

# APPORT DES STATISTIQUES SPATIALES ET LES S. I. G DANS LA CARACTERISATION DES SOLS GYPSEUX DANS UNE REGION ARIDE: CAS D'EL HADJEB – BISKRA

T. MOSTEPHAOUJ<sup>(1)</sup>, R. BENSAD<sup>(2)</sup>, B. SAKAA<sup>(1)</sup>, S. MERDAS<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>Centre de Recherche Scientifique et Techniques sur les Régions Arides (CRSTRA), Campus Universitaire Mohamed Kheider –Biskra

<sup>(2)</sup>Département d'Agronomie, Université de Skikda

## RESUME

D'après plusieurs auteurs, le dépôt des sels dans le nord du Sahara Algérienne présente une distribution spatiale séquentielle. Une campagne de mesures sur 110 échantillons des taux de sels (gypse, calcaire, halite) a été effectuée sur quatre toposéquences orientées Nord – Sud, du djebel Boughzel (commune d'El Hadjeb) vers la dépression endoréique (sebkha d'Oumache). L'objectif était de localiser les zones de forte concentration en sels particulièrement le gypse ( $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ ), à l'échelle de la région en utilisant les modèles d'analyse géostatistique intégrée dans un S.I.G, afin de déterminer les origines de cette distribution. L'analyse variographique, suivie d'interpolation par Krigeage (cartes isotenes), a permis de caractériser la structure de la variabilité spatiale et de localiser les zones de concentration égale en sels. Ainsi, l'interpolation par krigeage a montré, une répartition séquentielle des concentrations en sels du Nord vers le sud, allons des calcaires, jusqu'aux sels sodiques passant par les formations gypseuses. À cette variabilité serait associé en plus du climat aride, la topographie, les matériaux géologiques, les eaux sulfatées de la nappe phréatique et des nappes artésiennes, aussi les facteurs anthropiques (irrigation et drainage).

**MOTS CLES:** Gypse, toposéquence, variogramme, krigeage, SIG, géomorphologie, nappe phréatique.

## ABSTRACT

As stated by to several authors, the depositions of salts in the northern Algerian Sahara have a sequential spatial distribution. A campaign of measurements on 110 salt levels samples (gypsum, calcareous, and halite) has been performed on four toposequences North - South oriented from the mountain Jebel Boughzel (municipality of El Hadjeb) to depression endoreic (sebkha of Oumache). The objective was to locate areas of high concentration of salts especially gypsum ( $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ ), across the region using geostatistical analysis models integrated into the Geographic Information System (GIS) to find out the origins of this distribution. The variography, followed by Kriging interpolation, have characterized the structure of spatial variability and located areas with equal concentration of salts. The interpolation by Kriging showed a sequential distribution of salt concentrations from north to south, from the calcareous, to the sodium salts through the gypsum formations. At this variability is associated in addition to the arid climate, topography, geological materials, groundwater and artesian water and anthropogenic factors as well (irrigation and drainage).

**KEYWORDS:** Gypsum, toposequence, variogramme, Kriging, GIS, geomorphology, groundwater.

## خلاصة

وفقا لعدد من المؤلفين، ترسب الأملاح في شمال الصحراء الجزائرية يحتوي على التوزيع المكاني متسلسل. تم القيام بحملة من القياسات على 110 عينة من مستويات الملح (الجبس والحجر الجيري والهاليت) على أربعة محاور موجهة شمال – جنوب من جبل سدى غزال بلدية الحاجب إلى سبخة أوماش. كان الهدف هو تحديد مجالات تركيز عال الأملاح وخاصة الجبس ( $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ ), في جميع أنحاء المنطقة باستخدام نماذج تحليل الجيوب إحصائية "Geostatistics" ودمجها في نظام المعلومات الجغرافية لتحديد أصول هذا توزيع. تحليل variogram، تليها الكريجينج الاستيفاء في شكل خرائط كونتورية، سمح لتوصيف هيكل التباين المكاني وتحديد مجالات تركيز الملح على قدم المساواة. وهكذا، فإن الاستيفاء من قبل الكريجينج (Kriging) أظهر توزيع متتابعة من الأملاح في تركيزات من الشمال إلى الجنوب، الحجر الجيري، وأملاح الصوديوم مرورا من خلال تشكيلات الجبس. يرتبط بهذا التغير و في معظم المناخ الجاف، بالتضاريس، والمواد الجيولوجية، وكذا المياه الجوفية الكبريتية والمياه الجوفية الارتوازية، والعوامل البشرية كالري المفرط والصرف.

