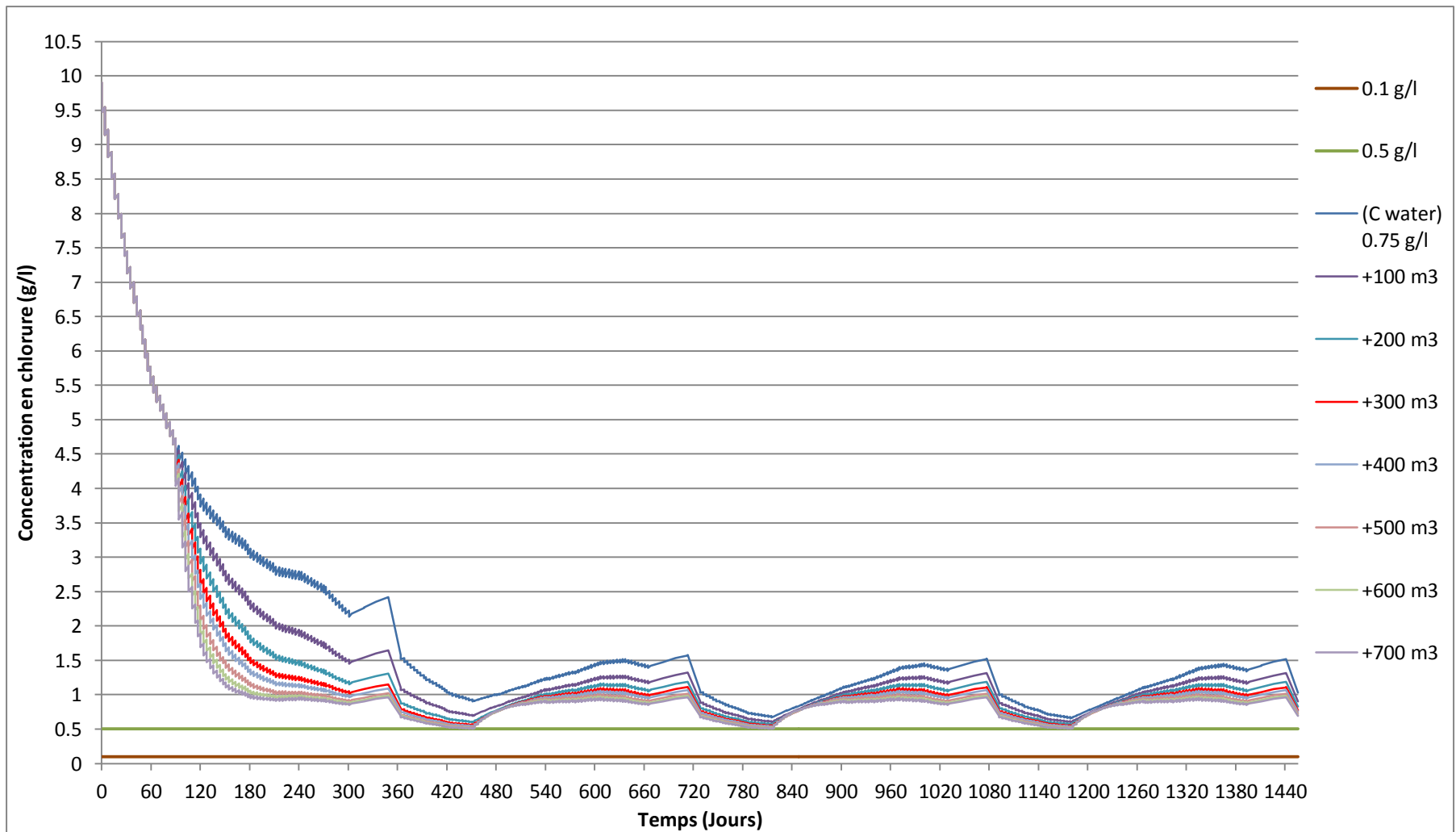


Figure IV. 22 Dynamique de la salinité de la solution du sol avec une concentration d'eau de mélangeur =0.75 g/l

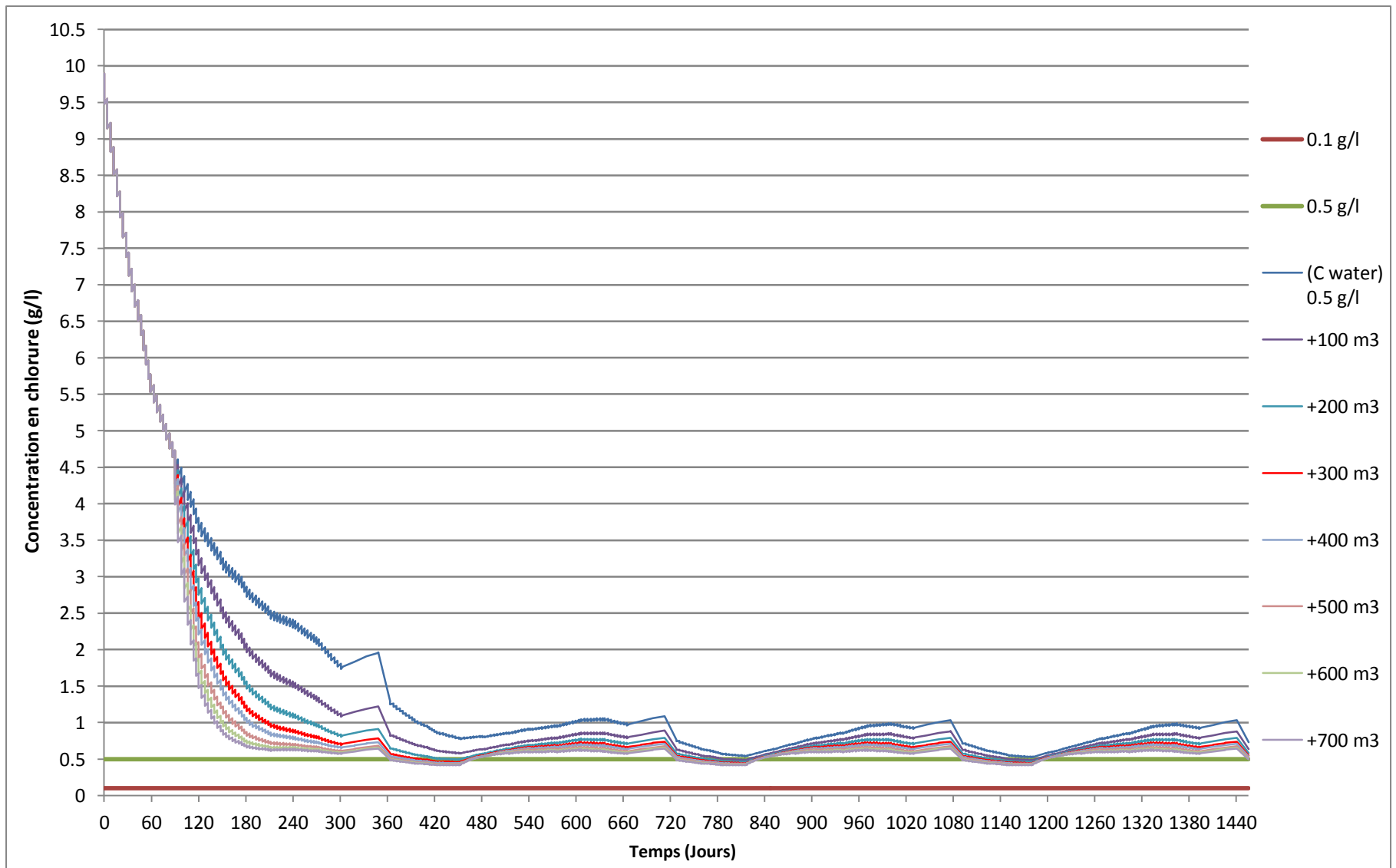


Figure IV. 23 Dynamique de la salinité de la solution du sol avec une concentration d'eau de mélangeur =0.5 g/l

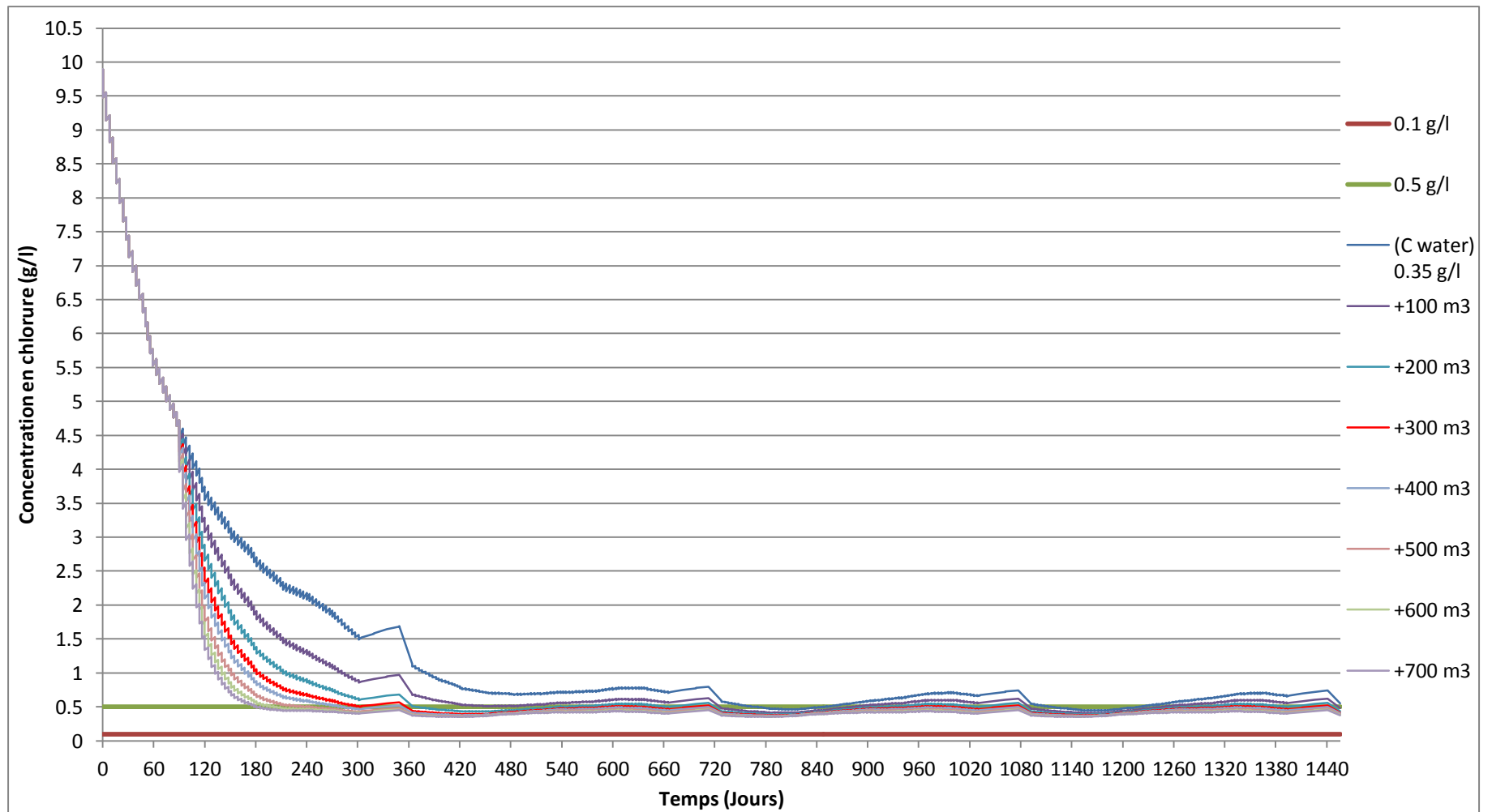


Figure IV. 24 Dynamique de la salinité de la solution du sol avec une concentration d'eau de mélangeur =0.35 g/l

Les figures IV.22, IV.23 et IV.24 illustrent la variation du régime salin pour la même période de rotation avec différentes concentrations et volumes d'eaux qui provient du mélangeur (0.75 g/l; 0.5 g/l ; 0.35 g/l). Elles montrent qu'avec toutes les variations de la concentration de l'eau du mélangeur, on remarque une diminution de la concentration de la solution du sol. On observe qu'à une concentration des eaux de mélangeur égale à 0.35 g/l et avec une dose de lessivage de +300 m³/ha, la salinité de la solution des sols a baissé sous la concentration maximale admissible.

