

Apport de la télédétection multi-temporelle à l'identification de zones potentiellement salées dans les périmètres irrigués du Niger

H. Merlet⁽¹⁾, I. Moussa^(1,2), D. Michot⁽¹⁾, P. Pichelin⁽¹⁾, M. N. Ado⁽³⁾, I. Adam⁽²⁾, Y. Guéro⁽²⁾ et C. Walter^(1*)

1) SAS, INRAE, Institut Agro, 35000 Rennes, France

2) Faculté d'agronomie, University Abdou Moumouni, Niamey PO Box 10896, Niger

3) Faculté des Sciences Agronomiques, Université Djibo Hamani de Tahoua, Niger

* Auteur correspondant : christian.walter@institut-agro.fr

RÉSUMÉ

La salinité est une menace mondiale sur les sols notamment au sein de systèmes irrigués où un drainage adapté n'est pas toujours mis en place. Les périmètres irrigués des rives du fleuve Niger, stratégiques pour la sécurité alimentaire du pays grâce à la culture du riz, sont particulièrement concernés par ces risques de salinisation. Il serait donc important de disposer d'un dispositif de surveillance de l'évolution dans le temps de la salinité des sols. L'objectif de cette étude est de comparer deux méthodes d'évaluation de la salinité potentielle des sols par télédétection multi-temporelle à haute résolution spatiale: i) une méthode directe via la caractérisation de l'état de surface des sols nus (indice de salinité) et ii) une méthode indirecte via la caractérisation de la dynamique de croissance de la végétation (indice *NDVI*). Deux périmètres irrigués au sud-est de Niamey, le périmètre de Sébéri d'une superficie de 4,8 km² et celui de Tiaguiriré de 2,2 km², sont retenus comme zones d'étude. Sur celles-ci, l'ensemble des images des deux satellites Sentinel-2, disponibles entre 2016 et 2022, ont été considérées : cela correspond à 279 dates d'acquisition couvrant 7 saisons sèches et 6 saisons humides successives. L'indice de salinité *SI* est calculé lorsque les sols sont considérés comme nus (*BSI* > 0,08 et *NDVI* < 0,20) et non couverts d'eau (*NDVI* > 0, *NDWI* < -0,2 et *SWI* < -0,3) ; il est ensuite moyenné par année (*Moyenne-SI*). Une intégrale par rapport au temps de *NDVI* (*TI-NDVI*) est calculée par saison de culture (humide ou sèche) lorsque les sols sont considérés comme couverts de végétation (*NDVI* > 0,21). La comparaison année après année permet d'identifier les zones avec les *Moyennes-SI* les plus élevées. Cet indice est stable au cours du

Comment citer cet article :

Merlet H., Moussa I., Michot D., Pichelin P., Nassirou Ado M., Adam I., Guéro Y. et Walter C., 2024 - Apport de la télédétection multi-temporelle à l'identification de zones potentiellement salées dans les périmètres irrigués du Niger - *Étude et Gestion des Sols*, 31, 103-121

temps, mais ne peut être calculé pour certaines années que sur un nombre réduit de pixels. Concernant l'intégrale *TI-NDVI*, les valeurs sont globalement plus élevées en saisons humides qu'en saisons sèches. Les variations inter-saisonnières sont marquées, mais des zones avec une forte récurrence de faibles valeurs peuvent être identifiées. Après uniformisation des *TI-NDVI* et des Moyennes-*SI* via le rang des pixels, il est possible de comparer la répartition des zones identifiées comme étant potentiellement plus salées. Il en ressort que la méthode indirecte fondée sur la dynamique de croissance de la végétation permet de cartographier l'ensemble de la zone d'étude et d'analyser les variations temporelles entre saisons et entre années. Dans les zones où les deux approches ont pu être appliquées, les zones les plus contraignantes (fort *SI* et faible *TI-NDVI*) ont globalement les mêmes localisations, mais avec des géométries et surfaces variables suivant la méthode utilisée. Finalement, l'utilisation de la télédétection multi-temporelle apparaît particulièrement adaptée dans ce type de contexte pour identifier des zones potentiellement salées et les deux méthodes évaluées semblent complémentaires, puisqu'elles comparent des situations différentes au sein du périmètre étudié. Le couplage avec des mesures de terrains est discuté pour interpréter les dynamiques spatiales et temporelles identifiées par télédétection.

Mots-clés

Télédétection, salinisation, vallée du Niger, périmètre irrigué, riziculture, Sentinel-2, Niger

SUMMARY

CONTRIBUTION OF MULTI-TEMPORAL REMOTE SENSING TO THE IDENTIFICATION OF POTENTIALLY SALINE AREAS IN THE IRRIGATED AREAS OF NIGER

Salinity is a global threat to soils, especially in irrigated systems where proper drainage is not always in place. The irrigated areas on the banks of the Niger River, which are strategic for the country's food security through rice cultivation, are particularly concerned by these risks of salinisation. It would therefore be important to set up in these areas a system for monitoring the evolution of soil salinity over time. The objective of this study was to compare two methods of assessing potential soil salinity by multi-temporal remote sensing, a direct method via the characterisation of the surface state of bare soil (salinity index) and an indirect method via the characterisation of vegetation growth dynamics (NDVI). Two irrigated perimeters to the south-east of Niamey, the Sébéri perimeter with a surface area of 4,8 km² and the Tiaguiriré perimeter with a surface area of 2,2 km², were selected as study areas. All Sentinel-2 satellite images available between 2016 and 2022 were considered: this corresponds to 279 acquisition dates covering 7 successive dry seasons and 6 wet seasons. The *SI* were calculated when soils are considered bare (*BSI* > 0.08 and *NDVI* < 0.20) and not covered by water (*NDVI* > 0, *NDWI* < -0.2 and *SWI* < -0.3) and was then averaged per year (Mean-*SI*). A time integral of *NDVI* (*TI-NDVI*) was calculated per cropping season (wet or dry) when soils are considered as vegetated (*NDVI* > 0.20). The comparison year after year allowed the identification of the areas with the highest Mean-*SI*. This index was stable over time, but could only be calculated for some years on a reduced number of pixels. Concerning the *TI-NDVI*, the values were globally higher in wet seasons than in dry seasons. The inter-seasonal variations were quite marked, even if a characterisation of areas with a recurrence of low values could be identified. After standardizing the *TI-NDVI* and Mean-*SI* via pixel rank, it was possible to compare the distribution of areas identified as potentially more saline. The indirect method based on vegetation growth dynamics can be used to map the whole study area and to analyse temporal variations between seasons and years. In the areas where both approaches could be applied, the most constrained areas (high *SI* and low *TI-NDVI*) had globally the same locations, but with variable geometries and surfaces depending on the method used. Finally, the use of multitemporal remote sensing appears particularly suitable in this type of context for identifying potentially saline areas, and the two methods tested seem complementary, since they assess different situations within the study area. Coupling with field measurements is discussed in order to interpret the spatial and temporal dynamics identified by remote sensing.

Key-words

Remote sensing, salinisation, Niger valley, irrigated perimeter, rice growing, Sentinel-2, Niger

RESUMEN

CONTRIBUCIÓN DE LA TELEDETECCIÓN MULTITEMPORAL A LA IDENTIFICACIÓN DE ZONAS POTENCIALMENTE SALINAS EN LOS PERÍMETROS IRRIGADOS DEL NÍGER

La salinidad es una amenaza mundial para los suelos, en particular para los sistemas de riego en los que no se dispone siempre de un drenaje adecuado. Los perímetros irrigados de las orillas del río Níger, estratégicos para la seguridad alimentaria del país gracias al cultivo del arroz, se ven particularmente afectados por estos riesgos de salinización. Por consiguiente, sería importante disponer de un dispositivo de vigilancia de la evolución en el tiempo de la salinidad de los suelos. El objetivo de este estudio es comparar dos métodos de evaluación de la salinidad potencial de los suelos mediante teledetección multitemporal de alta resolución espacial: i) un método directo mediante la caracterización del estado de la superficie de los suelos desnudos

(indice de salinidad) y ii) un método indirecto mediante la caracterización de la dinámica de crecimiento de la vegetación (índice NDVI). Se seleccionaron dos perímetros irrigados al sureste de Niamey, el perímetro de Sebasti de una superficie de 4,8 km² y el de Tiaguiriré de 2,2 km², como zonas de estudio. En estas, se consideró el conjunto de las imágenes de los dos satélites Sentinel-2, disponibles entre 2016 y 2022 : lo que corresponde a 279 fechas de adquisición que abarcan 7 estaciones secas y 6 estaciones húmedas sucesivas. El índice de salinidad SI se calcula cuando los suelos se consideran desnudos ($BSI > 0,08$ y $NDVI < 0,20$) y no cubiertos de agua ($NDVI > 0$, $NDWI < -0,2$ y $SWI < -0,3$); luego se promedia por año (Media-SI). Se calcula una integral en función del tiempo de NDVI (TI-NDVI) por estación de cultivo (húmeda o seca) cuando los suelos se consideran cubiertos de vegetación ($NDVI > 0,20$). La comparación año tras año permite identificar las zonas con las Medias-SI más elevadas. Este índice es estable con el tiempo, pero para algunos años solo se puede calcular en un número reducido de píxeles. En cuanto a la integral TI-NDVI, los valores son globalmente más elevados en las estaciones húmedas que en las secas. Las variaciones interestacionales son marcadas, pero se pueden identificar zonas con una fuerte recurrencia de valores bajos. Después de normalizar el TI-NDVI y el Promedio-SI a través del rango de píxeles, es posible comparar la distribución de las áreas identificadas como potencialmente más saladas. De ello se destaque que el método indirecto basado en la dinámica de crecimiento de la vegetación permite cartografiar el conjunto de la zona de estudio y analizar las variaciones temporales entre estaciones y entre años. En las zonas en las que se han podido aplicar ambos enfoques, las zonas más restrictivas (fuerte SI y baja TI-NDVI) tienen globalmente las mismas localizaciones, pero con geometrías y superficies variables según el método utilizado. Por último, la utilización de la teledetección multitemporal parece particularmente adecuada en este tipo de contexto para identificar zonas potencialmente salinas, y los dos métodos evaluados parecen complementarios, puesto que evalúan situaciones diferentes dentro del perímetro estudiado. El acoplamiento con mediciones de terreno se discute para interpretar las dinámicas espaciales y temporales identificadas por teledetección.

Palabras clave

Teledetección, salinización, valle del Níger, perímetro irrigado, cultivo del arroz, Sentinel-2, Níger

1. INTRODUCTION

La salinité est à l'échelle mondiale l'une des principales menaces sur les sols. Cette salinité s'exprime en grande partie dans les zones à climat aride ou semi-aride où la demande évaporative est forte (Girard *et al.*, 2023). L'agriculture irriguée peut amplifier ce phénomène par l'usage d'eau de mauvaise qualité et par un mauvais drainage des sols. La salinité abaisse la fertilité de ces derniers et impacte leur fonctionnement général (Thomas et Middleton, 1993). La salinisation a lieu lorsque l'évaporation est supérieure aux apports d'eau et que cette eau, éventuellement salée, n'est que peu drainée (Dehaan et Taylor, 2002). Par ailleurs, le changement climatique peut accroître les risques associés, notamment en raison d'épisodes de sécheresse plus fréquents et de l'augmentation générale de la température, associée à des remontées de la mer dans les zones côtières (Várallyay, 1994). La salinisation a un impact important sur la croissance des plantes à cause d'une hausse du potentiel osmotique de la solution du sol, et par conséquent une diminution de l'eau disponible pour la plante (Ramoliya et Pandey, 2003; Munns, 1993; Greenway et Munns, 1980). Ces risques sont particulièrement prononcés dans les rizières d'Afrique de l'Ouest, comme celles de la zone d'étude au Niger.

