

Chapitre IV

Matériel & Méthodes

Chapitre V. Matériel & Méthodes

Cette partie est consacrée à la description de la parcelle expérimentale, de la méthodologie utilisée, des techniques analytiques et des différentes méthodes de traitement des données.

V.1. Matériel

L'expérimentation s'est déroulée au niveau d'une parcelle cultivée, située dans une zone salée de la plaine de Relizane, à environ 05 km à l'Ouest de la ville de Relizane et 2.5 Km à l'Est de la ville d'El Matmar. Les coordonnées de la parcelle, en longitude /Latitude (WGS 1984) se situent entre les longitudes $0^{\circ}29'35''$ et $0^{\circ}29'46''$ et entre les latitudes $35^{\circ}43'56''$ et $35^{\circ}44'9''$ (Fig.18).

Cette parcelle présente une superficie de 11,3 ha, et elle est occupée par une culture d'Oliviers et une culture d'Avoine (Fig.19)

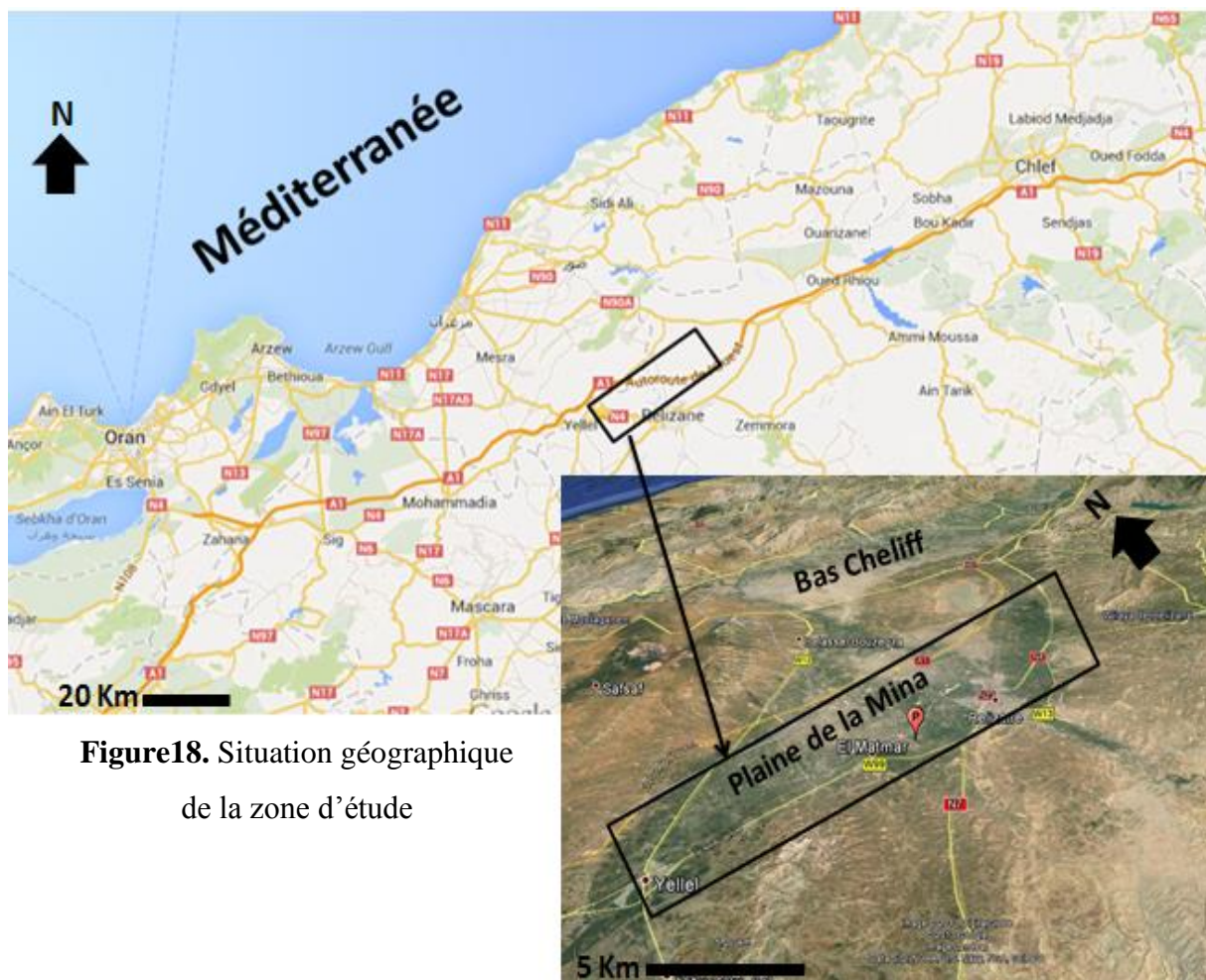


Figure18. Situation géographique de la zone d'étude

La prospection sur terrain par l'appareil de mesure EM38 a montré des variations de la salinité sur les sols de la parcelle. Les mesures électromagnétiques, réalisées sur ces zones nous ont permis, de suggérer la division du terrain en trois zones. La carte a fait ressortir trois zones de différents niveaux de salinité :

1. **Une zone A** : localisée au sud-ouest de la parcelle et correspond aux **faibles valeurs** de la salinité;
2. **Une zone B** : localisée à l'est et au centre, juste avant le drain tertiaire se trouvant au milieu de la parcelle et correspond aux **fortes valeurs** de la salinité;
3. **Une zone C** : localisée au nord de la parcelle, après le drain tertiaire et correspond à des **valeurs extrêmes** de la salinité;

Un profil pédologique représentatif a été implanté, au niveau de chaque zone :

