

Chapitre VI

Résultats & Discussion

Chapitre VI. Résultats et discussions

VI.1. Etude des paramètres physiques et physico-chimiques du sol

Les résultats portent sur les paramètres physiques et physico-chimiques des 160 échantillons de sol prélevés, au cours de deux campagnes, sur quatre niveaux de profondeur

1) Analyse de l'humidité

Les **tableaux.12** et **13** montrent que l'humidité moyenne du sol est de 15 %, en Juin et 20.3%, en Novembre.

Les teneurs en eau de l'horizon de surface sont plus variables dans l'espace ($CV > 15 \%$) que celles des autres couches ($CV < 15 \%$). Cette variabilité spatiale est aussi remarquée, pendant la campagne Juin, au niveau de l'horizon de profondeur (75-100cm) avec un CV supérieur à 15%.

Tableau 12. Résultats de l'humidité du sol en (%) (Juin 2012)

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
Moyenne	9,0	16,1	17,5	17,5	15,0
C .V. %	32,1	13,9	11,9	20,0	12,3

Tableau 13. Résultats de l'humidité du sol en (%) (Novembre 2012)

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
Moyenne	23,0	23,1	21,0	20,4	20,3
C .V. %	20,0	12,3	13,9	13,7	11,3

2) Analyse de la texture

D'après les **Tableaux.14, 15 et 16**, nous remarquons que les fractions granulométriques prédominantes sont les fractions argileuses et limoneuses. Dans l'horizon de surface, les argiles et les limons ont pratiquement les mêmes taux avec des moyennes respectives de 46.5 et 48.8%. Dans l'horizon de sub-surface, la fraction argileuse prédomine avec un taux moyen de 55.4%. La fraction sableuse est peu représentée avec une moyenne qui varie entre 4.2 et 6.7%, dans tout le profil. Nous observons, au niveau des horizons profonds, une diminution de la fraction argileuse, avec une moyenne de 36.7 à 45.6% et une forte augmentation de la fraction limoneuse avec une moyenne de 50 à 56.6%.

Nous remarquons que le coefficient de variabilité pour l'argile est élevé ($41.2\% < CV < 44.7\%$) dans les horizons de profondeur et modéré dans les horizons de surface ($28.2\% < CV < 30.1\%$) (**Tab.14**). Pour les limons ce sont les couches (25-50cm et 50-75cm) qui présentent des coefficients de variabilité élevés ($35.2\% < CV < 37.5\%$) (Tab.), alors que pour les horizons de surface et de profondeur, la variabilité est modérée ($23.1 < CV < 23.8\%$) (**Tab.15**). Pour le sable, les coefficients de variabilité sont élevés dans tous les horizons ($81.6\% < CV < 108.4\%$) (**Tab.16**).

Tableau 14. Résultats de l'Argile (en %)

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
Moyenne	46,5	55,4	45,7	36,7	46,1
C .V. %	28,2	30,1	44,7	41,2	29,6

Tableau 15. Résultats des Limons (en %)

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
Moyenne	48,8	40,4	50,2	56,6	49,0
C .V. %	23,1	37,5	35,2	23,5	23,8

Tableau 16. Résultats des Sables (en %)

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
Moyenne	4,8	4,2	4,2	6,7	4,4
C .V. %	81,6	97,9	108,4	106,7	85,4

3) Analyses de la matière organique (M.O)

Les **tableaux 17** et **18** montrent que le taux de matière organique diminue avec la profondeur, la moyenne varie entre 0.57%, en profondeur à 1.82 % dans l'horizon de surface. Le coefficient de variabilité est élevé dans l'horizon (50-75cm) ($CV > 35\%$), en Juin, et modéré dans le reste du profil ($CV < 35\%$). Par contre, en Novembre, le coefficient de variabilité est élevé dans tous les horizons ($CV > 35\%$), sauf pour l'horizon de surface ($CV < 35\%$).

Tableau 17. Résultats de la matière organique (Juin 2012)

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
Moyenne	1,82	1,28	0,68	0,57	1,09
C .V. %	17,55	26,93	32,60	40,73	17,55

Tableau 18. Résultats de la matière organique (Novembre 2012)

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
Moyenne	1,8	1,3	0,7	0,6	1,1
C .V. %	30,9	36,6	38,6	62,7	42,2

4) Analyses du potentiel Hydrogène (pH)

Les **tableaux 19** et **20** indiquent que le pH est supérieur à 8 avec une moyenne de 8.26 à 8.52 et un coefficient de variation faible ($CV < 15\%$). Ces valeurs correspondent à une réaction du sol relativement alcaline, caractéristique principale des sols calcaires et des sols salés.

Tableau 19. Résultats du pH (Juin 2012)

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
Moyenne	8,26	8,40	8,51	8,52	8,42
C .V. %	1,12	1,03	2,43	2,47	1,13

Tableau 20. Résultats du pH (Novembre 2012)

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
Moyenne	8,27	8,42	8,51	8,50	8,42
C .V. %	1,36	1,80	2,77	3,16	2,27

5) Analyses statistiques du calcaire (CaCO₃)

Les **tableaux 21** et **22** montrent que les teneurs en calcaire sont homogènes au niveau du profil, la moyenne varie de 14.3 à 17.5 %, avec un faible coefficient de variabilité ($CV < 15\%$).

Tableau 21. Résultats du calcaire (CaCO₃ en %)(Juin 2012)

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
Moyenne	15,3	16,2	17,0	17,5	16,5
C .V. %	10,5	11,1	7,3	6,8	5,9

Tableau 22. Résultats du calcaire (CaCO₃ en %)(Novembre)

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
Moyenne	14,3	14,5	15,1	15,0	14,7
C .V. %	7,1	7,6	7,8	6,0	4,0

VI.2. Caractérisation de la salinité des sols

Les résultats portent sur la conductivité électrique (extrait de la pâte saturée et extrait dilué) des 160 échantillons de sol prélevés, au cours de deux campagnes, sur quatre niveaux de profondeur.

1) Conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée (CE_{ps})

Les valeurs moyennes de la CE_{ps} passent de 7.1 dS.m^{-1} dans l'horizon de surface et augmentent progressivement vers la profondeur pour atteindre une valeur de 25 dS.m^{-1} , en Juin. En Novembre, la salinité affiche une légère augmentation de la surface vers la profondeur. Les valeurs de la CE_{ps} passent de 8.4 dS.m^{-1} , (horizon de surface) à 27.6 dS.m^{-1} (horizon de profondeur).

La salinité moyenne de la couche (0-100cm) révèle que le profil salin moyen est de type descendant (**Fig.27**), elle se situe entre 7.1 dS.m^{-1} en surface et 27.6 dS.m^{-1} en profondeur, avec une moyenne de 18.4 dS.m^{-1} , en Juin (**tab.23**) et 21.2 dS.m^{-1} , en Novembre (**tab.24**).

Les valeurs du coefficient de variation de la CE_{ps} sont supérieures à 35 %, au niveau des horizons (0-25cm ; 50-75cm ; 75-100cm), pour les deux campagnes de mesures. Ces valeurs expriment une forte variabilité de la salinité en surface et en profondeur. Cette variabilité est cependant modérée dans l'horizon (25-50cm) qui enregistrent un coefficient de variation de l'ordre de 31 % (Juin) et 31.3%, (Novembre). La couche (0-100cm) présente un coefficient de variabilité modéré de 34.4% et 34.1%.

Tableau 23. Les résultats de la CE_{ps} en dS/m (Juin 2012)

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
Moyenne	7,1	17,7	23,6	25,0	18,4
C .V. %	57,4	31,0	35,1	41,5	34,4

Tableau 24. Les résultats de la CE_{ps} en dS/m (Novembre 2012)

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
Moyenne	8,4	21,9	25,7	27,6	21,2
C .V. %	43,9	31,3	36,5	37,1	34,1

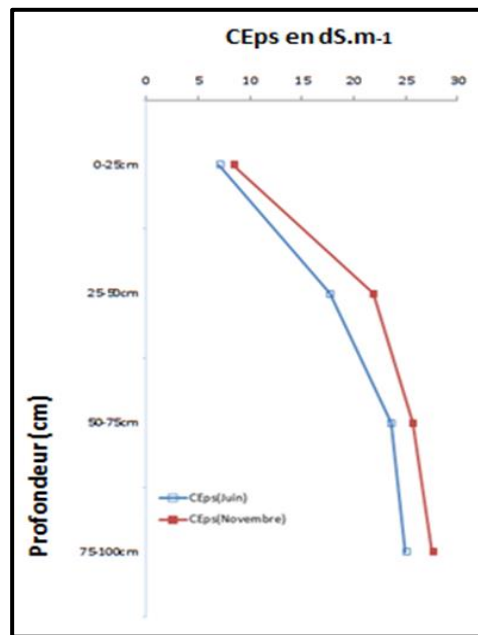


Figure 27. Profils salins moyens des échantillons prélevés (CE_{ps} en $dS.m^{-1}$)

2) Conductivité électrique de l'extrait dilué ($CE_{d1/5}$)

Les valeurs moyennes de la CE_d passent de $1.7 dS.m^{-1}$ dans l'horizon de surface et augmentent progressivement vers la profondeur pour atteindre une valeur de $4.4 dS.m^{-1}$, en Juin. En Novembre, les valeurs de la CE_d passent de $1.6 dS.m^{-1}$, (horizon de surface) à $4.3 dS.m^{-1}$ (horizon de profondeur).

Les résultats des **tableaux.25** et **26** révèlent que la conductivité électrique de l'extrait dilué ($CE_{d1/5}$), pour l'ensemble des horizons se situe entre 0.2 et $7.4 dS.m^{-1}$.

Les valeurs du coefficient de variation de la $CE_{d1/5}$ sont supérieures à 35 %, pour l'horizon (0-25cm) de la campagne Juin et les horizons (0-25cm et 25-50cm) de la campagne Novembre. Elles expriment une forte variabilité de la salinité dans ces couches. Cette variabilité est, cependant, modérée, au niveau des horizons (25-50cm, 50-75cm et 75-100cm), en Juin, qui enregistre des coefficients de variation, respectivement, de l'ordre de 33.4 %, 28.2% et 34.7%. En Novembre, les horizons (25-50cm et 50-75cm) enregistrent des coefficients de variation, respectivement, de l'ordre de 27.2 % et 29.1%.

Pour la campagne Juin, la $CE_{d1/5}$ moyenne de la couche (0-100cm) se situe entre $1.6 dS.m^{-1}$, en surface, et $4.7 dS.m^{-1}$, en profondeur.

La valeur moyenne de la $CE_{d1/5}$ du profil est de $3.6 dS.m^{-1}$, en Juin et $3.7 dS.m^{-1}$, en Novembre.

Tableau 25. Résultats statistiques de la $CE_{d_{1/5}}$ en $dS.m^{-1}$. (Juin 2012)

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
Moyenne	1,7	3,7	4,6	4,4	3,6
C .V. %	59,6	33,4	28,2	34,7	32,6

Tableau 26. Les résultats statistiques de la $CE_{d_{1/5}}$ $dS.m^{-1}$. (Novembre 2012)

Paramètres	Profondeur (cm)				
	0- 25 cm	25- 50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-100 cm
Moyenne	1,6	4,1	4,7	4,3	3,7
C .V. %	57,0	27,2	29,1	35,3	28,2

L'analyse corrélative entre les valeurs de la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée (CE_{ps}) et celles de l'extrait dilué ($CE_{d_{1/5}}$), montre une bonne corrélation ($r^2 > 0.8$) qui est statistiquement hautement significative (Fig.28 et 29).

La relation entre les deux conductivités peut s'écrire de cette façon :

$$CE_{ps} (dS.m^{-1}) = 4.88 * CE_{d_{1/5}} + 0.8 \quad (r^2=0.81) \quad (\text{Juin 2012})$$

$$CE_{ps} (dS.m^{-1}) = 5.52 * CE_{d_{1/5}} + 0.63 \quad (r^2= 0.83) \quad (\text{Novembre 2012})$$

Avec :

CE_{ps} : conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée en $dS.m^{-1}$ à $25^\circ C$;

$CE_{d_{1/5}}$: conductivité électrique de l'extrait dilué 1/5 en $dS.m^{-1}$ à $25^\circ C$.

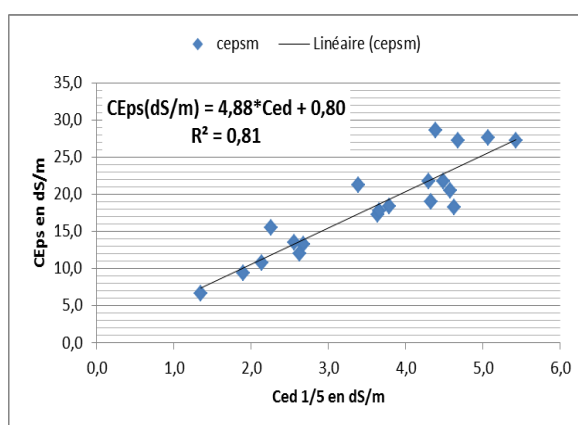


Figure 28. Corrélation entre $CE_{d_{1/5}}$ et CE_{ps} (Juin 2012)

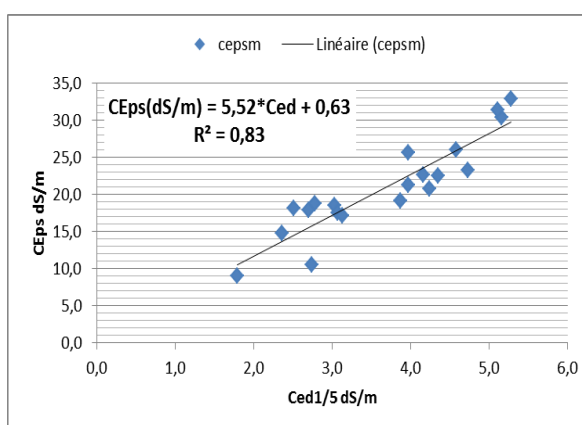


Figure 29. Corrélation entre $CE_{d_{1/5}}$ et CE_{ps} (Novembre 2012)

3) Distribution de la salinité selon les transects Sud-Nord (Fig.30 à 37)**a) Distribution de la salinité de l'horizon de surface (0-25cm)**

Les valeurs minimales de la CE_{ps} de l'horizon de surface (0-25cm) sont observées dans la partie sud de la parcelle, avant le drain tertiaire, situé au centre, elles sont de l'ordre de 1.1 à 10.3 $dS.m^{-1}$, en Juin et de 2 à 8.7 $dS.m^{-1}$, en Novembre. Par contre les valeurs maximales, situées au nord de la parcelle, varient de 5.1 à 17 $dS.m^{-1}$, en Juin et de 7.5 à 12.4 $dS.m^{-1}$, en Novembre.

b) Distribution de la salinité de l'horizon de sub-surface (25-50cm)

Pour l'horizon de sub-surface (25-50cm), les valeurs minimales de la CE_{ps} sont de 7.1 à 20.4 $dS.m^{-1}$, dans le sud de la parcelle, en Juin et de 10.7 à 21.9 $dS.m^{-1}$, en Novembre. Par contre les valeurs maximales, situées, dans le nord de la parcelle, varient de 13.7 à 29 $dS.m^{-1}$, en Juin, et de 18.4 à 31 $dS.m^{-1}$, en Novembre.

c) Distribution de la salinité de l'horizon (50-75cm)

Pour l'horizon (50-75cm), les valeurs minimales de la CE_{ps} sont de 9 à 21.5 $dS.m^{-1}$, dans le sud de la parcelle, en Juin, et de 12.2 à 22.7 $dS.m^{-1}$, en Novembre. Les valeurs maximales sont de 22.3 à 41.7 $dS.m^{-1}$, dans le nord de la parcelle, en Juin et de 21 à 41 $dS.m^{-1}$, en Novembre.

d) Distribution de la salinité de l'horizon de profondeur (75-100cm)

Pour l'horizon de profondeur (75-100cm), les valeurs minimales de la CE_{ps} sont de 8.9 à 20.4 $dS.m^{-1}$, dans le sud de la parcelle, en Mai, et de 10.2 à 27.8 $dS.m^{-1}$, en Novembre. Les valeurs maximales sont de 24.4 à 46 $dS.m^{-1}$, dans le nord, en Juin, et de 24.7 à 46.3 $dS.m^{-1}$, en Novembre.

A cet effet, nous pouvons conclure, que la salinité des quatre horizons augmente du sud vers le nord de la parcelle.