En effet, celles-ci sont souvent irriguées et aménagées sur des sols généralement peu drainants (Guero, 1987), ce qui accentue les risques de salinisation. Ainsi, la culture du riz peut être suivie d'une baisse de production de biomasse et du rendement en grain du fait de sa sensibilité à la salinité (Riaz *et al.*, 2019). Pour préserver les sols sur le périmètre d'étude, une meilleure connaissance de la répartition des zones salées doit être mise en place.

L'utilisation de la télédétection pour identifier les sols salés existe depuis les années 1990 (Mougenot *et al.*, 1993), mais ne prenait alors pas en compte la variabilité temporelle. Historiquement, cette caractérisation se basait principalement sur une approche mono-date via l'état de surface en conditions de sol nu (Douaoui *et al.*, 2006). Le temps de revisite des satellites sur un même site était assez long, en raison de leur faible résolution temporelle, ce qui conférait peu de possibilités de suivi dans le temps. Le développement des capteurs à hautes résolutions spatiale et temporelle (Sentinel-2, Landsat 8) a permis une amélioration de l'approche classique reposant uniquement sur la caractérisation en surface des zones en sol nu (Metternicht et Zinck, 2003). En effet, il a été possible d'identifier des périodes plus nombreuses de sols nus et avec une résolution spatiale plus fine permettant d'identifier des

zones salées de faible étendue. De même, la caractérisation de la croissance de la végétation a pu être développée (Zhang *et al.*, 2003). La prise en compte de la végétation, notamment du type de végétation, est importante pour améliorer les prédictions de salinité du sol (Scudiero *et al.*, 2014). Il a été récemment montré un intérêt potentiel à l'incorporation de données d'indice de végétation pour estimer la salinité des sols (Guo *et al.*, 2023). Une autre approche consiste à prendre en compte la végétation au cours de son cycle complet de développement, afin d'identifier d'éventuels stress biotiques ou abiotiques (Moussa *et al.*, 2020). Ainsi, une détection indirecte basée sur la phytomasse est possible *via* l'identification d'une récurrence des stress sur la végétation. A notre connaissance, cette méthode a été uniquement testée au Niger afin d'identifier les zones où les contraintes de salinité sont les plus importantes (Moussa *et al.*, 2020). Elle présente *a priori* les avantages de pouvoir discriminer des zones de salinité forte à modérée, mais suffisante pour affecter la croissance de la culture du riz, et d'intégrer l'effet d'une salinité de profondeur non détectée en surface.

L'objectif de cette étude est de comparer, sur deux périmètres irrigués de la vallée du Fleuve Niger, deux approches d'identification par télédétection multi-temporelle de la salinité potentielle des sols irrigués et de son évolution temporelle. Il s'agit d'évaluer, d'une part, une méthode de détection directe, à partir de l'étude des surfaces en sol nu et, d'autre part, une approche indirecte se basant sur l'étude de la dynamique de croissance de la culture du riz au cours des saisons culturales successives.

Pour chaque méthode, une hypothèse de travail est envisagée. Concernant la méthode utilisant les périodes en sol nu, l'hypothèse est faite que la salinité des sols peut être évaluée à partir de l'observation de l'état de surface. Pour l'autre méthode, basée sur la caractérisation de la végétation, l'hypothèse est faite que la salinité influence la dynamique de croissance de la culture et peut être appréhendée par les chroniques temporelles d'images satellitaires.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1 Zone d'étude

La zone d'étude se situe dans la vallée du Niger à 50 km au sud-est de la ville de Niamey (13°16'03.3200 N, 2°21'03.8100 E) (*Figure 1*). Elle comprend deux périmètres irrigués utilisés pour la culture du riz : le périmètre de Sébéri (rive gauche) qui s'étend sur 4,8 km² et de Tiaguiré (rive droite) qui représente 2,2 km². Ils ont été choisis du fait de la bonne connaissance de leurs caractéristiques. En effet, des études antérieures ont étudié les sols salés identifiés dans ces périmètres (Guero, 2000 ; Adam 2011 ; Ado, 2017 ; Moussa *et al.*, 2020).

Les sols des deux périmètres (*Figure 2*) sont des Vertisols ou des Salisols se caractérisant par une forte teneur en argile, 60-74 % d'argile en surface et 52-85 % plus en profondeur, mais également par une acidité relativement élevée avec un pH_{H2O} entre 4 et 6,2 (Adam, 2011 ; Ado, 2017). La conductivité électrique CE_{1/5} varie entre 0,01 et 7,20 dS.m⁻¹ (Adam, 2011 ; Guero, 2000). Les types de sels identifiés sont de l'hexahydrate, du gypse, de l'epsomite et secondairement de la watevilleite et du carbonate de sodium hydraté (Adam, 2011).

Les périmètres sont localisés dans la zone tropicale sèche de type Sahélien (République du Niger, 2000). D'après le Service de Météorologie Nationale du Niger, les températures moyennes varient de 25 °C pour les mois les plus froids (décembre et janvier) jusqu'à 36 °C de moyenne pour le mois le plus chaud (avril). Les précipitations annuelles moyennes sont de 510 mm/an (± 100 mm/an) et présentent de fortes variabilités spatiales et temporelles. Le maximum est atteint en août (150 mm) et le minimum en octobre et mai (22 mm et 20 mm). Malgré le déficit hydrique fort en saison sèche, la mise en place d'un système d'irrigation rend la culture du riz possible deux fois dans l'année (Food and Agriculture Organization (FAO), 2015) : en saison sèche (d'octobre à mai) et en saison humide (de juin à septembre). La gestion de l'eau sur les zones est encadrée par l'ONAHA (Office National des Aménagements Hydro-Agricoles). Cependant, du fait de l'irrigation importante sur le périmètre, de la faible conductivité hydraulique à la saturation en eau (2,8x10⁻⁸ m.s⁻¹ en surface et 1,5x10⁻⁸ m.s⁻¹ à 50 cm de profondeur (Guero, 2000 ; Adam, 2011) associée à une absence de drainage (Moussa *et al.*, 2020), la zone est soumise à la salinisation. Ce facteur représente une des contraintes majeures à la culture du riz (Guero, 2000 ; Adam, 2011 ; Moussa *et al.*, 2020).

2.2 Conduite de la culture du riz sur le périmètre d'étude

La culture de riz en saison sèche s'étale de mi-novembre à mi-mai et celle de la saison humide de mi-juin à mi-novembre (*Figure 3*) (Moussa *et al.*, 2020). La culture du riz s'effectue d'abord en pépinières suivi d'un repiquage des rizières après environ 30 à 45 jours dans une faible lame d'eau (Sido, 2010). Un écartement de 20 cm entre chaque plant est recommandé. Le riz nécessite une quantité d'eau importante, mais qui doit être adaptée au stade de développement : 5 cm d'eau en phase végétative, 10 cm en phase reproductive et pas d'eau à partir du stade pâteux (Chambre Régionale d'Agriculture de Diffa, 2017). La phase de récolte a lieu généralement en mai pour la saison sèche et début novembre pour la saison humide (Moussa *et al.*, 2020). La simplicité de l'itinéraire technique sur la zone est idéale pour notre étude. En effet, la monoculture de riz facilite le test des deux méthodes de télédétection.

Figure 1 : Localisation de la zone d'étude et vue aérienne des périmètres irrigués de Sébéri et Tiaguiré situés au sud de Niamey (Niger).

Figure 1 : Location of the study area and aerial view of the Sébéri and Tiaguiré irrigation schemes located south of Niamey (Niger).

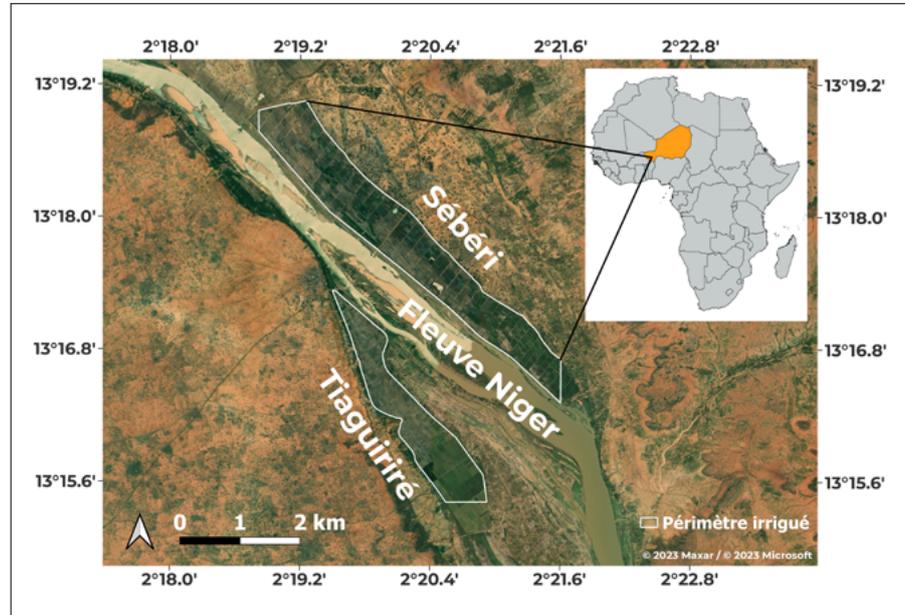


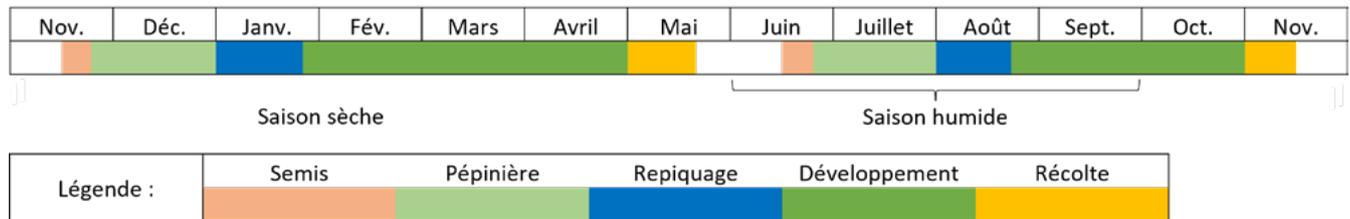
Figure 2 : Photographies: (a) d'un des périmètres irrigués dans une zone marquée par une salinité forte se traduisant par la présence d'efflorescences salines en surface et (b) du profil du sol de cette zone développé dans des alluvions argileuses et sableuses et décrit comme un Salisol vertique (Profil P2 de Adam, 2011).

Figure 2 : Photographs: (a) of one of the irrigated perimeters in a zone marked by high salinity resulting in the presence of saline efflorescence on the surface and (b) of the soil profile of this zone developed in clayey and sandy alluvium and described as a vertic Salisol (Profile P2 from Adam, 2011).



Figure 3 : Calendrier de la culture du riz en deux saisons spécifiques à la moyenne vallée du Niger (adapté de Moussa et al., 2020).

Figure 3 : Calendar of rice cultivation in two seasons specific to the middle Niger valley (adapted from Moussa et al., 2020).