A partir de ces résultats on peut conclure que pour l'obtention d'un lessivage complet de 1 mètre de sol et aboutir à des concentrations inférieures à la concentration maximale admissible en chlorure, il est indispensable de mobiliser d'autres forages C.I.

IV.5 Conclusion

En résumant les résultats pour les différents essais et horizons, on constate que les valeurs du coefficient de convection – diffusion D^* , montrent une légère différence, et varient dans un intervalle de 4.10^{-3} à 8.10^{-2} (m²/j) pour les petites colonnes et de 3.10^{-2} à 6.10^{-2} (m²/j) pour les grandes colonnes. Ces résultats sont dans le même ordre de grandeur que dans les travaux de (Borovski, 1974) (Aidarov, 1991) (Veriguin, 1979) pour le même type de sol.

Tandis que pour la constante de dissolution γ entre ($1.05E-4$ à $2.83 E-4 j^{-1}$), comme pour les essais en petites colonnes, l'ordre de grandeur de la variation de D^* et λ et γ est le même que dans les travaux de (Veriguin et al., 1979)

La connaissance des paramètres ($D^* \approx 0,041$ m²/j) et ($\gamma \approx 2,11E^{-4} j^{-1}$) en se basant sur les solutions inverses de modèle mathématique pour les problèmes de transfert de sel, nous permettent de faire des prévisions des régimes hydro-salins des sols, ce qui donne la possibilité d'optimiser les quantités d'eaux destinées au lessivage et par voie de conséquence prévoir et gérer le risque de la salinisation des terres irriguées.

La recherche pour la prévision du régime hydro-salin et l'optimisation du régime d'irrigation à caractère lessivant sur fond de drainage adéquat pour le rabattement des eaux de la nappe phréatique salée a une grande importance pour la gestion des irrigations à caractère lessivant dans la vallée de l'Oued Righ. A partir des résultats des prévisions du régime hydro-salin pendant la période de rotation des cultures avec les ressources en eaux disponibles, on arrive au constat que les sols de la vallée de l'Oued Righ subissent une salinisation excessive (secondaire) malgré les grandes quantités d'eaux supplémentaires utilisées (+700 m³/ha). Tandis qu'avec la mobilisation

d'un volume d'eau de C.I $C^{cl-} \approx 0.255$, un lessivage complet d'un mètre de sol a été atteint (volume de lessivage égale à $+300 \text{ m}^3/\text{ha}$ par irrigation avec une concentration des eaux d'irrigation en chlore égale à 0.35 g/l). Ceci nous amène à la conclusion que pour arriver à une désalinisation complète du un mètre de sol c'est à dire pour l'obtention d'une concentration moyenne de sels solubles inférieur à la concentration admissible, il est claire qu'il faut mobiliser un volume supplémentaire des eaux du C.I, ce qui est non recommandé par l'OSS. Dans le cas contraire, (en gardant la ressource en eau utilisé actuellement) on est dans l'obligation d'accepter la concentration minimale obtenue ainsi que la réponse agricole correspondante dans ces conditions, (avec un volume de lessivage optimal $+300 \text{ m}^3/\text{ha}$ et la concentration en eau d'irrigation égale à 1 g/l). On peut conclure que la notion de la concentration acceptable dans la vallée de l'Oued Righ est fonction des conditions d'irrigation et est variable d'une oasis à une autre.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire a pour objectif principal la prévision de la salinité des sols et l'optimisation du régime d'irrigation à caractère lessivant dans les terres mises en valeur du sud-est du Sahara Algérien. Ce travail a pu mettre en évidence un certain nombre de résultats intéressants, malgré des moyens limités.

L'étude des conditions naturelles et anthropiques qui contrôle la balance hydrique montre que les paramètres climatiques, hydrogéologiques, la qualité des eaux d'irrigation et de la nappe phréatique sont les facteurs les plus importants régissant sur les processus de mouvement des sels solubles dans le sol. L'accumulation des sels solubles et des sels solubles sous forme cristaux dans la couche active est due essentiellement à la remontée de la nappe phréatique dont les eaux sont extrêmement salée avec des évapotranspirations importantes (ETP), combinée à la rareté des précipitations. Les échanges cationiques ($CEC \approx 2\div 7$ meq/100 g) n'influent pratiquement pas sur les processus de mouvement des sels solubles et la formation du type de régime salin.

La détermination de la dose d'eau de lessivage est réalisée par des méthodes empiriques, semi empiriques, analytiques et numériques. L'utilisation des formules empiriques pour le calcul de la dose de lessivage des sols salins engendre un surplus et un gaspillage d'eau important. Pour mieux gérer et optimiser ces quantités d'eau de lessivage sur une rotation du plan de culture, on a recours à la théorie de transfert des sels solubles dans les milieux poreux qui permet de mettre en évidence plusieurs types de modèles décrivant le transport des sels solubles dans le sol.

La fiabilité et l'efficacité des solutions de ces problèmes mathématiques dépendent particulièrement de la précision de la détermination des paramètres hydrodynamique expérimentaux (D^* , λ , ν) et de la constante de la vitesse de dissolution (γ).

La méthodologie de détermination de paramètres hydrodynamique expérimentaux (D^* , λ , ν , γ) est réalisé par l'observation de la dynamique de l'ion chlorure (Cl^-) pendant le lessivage à la sortie des colonnes de sol. Pour cela, des expériences sur des petites colonnes et de grandes colonnes ont été réalisé avec des échantillons de sol qui ont été prélevé à partir d'une fosse pédologique d'une profondeur de 100 cm (correspond à la couche active de sol) dans la palmeraie d'Ourlana commune de Djamaa (palmeraie représentative).

La détermination des paramètres de transport de sels solubles pour les petites colonnes se fait par l'ajustement de la courbe expérimentale avec les solutions analytiques de l'équation de diffusion-convection à l'aide de logiciel STANMOD (STudio of ANalitical MODels). Cependant, pour les grandes colonnes la détermination des paramètres de transport de sels solubles a été faite en utilisant le programme ASC (Average Salt Concentration).

Après l'obtention des coefficients ($D^* \approx 0,041 \text{ m}^2/\text{j}$) et ($\gamma \approx 2,11 \text{ E-4 j}^{-1}$), les prévisions de la dynamique de sels solubles de la solution de sol pour une période de rotation des cultures à l'aide du modèle mathématique du transfert des sels solubles sont réalisés suivant deux cas: avec la ressource en eau disponible (conditions réels), et avec mobilisation d'un volume d'eau supplémentaire de la nappe du continentale intercalaire.

En résumant les résultats des prévisions du régime hydro-salin pendant la période de rotation des cultures avec les ressources en eaux disponibles, on arrive au constat que les sols de la vallée de l'Oued Righ subissent une salinisation excessive (secondaire) malgré les grandes quantités d'eaux supplémentaires utilisées (+700 m³/ha). Tandis qu'avec la mobilisation d'un volume d'eau de C.I $C^{cl} \approx 0.255$, un lessivage complet d'un mètre de sol a été atteint (volume de lessivage égale à +300 m³/ha par irrigation avec une concentration des eaux d'irrigation en chlore égale à 0.35 g/l). Ceci nous amène à la conclusion que pour arriver à une désalinisation complète du un mètre de sol c'est à dire pour l'obtention d'une concentration moyenne de sels solubles inférieure à la concentration admissible, il est clair qu'il faut mobiliser un volume supplémentaire des eaux du C.I, ce qui est non recommandé par l'OSS. Dans le cas contraire, (en gardant la ressource en eau utilisée actuellement) on est dans l'obligation d'accepter la concentration minimale obtenue ainsi que la réponse agricole correspondante dans ces conditions, (avec un volume de lessivage optimal +300 m³/ha et la concentration en eau d'irrigation égale à 1 g/l). On peut conclure que la notion de la concentration acceptable dans la vallée de l'Oued Righ est fonction des conditions d'irrigation et est variable d'une oasis à une autre et de l'acceptation de la réponse agricole donnée.

Ce travail offre une autre perspective, dans la mesure où il peut être appliqué dans la détermination du régime d'irrigation à caractère lessivant dans un projet de mise en valeur, et être extrapolé dans toute la région de l'Oued Righ et Biskra.

Nous avons donc, donné à la lumière de cette contribution, une approche du processus de la prévision de la salinité des terres et l'optimisation du régime d'irrigation à caractère lessivant. Avec d'autre moyen et dans l'avenir, nous espérons vérifier la validité de nos résultats en étudiant le lessivage sur plusieurs profils de sol sur un champ expérimental in situ...

Listes des annexes

Listes des annexes

Annexe I

Tableau A.I. 1: précipitations moyennes mensuelles interannuelle dans la région de l'Oued Righ, période (1975-2009). (Source : ONM)

| Mois | Sep | Oct | Nov | Dec | Jan | Fevr | Mars | Avri | Mai | Juin | Juill | Aout |
|--------------------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|-------|------|
| Précipitation (mm) | 5.38 | 7.22 | 8.78 | 6.43 | 19.00 | 5.15 | 8.90 | 8.80 | 4.57 | 1.54 | 0.91 | 2.49 |

Tableau A.I. 2: Humidité moyenne mensuelle interannuelle dans la région de l'Oued Righ, période (1975-2009). (Source : ONM)

| Mois | Sep | Oct | Nov | Dec | Jan | Fevr | Mars | Avri | Mai | Juin | Juill | Aout |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Humidité (%) | 42.86 | 50.45 | 59.17 | 63.82 | 63.19 | 53.13 | 47.72 | 42.88 | 38.67 | 33.71 | 31.86 | 32.93 |

Tableau A.I. 3: Température moyenne mensuelle interannuelle dans la région de l'Oued Righ, période (1975-2009). (Source : ONM)

| Mois | Sep | Oct | Nov | Dec | Jan | Fevr | Mars | Avri | Mai | Juin | Juill | Aout |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|
| Temp (C°) | 28.9 | 22.2 | 15.5 | 11.2 | 10.2 | 12.7 | 16.1 | 20.3 | 25.5 | 30.8 | 33.3 | 32.9 |

Tableau A.I. 4: Evaporation moyenne mensuelle interannuelle dans la région de l'Oued Righ, période (1975-2009). (Source : ONM)

| Mois | Sep | Oct | Nov | Dec | Jan | Fevr | Mars | Avri | Mai | Juin | Juill | Aout |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Evaporation (mm) | 272.83 | 196.57 | 126.84 | 106.80 | 104.37 | 131.15 | 203.86 | 257.25 | 321.69 | 382.75 | 406.74 | 376.59 |