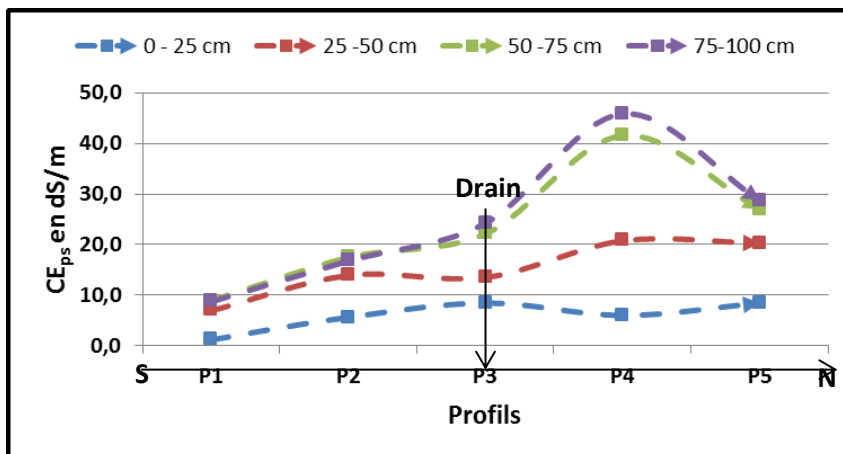


Figure 30. Distribution de la CE_{ps} selon le transect 1. Sud-Nord (Juin 2012)

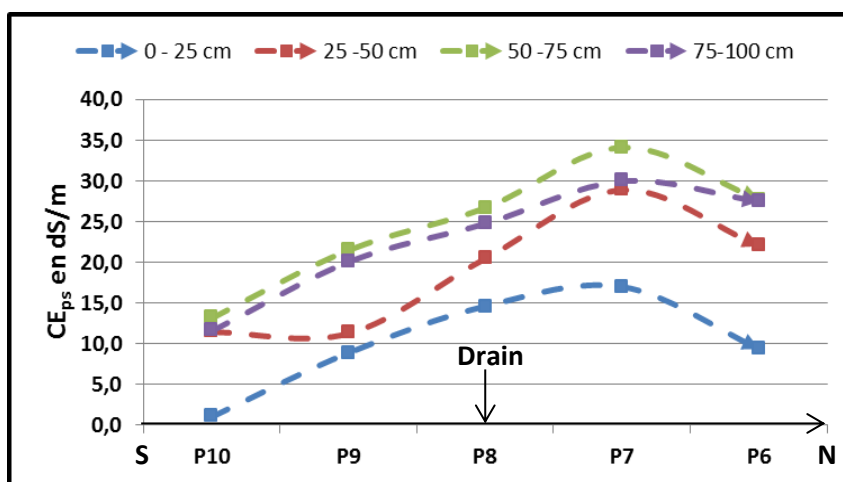


Figure 31. Distribution de la CE_{ps} selon le transect 2. Sud-Nord (Juin 2012)

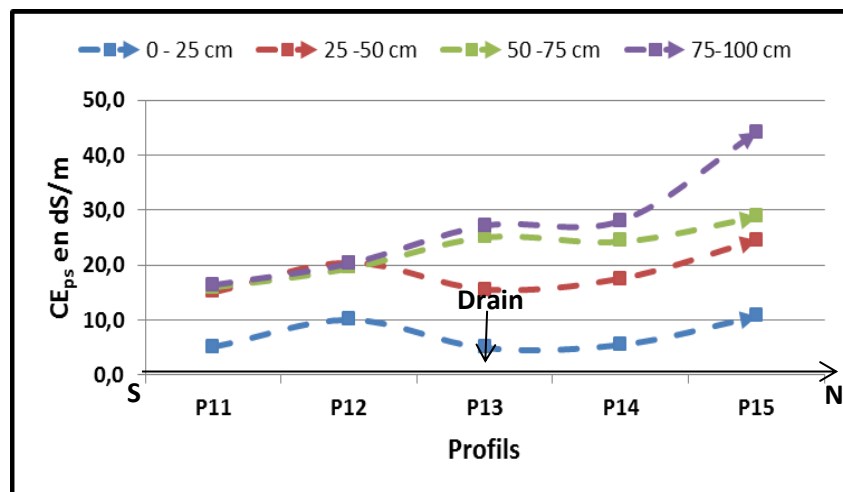


Figure 32. Distribution de la CE_{ps} selon le transect 3. Sud-Nord (Juin 2012)

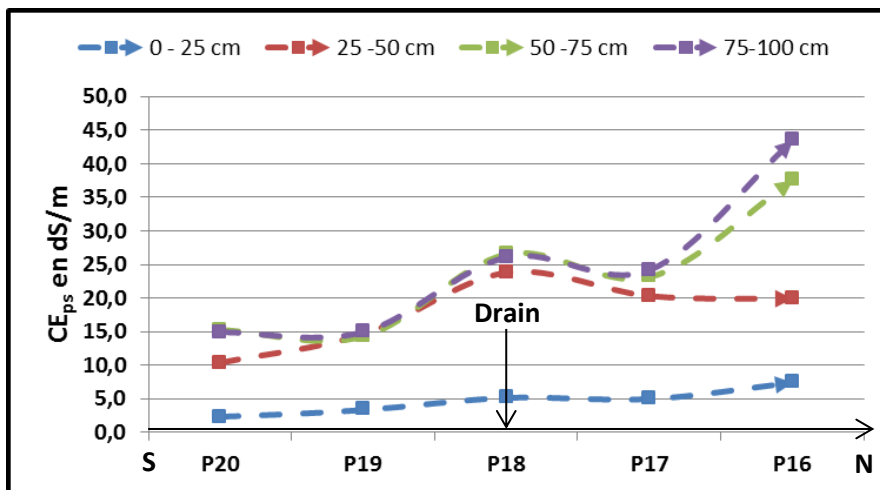


Figure 33. Distribution de la CE_{ps} selon le transect 4. Sud-Nord (Juin 2012)

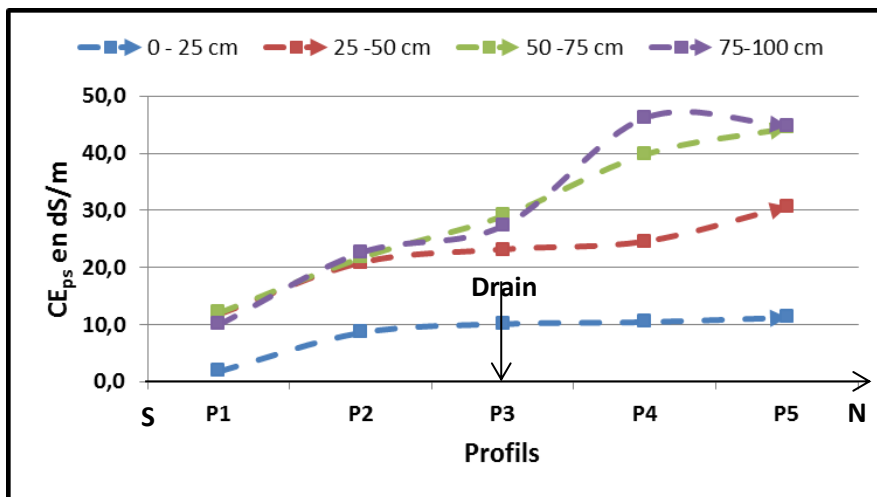


Figure 34. Distribution de la CE_{ps} selon le transect 1. Sud-Nord (Novembre 2012)

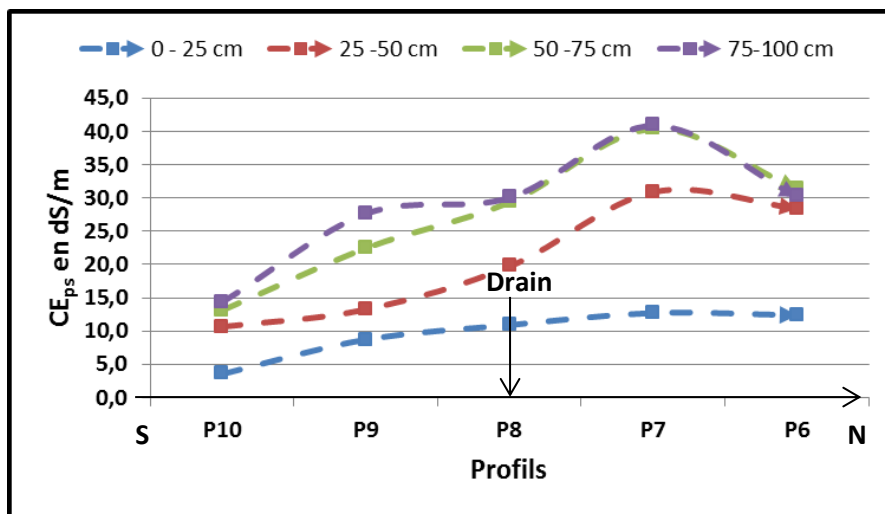


Figure 35. Distribution de la CE_{ps} selon le transect 2. Sud-Nord (Novembre 2012)

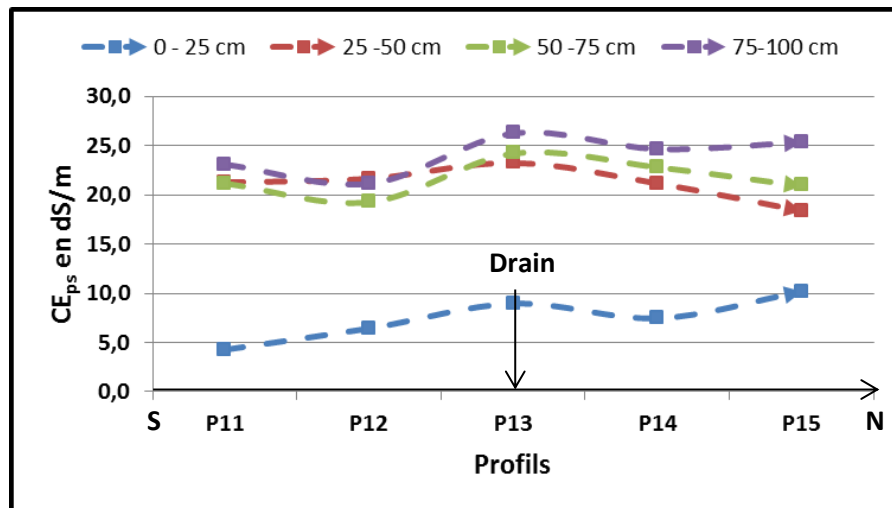


Figure 36. Distribution de la CE_{ps} selon le transect 3. Sud-Nord (Novembre 2012)

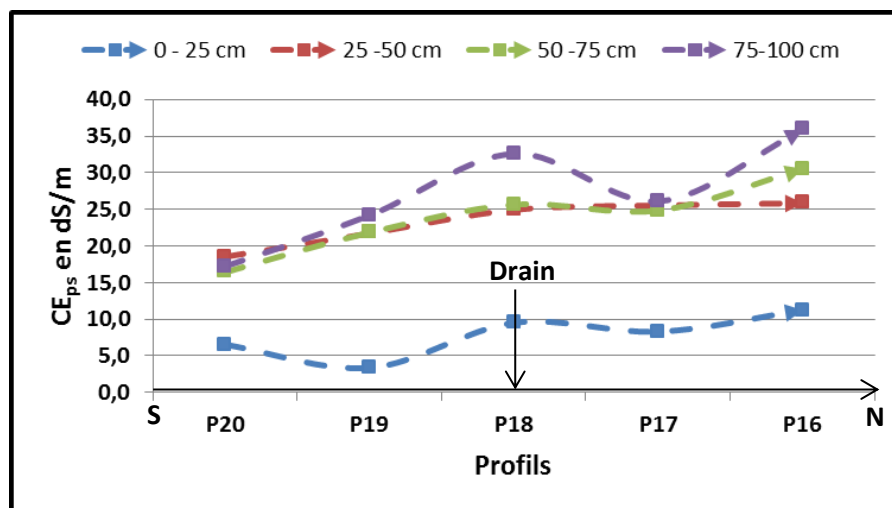


Figure 37. Distribution de la CE_{ps} selon le transect 4. Sud-Nord (Novembre 2012)

4) Distribution verticale de la salinité

a) Profils de types convexes

Les figures 38 et 39 montrent une grande variabilité verticale (intra-profil) et spatiale (inter-profil) de la salinité du sol. En effet, nous distinguons deux types de profils salins présentant deux allures différentes :

- Les profils (2, 7, 8, 9, 10, 12, 18 et 20) de la campagne Juin sont de type convexe avec un maximum de salinité dans l'horizon médian (50-75cm). Ce type de profil, caractérisé par un maximum de salinité, dans les horizons peu à moyennement profonds, serait le résultat d'une salinisation due aux pluies d'hivers (Servant, 1976) ;

- Les profils (1, 3, 6, 12, 20) de la campagne Novembre, sont de type convexe avec un maximum de salinité dans l'horizon médian (50-75cm). Ce type de profil serait le résultat d'une remontée capillaire des sels, pendant la période sèche.

b) Profils de types descendants

Les profils de types descendants de la campagne Juin, sont caractérisés par des maximums de salinité dans les horizons profonds (50-75 et 75-100 cm). Ce type de profil serait le résultat d'une lixiviation des sels par les pluies hivernales.

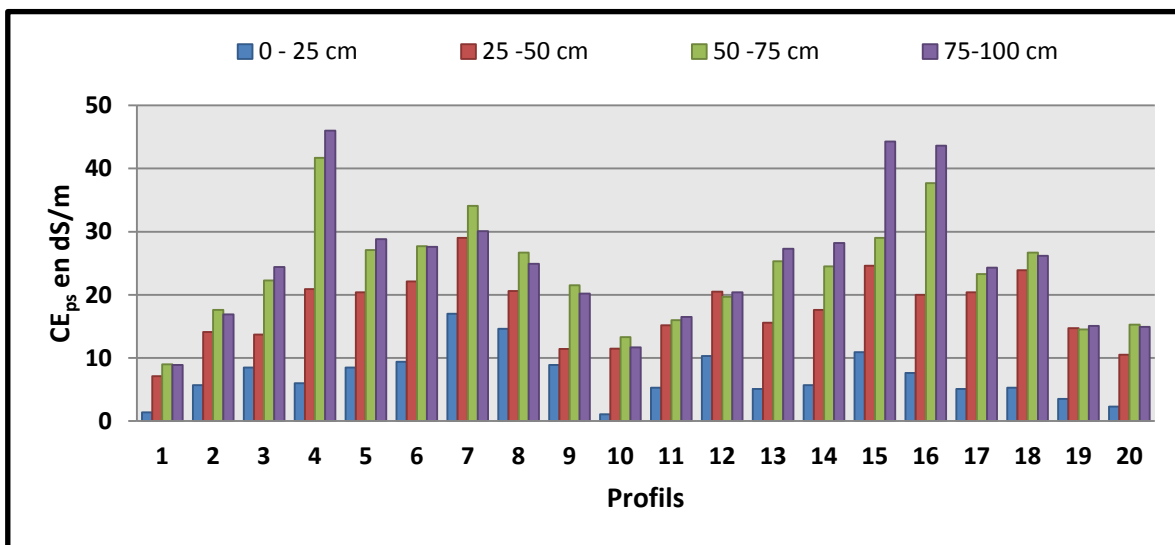


Figure 38. Evolution de la CE_{ps} (dS/m) par profils (Juin 2012)

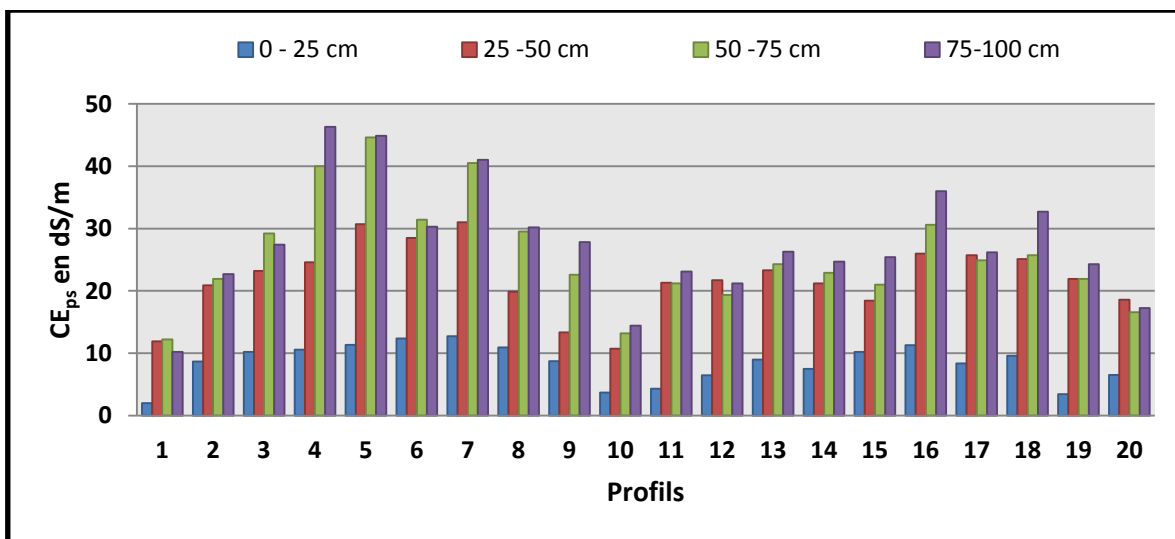


Figure 39. Evolution de la CE_{ps} (dS/m) par profils (Novembre 2012)

VI.3. Etude de la salinité par induction électromagnétique (EM38)

Les mesures obtenues par induction électromagnétique ont été étalonnées par rapport aux mesures de la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée. Ceci nous permettra d'obtenir une caractérisation de la conductivité électrique calculée (CE_{psc}) de la parcelle d'étude.

VI.3.1. Les lectures électromagnétiques de l'EM38

Le rapport entre les mesures électromagnétiques en mode horizontal et en mode vertical [CEM_H / CEM_V] permet la distinction entre les différents profils salins et de caractériser l'évolution de la salinité en profondeur (**Tab.27**) :

- Lorsque $CEM_H > CEM_V$ on se trouve au-dessus d'un profil salin décroissant avec la profondeur, situation indiquant une concentration des sels en surface ;
- Dans le cas contraire, lorsque $CEM_H < CEM_V$, il s'agit d'un profil salin croissant en profondeur, où les sels se sont accumulés.

La comparaison entre les lectures de l' CEM_H et celles de l' CEM_V est une première possibilité d'interprétation des résultats. Les résultats du rapport entre les lectures horizontales et les lectures verticales [CEM_H / CEM_V] pour les deux campagnes de mesure est inférieur à 1.05 (**Tab.28**). Ces deux valeurs indiquent une forte concentration de la salinité en profondeur (profil lessivé ou profil salin descendant).

Tableau 27. Distinction des différents profils salins

Type de profil	$CEM_{(H)} / CEM_{(V)}$	Auteurs
Profil inversé	$CEM_H / CEM_V > 1.05$	Corwin et Rhoades (1989 & 1990)
Profil lessivé	$CEM_H / CEM_V \leq 1.05$	
Profil inversé	$CEM_H / CEM_V > 1.05$	Norman (1990b, Heath et al. 1999)
Profil uniforme	$1 \leq CEM_H / CEM_V \leq 1.05$	
Profil lessivé	$CEM_H / CEM_V \leq 1$	Heath et al. $0.5 \leq CEM_H / CEM_V \leq 1$

Tableau 28. Types de profils de salinité obtenus, pour les deux campagnes de mesure

Type de profil	$CEM_{(H)} / CEM_{(V)}$	Campagne de mesure
Profil lessivé	$CEM_H / CEM_V = 0.74 (\leq 1.05)$	Juin 2012
Profil lessivé	$CEM_H / CEM_V = 0.77 (\leq 1.05)$	Novembre 2012

VI.3.2. Relation entre la CEM et les propriétés du sol

Les coefficients de corrélation entre les lectures verticales et horizontales de l'EM38 et les propriétés physiques et physico-chimiques du sol sont présentés dans le **tableau 29**.

