



ESJ Natural/Life/Medical Sciences

Abdelwahed Chaou,
Mohamed Chikhaoui,
Mustapha Naimi,

Department of Natural Resources and Environment,
Hassan II Agronomic and Veterinary Institute,
Rabat, Morocco

Aissa Kerkour El Miad,

Department of Mathematics and Computer Science
Mohammed Premier University, Oujda, Morocco

Aiman Achemrk,

OCP Group
Casablanca, Morocco

Submitted: 28 September 2020

Accepted: 27 October 2020

Published: 30 November 2020

Corresponding author:

Mohamed Chikhaoui

DOI: [10.19044/esj.2020.v16n33p206](https://doi.org/10.19044/esj.2020.v16n33p206)



Copyright 2020 Chikhaoui et al.
Distributed under Creative Commons
BY-NC-ND 4.0 OPEN ACCESS

Cite as:

Chaou A, Chikhaoui M, Naimi M, El Miad A, Achemrk A (2020). Cartographie Du Risque De Salinité Des Sols À L'aide De L'approche Des Indices Et Des Données Multi-Sources : Cas De La Plaine De Tadla Au Maroc *European Scientific Journal, ESJ*, 16 (33), 206.
<https://doi.org/10.19044/esj.2020.v16n33p206>

Cartographie Du Risque De Salinité Des Sols À L'aide De L'approche Des Indices Et Des Données Multi-Sources: Cas De La Plaine De Tadla Au Maroc

Résumé:

La salinisation est l'une des formes de dégradation des sols qui connaît une extension spectaculaire et qui révèle des aspects de plus en plus inquiétants. Elle contribue à la diminution de la production agricole dans la plupart des zones irriguées du monde, notamment celles soumises à un climat aride ou semi-aride. Ce phénomène résulte des effets synergiques du climat, de la roche mère, de l'agressivité des conditions naturelles et des activités anthropiques. Dans ce contexte, la présente étude se fixe comme objectif de cartographier le risque de salinité des sols de la plaine de Tadla. Pour atteindre cet objectif, nous avons adopté l'approche de l'Indice de Risque de Salinisation des Sols (IRSS) calculé à l'aide des données multi-sources (pédologiques, climatiques, hydrologiques et de salinité). La superposition des variables mises en jeu (la conductivité électrique de l'eau de nappe, la conductivité électrique de l'eau d'irrigation, la conductivité électrique du sol, la profondeur de la nappe, l'indice d'aridité, le type de climat, la pente, la texture et l'efficacité géologique) et leur pondération ont été réalisées à l'aide des SIG. Cette opération a permis de calculer l'indice IRSS et d'élaborer la carte de risque de salinité des sols de la zone d'étude. Cette approche basée sur l'IRSS a montré la présence de trois classes de risque de salinisation : léger, modéré et sévère. La classe de risque modéré domine avec une couverture de 76% de la superficie totale. Les résultats obtenus

montrent l'intérêt de cette approche pour déterminer les zones à risque de salinisation afin de mieux gérer le risque de la salinisation des sols et réduire les effets de celle-ci sur la production agricole.

Subject: Sciences du sol et Agriculture

Mots-clés : Dégradation du sol, Salinité du sol, Indice de risque de salinisation, Plaine de Tadla, Maroc

Soil salinity risk mapping using the index approach and multi-source data: Case of the Tadla Plain in Morocco

***Abdelwahed Chaaou,
Mohamed Chikhaoui,
Mustapha Naimi,***

Department of Natural Resources and Environment,
Hassan II Agronomic and Veterinary Institute, Rabat, Morocco

Aissa Kerkour El Miad,

Department of Mathematics and Computer Science
Mohammed Premier University, Oujda, Morocco

Aiman Achemrk,

OCP Group, Casablanca, Morocco

DOI: [10.19044/esj.2020.v16n33p206](https://doi.org/10.19044/esj.2020.v16n33p206)

Abstract:

Salinization is one of the forms of soil degradation that is expanding dramatically and is revealing increasingly worrying aspects. It contributes to the decline in agricultural production in most of the world's irrigated areas, especially those subject to arid or semi-arid climate. This phenomenon is the result of the synergistic effects of climate, bedrock, the aggressiveness of natural conditions and anthropogenic activities. In this context, the present study focuses on the mapping of salinity risk in the soils of Tadla Plain. To achieve this objective, we adopted the approach of the Soil Salinity Risk Index (SSRI) calculated using data from multiple sources (pedological, climatic, hydrological and salinity). The necessary variables (electrical conductivity of groundwater, electrical conductivity of irrigation water, electrical conductivity of soil, depth to groundwater, aridity index, climate type, slope, texture and geological efficiency) were overlaid and weighted using GIS. This operation allowed to calculate the SSRI and develop the soil salinity risk map of the study area. The use of the SSRI-based approach indicates the presence of three risk classes: light, moderate and severe. The moderate risk class dominates with a coverage representing 76% of the total area. The results obtained show the prospect of this approach to delineate areas of salinization risk to manage soil salinization and reduce its effects on agricultural production.

Keywords: Soil Degradation, Soil Salinity, Risk Index, Tadla Plain, Morocco

Introduction :

La salinisation pose un problème sérieux dans le développement de l'agriculture moderne ainsi que dans la préservation de l'environnement. L'étendue globale des sols affectés par la salinisation primaire dans le monde est d'environ 955 millions hectares, tandis que la salinisation secondaire touche près de 77 millions hectares, avec 58% dans les zones irriguées (Bakacsi et al., 2019, Metternicht et Zinck, 2003). Près de 20% des terres irriguées sont affectées par le sel, et cette proportion tend à augmenter en dépit des efforts considérables consacrés à la remise en état des terres (Metternicht et Zinck, 2003). La salinisation secondaire résulte des effets synergiques de l'aridité du climat, de l'utilisation des eaux d'irrigation chargées en sels solubles, du mauvais drainage associé à la remontée capillaire, et dans une moindre mesure de l'utilisation abusive des engrais chimiques (Asfaw et al., 2016 ; El Gallal et al., 2016 ; Florinsky et al., 2009 ; Badraoui, 2006).