Tableau A.I. 5: ETP moyenne mensuelle interannuelle dans la région de l'Oued Righ, période (1975-2009). (Source : ONM)

| Mois | Sep | Oct | Nov | Dec | Jan | Fevr | Mars | Avri | Mai | Juin | Juill | Aout |
|----------|-------|--------|------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|
| ETP (mm) | 195.6 | 131.13 | 71.4 | 48.98 | 62.31 | 84.56 | 134.85 | 188.1 | 230.95 | 260.4 | 253.89 | 238.39 |

Tableau A.I. 6: précipitations moyennes mensuelles interannuelle dans la région de Biskra pour la période (1989-2015). (Source : ONM)

| Mois | Sep | Oct | Nov | Dec | Jan | Fevr | Mars | Avri | Mai | Juin | Juill | Aout |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|
| Précipitation (mm) | 15.54 | 17.29 | 16.98 | 10.36 | 22.51 | 13.30 | 14.69 | 14.90 | 10.06 | 4.99 | 1.83 | 4.46 |

Tableau A.I. 7: Humidités moyennes mensuelles interannuelle dans la région de Biskra pour la période (1989-2015). (Source : ONM)

| Mois | Sep | Oct | Nov | Dec | Jan | Fevr | Mars | Avri | Mai | Juin | Juill | Aout |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Humidité (%) | 39.43 | 47.33 | 53.35 | 58.93 | 56.58 | 48.20 | 43.27 | 38.72 | 32.80 | 29.11 | 26.05 | 30.09 |

Tableau A.I. 8: Températures moyennes mensuelles interannuelle dans la région de Biskra pour la période (1989-2015). (Source : ONM)

| Mois | Sep | Oct | Nov | Dec | Jan | Fevr | Mars | Avri | Mai | Juin | Juill | Aout |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Temp (C°) | 28.94 | 23.69 | 17.10 | 12.89 | 12.01 | 13.60 | 17.30 | 20.54 | 26.06 | 31.03 | 34.34 | 33.90 |

Tableau A.I. 9: Evaporations moyennes mensuelles interannuelle dans la région de Biskra pour la période (1989-2015). (Source : ONM)

| Mois | Sep | Oct | Nov | Dec | Jan | Fevr | Mars | Avri | Mai | Juin | Juill | Aout |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Evaporation (mm) | 287.85 | 208.61 | 141.89 | 108.58 | 110.25 | 134.94 | 189.42 | 245.29 | 317.01 | 373.08 | 411.02 | 376.27 |

Tableau A.I. 10: Evapotranspirations moyennes mensuelles interannuelle dans la région de Biskra pour la période (1989-2015). (Source : ONM)

| Mois | Sep | Oct | Nov | Dec | Jan | Fevr | Mars | Avri | Mai | Juin | Juill | Aout |
|----------|-------|--------|------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|
| ETP (mm) | 207.3 | 159.03 | 77.4 | 57.04 | 66.96 | 84.56 | 130.2 | 178.8 | 226.92 | 231.9 | 238.7 | 229.71 |

Tableau A.I. 11: Synthèse hydrogéologique régionale des différentes aquifères (sans échelle) (Source : A.N.R.H)

| Ere | Etage | Lithologie | Nature hydrogéologique |
|-------------------|---------------------|-------------------------|--|
| Quaternaire | Phréatique | Sable | Nappe phréatique |
| | Pliocène supérieur | Argiles évaporites | Substratum |
| Tertiaire | Miopliocène | Sable | 1 ^{ère} nappe des sables (CT) |
| | | Argiles gypseuses | (semi-perméable) |
| | Pontien | Sables,graviers et grès | 2 ^{ème} nappe des sables (CT) |
| | Eocène Moyen | Argiles lagunaires | Substratum |
| | Eocène inférieur | Dolomies et calcaires | Nappe des calcaires (CT) |
| Sénonien calcaire | | | |
| Secondaire | Sénonien lagunaire | Evaporites, argiles | Substratum |
| | Cénomanién | Argiles, marnes | Substratum |
| | Albien Barrémien | Sables et grès | Nappe albienne (CI) |
| | | | |

Tableau A.I. 12 : Analyse chimique des eaux de la nappe phréatique (Belksier M.Salah, 2009)

| Zone | Oum Thiour | Meghaier | S.Khelil | Ain Chaikh | Jamaa | S.Amran | S.Sliman | Mégarin | Zaouia Abdia | Nezla | |
|----------------------|-------------------------------|----------|----------|------------|--------|---------|----------|---------|--------------|-------|-------|
| Nappe | | | | | | | | | | | |
| PH | 7.3 | 6.8 | 7.4 | 6.3 | 7 | 7.8 | 7.4 | 7.4 | 7.2 | 6.9 | |
| CE (μ .S/cm) | 7100 | 6400 | 5630 | 5160 | 8790 | 1270 | 1340 | 7100 | 6850 | 1260 | |
| + | Ca ²⁺ mg/l | 517 | 288.4 | 323 | 83.2 | 386.2 | 153.8 | 462.2 | 389.4 | 366.6 | 384.6 |
| | Mg ²⁺ mg/l | 176.4 | 223.2 | 202.8 | 39.6 | 482.6 | 146.6 | 398.1 | 292.8 | 284.4 | 416 |
| - | Cl ⁻ | 2130 | 3195 | 3337 | 3443.7 | 3159 | 3337 | 3337 | 3337 | 3408 | 3479 |
| | SO ₄ ²⁻ | 564.9 | 664.8 | 574.5 | 724.8 | 586.5 | 829.9 | 829.9 | 564.9 | 634.5 | 584.6 |
| | HCO ₃ ⁻ | 295.2 | 224.4 | 222 | 197.6 | 24.4 | 417.2 | 417.2 | 300.1 | 309.8 | 588 |
| R.S (g/l) | 6.8 | 6.5 | 6.4 | 6.2 | 6.9 | 5.2 | 5.26 | 6.7 | 6.6 | 5.15 | |

Tableau A.I. 13 Rabattements dans la nappe du CT en Algérie (OSS,2003)

| Zone | Dénomination du Forage | Période | Rabattement (m) |
|-----------|------------------------|-----------|-----------------|
| Oued Righ | Sidi Ahmed Tidjani | 1952-1995 | 32.14 |
| | Chemora | 1955-1991 | 25.70 |
| | Sidi Mestour Bis | 1984-1991 | 25.00 |
| | Zemlet El Kha.2 K 1 | 1961-1970 | 0.20 |

Tableau A.I. 14 Rabattements dans la nappe du CI en Algérie (OSS,2003)

| Zone | Dénomination du Forage | Période | Rabattement (m) |
|-----------|-------------------------|-----------|-----------------|
| Oued Righ | M'rara | 1956-2000 | 88.00 |
| | Tamerna | 1956-2000 | 77.00 |
| | Sidi Mahdi 2 | 1959-2000 | 85.8 |
| | Sidi Slimane | 1962-2000 | 133.9 |
| Biskra | Foughala Ouest | 1981-2000 | 66.6 |
| | Hassi Smara (Ain Smara) | 1983-2001 | 131.7 |
| | Ouled Djelal 3 | 1974-2001 | 62.7 |
| | Sidi Khaled 3 | 1956-2000 | 94.2 |

Tableau A.I. 15: Etat actuel d'exploitation des forages. (ANRH)

| Zone | Formation captée | But d'utilisation | Débit actuel (l/s) |
|----------------------|------------------|-------------------|--------------------|
| TOUGGOURT | Mio-Pliocene | Irrigation | 6078.75 |
| | | Irrigation +AEP | 250.00 |
| | | AEP | 20.00 |
| | Eocène | Irrigation | 324.22 |
| | Sénonien | Irrigation | 8.00 |
| | Albien | AEP | 1625 |
| Total | | | 8305.97 |
| DJAMAA | Miopliocene | Irrigation | 3560.61 |
| | | Irrigation +AEP | 150.00 |
| | | AEP | 15.00 |
| | Albien | AEP | 2645.33 |
| Total | | | 6370.94 |
| EL MEGHAIER | Miopliocene | Irrigation | 1198.82 |
| | | Irrigation +AEP | 36.00 |
| | | AEP | 384.66 |
| | Albien | AEP | 2050.56 |
| Total | | | 3670.04 |
| Total général | | | 18346.95 |

Tableau A.I. 16: Synthèse hydrogéologique régionale des différentes aquifères pour la wilaya de Biskra (Sans échelle) (ANRH, 2008)

| Unités stratigraphiques | Unités lithologiques | Unités hydrogéologiques |
|---|--|--------------------------------|
| Quaternaire | Sables , Argiles | Nappe phréatique |
| Mio-Pliocène | Sables et Argiles | Nappe des sables |
| Eocène moyen | Argiles gypseuses | Semi perméable |
| Eocène inférieur | Calcaires | Nappe des calcaires |
| Sénonien supérieur Maestrichtien Campanien | Calcaires | Nappe des calcaires |
| Sénonien inférieur | Argiles, gypse, sels | Imperméable |
| Turonien | Calcaire dolomitique et Dolomie | Nappe du turonien |
| Cénomaniens | Argiles, marnes, Marno-calcaires et gypse | Imperméable |
| Albien | Calcaire Marnes, Grès | Nappe du continental |
| Aptien | Grès, Dolomies | Imperméable |
| Barrémien | Grès | Nappe du continental |

Tableau A.I. 17: Caractéristiques des nappes captées à travers la wilaya de Biskra

(A.N.R.H)

| Daïra | Nappe | Prof (m) | Q (l/s) | RS (g/l) | NS (m) | Forage en service |
|--------------------|--------------|-----------|---------|----------|--------|-------------------|
| Z/El Oued | Pontien | 500-900 | 20-30 | 2 | ART | 8 |
| | Mio-pliocène | 90-250 | 5-15 | 2-4 | 16-88 | 1228 |
| | Phréatique | 20-60 | 1-3 | 2-4 | 19-21 | 73 |
| Sidi Okba | Pontien | 500-900 | 20-30 | 2 | ART | 8 |
| | Mio-pliocène | 90-250 | 5-15 | 2-4 | 04-46 | 811 |
| | Phréatique | 20-60 | 1-3 | 2-4 | 03-37 | 91 |
| O/Djellal | Albien | 1700-2600 | 60-120 | 2-3 | ART | 5 |
| | Eocène inf. | 90-500 | 5-40 | 0 ?5 | 10-50 | 419 |
| | Mio-pliocène | 90-250 | 5-15 | 2-4 | 10-20 | 70 |
| | Phréatique | 20-60 | 1-4 | 2-4 | 03-10 | 607 |
| Sidi Khaled | Albien | 1500-2500 | 40-120 | 3 | 2/ART | 8 |
| | Eocène inf. | 90-500 | 5-40 | 0,5-4 | 90-120 | 2 |
| | Phréatique | 20-60 | 1-3 | 2-4 | 03-10 | 415 |
| Biskra | Albien | 2500 | 25 | 3 | ART | 1 |
| | Eocène inf. | 90-500 | 5-40 | 0,5-4 | 20-50 | 58 |
| | Mio-pliocène | 90-250 | 5-15 | 2-4 | 10-15 | 30 |
| | Phréatique | 20-60 | 1-3 | 2-4 | 03-10 | 1040 |
| Tolga | Albien | 1700-2600 | 60-120 | 2-3 | ART | 2 |
| | Eocène inf. | 90-500 | 5-40 | 0,5-4 | ART-50 | 475 |
| | Phréatique | 20-60 | 1-3 | 2-4 | 02-05 | 66 |
| Foughala | Albien | 1700-2600 | 60-120 | 2-3 | ART | 1 |
| | Eocène inf. | 90-500 | 5-40 | 0,5-4 | 20-50 | 316 |
| | Mio-pliocène | 90-250 | 5-15 | 2-4 | 07-10 | 97 |