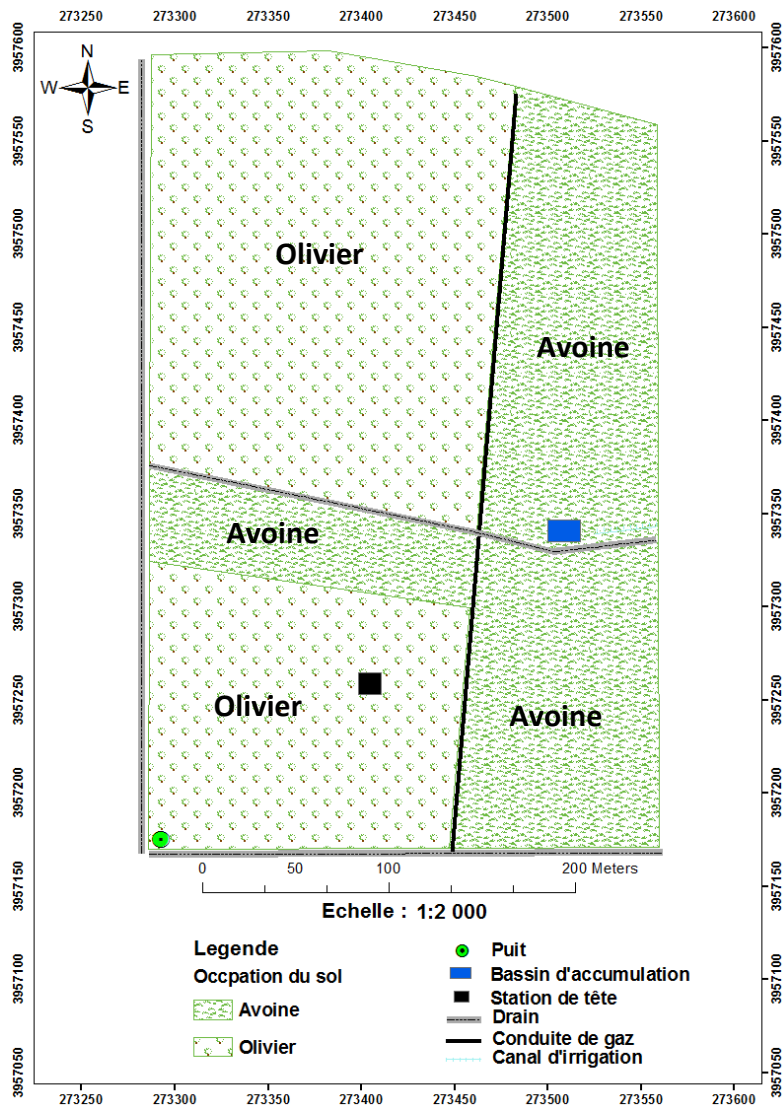
- **Le profil A** : représentant la zone A, caractérisée par une faible salinité avec des valeurs de l'EM38 inférieures à 100 dS.m^{-1} ;
- **Le profil B** : représentant la la zone B, caractérisée par une forte salinité avec des valeurs de l'EM38 situées entre 100 et 200 dS.m^{-1} ;
- **Le profil C** : représentant la zone C, caractérisée par une extrême salinité avec des valeurs de l'EM38 supérieures à 200 dS.m^{-1} .



Figure 19. Parcelle d'étude (Source : Google Earth)



Photo 1. Vue générale de la parcelle d'étude



V.2. Méthodologie

Dans le cadre de cette étude, la démarche utilisée comporte quatre étapes importantes :

- Analyse des documents de base
- La prospection de terrain ;
- Les analyses de laboratoire ;
- Et le traitement des données et cartographie.