Au Maroc, depuis l'équipement et la mise en service des périmètres irrigués, la superficie des terres agricoles touchées par la salinité ne cesse d'augmenter (Chikhaoui et al., 2018 ; Sadiqui et al., 2016). Selon Badraoui (2003), environ 16 % des terres irriguées étaient affectées par la salinisation secondaire. Confronté à l'extension de ce fléau, le Maroc doit multiplier ses interventions pour évaluer les conséquences de la salinisation des sols, et aussi pour mettre au point des programmes de conservation appropriés. Dans ce contexte, plusieurs études ont été menées afin d'élaborer une stratégie globale de développement durable des périmètres irrigués. Pour analyser l'état de dégradation des sols par la salinité et en évaluer les risques d'extension et d'aggravation, plusieurs approches de suivi spatiotemporel ont été élaborées et appliquées à travers le monde. L'utilisation des modèles permet le contrôle de la salinité par la connaissance de sa distribution spatiale et de son évolution dans le temps (Bouaziz et al., 2018 ; Lahlou, 1998). Cependant, le suivi du processus et la cartographie de la salinité des sols ne sont pas réalisés avec fiabilité suffisante, sans l'intégration de plusieurs facteurs (Aswaf et al., 2016 ; Nosetto et al., 2013). Vu la complexité des processus contrôlant le phénomène de salinité, l'utilisation d'une approche multicritère permet d'identifier les zones à fort risque de salinité et d'assurer le suivi spatiotemporel de la dégradation chimique des sols (Triki et al., 2017 ; Bolinder et al., 2000). Il s'avère ainsi nécessaire de développer une approche permettant de cartographier ce phénomène en se basant sur plusieurs facteurs (Beauchemin et al., 2003 ; Sims et al., 1998). Dans ce contexte, Masoudi et al. (2006) ont élaboré un outil de cartographie des risques de salinité des sols, sous forme d'indice basé sur l'utilisation de plusieurs facteurs : types de sols et de

matériaux parentaux, climat et niveau de la nappe. Cette approche permet d'élaborer une carte de risque de salinité des sols qui peut servir comme outil d'aide à la prise de décision pour gérer la qualité des sols. Malgré son usage extensif à l'échelle mondiale, cette approche n'a jamais été mise en œuvre en région méditerranéenne, et plus particulièrement au Maroc.

L'objectif principal de cette recherche est de caractériser l'état de dégradation des sols par la salinité et de valider la pertinence de l'approche basée sur les indices de risque de salinité des sols.

Matériel et Méthodes :

Zone d'étude :

Cette étude a été effectuée dans le périmètre irrigué du Tadla, situé à 200 km au Sud-Est de la ville de Casablanca au Maroc (Figure 1). Le périmètre irrigué du Tadla s'étend sur une large surface, estimée à 3 600 km². Il est traversé par le cours de l'Oum R'bia sur environ 160 Km. Ce dernier le divise en sous-périmètres irrigués aux caractères hydrauliques différents : Béni Amir au Nord (35 600 ha) et Béni Moussa (69 500 ha) au Sud (Figure 1). Le sous-périmètre des Béni Moussa est irrigué par les eaux du barrage de Bin El Ouidane, dont la salinité moyenne à la sortie de l'hiver avoisine 0.3 g/l. Alors que le sous-périmètre des Béni Amir est irrigué par les eaux de la rivière d'Oum R'bia, caractérisée par une salinité moyenne à la sortie de l'hiver de 1.3g/l (El Harti et al., 2016).

Géologiquement, le périmètre du Tadla est caractérisé par une vaste dépression synclinale en subsidence remplie de dépôts du Néogène (miocène et pliocène) et du quaternaire (Étienne et Guessab, 1975). Sur le socle paléozoïque (Ordovicien), on rencontre des grès et des marnes rouges rapportés à moitié au Trias et à moitié à l'infra Cénomanién (Missante, 1963). Les études pédologiques réalisées au niveau de la zone d'étude montrent la prédominance des sols isohumiques favorables à la mise en valeur sous irrigation en raison de leur profondeur et leur texture équilibrée.

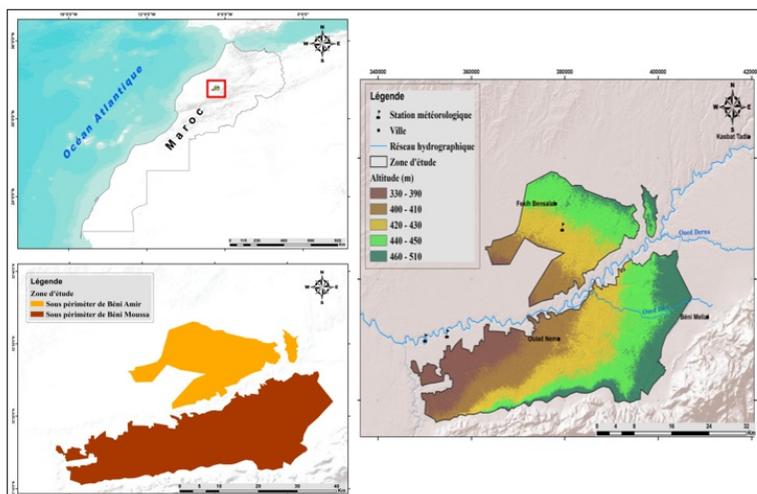


Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude

Le périmètre du Tadla est soumis à un climat très variable et à une activité anthropique intense. Caractérisé par des précipitations faibles, des températures élevées et une saison humide de cinq mois (Figure 2), le climat est de type méditerranéen aride à hiver tempéré. La pluviométrie moyenne annuelle varie de 150 à 450 mm avec un coefficient de variation interannuel de 20 % (Chikhaoui et al., 2018). Le mois le plus pluvieux est novembre (61,3 mm) et un maximum secondaire est enregistré en mars (39,8 mm). Les températures montrent des variations saisonnières importantes, avec un maximum de 28,7 °C en juillet et un minimum de 10,6 °C en janvier (Figure 2).