2.3 Chaîne d'acquisition et d'analyse des images par télédétection

La *figure 4* récapitule l'organisation du traitement des images satellitales. Les images des satellites Sentinel-2A et Sentinel-2B sont utilisées dans le cadre de cette étude. Il s'agit d'une paire de satellites équipés de capteur multi-spectraux de haute résolution (13 bandes spectrales). Ils sont situés sur la même orbite, mais avec un écart de 180°, ce qui permet d'avoir une haute fréquence d'acquisition (5 jours à l'équateur). Les images utilisées ont été collectées de janvier 2016 à décembre 2022, soit 13 saisons successives de culture du riz correspondant à 7 saisons sèches et 6 saisons humides. Lors de la saison humide 2020, la zone a été soumise à d'importantes inondations qui ont fortement impacté la culture (Tarchiani et al., 2021). De ce fait, les données entre juillet et décembre 2020 ont été retirées de l'analyse, car elles représentent des valeurs anormales. Un maximum d'images est nécessaire pour un suivi précis de la végétation, mais également pour avoir des chances d'identifier des sols nus. Un total de 279 images sont donc analysées dans cette étude sur un total de 354 images téléchargées. En effet, certaines images n'ont pu être utilisées, car elles présentaient une couverture nuageuse complète. Les images sont fournies par le site Theia (<https://theia.cnes.fr/atdistrib/rocket/#/search?collection=SENTINEL2>) sous forme de tuiles (100 x 100 km) au niveau 2A : elles ont toutes subi un pré-traitement par la chaîne de traitement MACCS (Multi-

sensor Atmospheric Correction and Cloud Screening), qui permet la correction atmosphérique des données et détecte également les nuages et leurs ombres (Hagolle et al., 2017). Elles ont été téléchargées via l'interface de programmation d'application du site du pôle de données et de services surfaces continentales Theia et rééchantillonnées à 10 m par un script Python développé en utilisant les bibliothèques gdal et fiona. Les zones nuageuses ont été supprimées en utilisant le masque fourni lors du téléchargement avec un script python (bibliothèques gdal et fiona). Les bandes 2, 3, 4, 8 et 11 ont été sélectionnées pour permettre le calcul des différents indices (*Tableau 1*). Ensuite, les périmètres de Sébéri et de Tiaguiriré ont été extraits des images avec un masque supplémentaire pour ne conserver que les parcelles étudiées (hors zones humides, chemins, habitations, points d'eau).

2.3.1. Méthode directe : indice de salinité SI

Cette méthode est dite directe, car elle utilise sans intermédiaire l'état de surface du sol pour caractériser la salinité. L'indice de salinité (*SI*: *Salinity Index*) (Tripathi et al., 1997) est celui utilisé dans l'étude afin d'évaluer les niveaux de salinité du sol (*Équation 1*). Les bandes du rouge et du proche infra-rouge des satellites Sentinel-2 sont utilisées pour estimer *SI*. Cet indice a été développé pour identifier, par l'étude de la réflectance spatiale de la surface des sols, des caractéristiques spécifiques liées à la salinité, notamment des croûtes de sel ou des efflorescences salines, mais également des facteurs plus difficiles à observer comme des modifications de la texture et

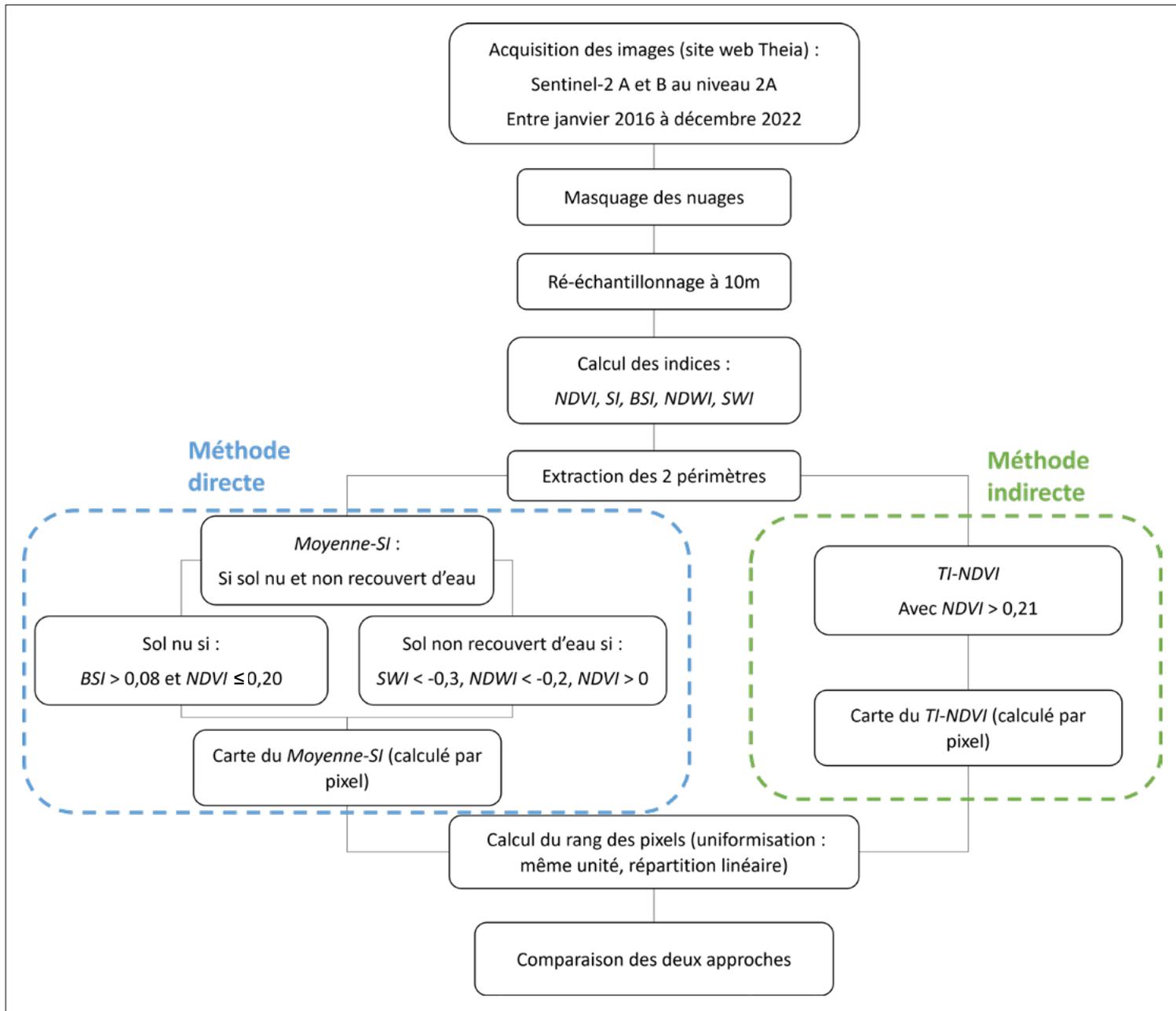
Tableau 1 : Bandes spectrales du satellite Sentinel-2 utilisées ainsi que leurs caractéristiques.

Table 1 : Sentinel-2 spectral bands used and their characteristics.

ID bande	Domaine spectral	Centre de la bande spectrale (nm)	Largeur de la bande (nm)	Résolution spatiale (m)
B2	Bleu	493	65	10
B3	Vert	560	35	10
B4	Rouge	665	30	10
B8	Proche infrarouge (PIR)	833	105	10
B11	Infrarouge ondes courtes	1610	90	20

Figure 4 : Organisation du traitement des données à partir de l'acquisition des images Sentinel-2 (tuile d'identification T31PDQ_D) téléchargées depuis le site du pôle de données et de services surfaces continentales Theia. NDVI pour Normalized Difference Vegetation Index, SI pour Salinity Index, BSI pour Bare Soil Index, NDWI pour Normalized Difference Water Index, SWI pour Superfine Water Index, TI-NDVI pour Time-integrated NDVI.

Figure 4 : Organisation of data processing from the acquisition of Sentinel-2 images (identification tile T31PDQ_D) downloaded from the Theia continental surface data and services centre. NDVI for Normalized Difference Vegetation Index, SI for Salinity Index, BSI for Bare Soil Index, NDWI for Normalized Difference Water Index, SWI for Superfine Water Index, TI-NDVI for Time-integrated NDVI.



de la structure du sol liées à des processus de dispersion des agrégats (Allbed et Kumar, 2013). Les sols salés présentent donc des réflectances plus élevées et des surfaces moins rugueuses, perceptibles dans le domaine des bandes du rouge et du proche infra-rouge (Metternicht et Zink, 1997).

$$SI = R/PIR \times 100 \text{ (Tripathi et al., 1997) Equation 1}$$

avec R pour Rouge (longueur d'onde centrale : 665 nm) et PIR pour Proche Infra-Rouge (longueur d'onde centrale : 833 nm). Du fait de la sensibilité de *SI* au couvert végétal et/ou à l'eau, chaque image a fait l'objet d'un traitement pour identifier les sols nus non recouverts d'eau selon deux étapes successives :

(i) Identification des sols nus grâce à la combinaison de l'indice *NDVI* (*Normalized Difference Vegetation Index*) (Rouse, 1974) et d'un indice de sol nu (*BSI*: *Bare Soil Index*) (Rikimaru et al., 2002) (Tableau 2). Selon Mzid et al. (2021), les pixels avec un *BSI* > 0,08 et un

NDVI < 0,20 sont identifiés comme étant des sols nus et permettent donc d'extraire les pixels avec un couvert végétal.

(ii) Identification des sols couverts d'eau grâce à une combinaison d'indices.

L'indice *NDVI*, l'indice *NDWI* (*Normalized Difference Water Index*) (McFeeters, 1996) et l'indice *SWI* (Sharma et al., 2015) (*Superfine Water Index*) ont été utilisés pour cette extraction (Tableau 2).

Afin de ne pas surévaluer l'indice *SI* dans les zones couvertes d'eau, il est nécessaire que tous ces périmètres ennoyés soient retirés des images. En effet, la réflectance de l'eau étant plus marquée dans le rouge que dans le proche infrarouge, le rapport des deux donne des valeurs fortes (Girard et Girard, 2010). Nous avons appliqué un seuil arbitrairement élevé sur la base de l'analyse des images de l'indice *SI* qui permet d'attester que ces périmètres ont été correctement retirés. Nous avons considéré les sols comme non recouverts d'eau lorsque (*NDVI* > 0 et *NDWI* < -0,2 et *SWI* < -0,3).

Tableau 2 : Caractéristiques et équations des indices retenus permettant la discrimination de la végétation, des sols nus et de l'eau de surface. PIR pour Proche Infra-rouge, V pour Vert (longueur d'onde centrale : 560 nm), SAT pour Saturation, R pour Rouge, B pour Bleu (longueur d'onde centrale : 493 nm) et *SWIR1* pour *Short-wavelength infrared 1* ce qui équivaut à la bande 11 (longueur d'onde centrale : 1610 nm). Après conversion des valeurs de couleur pour les bandes R, V, B du système Rouge-vert-bleu (RVB) en système Teinte-saturation-luminosité (TSL), il est possible d'extraire SAT.

Table 2 : Characteristics and equations of the selected indices for vegetation, bare soil, and surface water discrimination. PIR for Near Infrared, V for Green (central wavelength: 560 nm), SAT for Saturation, R for Red, B for Blue (central wavelength: 493 nm) and *SWIR1* for Short-wavelength infrared 1 which is equivalent to band 11 (central wavelength: 1610 nm). After conversion of the color values for the R, G, B bands of the Red-Green-Blue (RGB) system to the Hue-Saturation-Luminosity (HSL) system, SAT can be extracted.