La corrélation entre la CEM_V et la CEM_H est très élevée (coefficient de corrélation $r > 0.90$). Les résultats ont montré une corrélation positive de la CEM avec les propriétés du sol, à l'exception de la teneur en argile, limon, sable et le calcaire.

La corrélation la plus importantes a été trouvée entre la CEM et la CE_{ps} ($0.865 < r < 0.918$), suivie par la $Ced_{1/5}$ ($0.78 < r < 0.89$) et le pH ($0.50 < r < 0.81$). De nombreuses études ont montré qu'une forte relation existe entre la teneur en eau du sol et la teneur en argile et la CEM (**Draps et Hendrickx, 1995; Nehmdahl et Greve, 2001; Bronson et al, 2005**).

Pour la matière organique, la corrélation avec la CEM est significative ($-0.52 < r < -0.667$). Dans cette étude, nous avons trouvé une relation positive entre la CEM et la teneur en eau (campagne Juin 2012), cependant, la relation est négative avec la teneur en argile ($-0.038 < r < -0.355$). Dans leur étude (**Nolin et al, 2002**) ont aussi rapporté des corrélations significatives entre la CE, la texture du sol et la matière organique.

Les corrélations entre la CEM et la teneur en limon est négative ($0.114 < r < 0.357$), bien que certains chercheurs ont trouvé une corrélation positive entre eux (**Carrol et Oliver, 2005**). Il n'y a pas de corrélation entre la teneur en sable avec la CEM ($-0.11 < r < 0.259$) et entre la teneur en argile avec la CEM ($-0.147 < r < -0.258$).

Ainsi, on peut constater que de nombreux chercheurs ont trouvé des corrélations utiles entre les lectures de l'EM38 et un certain nombre de propriétés agronomiques importantes du sol. Cependant, en raison de l'interaction de divers facteurs, toute corrélation trouvée est spécifique au site étudié (**Kati, 2005**).

Tableau 29. Relation entre la CEM et les propriétés du sol des deux campagnes de mesures

Variables	Campagne Juin 2012		Campagne Novembre 2012	
	CEM _H	CEM _V	CEM _H	CEM _V
CEM _H mS.m ⁻¹	1,000	0,944	1,000	0,981
CEM _V mS.m ⁻¹	0,944	1,000	0,981	1,000
CE _{ps} dS.m ⁻¹	0,918	0,869	0,865	0,889
Ced _(1/5) dS.m ⁻¹	0,892	0,896	0,783	0,816
Humidité %	0,722	0,820	0,404	0,419
M.O %	-0,677	-0,578	-0,529	-0,521
pH	0,595	0,502	0,813	0,791
Argile %	-0,173	-0,147	-0,258	-0,224
Limon %	0,170	0,168	0,287	0,272
Sable %	0,124	0,073	0,137	0,087
CaCO ₃ %	0,071	0,042	-0,150	-0,238

En gras, valeurs significatives au seuil alpha=0,050 (test bilatéral).

VI.3.3. Estimation de la CE_{ps} à partir des mesures électromagnétiques

L'approche de la régression multiple a été utilisée dans cette étude pour l'étalonnage des mesures électromagnétiques par rapport aux conductivités électriques des extraits de pâtes saturées de sol. Le coefficient de corrélation (r) est utilisé dans chaque groupe d'analyse pour comparer les ajustements effectués avec les différents modèles. Ces coefficients des modèles obtenus sont présentés dans les tableaux.

VI.3.4. Estimation de la CE_{ps} des différents horizons du sol

Ce type d'étalonnage se base sur l'utilisation des régressions multiples (**Rhoades et Corwin, 1981**) qui consiste à relier toutes les mesures électromagnétiques verticales ou horizontales de l'EM-38, obtenues à différentes hauteurs, aux conductivités électriques de l'extrait de pâte saturée des quatre horizons du sol (0-25cm ; 25cm-50cm ; 50cm-75cm ; 75cm-100cm).

$$CE_{(x-z)} = \pm c \pm \alpha_0 CEM_V \pm \alpha_1 CEM_{V1} \pm \alpha_2 CEM_{V2} \pm \alpha_3 CEM_{V3} \pm \alpha_4 CEM_{V4}$$

Où:

- CE_(x-z) : Conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée(CEps), exprimée en dS.m⁻¹ à 25°C, mesurée au laboratoire, pour une couche de sol(x-z) ;
- CEM_V, CEM_{V1}, CEM_{V2}, CEM_{V3}, CEM_{V4} : lectures horizontales ou verticales de la conductivité électromagnétique, exprimées en mS.m⁻¹, obtenues par l'EM38, aux hauteurs respectives, par rapport au sol (0 cm ; 50 cm ; 75 cm ; 100 cm et 125 cm) ;
- α₀, α₁, α₂, α₃, α₄ : constantes ;
- c : constante.

La table de **Bravais Pearson (Tab.14. Annexe.10)** indique que le r calculé, pour toutes les équations, dépasse la valeur de la table, d'où la relation est significative avec un risque d'erreur ($\alpha = 0.05$). Les résultats ont révélé une étroite relation entre les valeurs de la CE_{ps} calculées et les valeurs de la CE_{ps} mesurées au laboratoire, pour les différents horizons des deux campagnes de mesure (**Tab.33 et 35**).

Les **tableaux.30 et 31** montrent que le coefficient de corrélation varie entre 0,83 et 0,94, avec une erreur d'estimation de 2.08 à 6.11 $dS.m^{-1}$, d'où la relation est significative avec un risque d'erreur ($\alpha = 0.05$). Cette relation est plus forte au niveau des couches inférieures (à 25-50, 50-75cm et 75-100cm), où les valeurs de r varient entre 0,86 et 0,94, par rapport à l'horizon de surface (0-25cm), où les valeurs de r varient de 0,83 à 0,86. Des résultats similaires ont été trouvés par **Sharma et Gupta (2000)** avec des coefficients de corrélation variant entre 0,79 et 0,89 pour différentes profondeurs.

Tableau 30. Equations de régressions multiples obtenues pour le calcul de la CE_{ps} des différents horizons du sol à partir des mesures des conductivités électromagnétiques verticales (CEM_V), obtenues à différentes hauteurs, par l'EM38 (Campagne de mesure Juin 2012).

Profondeur (cm)	Equations de régressions (Juin 2012)	n	r	Erreur (dS/m)
0-25cm	$CE_{psc_1} = -4.02 + 0.065 * CEM_V - 0.19 * CEM_{V1} - 0.05 * CEM_{V2} - 0.34 * CEM_{V3} + 0.8 * CEM_{V4}$	20	0.86	2.45
25-50cm	$CE_{psc_2} = 4.47 - 0.024 * CEM_V + 0.067 * CEM_{V1} + 0.1 * CEM_{V2} - 0.15 * CEM_{V3} + 0.11 * CEM_{V4}$	20	0.87	3.09
50-75cm	$CE_{psc_3} = 7.29 + 0.067 * CEM_V - 0.24 * CEM_{V1} + 0.27 * CEM_{V2} + 0.35 * CEM_{V3} - 0.47 * CEM_{V4}$	20	0.94	3.16
75-100cm	$CE_{psc_4} = 5.97 + 0.045 * CEM_V - 0.24 * CEM_{V1} + 0.186 * CEM_{V2} + 0.55 * CEM_{V3} - 0.46 * CEM_{V4}$	20	0.86	6.11

Tableau 31. Equations de régressions multiples obtenues pour le calcul de la CE_{ps} des différents horizons du sol à partir des mesures des conductivités électromagnétiques verticales (CEM_V), obtenues à différentes hauteurs, par l'EM38 (Campagne de mesure Novembre 2012).

Profondeur (cm)	Equations de régressions (Novembre 2012)	n	r	Erreur (dS/m)
0-25cm	$CE_{psc_1} = 2.85 + 0.04*CEM_V + 0.04*CEM_{V1} - 0.19*CEM_{V2} + 0.08*CEM_{V3} + 0.05*CEM_{V4}$	20	0.83	2.08
25-50cm	$CE_{psc_2} = 15.48 - 0.05*CEM_V + 0.62*CEM_{V1} - 1,04*CEM_{V2} + 1.11*CEM_{V3} - 0.71*CEM_{V4}$	20	0.87	3.08
50-75cm	$CE_{psc_3} = 8.34 + 0.03*CEM_V + 0.23*CEM_{V1} + 0.52*CEM_{V2} - 0.02*CEM_{V3} - 1.32*CEM_{V4}$	20	0.87	4.88
75-100cm	$CE_{psc_4} = 7.6 + 0.1*CEM_V + 0.02*CEM_{V1} + 0.2*CEM_{V2} - 0.17*CEM_{V3} - 0.36*CEM_{V4}$	20	0.88	5

VI.3.5. Analyse statistique des valeurs mesurées et calculées de la CE_{ps}

Les **tableaux 33** et **35** montrent la comparaison entre les paramètres statistiques des valeurs mesurées et calculées de la CE_{ps} , des différents horizons, pour les deux campagnes de mesures.

1) Analyse statistique des valeurs de la CE_{ps} de l'horizon de surface (0-25cm)

Les résultats de la campagne Juin montrent que les moyennes de la CE_{ps} mesurée et celles calculées sont identiques, avec une différence de 14% entre les valeurs de l'écart type. La différence entre la valeur maximale est de 17%, et la différence entre la valeur minimale est de 31%.

Pour la campagne de Novembre, les différences sont de 0,1% dans la moyenne et 12% de l'écart type. La différence entre la valeur maximale est de 7%, et la différence entre la valeur minimale est de 29%.

2) Analyse statistique des valeurs de la CE_{ps} de l'horizon de sub-surface (25-50cm)

Les résultats de la campagne Juin montrent des différences de 0,1% dans la moyenne et 13% dans l'écart type sont observées. La différence entre la valeur maximale est de 12%, et la différence entre la valeur minimale est de 12%.

Pour la campagne de Novembre, les moyennes de la CE_{ps} mesurée et celles calculées sont identiques, avec une différence de 12% entre les valeurs de l'écart type. La différence entre la valeur maximale est de 4 %, et la différence entre la valeur minimale est de 11%.

3) Analyse statistique des valeurs de la CE_{ps} de l'horizon (50-75cm)

Les résultats de la campagne Juin montrent que les moyennes de la CE_{ps} mesurée et celles calculées sont identiques, et une différence de 4% entre les valeurs de l'écart type. La différence entre la valeur maximale est de 0.2 %, et la différence entre la valeur minimale est de 11%.

Pour la campagne de Novembre, les moyennes de la CE_{ps} mesurée et celles calculées sont identiques, avec une différence de 14% entre les valeurs de l'écart type. La différence entre la valeur maximale est de 3 %, et la différence entre la valeur minimale est de 11%. ;

4) Analyse statistique des valeurs de la CE_{ps} de l'horizon de profondeur (75-100cm)

Les résultats de la campagne Juin montrent que les moyennes de la CE_{ps} mesurée et celles calculées sont identiques, avec une différence de 13% entre les valeurs de l'écart type. La différence entre la valeur maximale est de 2 %, et la différence entre la valeur minimale est de 11%.

Pour la campagne de Novembre, les moyennes de la CE_{ps} mesurée et celles calculées sont identiques, avec une différence de 12% entre les valeurs de l'écart type. La différence entre la valeur maximale est de 17 %, et la différence entre la valeur minimale est de 17%.

Tableau 32. Valeurs des conductivités électriques (CE_{ps}), mesurées et calculées (Juin 2012)

N°	CE_{ps} ($dS.m^{-1}$) mesurée au laboratoire				CE_{ps} ($dS.m^{-1}$) calculée par les équations de régressions			
	0-25 cm	25-50 cm	50-75 cm	75-100 cm	0-25 cm	25-50 cm	50-75 cm	75-100 cm
1	1,4	7,1	9,0	8,9	2,0	8,1	8,0	7,9
2	5,7	14,1	17,6	16,9	5,3	13,0	14,3	15,5
3	8,5	13,7	22,3	24,4	10,9	20,8	26,1	28,6
4	6,0	20,9	41,7	46,0	5,7	20,2	41,8	47,0
5	8,5	20,4	27,1	28,8	10,6	21,0	27,4	30,1
6	9,4	22,1	27,7	27,6	9,7	19,8	25,1	27,1
7	17,0	29,0	34,1	30,1	12,6	25,4	33,4	34,6
8	14,6	20,6	26,7	24,9	14,1	19,7	28,0	28,5
9	8,9	11,4	21,5	20,2	8,1	13,1	21,4	20,7
10	1,1	11,5	13,3	11,7	1,6	10,4	14,1	10,8
11	5,3	15,2	16,0	16,5	3,9	14,7	17,7	19,7
12	10,3	20,5	19,7	20,4	4,4	16,5	19,1	21,2
13	5,1	15,6	25,3	27,3	7,1	19,1	24,9	27,0
14	5,7	17,6	24,5	28,2	7,4	18,9	25,5	26,9
15	10,9	24,6	29,0	44,3	10,7	20,4	26,7	29,0
16	7,6	20,0	37,7	43,6	6,9	22,3	29,7	31,0
17	5,1	20,4	23,3	24,3	6,8	19,7	26,0	27,8
18	5,3	23,9	26,7	26,2	7,3	25,1	30,8	32,3
19	3,5	14,7	14,5	15,1	3,8	13,7	16,7	18,1
20	2,3	10,5	15,3	14,9	3,2	11,7	16,2	16,5

Tableau 33. Paramètres statistiques des valeurs mesurées et calculées de la CE_{ps} (Juin 2012).

Profondeur (cm)	Corrélation		CE_{ps} ($dS.m^{-1}$) Mesurée au laboratoire				CE_{ps} ($dS.m^{-1}$) calculée par les équations de régressions			
	n	r	Ecart type	Moy	Min	Max	Ecart type	Moy	Min	Max
0-25cm	20	0.86	7.11	4.03	1.1	17	7.11	3.46	1.6	14.1
25-50cm	20	0.87	17.69	5.45	7.1	29	17.68	4.72	8.1	25.4
50-75cm	20	0.94	23.65	8.17	9	41.7	23.65	7.85	8	41.8
75-100cm	20	0.86	25.02	10.35	8.9	46	25.02	9.02	7.9	47

Tableau 34. Valeurs des conductivités électriques (CE_{ps}), mesurées et calculées (Novembre 2012)

N°	CE_{ps} (dS.m ⁻¹) mesurée au laboratoire				CE_{ps} (dS.m ⁻¹) calculée par les équations de régressions			
	0 – 25 cm	25 -50 cm	50 -75 cm	75-100 cm	0 – 25 cm	25 -50 cm	50 -75 cm	75-100 cm
1	2,0	11,9	12,2	10,2	2,8	14,2	14,7	11,9
2	8,7	20,9	21,9	22,7	6,0	16,7	15,5	18,5
3	10,2	23,2	29,2	27,4	8,1	25,1	29,3	28,3
4	10,6	24,6	40,0	46,3	11,8	25,3	34,1	38,7
5	11,3	30,7	44,6	44,9	11,6	29,7	39,0	39,5
6	12,4	28,5	31,4	30,3	8,8	25,2	27,2	28,4
7	12,7	31,0	40,5	41,0	11,4	26,9	35,0	37,1
8	10,9	19,9	29,5	30,2	11,3	24,3	33,9	37,3
9	8,7	13,4	22,6	27,8	6,4	16,1	18,3	21,0
10	3,7	10,7	13,2	14,4	4,4	12,0	12,5	14,8
11	4,3	21,3	21,2	23,1	6,7	19,5	21,5	22,4
12	6,5	21,7	19,4	21,2	6,8	19,9	22,7	23,1
13	9,0	23,3	24,3	26,3	8,5	21,0	27,5	29,2
14	7,5	21,2	22,9	24,7	8,2	22,3	25,9	27,7
15	10,2	18,4	21,0	25,4	10,2	20,2	28,0	33,3
16	11,3	26,0	30,6	36,0	10,9	23,7	31,0	35,2
17	8,4	25,7	24,9	26,2	10,2	28,9	30,0	31,8
18	9,6	25,1	25,7	32,7	10,7	27,5	30,6	33,4
19	3,4	21,9	21,9	24,3	6,7	19,0	19,8	21,6
20	6,5	18,6	16,6	17,3	6,3	20,6	17,2	19,0

Tableau 35. Paramètres statistiques des valeurs mesurées et calculées de la CE_{ps} (Novembre 2012).

Profondeur (cm)	Corrélation		CE_{ps} (dS.m ⁻¹) mesurée au laboratoire				CE_{ps} (dS.m ⁻¹) calculée par les équations de régressions			
	n	r	Ecart type	Moy	Min	Max	Ecart type	Moy	Min	Max
0-25cm	20	0.83	8.4	3	2	12.7	8.39	2.65	2.8	11.8
25-50cm	20	0.88	21.90	5.80	10.7	31	21.91	5.08	12	29.7
50-75cm	20	0.87	25.68	8.78	12.2	44.6	25.69	7.53	12.5	39
75-100cm	20	0.88	27.62	9.42	10.2	46.3	27.61	8.28	11.9	39.5

VI.3.5. La conductivité électrique calculée (CE_{psc}) pour l'ensemble des horizons

Les calculs ont porté sur l'ensemble des valeurs de la conductivité électrique calculée (CE_{psc}) par le biais de l'équation de régression.

VI.3.5.1. Analyses statistiques

1) Campagne Juin 2012

Les résultats révèlent que la conductivité électrique calculée (CE_{psc}) pour l'ensemble des horizons se situe entre 0,02 et 49,09 $dS.m^{-1}$ (**Tab.36**). Ce résultat signifie que la salinité de la parcelle étudiée est très hétérogène. La salinité moyenne varie entre 8,73 $dS.m^{-1}$ en surface et 25,31 $dS.m^{-1}$ en profondeur. Le profil salin moyen est donc de type descendant. Le coefficient de variation de la CE_{psc1} est supérieur à 50 %, et exprime une forte variabilité de la salinité en surface. Cette variabilité est modérée, au niveau des autres horizons qui enregistrent des coefficients de variation de l'ordre de 27.36 % pour H2, 30.57 % pour H3 et 30.26 % pour H4.