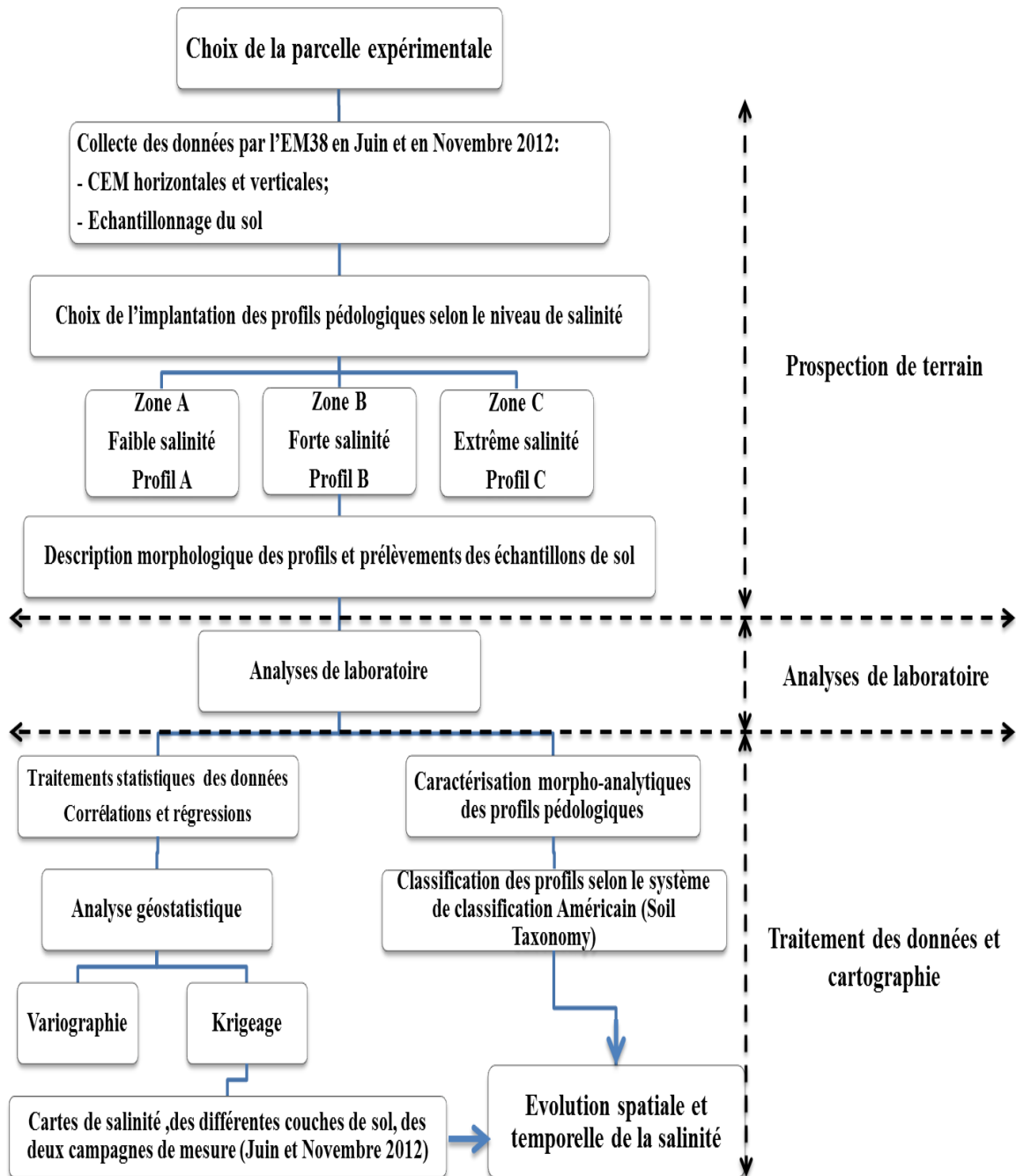


Figure 21. Démarche méthodologique

V.2.1. Analyse des documents de base

Cette étape concerne l'examen des documents disponibles ainsi que les études réalisées dans la zone d'étude. Elle concerne :

- La carte géologique (échelle 1/50.000),
- L'étude sur la caractérisation de l'état actuel de la salinité dans le périmètre irrigué de la Mina sur 6000 Ha (INSID, 2008);

- L'étude sur le suivi et modélisation de la salinité des sols dans le périmètre irrigué de la Mina (ANRH, 2003) ;
- Et l'étude agro-pédologique des extensions du périmètre de la Mina (Ghoul, DEMRH, 1973).

V.2.2. Prospection de terrain

Les principaux objectifs de notre travail consistent à démontrer la présence de sels dans les sols, à définir le degré de la salinisation et à suivre la distribution spatiale et temporelle des sels. Afin de répondre à ces objectifs, il était nécessaire de localiser une parcelle se trouvant sur une zone salée. A cet effet, nous avons procédé à la localisation de la zone d'étude sur la carte de salinité du sol établie par l'INSID en 2008. Nous avons réalisé une sortie, sur terrain, pour une récolte de données existantes. Le propriétaire de la parcelle était notre principale source d'information. En effet, nous avons reçu des informations qui concernent la superficie, les limites, le travail du sol, les cultures pratiquées et la conduite de l'irrigation au niveau de la parcelle.

Après la délimitation de la parcelle, par le biais d'un GPS de navigation de type GARMIN, nous avons établi un plan de cette parcelle, par l'utilisation du logiciel ARC-GIS, sur lequel nous avons définis un plan d'échantillonnage selon une grille régulière de 10 m x 10 m, afin de positionner 910 points de mesures de l'EM38 et 20 points de prélèvements des échantillons de sol. Ainsi, nous avons créé une base de données numérique que nous avons intégrée dans un système d'information géographique.

La prospection sur terrain a nécessité, l'utilisation du conductivimètre électromagnétique (EM38) pour la cartographie de la salinité et une tarière pédologique pour le prélèvement des échantillons de sol. Nous avons réalisé deux campagnes de mesures par l'EM38, dans la même parcelle (en Juin 2012 et en Novembre 2012), afin de suivre l'évolution spatio-temporelle de la salinité. Ensuite, nous avons procédé à l'étude des sols par l'ouverture de trois fosses pédologiques représentant trois zones de différents niveaux de salinité, par une description détaillée des profils.

V.2.3. Utilisation de l'EM38 pour la cartographie de la salinité

Deux types de données ont été collectés sur le terrain. :

- **Le premier, concerne les données à calibrer** et comporte les mesures au champ de la conductivité électromagnétique (CEM) du sol par l'appareil de mesure EM38 de

Geonics, en 910 points de mesures sur une grille régulière de 10 m x 10 m visant à couvrir toute la parcelle d'étude. Les lectures verticales et horizontales de l'EM38 ont été obtenues en maintenant l'appareil au-dessus de la surface du sol, pour les hauteurs (0 cm, 50 cm, 75 cm, 100 cm et 125 cm) (**Photo.2 et Fig.22**);

- **Le second, concerne, les données de calibrage**, et correspond à 20 points de mesure sélectionnés parmi les 910 points de mesure mentionnés ci-dessus de façon à représenter spatialement toute la zone d'étude et, implicitement, à couvrir la gamme de conductivité électrique apparente du sol(**Fig.24**). Des échantillons de sol ont été prélevés jusqu'à une profondeur de 100 cm par incréments de 25 cm pour déterminer la conductivité électrique de la pâte saturée (CE_{ps}) au laboratoire (**Fig.23**)

Vue la profondeur d'investigation de l'EM38, en position horizontale (0.75cm), seules les lectures verticales ont été prises en considération. Par ailleurs, la difficulté d'interprétation des mesures de la conductivité électromagnétique(CEM) réside dans l'influence de l'humidité du sol sur ces mesuré. La meilleure méthode consiste à intervenir après des pluies importantes qui homogénéisent les profils hydriques des sols (**Job et al, 1990**).

Afin de suivre l'évolution spatio-temporelle de la salinité, la prospection de la salinité, sur terrain s'est déroulée, sur deux campagnes de mesures :

- **En Juin 2012 (après la période pluvieuse)** : correspondant à un maximum de pluviométrie, pendant cette période;
- **Novembre 2012 (après la période sèche)** : correspondant à une période de sécheresse et d'irrigation des sols.