Indice spectral	Équation	Spécificités
Normalized Difference Vegetation Index (<i>NDVI</i>)	$NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R} \text{ (Rouse, 1974)}$ (-1 ≤ <i>NDVI</i> ≤ 1)	Caractérisation de l'état du couvert végétal en place.
Bare Soil Index (<i>BSI</i>)	$BSI = \frac{(SWIR1 + R) - (PIR + B)}{(SWIR1 + R) + (PIR + B)}$ (Rikimaru et al., 2002) (-1 ≤ <i>BSI</i> ≤ 1)	Détection des sols nus.
Normalized Difference Water Index (<i>NDWI</i>)	$NDWI = \frac{V - PIR}{V + PIR}$ (McFeeters, 1996) (-1 ≤ <i>NDWI</i> ≤ 1)	Identification des changements de teneur en eau de la végétation.
Superfine Water Index (<i>SWI</i>)	$SWI = \frac{SAT_{(RGB)} - 7 \times PIR}{SAT_{(RGB)} + 7 \times PIR}$ (Sharma et al., 2015) (-1 ≤ <i>SWI</i> ≤ 1)	Utilisation pour la détection de l'eau de surface.

A partir des zones considérées comme non couvertes de végétation et/ou d'eau (i) et (ii), l'indice *SI* a été calculé pour chaque image de la zone d'étude disponible. Un indice *SI* fort est associé à un risque de salinité élevé, à l'inverse des valeurs faibles sont synonymes de risque faible. Pour chaque pixel de la zone d'étude, la moyenne des indices *SI* (*Moyenne-SI*) a été calculée pour chaque année entre 2016 et 2022, *SI* au moins 3 dates sans végétation et sans eau étaient disponibles pour ce pixel l'année considérée. Dans le cas contraire, l'indice *SI* du pixel n'a pas été renseigné pour cette année. Cet indice représente ainsi un indicateur de salinité potentielle de la surface du sol, dérivé de la réflectance de la surface du sol des rizières,

quand il n'y a pas de culture en place et après ressuyage de la lame d'eau d'irrigation. Il s'agit dans le contexte des systèmes de culture du riz au Niger de périodes assez brèves, d'une durée inférieure à un mois, situées entre les deux saisons culturales d'une année.

2.3.2. Méthode indirecte : *TI-NDVI*

L'indice *NDVI* est un des plus utilisés lorsqu'il s'agit d'étudier la végétation (Huang *et al.*, 2021). En effet, il permet d'attester de la vitalité du couvert végétal en se basant sur les bandes du rouge et du proche infra-rouge. Le *NDVI* a d'abord été calculé par pixel pour toutes les images. Un pixel est considéré comme

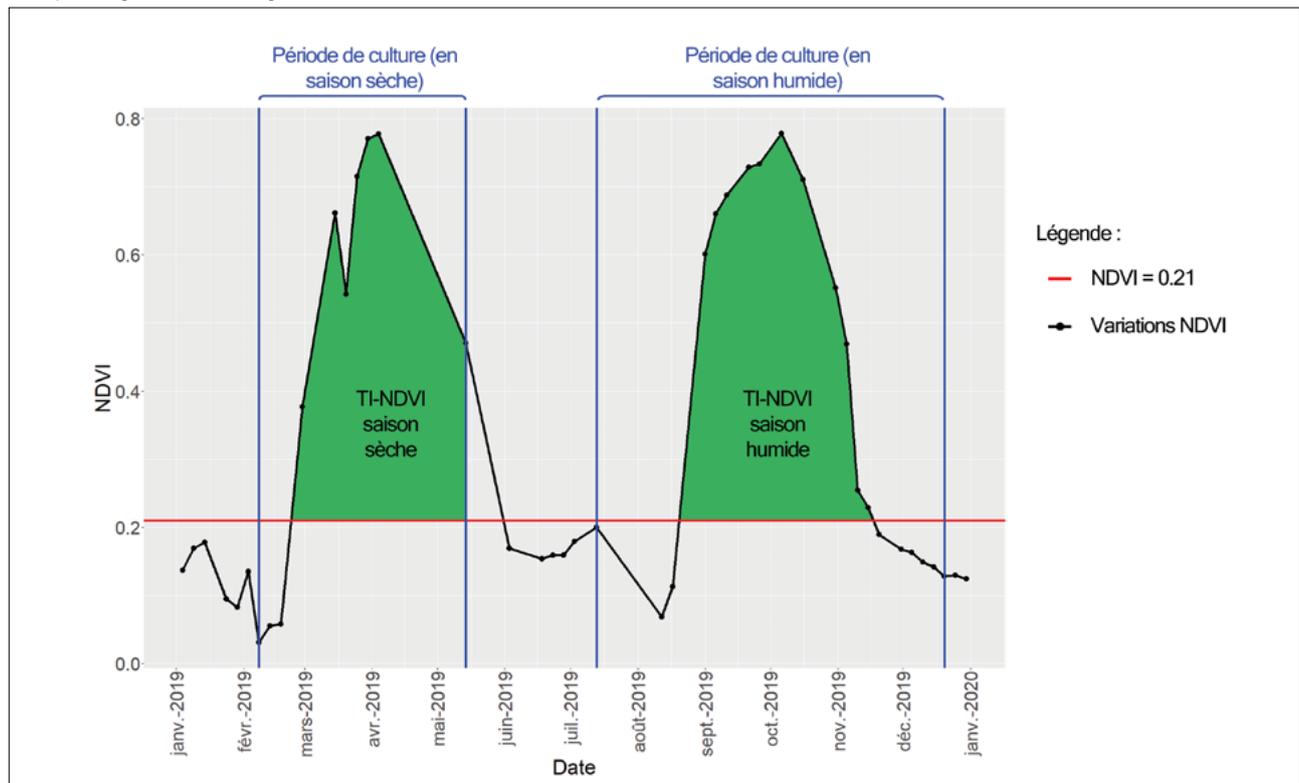
Equation 2

$$TI - NDVI = \sum_{t=d0}^{dn} \left[\left(\left(\frac{NDVI_t + NDVI_{t+1}}{2} \right) - 0,21 \right) \times (d(t+1) - d(t)) \right]$$

Avec *d0* pour la date de début de culture, *dn* pour la date de récolte, *d(t)* pour les dates disponibles (images Sentinel-2) pendant la période de culture et *NDVI_t* pour le *NDVI* à la date *t*, *TI-NDVI* étant exprimé en *NDVI.jours*.

Figure 5 : Évolution de l'indice *NDVI* sur une parcelle type au cours de deux saisons culturales (sèche et humide). Les dates de début et de fin des périodes de cultures sont définies par rapport aux moyennes de 64 parcelles de la zone, le seuil *NDVI* > 0,21 est croisé avec les dates de repiquage et de récolte.

Figure 5 : Evolution of the *NDVI* on a typical plot during two cropping seasons (dry and wet). The starting and ending dates of the cropping periods are defined in relation to the averages of 64 plots in the area, the *NDVI* threshold > 0.21 is crossed with the usual transplanting and harvesting dates.



couvert de végétation lorsque $NDVI > 0,21$ (Roussillon, 2015; Shabou et al., 2015). Ce seuil appliqué aux moyennes de 64 parcelles de la zone (25 pixels par parcelle), croisé avec les dates habituelles de repiquage et de récolte, a permis de définir les dates de début et de fin de chaque saison de culture. Les parcelles ont été choisies pour avoir une couverture des deux périmètres et un degré de contrainte de salinité plus ou moins fort. De plus, l'homogénéité de la taille des parcelles fait qu'elles peuvent toutes être représentées par 25 pixels.

L'intégration par rapport au temps de $NDVI$ est alors possible entre les dates de début et de fin de culture pour chaque saison ($TI-NDVI$: Time-integrated $NDVI$) (Équation 2) (Reed et al., 1994; Ma et al., 2011; Moussa et al., 2020).

L'intégrale du $NDVI$ est évaluée par pixel pour chaque saison de croissance où il y a présence de végétation. Son calcul permet de prendre en compte l'aspect temporel du $NDVI$ et est corrélé à la productivité du riz (rendement en grain, et production de biomasse aérienne) (Moussa et al., 2020). La figure 5 illustre le mode de calcul de $TI-NDVI$, en s'appuyant sur l'évolution de l'indice $NDVI$ pour une parcelle en 2019, soit 2 saisons culturales (11 images en saison sèche et 22 en saison humide). Des valeurs de $TI-NDVI$ faibles peuvent être liées à un risque accru de salinité des sols. Cette méthode présente l'intérêt de ne pas nécessiter d'images en situation de sol nu, ce qui peut être problématique dans ces zones de riziculture. En effet, les périodes d'interculture sont courtes et les surfaces rapidement recouvertes d'une lame d'eau d'irrigation.

2.4 Protocole de comparaison des deux méthodes

La comparaison relative des différents pixels des périmètres au cours des différentes années (pour l'indice SI) ou saisons culturales (pour l'indice $TI-NDVI$) considérées pour l'étude, a été basée sur le calcul du rang des pixels, ordonnés en fonction de

leur valeur d'indice pour chaque unité de temps. L'utilisation du rang plutôt que de la valeur des indices permet de s'affranchir des variations interannuelles et/ou inter-saisonnières des valeurs des indices, dues notamment aux fluctuations climatiques et aux différences dans l'itinéraire technique. Cela confère une unité similaire aux différents indices et uniformise les écarts entre différents pixels, permettant d'avoir ainsi des valeurs comparables entre les valeurs des $Moyenne-SI$ et des $TI-NDVI$. Les rangs ont été établis sur les différentes images de $TI-NDVI$ (chaque cycle cultural) et de $Moyenne-SI$ (chaque année). Pour chaque image, les pixels ont été classés par ordre croissant de ($Moyenne-SI$) et décroissant de ($TI-NDVI$) et se sont vus attribuer un numéro de rang. En effet, l'idée est d'obtenir un rang élevé pour des zones à fort potentiel de salinité. Or, ce potentiel est fort pour des valeurs de $Moyenne-SI$ élevées et des valeurs de $TI-NDVI$ faibles.

Pour pouvoir comparer les images entre elles, une réduction par le nombre de pixels non nuls a été effectuée pour chaque image (Figure 6). Les valeurs des pixels sont alors comprises entre 0 et 1 pour l'ensemble des données. Cela permet une comparaison entre saisons et années pour un même indice, mais également de pouvoir comparer les zones de contraintes identifiées entre les indices, c'est-à-dire les zones où la salinité est potentiellement la plus forte.

3. RÉSULTATS

3.1 Statistiques descriptives des indices $Moyenne-SI$ et $TI-NDVI$

Pour l'indice $Moyenne-SI$, les percentiles et les médianes annuelles sont peu variables entre 2016 et 2022 (Tableau 3), les valeurs sont au minimum de 68,5 pour le percentile-5 et au maximum de 76,3 pour le percentile-95.

Figure 6 : Illustration de la méthode du calcul du rang (exemple pour 4 pixels avec des valeurs de $TI-NDVI$). Des valeurs de $TI-NDVI$ élevées (en vert) sont représentées par un rang faible et à l'inverse des valeurs faibles (en rouge) par un rang élevé. Ce rang est ensuite réduit, c'est-à-dire divisé par le nombre de pixels, 4 d'après la figure 6.

Figure 6 : Illustration of the rank calculation method (example for 4 pixels with $TI-NDVI$ values). High $TI-NDVI$ values (in green) are represented by a low rank and conversely low values (in red) by a high rank. This rank is then reduced, i.e. divided by the number of pixels, 4 as shown in Figure 6.