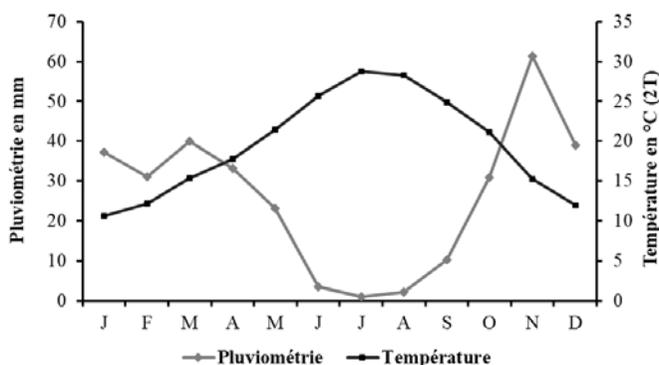


Figure 2 : Diagramme ombrothermique

Présentation de l'Indice de Risque de Salinisation des Sols (IRSS)

L'approche d'indice de risque de salinisation des sols (IRSS) de Masoudi et al. (2006) est méthode additive. Elle est constituée de dix composantes regroupées en trois catégories (Tableau 1). La première catégorie

comprend la qualité des eaux d'irrigation, qui comprend la conductivité électrique de l'eau de nappe et sa profondeur et la conductivité électrique de l'eau d'irrigation. La seconde catégorie, qui caractérise le climat, globe les précipitations et le pouvoir évaporant (indice d'aridité). La troisième catégorie, édaphique comprend la pente, la texture, la conductivité électrique du sol et l'efficacité géologique.

Le calcul de l'IRSS est basé sur une matrice de 5 X 9 (Tableau 1) avec une pondération à deux niveaux (1 ou 2) : Les poids des facteurs en lignes et les cinq indices de classes de risque en colonnes. Les classes de risque possèdent chacune un indice et selon le risque croissant de salinisation associée à ces classes, les indices varient de 1 à 5. Pour calculer l'IRSS, l'indice de classe de risque est multiplié par son poids respectif pour tous les facteurs. De cette opération découle des valeurs pondérées pour chaque facteur qui, une fois additionnées donnent l'IRSS. Ce dernier varie entre 10 « très léger » à 50 « très élevé » en fonction des classes de risque (Tableau 2).

Tableau 1 : Facteurs utilisés pour le calcul de l'IRSS (Masoudi et al., 2006)

Facteurs VCri	Poids (Wi)	Classes de risque				
		Aucune (1)	Légère (2)	Modérée (3)	Sévère (4)	Très sévère (5)
Profondeur de la nappe phréatique (m)	1	>5	3 - 5	1 - 3	0,5 - 1	<0,5
Texture du sol	1	Très grossière	Grossière	Modérément fine	Fine	Très fine
Pente en %	1	30+	15 - 30	5 - 15	1 - 5	<1
CE (dS/m) de l'eau d'irrigation (eau de surface)	1	<0.25	0.25 - 0.75	0.75 - 2.25	2.25 - 5	5+
CE (dS/m) de l'eau de nappe	1	<0.25	0.25 - 0.75	0.75 - 2.25	2.25 - 5	5+
Efficacité de la surface géologique	1	<0.1	0.1 - 0.39	0.39 - 0.65	0.65 - 1	1+
Climat	1	Subhumide et humide	Légèrement semi-aride	Semi-aride	Aride	Très aride
Indice d'aridité (P/ETP)	1	0.60+	0.40 - 0.60	0.20 - 0.40	0.05 - 0.20	<0.05
CE (dS/m) du sol	2	<4	4 - 8	8 - 16	16 - 32	>32
IRSS = (état de salinité du sol x 2) + (qualité de l'eau d'irrigation + profondeur de la nappe + qualité des eaux souterraines + texture du sol + climat + indice d'aridité + pente + efficacité de la surface géologique) x 1						

Tableau 2 : Classes de sévérité du risque de salinité (Masoudi et al., 2006)

Classe	Très léger	Léger	Modérée	Sévère	Très sévère
Score de risque	10-15	16-25	26-35	36-45	46-50

Présentation des données utilisées :

Les données utilisées dans le cadre de cette étude ont été collectées au niveau des réseaux de suivi et de surveillance de la qualité des sols et des eaux. Les données de qualité des eaux souterraines correspondent à des mesures faites à une fréquence de 6 fois par an sur un réseau de 100 points d'observations. Ces mesures qui caractérisent la qualité des eaux souterraines et de surface sont : la conductivité électrique (CE) et le niveau piézométrique (NP). Les données (conductivité électrique (CE) de l'extrait de la pâte saturée et de la matière organique (MO)) de la qualité des sols sont collectées sur deux à trois profondeurs par tranche de 20 cm, à une fréquence de deux fois par an, au niveau d'un réseau de 40 sites. Enfin, la carte pédologique de la plaine de Tadla (Jaminet, 1953 ; SCET-Maroc, 1976) a été utilisée pour caractériser les sols. Le Tableau 3 présente l'ensemble des données utilisées et leurs fréquences.

Tableau 3 : Données utilisées et leurs formats

Types de données	Format	Echelle
Profondeur de la nappe	Tabulaire	Points de suivi des réseaux
Conductivité électrique (CE) de l'eau de nappe		
Conductivité électrique (CE) des sols		
Conductivité électrique (CE) de l'eau d'irrigation (eau du barrage)		
Pluviométrie	Tabulaire	Journalière (station climatique)
Evapotranspiration (ET0) (Penman and Monteith)	Tabulaire	Journalière (station climatique)
Carte texturale	Vecteur	1/50 000
Courbes de niveau	Vecteur	1/50 000
Carte géologique	Raster	1/100 000

Analyse et traitement des données :

Avant d'élaborer la carte du risque de salinité des sols, nous avons procédé à une analyse des données collectées pour réaliser une interpolation qui soit la plus représentative possible du phénomène étudié (Figure 3). L'analyse de la variabilité et de la structure spatiale de ces différentes données en particulier a été réalisée sous Arc Gis (Spatial Analyst). Ce module qui intègre la méthode d'interpolation IDW (Inverse Distance Weighting) offre la possibilité d'analyser le comportement spatial des données. Dans le cadre de cette étude, cette méthode a été utilisée pour interpoler les données de la campagne (2015-2016) relatives à la côte piézométrique, la conductivité

électrique de l'eau de nappe, la conductivité électrique des sols afin d'élaborer les cartes thématiques respectives. Il est important de noter que cette méthode est recommandée par plusieurs études, car elle permet d'avoir des résultats fiables quand la distribution des points de données échantillonnés est régulière (ESRI, 1992). Pour le facteur pente, nous avons généré le modèle numérique du terrain (MNT), à partir de la numérisation des courbes de niveau de la carte topographique du Tadla (1/50 000, 10 m d'équidistance).. Enfin les cartes thématiques produites ont été ajustées à une même échelle dans un SIG dans le but de déterminer la carte de l'indice IRSS.