Photo 2. Utilisation de l'EM38

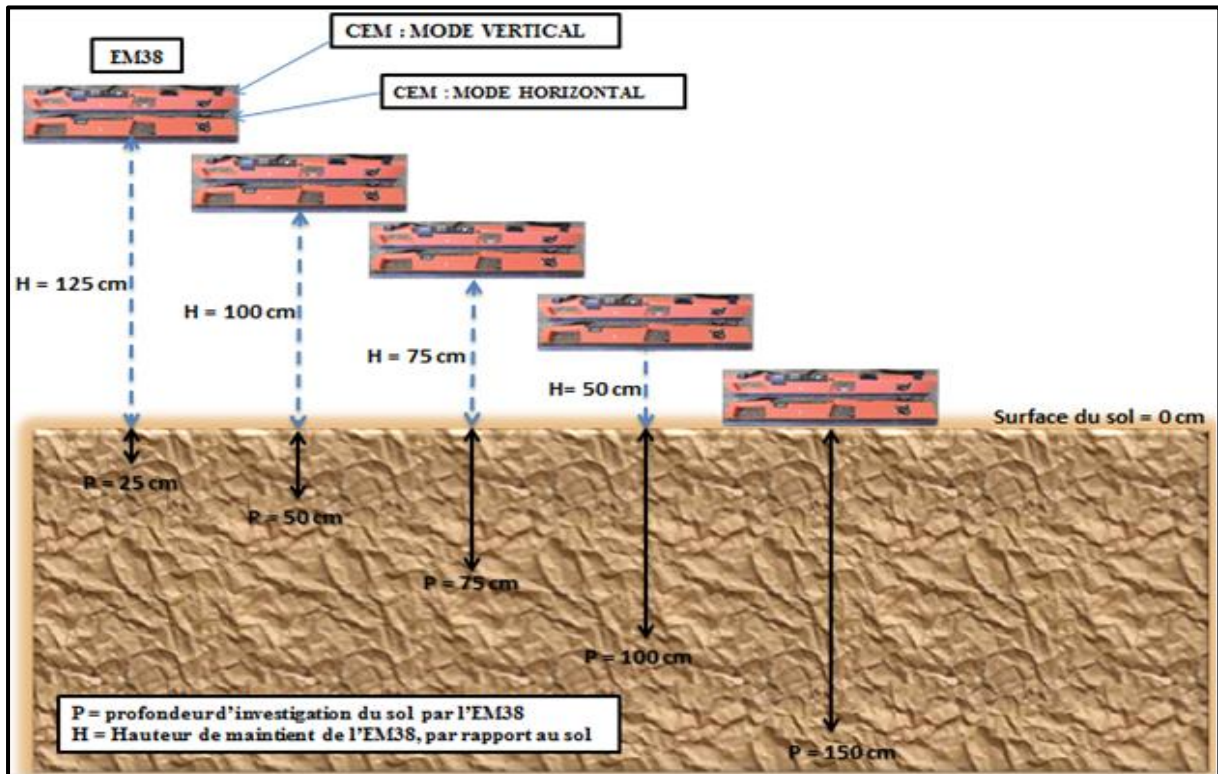


Figure 22. Lectures verticales et horizontales de l'EM38 à différentes hauteurs

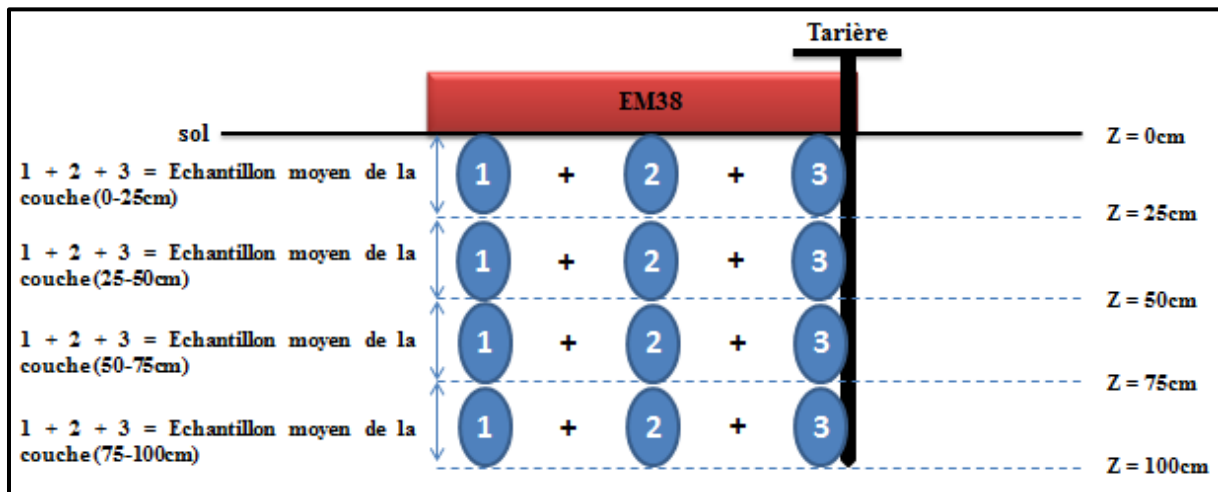


Figure 23. Méthode de prélèvement des échantillons de sol

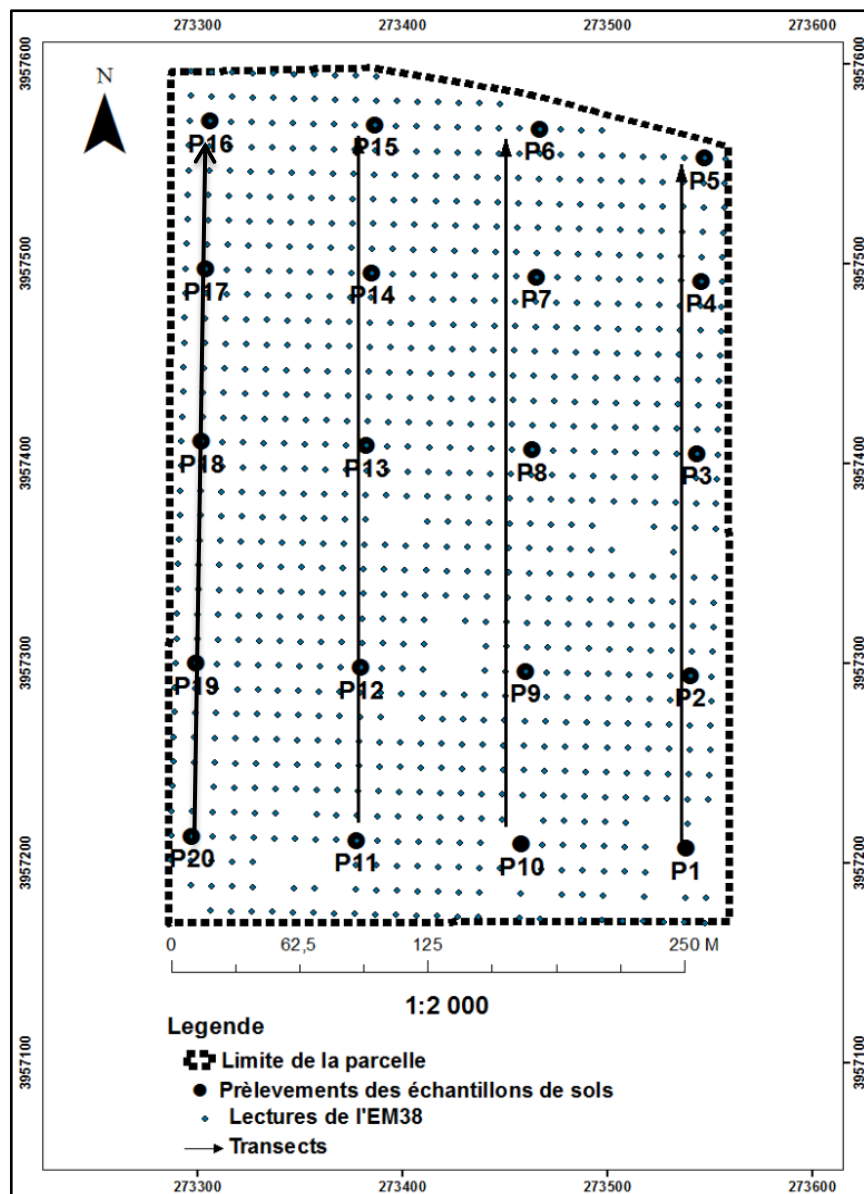


Figure 24. Plan d'échantillonnage

V.2.4. Etude des sols de la parcelle

L'étude des sols a été effectuée, le 16 Septembre de l'année 2012. Trois fosses pédologiques de 150 cm de profondeur ont été ouvertes, et leur description a été réalisée selon les paramètres suivants : l'épaisseur de l'horizon, la couleur, l'humidité, les propriétés mécaniques, les tâches, les revêtements, les cristaux, les nodules, les ciments, les fentes, les éléments grossiers, la texture, la structure, l'effervescence à l'HCl, la porosité, la salure, la matière organique, l'enracinement, les traces d'activités.

Pour chaque horizon, délimité, des échantillons de sol ont été prélevés, en commençant par les horizons sous-jacents, vers les horizons de surface, pour éviter de contaminer les échantillons issus des horizons de profondeur.

Les échantillons de sol prélevés ont été codés et mis dans sachets en plastique bien fermés, et envoyés pour les analyses de laboratoire à l'Institut National des Sols, Irrigation et Drainage (INSID) d'El Matmar (Relizane).

V.2.5. Analyses de laboratoire

Une fois les échantillons de sol séchés, broyés et passés sur des tamis à maille carrée de 2mm, nous avons procédé aux mesures de la granulométrie, du pH, de la CE, du calcaire, du gypse, du carbone, de la CEC, des cations échangeables et des sels solubles

1) Analyses physiques et chimiques du sol

Tout d'abord les échantillons de sol ont été séchés à l'étuve à 105°C, pendant une nuit. La différence entre le poids avant et après le séchage exprime la teneur en eau de l'échantillon initial ;

- L'analyse granulométrique a été réalisée par la méthode à la pipette de Robinson. Elle consiste tout d'abord à détruire la matière organique à l'eau oxygénée (H₂O₂) et à disperser l'argile par l'héxamétaphosphate de sodium. La texture du sol est ensuite déterminée, en séparant les fractions granulométriques: les limons grossiers (20 à 50 µm) et fins (2 à 20 µm) ; les argiles (0 à 2 µm), les sables fins (50 -200µm) et grossiers (200-2000µm).