La médiane indique que 50 % des horizons ont des CE_{psc} inférieures à 8.51 $dS.m^{-1}$ en surface, 17.75 $dS.m^{-1}$ en sub-surface, 23.55 $dS.m^{-1}$ dans le troisième horizon, et 25.30 $dS.m^{-1}$ en profondeur. La différence entre la moyenne et la médiane montre qu'il y a une dissymétrie à droite pour la CE_{psc1} , CE_{psc3} et CE_{psc4} , par contre, la CE_{psc2} a une dissymétrie à gauche.

2) Campagne Novembre 2012

Selon le **tableau 36** les résultats révèlent que la conductivité électrique calculée (CE_{psc}) pour l'ensemble des horizons se situe entre 2,19 et 62,36 $dS.m^{-1}$. Ce résultat signifie que la salinité de la parcelle étudiée est très hétérogène. La salinité moyenne varie entre 8,28 $dS.m^{-1}$ en surface et 28,35 $dS.m^{-1}$ en profondeur. Le profil salin moyen est donc de type descendant. Le coefficient de variation de la CE_{psc1} est inférieur à 50 %, et exprime une variabilité modérée dans le profil. Cette variabilité enregistre des coefficients de variation de l'ordre de 33.45 % pour H1, 28.12 % pour H2, 35.6 % pour H3 et 32.45 % pour H4.

La médiane indique que 50 % des horizons ont des CE_{psc} inférieures à 8.33 $dS.m^{-1}$ en surface, 22.08 $dS.m^{-1}$ en sub-surface, 26.03 $dS.m^{-1}$ dans le troisième horizon, et 28.14 $dS.m^{-1}$ en profondeur. La différence entre la moyenne et la médiane montre qu'il y a une dissymétrie à droite pour la CE_{psc2} , CE_{psc3} et CE_{psc4} , par contre, la CE_{psc1} a une dissymétrie à gauche.

Tableau 36. Les paramètres de statistiques descriptives de la conductivité électrique calculée

Paramètres	CE _{psc} en dS.m ⁻¹ 25°C (Juin 2012)				CE _{psc} en dS.m ⁻¹ 25°C (Novembre 2012)			
	CE _{psc1}	CE _{psc2}	CE _{psc3}	CE _{psc4}	CE _{psc1}	CE _{psc2}	CE _{psc3}	CE _{psc4}
Minimum	0.02	7.58	7.85	8.04	2.19	4.67	5.08	10.34
Maximum	24.45	29.77	49.09	48.39	14.73	51.67	62.36	54.73
Moyenne	8.73	17.63	23.83	25.31	8.28	22.58	27.16	28.35
Médiane	8.51	17.75	23.55	25.30	8.33	22.08	26.03	28.14
Coefficient de variation %	54.22	27.36	30.57	30.26	33.45	28.12	35.60	32.45

VI.3.5.2. Fréquences de la conductivité électrique calculée (CE_{psc}) des différents horizons

1) Campagne Juin 2012

Le **tableau 37** présente les fréquences des différentes classes de salinité pour chaque horizon, où la proportion des horizons non salés avec une CE_{psc} inférieure à 2 dS.m⁻¹ est de 6.5 % des horizons de surface (H1) et nulle pour les autres horizons. Aussi, la proportion des horizons extrêmement salés avec une CE_{psc} > 16 dS.m⁻¹ est de 7.9% des horizons H1, 59.5 % des horizons H2, 83.7 % des horizons H3 et 86.7 % des horizons H4.

Par ailleurs,

- 12.45 % des H1, 0 % des H2, 0 % des H3 et 0 % des H4 sont légèrement salins avec une CE_{psc} comprise entre 2 et 4 dS.m⁻¹
- 27.9 % des H1, 0.3 % des H2, 0.1 % des H3 et 0 % des H4 sont salins avec une CE_{psc} comprise entre 4 et 8 dS.m⁻¹
- 45.4 % des H1, 40.2 % des H2, 16.2 % des H3 et 13.3 % des H4 sont très salins avec une CE_{psc} comprise entre 8 et 16 dS.m⁻¹.
- 7.9 % des H1, 59.5 % des H2, 61.5 % des H3 et 57.4 % des H4 sont extrêmement salins avec une CE_{psc} comprise entre 16 et 30 dS.m⁻¹
- 0 % des H1, 0 % des H2, 22.2 % des H3 et 29.3 % des H4 sont extrêmement salins avec une CE_{psc} > 30 dS.m⁻¹

2) Campagne Novembre 2012

Le **tableau 37** présente les fréquences des différentes classes de salinité pour chaque horizon, où la proportion des horizons non salés avec une CE_{psc} inférieure à 2 dS.m⁻¹ est nulle pour tous les horizons. Aussi, la proportion des horizons extrêmement salés avec une CE_{psc} > 16

dS.m^{-1} est nulle pour les horizons H1, 85.1 % des horizons H2, 87.5 % des horizons H3 et 90 % des horizons H4.

Par ailleurs,

- 6.1 % des H1, 0 % des H2, 0 % des H3 et 0 % des H4 sont légèrement salins avec une CE_{psc} comprise entre 2 et 4 dS.m^{-1}
- 40.1 % des H1, 0 % des H2, 0 % des H3 et 0 % des H4 sont salins avec une CE_{psc} comprise entre 4 et 8 dS.m^{-1}
- 53.7 % des H1, 14.5 % des H2, 12.4 % des H3 et 10 % des H4 sont très salins avec une CE_{psc} comprise entre 8 et 16 dS.m^{-1} - 0 % des H1, 79 % des H2, 56.7 % des H3 et 53 % des H4 sont extrêmement salins avec une CE_{psc} comprise entre 16 et 30 dS.m^{-1} .
- 0 % des H1, 6.1 % des H2, 30.8 % des H3 et 37 % des H4 sont extrêmement salins avec une $\text{CE}_{\text{psc}} > 30 \text{ dS.m}^{-1}$.

Tableau 37. Répartition de la fréquence des horizons (en %), en fonction des classes de salinité (CE_{psc} en dS.m^{-1})

Horizons (cm)	Nbre	Classes de salinité (CE_{psc} en dS.m^{-1})					
		< 2	2 - 4	4 - 8	8 - 16	16 - 30	>30
Juin 2012							
H1 (0-25cm)	862	6.5%	12.4%	27.9%	45.4%	7.9%	0%
H2 (25-50cm)	862	0%	0%	0.3%	40.2%	59.5%	0%
H3 (50-75cm)	862	0%	0%	0.1%	16.2%	61.5%	22.2%
H4 (75-100cm)	862	0%	0%	0%	13.3%	57.4%	29.3%
Novembre 2012							
H1 (0-25cm)	847	0%	6.1%	40.1%	53.7%	0%	0%
H2 (25-50cm)	847	0%	0%	0.4%	14.5%	79%	6.1%
H3 (50-75cm)	847	0%	0%	0.1%	12.4%	56.7%	30.8%
H4 (75-100cm)	847	0%	0%	0%	10%	53%	37%

VI.3.6. Vérification de la loi de distribution

La plupart des méthodes de test paramétriques requièrent la normalité des données. Il est donc important de disposer d'une méthode permettant de vérifier cette normalité. Une approche élégante est le test de conformité de Kolmogorov-Smirnov.

Ce test non paramétrique consiste à comparer la distribution de fréquences relatives cumulées d'une variable observée avec la distribution théorique que cette variable aurait si elle était distribuée normalement. On superpose les deux distributions, on cherche la

classe où l'écart entre la distribution théorique et la distribution observée est le plus grand, et on vérifie (dans une table conçue à cet effet ou en calculant directement la valeur critique), si cet écart est significativement grand, c'est-à-dire si l'hypothèse de normalité H_0 : distribution normale peut être rejetée au seuil considéré.

Dans cette étude, la vérification de la loi de distribution a été effectuée par le test **Kolmogorov-Smirnov** qui a été réalisé à partir de la distribution des fréquences pour un niveau de signification de 0,05.

$$N'(X) - F(X) < \frac{1.36}{\sqrt{N}}$$

Où : $N'(X)$ est la fréquence cumulée et $F(X)$ est la fonction de répartition de la distribution normale envisagée et N et le nombre d'échantillons.

Selon le **tableau 38**, pour les résultats de la campagne Juin 2012 (Tableau), seule la CE_{psc1} suit une distribution normale, contrairement à la CE_{psc2} , CE_{psc3} et la CE_{psc4} qui ne suivent aucune des lois proposées, à cet effet, elles suivent une loi anormale. Concernant les résultats de la campagne de Novembre 2012, la CE_{psc2} et la CE_{psc3} suivent une distribution normale, contrairement, la CE_{psc1} et la CE_{psc4} ne suivent aucune des lois proposées, à cet effet, elles suivent une loi anormale (**Tab.39**).

Tableau 38. Vérification de la loi de distribution de la CE_{psc} par le test de Kolmogorov-Smirnov (Juin 2012).

Paramètres	N	$\frac{1.36}{\sqrt{N}}$	Test K-S	Lois de distribution
CE_{psc1}	864	0.046	0.04	N
CE_{psc2}	864	0.046	0.048	AN
CE_{psc3}	864	0.046	0.056	AN
CE_{psc4}	864	0.046	0.051	AN
Ln CE_{psc2}	864	0.046	0.082	AN
Ln CE_{psc3}	864	0.046	0.075	AN
Ln CE_{psc4}	864	0.046	0.081	AN
Exp CE_{psc2}	864	0.046	0.457	AN
Exp CE_{psc3}	864	0.046	0.505	AN
Exp CE_{psc4}	864	0.046	0.502	AN

N : Normale ; AN : Anormale

Tableau 39. Vérification de la loi de distribution de la CE_{psc} par le test de Kolmogorov-Smirnov (Novembre 2012).

Paramètres	N	$\frac{1.36}{\sqrt{N}}$	Test K-S	Lois de distribution
CE_{psc1}	847	0.047	0,049	AN
CE_{psc2}	847	0.047	0,043	N
CE_{psc3}	847	0.047	0,045	N
CE_{psc4}	847	0.047	0,054	AN
Ln CE_{psc1}	847	0.047	0,088	AN
Ln CE_{psc4}	847	0.047	0,108	AN
ExpCE_{psc1}	847	0.047	0,38	AN
ExpCE_{psc4}	847	0.047	0,504	AN

N : Normale ; AN : Anormale

VI.4. Cartographie de la salinité

Les données acquises à l'aide du conductimètre électromagnétique EM38 sont traitées numériquement par des méthodes géostatistiques, en particulier, des cartes sont tracées à partir d'une interpolation par krigeage. L'étude des variogrammes peut également fournir des renseignements sur la variabilité spatiale de la mesure, susceptibles d'orienter les modes d'échantillonnage futurs. L'emploi de ces méthodes se trouve facilité par le développement de logiciels fonctionnant sur micro-ordinateurs et pouvant même être utilisés sur du matériel portable (Boivin, 1988).

VI.4.1. Variographie

Le but principal de cette analyse est la recherche pour chaque horizon d'un modèle structural théorique du variogramme utilisable lors des procédures d'interpolation par krigeage.

1) Analyse variographique des résultats de la campagne Juin 2012

a) Structure du semi-variogramme de l'horizon de surface (0-25cm)

Le semi-variogramme de la **figure 40** s'ajuste mieux à un modèle Rational Quadratique avec un rapport d'anisotropie égal à 1.61 selon la direction 273.7° (**Tabl.40**). Ce résultat signifie que la CE_{psc} du premier horizon évolue d'une façon plus importante, selon la direction considérée.

L'effet de pépite est de 3.79 dS.m^{-1} indiquant une importante variabilité locale du paramètre étudié. La valeur élevée du palier (9.28 dS.m^{-1}) traduit également une grande variabilité de la salinité de la parcelle étudiée.

La portée est de 94.59 m, selon la direction la direction considérée. Au-delà de ces distances, les mesures de la CEpsc deviennent statistiquement indépendantes, leurs corrélations sont d'autant plus fortes que les deux points de mesure sont proches.

b) Structure du semi-variogramme de l'horizon de sub-surface (25-50cm)

Le semi-variogramme de la **figure 41** s'ajuste mieux à un modèle Rational Quadratique avec un rapport d'anisotropie égal à 1.61 selon la direction 290.7° (**Tab.40**). Ce résultat signifie que la CEpsc du premier horizon évolue d'une façon plus importante, selon la direction considérée.

L'effet de pépité est de 1.56 dS.m^{-1} indiquant une importante variabilité locale du paramètre étudié. La valeur élevée du palier (9.72 dS.m^{-1}) traduit également une grande variabilité de la salinité de la parcelle étudiée.

La portée est de 81.68 m, selon la direction la direction considérée. Au-delà de ces distances, les mesures de la CEpsc deviennent statistiquement indépendantes, leurs corrélations sont d'autant plus fortes que les deux points de mesure sont proches.

c) Structure du semi-variogramme de l'horizon (50-75cm)

Le semi-variogramme de la **figure 42** s'ajuste mieux à un modèle Exponentiel avec un rapport d'anisotropie égal à 1.64 selon la direction 282.4° (**Tab.40**). Ce résultat signifie que la CEpsc du premier horizon évolue d'une façon plus importante, selon la direction considérée.

L'effet de pépité est de 2.75 dS.m^{-1} il indiquant une importante variabilité locale du paramètre étudié. La valeur élevée du palier (25.35 dS/m) traduit également une grande variabilité de la salinité de la parcelle étudiée.

La portée est de 85.36 m, selon la direction la direction considérée. Au-delà de ces distances, les mesures de la CEpsc deviennent statistiquement indépendantes, leurs corrélations sont d'autant plus fortes que les deux points de mesure sont proches.

d) Structure du semi-variogramme de l'horizon de profondeur (75-100cm)

Le semi-variogramme de la **figure 43** s'ajuste mieux à un modèle Exponentiel avec un rapport d'anisotropie égal à 1.7 selon la direction 281.9° (**Tab.40**). Ce résultat signifie que la CEpsc du premier horizon évolue d'une façon plus importante, selon la direction considérée.

L'effet de pépité est de 1.91 dS.m^{-1} indiquant une importante variabilité locale du paramètre étudié. La valeur élevée du palier (25.14 dS/m) traduit également une grande variabilité de la salinité de la parcelle étudiée.

La portée est de 87.03 m, selon la direction la direction considérée. Au-delà de ces distances, les mesures de la CEpsc deviennent statistiquement indépendantes, leurs corrélations sont d'autant plus fortes que les deux points de mesure sont proches.

Tableau 40. Paramètres du modèle de variogramme des différents horizons (Juin 2012)

Profondeur du sol (cm)	Modèle	Pépité (dS/m ²)	Pallier (dS/m ²)	Portée (m)	Anisotropie	Direction						
0-25cm	R. quadratique	3.78	9.28	94.64	1.61	273.7						
25-50cm	R. quadratique	1.56	9.72	81.67	1.17	290.7						
50-75cm	Exponentiel	2.75	85.36	1.64	282.4	75-100cm	Exponentiel	1.91	25.14	87.03	1.70	281.9
75-100cm	Exponentiel	1.91	25.14	87.03	1.70	281.9						

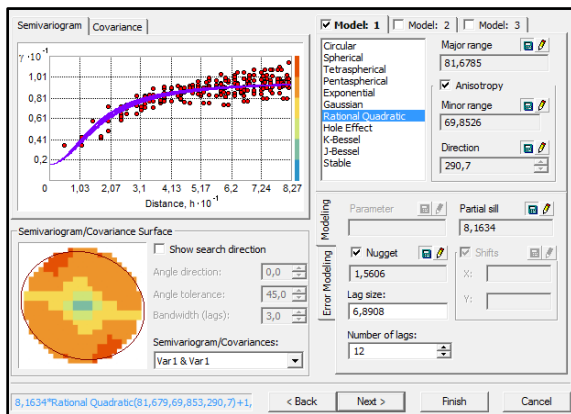


Figure 40. Modèle du variogramme de l'horizon de surface (0-25cm)

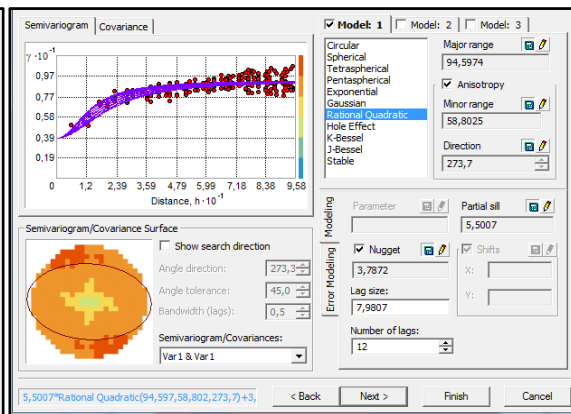


Figure 41. Modèle du variogramme de l'horizon de sub-surface (25-50cm)

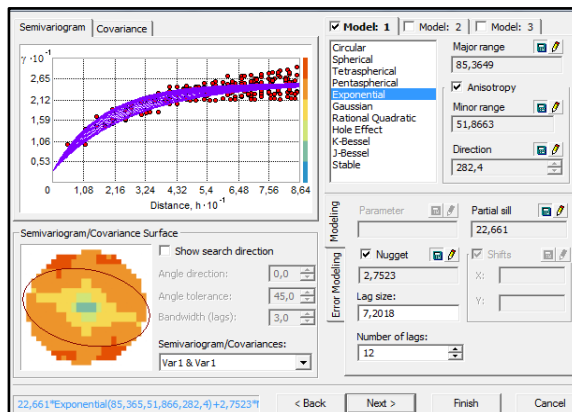


Figure 42. Modèle du variogramme de l'horizon (50-75cm)

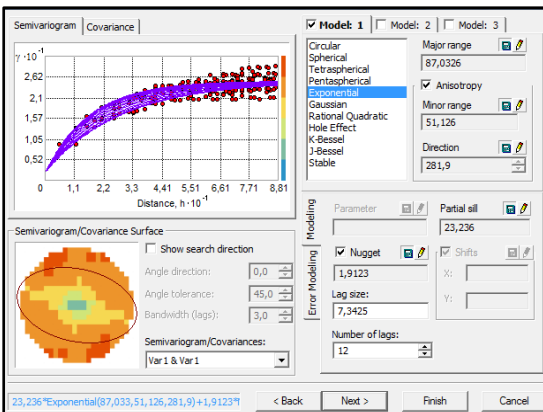


Figure 43. Modèle du variogramme de l'horizon de profondeur (75-100cm)

2) Analyse variographique des résultats de la campagne Novembre 2012

a) Structure du semi-variogramme de l'horizon de surface (0-25cm)

Le semi-variogramme de la **figure 44** s'ajuste mieux à un modèle Exponentiel avec un rapport d'anisotropie égal à 1.48 selon la direction 278.3° (**Tab.41**). Ce résultat signifie que la CEpsc du premier horizon évolue d'une façon plus importante, selon la direction considérée. L'effet de pépité est de 0.57 dS.m^{-1} indiquant une importante variabilité locale du paramètre étudié. La valeur élevée du palier (3.43 dS/m) traduit également une grande variabilité de la salinité de la parcelle étudiée.