| | | | | | | |
|--------------------|--------------|---------|------|-------|-------|-------------|
| | Phréatique | 20-60 | 1-3 | 2-4 | 03-05 | 309 |
| Ourlal | Albien | 2500 | 25 | 3 | ART | 1 |
| | Eocène inf. | 90-500 | 5-40 | 0,5-4 | ART | 13 |
| | Mio-pliocène | 90-250 | 5-15 | 2-4 | 06-10 | 574 |
| | Phréatique | 20-60 | 1-3 | 2-4 | 02-05 | 885 |
| El Outaya | Mio-pliocène | 90-250 | 5-15 | 2-4 | 20 | 45 |
| El Kantara | Maestrichien | 200-800 | 20 | 1 | 20 | 7 |
| Djemorah | Maestrichien | 100-350 | 10 | 1-2 | 20 | 9 |
| | Mio-pliocène | 150 | 10 | 2-4 | 10 | 11 |
| | Phréatique | 20 | 3 | - | 10 | 3 |
| M'Chounèche | Maestrichien | 200-300 | 15 | 1-2 | 15 | 9 |
| | | | | | | 7699 |

Tableau A.I. 18: Répartition des cultures par commune (Ha) (DSA, 2016)

| Commune | Palmiers | Céréales d'hiver | Fourrages | Maraîchage | Cult industrielles et cond | Arboriculture | Toutes cultures |
|-------------------|----------|---------------------|-----------|------------|-------------------------------|---------------|--------------------|
| AIN NAGA | 324 | 1 860 | 80 | 2 968 | 59 | - | 5 331 |
| AIN ZAATOUT | 40 | 19 | | 16 | - | 131 | 206 |
| BISKRA | 950 | 80 | 50 | 81 | - | 16 | 1 177 |
| BORDJ BEN AZZOUZ | 1 221 | - | 2 | 35 | - | 60 | 1 318 |
| BOUCHAGROUN | 610 | - | 20 | 34 | - | 11 | 675 |
| BRANIS | 208 | 450 | | 33 | - | 25 | 716 |
| CHETMA | 707 | 6 | 2 | 41 | - | 1 | 757 |
| DJEMORAH | 72 | 125 | | 63 | - | 224 | 484 |
| DOUCEN | 404 | 3 615 | 595 | 555 | - | 34 | 5 353 |
| EL FEIDH | 197 | 11 680 | 550 | 1 173 | 459 | 5 | 15 784 |
| EL GHROUS | 706 | - | 50 | 338 | - | 14 | 1 108 |
| EL HADJAB | 1 136 | 60 | 25 | 25 | - | 3 | 1 249 |
| EL HAOUCH | 702 | 3 165 | 60 | 297 | - | - | 4 304 |
| EL OUTAYA | 68 | 2 600 | 50 | 294 | - | 27 | 3 289 |
| FERKANE | 39 | 850 | | 122 | - | 83 | 1 144 |
| FOUGHALA | 996 | - | 20 | 64 | - | 6 | 1 086 |
| KANTARA | 164 | 10 | | 3 | - | 231 | 408 |
| KHANGUET S. NADJI | 216 | 1 702 | 70 | 2 | - | - | 2 100 |
| LICHANA | 749 | - | 15 | 28 | - | 6 | 798 |
| LIOUA | 1 515 | 260 | 45 | 478 | - | 43 | 2 341 |
| M'CHOUNECHE | 829 | 16 | 8 | 86 | - | 12 | 951 |
| M'LILI | 1 080 | 105 | 12 | 82 | - | 5 | 1 284 |
| MEKHADMA | 969 | 40 | 7 | 49 | - | 7 | 1 231 |
| MEZIRAA | 95 | 1 590 | 70 | 2 575 | 36 | 20 | 4 385 |

| | | | | | | | |
|-----------------|--------|--------|-------|--------|-----|-------|--------|
| NEGRINE | 604 | 1 540 | | 613 | - | 92 | 3 249 |
| OULED DJELLAL | 1 845 | 190 | 70 | 87 | - | 10 | 2 211 |
| OUMACHE | 750 | 1 650 | 53 | 230 | - | 15 | 2 698 |
| OURLAL | 1 100 | 80 | 11 | 31 | - | 12 | 1 234 |
| SIDI KHALED | 815 | 70 | 88 | 264 | - | 17 | 1 253 |
| SIDI OKBA | 2 162 | 602 | 132 | 603 | 11 | 8 | 3 518 |
| TOLGA | 2 057 | 2 373 | 20 | 103 | - | 53 | 4 606 |
| ZERIBET EL OUED | 69 | 5 350 | 280 | 1 859 | 208 | 6 | 8 872 |
| Total Ziban | 23 398 | 40 088 | 2 385 | 13 231 | 773 | 1 174 | 85 118 |

Tableau A.I. 19 : Résultats des analyses détaillées des profils pédologiques de l'Oued Righ

| Noms des palmeraies | Surface (ha) | Texture | Granulométrie (%) | Capacité d'échange [meq/100g] | Concentration des sels dans le sol [meq/l] | Profondeur de la N.P [cm] ≈ |
|-----------------------------|--------------------|-------------------------------------|---|-------------------------------|---|-----------------------------|
| Oum el Tiour | 304,59 5,01 % | Limono-sableuse | Argile= 11,54 Limon= 17,59 Sable=68,7075 | | So ₄ ²⁻ = 80,66 Cl ⁻ = 72,70 Na ⁺ =92,49 | 111 |
| Ourir | 262,12 4,31 % | Limono-sableuse | Argile= 7,886 Limon= 25,026 Sable= 58,894 | 4,75 | So ₄ ²⁻ = 86,17 Cl ⁻ = 160,97 Na ⁺ = 140,43 | 104 |
| N'sigha | 101,57 1,67 % | Sablo-limoneuse | Argile= 5,48 Limon= 18,76 Sable= 68,95 | | So ₄ ²⁻ = 62,36 Cl ⁻ = 83,68 Na ⁺ = 70,68 | 100 |
| M'ghaier et Dendouga | 1472,34 24,22 % | Sablo-limoneuse | Argile= 5,92 Limon=15,05 Sable= 71,97 | 2,93 | So ₄ ²⁻ = 61,57 Cl ⁻ = 51,82 Na ⁺ = 63,11 | 112 |
| El Berd et Tendla | 328,22 5,39 % | Sableuse | Argile= 5,785 Limon= 6,9 Sable= 84,31 | 2 | So ₄ ²⁻ =96,11 Cl ⁻ = 156,72 Na ⁺ = 133,86 | 88 |
| El Arfiane | 157,40 2,59 % | Sablo-limoneuse/ Limono-sableuse | Argile= 6,18 Limon= 15,80 Sable= 71,69 | | So ₄ ²⁻ = 54,04 Cl ⁻ = 97 Na ⁺ = 82,19 | 103 |
| Zaouiet-Riab | 540,90 8,90 % | Sablo-limoneuse | Argile= 5,46 Limon= 16,88 Sable= 66,64 | | So ₄ ²⁻ = 90,52 Cl ⁻ = 238,49 Na ⁺ = 205,01 | 96 |
| Mazer | 59,18 0,97 % | Limono-sableuse | Argile= 13 Limon= 18,37 Sable= 64,25 | | So ₄ ²⁻ =62,61 Cl ⁻ =99,63 Na ⁺ = 92,58 | 80 |
| Ourhlana | 62,49 1,02 % | Limono-sableuse | Argile= 14,35 Limon= 21,35 Sable= 62,85 | | So ₄ ²⁻ =54,85 Cl ⁻ =99,83 Na ⁺ =79,40 | 70 |

| | | | | | | |
|-----------------------------|-------------------|--|---|------|---|-----|
| Jamâa | 128,07 2,10 % | Sablo- limoneuse | Argile= 13 Limon= 5,28 Sable= 82,28 | | So ₄ ²⁻ =39,6 Cl ⁻ =40,37 Na ⁺ =30,68 | 60 |
| Tiguedidine Nord/Sud | 433,33 7,13 % | Limono- sableuse | Argile= 12,87 Limon= 19,66 Sable= 59,50 | | So ₄ ²⁻ = 80,66 Cl ⁻ =226,71 Na ⁺ =182,10 | 87 |
| Skouna | 616,19 10,14 % | Limono- sableuse | Argile= 7,5 Limon= 22,87 Sable= 57,79 | 5,31 | So ₄ ²⁻ = 83,69 Cl ⁻ = 182,83 Na ⁺ = 157,05 | 117 |
| Tamerna Kedima | 134,11 2,21 % | Sablo- limoneuse | Argile= 9,18 Limon= 12,63 Sable= 73,36 | | So ₄ ²⁻ =95,31 Cl ⁻ =107,25 Na ⁺ =103,85 | 100 |
| Tamerna Choucha | 226,12 3,72 % | Sablo- limoneuse | Argile= 6 Limon= 13,76 Sable= 68,69 | 3,45 | So ₄ ²⁻ =78,83 Cl ⁻ =172,37 Na ⁺ =134,94 | 100 |
| Moggar | 116,20 1,91 % | Sableuse | Argile= 5,4 Limon= 7,2 Sable= 75,6 | | So ₄ ²⁻ =40,6 Cl ⁻ =47,71 Na ⁺ =50,26 | |
| Ghamra | 71,40 1,17 % | Limono- sableuse / Sablo- limoneuse | Argile= 6,1 Limon= 15,11 Sable= 68,11 | | So ₄ ²⁻ =80,53 Cl ⁻ =147,06 Na ⁺ =133,61 | 90 |
| Tebesbest | 58,50 0,96 % | Sablo- limoneuse | Argile= 5,5 Limon= 12,81 Sable= 71,15 | 6 | So ₄ ²⁻ =97,44 Cl ⁻ =204,24 Na ⁺ =173,44 | 87 |
| Sidi Mahdi | 181,90 3 % | Sableuse | Argile= 7,14 Limon= 5,79 Sable= 85,31 | 2,05 | So ₄ ²⁻ =41,61 Cl ⁻ =40,12 Na ⁺ =36,07 | 106 |
| Ain Sahara | / | Sablo- limoneuse / Sableuse | Argile= 5,75 Limon= 5,5 Sable= 80,25 | | So ₄ ²⁻ =79,1 Cl ⁻ =148,92 Na ⁺ =122,97 | 80 |
| Tougourt Sud | 307,58 5,06 % | Sablo- limoneuse | Argile= 8,59 Limon= 9,00 Sable=76,6 | 1,66 | So ₄ ²⁻ =71,74 Cl ⁻ = 122,39 Na ⁺ = 104,55 | 83 |
| Temacine Est | 18,16 0,30 % | Sablo- limoneuse | Argile= 12,5 Limon= 10,5 Sable= 74,5 | | So ₄ ²⁻ =58,05 Cl ⁻ =38,95 Na ⁺ =61,3 | 90 |
| Temacine Sud-Est | 68,33 1,12 % | Sablo- limoneuse | Argile= 6,87 Limon= 6,37 Sable= 79,5 | | So ₄ ²⁻ =84,16 Cl ⁻ =229,25 Na ⁺ =214,41 | 85 |
| Kardeche | 76,34 1,25 % | Sablo- limoneuse | Argile= 5,09 Limon= 9,88 Sable= 78,03 | | So ₄ ²⁻ = 72,78 Cl ⁻ =86,75 Na ⁺ =69,24 | 77 |
| Blidet Amor | 272,01 4,47 % | Limono- sableuse | Argile= 3,77 Limon= 18,02 Sable= 65,61 | | So ₄ ²⁻ =53,61 Cl ⁻ = 73,84 Na ⁺ =60 | 107 |
| El Goug | 81,40 1,34 % | Sableuse | Argile= 4,05 Limon= 6,85 Sable= 85,75 | | So ₄ ²⁻ =44,66 Cl ⁻ =48,77 Na ⁺ =36,15 | 82 |
| TOTAL | 6078,42 100 % | | | | | |