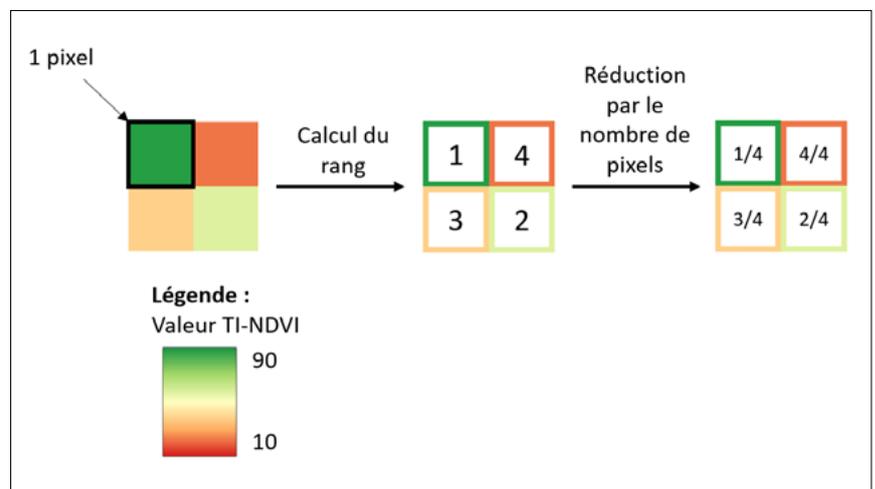


Tableau 3 : Statistiques descriptives au sein de la zone d'étude entre 2016 et 2022, par année pour l'indice *Moyenne-SI* et par saison sèche ou par saison humide pour l'indice *TI-NDVI*.

Table 3 : Descriptive statistics within the study area between 2016 and 2022, by year for the *Mean-SI* and by dry or wet season for the *TI-NDVI*.

Année	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Indice	<i>Moyenne-SI</i>						
Percentile-5	68,6	68,7	69,5	68,5	69,0	68,6	69,0
Médiane	70,9	71,0	72,4	71,2	72,3	71,7	72,3
Percentile-95	73,9	74,4	76,0	75,2	76,3	75,6	76,2
Indice	<i>TI-NDVI Saison sèche (NDVI.jour)</i>						
Percentile-5	23,3	17,0	13,9	13,2	34,7	41,0	29,3
Médiane	43,4	42,1	38,8	41,1	50,4	68,6	40,5
Percentile-95	55,0	53,8	51,1	51,9	60,1	81,7	47,2
Indice	<i>TI-NDVI Saison humide (NDVI.jour)</i>						
Percentile-5	36,6	48,4	47,2	55,1		50,3	38,3
Médiane	55,0	67,5	64,1	68,4		62,9	54,2
Percentile-95	70,2	87,5	79,7	91,4		77,5	69,7

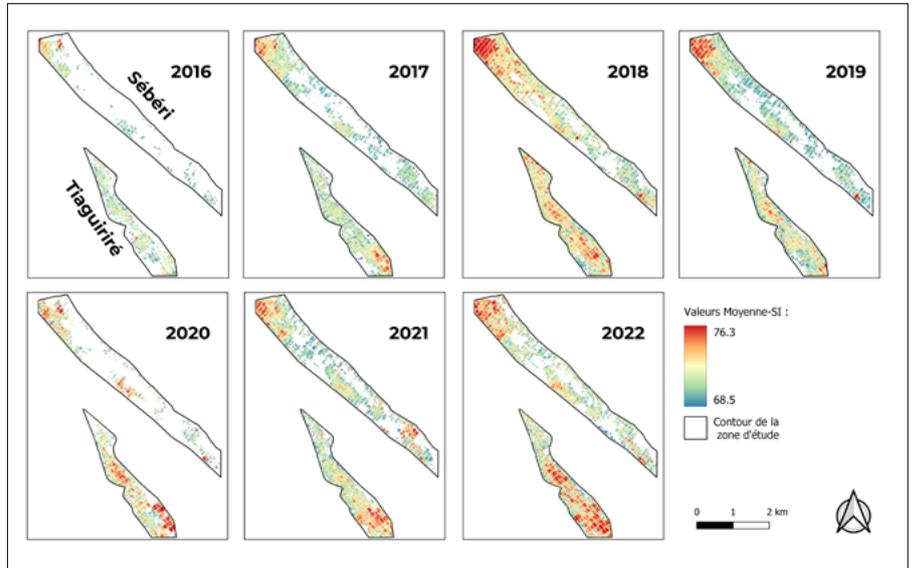
Tableau 4 : Images disponibles et surfaces calculées au sein de la zone d'étude entre 2016 et 2022, par année pour l'indice *Moyenne-SI* et par saison sèche ou par saison humide pour l'indice *TI-NDVI*.

Table 4 : Available images and calculated surfaces within the study area between 2016 and 2022, by year for the *Mean-SI* and by dry or wet season for the *TI-NDVI*.

Année	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Indice	<i>Moyenne-SI</i>						
Nombre d'images	21	38	55	47	22	48	48
Surface calculée (en %)	23	53	78	66	37	64	68
Indice	<i>TI-NDVI Saison sèche (NDVI.jour)</i>						
Nombre d'images	8	10	19	11	17	20	14
Surface calculée (en %)	100	100	100	100	100	100	100
Indice	<i>TI-NDVI Saison humide (NDVI.jour)</i>						
Nombre d'images	9	22	23	22		19	16
Surface calculée (en %)	100	100	100	100		100	100

Figure 7 : Cartes de la moyenne annuelle de l'indice de salinité sur sol nu (*Moyenne-SI*) pour les années 2016 à 2022, calculée avec les valeurs d'au moins 3 dates dans l'année. L'étendue de la légende correspond au minimum des percentile-5 et maximum des percentiles-95 toutes années confondues. Les zones non renseignées (en blanc) correspondent à des pixels avec moins de 3 dates de sol nu dans l'année.

Figure 7 : Maps of the annual mean of bare soil salinity index (*Mean-SI*) for the years 2016 to 2022, calculated with values from at least 3 dates in the year. The range of the legend corresponds to the minimum of the 5-percentile and the maximum of the 95-percentile for all years combined. The uninformed zones (in white) correspond to pixels with less than 3 dates of bare soil in the year.



Les statistiques par saison culturale de l'indice *TI-NDVI* sont plus variables à la fois entre saison sèche et saison humide et pour un même type de saison entre années (*Tableau 3*).

En saisons sèches, 2020 et surtout 2021 présentent des valeurs *TI-NDVI* beaucoup plus fortes que les autres années à la fois pour la médiane et les deux percentiles. Les saisons humides présentent des valeurs *TI-NDVI* plus fortes que les saisons sèches; seule la saison sèche 2021 a des valeurs de *TI-NDVI* du même ordre que celles observées en moyenne en saison humide. En saison humide, les différences entre années sont plus modérées avec néanmoins les années 2016 et 2017 présentant des médianes faibles inférieures à 55 *NDVI*.jours.

Sur la période 2016-2022, l'indice *Moyenne-SI* a pu être calculé selon les années, sur une proportion variable de pixels, avec un minimum de 23 % en 2016 et jusqu'à 78 % en 2018. Le nombre d'images utilisé pour le calcul des indices est variable. Concernant l'indice *TI-NDVI*, ce nombre peut évoluer d'un facteur 2 entre les années, avec un minimum à 8 images pour la saison sèche 2016 et un maximum à 23 images pour la saison humide 2018.

3.2 Analyse des variations interannuelles de l'indice *Moyenne-SI* sur sol nu

La *figure 7* présente des cartes de l'évolution de la *Moyenne-SI* entre 2016 et 2022 pour les zones en sols nus et non recouvertes d'eau. Les parties blanches représentent des pixels manquants dont la *Moyenne-SI* n'a pu être calculée (pas assez de dates en situation de sol nu sans couverture d'eau). Un nombre restreint de pixels est disponible pour l'année 2016; seulement 23 % d'entre eux ont pu être calculés sur la zone d'étude, car le satellite Sentinel-2B a été lancé seulement en 2017. De même en

Figure 8 : Représentation de l'évolution entre 2016 et 2022 de la proportion des pixels dans 4 intervalles de valeurs de *Moyenne-SI* (P5 pour Percentile-5 et P95 pour Percentile-95).

Figure 8 - Representation of the evolution between 2016 and 2022 of the proportion of pixels in 4 intervals of *Mean-SI* values (P5 for Percentile-5 and P95 for Percentile-95).

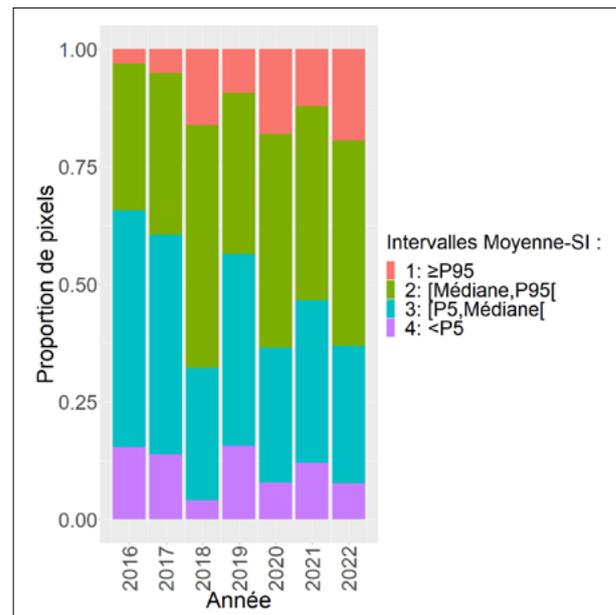
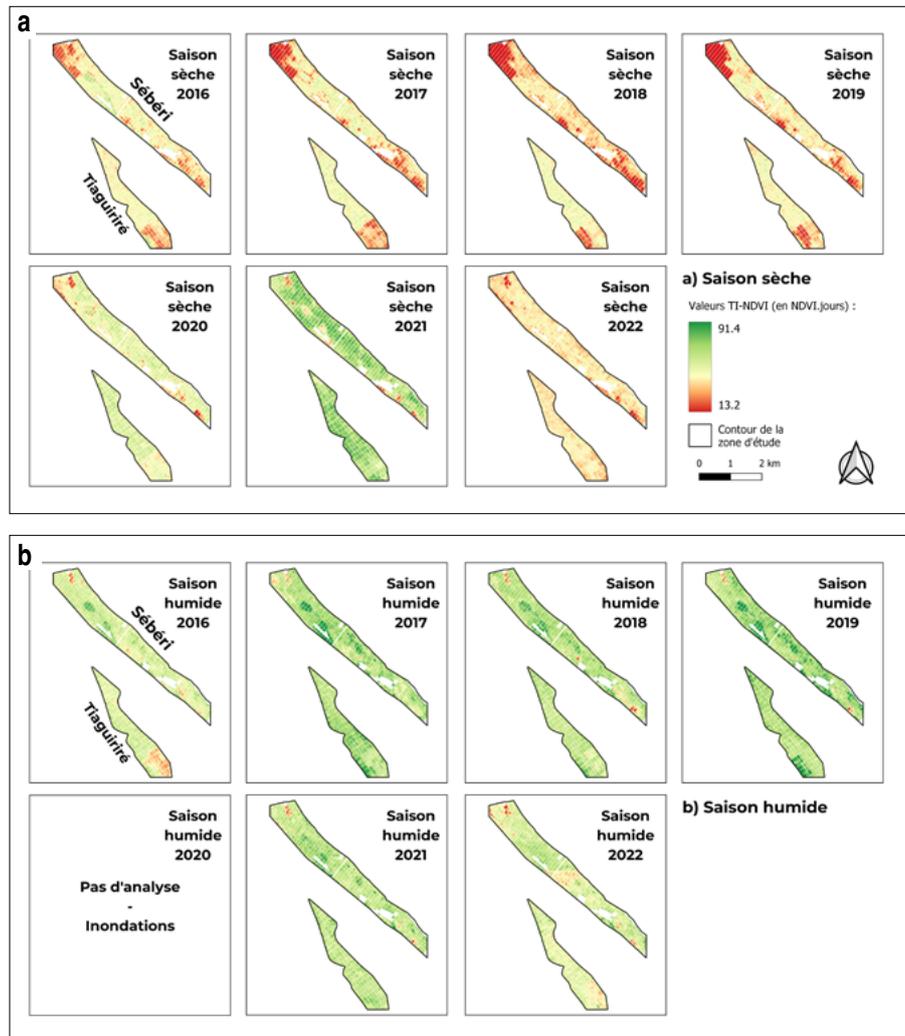


Figure 9 : Cartes entre 2016 et 2022 de l'indice sur végétation *TI-NDVI* intégré par cycle cultural en: a) saison sèche et en b) saison humide. Les bornes extrêmes de la légende correspondent au minimum des percentile-5 et au maximum des percentiles-95.