La portée est de 95.93 m, selon la direction la direction considérée. Au-delà de ces distances, les mesures de la CEpsc deviennent statistiquement indépendantes, leurs corrélations sont d'autant plus fortes que les deux points de mesure sont proches.

b) Structure du semi-variogramme de l'horizon de sub-surface (25-50cm)

Le semi-variogramme de la **figure 45** s'ajuste mieux à un modèle Exponentiel avec un rapport d'anisotropie égal à 1.20 selon la direction 282.3° (**Tab.41**). Ce résultat signifie que la CEpsc du premier horizon évolue d'une façon plus importante, selon la direction considérée. L'effet de pépité est de 13.99 dS.m^{-1} indiquant une importante variabilité locale du paramètre étudié. La valeur élevée du palier (28.63 dS/m) traduit également une grande variabilité de la salinité de la parcelle étudiée.

La portée est de 92.28 m, selon la direction la direction considérée. Au-delà de ces distances, les mesures de la CEpsc deviennent statistiquement indépendantes, leurs corrélations sont d'autant plus fortes que les deux points de mesure sont proches.

c) Structure du semi-variogramme de l'horizon (50-75cm)

Le semi-variogramme de la **figure 46** s'ajuste mieux à un modèle Exponentiel avec un rapport d'anisotropie égal à 1.14 selon la direction 345.7° (**Tab.41**). Ce résultat signifie que la CEpsc du premier horizon évolue d'une façon plus importante, selon la direction considérée. L'effet de pépité est de 19.84 dS.m^{-1} , il indiquant une importante variabilité locale du paramètre étudié. La valeur élevée du palier (38.64 dS/m) traduit également une grande variabilité de la salinité de la parcelle étudiée.

La portée est de 84.57 m, selon la direction la direction considérée. Au-delà de ces distances, les mesures de la CEpsc deviennent statistiquement indépendantes, leurs corrélations sont d'autant plus fortes que les deux points de mesure sont proches.

d) Structure du semi-variogramme de l'horizon de profondeur (75-100cm)

Le semi-variogramme de la **figure 47** s'ajuste mieux à un modèle Rational Quadratique avec un rapport d'anisotropie égal à 1.18 selon la direction 282.3°(**Tab.41**). Ce résultat signifie que la CEpsc du premier horizon évolue d'une façon plus importante, selon la direction considérée.

L'effet de pépite est de 10.3 dS.m⁻¹, il indiquant une importante variabilité locale du paramètre étudié. La valeur élevée du palier (39.35 dS/m) traduit également une grande variabilité de la salinité de la parcelle étudiée.

La portée est de 90.35 m, selon la direction la direction considérée. Au-delà de ces distances, les mesures de la CEpsc deviennent statistiquement indépendantes, leurs corrélations sont d'autant plus fortes que les deux points de mesure sont proches.

Tableau 41. Paramètres du modèle de variogramme des différents horizons (Nov. 2012)

Profondeur du sol (cm)	Modèle	Pépité dS.m ⁻¹	Pallier dS.m ⁻¹	Portée (m)	Anisotropie	Direction
0-25cm	Exponentiel	0.57	3.43	95.93	1.48	278.3
25-50cm	Exponentiel	13.98	28.63	92.28	1.20	282.3
50-75cm	R. quadratique	19.84	38.64	84.57	1.14	345.7
75-100cm	R. quadratique	10.3	39.35	90.35	1.18	285.9

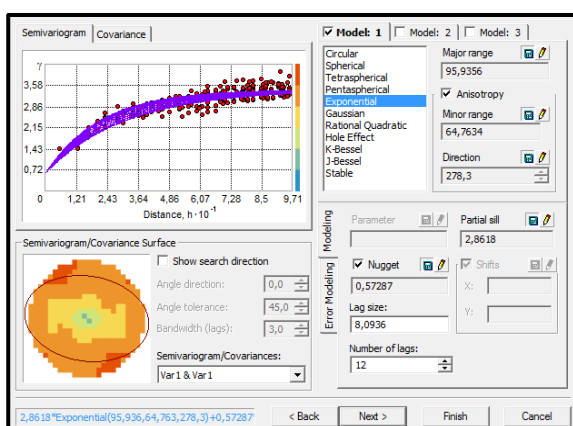


Figure 44. Modèle du variogramme de l'horizon de surface (0-25cm)

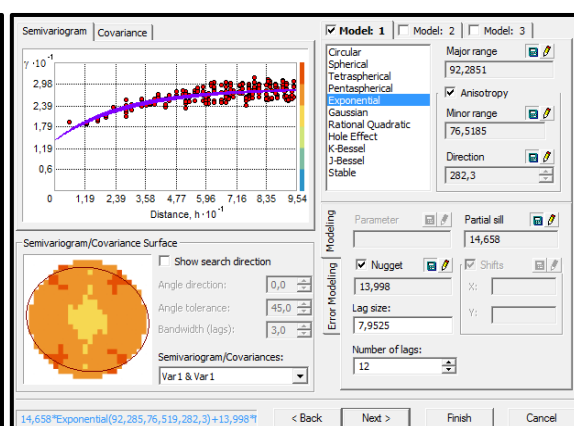


Figure 45. Modèle du variogramme de l'horizon de sub-surface (25-50cm)

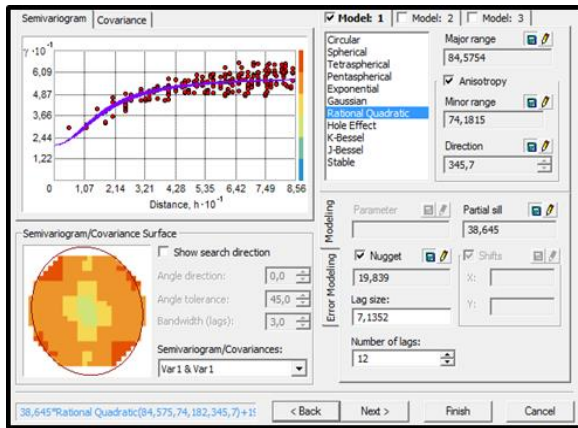


Figure 46. Modèle du variogramme de l'horizon (50-75cm)

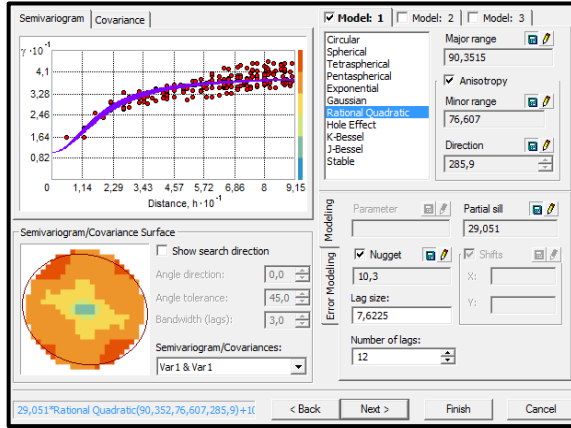


Figure 47. Modèle du variogramme de de l'horizon de profondeur (75-100cm)

VI.4.2. Cartographie par krigeage ordinaire des conductivités électriques calculées

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 E.H., Srivastava R.M., 1989).

Dans cette étude, les modèles de semi-variogrammes ont été testés pour chaque horizon et les performances de prédiction de la salinité sont représentés les **tableaux 42 et 43**.

Pour qu'un modèle fournit 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;
- La racine carrée de l'écart quadratique moyen (**RMSE**) doit être proche de 1 (Johnston K., and al, 2001).

1) Cartographie par krigeage ordinaire des conductivités électriques calculées de la campagne Juin 2012

Dans le **tableau 42** (Juin 2012), les résultats montrent que, pour les différents horizons, les valeurs de la EM sont situées entre l'intervalle -0.0014 à 0.0013, les valeurs de la RMS et de l'ASE sont situées, respectivement, entre l'intervalle 1.87 à 3.35 et 1.88 à 3.38. Les valeurs de la RMSE sont situées entre l'intervalle 0.99 à 1.

Tableau 42. Erreurs de prédiction des modèles de variogramme (Juin 2012)

Profondeur du sol (cm)	Modèles	Erreurs de prédiction			
		Root Mean Square (RMS)(dS.m ⁻¹)	Average Standard Error (ASE) (dS.m ⁻¹)	Erreur moyenne (EM) (dS.m ⁻¹)	RMSE (dS.m ⁻¹)
0-25cm	R. quadratique	2.39	2.41	-0.0014	1
25-50cm	R. quadratique	1.87	1.88	0.0024	0.99
50-75cm	Exponentiel	3.35	3.38	0.0010	0.99
75-100cm	Exponentiel	3.228	3.236	0.0013	1

2) Cartographie par krigeage ordinaire des conductivités électriques calculées de la campagne Novembre 2012

Pour le **tableau 43**, les résultats montrent que, pour les différents horizons, les valeurs de la EM sont situées entre l'intervalle -0.00001 à 0.0001, les valeurs de la RMS et de l'ASE sont situées, respectivement, entre l'intervalle 1.27 à 5.78 et 1.26 à 5.83. Les valeurs de la RMSE sont situées entre l'intervalle 0.98 à 1.

Tableau 43. Erreurs de prédiction des modèles de variogramme (Novembre 2012)

Profondeur du sol (cm)	Modèles	Erreurs de prédiction			
		(RMS) (dS.m ⁻¹)	ASE (dS.m ⁻¹)	(EM) (dS.m ⁻¹)	RMSE (dS.m ⁻¹)
0-25cm	Exponentiel	1.27	1.26	-0.0017	1.0
25-50cm	Exponentiel	5.51	4.52	-0.0035	0.99
50-75cm	Exponentiel	5.74	5.64	0.0003	1.0
75-100cm	R. quadratique	4.22	4.19	-0.00001	1.0

VI.5. Distribution spatiale de la salinité

Les cartes krigées, issues de l'analyse géostatistique des conductivités électriques estimées aux 910 emplacements de mesures de la conductivité électromagnétique, sont présentées dans les **figures (48 à 55)**. Les couleurs ont été choisies pour correspondre aux seuils d'interprétation habituels de la salinité de l'USDA. Les calculs des superficies ont été établis automatiquement, par le module Géostatistical Analyst du logiciel ARCGIS 9.3, avec lequel

les cartes de salinité ont été générées. Le tableau représente la répartition des superficies en hectares (Ha) en fonction des classes de salinité.

Cela montre que sur la parcelle d'étude, le gradient de salinité est très important, depuis des sols non salés jusqu'à des sols considérés comme extrêmement salés.

1) Distribution spatiale de la salinité (campagne Juin 2012)

a) Distribution de la salinité dans l'horizon de surface (0-25cm)

La **figure 48** montre une hétérogénéité de la répartition des différentes classes de la salinité au niveau de la parcelle. Aussi, les plus fortes concentrations de la salinité sont situées dans la partie nord de la parcelle et les plus faibles concentrations sont situées dans la partie sud.

- **Les sols non salins** ($CE_{psc} < 2 \text{ dS.m}^{-1}$) occupent une faible partie de la parcelle (0,6 ha soit 5%) et se situent essentiellement au sud-ouest et au sud-est;
- **Les sols légèrement salins** ($2 \text{ dS.m}^{-1} < CE_{psc} < 4 \text{ dS.m}^{-1}$) occupent 1.5 ha soit 13% et se répartissent aussi sur sud-ouest et au sud-est de la parcelle;
- **Les sols salins** ($4 \text{ dS.m}^{-1} < CE_{psc} < 8 \text{ dS.m}^{-1}$) occupent une superficie de 3.1 ha, soit 28% et occupent la partie centrale du sud de la parcelle, avec quelques plages au nord-ouest;
- **Les sols très salins** ($8 \text{ dS.m}^{-1} < CE_{psc} < 16 \text{ dS.m}^{-1}$) occupent environ la moitié de la parcelle soit 5.7 ha, soit 50%. Ils sont concentrés au nord et au centre de la parcelle avec quelques plages dans la partie centrale du sud de la parcelle;
- **Les sols extrêmement salins** ($16 \text{ dS.m}^{-1} < CE_{psc} < 30 \text{ dS.m}^{-1}$) occupent 0.5 ha, soit 4%, et sont situés au nord-est de la parcelle;
- Les sols avec une CE_{psc} supérieure à 30 dS.m^{-1} sont inexistantes.

b) Distribution de la salinité dans l'horizon de sub-surface (25-50cm)

La **figure 49** montre, au contraire de la couche (0-25cm), une homogénéité de la répartition de la salinité, au niveau de la parcelle. Les plus fortes concentrations de la salinité sont situées, dans la partie nord de la parcelle et les plus faibles concentrations sont situées dans la partie sud.

- **Les sols non salins** ($CE_{psc} < 2 \text{ dS.m}^{-1}$) sont inexistantes;
- **Les sols légèrement salins** ($2 \text{ dS.m}^{-1} < CE_C < 4 \text{ dS.m}^{-1}$) sont inexistantes;
- **Les sols salins** ($4 < CE_{psc} < 8 \text{ dS/m}$) occupent une très faible superficie, représentée par une plage de 0.1 ha, soit 01%, située au sud-est de la parcelle;
- **Les sols très salins** ($8 \text{ dS.m}^{-1} < CE_{psc} < 16 \text{ dS.m}^{-1}$) occupent 4.5 ha, soit 39% de la, et sont concentrés au centre et au sud de la parcelle avec quelques plages dans le centre et le nord de la parcelle;

- **Les sols extrêmement salins** ($16 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 30 \text{ dS.m}^{-1}$) occupent la majeure partie de la parcelle et représentent 60 %, soit 6.7 ha, et sont situés au nord et au centre de la parcelle;
- Les sols avec une CE_{psc} supérieure à 30 dS.m^{-1} sont inexistantes.

c) Distribution de la salinité dans l'horizon (50-75cm)

La **figure 50** montre une dominance des sols extrêmement salés, au niveau de la parcelle et l'apparition d'une plage à très fortes concentrations en sels ($\text{CE}_{\text{psc}} > 30 \text{ dS.m}^{-1}$). Ces concentrations de la salinité sont situées, dans la partie nord de la parcelle (entre le drain situé au centre et la limite nord).

- **Les sols non salins** ($\text{CE}_{\text{psc}} < 2 \text{ dS.m}^{-1}$) sont inexistantes;
- **Les sols légèrement salins** ($2 \text{ dS/m} < \text{CE}_{\text{psc}} < 4 \text{ dS.m}^{-1}$) sont inexistantes;
- **Les sols salins** ($4 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 8 \text{ dS.m}^{-1}$) sont inexistantes ;
- **Les sols très salins** ($8 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 16 \text{ dS.m}^{-1}$) occupent 1.6 ha, soit 14% de la parcelle, et sont concentrés au sud-est et au sud-ouest;
- **Les sols extrêmement salins** ($16 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 30 \text{ dS.m}^{-1}$) occupent la majeure partie de la parcelle et représentent 66 %, soit 7.4 ha, et sont situés au nord et au centre de la parcelle;
- Les sols avec une CE_{psc} supérieure à 30 dS.m^{-1} représentent 2.2 ha, soit 20%. Ils sont localisés au nord de la parcelle.

d) Distribution de la salinité dans l'horizon de profondeur (75-100cm)

La **figure 51** montre, comme dans l'horizon (50-75cm), une dominance des sols extrêmement salés, au niveau de la parcelle et une légère extension de la plage à très fortes concentrations en sels ($\text{C}_{\text{eps}} > 30 \text{ dS/m}$).

- **Les sols non salins** ($\text{CE}_{\text{psc}} < 2 \text{ dS.m}^{-1}$) sont inexistantes;
- **Les sols légèrement salins** ($2 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{C}} < 4 \text{ dS.m}^{-1}$) sont inexistantes;
- **Les sols salins** ($4 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 8 \text{ dS.m}^{-1}$) sont inexistantes ;
- **Les sols très salins** ($8 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 16 \text{ dS.m}^{-1}$) occupent 1.4 ha, soit 12% de la, et sont concentrés au sud-est et au sud-ouest de la parcelle;
- **Les sols extrêmement salins** ($16 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 30 \text{ dS.m}^{-1}$) occupent la majeure partie de la parcelle et représentent 60 %, soit 6.8 ha, et sont situés au nord et au centre de la parcelle;
- Les sols avec une CE_{psc} supérieure à 30 dS.m^{-1} représentent 3.1 ha, soit 28% et sont localisés au nord de la parcelle.