Tableau A.I. 20 Pourcentages et surfaces des sols sablo-limoneux

| Palmerais | Surface (ha) | Argile (%) | Limon (%) | Sable (%) |
|----------------------|--------------|------------|-----------|-----------|
| N'sigha | 101,57 | 5,48 | 18,76 | 68,95 |
| M'ghaier et Dendouga | 1472,34 | 5,92 | 15,05 | 71,97 |
| Zaouiet-Riab | 540,9 | 5,46 | 16,88 | 66,64 |
| Jamâa | 128,07 | 13 | 5,28 | 82,28 |
| Tamerna Kedima | 134,11 | 9,18 | 12,63 | 73,36 |
| Tamerna Choucha | 226,12 | 6 | 13,76 | 68,69 |
| Tebesbest | 58,5 | 5,5 | 12,81 | 71,15 |
| Tougourt sud | 307,58 | 8,59 | 9 | 76,6 |
| Temacine Est | 18,16 | 12,5 | 10,5 | 74,5 |
| Temacine Sud-Est | 68,33 | 6,87 | 6,37 | 79,5 |
| Kardeche | 76,34 | 5,09 | 9,88 | 78,03 |

La moyenne pondéré d'une particule et calculé comme suit :

$$\text{La moyenne pondéré } \bar{M} = \frac{\sum(\text{surface de palmerai} \times \text{pourcentage d'une particule})}{\text{surface totlale}}$$

$$\bar{M} \text{ Argile} = 6,55 \%$$

$$\bar{M} \text{ Limon} = 13,91 \%$$

$$\bar{M} \text{ Sable} = 71,96 \%$$

Tableau A.I. 21 Pourcentages et surfaces des sols limono-sableux

| Palmerais | Surface (ha) | Argile (%) | Limon (%) | Sable (%) |
|-----------------------------|---------------------|-------------------|------------------|------------------|
| Oum el Tiour | 304,59 | 11,54 | 17,59 | 68,7075 |
| Ourir | 262,12 | 7,886 | 25,026 | 58,894 |
| Mazer | 59,18 | 13 | 18,37 | 64,25 |
| Ourhlana | 62,49 | 14,35 | 21,35 | 62,85 |
| Tiguedidine Nord/Sud | 433,33 | 12,87 | 19,66 | 59,5 |
| Skouna | 616,19 | 7,5 | 22,87 | 57,79 |
| Blidet Amor | 272,01 | 3,77 | 18,02 | 65,61 |

\bar{M} Argile = 9,19 %

\bar{M} Limon = 20,82 %

\bar{M} Sable = 61,36 %

Annexe II

- 9 -

Besoins en eau d'irrigation du palmier avec des cultures
fourragères et maraichères après le réaménagement (EC_w=11,0 mmhos/cm) Tableau N°2

| MOIS | JAN. | FEV. | MARS | AVRIL | MAI | JUIN | JULL. | AOUT | SEPT. | OCT. | NOV. | DEC. | TOTAL |
|---|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|---------|
| ETP (mm) | 62,3 | 84,6 | 134,8 | 188,1 | 230,9 | 260,4 | 253,9 | 238,4 | 195,6 | 131,1 | 71,4 | 49,0 | 1 900,6 |
| DATTES (ha) | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | |
| Coeff.cultural | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 0,75 | 0,75 | |
| Effet d'oasis | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | |
| Evapotransp. (mm) | 37,4 | 50,8 | 80,9 | 120,4 | 147,8 | 166,7 | 162,5 | 190,7 | 140,8 | 94,4 | 42,8 | 29,4 | 1 264,6 |
| LUZERNE (ha) | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | |
| Coeff.cultural | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,95 | 0,48 | 0,48 | 0,5 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | |
| Effet d'oasis | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | |
| Evapotransp. (mm) | 35 | 47 | 75 | 105 | 154 | 87 | 85 | 83 | 137 | 83 | 45 | 31 | 967 |
| ORGE (ha) | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | |
| Coeff.cultural | 1,05 | 1,1 | 1,0 | 0,45 | - | - | - | - | - | - | 0,7 | 0,85 | |
| Effet d'oasis | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | - | - | - | - | - | - | 0,7 | 0,7 | |
| Evapotransp. (mm) | 46 | 65 | 94 | 59 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 35 | 29 | 329 |
| TOMATES (ha) | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | |
| Coeff.cultural | - | - | 0,6 | 0,85 | 1,15 | 1,15 | 0,65 | - | - | - | - | - | |
| Effet d'oasis | - | - | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | - | - | - | - | - | |
| Evapotransp. (mm) | 0 | 0 | 57 | 112 | 186 | 210 | 116 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 680 |
| EC _w (mmhos/cm) | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | |
| EC _e (mmhos/cm) | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | |
| Fraction de lessivage | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,19 | |
| Efficience de lessivage | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | |
| Besoins à la parcelle sans lessivage et pertes (m ³ /ha) | 455 | 620 | 1007 | 1424 | 1725 | 1859 | 1768 | 1990 | 1545 | 1027 | 508 | 354 | 14 282 |
| Besoins de lessivage B (m ³ /ha) | 168 | 229 | 373 | 527 | 638 | 688 | 654 | 736 | 572 | 380 | 188 | 131 | 5 284 |
| Pertes à la parcelle P (m ³ /ha) | 195 | 266 | 432 | 610 | 739 | 797 | 758 | 853 | 662 | 440 | 218 | 152 | 6 122 |
| Pertes percolées dans le sol $(\frac{2}{3} \cdot P)$ (m ³ /ha) | 131 | 177 | 288 | 406 | 492 | 531 | 505 | 568 | 441 | 293 | 145 | 101 | 4 078 |
| $B - \frac{2}{3} P$ (m ³ /ha) | 37 | 52 | 85 | 121 | 146 | 157 | 149 | 168 | 131 | 87 | 43 | 30 | 1 206 |
| Total des pertes avec lessivage (m ³ /ha) | 232 | 318 | 517 | 731 | 885 | 954 | 907 | 1021 | 793 | 527 | 261 | 182 | 7 328 |
| Besoins totaux à la parcelle (m ³ /ha) | 687 | 938 | 1524 | 2155 | 2610 | 2813 | 2675 | 3011 | 2338 | 1554 | 769 | 536 | 21 610 |
| Besoins au forage (m ³ /ha) | 708 | 967 | 1571 | 2222 | 2691 | 2900 | 2758 | 3104 | 2410 | 1602 | 793 | 553 | 22 279 |
| Besoins au forage (l/s/ha) (24 ^h /24 ^h) | 0,26 | 0,40 | 0,59 | 0,86 | 1,0 | 1,12 | 1,03 | 1,16 | 0,93 | 0,60 | 0,31 | 0,21 | 0,71 |
| Débit au forage (20 ^h /24 ^h) (l/s/ha) | 0,31 | 0,48 | 0,71 | 1,03 | 1,20 | 1,34 | 1,24 | 1,39 | 1,12 | 0,72 | 0,37 | 0,25 | 0,85 |
| Débit au forage calculé 24 ^h /24 ^h (l/s/ha) | 0,5 | 0,5 | 0,6 | 0,9 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 0,9 | 0,6 | 0,5 | 0,5 | 0,78 |
| Débit au forage calculé 20 ^h /24 ^h (l/s/ha) | 0,6 | 0,6 | 0,7 | 1,1 | 1,3 | 1,3 | 1,3 | 1,3 | 1,1 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 0,93 |
| | | | | | | | | | | | | | Moyenne |

Besoin en eau d'irrigation avec cultures (Tesco,1983)

Annexe III

Annexe III.1 Programme pour le calcul du coefficient γ (Problème inverse)

```
public class Salinite extends javax.swing.JFrame {

    public static Double sigma=0.000002;
    public static Double L=1.0;
    public static Double LAMPDA=0.1188;
    public static Double RE=1.0;
    public static Double N1=0.600;
    public static Double PHI=0.6;

    public static Double Cs=359.0;
    public static Double C1=0.0300;
    public static Double S0=20.0;
    public static Double St=0.54;

    public static Double vitesse=15.7;

    //Hn pour mew = 2.1
    public static Integer n=6;
    public static Double h1=1.09147415874772;
    public static Double h2=2.30885760610855;
    public static Double h3=3.66223854135674;
    public static Double h4=5.10280263889306;
    public static Double h5=6.59160598106206;
    public static Double h6=8.10743299546621;
    public static Double h7=0.0;
    public static Double h8=0.0;
    public static Double h9=0.0;
    public static Double h10=0.0;

    public static Double gamma(Double Phi, Double vitesse, Double L,
    Double sigma)
    {
        return ((Phi*Math.sqrt(vitesse))/L)*sigma;
    }

    public static Double mew()
    {
        return L/(4.0*LAMPDA);
    }

    public static Double alpha()
    {
        return (St-C1)/(S0-C1);
    }

    public static Double hN(Integer i)
    {
        switch (i)
        {
```

```

        case 1: {
            return h1;
        }

        case 2: {
            return h2;
        }

        case 3: {
            return h3;
        }

        case 4: {
            return h4;
        }

        case 5: {
            return h5;
        }

        case 6: {
            return h6;
        }

        case 7: {
            return h7;
        }

        case 8: {
            return h8;
        }

        case 9: {
            return h9;
        }

        case 10: {
            return h10;
        }
        default : return 0.0;
    }

}

public static Double Taugh()
{
    return N1/(PHI*L*RE);
}

```

```

}

public static Double F0()
{
    return Taugh()/mew();
}

public static Double A(Double SigmaN, Integer i)
{
    return Math.pow(hN(i),2.0)+Math.pow(mew(), 2.0)+(mew()*SigmaN);
}

public static Double PhiN(Double sigma, Integer i)
{
    Double nominateur;
    Double denominateur;

    nominateur= (Math.pow(hN(i),
2)+Math.pow(mew(),2))*(Math.exp(2*mew()))*(Math.pow((Math.sin(2*hN(i))),2));
    denominateur= (2*(Math.pow(hN(i),
2)+Math.pow(mew(),2)+mew()))*A(sigma, i);

    return (Math.pow((-1), i+1))*(nominateur/denominateur);
}

public static Double t1N(Double sigma, Integer i, Double F0)
{
    return (PhiN(0.0,i)*(Math.exp(-A(sigma,i))*F0));
}

public static Double t2N(Double sigma, Integer i, Double F0)
{
    return (PhiN(0.0,i)-(PhiN(sigma,i))*(1-Math.exp(-A(sigma,i))*F0));
}

public static Double St1N(Double sigma, Integer nMax)
{
    Double S=0.0;

    for (int i=1 ; i<=nMax; i++)
    {
        S=S+t1N(sigma, i, F0());
    }
    return S;
}

public static Double St2N(Double Cs, Double C1, Double S0, Double
sigma, Integer nMax)
{
    Double S=0.0;

    for (int i=1 ; i<=nMax; i++)
    {
        S=S+t2N(sigma, i, F0());
    }
}