Il convient de souligner que le choix de la campagne (2015-2016) a été basé sur la disponibilité des données nécessaires pour l'application de l'approche adoptée.

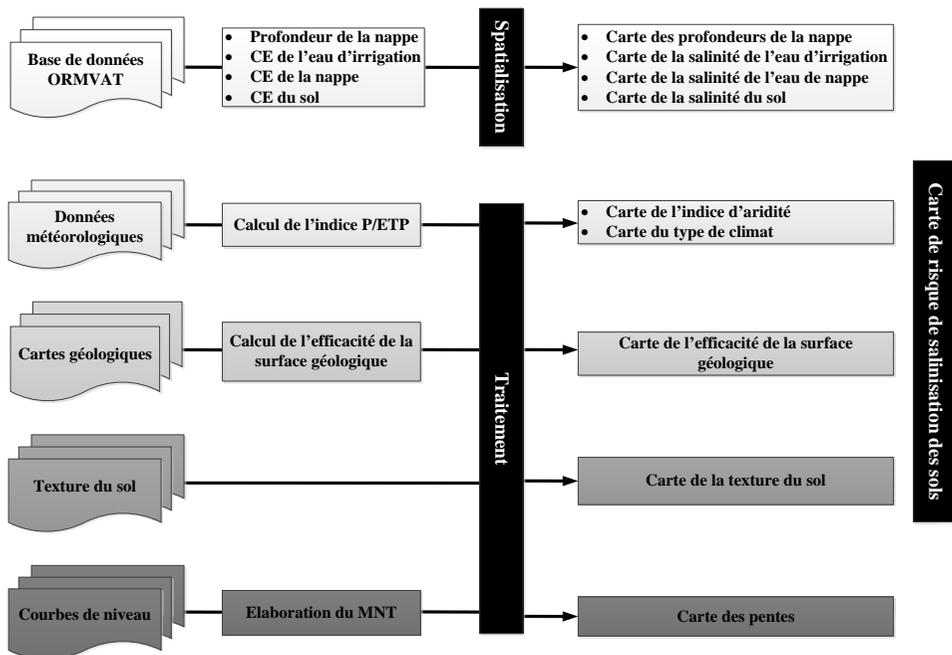


Figure 3 : Démarche pour l'élaboration de la carte de risque de salinisation des sols

Résultats et Discussion :

Il apparaît évident que l'évaluation du risque de salinisation des sols passe en premier lieu par l'étude de la variabilité spatiale des différents facteurs régissant ce phénomène et qui rentre dans le calcul de l'IRSS.

Variabilité spatiale de la conductivité électrique des sols :

L'analyse des données relatives à la salinité du sol, exprimée en CE de l'extrait de la pâte saturée, montre une grande variabilité spatio-temporelle celle-ci dans le périmètre irrigué du Tadla. Cette analyse révèle aussi que les

teneurs en sels des sols du sous-périmètre de Béni Amir sont plus élevées que ceux du sous-périmètre de Béni Moussa. Les plus touchés par ce phénomène sont concentrés dans l'aval hydraulique du périmètre (Figure 4). Ce constat pourrait être expliqué par l'utilisation des eaux de la nappe phréatique et le recyclage des eaux de drainage pour l'irrigation. Cette tendance a été constatée aussi par les travaux de Badraoui (2003).

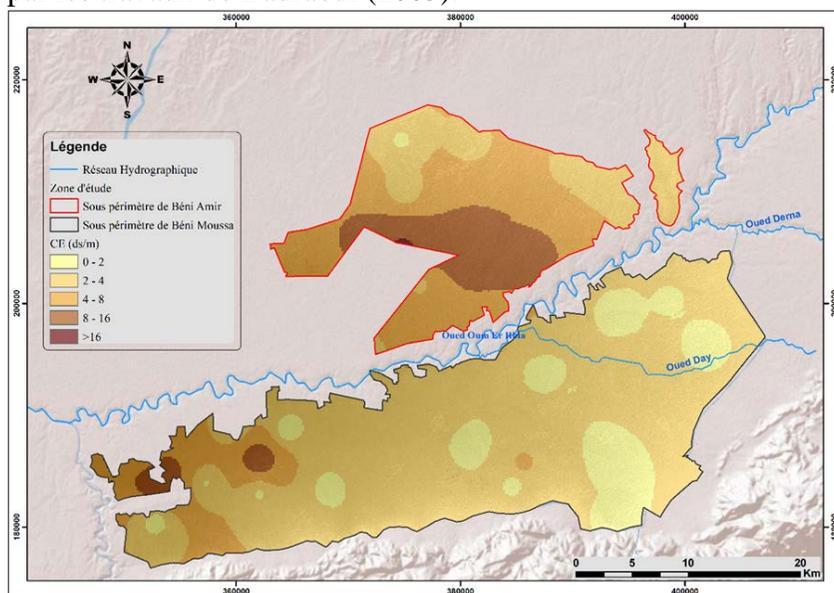


Figure 4 : Carte de salinité des sols (2015 - 2016)

La salinité des sols du périmètre du Tadla varie aussi selon la saison (Figure 5). En effet, nous avons constaté que la superficie occupée par la classe de salinité des sols (8 et 16 dS/m) est plus grande en février 2016 qu'en septembre 2015. Ce constat s'explique par la particularité de la campagne agricole 2016 qui était une année de sécheresse.