- La mesure du pH a été effectuée par un pH-mètre, avec un rapport sol – eau est de 1/2.5. La valeur du pHeau (acidité effective) des échantillons de sols a été obtenue par la méthode électrométrique au pH-mètre avec une électrode en verre.
- La mesure de la conductivité électrique de l'extrait dilué au 1/5(CEd) exprimée en dS.m⁻¹, a été effectuée avec un conductimètre, avec un rapport sol-eau de 1/5;
- la mesure de la conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée (CE_{ps}) exprimée en dS/m ;
- Le dosage du calcaire total (en %) a été réalisé par le calcimètre Bernard ;
- Le carbone organique (en g.kg⁻¹) : dosage par la méthode Ane ;
- La matière organique : déterminé par dosage du carbone organique en appliquant la formule (M0% = C *1,72);

- Le gypse (en %) est dosé par la méthode de précipitation par le chlorure de baryum et calcination pendant 2h, au four à moufle;
- Le dosage des anions solubles à partir de l'extrait de la pâte saturée du sol :
 - ✓ Les chlorures sont dosés par titrimétrie au nitrate d'argent (AgNO_3 en meq.l^{-1}) en présence de chromate de potassium ;
 - ✓ Les carbonates (CO_3^{-2} en meq.l^{-1}) et les bicarbonates (HCO_3^- en meq.l^{-1}) sont dosés par titrimétrie avec du H_2SO_4 ;
 - ✓ Les sulfates (SO_4^{-2} en meq.l^{-1}) sont dosés par la méthode gravimétrique par précipitation sous forme de sulfate de Baryum (BaSO_4) ;
- Dosage des cations solubles à partir de l'extrait de la pâte saturée du sol ;
 - ✓ Le calcium Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ et K^+ (exprimés en $\text{meq}/100\text{g}$ de sol) sont dosés, par l'absorption anatomique ;
- La détermination des bases échangeables et la capacité d'échange par la méthode de Bower modifiée ;
 - ✓ L'extraction des cations échangeables (Ca^{++} , K^+ , Mg^{++}) par l'Acétate de sodium à pH 8.2 ;
 - ✓ Le déplacement du Na^+ par l'Acétate d'ammonium à pH 7 (après trois lavage à l'alcool afin d'éliminer l'excès de Na^+) ;
 - ✓ Le dosage, ensuite, du Na^+ issu de ce déplacement qui représente la valeur de la CEC (exprimée en $\text{meq}/100\text{g}$ de sol).