```

```

        }
        return ((Cs-C1)/S0-C1)*S;
    }

    public static Double SommeGlobale(Double Cs, Double C1, Double S0,
Double sigma, Integer nMax)
    {
        return St1N(sigma, nMax)+St2N(Cs,C1,S0, sigma, nMax);
    }

    public void initTextFields()
    {
        }

/**
 * Creates new form Salinite
 */
public Salinite() {
    initComponents();
    this.initTextFields();
}

        sigma=Double.parseDouble(jTextField2.getText());

    PHI=Double.parseDouble(jTextField6.getText());
    RE=Double.parseDouble(jTextField8.getText());

    LAMPDA=Double.parseDouble(jTextField4.getText());
    L=Double.parseDouble(jTextField5.getText());
    N1=Double.parseDouble(jTextField7.getText());

    Cs=Double.parseDouble(jTextField9.getText());
    C1=Double.parseDouble(jTextField10.getText());
    S0=Double.parseDouble(jTextField11.getText());

    Integer nMax=n;

    Double S= SommeGlobale(Cs,C1,S0, sigma, nMax);
    Double sig=sigma;
    Double pas=0.000001;
    Double precision=0.00001;

    Double alpha = alpha();
    Double minimum=Double.MAX_VALUE;
    Double temp;
    Double sigmaFinale=sigma;
    Double res=S;
    for (int i=1; i<100000;i++)
    {
        temp=alpha-res;
        if (temp<0)
        {
            temp=-temp;
        }
    }

```

```
if (minimum>temp && temp<precision)
{
    minimum=temp;
    sigmaFinale=sig;
}

res=SommeGlobale(Cs,C1,S0,sig,nMax);
sig=sig+pas;
}
```

Annexe III.2 Programme pour la prévision de la salinité de la couche active en présence des sels en cristaux (Problème directe)

```
Public class SaliniteProblemDirecte extends javax.swing.JFrame {

    public static Double N1 = 0.600;
    public static Double PHI = 0.6;
    public static Integer Temp = 31;
    public static Double vitesse = 0.42;
    public static Double L = 1.0;
    public static Double RE = 1.0;
    public static Double LAMPDA = 0.1;
    public static Double gamma = 0.00036;

    public static Double Cs = 359.0;
    public static Double C1 = 0.0300;
    public static Double S0 = 15.0;

    //Hn pour mew = 2.1
    public static Integer n = 6;
    public static Double h1 = 1.142226854;
    public static Double h2 = 3.731838086;
    public static Double h3 = 6.6431207519;
    public static Double h4 = 9.677580227;
    public static Double h5 = 12.75984;
    public static Double h6 = 15.86426;
    public static Double h7 = 0.0;
    public static Double h8 = 0.0;
    public static Double h9 = 0.0;
    public static Double h10 = 0.0;

    public static Double Sigma() {
        return (gamma * L) / (PHI * Math.sqrt(vitesse));
    }

    public static Double mew() {
        return L / (4.0 * LAMPDA);
    }

    public static Double hN(Integer i) {
        switch (i) {
            case 1: {
                return h1;
            }
            case 2: {
                return h2;
            }
            case 3: {
                return h3;
            }
            case 4: {
                return h4;
            }
            case 5: {
                return h5;
            }
        }
    }
}
```



```

    }
    case 6: {
        return h6;
    }
    case 7: {
        return h7;
    }
    case 8: {
        return h8;
    }
    case 9: {
        return h9;
    }
    case 10: {
        return h10;
    }
    default:
        return 0.0;
}
}
public static Double Taugh() {
    return vitesse * Temp;
}
public static Double F0() {
    return Taugh() / mew();
}
public static Double A(Double Sigma, Integer i) {
    return Math.pow(hN(i), 2.0) + Math.pow(mew(), 2.0) + (mew() * Sigma);
}
public static Double PhiN(Double sigma, Integer i) {
    Double nominateur;
    Double denominateur;

    nominateur = (Math.pow(hN(i), 2) + Math.pow(mew(), 2)) * (Math.exp(2 *
mew())) * (Math.pow((Math.sin(2 * hN(i))), 2));
    denominateur = (2 * (Math.pow(hN(i), 2) + Math.pow(mew(), 2) + mew()))
* A(sigma, i);

    return (Math.pow((-1), i + 1)) * (nominateur / denominateur);
}

public static Double t1N(Double sigma, Integer i, Double F0) {
    return (PhiN(0.0, i) * (Math.exp(-A(sigma, i) * F0)));
}
public static Double t2N(Double sigma, Integer i, Double F0) {
    return (PhiN(0.0, i) - (PhiN(sigma, i))) * (1 - Math.exp(-A(sigma, i)
* F0));
}
public static Double St1N(Double sigma, Integer nMax) {
    Double S1 = 0.0;

    for (int i = 1; i <= nMax; i++) {
        S1 = S1 + t1N(sigma, i, F0());
    }
    return S1;
}
}

```

```

    public static Double St2N(Double Cs, Double C1, Double S0, Double sigma,
Integer nMax) {

    Double S2 = 0.0;

    for (int i = 1; i <= nMax; i++) {
        S2 = S2 + t2N(sigma, i, F0());
    }
    return ((Cs - C1) / (S0 - C1)) * S2;
}

public static Double SommeGlobale(Double Cs, Double C1, Double S0, Double
sigma, Integer nMax) {
    return St1N(sigma, nMax) + St2N(Cs, C1, S0, sigma, nMax);
}

public Double StDirecte(Double C1, Double S0, Double Alpha)
{
    return (Alpha*(S0-C1))+C1;
}

```

Annexe III.3 Programme pour le calcul de la salinité de la couche active de sol en utilisant la formule de L.M Rex

```
public static Double CL = 0.025;
    public static Double T = 1.0;

    public static Double V = 0.375;
    //public static Double ma = 0.2;
    public static Double D = 0.03;
    public static Double H = 0.6;

    public static Integer n = 3;

    public static Double h0 = 0.0;
    public static Double h1 = 0.2;
    public static Double h2 = 0.4;
    public static Double h3 = 0.6;
    public static Double h4 = 0.8;
    public static Double h5 = 1.0;
    public static Double h6 = 1.4;
    public static Double h7 = 0.0;
    public static Double h8 = 0.0;
    public static Double h9 = 0.0;
    public static Double h10 = 0.0;

    public static Double c0 = 0.313;
    public static Double c1 = 0.305;
    public static Double c2 = 0.321;
    public static Double c3 = 0.393;
    public static Double c4 = 0.479;
    public static Double c5 = 0.580;
    public static Double c6 = 0.812;
    public static Double c7 = 0.0;
    public static Double c8 = 0.0;
    public static Double c9 = 0.0;
    public static Double c10 = 0.0;

    public static Double A() {
        //return (V / (2 * ma)) * (Math.sqrt(T / D));
        return (V / (2)) * (Math.sqrt(T / D));
    }

    public static Double Z() {
        //return (H * ma) / (V * T);
        return (H) / (V * T);
    }

    public static Double h(Integer j) {
        System.err.println("h(" + j + ")");
        switch (j) {
            case 0: {
                return h0;
            }
            case 1: {
                return h1;
            }
        }
    }
}
```

```

        case 2: {
            return h2;
        }
        case 3: {
            return h3;
        }

        case 4: {
            return h4;
        }
        case 5: {
            return h5;
        }
        case 6: {
            return h6;
        }

        case 7: {
            return h7;
        }

        case 8: {
            return h8;
        }

        case 9: {
            return h9;
        }

        case 10: {
            return h10;
        }

        default:
            return 0.0;
    }
}

public static Double c(Integer j) {
    System.err.println("c(" + j + ")");
    switch (j) {
        case 0: {
            return c0;
        }
        case 1: {
            return c1;
        }
        case 2: {
            return c2;
        }
        case 3: {
            return c3;
        }

        case 4: {
            return c4;
        }
    }
}

```

```

        }

        case 5: {
            return c5;
        }

        case 6: {
            return c6;
        }

        case 7: {
            return c7;
        }

        case 8: {
            return c8;
        }

        case 9: {
            return c9;
        }

        case 10: {
            return c10;
        }

        default:
            return 0.0;
    }
}

public static Double h0(Integer j) {
    //return (h(j) * ma) / (V * T);
    return (h(j)) / (V * T);
}

public static Double Z_moins(Integer j) {
    return 1 + h0(j) - Z();
}

public static Double Z_plus(Integer j) {
    return 1 + h0(j) + Z();
}

public static Double erfc(Double s) {
    return org.apache.commons.math3.special.Erf.erfc(s);
}

public static Double ierfc(Double s) {
    return ((1 / Math.sqrt(Math.PI)) * Math.exp(-Math.pow(s, 2))) - (s *
(erfc(s)));
}

public static Double FAZ(Integer j) {
    return erfc(A() * Z_moins(j))

```

```

        + ((erfc(A() * Z_plus(j)) - ((4) * (A()) * (ierfc(A() *
Z_plus(j)))) * Math.exp(4 * Math.pow(A(), 2) * Z()));
    }

    public static Double SN(Integer j) {
        return (c(j + 1) - c(j)) * FAZ(j + 1);
    }

    public static Double Somme(Integer n) {
        Double S = 0.0;

        for (int j = 0; j <= (n - 1); j++) {
            System.err.println("S = " + S + " + SN(" + j + ")");
            S = S + SN(j);
        }
        return S;
    }

    public static Double W() {
        return ((c(0) - CL) * FAZ(0));
    }

    public static Double Resultat(Integer n) {
        return CL + (0.5 * (W() + Somme(n)));
    }
}