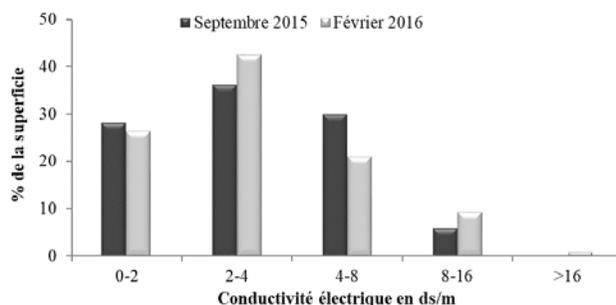


Figure 5 : Variation saisonnière de la salinité des sols entre septembre 2015 et février 2016

Variabilité spatiale de la conductivité électrique des eaux de la nappe phréatique :

Le périmètre irrigué du Tadla est caractérisé par un gradient de salinité qui augmente de l'amont à l'aval hydraulique. L'analyse de la carte de salinité de nappe phréatique montre une différence de salinité entre les deux sous-périmètres. En effet la concentration des sels hydrosolubles est plus appréciable dans la nappe de Béni Amir. Au contraire, cette concentration devient plus faible au niveau du secteur Est de la nappe de Béni Moussa, mais elle augmente progressivement en allant vers le secteur Ouest où elle atteint son maximum en aval. Soulignons que les travaux de Kuper et al. (2003) ont montré que, la nappe de Béni Amir est excessivement affectée par le problème de salinité.

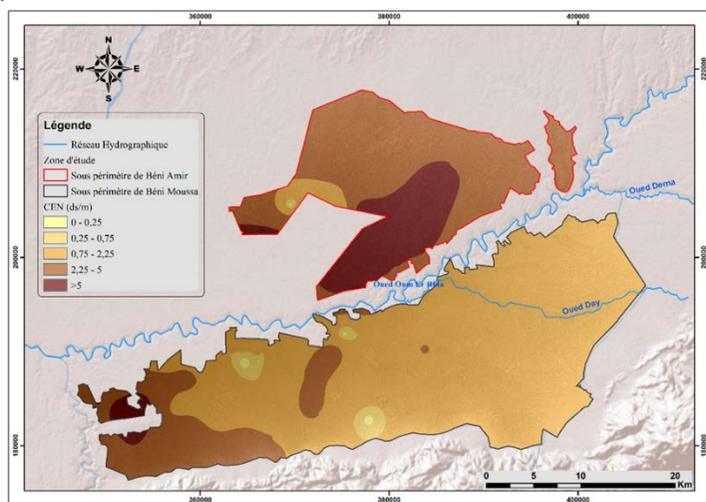


Figure 6 : Carte de salinité de la nappe phréatique (2015 - 2016).

La variation saisonnière de la répartition des classes de salinité des sols est bien illustrée par la Figure 7. La classe de salinité très sévère ($>5\text{dS/m}$) des eaux de la nappe phréatique est plus étendue en début de saison (fin été - début automne) qu'à la fin (fin d'hiver). Cette différence s'explique par la diminution des précipitations et par l'intensification des cultures (céréales, betterave sucrière, maraîchage, fourrage et arboriculture fruitière), en particulier l'utilisation excessive des engrais.

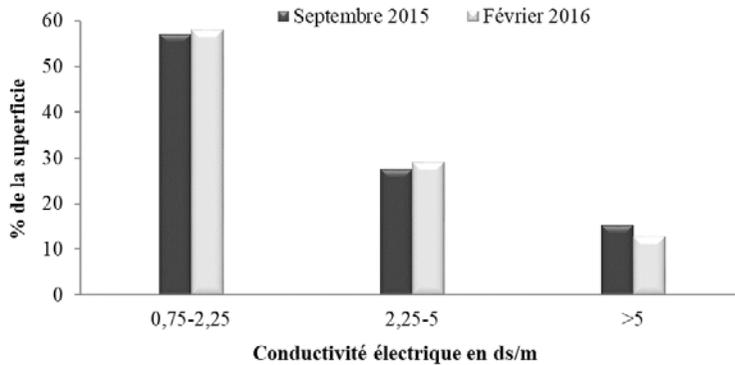


Figure 7 : Variation saisonnière de la salinité de la nappe phréatique entre septembre 2015 et février 2016

Variabilité de la profondeur de la nappe phréatique :

La figure 8 montre une variabilité spatiale de la profondeur de la nappe phréatique. Cette profondeur dépasse 10 m dans la partie nord du sous-périmètre de Béni Amir. La nappe est plus profonde au sud du sous-périmètre de Béni Moussa, et sa profondeur dépasse 20 m. Le suivi de la variation de la profondeur de la nappe phréatique a permis également de noter que le niveau piézométrique se rapproche de la surface en hiver et s'éloigne en été. Cette variation saisonnière est contrôlée essentiellement par le régime pluviométrique méditerranéen. Aussi il convient de souligner qu'après la mise en œuvre de la politique de désengagement et de libéralisation des assolements, les agriculteurs ont exercé une pression énorme sur les ressources en eau souterraines, induisant une baisse significative du niveau de la nappe (Kuper et al., 2003 ; Faouzi et al., 2001).

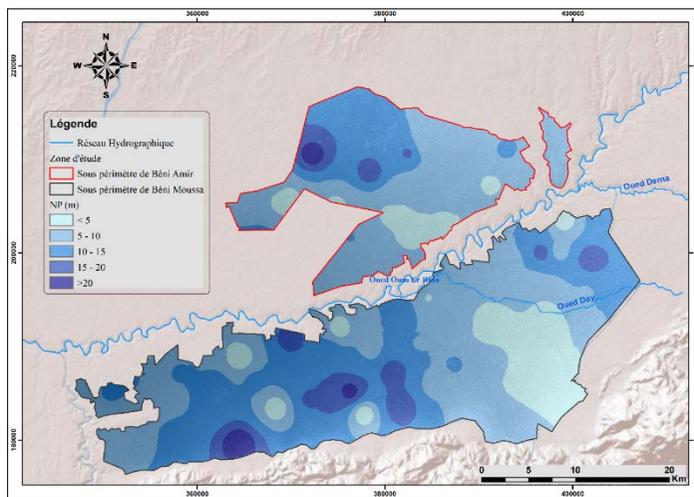


Figure 8 : Carte de la profondeur de la nappe phréatique (2015 - 2016)

Variabilité de la texture des sols :

L'analyse texturale des sols du périmètre a permis d'identifier trois classes majeures de texture : modérément fine (limono-argileuse), fine (argilo-limoneuse) et très fine (argileuse). Les sols de texture modérément fine, à risque modéré, dominent avec 64 % de la superficie totale (Figure 9). Les sols à texture fine, à risque sévère, n'occupent qu'une faible portion faible au sud du sous-périmètre de Béni Moussa Est. Les sols à texture très fine donc à risque de salinisation très sévère représentent 28% de la superficie et n'existent que dans le sous-périmètre de Béni Moussa. Cependant, l'analyse de la répartition spatiale de la conductivité électrique des sols et le niveau de risque de salinité a permis de conclure que d'autres facteurs, autre que la texture, peuvent contrôler ce phénomène.