**الكلمات الرئيسية:** الجبس، variogram، الكريجينج، نظم المعلومات الجغرافية، الجيومورفولوجيا، والمياه الجوفية.

## 1 INTRODUCTION

Dans les régions arides la plupart des sols présentent des accumulations de sels de différentes solubilités (calcaire, gypse, chlorure de sodium, etc..) et que ces sels présentent une distribution spatiale séquentielle. Le gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) est le sel le plus présent dans la plupart des sols de notre région d'étude. Le gypse est répandu dans les matériaux géologiques et dans les eaux sulfatées de la nappe phréatique et les nappes artésiennes, si bien que pratiquement tous les sols présentent des manifestations gypseuses pouvant aller de simple croûte gypso-calcaire endurées dite « Deb-deb » aux sols petrogypsicis à seulement quelques traces de sulfates dans la solution du sol. Dans la plupart des cas, le gypse est associé à d'autres sels de calcium et de sels de sodium et de magnésium.

Les différentes formes d'accumulation ont été étudiées par plusieurs auteurs, (Pouget M., 1968 ; Kadri et Hatira, 1996; Halitim A., et Robert M., (1992) ; Poch R.M., (1992) ; Khademi et al., 1997; Florea et Al-Joumaa, 1998 ; Herro, et Porta, 2000).

Certains auteurs précisent que différentes sources l'accumulation de gypse se produisent dans les sols par altération in situ à partir d'un matériel parental gypseux et par l'évaporation des eaux souterraines minéralisées (nappe phréatique peu profonde). D'autres considèrent que le gypse peut être déposé par d'autres moyens. Il peut être transporté par l'eau ou le vent et déposé dans de nouvelles localités formant des dunes de gypse ou s'incorporant avec le sol. Pour la caractérisation et la cartographie de ces sels, les techniques et les outils ont beaucoup évolué ces dernières années. L'avènement de la télédétection, le GPS, les SIG et les statistiques spatiales, ont permis aux pédologues d'acquérir des informations géoréférencées et de modéliser la variabilité spatio-temporelle des propriétés physicochimiques des sols (Legros J. P. 1996).

Faisons partie des statistiques spatiales, les méthodes de la géostatistique ont été introduites ces dernières années par les pédologues, (Crave & Gascuel-Oudou, 1997; Goovaerts,

1998 ; webster R., et al., (2004) ; Krasilnikov, P., et al., (2008) et les climatologues et par les climatologues (Burrough, (1986) ; Dubreuil et al., (2002) ; Mazzini & Schettini, (2009) ; Bittencourt et al., (2013) ; Carmello V., et al. (2015)), pour identifier les propriétés physiques, chimiques et biologiques, ainsi que la structure spatiale des sols à partir de l'information contenue dans un ensemble minimal de données géoréférencées par modélisation de l'espace. Ces techniques ont aidé le pédologue à minimiser la durée d'investigation sur terrain, ainsi que les coûts d'analyse et de cartographie.

L'objectif principal de cette étude l'élaboration des cartes de localisation des zones à forte présence en sels particulièrement le gypse par l'utilisation du système d'Information Géographiques (SIG) et la géostatistique. Comme objectif spécifique d'essayer de déterminer la distribution du gypse et son origine dans son milieu physique aride « les Ziban ouest.

Localiser les zones à présence de sels permet de lutter contre les risques de salinité à travers la maîtrise de l'irrigation et le drainage. Ainsi, protégé la région contre le risque de la désertification, et à l'abondant de ces régions par des mouvements migratoires des populations.

## 2 SITE D'ÉTUDE, MATÉRIEL ET MÉTHODES

### 2.1 Site d'étude

L'étude concerne un site de 2.500 hectares de superficie, qui s'entend entre la commune d'El. Hadjeb et celle d'Oumache, situé à 10 km à l'ouest de la wilaya de Biskra, est à 500 km au sud-est de la capitale Alger (Fig. 1a). Il se situe dans la partie amant d'un sous bassin versant d'oued Djedi faiblement entaillé de plusieurs centaines d'hectares entre les coordonnées  $5^{\circ}35'E - 5^{\circ}40'e$  et  $34^{\circ}40'N - 34^{\circ}50'N$ . La physiographie est fortement contrastée, avec un faible relief, les pentes y sont douces (de 1 à 3 %), ou l'on a la présence de cinq principaux ensembles, les monts, les piémonts, les glacis, une plaine et une dépression (Fig. 1b)