Figure 9 : Maps between 2016 and 2022 of the *TI-NDVI* integrated by crop cycle in: a) dry season and b) wet season. The extreme limits of the legend correspond to the minimum of the 5-percentile and the maximum of the 95-percentile.



2020, du fait des inondations, moins d'images sont disponibles pour le calcul de la moyenne avec 37 % de pixels calculés. La carte indique des valeurs élevées majoritairement dans les zones nord et sud de Sébéri, mais également dans le sud du périmètre de Tiaguiré. Il y a des variations interannuelles de l'extension des zones à fort *Moyenne-SI* notamment marquées dans le sud de Tiaguiré.

La répartition des pixels dans différents intervalles de *Moyenne-SI* permet d'apprécier l'importance des variations interannuelles de potentielles salinisations des sols (Figure 8): cette figure indique une tendance à l'augmentation de la proportion de pixels à fort potentiel de salinisation des sols entre 2016 et 2022.

3.3 Analyse des variations interannuelles de *TI-NDVI*

Les cartes de l'évolution de l'intégrale *TI-NDVI* entre 2016 et 2022 (Figure 9) permettent la comparaison entre les saisons

sèches et les saisons humides. Les saisons humides ont globalement des *TI-NDVI* bien supérieures à celles en saisons sèches. La saison sèche 2021 apparaît atypique, puisque les valeurs de *TI-NDVI* observées sont très supérieures à celles des autres saisons sèches (Figure 9).

Les saisons sèches présentent de fortes variations interannuelles: ainsi, en 2020 et 2021, les valeurs ont été bien plus élevées que pour les autres années. Les *TI-NDVI* les plus faibles sont situées majoritairement au nord et sud de Sébéri et au sud de Tiaguiré. Ce sont pour la plupart des parcelles non cultivées en saison sèche (Moussa *et al.*, 2020). L'étendue de ces zones a tendance à se réduire à partir de 2020. Entre les saisons humides, il y a plus d'homogénéité, excepté pour les saisons 2016 et 2022 qui présentent en moyenne des valeurs plus faibles de *TI-NDVI* que les autres années.

La proportion des pixels dans 4 classes de valeurs *TI-NDVI* rend possible l'observation des évolutions interannuelles de répartitions (Figure 10). L'année sèche 2021 présente la même répartition de pixels que lors des saisons humides où la *TI-*

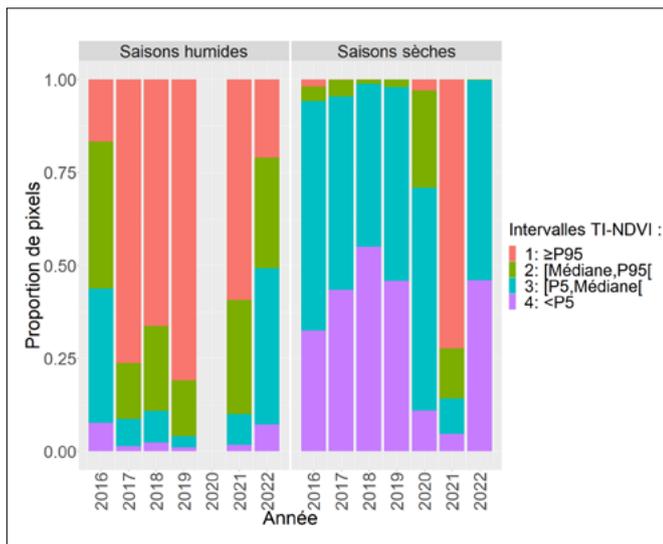
NDVI est la plus élevée, ce qui n'est pas du tout le cas pour les autres saisons sèches. Les saisons humides 2016 et 2022 sont similaires en matière de répartition des pixels.

3.4 Comparaison des deux approches

En utilisant les valeurs de rangs de pixels, la *figure 11* montre une cartographie de valeurs proches de 0 quand l'indice *SI* est faible et l'indice *TI-NDVI* élevé, jusqu'à des valeurs proches de 1 quand l'indice *SI* est élevé et *TI-NDVI* faible. Concernant l'indice *TI-NDVI* en saison sèche et saison humide, les zones

Figure 10 - Représentation pour les saisons sèches et humides entre 2016 et 2022 de la proportion des pixels dans 4 intervalles de valeurs de *TI-NDVI* (P5 pour Percentile-5 et P95 pour Percentile-95)

Figure 10 - Representation for the dry and wet seasons between 2016 and 2022 of the proportion of pixels in 4 intervals of *TI-NDVI* values (P5 for Percentile-5 and P95 for Percentile-95).



de rang élevé ont globalement la même localisation, excepté à Tiaguiriré qui est identifié comme ayant plus de valeurs élevées en saison humide. Il existe également une concordance importante de la répartition des zones de rang élevé entre la *Moyenne-SI* et la *TI-NDVI*. Les zones où la salinisation est potentiellement importante, c'est-à-dire des zones de rang élevé sont globalement plus étendues pour la *TI-NDVI* sur la zone de Sébéri, alors que pour la *Moyenne-SI*, elles sont plus étendues sur la zone de Tiaguiriré.

Le *tableau 5* a été obtenu sur la base des pixels communs à l'image *Moyenne-SI* et à la moyenne des images *TI-NDVI* en saisons sèche et humide. Ce tableau croisé des pixels communs aux deux indices est établi sur 5 intervalles de rang de pixel allant de 0-0,2 à 0,8-1. Il est bon de rappeler qu'un intervalle de rang faible (e.g. 0-0,2) est synonyme d'un potentiel de salinité faible. A l'inverse, un intervalle de rang élevé est synonyme d'un potentiel de salinité élevé (e.g. 0,8-1). Ainsi, obtenir une surface élevée, pour un des indices sur un intervalle au potentiel de salinité faible et pour l'autre sur un intervalle au potentiel de salinité élevé, signifie que les mêmes zones sont décrites par les indices avec des potentiels de salinité opposés. A *contrario*, obtenir une surface élevée pour des intervalles de même potentialité pour les deux indices signifie que les zones sont caractérisées de la même manière par les indices.

A rang équivalent, les surfaces communes aux deux indices sont importantes. La valeur la plus forte est atteinte pour les zones à l'intervalle de potentiel de salinité élevé à la fois en *Moyenne-SI* et *TI-NDVI* (42,8 ha). Cependant, il y a entre les images des valeurs élevées, même quand les intervalles ne sont pas les mêmes pour les deux indices. Cela montre qu'il y a des différences notables entre les zones identifiées comme potentiellement salées *via* les deux méthodes. Il semblerait qu'elles apportent des informations similaires pour certaines localisations (*Figure 11*) mais différentes concernant la géométrie et la taille de ces localisations (*Tableau 5*).

Figure 11 : Cartes de la moyenne interannuelle entre 2016 et 2022 du rang des pixels sur la zone d'étude : a) pour l'indice *Moyenne-SI*, b) pour l'indice *TI-NDVI* en saison sèche et c) en saison humide. Les pixels sont classés de 0 à 1 en fonction de leur rang croissant pour la *Moyenne-SI* et de leur rang décroissant pour l'indice *TI-NDVI*.

Figure 11 : Maps of the inter-annual mean between 2016 and 2022 of the rank of pixels in the study area: a) for the *Mean-SI*, b) for the *TI-NDVI* in the dry season and c) in the wet season. The pixels are ranked from 0 to 1 according to their increasing rank for the *Mean-SI* and decreasing rank for the *TI-NDVI*.

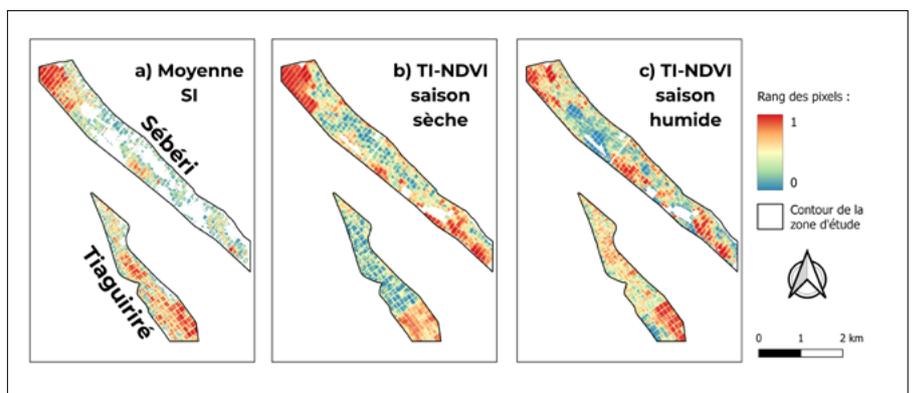


Tableau 5 : Correspondance des potentiels de salinité entre *Moyenne-SI* et *TI-NDVI* sur des zones communes. Ces potentiels de salinité sont représentés par 5 intervalles de rang de pixel allant de 0-0,2 pour un potentiel de salinité faible à 0,8-1 pour un potentiel élevé. Les valeurs sont exprimées en ha et la superficie totale comparée est de 395,2 ha. Les classes A à E correspondent ainsi à des indices croissants de *Moyenne-SI* et des indices décroissants de *TI-NDVI*.

Table 5: Correspondence of salinity potentials between *Mean-SI* and *TI-NDVI* over common areas. These salinity potentials are described by 5 pixel rank intervals ranging from 0-0.2 for low salinity potential to 0.8-1 for high potential. Values are expressed in ha and the total area compared is 395.2 ha. Classes A to E thus correspond to increasing *Mean-SI* indices and decreasing *TI-NDVI* indices.

TI-NDVI						Superficie totale
Moyenne-SI	0-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	0,6-0,8	0,8-1	
0-0,2	15.6	16.8	16.6	15.9	14.2	79.0
0,2-0,4	11.7	16.8	18.7	17.8	14.1	79.1
0,4-0,6	9.4	15.1	19.6	19.4	15.7	79.0
0,6-0,8	5.8	14.1	15.9	22.4	20.8	79.1
0,8-1	2.9	7.4	8.9	17.0	42.8	79.1
Superficie totale	45.4	70.2	79.6	92.5	107.6	395.2

4. DISCUSSION

4.1 L'identification des zones potentiellement salées par analyse de l'état de surface des sols nus

L'indice *SI* est appliqué sur la zone d'étude dès lors qu'au moins 3 dates en sol nu non inondé sont disponibles. Nous moyennons ensuite les indices de toutes les dates disponibles pour créer un indice *Moyenne-SI*.

Celui-ci est apparu stable dans sa distribution géographique d'année en année (*Figure 7*), mais une augmentation régulière des surfaces aux valeurs élevées est observée entre 2016 et 2022 (*Figure 8*). Cependant, des variations interannuelles localisées sont identifiables, notamment dans le sud de Tiaguiriré.