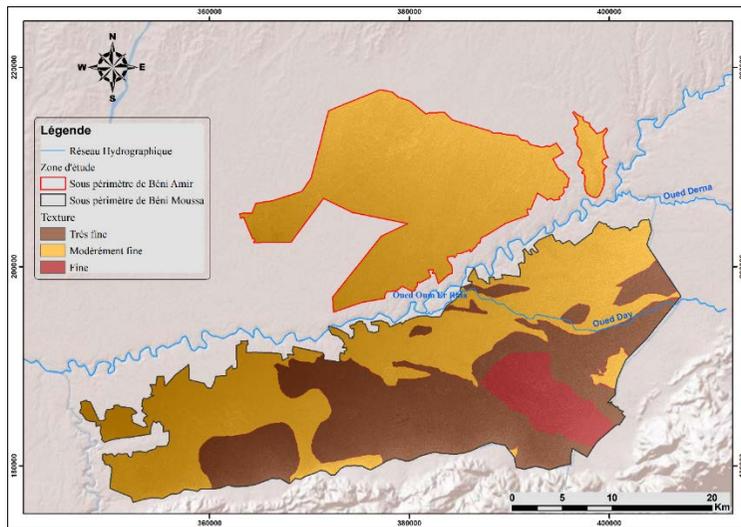


Figure 9 : Carte de texture des sols du périmètre de Tadla

Variabilité de la topographie :

La figure 10 présente la distribution spatiale des classes de pente de la zone d'étude. L'analyse de cette carte montre que 85 % de la superficie du périmètre se caractérise par des classes de pente de 0 à 1 %, alors que le reste, soit 13% du périmètre, est caractérisé par une pente de 1 à 5. L'analyse, du risque de salinisation lié à la topographie montre que plus faible est la classe de pente plus grand est le risque de salinisation associé, car le drainage externe est déficient.

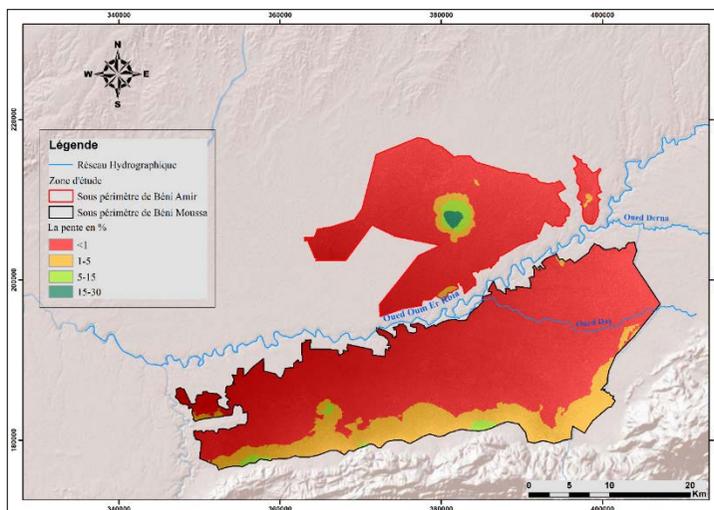


Figure 10 : Carte des pentes du périmètre de Tadla

Variabilité spatiale de l’efficacité de la surface géologique :

Du point de vue géologique, le substrat de base de la plaine du Tadla est dépourvu de dômes de sels et d’évaporites, donc le risque de salinité dû à ce facteur est faible. Dans ce contexte, nous avons considéré que la géologie n’a pas d’impact sur la teneur en sels des sols du périmètre irrigué du Tadla. Toutefois, la nature géologique salifère en amont influence de manière indirecte la salinisation des sols en dégradant la qualité des eaux de l’Oued Oum R’bia qui draine ces surfaces. En effet, ces eaux sont utilisées pour l’irrigation des sols du sous-périmètre de Béni Amir.

Variabilité de l’indice d’aridité du climat :

Pour caractériser le climat qui règne dans le périmètre du Tadla, l’indice d’aridité est l’une des méthodes utilisées (Demartone, 1923). Selon la classification de l’UNEP (1997) qui se base sur le calcul de l’indice d’aridité, la plaine du Tadla se trouve dans un milieu aride avec un risque sévère. Ainsi, pour intégrer ce paramètre dans le calcul de l’IRSS, tous les pixels du périmètre sont codés en classe 4 (Tableau 4).

Tableau 4 : Indice d’aridité et climat du périmètre du Tadla

Station météorologique	Indice d’aridité P/ETP	Climat	Classe de risque
Béni Amir	0,194	Aride	4
Béni Moussa (Ouled Gnaou)	0,198		
Béni Moussa Ouest	0,186		

Variabilité de la conductivité électrique des eaux d’irrigation :

Le Tableau 5 récapitule les données collectées au niveau du réseau de suivi de la qualité des eaux de surface. En se basant sur ces chiffres, nous

constatons que les deux sources d'eau (Barrage Bin El Ouidane et Oued Oum R'bia) ont des qualités assez différentes, codées respectivement 2 et 3 selon leurs degrés de Risk. Dans ce contexte, nous avons attribué à tous les pixels du sous-périmètre de Béni Moussa la classe de risque léger (2). Au contraire, la classe de risque modéré (3) a été attribuée à tous les pixels du sous-périmètre de Béni Amir.