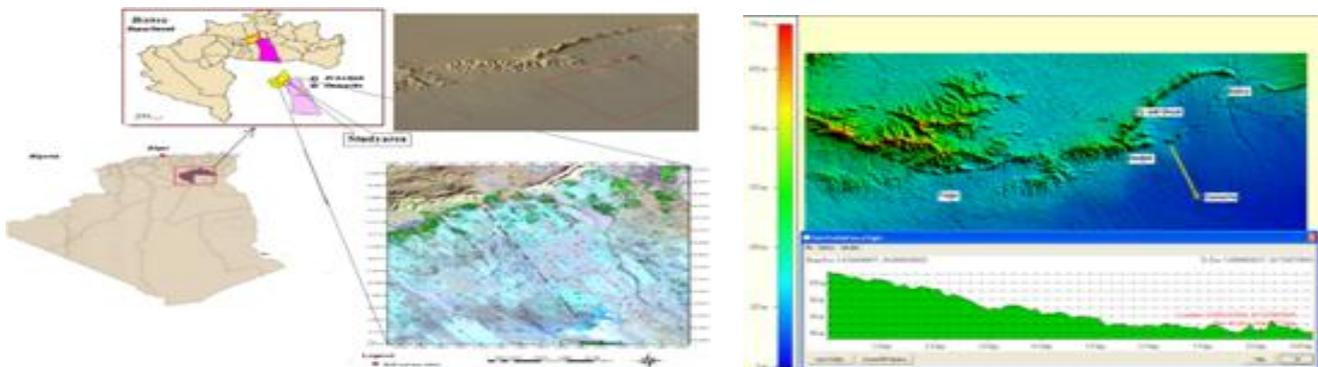


Figure 01 : a- localisation de la région d'étude sur une image satellite TM de Landsat 5 et b- un MNA aster avec un profil en long A-B

La région se caractérise par un climat aride, avec la présence d'une nappe phréatique sulfato chlorurée et un matériau gypso calcaire. Au cours des dernières décennies,

avec les périodes de forte sécheresse, le débit des rivières et le comportement des nappes phréatiques ont été soumis à d'importantes variations.

Les affleurements rocheux qui constituent les principaux reliefs de la région, ce sont des sédiments datant du Secondaire. Ils représentent les derniers anticlinaux de l'Atlas saharien situé à la limite nord de la région. Quant aux sédiments du quaternaire, ils s'étendent vers le centre et dans le Sud, vers la plate-forme saharienne. Les formations dites Deb-deb du quaternaire et qui sont constituées par des calcaires gypseux se localisent autour des oasis.

## 2.2 Données utilisées

Des études de télédétection dans la région ont été faites pour guider la prospection. Des cartes thématiques ont été numérisées (géologie) et d'autres calculées, telle que la carte des pentes et d'expositions à partir d'un modèle numérique d'altitude (MNA) raster de 30 m de résolution type Aster et l'extraction automatique du réseau hydrographique. Toutes ces données étant géoréférencées et intégrées dans un système d'informations géographique (ArcGis 9.3).

## 2.3 Les mesures pédologiques

10 sondages pédologiques ont été opérés entre 2007 et 2008 sur le site au moyen d'une tarière à main le long de quatre transects orientés du nord vers le sud sur une longueur de 10 Km, formant un quadrillage irrégulier d'environ 500 m, établie avec un échantillonnage mixte (aléatoire et systématique) (Fig. 2) dont 27 profils. Les relevés ont été effectués en fonction de l'homogénéité Topographique. Les sondages sont identifiés spatialement à l'aide d'un système GPS (Garmin). Outre les coordonnées des sondages et des fosses ouvertes, une étude des propriétés morpho-structurales de la couche de surface (0-10 cm) a d'abord été effectuée (couleur Munsell, rugosité...) sur terrain, puis des prélèvements d'échantillons ont été réalisés et analysés au laboratoire. Le calcaire total a été déterminé par la méthode de calcimètre de Bernard, la CE avec un rapport 1/5, le pH eau avec un rapport 1/2.5, la granulométrie par la méthode internationale de la pipette de Robinson et le dosage du gypse est effectuée par l'utilisation de l'acétone avec un rapport sol/eau de 1/500 d'après la méthode de Richard (1954). Une base de données intégrant toutes les données des sondages disponibles a été construite sous SIG (ArcGIS 9.3).

Localisation des transects et des sondages dans la région d'El Hadjeb

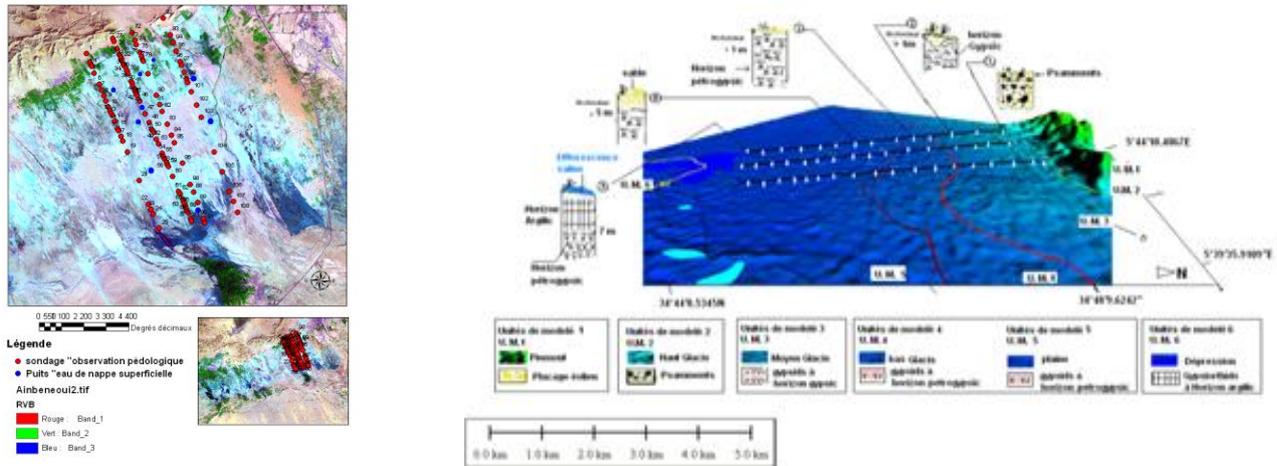


Figure02: localisation des échantillons sur une image satellitale TM de Landsat 5 du 14/03/2009 et un MNA Aster avec la localisation des profils pédologiques types

## 2.4 Les principales phases du travail

Le schéma suivant décrit les principales phases du travail (Fig. 3).