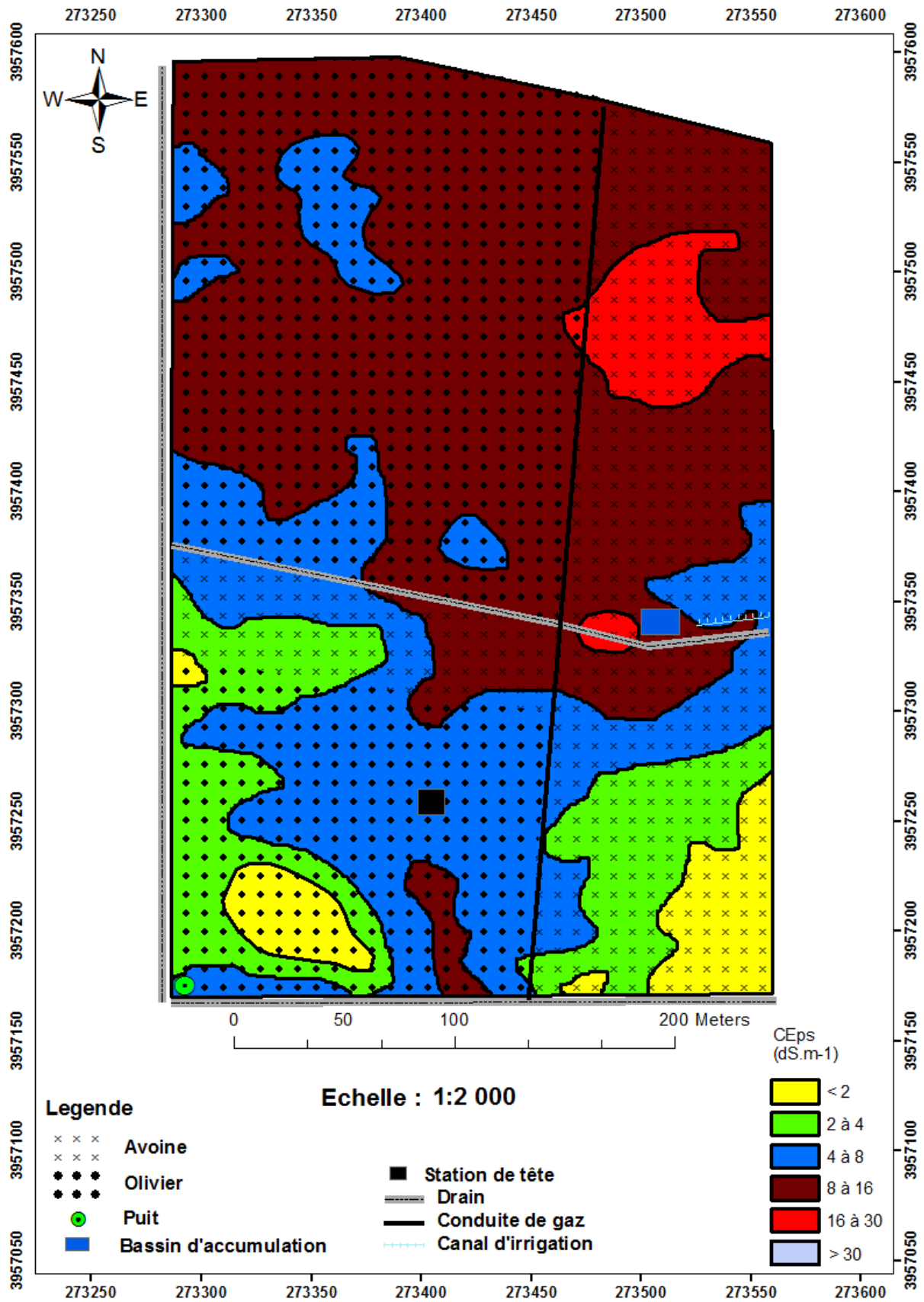


Figure 48. Carte de salinité de l'horizon de surface (0-25cm) (Juin 2012).

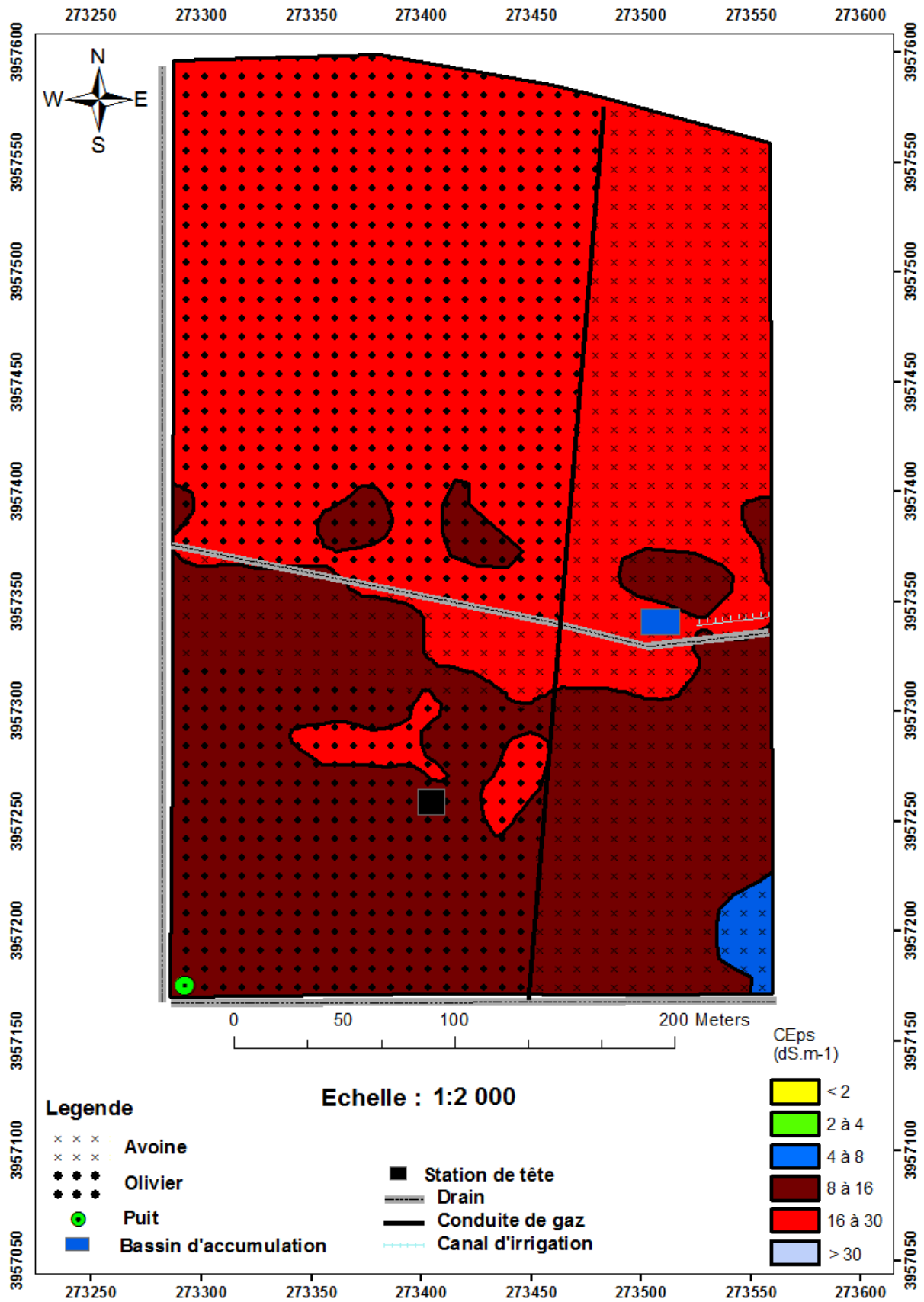


Figure 49. Carte de salinité de l'horizon de sub-surface (25-50cm) (Juin 2012).

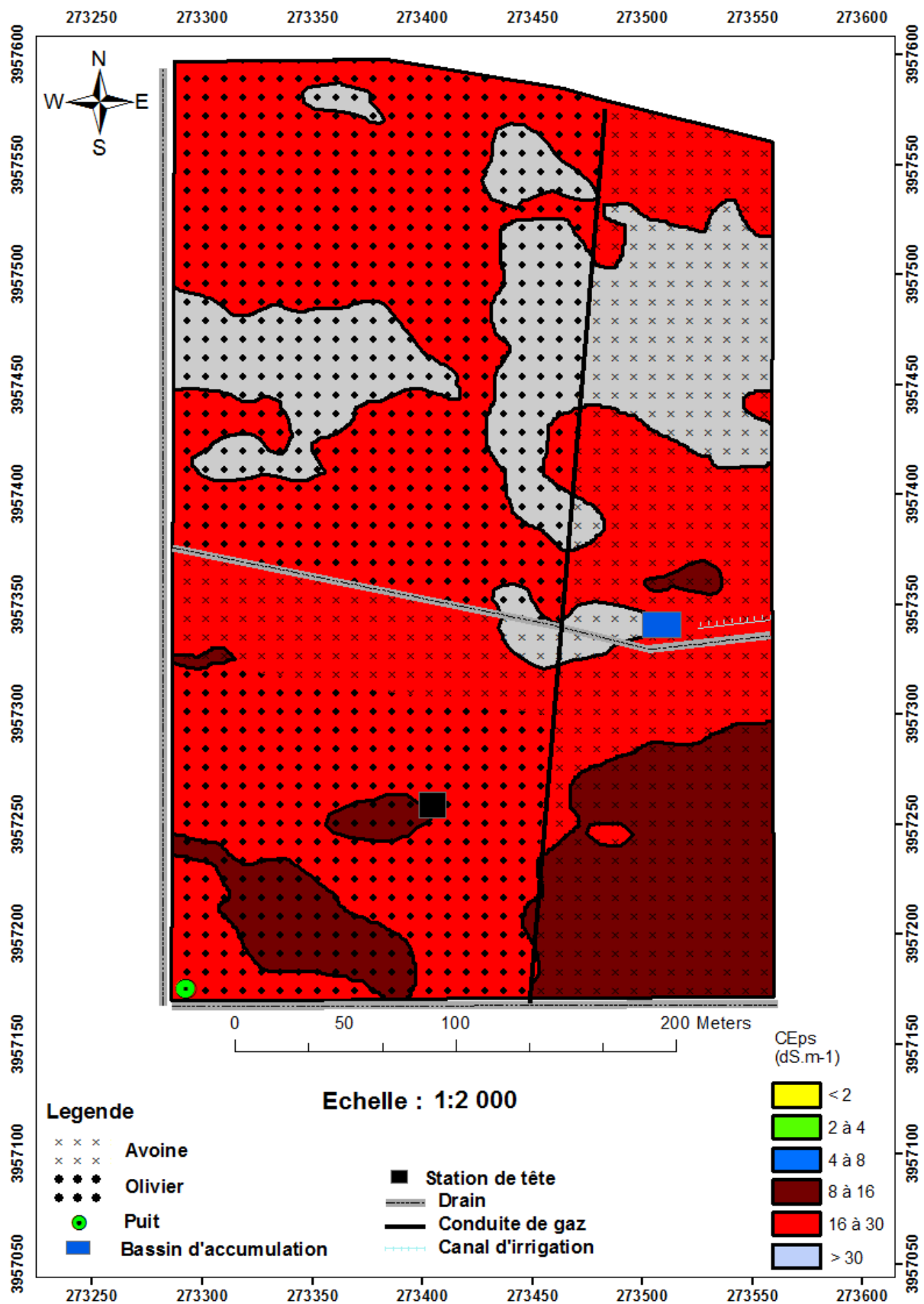


Figure 50. Carte de salinité de l'horizon (50-75cm) (Juin 2012).

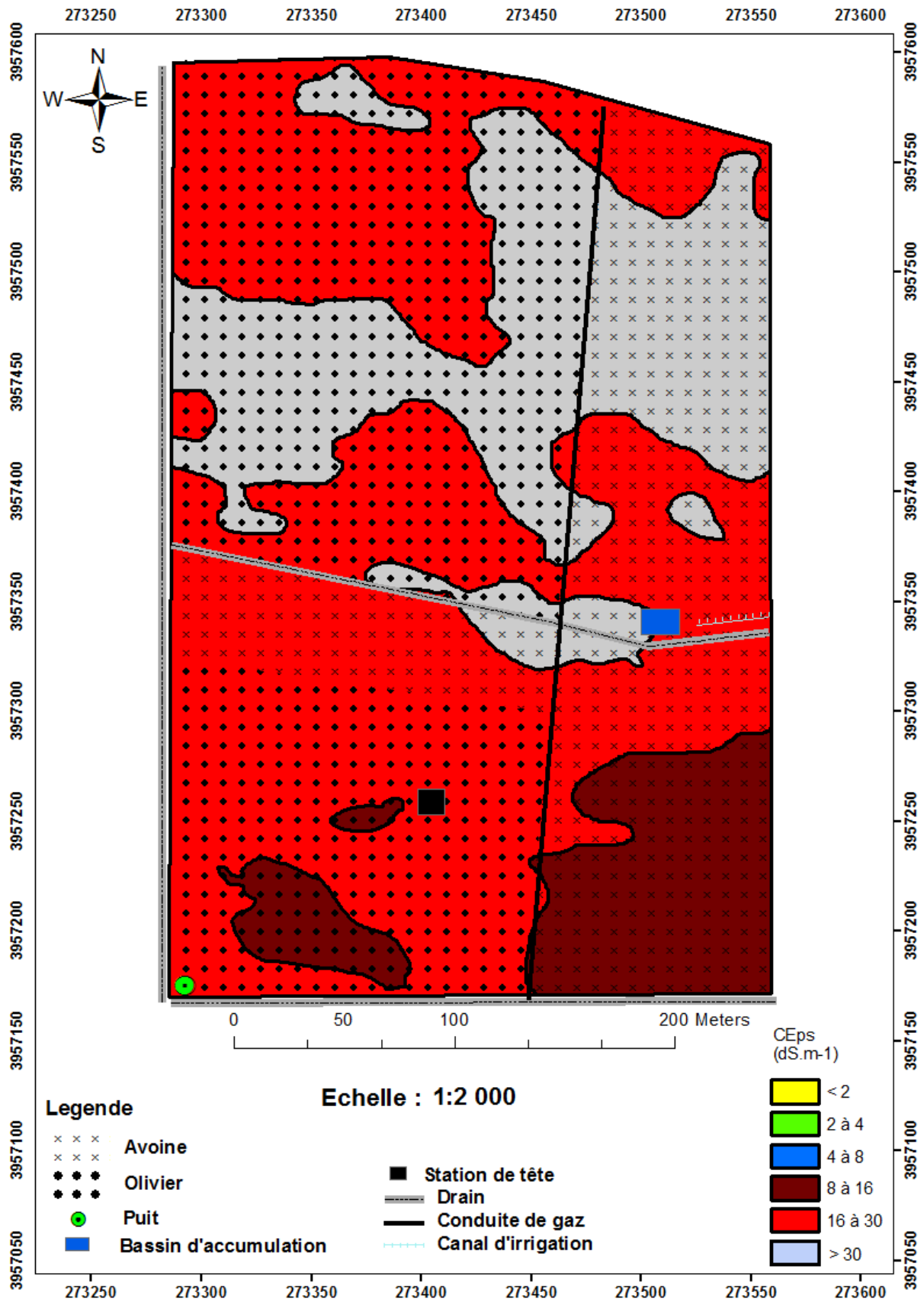


Figure 51. Carte de salinité de l'horizon de profondeur (75-100cm) (Juin 2012).

2) Distribution spatiale de la salinité (campagne Novembre 2012)

a) Distribution de la salinité dans l'horizon de surface (0-25cm)

La **figure 52** montre une prédominance des sols salés et très salés et la disparition de la classe de la salinité ($< 2 \text{ dS.m}^{-1}$).

- **Les sols non salins** ($\text{CE}_{\text{psc}} < 2 \text{ dS/m}$) sont inexistants ;
- **Les sols légèrement salins** ($2 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 4 \text{ dS.m}^{-1}$) occupent 0.6 ha soit 5% et se répartissent sur sud-ouest de la parcelle;
- **Les sols salins** ($4 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 8 \text{ dS.m}^{-1}$) occupent une superficie de 4.5 ha, soit 40% et occupent le sud de la parcelle, avec quelques plages au nord;
- **Les sols très salins** ($8 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 16 \text{ dS.m}^{-1}$) occupent plus de la moitié de la parcelle soit 6.2 ha (55 %) et sont concentrés au nord et au centre de la parcelle;
- **Les sols extrêmement salins** ($16 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 30 \text{ dS.m}^{-1}$) sont inexistants;
- Les sols avec une CE_{psc} supérieure à 30 dS.m^{-1} sont inexistants.

b) Distribution de la salinité dans l'horizon de sub-surface (25-50cm)

La **figure 53** montre une prédominance des sols extrêmement salés et la disparition des classes de salinité ($< 16 \text{ dS.m}^{-1}$). Cependant, il y a l'apparition, dans la partie nord de la parcelle, de quelques plages de salinité ($> 30 \text{ dS.m}^{-1}$).

- **Les sols non salins** ($\text{CE}_{\text{psc}} < 2 \text{ dS.m}^{-1}$) sont inexistants ;
- **Les sols légèrement salins** sont inexistants ;
- **Les sols salins** ($4 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 8 \text{ dS.m}^{-1}$) sont inexistants ;
- **Les sols très salins** ($8 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 16 \text{ dS.m}^{-1}$) occupent une faible proportion de 0.8 ha (soit 7%), au sud-ouest et le sud-est de la parcelle(Fig.);
- **Les sols extrêmement salins** ($16 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 30 \text{ dS.m}^{-1}$) sont prédominants et occupent 10 ha, soit 88 %, (Fig.);
- Les sols avec une CE_{psc} supérieure à 30 dS.m^{-1} ne représentent que quelques plages (0.5 ha, soit 5%), au nord-est et nord-ouest de la parcelle.

c) Distribution de la salinité dans l'horizon (50-75cm)

La **figure 54** montre une prédominance des sols extrêmement salés la disparition des classes de salinité ($< 16 \text{ dS.m}^{-1}$). Cependant, il y a l'apparition de quelques plages de salinité ($> 30 \text{ dS.m}^{-1}$), dans la partie nord de la parcelle.