Tableau 5 : Conductivité électrique des eaux d'Oum R'bia et de Bin El Ouidane

Campagne	Saison	CE des eaux d'Oum R'bia (dS/m)	Classe de risque	CE des eaux de Bin El Ouidane (dS/m)	Classe de risque
2015-2016	Sept-15	1,79	3	0,48	2
	Mai-16	2,20	3	0,51	2

Élaboration de la carte de risque de salinisation des sols :

La figure 11 représente la carte de risques de salinisation des sols du périmètre du Tadla obtenue par l'approche de l'IRSS. Celle-ci comporte 4 classes : risque potentiel modéré, risque potentiel léger, risque actuel modéré et risque actuel sévère. L'analyse de la répartition spatiale des classes de risque de dégradation des sols par la salinité a permis de conclure que l'indice IRSS est pertinent pour la détermination des classes de risque de salinisation des sols (actuel et potentiel) avec une dominance de celle de risque potentiel modéré avec une couverture spatiale de 76 %. On constate aussi que les zones à risque potentiel correspondent aux sols qui montrent une forte sensibilité à la salinité. Il en ressort que la classe de risque sévère se situe dans les zones où la salinité de l'eau de nappe et des sols est élevée. La figure 11 permet également de visualiser les zones à risque actuel sévère qui ne représentent que 0,1 % de la superficie totale du périmètre irrigué du Tadla. Ce risque est plus élevé durant la saison sèche. Cela démontre, d'une part, l'intérêt de cette approche et, d'autre part, l'apport des données multi-sources dans l'étude et la modélisation de la dégradation des sols par le phénomène de salinité. Par ailleurs, nous tenons à signaler que la corrélation entre la conductivité électrique de l'eau de nappe et la conductivité électrique du sol est relativement forte. Ce même constat a été aussi révélé par une étude réalisée par Badraoui (2003). En effet, la conductivité électrique de l'eau de nappe explique 40% de la variabilité de la conductivité électrique des sols. De même, la profondeur de la nappe explique 28% de la variabilité de la salinité des sols dans le Tadla. Dans notre cas, l'analyse des résultats obtenus montre que la variabilité spatiale faible de la pente n'est pas suffisante pour expliquer la dynamique spatiale de la salinité des sols du périmètre de Tadla. Cependant, il convient de souligner que l'utilisation actuelle des terres et les pratiques culturales adoptées semble contrôler le phénomène de salinisation des sols. De même, le système d'irrigation et son efficacité peuvent vraisemblablement influencer le processus de salinisation.

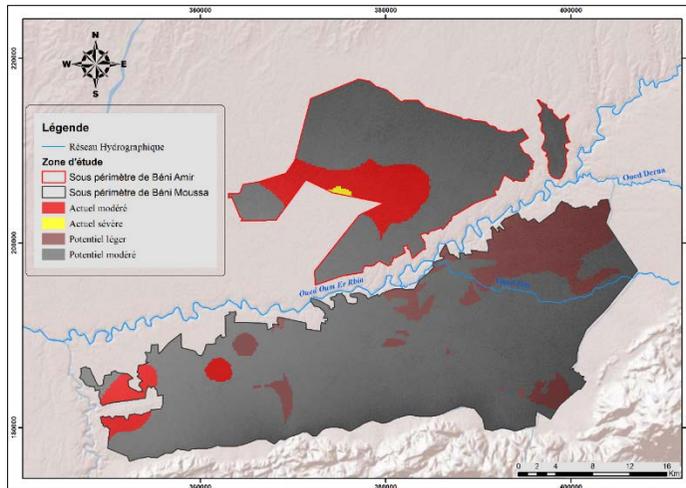


Figure 11 : Carte de risque de salinisation des sols (campagne agricole 2015-2016)

Conclusion :

À la lumière des résultats obtenus, nous avons montré l'intérêt de l'utilisation de l'approche de l'IRSS et de l'intégration de données multi-sources pour la caractérisation du risque de dégradation des sols par le phénomène de salinité à l'échelle d'un périmètre irrigué au centre du Maroc. L'approche présentée a permis de valoriser la base de données (climat, topographie, type de sols, qualité des sols et des eaux) disponible à l'Office de Mise en Valeur Agricole du Tadla (ORMVAT). L'utilisation de cette approche se justifie également par sa simplicité et sa mise en œuvre facile dans un environnement SIG. L'IRSS a permis de mettre en évidence la présence de trois classes de risque : léger, modéré et sévère. La classe de risque léger, largement représentée dans le sous-périmètre de Béni Moussa, est due à la faible concentration de sels des eaux d'irrigation utilisées. Alors que la grande majorité du sous-périmètre de Béni Amir est soumise à un risque de salinisation modéré. La classe de salinisation sévère est perçue essentiellement à l'aval du périmètre. La surveillance de la dynamique spatio-temporelle de la salinité des sols est la base pour comprendre les effets des précipitations, de l'irrigation et des pratiques agricoles sur l'évolution de la salinité des sols. Par conséquent, les utilisateurs et les gestionnaires des terres agricoles en s'appuyant sur l'IRSS peuvent être dotés d'éléments d'intervention clés pour réduire les effets de la salinisation des sols sur la production agricole.

À la lumière de ces résultats, nous suggérons d'améliorer cette étude en combinant l'IRSS avec d'autres variables, telles que l'occupation des sols et le système d'irrigation.

Remerciements :

Nous remercions le Centre National de la Recherche Scientifique et Technique, l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques (Projet GISEC) pour leur soutien multiforme. Nous remercions également l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole de Tadla pour leur collaboration.