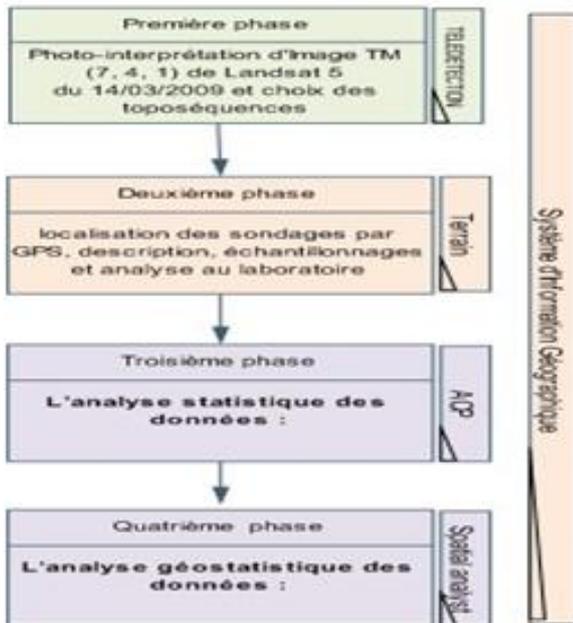


Figure 03: Les principales phases du travail

## 3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

### 3.1 Résultats

#### 3.1.1 Evaluation des données statistiques

##### 3.1.1.1 L'examen des distributions de données en utilisant l'histogramme

Tous les histogrammes ont montré une allure très asymétrique sauf celui du pH (Fig. 4). Une transformation logarithmique a été appliquée à des données biaisées, afin d'obtenir des distributions proches à la normale.

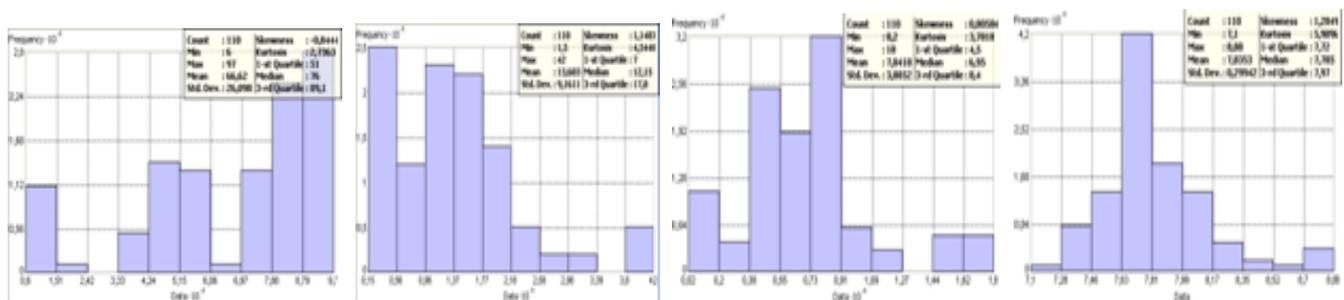


Figure 04: Histogrammes du gauche à droite le (CaSO<sub>4</sub>, 2H<sub>2</sub>O), le CaCO<sub>3</sub>, la CE et le pH

#### 2.4.1 L'analyse géostatistique des données

L'approche caractérisant la structuration spatiale des variables comporte:

- Analyse exploratoire des données : construction d'histogrammes permettant d'identifier les tendances générales, repérer les données anormales, et délimiter des zones aux propriétés différentes...
- Construction du variogramme : prise en compte de la continuité spatiale du paramètre à cartographier.
- Interpolation des données : estimation des concentrations des sels par krigeage à partir des mesures et des modèles de variogrammes établis.

L'analyse et l'interprétation des résultats ont été opérées avec spatial Analyst dans ArcGis 9.3.