2) Mesure de la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée

Afin de suivre l'évolution de la salinité, les lectures de la CEM doivent être calibrées avec la conductivité électrique de l'extrait de pâte de saturation (CE_{ps}), estimée, au laboratoire par les méthodes habituelles (USSL, 1954). Cette méthode permet d'approcher la solution du sol d'une façon plus réaliste et de mieux évaluer les effets de la salinité sur la croissance des plantes (Richards, 1954, Rhoades *et al*, 1999; Khorsandi *et Yazdi*, 2011).

➤ Réalisation de l'extrait de pâte saturée

- Dans une capsule de porcelaine on pèse 200g de sol. Ensuite, à l'aide d'une éprouvette graduée remplie d'eau distillée, on humecte le sol et on le mélange à l'aide d'une spatule, on ajoutant avec précaution de l'eau jusqu'à l'obtention d'une pâte satisfaisant les conditions suivantes :
 - ✓ Elle doit couler lentement, lorsqu'on incline la capsule ;
 - ✓ Sa surface doit être brillante ;

- ✓ Elle doit se détacher librement de la spatule.
- On note le volume d'eau versé.
- On rassemble cette boue au fond de la capsule en ménageant un trou de 2 à 3 cm³. Après une heure, si de l'eau s'est rassemblée dans le creux, le point de saturation a été dépassé, il convient d'ajouter de la terre (on notant le poids) et de renouveler les trois tests précédents.
- On laisse reposer pendant 4 heures en couvrant d'un papier filtre humide ou d'un film plastique fin pour éviter l'évaporation.
- On procède ensuite à la centrifugation de la pâte saturée, pendant 10 minutes, à 3000 tours/minute, dans des supports de godets (de 250 à 500 ml) préalablement tapissé tapissés de film plastique pour éviter les pollutions.
- Après séparation par centrifugation, on récupère l'aliquote et on mesure, ensuite, la conductivité électrique à l'aide d'un conductivimètre de paillasse
- On procède, ensuite à une filtration de l'aliquote, sur papier filtre sans cendre, afin d'éliminer les es fragments de matière organique. La solution doit être parfaitement limpide.
- Les volumes récupérés sont généralement faibles mais les solutions sont concentrées. A cet effet, on effectue des dilutions (1/50ou 1/100) après avoir mesuré la conductivité électrique. Cette solution est destinée aux analyses du bilan ionique (cations et anions solubles).

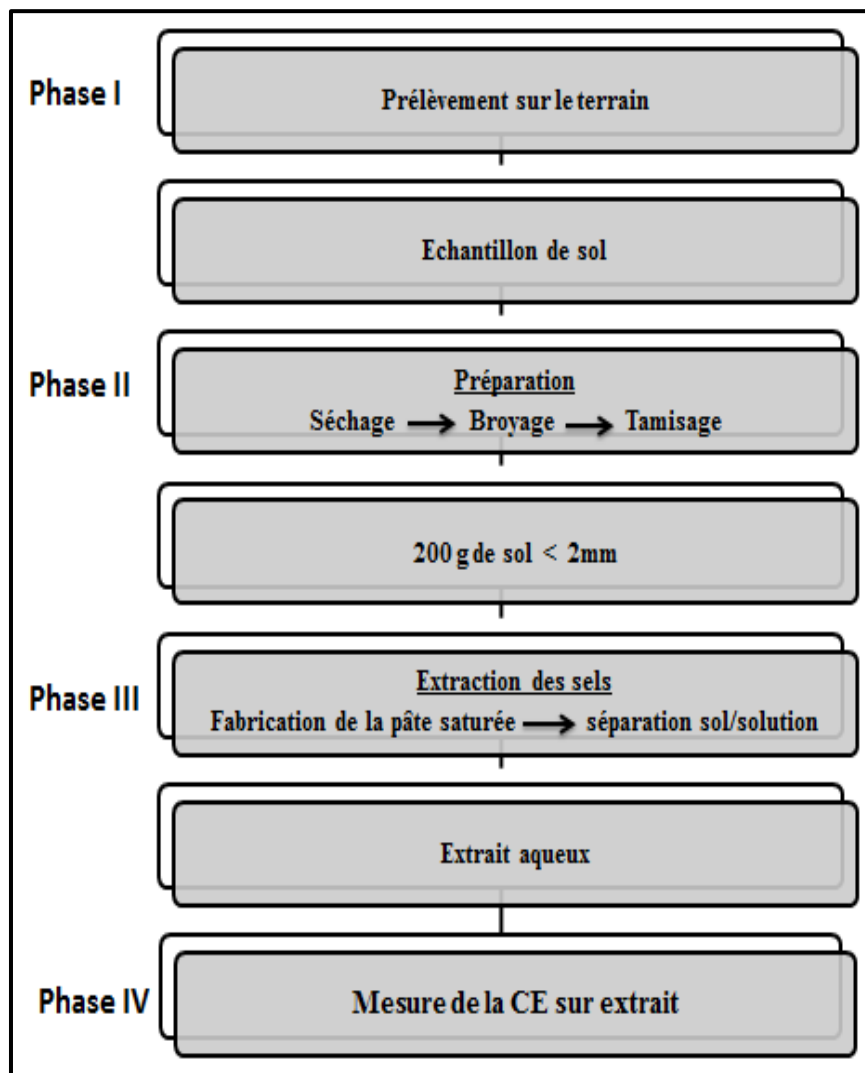


Figure 25. Schéma du protocole expérimental de la pâte saturée



Photos 3(a et b). Préparation de la pâte saturée



Photos 4 (c et d). Extraction des sels par Centrifugation et Filtration (Extrait saturé)



Photo 5. Mesure de la CE de l'extrait obtenu.

V.2.6. Etude de la variabilité spatiale de la salinité

Les statistiques descriptives ont été utilisées pour appuyer l'interprétation des variables en tenant compte de la corrélation et de la localisation des échantillons. Par la suite, nous avons utilisé les régressions linéaires qui ont servies à réaliser un étalonnage des mesures électromagnétiques et répondre ainsi à notre objectif.