- **Les sols non salins** ($\text{CE}_{\text{psc}} < 2 \text{ dS.m}^{-1}$) sont inexistants ;
- **Les sols légèrement salins** sont inexistants ;
- **Les sols salins** ($4 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 8 \text{ dS.m}^{-1}$) sont inexistants ;

- **Les sols très salins** ($8 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 16 \text{ dS.m}^{-1}$) occupent une faible proportion représentées par quelques plages au sud-est et au sud-ouest de la parcelle (0.8 ha, soit 7%);
- **Les sols extrêmement salins** ($16 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 30 \text{ dS.m}^{-1}$) occupent 6.6 ha, soit 58%, au sud, au centre et quelques plages au nord –ouest de la parcelle;
- Les sols, avec une CE_{psc} supérieure à 30 dS.m^{-1} , occupent le reste de la parcelle (3.9 ha, soit 35%), et ils rencontrés au nord de la parcelle.

d) Distribution de la salinité dans l'horizon de profondeur (75-100cm)

La **figure 55** montre une prédominance des sols extrêmement salés la disparition des classes de salinité ($< 16 \text{ dS.m}^{-1}$). Cependant, il y a l'apparition, dans la partie nord de la parcelle, de quelques plages de salinité ($> 30 \text{ dS.m}^{-1}$);

- **Les sols non salins** ($\text{CE}_{\text{psc}} < 2 \text{ dS.m}^{-1}$) sont inexistantes;
- **Les sols légèrement salins** ($2 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 4 \text{ dS.m}^{-1}$) sont inexistantes ;
- **Les sols salins** ($4 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 8 \text{ dS.m}^{-1}$) sont inexistantes;
- **Les sols très salins** ($8 \text{ dS/m} < \text{CE}_{\text{psc}} < 16 \text{ dS/m}$) occupent une faible proportion représentées par quelques plages au sud-est et au sud-ouest de la parcelle (1 ha, soit 9%);
- **Les sols extrêmement salins** ($16 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 30 \text{ dS.m}^{-1}$) occupent 5.4 ha, soit 48 %, au sud, au centre et quelques plages au nord –ouest de la parcelle;
- Les sols, avec une CE_{psc} supérieure à 30 dS.m^{-1} , occupent le reste de la parcelle (4.9 ha, soit 43%), et sont rencontrés au nord de la parcelle.

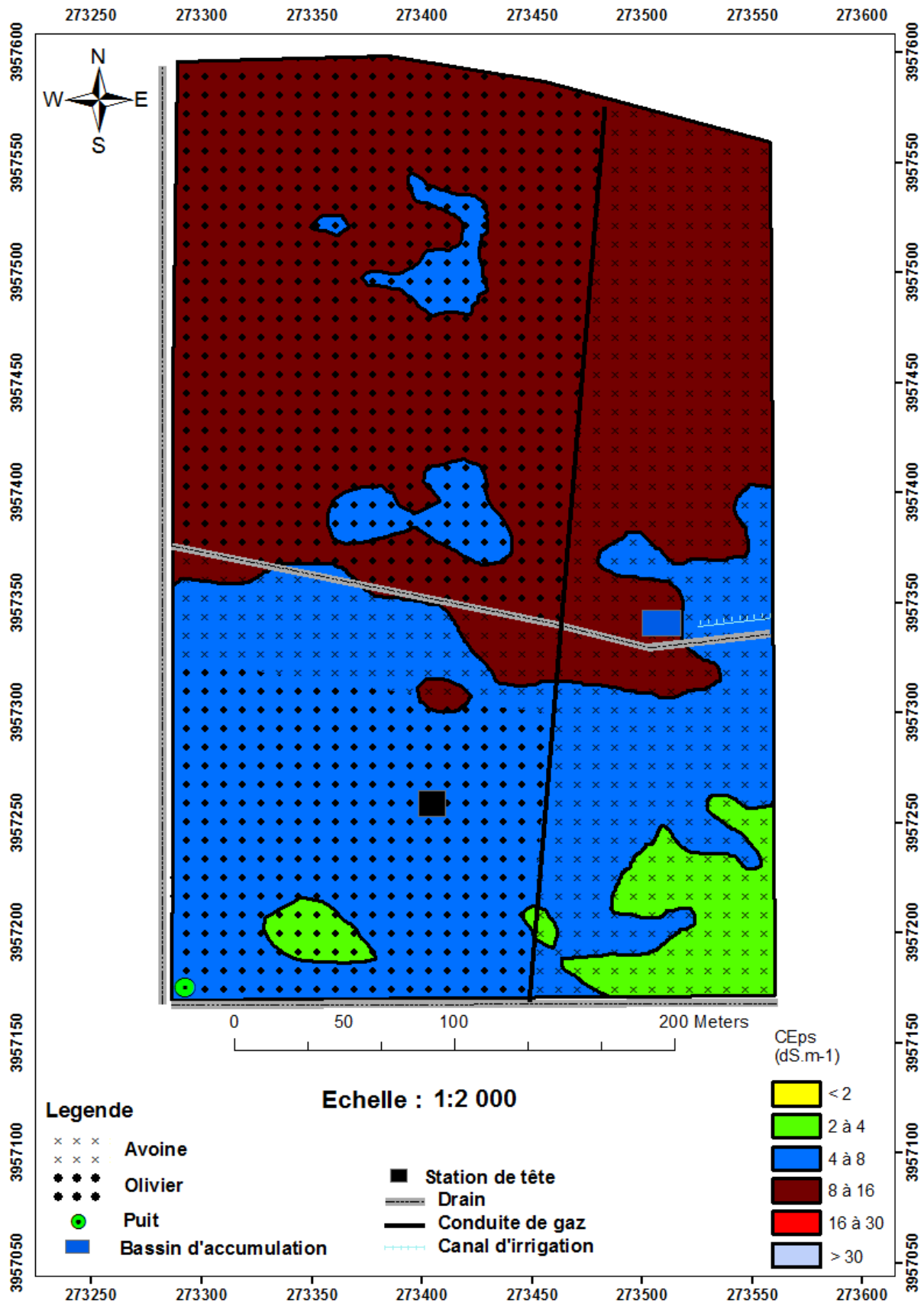


Figure 52. Carte de salinité de l'horizon de surface (0-25cm) (Novembre 2012).

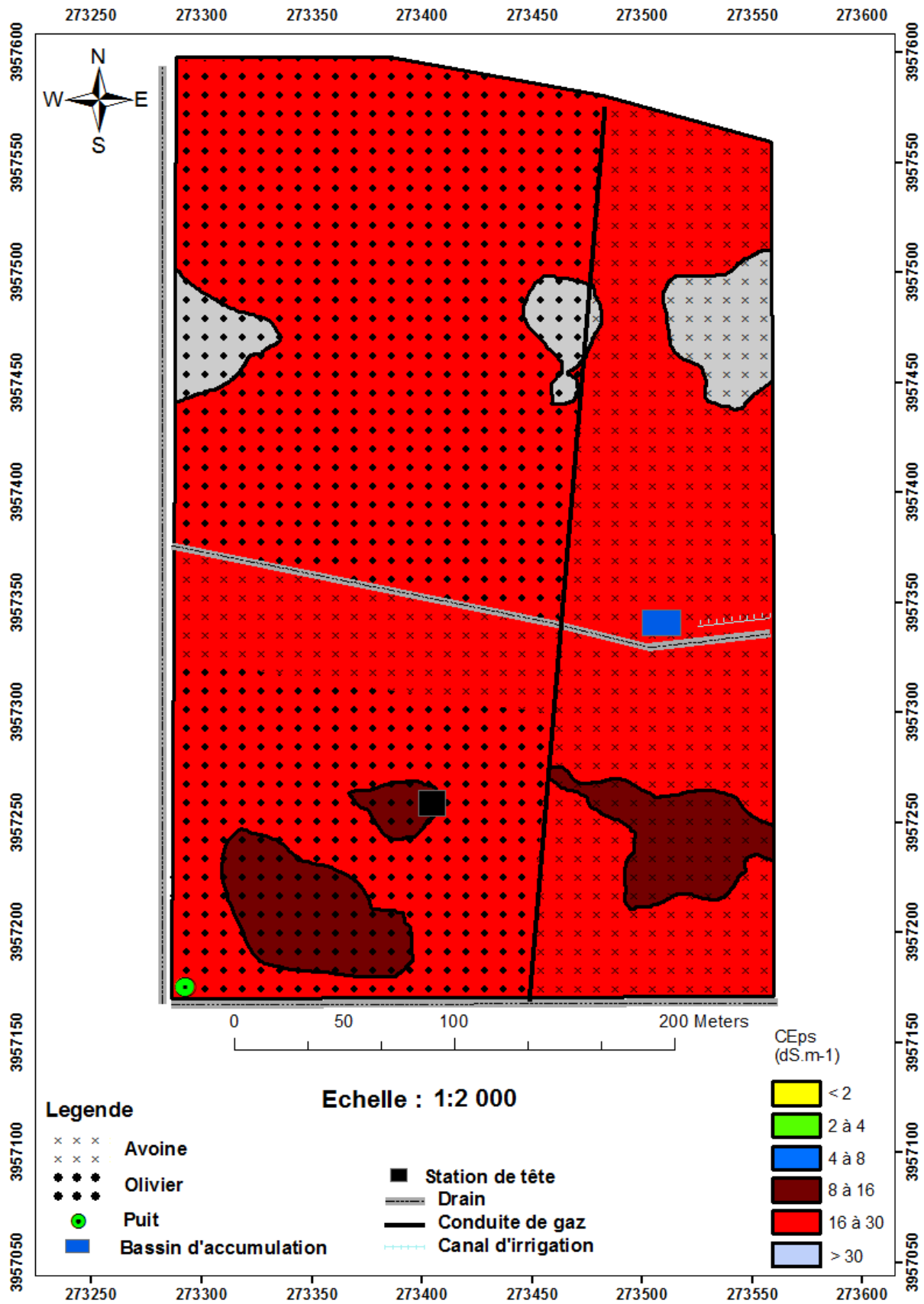


Figure 53. Carte de salinité de l'horizon de sub-surface (25-50cm) (Novembre 2012).

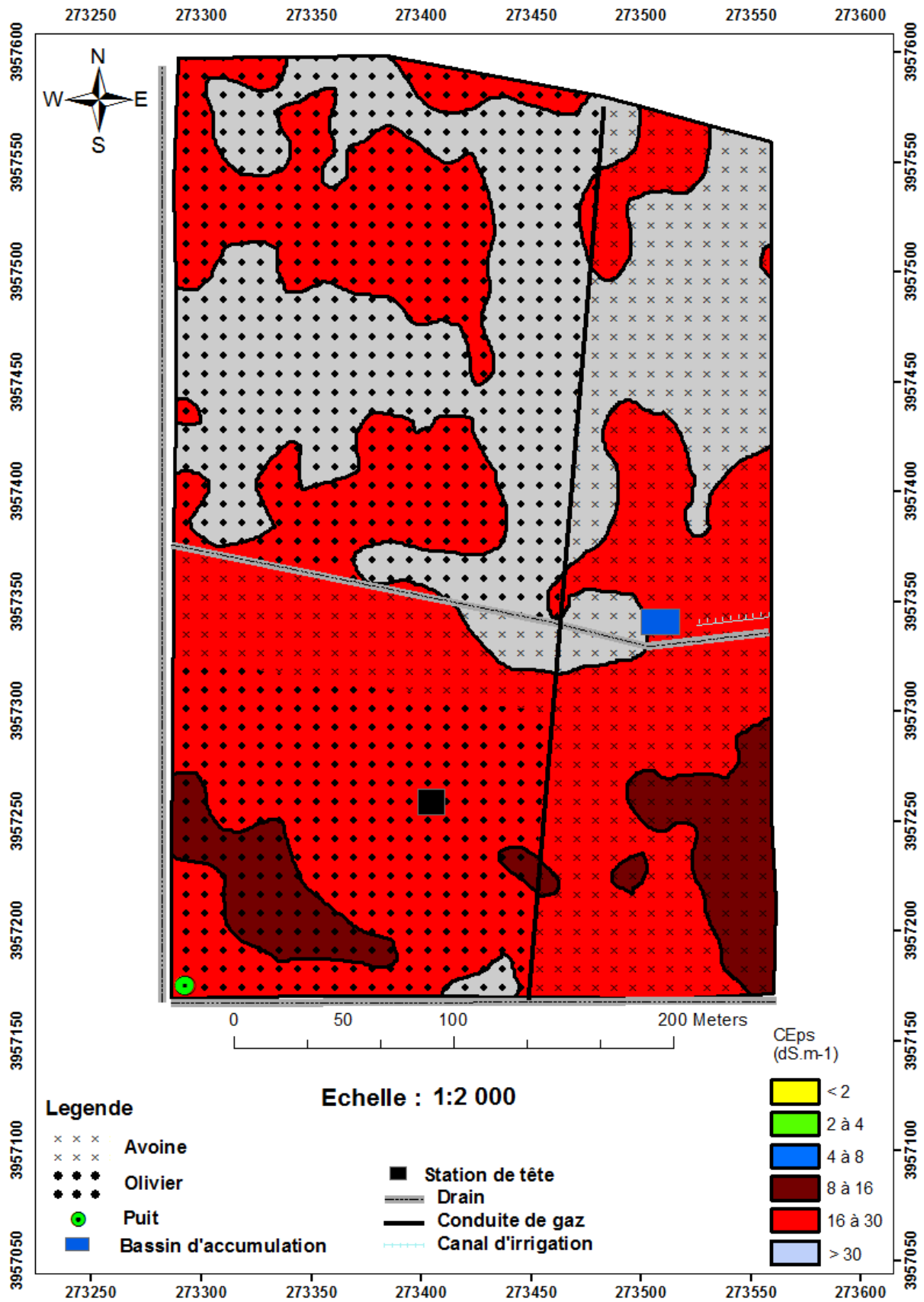


Figure 54. Carte de salinité de l'horizon (50-75cm) (Novembre 2012).

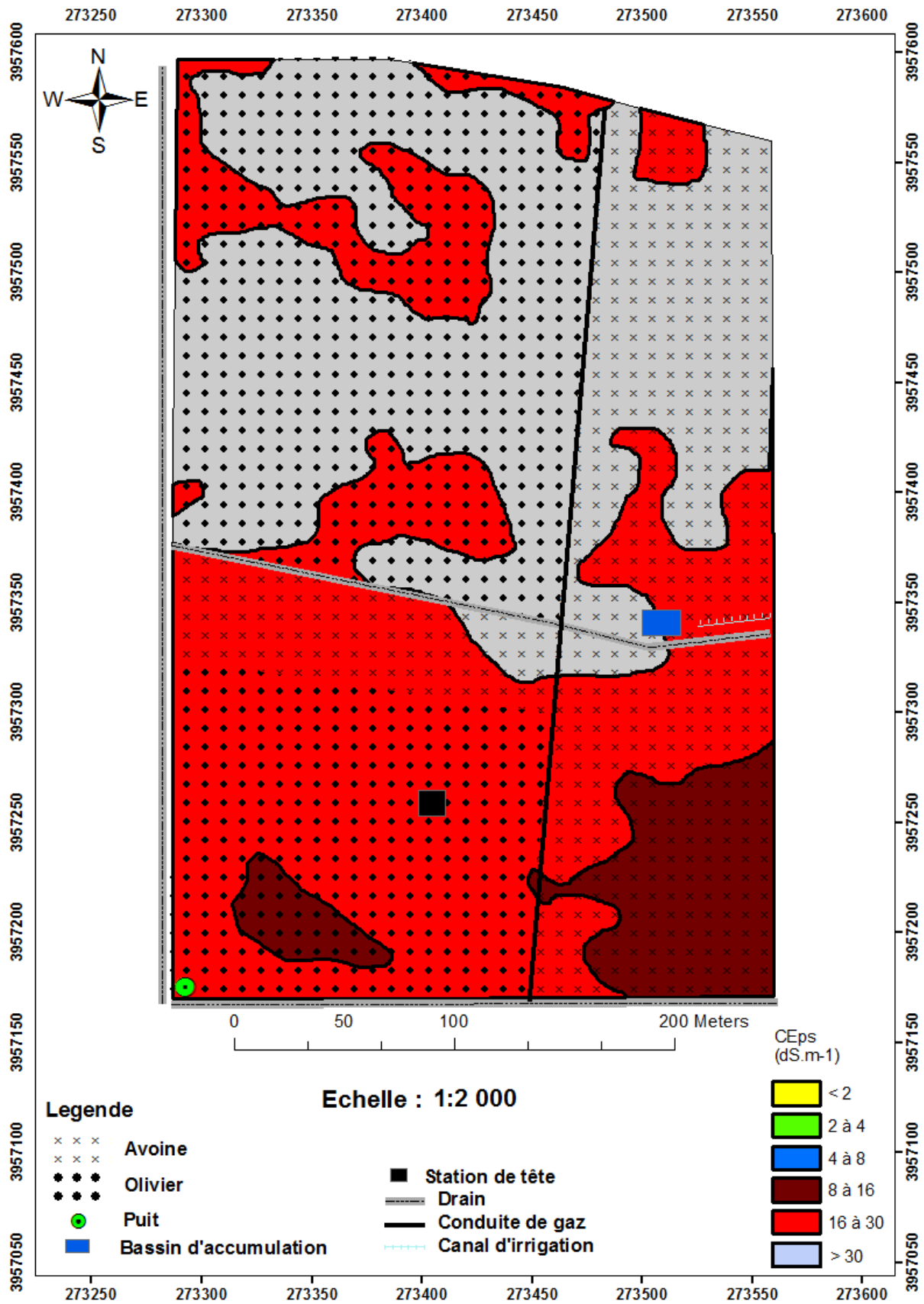


Figure 55. Carte de salinité de l'horizon de profondeur (75-100cm)(Novembre 2012).

VI.6. Evolution spatio-temporelle de la salinité

La variabilité spatiale de la salinité, au niveau de la parcelle, est particulièrement marquée par toute une gamme de valeurs de la CE_{psc} . De plus, on observe un gradient de salinité croissant vers le nord de la parcelle.

1) Evolution spatio-temporelle de la salinité dans l'horizon de surface (0-25cm)

La répartition spatiale de la salinité, dans l'horizon de surface, montre une structure spatiale analogue des cartes obtenues en Juin et en Novembre 2012 (**fig.49 et 53**). En effet, les plus fortes concentrations sont observées dans le nord et les plus faibles concentrations dans le sud de la parcelle, pour les deux campagnes de mesures. Cependant, les conductivités électriques sont plus fortes en Novembre qu'en Juin (**Tab.44 ; fig.57 et 58**).