### 3.1.1.2 Les principales statistiques des variables

**Tableau 01: Les principales statistiques relatives aux variables (CaSO<sub>4</sub>, 2H<sub>2</sub>O), CaCO<sub>3</sub>, CE, pH et l'altitude pour les 110 échantillons et Tableau 02 des variables des niveaux piézométriques de la nappe phréatique.**

Libellé de la variable	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum	C.V
(CaSO <sub>4</sub> , 2H <sub>2</sub> O)	66,620	25,979	6,000	97,000	38,99
CaCO <sub>3</sub>	13,603	9,119	1,500	42,000	67,03
CE	7,042	3,867	0,200	18,000	54,91
pH	7,835	0,298	7,100	8,880	3,80
Altitude (m)	81,115	32,475	38,640	178,000	40.03

Variable d'intérêt	Niveaux piézométriques
Minimum	10
Maximum	36
Moyenne	22.308
Ecart-type	8.4037
Médiane	19.5
C.V	37.60

C.V : coefficient de corrélation

### 3.1.1.3 Matrice des Corrélations

L'examen du tableau 03 relatif à la matrice de corrélation permet de voir qu'il y a des variables qui sont bien corrélées entre elles. Il existe une forte corrélation entre la conductivité électrique d'une part et le pH, l'altitude et la piézométrie d'autre part.

**Tableau 03 : Matrice de corrélation entre les variables**

	(CaSO <sub>4</sub> , 2H <sub>2</sub> O)	CaCO <sub>3</sub>	CE	pH	Alt	pièze
CaSO <sub>4</sub> , 2H <sub>2</sub> O	1,00					
CaCO <sub>3</sub>	-0,16	1,00				
CE	0,14	-0,02	1,00			
pH	0,04	-0,05	0,87	1,00		
Alt	-0,45	0,32	-0,24	-0,16	1,00	
pièze	-0,46	0,36	-0,24	-0,15	0,93	1,00

D'autres corrélations moins significatives entre le (CaSO<sub>4</sub>, 2H<sub>2</sub>O) d'une part, est l'altitude et la piézométrie d'autre part, ce qui permet de dire que le dépôt des sels est séquentiel et il est beaucoup plus dû aux matériels parentales, à la topographie et le niveau piézométrique de la nappe phréatique.

ajustées (bleus).

Pour l'ensemble des modèles d'ajustement, la variation de la courbe des données observées est très proche de la courbe ajustée. Les différentes valeurs obtenues de l'effet de pépète, la portée et le palier sont listés dans le tableau ci-dessous.

### 3.1.1.4 Modélisation de la structuration spatiale

#### 3.1.1.4.1 Auto corrélation spatiale et les influences directionnelles

Le semi-variogramme est représenté sous forme graphique avec les données observées (point rouge) et les données

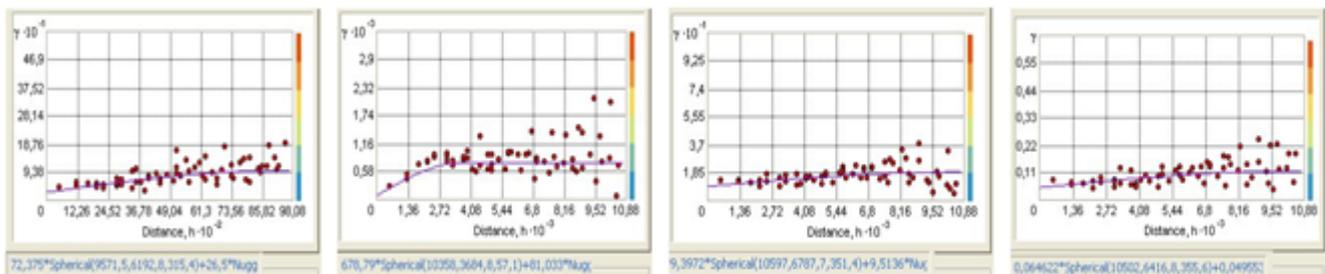
Tableau 04 : Analyse du variogramme avec ces différentes caractéristiques et ces modèles

	Effet de pépite	La portée	Le palier	Modèle d'ajustement
(CaSO <sub>4</sub> , 2H <sub>2</sub> O)	81.033	10357.5	678.79	Sphérique
CaCO <sub>3</sub>	26.5	9571.52	72.375	Sphérique
CE	9,51	300.8546	12.333	Sphérique
pH	0,04	223.855	0.0863	Sphérique
piézométrie	318.63	6100.208	95.378	Sphérique
Altitude	442.483	2465.887	299.297	Sphérique

Les semi-variogrammes sont ajustés par un modèle sphérique. Il présente un accroissement plus progressivement ensuite, il s'aplatit. L'autocorrélation spatiale des concentrations du gypse est assez bien représentée (Fig.5), surtout sur de courtes distances (quels sont les plus importants pour l'interpolation), le semi-variogramme est faible au début à de courtes distances et augmente avec la distance (plus on s'éloigne, plus les valeurs de concentration du gypse sont plus dissemblables). Cette dissemblance dans les valeurs du gypse augmente plus rapidement dans le sens nord-est-sud-ouest ainsi que dans le sens nord-sud. Plus tôt, il semble qu'il existe une

composante directionnelle à l'autocorrélation ou une anisotropie.