1) Le coefficient de variation

En analyse statistique classique, le coefficient de variation est souvent utilisé pour décrire et étudier la variabilité des propriétés physico-chimiques des sols. Il ne rend toutefois pas compte de la nature de la loi de distribution dont la connaissance est essentielle pour traiter des données en termes de valeurs moyennes ou de probabilité d'avoir une valeur inférieure à une certaine limite (**Vauclin, 1982**). L'approche géostatistique fournit un outil moderne pour comprendre le modèle de variabilité spatiale des sols en analysant la dépendance spatiale ou temporelle des échantillons (**Trangmar et al, 1985**).

Lorsque l'on obtient un C.V. faible, il est inutile d'augmenter le nombre d'observations pour mieux définir la loi de distribution car l'erreur commise est faible. En revanche, pour un C.V. élevé, la détermination de la loi de distribution est impérative puisque que l'on ne peut a priori assimiler mode et moyenne (**Vauclin, 1982**).

Cinq classes, basées sur la valeur du CV, sont proposées par **Nolin et al (1997)** pour qualifier l'intensité de la variabilité des sols (**Tab.11**).

Tableau 11. Classes d'intensité du coefficient de variabilité (**Nolin et al, 1997**).

Intensité de la variabilité	Coefficient de variabilité (%)
Faible	<15
Modérée	15-35
Élevée	35-50
Très élevée	50-100
Extrêmement élevée	>100

2) Régression linéaire et corrélation

Si une relation suffisamment importante se confirme entre X et Y, on peut poursuivre l'analyse en effectuant une régression.

Une régression est l'estimation de l'équation de la relation existant entre les variables X et Y. Cette relation peut être linéaire ou non. Dans le cas du modèle linéaire l'équation de la régression est:

Modèle linéaire: $Y = a + bX$

Les paramètres a (ordonnée à l'origine) et b (pente) peuvent être déterminés selon deux méthodes, la méthode des moindres carrés, ou celle des moindres rectangles, qui seront choisies en fonction du type de relation existant entre X et Y.

Lors de l'établissement d'une équation de régression, le coefficient de détermination (R^2) détermine à quel point l'équation de régression est adaptée pour décrire la distribution des points.

Si le R^2 est nul, cela signifie que l'équation de la droite de régression détermine 0% de la distribution des points. Cela signifie que le modèle mathématique utilisé n'explique absolument pas la distribution des points.

Si le R^2 vaut 1, cela signifie que l'équation de la droite de régression est capable de déterminer 100% de la distribution des points. Cela signifie que le modèle mathématique utilisé, ainsi que les paramètres a et b calculés sont ceux qui déterminent la distribution des points.

Plus le coefficient de détermination se rapproche de 0, plus le nuage de points est diffus autour de la droite de régression. Au contraire, plus le R^2 tend vers 1, plus le nuage de points se rapproche de la droite de régression. Quand les points sont exactement alignés sur la droite de régression, $R^2 = 1$.

Donc: $0 \leq R^2 \leq 1$

Le R^2 est calculé selon la formule:

$$R^2 = \frac{\text{SCEy estimés par l'équation de régression}}{\text{SCEtotale}}$$

R^2 = variabilité expliquée par la régression / variabilité totale

Pour l'évaluation de l'adéquation entre les valeurs calculées par les équations de régressions et les valeurs mesurées de la conductivité électrique de la pâte saturée du sol (CEps), le critère d'erreur suivant est utilisé :

$$\text{Erreur (\%)} = \frac{[(\text{Valeur calculée} - \text{Valeur mesurée})^2]^{1/2}}{[(\text{Valeur mesurée})^2]^{1/2}}$$

3) Méthodes de prédiction spatiale ou Variographie

La géostatistique est un outil d'analyse de la structure de variation et d'organisation spatiale de l'information géographique. Elle regroupe un ensemble de techniques statistiques permettant aux pédologues et aux scientifiques du sol de mieux comprendre et de reproduire le modèle de la variabilité spatiale des sols (**Trangmar *et al*, 1985**). Ces techniques reposent sur l'analyse numérique de la dépendance des échantillons dans l'espace. Selon **Nolin (2000)**, plus les échantillons sont rapprochés dans l'espace, plus ils se ressemblent jusqu'à une certaine distance au-delà de laquelle ils deviennent indépendants les uns des autres.

Une méthode couramment utilisée pour étudier la dépendance spatiale des observations est d'analyser le semi-variogramme, un graphique qui présente la variation de la demi-variance $\gamma(h)$ en fonction de la distance (h) entre les échantillons.

a) Le semi-variogramme

Le semi-variogramme, fonction qui exprime la variation de la demi-variance est couramment utilisé pour analyser la dépendance des observations spatiales (**Nolin *et al*, 1997**). Elle est à la base de la technique d'interpolation par krigeage. La **figure.26** présente un modèle théorique de semi-variogramme où la semi-variance $\gamma(h)$ est fonction de l'intervalle d'échantillonnage (h) et dont l'équation est donnée par :

$$\gamma(h) = 1/2 \text{ var } (Z(x) - Z(x+h))$$

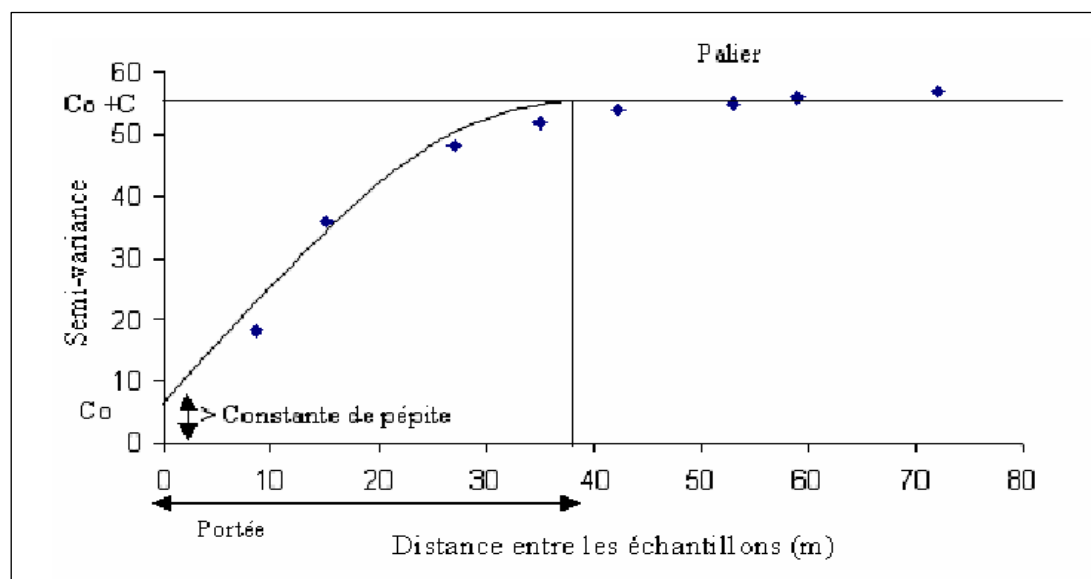


Figure 26. Semi-variogramme théorique (modèle sphérique) (**Quenum, 2009**).