```

Annexe III.4 Programme pour le calcul de la salinité dans les terres exicive salé $C_0=C_s$

```
Public class MaximumSaturation extends javax.swing.JFrame {

    public static Double sigmaPropose = 0.0;
    public static Double L = 1.0;
    public static Double LAMPDA = 0.1;
    //public static Double LAMPDA=0.1188;
    public static Double RE = 1.0;
    public static Double N1 = 0.600;
    public static Double PHI = 0.6;

    public static Double Cs = 359.0;
    public static Double C1 = 0.0300;
    //public static Double S0=20.0;
    public static Double St = 0.4;
    public static Double StDirect = 0.4;
    //public static Double St=0.54;

    public static Double vitesse = 0.42;

    //Hn pour mew = 2.1
    public static Integer n = 6;
    public static Double h1 = 1.142226854;
    public static Double h2 = 3.731838086;
    public static Double h3 = 6.6431207519;
    public static Double h4 = 9.677580227;
    public static Double h5 = 12.75984;
    public static Double h6 = 15.86426;
    public static Double h7 = 0.0;
    public static Double h8 = 0.0;
    public static Double h9 = 0.0;
    public static Double h10 = 0.0;

    public static Double gamma(Double Phi, Double vitesse, Double L, Double
sigma) {
        return ((Phi * Math.sqrt(vitesse)) / L) * sigma;
    }

    public static Double mew() {
        return L / (4.0 * LAMPDA);
    }

    public static Double alpha() {
        return (Cs - St) / (Cs - C1);
    }

    public static Double hN(Integer i) {
        switch (i) {
            case 1: {
                return h1;
            }

            case 2: {
                return h2;
            }
        }
    }
}
```

```

    }

    case 3: {
        return h3;
    }

    case 4: {
        return h4;
    }

    case 5: {
        return h5;
    }

    case 6: {
        return h6;
    }

    case 7: {
        return h7;
    }

    case 8: {
        return h8;
    }

    case 9: {
        return h9;
    }

    case 10: {
        return h10;
    }
    default:
        return 0.0;
}

}

public static Double Taugh() {
    return N1 / (PHI * L * RE);
}

public static Double F0() {
    return Taugh() / mew();
}

public static Double A(Double SigmaN, Integer i) {
    return Math.pow(hN(i), 2.0) + Math.pow(mew(), 2.0) + (mew() * SigmaN);
}

```



```

    }

    public static Double PhiN(Double sigma, Integer i) {
        Double nominateur;
        Double denominateur;

        nominateur = (Math.pow(hN(i), 2) + Math.pow(mew(), 2)) * (Math.exp(2 *
mew())) * (Math.pow((Math.sin(2 * hN(i))), 2));
        denominateur = (2 * (Math.pow(hN(i), 2) + Math.pow(mew(), 2) + mew()))
* A(sigma, i);

        return (Math.pow((-1), i + 1)) * (nominateur / denominateur);
    }

    public static Double t1N(Double sigma, Integer i, Double F0) {
        return (PhiN(0.0, i) * (Math.exp(-A(sigma, i) * F0)));
    }

    public static Double t2N(Double sigma, Integer i, Double F0) {
        return (PhiN(0.0, i) - (PhiN(sigma, i))) * (1 - Math.exp(-A(sigma, i)
* F0));
    }

    public static Double t3N(Double sigma, Integer i, Double F0) {
        return ((PhiN(sigma, i)) * (1 - Math.exp(-A(sigma, i) * F0)));
    }

    public static Double St1N(Double sigma, Integer nMax) {
        Double S = 0.0;

        for (int i = 1; i <= nMax; i++) {
            S = S + t1N(sigma, i, F0());
        }
        return S;
    }

    public static Double St2N(Double Cs, Double C1, Double S0, Double sigma,
Integer nMax) {
        Double S = 0.0;

        for (int i = 1; i <= nMax; i++) {
            S = S + t2N(sigma, i, F0());
        }
        return ((Cs - C1) / (S0 - C1)) * S;
    }

    public static Double St3N(Double sigma, Integer nMax) {
        Double S = 0.0;

        for (int i = 1; i <= nMax; i++) {
            S = S + t3N(sigma, i, F0());
        }
        return S;
    }

```

```
public static Double SommeGlobale(Double sigma, Integer nMax) {  
    return St3N(sigma, nMax);  
}
```

Annexe IV

Système d'irrigation dans la vallée de l'Oued Righ

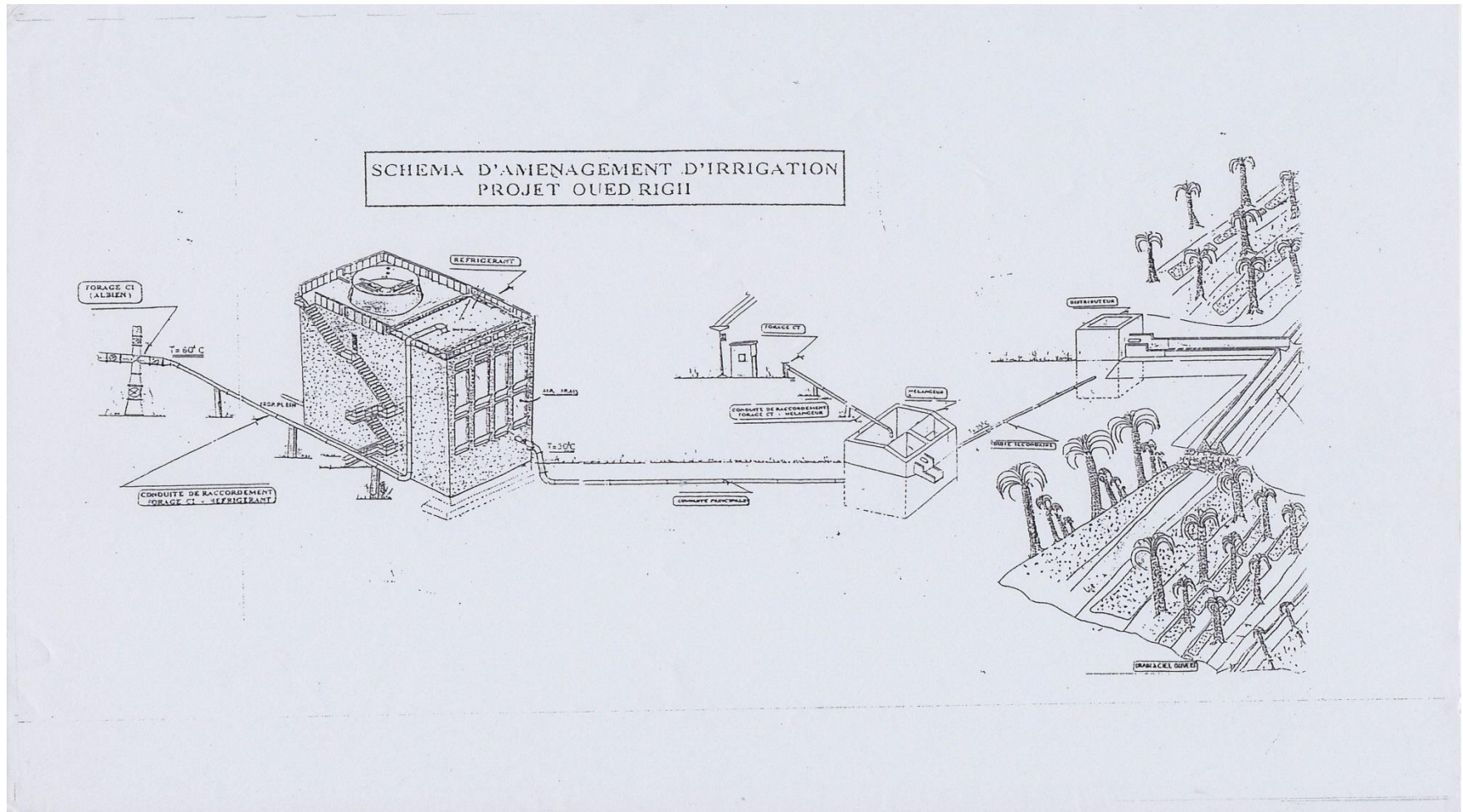


Schéma d'aménagement d'irrigation de l'Oued Righ (Tesco, 1983)



Cultures occupant les oasis dans la palmeraie d'Ourlana



Ouvrage Mélangeur



Canaux d'irrigation

Résultats des analyses après le lessivage :

Tableau.: Concentration de la solution du sol des grandes colonnes après le lessivage

| Essai | Concentration en (Cl ⁻) | Concentration en (Na ⁺) | Unité |
|-------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------|
| 1 | 0.55 | 0.50 | g/l |
| 2 | 0.388 | 0.40 | |
| 3 | 0.50 | 0.45 | |

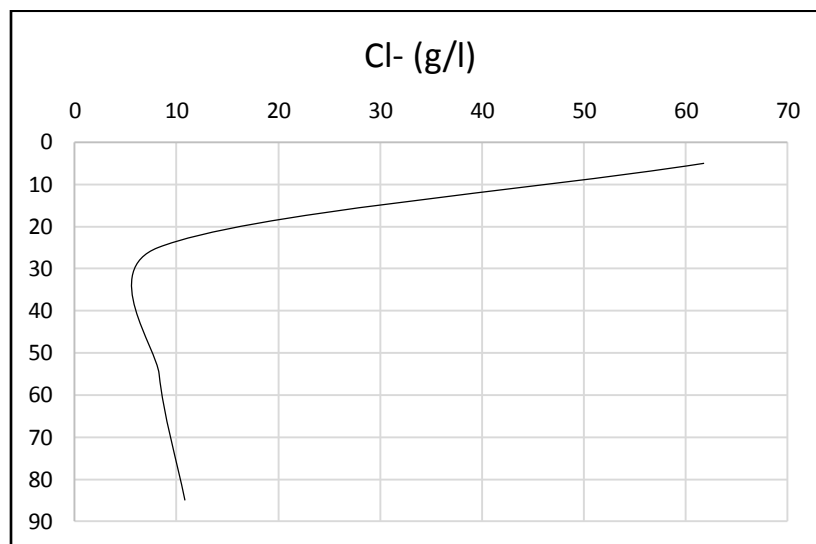


Figure : Courbe illustre la salinité initiale en ion (Cl⁻) pour le sol de la palmeraie d'Ourlana

Références bibliographique

ANAT, 2003. Etude « Schéma directeur des ressources en eau de la Wilaya de Biskra » Dossier Agro-Pédologique. Ed. Direction régional sud- Biskra.

ANRH, 2008. Inventaire des points d'eau et enquête sur les débits extraits de la wilaya de Biskra. Ed. Direction régional sud- Ouargla.

ANRH, 2010. Note relative à l'étude piézométriques et hydrochimiques des eaux de la nappe du quaternaire de la wilaya de Biskra. Ed. Direction régional sud- Ouargla.

Averyanov, S.F., 1978. Lutte contre la salinisation des terres irriguées. Moscow: Ed. Kollos. [In Russian].

Aydarov, I. P., Korol'kov A. I., and Khachatur'yan, V. Kh., 1988. Calculation of Water-Salt Regime of Soils. *Pochvovedenie*, 5, 62–69. Moscow: Ed. Naouka. [In Russian].

Aydarov, I.P., et al., 1978. Modèle mathématique de la dynamique des ions sodium et calcium dans les sols. *Pochvovedenie*, 8, 135- 139. Moscow: Ed. Naouka. [in Russian].

Bear, J., 1972. Dynamics of flow in porous media. New York: Ed. Elsevier.

Belksier Mohamed Salah, 2009. Hydrogéologie et hydrochimie de la nappe superficielle dans la région de l'Oued Righ et l'évaluation de sa vulnérabilité. Thèse de Magister, Univ. Badji Mokhtar-Annaba.

Bobtchenko, V.I., Sidko, A.A., and Simonova, T.I., 1981. Régime d'irrigation à caractère lessivant. In : V.R. Kovda, ed. Lutte contre la salinité des terres. Moscow : Ed. Kolos, 228-253. [In Russian].

Borovski, V.M., 1974. Méthode qualitative dans la mise en valeurs des terres salées. Alma Ata Kazakhstan: Ed. Naouka. [In Russian].

Bouguedoura, N., et al., 2015. Date palm status and perspective in Algeria. In: Jameel M. Al-Khayri., et al., Eds. Date palm genetic resources and utilization volume 1: Africa and the Americas. Netherlands: Ed. Springer, 125-168.