La tendance nord-est, sud-ouest de la teneur en gypse, est attribuée à une accumulation du gypse dans la partie centrale de la région entre la montagne et la dépression. L'altitude et la profondeur de la nappe phréatique et les vents sont des facteurs qui contribuent aux valeurs relativement fortes dans la partie centrale de la région d'étude et faible sur les piémonts des montagnes et au niveau de la surface de la sebkha (gypse sous forme de nappe).

Figure 05: Semi variogramme du gauche à droite le (CaSO<sub>4</sub>, 2H<sub>2</sub>O), le CaCO<sub>3</sub> (b), la CE et le pH

### 3.1.1.4.2 L'interpolation par krigeage

Le résultat de l'estimation des concentrations en gypse par krigeage ordinaire est illustré par Les figures ci-dessous. Les cartes laissent apparaître les grandes tendances des concentrations sur l'ensemble de la zone d'étude. L'approche proposée ne permet pas la mise en évidence de la répartition des sels en profondeur. En effet, l'échantillonnage considéré ici ne concerne que la surface de sol.

Les résultats (Fig. 6a et b), montrent des concentrations de gypse faibles au niveau des piémonts et deviennent de plus en plus forts à mi-versants et d'un degré moins au niveau de la dépression (sebkha). L'augmentation progressive des

concentrations en gypse est sans doute liée à la topographie et le rabattement de la nappe phréatique de faible profondeur et aussi à sa qualité en eaux (sulfaté). Dans la dépression les concentrations en gypse sont influencées par les diversement des oueds.

Les concentrations de calcaire sont plus importantes et s'observent au niveau des piémonts et dans la partie est de la région. Ils sont liés à la nature du substratum et aussi à la topographie.

À la vue de la figure, on s'aperçoit que la concentration en sel (halite) augmente en s'approchant de la dépression (chott).

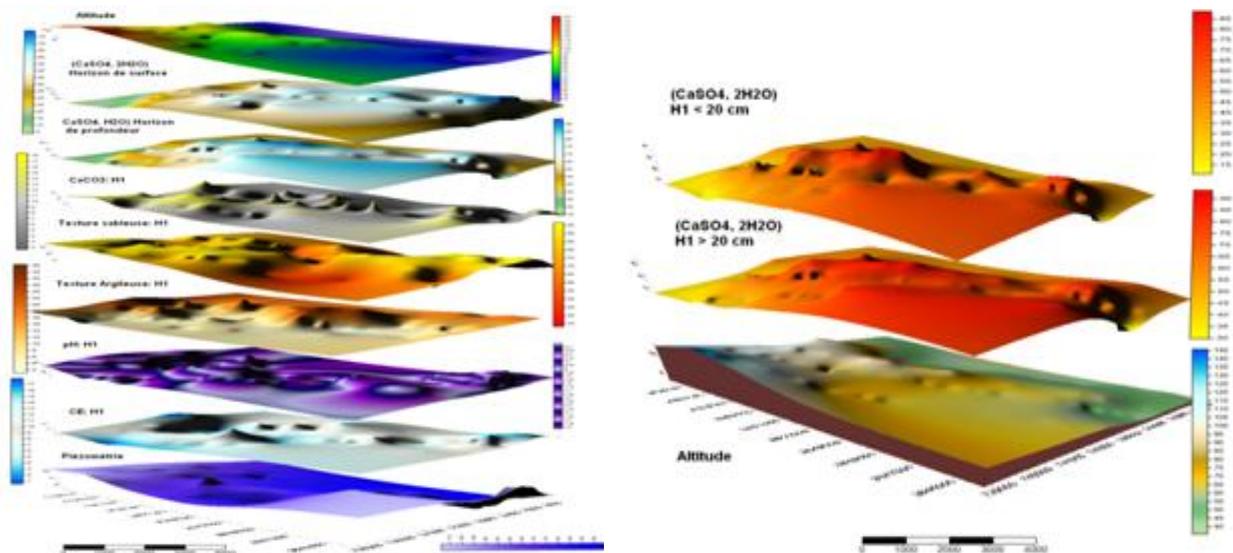


Figure 06: a - Cartes d'isoteneurs en  $(CaSO_4, 2H_2O)$ , en  $CaCO_3$ , CE, pH, texture, Altitude et piézométrie de la nappe phréatique et b - altitude et  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  de l'horizon de surface H1 et H2 de l'horizon de profondeur

### 3.2 Discussion

Les concentrations en sels cartographiés reflètent bien un certain «logique terrain», tant dans la répartition spatiale du gypse que celle du calcaire et de l'halite.

L'analyse des cartes de distribution des concentrations des sels montre une structuration spatiale très anisotrope est dépendante des propriétés topographiques et de l'influence de la nappe phréatique. Cette structuration est d'autant plus nette que l'on observe les trois grandes unités physiographiques qui constituent la région (Fig.3 et 6b). La topographie est l'un des principaux facteurs permettant de déterminer le niveau et la distribution spatiale de la salinité des sols. On constate également, qu'il y a une relation étroite entre les propriétés du sol (% du gypse, % calcaire, la CE et le pH) et la morphologie du paysage (Altitude). Ces derniers sont tous liés au régime hydrique du sol (ruissellement en surface et la fluctuation de la nappe phréatique). Donc, les caractéristiques géomorphologiques influencent directement le mouvement de l'eau.