References:

1. Asfaw, S., Di Battista, F., and Lipper, L. (2016). Agricultural technology adoption under climate change in the Sahel: Micro-evidence from Niger. *Journal of African Economies*, 25(5), 637-669.
2. Badraoui, M. (2006). Connaissance et utilisation des ressources en sol au Maroc. Rapport général 50 ans de développement humain et perspectives, 2025, 91-117.
3. Badraoui, M. (2003). Etat actuel de la salinité des eaux et des sols dans le Tadla. www.fsagx.ac.be/mf/Agriecoconseil/EFCA/badraoui.pdf.
4. Bakacsi, Z., Toth, T., Mako, A., Barnag., Laboczi, A., Szabo, J., Szatmari, G. and Pasztor, P. (2019). National level assessment of soil salinization and structural degradation risks under irrigation. *Hungarian Geographical Bulletin*, Vol 68-(2), P. 141–156.
5. Bakacsi Z., Tóth T., Makó, A., Barna G., Laborczi A., Szabó J., Szatmári G., and Pásztor L. (2019). National level assessment of soil salinization and structural degradation risks under irrigation. *Hungarian Geographical Bulletin*, 68(2), 141-156.
6. Bolinder, M.A., Simard, R.R., Beauchemin, S., and MacDonald, K.B. (2000). Indicator of risk of water contamination by P for soil landscape of Canada polygons. *Canadian Journal of Soil Science*, 80(1), 153-163.
7. Bouaziz, M., Chtourou, M.Y., Triki, I., Mezner, S., Bouaziz, S. (2018). Prediction of Soil Salinity Using Multivariate Statistical Techniques and Remote Sensing Tools. *Advances in Remote Sensing*, Vol. 7, 313-326.
8. Chikhaoui, M., Naimi, M., and Chaaou, A. (2018). Développement d'un indice de risque de salinité des sols à l'aide du capteur Sentinel-2 et des données multi-sources : Cas de la plaine de Tadla au Maroc (2018). *International Workshops sur l'apport des images Sentinel pour le développement*, 6-7 mars 2018, CRTS-Rabat, Maroc.
9. De Martonne E (1923). Aridité et indices d'aridité. *Académie des Sciences. Comptes Rendus*, 182(23) : 1935–1938.
10. El Harti, A., Lhissou, R., Chokmani, K., Ouzemou, J. E., Hassouna, M., Bachaoui, E. M., and El Ghmari, A. (2016). Spatiotemporal monitoring of soil salinization in irrigated Tadla Plain (Morocco) using

- satellite spectral indices. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 50, 64-73.
11. Étienne, H. et Guessab, D. (1975). Ressources du Maroc, Tome. 2 : Plaines et bassins du Maroc atlantique. Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc, Rabat, n° 231, p. 299-365.
 12. ESRI. (1992). *ARC/INFO user's guide: cell-based modelling with GRID. Analysis, display and management*, 2nd ed.
 13. El Gallal, M., Fletcher, L. and Evans, B. (2016). Assessment of potential risks associated with chemicals in wastewater used for irrigation in arid and semiarid zones: A review. *Agricultural Water Management* 177. 419–431.
 14. Etienne, H., Guessab, D., and Archambault, C. (1975). The Tadla plain. Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc, 231, 299-364.
 15. Faouzi, M., et Larabi, A. (2001). Problématique de la remontée, de la salinité et de la pollution par les nitrates des eaux de la nappe phréatique des Beni-Amir (Tadla, Maroc).
 16. Florinsky, I.V., R.G. Eilers, B.H. Wiebe et M.M. Fitzgerald. (2009). Dynamics of soil salinity in the Canadian Prairies: Application of singular spectrum analysis, *Environmental Modelling and Software*, vol. 24, p. 1182-1195.
 17. Hamzeh, S., Naseri, A. A., Alavipanah, S. K., Mojaradi, B., Bartholomeus, H. M., Clevers, J.G., and Behzad, M. (2013). Estimating salinity stress in sugarcane fields with spaceborne hyperspectral vegetation indices. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21, 282-290.
 18. Jaminet, R. (1953). Aperçu sur les sols et l'irrigation du périmètre des Béni Amir. - In *Etudes des Sols du périmètre irrigable des Béni Amir - Béni Moussa*. SRAE, Rabat, pp. 3-10
 19. Kuper, M., Hammani, A., Zemzam, S., Bouarfa, S., and Thomas, V. (2003). Stratégies d'utilisation conjuguée des eaux de surface et souterraine pour l'irrigation : le cas du périmètre irrigué du Tadla au Maroc. Actes du séminaire Pcsi, Gestion intégrée au sein d'un bassin versant.
 20. Lahlou, M., Badraoui, M., Soudi, B., Goumari, A., and Tessier, D. (2002). Modélisation de l'impact de l'irrigation sur le devenir salin et sodique des sols. In *Atelier du PCSI (Programme Commun Systèmes Irrigués) sur une Maîtrise des Impacts Environnementaux de l'Irrigation* (pp. 19-p). Cirad-IRD-Cemagref.
 21. Masoudi, M., Patwardhan, A. M., and Gore, S. D. (2006). A new methodology for producing of risk maps of soil salinity, case study: Payab Basin, Iran. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 10(3), 9-13.

22. Metternicht, G.I., and Zinck, J.A., (2003). Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints. *Remote Sensing of Environment*, 85(1), 1-20.
23. Missante, G., (1963). Les sols du Tadla et leur répartition schématique au 1/500 000e. *Al Awamia* 9, 155–190 <http://webagris.inra.org.ma/doc/awamia/00910.pdf>.
24. Nawar, S. Buddenbaum, H. Hill, J. and Kozak, J. (2014). Modeling and mapping of soil salinity with reflectance spectroscopy and Landsat data using two quantitative methods (PLSR & MARS). *Remote Sens.* 6, 10813-10834; doi: 10.3390/rs61110813.
25. Nosetto, M. D., Acosta, A. M., Jayawickreme, D. H., Ballesteros, S. I., Jackson, R. B., and Jobbágy, E. G. (2013). Land-use and topography shape soil and groundwater salinity in central Argentina. *Agricultural Water Management*, 129, 120-129.
26. Sadiki, M., Markhi, A., Elbelrhiti, H., Mrabet, H. (2016). Cartographie de la Salinité à la surface du sol dans une zone du Préfif : Cas de la région de l'Ouergha, *European Scientific Journal*. Vol.12, 1857 – 7881
27. SCET-Maroc (1976). Etude pédologique au 1/100 000 des sols de la plaine de Tadla. 128p
28. Sims, J.T., Simard, R.R., and Joern, B.C. (1998). Phosphorus loss in agricultural drainage: Historical perspective and current research. *Journal of environmental quality*, 27(2), 277-293.
29. Triki, F.H., Bouaziz, M., Benzina, M., and Bouaziz, S. (2017). Modeling of Soil Salinity within a Semi-Arid Region Using Spectral Analysis. *Arabian Journal of Geosciences*, 12, 11175-11182.