Brenner H., 1962. The diffusion model of longitudinal mixing in beds of finite length numerical values. Chemical Engineering Science, Vol. 17 London: Ed. Pergamon Press Ltd. pp. 229-243.

Choumakov, B.B., 1990. Irrigation. Moscow: Ed. Agropromizdat [In Russian].

D Papadoupoulos, 1972. Statistical Substantiation of the Leaching Rates. Ph.d Thesis university of Moscow (MGU).

D Papadoupoulos, 1973. On the determination of the leaching rates. Gidrotehnika i melioratsiya № 7. Moscow: Ed. Agropromizdat

Debbakh A, 2012. Qualité et dynamique des eaux des systèmes Lacustres en amont de l'Oued Righ. Thèse de Magister, Univ. Kasdi Merbah Ouargla.

Dennis L. Corwin et al., 2007. Leaching requirement for soil salinity control: Steady-state versus transient models. Agric. Water Manage. 90, 165–180. Amsterdam, Netherlands: Ed. Elsevier.

Derek Morrison and Clyde Munster, 2015. Groundwater App to Determine Flow Direction and Gradient. Groundwater journal, Vol. 53, No. 2, 342–346. New York, US: ed. Wiley.

Ekberli , 2006. Determination of Hydro-chemical Parameters of Salt Transportation in Soil by Using the Solution of Convective Diffusion Equation. Journal of Applied Sciences, 6: 1243-1247. Ed. Asian Network for Scientific Information.

Farhi Y, 2014. Structure et dynamique de l'avifaune des milieux steppiques présahariens et phœnicicoles des Ziban. Thèse de Doctorat, Univ. Khider M. Biskra.

Feike Leij., Martinus Th. van Genuchten., 1999. Solute Transport In: M. Sumner (ed.), Handbook of Soil Science Chapter 6, pp. A183-A227. CRC Press, Boca Raton, Florida.

Gaudet, J.P., 1978. Transferts d'eau et de solutés dans les sols non saturés. Mesures et simulations. Thesis (PhD). Université scientifique et médicale et Institut National Polytechnique de Grenoble.

Golovanov, A.I., et al., 2011. Amélioration des sols. Moscow: Ed. Kolos. [in Russian].

HANNA INStruments, 2012. Instruction Manuel HI 4521 & HI 4522. Lingolsheim, France.

Heath, R.C., 1987. Basic ground-water hydrology. Water Supply Paper 2220. Denver, Colorado: U.S. Geological Survey.

Kovda, V.R., 1973. Irrigation, Drainage and Salinity. PARIS/ UNESCO HUTCHINSON & CO (Publishers) LTD 3 Fitzroy Square, London W1, FAO/UNESCO

Kovda, V.R., 1976. Arid Land Irrigation In Developing Countries: Environmental Problems And Effects International Symposium, 16-21 February. Alexandria, Egypt. Ed. Pergamon Press.

Kovda, V.R., 1984. Problèmes de lutte contre la désertification et la salinisation des terres irriguées. Moscow: Ed. Kolos. [In Russian].

Lapidus L. and Amundson N.R., 1952. Mathematics of adsorption in beds. Vi. The effect of longitudinal diffusion in ion exchange and chromatographic columns. Journal of Physical Chemistry, Volume 56 (8), 984-988. États-Unis: Ed. American Chemical Society.

Letey, J et al., 2011. Evaluation of soil salinity leaching requirement guidelines. Agric. Water Manage. 98, 502–506. Amsterdam, Netherlands: Ed. Elsevier.

Luekov A.V., 1967. Théorie de la conductivité thermique Moscow: Ed. Vysshaya Shkola. [in Russian].

M. K. Shukla, F.J. Kastanek and D. R Nielsen., 2000. Transport of Chloride through Water-Saturated Soil Columns. Journal for Land Management, Food and Environment (Die Bodenkultur) 51, 235–414. Warsaw, Poland: Ed. De Gruyter.

M.B. Kirkham,. 2004. Principles of soil and plant water relations. Second edition, Kansas State University, 2004 Throckmorton Plant Science Ctr, Manhattan, USA.

Messahel, M., and Meza, N., 2004. Evaluation of the evaporation of ground water and depth of drainage in irrigated lands in saharian area. *La Houille Blanche*, 4, 25-28. Grenoble, France: Ed. Société Hydrotechnique de France.

Mettler Toledo, 2012. Guide pour les mesures ionométriques. Switzerland.

Meza N. et al., 2003. Qualité et quantité des eaux d'irrigation en régions sahariennes. In : recueil des communications des journées techniques et scientifiques sur la qualité des eaux du sud El Oued. Alger: Ed. ADE.

Meza, N., et al., 2001. L'irrigation et le drainage en région saharienne et leur impact sur le milieu. In : L'environnement en Algérie- Impact sur l'écosystème. Constantine : Ed. URAMA.

Mhiri A, et al., 1998. Approche systémique des risques de salinisation par endoréisation anthropique. *Etude et Gestion des sols*, 5 (4) : 257-268. Orleans, France: Ed. Association Française de l'Etude des Sols.

Mikayilov, F. D., 2007 Determination of Salt-Transport Model Parameters for Leaching of Saturated Superficially Salted Soils. *Eurasian Soil Science (Pochvovedenie)*, 40 (5), 544–554. Moscow: Ed. Naouka.

Mikayilov, F. D., and Azizov, K. Z., 1985. Determination of the Hydrochemical Parameter of Salt Transfer during the Leaching of Water-Saturated Saline Soils. *Pochvovedenie*, 5, 84–90. Moscow: Ed. Naouka. [In Russian].

Mikayilov, F. D., Pachepsky, Y.A., 2010. Average concentration of soluble salts in leached soils inferred from the convective–dispersive equation. *Irrigation science*, 28 (5), 431-434. Netherlands: Ed. Springer.

Mikayilov, F.D., 2012. Analysis of Solutions of the Equation for the Convective Diffusion of Ions in Soil *Eurasian Soil Science*, 2012, Vol. 45, 4, 408–415. Moscow: Ed. Naouka.

Moudrikh, N.M., Aliochin M.A., 2011. Méthodologie des travaux pratique en agrochimie. Perm : F.G.B.O.OU V.P.O Permeskaya G.S.KH.A [in Russian].

Myriam Marie El Fergougui, Djamel Boutoutaou & et Noureddine Meza (2016): Etude de l'évaporation de la nappe phréatique des zones arides: cas de Ouargla (Algérie), Hydrological Sciences Journal. Royaume-Uni : Ed. Taylor & Francis

NICO2000, 2015. Method for determining the concentration of Chloride (Cl-) in Aqueous Solutions. <http://www.nico2000.net/analytical/chloride.htm>

OSS., 2003. Système aquifère du Sahara septentrional: une conscience du bassin, 2ème édition Hydrogéologie. Volume II. Tunis.

OSS., 2008. Le Système aquifère du Sahara septentrional (Algérie, Tunisie, Libye), Gestion concertée d'un bassin transfrontalier, Collection synthèse, n°1, Tunis, 56p.

OSS., 2015. Système aquifère du Sahara septentrional: Pour une meilleure valorisation de l'eau d'irrigation dans le bassin du SASS. Diagnostic et recommandations. Tunis.

Pachepski, Y.A., 1990. Mathematical Models of Physico-chemical Processes in Soils Moscow: Ed. Naouka. [In Russian].

Reks, L.M., 1967. Distribution De Sels Dans La Couche De Sols-Cadre. Journal de Mécanique appliquée et physique technique, N°6, 35-39. Novossibirsk : Ed. SO RAN [In Russian].

Reks, L.M., Kiryicheva, L.V., 1981. Méthode de prédiction des régimes hydro-salins des terres irriguées (à l'exemple de la rivière Syr-Darya). In : L.G. Balaeva, ed. L'expérience Soviéto-Américaine sur l'utilisation efficace des terres salées, 23-44. Moscow : Ed. Kolos [In Russian].

Salah Eddine Benziouche, Foued Cheriet., 2012. Structure et contraintes de la filière dattes en Algérie. NEW MEDIT N°4,49-57. Bari, Italie: Ed. Institut Agronomique de la méditerranée

Scripchinskaya, L.V., et al., 1977. Amélioration hydro technique des sols. Kiev: ed. Vysshaya Shkola. [In Russian].

- Shein, E. V., 2005. Course of Soil Physics. Moscow: ed. Gos. Univ. [in Russian].
- Shein, E. V., et al., 2001. Field and laboratory methods for studying physical properties and soil regimes: Methodological guide. Moscow: Ed. VO MG Univ. [in Russian].
- Šimůnek J. van Genuchten Martinus Th. Šejna M., 2008 Development and Applications of the HYDRUS and STANMOD Software Packages and Related Codes. Vadose Zone Journal, Volume 7, 587-600. Madison, Wisconsin: ed. Soil Science Society of America.
- Simunek J., M.-T. Van Genuchten, M. Sejna, N. Toride et F.-J. Leij (1999). The STANMOD computer software for evaluating solute transport in porous media using analytical solutions of convection-dispersion equation. Colorado: Ed. School of Mines, Golden.
- Sogetha Sogreah, 1971. Étude agro-pédologique. In: Participation à la mise en valeur de l'Oued-Righ. Alger : Ed. Ministère Travaux Public
- Tahsa Noureddine., 1982. Théorie sur le déplacement miscible en milieux poreux : Application à la détermination des paramètres hydrodynamiques sous différentes conditions. Thèse (PhD). Faculté des sciences agronomiques de l'état de Gembloux –Belgique- et Institut agronomique et vétérinaire Hassan II –Rabat- Maroc.
- Tesco-Visiterev., 1985-1986. Etude agro-économique. Réaménagement et extension des palmeraies de la vallée de l'Oued Righ. Ed Budapest.
- Tien Dung Tran Ngoc., 2008. Transport de solutés dans un milieu à double-porosité non saturé Modélisation par homogénéisation et applications. Hydrology. Université Joseph-Fourier –Grenoble.
- Toride N., F.J. Leij and M.T. Van Genuchten (1995). The CXTFIT code for estimating transport parameters from laboratory and field tracer experiments. US Salinity Laboratory Research Report, vol.138.
- Van Genuchten, M.T., Alves, W.J., 1982. Analytical solutions of the one dimensional convective–dispersive solute transport equation. Technical Bulletin N°1661. U.S : Department of Agriculture.

Van Genuchten, M.T., Parker, J.C., 1984. Boundary conditions for displacement experiments through short laboratory soil columns. *Soil Science Society of America Journal* 48, 703-708
Madison, Wisconsin: ed. Soil Science Society of America.

Veriguin, N.N., 1957. Cinétique de dissolution des sels solubles pendant la filtration des eaux dans les sols. In: *Dissolution and Desalination of Rocks (Minerals)*. Moscow: State publishing house, literature for construction and architecture, 84-113 [in Russian].

Veriguin, N.N., Azizov, K. Z., and Mikayilov, F. D., 1986. Effect of Boundary Conditions in the Simulation of Salt Transfer in Soils under Leaching. *Pochvovedenie*, 6, 67–73. Moscow: Ed. Naouka [In Russian].

Veriguin, N.N., et al., 1979. Methods of Predicting the Salt Regime of Soils and Ground Waters. Moscow: Ed. Kolos. [In Russian].

Vyacheslav G. Rumynin., 2010. *Theory and Applications of Transport in Porous Media: Subsurface Solute Transport Models and Case Histories*. London: Ed. Springer.