Les concentrations du gypse dans l'horizon de surface (0-20 cm) vont en croissant graduellement à l'inverse de la teneur en calcaire total à mesure que l'on s'en éloigne des piémonts vers les zones avec endoréisme, la sebkha d'Oumache (Fig.3 et 6a et b). Il ressort singulièrement une diminution des teneurs en gypse du côté nord-est de la région comparativement au côté nord-ouest. Par contre, la partie centrale de la région présente des concentrations en gypse les plus importantes. On observe par ailleurs que la CE augmente graduellement en direction de la sebkha. Également, on remarque une croissance plus rapide de la concentration pour les carbonates à mesure que l'on s'éloigne du centre de la région qui confirme les schémas spécifiques de corrélation spatiale établie par l'analyse variographique des deux sels le gypse et le calcaire. On

remarque aussi, que là où le sol présente une texture sableuse, la CE est faible (le centre de la région et les piémonts des djebels) et là où la CE est élevée, la texture du sol présente un taux élevé en argile, le cas de la bordure de la cuvette de la sebkha d'Oumache où la CE mesurée étaient la plus élevées. Donc, on peut dire que la CE est en étroite relation avec la texture du sol (Jacobs et Dunn, 1998). La CE est non seulement influencée par les propriétés physiques du sol, mais elle est aussi fonction de certaines propriétés chimiques de celui-ci, entre autres, le pH et la capacité d'échange cationique. De plus, la CE est influencée par le contenu en eau du sol, la salinité et le matériel parental (Fritz et al, 1999). Les sulfates et les carbonates ont un effet important sur le pH de sol. Le pH des sols gypseux et calcaires est principalement contrôlé par la quantité de carbonate de calcium dans le profil de sol qui fluctue souvent entre 7.5 à 8.5.

La superposition des cartes d'isoteneurs créées avec les cartes factorielles «altitude, pente, géologie, piézométrie de la nappe phréatique» sous SIG a démontré que les différents types de sels ont un dépôt préférentiel selon la topographie, la géologie et la fluctuation de la nappe phréatique.

Sur les piémonts, dominés par les formations régosoliques à profil de type AC et de texture sableuse (placage éolien sur les versants d'exposition sud), la teneur en gypse est faible et sous forme de trace. Le profil est beaucoup plus calcaire que gypseux, le calcaire et sous forme des nodules et pseudo- mycéliums avec une teneur en calcaire total qui varie de 9 % et 19 %. Sur les bas piémonts, la teneur en gypse en surface est très forte (60 %), ce qui correspond aux formations de croûte et d'encroûtement de gypseuse appelées (Deb-deb), attribuée au quaternaire récent (Gouscov, 1964), où l'on a une forte accumulation dès la surface et dans la partie moyenne et profondes du profil, de couleur blanchâtre poudreuse (7.5 YR 8/2), l'horizon de

surface (0-4 cm) très minces, humifères de texture limono-sableuse, reposant sur l'horizon petrogypsic, la teneur en calcaire est faible. Les plus fortes concentrations (90 %) se retrouvent localisées au centre de la région, au niveau de la plaine alluviale où sont situées les principales plantations de palmiers dattiers d'El Hadjeb et de Bouchagroun, correspond à la classe des sols à horizons petrogypsic très compacts avec une texture sableuse à sablo-limoneuse avec des teneurs en calcaire très faible. Les concentrations de gypse vont par la suite en décadence à mesure que l'on se rapproche des zones avec endoréisme (la sebkha d'Oumache), en même temps que l'existence des sols à croûtes et encroûtement de nappe profonde légèrement hydromorphe à texture essentiellement composée d'argile, du limon et du sable (7.5 YR 5/3).

#### 4 CONCLUSION

L'objectif de ce travail a été de démontrer que le dépôt des sels dans les régions arides présente une distribution spatiale séquentielle. À partir de 110 sondages et observations, des mesures de taux de gypse, calcaire, pH, la CE, etc.. ont été réalisées au laboratoire et sur terrain, et des outils de géostatistique. (semi-variogramme et krigeage) ont été utilisés. Ainsi, que le logiciel système d'information géographique ArcGis (9.3).

Il ressort de notre travail que :

- l'analyse variographique, a permis en effet de modéliser la structure spatiale de la variable régionalisée (anisotropie, dépendance et corrélation spatiales entre les sondages et les observations) ;
- l'interpolation par krigeage, a permis de dresser des cartes d'isoteneurs des sels et aussi de prédire la distribution spatiale des concentrations de ces sels en des sites non échantillonnés ;
- L'intégration des cartes d'isoteneurs issues par krigeage et d'autres cartes exogènes, la géologie ainsi que des informations apportées par le modèle numérique de terrain (pente, exposition) dans ArcGis, nous ont permis de déterminer l'origine et la localisation du gypse.