Les proportions variables de surface qui ont pu être calculées, variant entre 23 % et 78 % de surfaces calculées, sont expliquées par des années où très peu d'images sont disponibles : un seul satellite était opérationnel en 2016 et une partie de 2017 ; les inondations en 2021 ont fortement limité l'extension des surfaces non ennoyées. Par ailleurs, le fait que l'indice *Moyenne-SI* ne puisse pas être calculé pour tous les pixels s'explique en premier lieu par le choix des seuils de *BSI*, *NDVI*, *NDWI*, *SWI* : en effet, les seuils choisis étant volontairement sélectifs, ils peuvent gommer certaines périodes potentiellement en sol nu et sans lame d'eau. Mais cette impossibilité de calcul concerne aussi les zones

intensément cultivées, avec des intercultures courtes, n'ayant jamais pu être caractérisées en tant que sol nu au cours de la période d'étude.

Dans l'étude d'Allbed *et al.* (2014), l'indice *SI* est en moyenne situé entre 98 et 106 pour les 3 zones de leur étude. Ces valeurs sont fortes comparées à celles identifiées à Sébéri et Tiaguiriré, avec des valeurs médianes entre 70 et 72. Cependant, elles sont obtenues au sein d'oasis en Arabie Saoudite fortement soumises à la salinisation des sols. Les conductivités électriques du sol sont comprises entre 51 et 90 ds.m⁻¹, alors qu'elles atteignent un maximum de 7,1 dS.m⁻¹ sur notre zone d'étude. Une autre étude menée sur des oasis algériennes présente des valeurs de *SI* moyennes situées entre 70 et 78 suivant les années (Mihi *et al.*, 2019). Les sols sont décrits par les auteurs comme peu ou moyennement salés. Ces valeurs semblent en accord avec celles obtenues sur les périmètres moyennement salinisés de notre étude.

Moyenne-SI s'applique ainsi aisément à des zones où le couvert végétal et les lames d'eau d'irrigation sont peu présents au cours d'une année, par exemple en raison d'une forte salinité qui limite le développement des cultures ; ceci donne accès à des périodes plus nombreuses de sol nu permettant de calculer l'indice. C'est dans ces zones que l'indice *Moyenne-SI* présente les valeurs les plus fortes (*Figure 7*), de façon constante selon les années, ce qui suggère des zones à salinité potentielle marquée.

Dans les zones fréquemment cultivées, lorsqu'il est possible, le calcul de l'indice repose sur un nombre réduit d'images disponibles, même si le dédoublement des satellites Sentinel-2

(Sentinel-2A et Sentinel-2B) à partir de 2017 permet à présent de disposer d'images tous les 5 jours sur le même site, dès lors qu'il n'y a pas de nuages. Dans ces zones, l'indice *Moyenne-SI* présente en fin de période d'étude des valeurs plus faibles qu'au début, mais également plus variables d'une année sur l'autre, pouvant localement devenir fortes notamment à Tiaguiré. Cette variabilité pourrait s'expliquer par des évolutions de la salinité de surface au cours du temps. Mais elle peut également être liée à d'autres caractéristiques de surface, notamment des variations d'humidité ou de présence plus ou moins grande de résidus végétaux, susceptibles d'influencer le calcul de l'indice (Girard et Girard, 2010).

4.2 L'approche par l'analyse du couvert végétal

L'indice *NDVI* est celui le plus couramment utilisé pour caractériser l'état d'un couvert végétal à partir de sa réflectance spectrale. En effet, cet indice présente une corrélation positive avec l'activité photosynthétique du couvert, sa biomasse et son indice de surface foliaire (Carlson et Ripley, 1997). L'intégrale temporelle *TI-NDVI* utilisée dans notre étude, n'a à notre connaissance que rarement été utilisée jusque-là. Elle suppose, pour appréhender la dynamique du couvert végétal au cours de sa croissance, de disposer de dates suffisamment rapprochées, de l'ordre de quelques jours. Une telle disponibilité n'existe que depuis le lancement, à partir de l'année 2015, de satellites à forte fréquence de retour, notamment les satellites Sentinel-2. Sur la même zone rizicole au Niger, Moussa *et al.* (2020) ont montré que le *TI-NDVI* apportait, par rapport à la seule analyse du *NDVI* à une date unique, plus d'informations sur les hétérogénéités spatiales et temporelles de croissance de la végétation. Cela a également été observé dans l'étude récente de Yan *et al.* (2022) portant sur une zone de prairies permanentes en Chine.

Les cartographies de *TI-NDVI* pour les 13 saisons culturales étudiées de 2016 à 2022 montrent une variabilité à la fois inter-saisonnière et interannuelle, liée à l'effet des conditions météorologiques sur la croissance des cultures. En effet, ces conditions, notamment la pluviométrie, sont susceptibles de varier de manière importante entre années et saisons. Les saisons sèches ont des *TI-NDVI* plus faibles que les saisons humides, avec les valeurs les plus basses situées au nord et sud de Sébéri et au sud de Tiaguiré.

A l'inverse de la méthode basée sur les sols nus, cette méthode utilise des pixels où la végétation est suffisante pour pouvoir calculer un *TI-NDVI*. A travers cet indice, elle met en évidence les zones à faible valeur de *NDVI* sur une période donnée. L'indice *TI-NDVI* étant corrélé à la production de biomasse et au rendement en grains (Moussa *et al.*, 2020), cela permet d'identifier au sein d'un périmètre, les différences de croissance des plants de riz. Ainsi, il est possible de cartographier l'intensité des contraintes liées à la mise en culture d'un sol (notamment sa salinité). Il est

cependant difficile de statuer uniquement avec ces données sur l'importance de la salinité par rapport à d'autres stress pouvant affecter la culture, notamment les stress hydriques, les carences azotées ou d'éventuelles attaques parasitaires. Néanmoins, en disposant de cartes de *TI-NDVI* sur plusieurs saisons, on peut distinguer les situations présentant des stress récurrents. Il est alors possible de les attribuer à des facteurs intrinsèques (réserve en eau du sol, salinité) par opposition à des stress occasionnels qui peuvent également s'expliquer par des pratiques différentes ou des événements conjoncturels. Les cultures étant irriguées en permanence, on peut supposer que les stress hydriques sont limités et considérer en première instance que la salinité est dans ce contexte le premier déterminant des stress récurrents observés par télédétection.

Ce contexte de riziculture est de toute évidence bien adapté pour identifier par télédétection des zones potentiellement salées. L'uniformité de l'espèce cultivée, la régularité des saisons culturales (dates de semis et de récolte proches) et une relative homogénéité des pratiques culturales liée à la gestion collective du périmètre, simplifient l'analyse des différences de *TI-NDVI* entre parcelles. L'analyse est alors bien plus aisée que dans un contexte de polycultures. Des étapes d'identification préalable de l'espèce cultivée et de caractérisation du cycle cultural, supposant des analyses complexes et génératrices d'incertitude, peuvent être simplifiées dans le cas d'une monoculture de riz. A cela s'ajoute au Niger la grande disponibilité d'images sans nuages, y compris en saison de pluie, qui permettent de décrire la dynamique de croissance de la culture de riz du semis à la récolte avec un intervalle temporel de l'ordre de 5 à 10 jours. Ce type de contexte est particulièrement adapté à des analyses des dynamiques de végétation par télédétection optique multi-temporelle.

Notons également que la période d'inondation du périmètre en 2020 à la suite d'une crue majeure du fleuve Niger explique les valeurs de *TI-NDVI* élevées obtenues pendant la saison sèche 2021 suivante (Figure 9) : l'hypothèse est que les plantes ont bénéficié, au cours de la saison qui a suivi l'inondation, d'une réserve en eau dans les sols plus importante que pendant les années sans inondation.

4.3 La comparaison des deux approches

Les zones identifiées à fort potentiel de salinisation, donc avec les rangs les plus élevés *via* les deux méthodes ont des localisations similaires. Cependant, leur taille et leur géométrie peuvent varier, ces zones sont beaucoup plus étendues à Sébéri pour la *TI-NDVI* alors qu'avec la *Moyenne-SI*, elles sont plus élargies pour Tiaguiré.

Les zones potentiellement salées ne sont pas évaluées de la même manière selon les deux méthodes. La méthode directe utilisant l'indice *SI* *via* la *Moyenne-SI*, prend en compte uniquement les sols secs sans végétation, donc principalement

en interculture. En revanche, la méthode indirecte se basant sur le *NDVI* via le *TI-NDVI* se fonde sur les périodes de végétation, donc principalement quand les sols sont saturés en eau.

La difficulté de cette comparaison réside dans le fait que les deux méthodes proposées utilisent des indices différents avec des unités et des gammes de valeurs qui ne sont pas comparables. L'utilisation du rang des pixels permet de s'en affranchir, en ramenant les deux approches sur une unité semblable et une répartition linéaire. Il est possible d'identifier quels périmètres ont les rangs les plus élevés et donc par association définir les zones où les potentiels de salinité sont les plus importants. Il est ensuite envisageable de voir *SI* ces zones sont semblables d'une carte à l'autre. La plupart des zones identifiées avec un risque de salinité élevé ont été localisées sur les mêmes sites (*Figure 11*). Cependant, l'étendue des zones potentiellement contraintes par la salinité ainsi que leurs formes étaient très variables suivant l'utilisation de la méthode des sols nus ou celle de la végétation. En effet, ces méthodes apportent des informations similaires pour certaines localisations (*Figure 12*) mais différentes concernant la géométrie et la taille de ces localisations (*Tableau 5*). L'information apportée par les deux méthodes est complémentaire. Leur croisement permet de valider ou non les espaces identifiés comme ayant de fortes contraintes, notamment en estimant leur étendue.

4.4 Le couplage avec des mesures au sol pour identifier les zones effectivement salées

Nous avons utilisé dans cet article la notion de zones potentiellement salées pour caractériser certains secteurs de la zone d'étude. Ces zones présentent soit des indices *Moyenne-SI* élevés, suggérant l'influence sur la réflectance de traits liés à la salinité en surface du sol, soit des indices *TI-NDVI* faibles révélant des stress subis par la végétation, liés en particulier à la salinité du sol.

La confirmation que ces zones identifiées par télédétection comme potentiellement salées le sont effectivement suppose de mobiliser des études existantes sur la zone d'étude ou de réaliser des campagnes d'échantillonnage d'analyse de la salinité des sols.

Les thèses d'Adam (2011) et d'Ado (2017) se sont concentrées sur une surface de 10 ha au sud-ouest du périmètre de Sébéri. Dans cette zone étudiée en 2008, l'étendue de variation des $EC_{1/5}$ était de 0,03 à 6,6 dS.m⁻¹ dans la couche 0-10 cm et de 0,05 à 5,4 dS.m⁻¹ dans la couche 60-70 cm (Adam, 2011). Malgré le décalage temporel entre la campagne de mesure et la présente étude, l'analyse des deux indices de télédétection dans cette étude confirme bien l'existence d'un gradient de salinité marqué (*Figure 11*). Les travaux conduits par Ado (2017) pour dessaler les sols, ont par ailleurs montré qu'il existait une variabilité inter et intra-annuelle de la salinité des sols dans les zones irriguées. Celle-ci est fonction des périodes d'irrigation, de la lixiviation des

sols en profondeur et des remontées capillaires vers la surface en période d'intercultures non irriguées (Ado *et al.*, 2016). La variabilité temporelle peut être une explication des variations des indices *Moyenne-SI* et *TI-NDVI* mises en évidence entre années (*Figure 7*) et entre saisons sèche et humide d'une même année (*Figure 9*).