Pour faire l'analyse spatiale d'une propriété, trois paramètres sont importants à considérer dans ce graphique. Ce sont la constante de pépite, le palier et la portée. La constante de pépite (Nugget) est la valeur de $\gamma(h)$ quand $h=0$. Elle représente la composante aléatoire de la variation et correspond à l'erreur d'échantillonnage et à la variabilité présente à une distance inférieure à l'intervalle d'échantillonnage (lag), donc non prise en considération par le dispositif d'échantillonnage. Le palier, si présent, est caractérisé par l'atteinte d'un plateau où $\gamma(h)$ devient constant avec l'évolution de h . Si les échantillons sont reliés les uns aux autres, le semi-variogramme prend une allure linéaire dans sa phase initiale pour ensuite atteindre le palier (Nolin *et al*, 1997). La valeur de h pour laquelle $\gamma(h)$ atteint le palier s'appelle la portée. Celle-ci s'avère très utile pour fixer l'intervalle optimal d'échantillonnage puisque les échantillons prélevés à une distance inférieure à la portée sont spatialement dépendants (Nolin *et al*, 1997). Le rapport $C0/(C0+C)$ où C (variance structurale) représente la composante systématique de la variabilité, s'avère également un indice intéressant pour analyser la structure spatiale d'une propriété ainsi que la stratégie d'échantillonnage utilisée. Plus la composante systématique est élevée relativement à la composante aléatoire (rapport $C0/(C0+C)$ faible), plus la structure d'organisation spatiale de la propriété est développée, élément essentiel pour obtenir des interpolations spatiales fiables. Par contre, lorsque la composante aléatoire ($C0$) est relativement élevée par rapport à la composante systématique (rapport $C0/(C0+C)$ élevé), il convient d'utiliser un intervalle d'échantillonnage plus rapproché afin de mieux intégrer la micro-variabilité ou d'améliorer la méthode de mesure afin de diminuer l'erreur expérimentale (Nolin *et al*, 1997).

b) L'interpolation par le krigeage

L'exploitation de la base de données par des analyses thématiques s'achève toujours par une représentation de la distribution spatiale des variables comme pour le cas de la salinité, afin de former une image pertinente de la dynamique spatiale et une signification subjective des observations.

La cartographie automatique a pour objectif de reconstituer la répartition spatiale sous forme d'une surface ou de quelques contours d'une variable mesurée à partir de points de coordonnées connues. Pour cela, on utilise généralement les méthodes d'interpolation telles que la cartographie par triangulation, l'interpolation polynomiale ou encore les méthodes des moindres carrées.

L'échantillonnage fournit des informations exactes sur le sol aux points d'où proviennent les données. Cependant, ceci ne dit pas ce qui se passe entre ces points. Il faut donc une méthode

précise pour estimer les valeurs aux points intermédiaires ou les moyennes sur un ensemble. Le krigeage est une méthode d'estimation qui tient compte d'un certain nombre de facteurs. Il fournit la moyenne pondérée des valeurs des échantillons qui conduit à l'erreur d'estimation de la variance minimale (**Armstrong et Carignan, 1997**). En d'autres termes, le krigeage associe une erreur d'estimation à chacune des cellules pour évaluer la précision et la fiabilité de la prédiction. La précision des estimations dépend d'un certain nombre de facteurs, soit :

- Le nombre d'échantillons et la qualité des données en chaque point;
- La position des échantillons sur le site étudié, car les échantillons régulièrement espacés offrent une meilleure couverture et donnent ainsi davantage d'informations sur le site que des échantillons regroupés;
- La distance entre les échantillons et le point dont on veut estimer la valeur;
- La continuité spatiale de la variable étudiée : il est plus facile d'estimer la valeur d'une variable assez régulière que celle d'une variable qui varie de façon aléatoire.

Parmi les différentes techniques de krigeage, la méthode du Krigeage ordinaire (KO) a été utilisée dans la présente étude, en raison de sa simplicité et de la précision de la prédiction par rapport aux autres méthodes de krigeage (**Isaaks and Srivastava, 1989**). Il consiste en une opération qui est répétée en chaque nœud X_0 d'une grille régulière recouvrant le domaine étudié.

Soit X_α , le nombre de point échantillonnés d'une propriété donnée. On considère estimer une valeur Z^* en un point X_0 . La nouvelle valeur Z^* est estimée par une moyenne pondérée de données $Z(X_\alpha)$:

$$Z^*(X_0) = \sum_n \gamma_\alpha Z(X_\alpha)$$

Les n pondérateurs γ_α sont calculés de façon à assurer que l'estimation $Z^*(X_0)$ soit sans biais et que la variance de l'erreur d'estimation soit minimale.

Dans cette étude, les modèles de semi-variogrammes ont été testés pour chaque horizon et les performances de prédiction de la salinité sont représentées dans des tableaux.

Pour qu'un modèle fournisse des prédictions précises, il faut que :

- la moyenne standardisée (EM) doit être proche de 0;
- la racine carrée de la moyenne de l'erreur standard (RMS) et l'erreur standard de la moyenne (ASE) doivent être aussi faibles que possibles;

- et la racine carrée de l'écart quadratique moyen (RMSE) doit être proche de 1 (**Johnston et al, 2001**).

Le module utilisé pour l'analyse géostatistique est Géostatistical Analyst du logiciel ARC-GIS 9.3.