Toutefois, les estimations produites auraient pu être encore améliorées par d'autres variables auxiliaires comme l'hydrologie (régime d'écoulement, etc.).

Enfin, il est important de noter que cette étude nous a permis de comprendre la distribution des sels entre autres le gypseux en fonction des facteurs topographiques, climatiques et par remontée capillaire (par ascensum) de la nappe phréatique minéralisée.

Les cartes de distribution spatiale des sels, surtout le gypse constitue un élément d'appui indispensable pour les décideurs quant aux choix des zones de mise en valeur des terres dans ces zones hostiles surtout en irriguer.

#### REFERENCES

- [1] Bittencourt F., Mantovani E. C., Sediya G. C., Santos N. T., 2013 : Distribuição espacial da chuva em fazendas de soja e algodão no extremo oeste da Bahia. III Simpósio de geoestatística aplicada em ciências agrárias, 1 – 6.
- [2] Burrough, P.A, 1986 : Principals of geographical information systems for land resources assessment. Oxford, Clarendon Press, 194 p.
- [3] Carmello V., Sant'Anna Neto, J. L., Dubreuil, V., 2014 : Variabilité des précipitations et rendements du soja en région de climat de transition, XXVIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, 1, 279 -284.
- [4] Carmello V., Dubreuil V., Sant'anna Neto J L. (2015) : Analyse géostatistique de la distribution spatiale des précipitations sur le versant sud du bassin du fleuve paranapanema, dans le sud du Brésil. XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège 2015, 6 p.
- [5] Crave A., et Gascuel-Oudou C., 1997. «The influence of topography on time and space distribution of soil surface water content ». Hydrological processes, 11, pp 203–210.
- [6] Dubreuil V., Montgobert M., Planchon O., 2002 : Une méthode d'interpolation des températures de l'air en Bretagne : combinaison des paramètres géographiques et des mesures infrarouge NOAA-AVHRR ; Hommes et Terres du Nord , 1, 26-39 p.
- [7] Farpoor, M.H., Khademi, H., Eghbal, M.K et Krouse, H.R., 2004. « Mode of gypsum deposition in Southeastern Iranian soils as revealed by isotopic composition of crystallization water». Geoderma, v.121, pp 233-242.
- [8] Florea N., Al-Joumaa Kh., 1998. « Genesis and classification of gypsiferous soils of the middle Euphrates loodplain, Syria». Geoderma 87 (1998), pp 67-85.
- [9] Goovaerts P., 1998. «Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives». Geoderma 89-1999. Pp 1–45.
- [10] Gouscov N., 1964. «Notice explicative de la carte géologique au 1/200.00e de Biskra (48)». service géologique de l'Algérie, 13 p.
- [11] Halitim A., et Robert M., 1992. «Geneses of gypseous and calcareous formations in arid zone (Algeria). Dynamics and effects in soil properties». Workshop on gypseous soils. Aleppo: ICARDA-FAO, 11 p.
- [12] Herro, I. J. et Porta J., 2000. «The terminology and the concepts of gypsum-rich soils». Geoderma, 96: pp 47-61.
- [13] Kadri A., Et Hatira A., 1996. «Genesis and typology of gypso-saline accumulations in southern Tunisia». International symposium on soils with gypsum Léida, Espagne, pp 55-59.
- [14] Khademi, H., Mermut A.R., et Krouse H.R., 1997. «Isotopic composition of gypsum hydration water in selected landforms from central Iran ». Sélectionnés

- reliefs du centre de l'Iran. CHEM. GEOL, 138: pp 245-255.
- [15] Krasilnikov, P., Carre, F., & Montanarella, L., 2008. « Soil geography and geostatistics (concepts and applications) ». JRC (scientific and technical reports), ICE (institute for environment and sustainability), 212 p. ISBN 978-92-79-08720-2 ISSN 1018-5593 Luxembourg: office for official publications of the European community's °c European communities, 2008.
- [16] Legros J. P., 1996. « Cartographie des sols: de l'analyse spatiale a la gestion des territoires ». Livres. 10 – collection génie l'environnement, Presses polytechniques et universitaires romandes ch.- 1015 Lausanne, 321 p - ISBN 2-88074-298-6.
- [17] Mazzini P. L. F., Schettini C. A. F., 2009 : Avaliação de metodologias de interpolação espacial aplicadas a dados hidrográficos costeiros quase sinóticos. Brazilian Journal of Aquat. Sci. Technology, 13, 53-64.
- [18] Poch R.M., 1992. « Fabric and physical properties of soils with gypsic and hypergypsic horizons in the Ebro valley ». PhD thesis, university Gent, Belgium, 285 p.
- [19] Pouget, M., 1968. « Contribution a l'étude des croûtes et encroûtements gypseux de nappe dans le sud-tunisien ». Cahiers ORSTOM série pédologie 6, p 309-365.
- [20] Webster R., et Oliver M.A., 2004. « Geostatistics for environmental scientists ». Ed; Wiley, 271 p.