5. CONCLUSION

L'étude a examiné deux méthodes visant à l'identification de zones potentiellement salées, soit à travers des traits caractéristiques de la salinité en surface, soit par le stress induit par la salinité sur la culture de riz. Les deux méthodes utilisent des approches différentes : une méthode directe qui s'appuie sur des sols nus via un indice de salinité (*SI*) et une méthode indirecte qui s'intéresse à la dynamique de croissance de la végétation (*NDVI*). L'indice *SI* a permis un suivi année par année qui a l'avantage d'être peu soumis aux variations interannuelles notamment de température et de pluviométrie. Cependant, la faible disponibilité d'images en sol nu rend le nombre de pixels calculés assez variable. La *TI-NDVI* rend possible une analyse inter-saisonnière et interannuelle, donc temporellement plus dynamique qu'avec l'indice *Moyenne-SI*. Elle apporte des informations intéressantes sur le couvert végétal notamment en identifiant les parcelles les moins utilisées et aux rendements les plus faibles. Via le calcul du rang, la comparaison entre les méthodes est possible et statue sur des zones de contraintes similaires, mais d'aires et de géométries différentes. Les deux méthodes présentent donc une complémentarité qui permet de spatialiser plus précisément les contraintes de mise en culture d'un périmètre. La télédétection présente ainsi un réel intérêt dans le suivi de l'état des sols des rizières. En effet, elle permet de caractériser l'état actuel et passé des sols via des séries temporelles, tout en assurant le suivi de leur potentielle dégradation.

REMERCIEMENTS

Didier Michot et Christian Walter sont membres du Centre d'expertise Scientifique Theia « Cartographie Numérique des Sols » soutenu par le CNES. Ce projet a aussi bénéficié d'un programme ERASMUS+ ayant associé l'Université de Niamey et l'Institut Agro Rennes – Angers, qui a permis les échanges et les collaborations de recherche entre les co-auteurs nigériens et français. Nous tenons également à remercier les relecteurs de ce manuscrit pour leurs remarques constructives.

BIBLIOGRAPHIE

- Adam I. (2011). Cartographie fine et suivi détaillé de la salinité des sols d'un périmètre irrigué au Niger en vue de leur remédiation [Thèse de doctorat, Rennes, Agrocampus Ouest]. <https://www.theses.fr/2011NSARD062>
- Ado M. (2017). Evaluation in situ et en conditions contrôlées de la phytodésalinisation des Vertisols irrigués. Cas d'étude du périmètre rizicole de Kollo (Niger) dans la vallée du fleuve Niger [Thèse de doctorat, Rennes, Agrocampus Ouest]. <https://www.theses.fr/2017NSARD082>
- Ado M.N., Guero Y., Michot D., Soubeiga B., Senga Kiese T., Walter C. (2016). Phytodesalinization of irrigated saline Vertisols in the Niger Valley by *Echinochloa stagnina*. *Agric. Water Manage.* 177: 229–240. <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.agwat.2016.07.024>
- Allbed A., Kumar L. (2013). Soil Salinity Mapping and Monitoring in Arid and Semi-Arid Regions Using Remote Sensing Technology: A Review." *Advances in Remote Sensing*, Vol. 2 N° 4, 2013, pp. 373-385. doi: 10.4236/ars.2013.24040.
- Allbed A., Kumar L., Aldakheel Y. (2014). Assessing soil salinity using soil salinity and vegetation indices derived from IKONOS high-spatial resolution imageries: Applications in a date palm dominated region. *Geoderma*, 230-231, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.03.025>
- Carlson T.N., Ripley D.A. (1997). On the relation between *NDVI*, fractional vegetation cover and leaf area index. *Remote Sens. Environ.* 62, 241-252
- Chambre Régionale d'Agriculture de Diffa (2017). Fiche technico-économique pour le riz hors aménagement Région de Diffa.
- Dehaan R.L., Taylor G.R. (2002). Field-derived spectra of salinized soils and vegetation as indicators of irrigation-induced soil salinization. *Remote Sensing of Environment*, 80(3), 406-417. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00321-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00321-2)
- Douaoui A.E.K., Nicolas H., Walter C. (2006). Detecting salinity hazards within a semiarid context by means of combining soil and remote-sensing data. *Geoderma*, 134(1-2), 217-230. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.10.009>
- Food and Agriculture Organization (FAO) (2015). AQUASTAT Profil de Pays-Niger; Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture: Rome, Italie; p. 18. (s. d.).
- Girard M.-C., Girard C.M. (2010). Traitement des données de télédétection (2e éd.). Dunod. pp. 85-87; pp. 94-98.
- Girard M.-C., Schwartz C., Jabli B. (2023). Etude des sols: Description, cartographie, utilisation. Dunod. pp. 305-308; 346-352.
- Greenway H., Munns R. (1980). Mechanisms of Salt Tolerance in Nonhalophytes. *Annual Review of Plant Physiology*, 31(1), 149-190. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.31.060180.001053>
- Guero Y. (1987). Organisation et propriétés fonctionnelles des sols de la vallée du Moyen Niger. Ph.D. Thesis, Tunis University, Tunisia, Niamey University, Niger.
- Guero Y. (2000). Contribution à l'étude des mécanismes de dégradation physico-chimique des sols sous climat sahélien: Exemples pris dans la vallée du Moyen Niger. <https://dicames.online/jspui/handle/20.500.12177/2302>
- Guo B., Yang X., Yang M., Sun D., Zhu W., Zhu D., Wang J. (2023). Mapping soil salinity using a combination of vegetation index time series and single-temporal remote sensing images in the Yellow River Delta, China. *CATENA*, 231, 107313. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107313>
- Hagolle O., Huc M., Desjardins C., Auer S., Richter R. (2017). Maja Algorithm Theoretical Basis Document. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.1209633>
- Huang S., Tang L., Hupy J.P., Wang Y., Shao G. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (*NDVI*) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 32(1), 1-6. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>
- Ma C., Guo Z., Zhang X., Han R. (2011). Annual integral changes of time serial *NDVI* in mining subsidence area. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 21, s583-s588. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(12\)61644-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(12)61644-6)
- McFeeters S.K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (*NDWI*) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Metternicht G., Zinck J.A. (1997). Spatial Discrimination of Salt and Sodium-Affected Soil Surfaces." *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 18, N° 12, 1997, pp. 2571-2586.
- Metternicht G.I., Zinck J.A. (2003). Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints. *Remote Sensing of Environment*, 85(1), 1-20. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00188-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00188-8)
- Mihi A., Tarai N., Chenchouni H. (2019). Can palm date plantations and oasisification be used as a proxy to fight sustainably against desertification and sand encroachment in hot drylands? *Ecological Indicators*, 105, 365-375. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.11.027>
- Mougenot B., Pouget M., Epema G.F. (1993). Remote sensing of salt affected soils. *Remote Sensing Reviews*, 7(3-4), 241-259. <https://doi.org/10.1080/02757259309532180>
- Moussa I., Walter C., Michot D., Adam Boukary I., Nicolas H., Pichelin P., Guéro Y. (2020). Soil Salinity Assessment in Irrigated Paddy Fields of the Niger Valley Using a Four-Year Time Series of Sentinel-2 Satellite Images. *Remote Sensing*, 12(20), 3399. <https://doi.org/10.3390/rs12203399>
- Munns R. (1993). Physiological processes limiting plant growth in saline soils: some dogmas and hypotheses. *Plant, Cell and Environment*, 16(1), 15-24. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1993.tb00840.x>
- Mzid N., Pignatti S., Huang W., Casa R. (2021). An Analysis of Bare Soil Occurrence in Arable Croplands for Remote Sensing Topsoil Applications. *Remote Sensing*, 13(3), 474. <https://doi.org/10.3390/rs13030474>
- Ramoliya P.J., Pandey A.N. (2003). Soil salinity and water status affect growth of Phoenix dactylifera seedlings. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 31(4), 345-353. <https://doi.org/10.1080/01140671.2003.9514270>
- Reed B.C., Brown J.F., VanderZee D., Loveland T.R., Merchant J.W., Ohlen D.O. (1994). Measuring phenological variability from satellite imagery. *Journal of Vegetation Science*, 5(5), 703-714. <https://doi.org/10.2307/3235884>
- République du Niger (2000). Convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques: première communication nationale du Niger; p. 9.
- Riaz M., Arif M.S., Ashraf M.A., Mahmood R., Yasmeen T., Shakoor M.B., Shahzad S.M., Ali M., Saleem I., Arif M., Fahad S. (2019). A Comprehensive Review on Rice Responses and Tolerance to Salt Stress. In *Advances in Rice Research for Abiotic Stress Tolerance* (p. 133-158 - Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814332-2.00007-1>
- Rikimaru A., Roy P.S., Miyatake S. (2002). Tropical forest cover density mapping. *Tropical Ecology (India)*, 43(1), 39-47. https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Tropical+forest+cover+density+mapping&author=Rikimaru%2C+A+%28Nagaoka+University+of+Technology%29&publication_year=2002
- Rouse J.W. (1974). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation. Texas A & M University, Remote Sensing Center. https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Monitoring+the+vernal+advancement+and+retrogradation+%28greenwave+effect%29+of+natural+vegetation&author=Rouse%2C+J.+W.&publication_year=1974

- Roussillon J. (2015). Développement de méthodes innovantes de cartographie de l'occupation du sol à partir de séries temporelles d'images haute résolution visible (NDVI) - <https://www.semanticscholar.org/paper/D%C3%A9veloppement-de-m%C3%A9thodes-innovantes-de-de-du-sol-%C3%A0-Roussillon/85c0ccb094062414b15969c8495603c82f4d408a>
- Scudiero E., Skaggs T.H., Corwin D.L. (2014). Regional scale soil salinity evaluation using Landsat 7, western San Joaquin Valley, California, USA. *Geoderma Regional*, 2-3, 82-90. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2014.10.004>
- Shabou M., Mougenot B., Chabaane Z., Walter C., Boulet G., Aissa N., Zribi M. (2015). Soil Clay Content Mapping Using a Time Series of Landsat TM Data in Semi-Arid Lands. *Remote Sensing*, 7(5), 6059-6078. doi.org/10.3390/rs70506059
- Sharma R., Tateishi R., Hara K., Nguyen L. (2015). Developing Superfine Water Index (SWI) for Global Water Cover Mapping Using MODIS Data. *Remote Sensing*, 7(10), 13807-13841. <https://doi.org/10.3390/rs71013807>
- Sido Y.A. (2010). Etat des lieux de la riziculture : Cas du Niger. *Projet espagnol sur la riziculture en Afrique de l'Ouest / FAO* ; pp. 43-46.
- Tarchiani V., Fiorillo E., Hassimou Issa, Katiellou Gaptia Lawan Tiepolo, M., Aissatou Adamou Sitta, Mahamadou Daoura Nieino, Ibrahim, M. H., Aliou Moumouni Tankari, Aissa Liman Diallo. (2021). Les Inondations au Niger 1998-2020. <https://doi.org/10.13140/rg.2.2.33927.52645>
- Thomas D.S.G., Middleton N.J. (1993). Salinization: new perspectives on a major desertification issue. *Journal of Arid Environments*, 24(1), 95-105. <https://doi.org/10.1006/jare.1993.1008>
- Tripathi N.K., Rai B.K., Dwivedi P. (1997). Spatial modeling of soil alkalinity in GIS environment using IRS data. In *Proceedings of the 18th Asian Conference on Remote Sensing, Kuala Lumpur, Malaysia*, pp. 20-24.
- Várallyay G. (1994). Climate Change, Soil Salinity and Alkalinity. In M. D. A. Rounsevell & P. J. Loveland (Éds.), *Soil Responses to Climate Change* (p. 39-54 - Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-79218-2_4
- Yan J., Zhang G., Ling H., Han F. (2022). Comparison of time-integrated NDVI and annual maximum NDVI for assessing grassland dynamics. *Ecological Indicators*, 136, 108611. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108611>
- Zhang X., Friedl M.A., Schaaf C.B., Strahler A.H., Hodges J.C.F., Gao F., Reed B.C., Huete A. (2003). Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 84(3), 471-475. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00135-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00135-9)