- **Sols non salins** ($CE_{psc} < 2 \text{ dS.m}^{-1}$) : ils sont faiblement représentés, en Juin, (0.6 ha) mais inexistant, en Novembre ;
- **Sols moyennement salins** ($2 \text{ dS.m}^{-1} < CE_{psc} < 4 \text{ dS.m}^{-1}$) : leur superficie est passée de 1.4 ha (13.24 %), en Juin, à 0.6 ha (7.94 %), en Novembre, soit une réduction de 5.3 % ;
- **Sols salins** ($4 \text{ dS.m}^{-1} < CE_{psc} < 8 \text{ dS.m}^{-1}$) : leur superficie est passée de 2.97 ha (26.4%), en Juin, à 4.55 ha (40.4 %), en Novembre, soit une augmentation de 14 % ;
- **Sols très salins** ($8 \text{ dS.m}^{-1} < CE_{psc} < 16 \text{ dS.m}^{-1}$) : leur superficie est passée de 5.7 ha (50.67%), en Juin, à 6.1 ha (54.2 %) en Novembre, soit une augmentation de 3.53 % ;
- **Sols extrêmement salins** ($16 \text{ dS.m}^{-1} < CE_{psc} < 30 \text{ dS.m}^{-1}$) : ils occupent 0.48 ha (4.27 %) de la superficie, en Juin, mais inexistant, en Novembre.

2) Evolution spatio-temporelle de la salinité dans l'horizon de sub-surface (25-50cm)

Selon le **tableau 44 et les figures 57 et 58**, l'horizon de sub-surface est caractérisé par une forte augmentation de la salinité en Novembre ($CE_{psc} > 8 \text{ dS/m}$) et la disparition des classes de salinité inférieures à 8 dS/m. Ceci pourrait être dû aux remontées des sels par capillarité, pendant la période estivale, jusqu'à l'horizon de sub-surface. En effet, l'apparition de très fortes concentrations en sels ($CE_{psc} > 30 \text{ dS/m}$), au nord de la parcelle, témoigne de cette situation.

- **Les sols non salins** ($CE_{psc} < 2 \text{ dS.m}^{-1}$) et les sols moyennement salins ($2 \text{ dS.m}^{-1} < CE_{psc} < 4 \text{ dS.m}^{-1}$) sont inexistant pendant toute la période (Juin à Novembre) ;
- **Les sols salins** ($4 \text{ dS.m}^{-1} < CE_{psc} < 8 \text{ dS.m}^{-1}$) sont représentés par une très faible plage de 0.1 ha, en Juin ;

- **Les sols très salins** ($8 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 16 \text{ dS.m}^{-1}$) : avec une superficie de 4.46 ha (39.68%), en Juin, elle diminue jusqu' à 0.65 ha (5.78 %), en Novembre, soit une réduction de 33.9 % ;
- **Les sols extrêmement salins** ($16 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 30 \text{ dS.m}^{-1}$) : leur superficie a évolué de 5.7 ha (59.52%), en Juin, à 10.2 ha (89.96 %), en Novembre, soit une augmentation de 30.44 % ;
- Les sols à $\text{CE}_{\text{psc}} > 30 \text{ dS.m}^{-1}$ sont inexistantes en Juin, mais représentent 4.27% (soit 0.48 ha) de la superficie, en Novembre.

IV.4.3. Evolution spatio-temporelle de la salinité dans l'horizon (50-75cm)

Le **tableau 44 et les figures 57 et 58**, montre que l'horizon (50-75cm) est caractérisé par une forte augmentation de la salinité en Novembre ($\text{CE}_{\text{psc}} > 16 \text{ dS.m}^{-1}$) et la réduction des classes de salinité ($8 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 16 \text{ dS.m}^{-1}$) et ($16 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 30 \text{ dS.m}^{-1}$) ;

- **Les sols non salins** ($\text{CE}_{\text{psc}} < 2 \text{ dS.m}^{-1}$), moyennement salins ($2 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 4 \text{ dS.m}^{-1}$) et **les sols salins** ($4 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 8 \text{ dS.m}^{-1}$) sont inexistantes pendant toute la période (Juin à Novembre) ;
- **Les sols très salins** ($8 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 16 \text{ dS.m}^{-1}$) : leur superficie est passée de 1.73 ha (14.93%), en Juin, à 0.63 ha (5.6 %), en Novembre, soit une réduction de 9.33 % ;
- **Les sols extrêmement salins** ($16 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 30 \text{ dS.m}^{-1}$) : leur superficie a légèrement diminué, elle était de 7.66 ha (65.16%), en Juin, à 6.58 ha (58.44 %), en Novembre, soit une réduction de 6.72 % ;
- Les sols à $\text{CE}_{\text{psc}} > 30 \text{ dS.m}^{-1}$: leur superficie est évoluée de 2.24 ha (19.91%), en Juin, à 4.05 ha (35.97 %), en Novembre, soit une augmentation de 16.06 %.

IV.4.4. Evolution spatio-temporelle de la salinité dans l'horizon de profondeur (75-100cm)

Le **tableau 44 et les figures 56 et 57**, montre que l'horizon de profondeur est caractérisé par une forte augmentation de la salinité en Novembre ($\text{CE}_{\text{psc}} > 16 \text{ dS/m}$) et la réduction des classes de salinité ($8 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 16 \text{ dS.m}^{-1}$) et ($16 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 30 \text{ dS.m}^{-1}$).

- **Les sols non salins** ($\text{CE}_{\text{psc}} < 2 \text{ dS.m}^{-1}$), moyennement salins ($2 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 4 \text{ dS.m}^{-1}$) et **les sols salins** ($4 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 8 \text{ dS.m}^{-1}$) sont inexistantes pendant toute la période (Juin à Novembre) ;
- **Les sols très salins** ($8 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 16 \text{ dS.m}^{-1}$) : leur superficie est passée de 1.4 ha (12.44%), en Juin, à 0.91 ha (8.09 %), en Novembre, soit une réduction de 4.35 % ;

- **Les sols extrêmement salins** ($16 \text{ dS.m}^{-1} < \text{CE}_{\text{psc}} < 30 \text{ dS.m}^{-1}$) : leur superficie est passée de 6.73 ha (59.82%), en Juin, à 5.2 ha (46.22 %), en Novembre, soit une réduction de 13.6 % ;
- Sols à $\text{CE}_{\text{psc}} > 30 \text{ dS.m}^{-1}$: leur superficie est passée de 3.12 ha (27.73%), en Juin, à 5.14 ha (45.69 %), en Novembre, soit une augmentation de 17.96 %.

Tableau 44. Superficie des classes de salinité en hectares (Ha) des deux campagnes de mesures.

Profondeur (cm)	Superficie en Ha (Juin 2012)					
	Non salin	Peu salin	Salin	Très Salin	Extrêmement salin	Hyper salin
0-25cm	0,6	1,5	3,1	5,7	0,5	0,0
25-50cm	0,0	0,0	0,1	4,5	6,7	0,0
50-75cm	0,0	0,0	0,0	1,6	7,4	2,2
75-100cm	0,0	0,0	0,0	1,4	6,8	3,1
Profondeur (cm)	Superficie en Ha (Novembre 2012)					
	Non salin	Peu salin	Salin	Très Salin	Extrêmement salin	Hyper salin
0-25cm	0,0	0,6	4,5	6,2	0,0	0,0
25-50cm	0,0	0,0	0,0	0,8	10,0	0,5
50-75cm	0,0	0,0	0,0	0,8	6,6	3,9
75-100cm	0,0	0,0	0,0	1,0	5,4	4,9

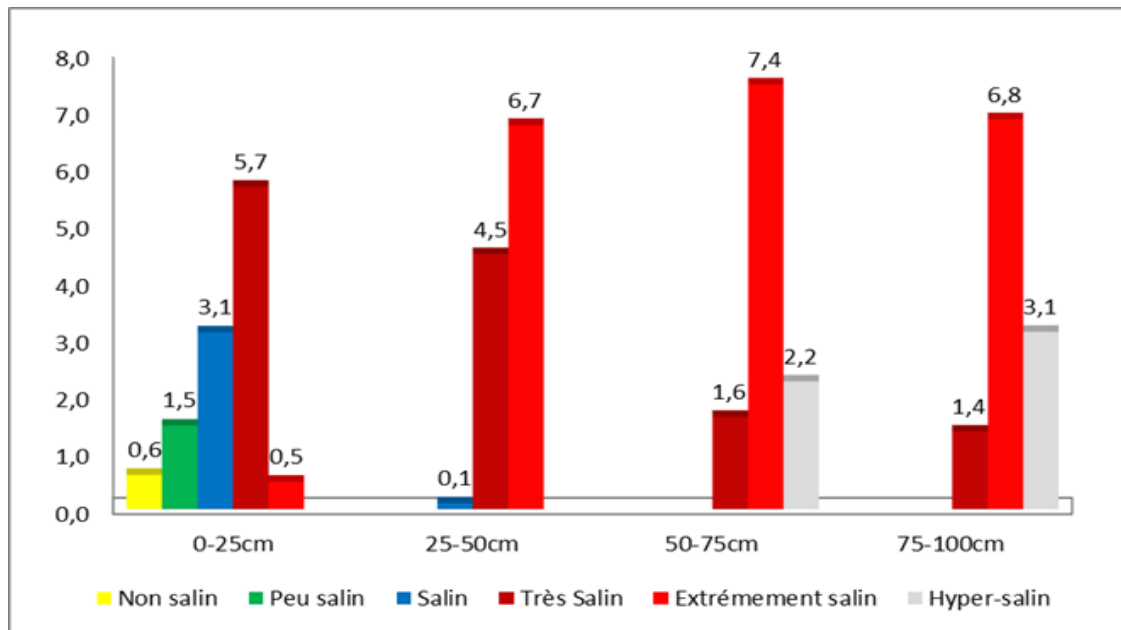


Figure 56. Répartition en (Ha) des classes de salinité dans les horizons (Juin 2012)

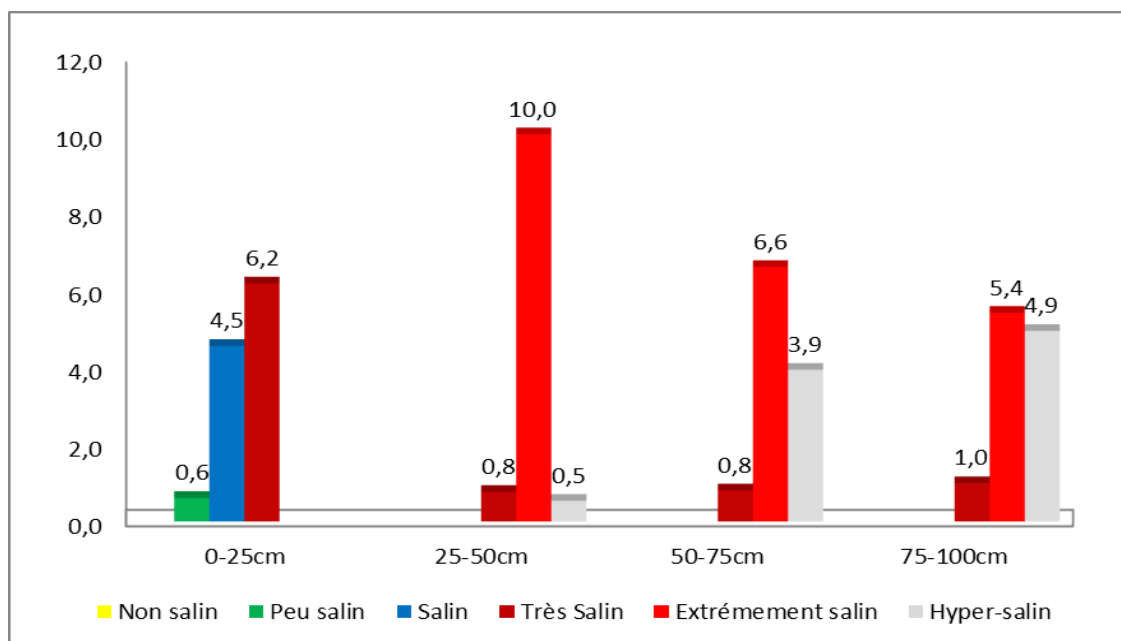


Figure 57. Répartition en (Ha) des classes de salinité dans les horizons (Novembre 2012)

VI.7. Répartition de l'occupation du sol, en fonction des classes de salinité

Dans ce chapitre nous présentons les résultats de la répartition de l'occupation du sol de la parcelle (en Ha), composée d'oliviers et d'avoine, en fonction des différents niveaux de salinités que nous avons définis et les dangers que peut présenter la salinité sur la durabilité du système agricole de la parcelle étudiée.

L'examen du **tableau 45** montre que, sur les 11.3 Ha de la superficie, l'olivier occupent occupe 6.7Ha (soit 59.5%) et l'orge 4.6 Ha (soit 40.5%). Aussi cette répartition a pu être détaillée, en fonction des classes de salinité, par une simple intersection entre la couche d'information (classes de salinité) et la couche (occupation du sol). Cette étape a été réalisée par le logiciel ArcMap par la création d'une troisième couche d'information qui représente le type d'occupation en fonction des classes de salinité pour chaque horizon.

Les résultats indiquent que la superficie affectée par une faible salinité ($CEps < 4 \text{ dS.m}^{-1}$) ne représente qu'une faible proportion par rapport à la superficie de la parcelle (11.3 ha). Pour la campagne du mois de Juin, cette superficie n'est que de 1.9% pour l'olivier et 0.9% pour l'avoine. Alors que pour la campagne de Novembre, elle évolue vers les classes supérieures.

Par ailleurs, la superficie affectée par une forte salinité ($CEps > 8 \text{ dS.m}^{-1}$), représente, respectivement, pour l'olivier, 52.9% et 53% pour les campagnes de mesures Juin et Novembre. Alors que pour l'avoine, elle passe de 35.5%, en Juin, à 35.3%, en Novembre.

Pour la superficie affectée par une salinité de 4 à 8 dS.m^{-1} , elle est de 4.7% pour l'olivier en Juin et 5.8% en Novembre, alors que pour l'avoine, elle passe de 2.4%, en Juin, à 4.2%, en Novembre.

Tableau 45. Répartition de l'occupation du sol en fonction des classes de salinité.

Classes de salinité	Juin 2012		Novembre 2012	
	Olivier (%)	Avoine (%)	Olivier (%)	Avoine (%)
Non salé ($CEps < 2 \text{ dS.m}^{-1}$)	0,5	0,9	0	0
Peu salé ($2 < CEps < 4 \text{ dS.m}^{-1}$)	1,4	1,9	0,2	1,1
Salé ($4 < CEps < 8 \text{ dS.m}^{-1}$)	4,7	2,4	5,8	4,2
Très salé ($8 < CEps < 16 \text{ dS.m}^{-1}$)	15,0	14,0	11,0	8,2
Extrêmement salé ($16 < CEps < 30 \text{ dS.m}^{-1}$)	31,0	16,5	28,9	19,7
Hyper-salé ($CEps > 30 \text{ dS.m}^{-1}$)	6,9	4,9	13,4	7,4
$CEps > 8 \text{ dS.m}^{-1}$	52,9	35,5	53,4	35,3
$CEps < 4 \text{ dS.m}^{-1}$	1.9	2.8	0,2	1.1

VI.8. Caractérisation des sols

VI.8.1. Introduction

L'étude pédologique a conduit à l'observation de trois profils de sols, répartis sur toute la parcelle, selon un transect du Sud-Est au Nord-Ouest.

Le volet de ce chapitre est réservé à la présentation et la discussion des paramètres morphologiques et analytiques des sols de la parcelle d'étude qui sont présentées et discutées dans le détail.

VI.8.2. Caractérisation du profil A

1) Données générales

Le profil se situe au sud-est de la parcelle d'étude, délimitée au sud par un drain tertiaire, et au nord par autre drain tertiaire.

- Coordonnées géographiques : 0° 29' 44.8'' longitude Est et 35° 43' 59'' de latitude Nord;
- Altitude : 63m ;
- Date de description: 16/09/2012 ;
- Temps : Ciel clair ;
- Précédent climatique : Il a plu dans la région les jours précédents.
- Topographie : Terrain plat ;
- Matériaux d'origines : Alluvions ;
- État de surface : Terrain cultivé (avoine)

2) Description morphologique du profil A

Anp (0 à 28cm) : Sec; couleur à l'état sec 10 YR 6/3 argilo-limoneux; structure polyédrique angulaire fine à moyenne; poreux; plastique; collant; peu compacte; friable; absence d'éléments grossiers; moyennement organique; présence de fissures, présence de racines fines, forte activité biologique ; présence de tâches blanchâtres hétérogènes ; vive effervescence à l'Hcl généralisée ; transition nette régulière.

BCny : (28 à 76 cm) : Frais; couleur 10YR 6/4; argilo-limoneux; structure polyédrique anguleuse grossière; collant ; compact; peu friable; porosité structurale importante; absence d'éléments grossiers; présence de fentes verticale(plus épaisses au sommet et moins épaisses à la base); présence de racines mortes; moyennement organique; activité biologique moyenne; plastique; présence de tâches blanchâtres sous forme de pseudo-mycéliums; vive effervescence à l'Hcl généralisée; transition nette et régulière.

Cny1 : (76 à 95 cm) : humide; couleur 10YR 6/4; limono-argileux; structure massive; compact ; peu friable; collant; plastique; peu poreux; absence d'éléments grossiers; non or-

ganique; présence de traces noirâtres correspondant à des anciennes racines, faible activité biologique; présence de tâches blanchâtres moins intenses que l'horizon sus-jacent ; vive effervescence à l'Hcl généralisée ; transition régulière et nette.

Cny2 : (95 à 150 cm) : humide; couleur 10YR 7/4; limoneux; structure massive; peu compact ; très friable; collant; plastique; très peu poreux; très fragile, absence d'éléments grossiers; non organique; présence de traces noirâtres correspondant à des anciennes racines, faible activité biologique; présence des taches blanchâtres moins intenses que l'horizon sus-jacent; présence de tâches d'hydromorphie (oxydo-réduction) de couleur grisâtres et ocres, vive effervescence à l'Hcl généralisée.

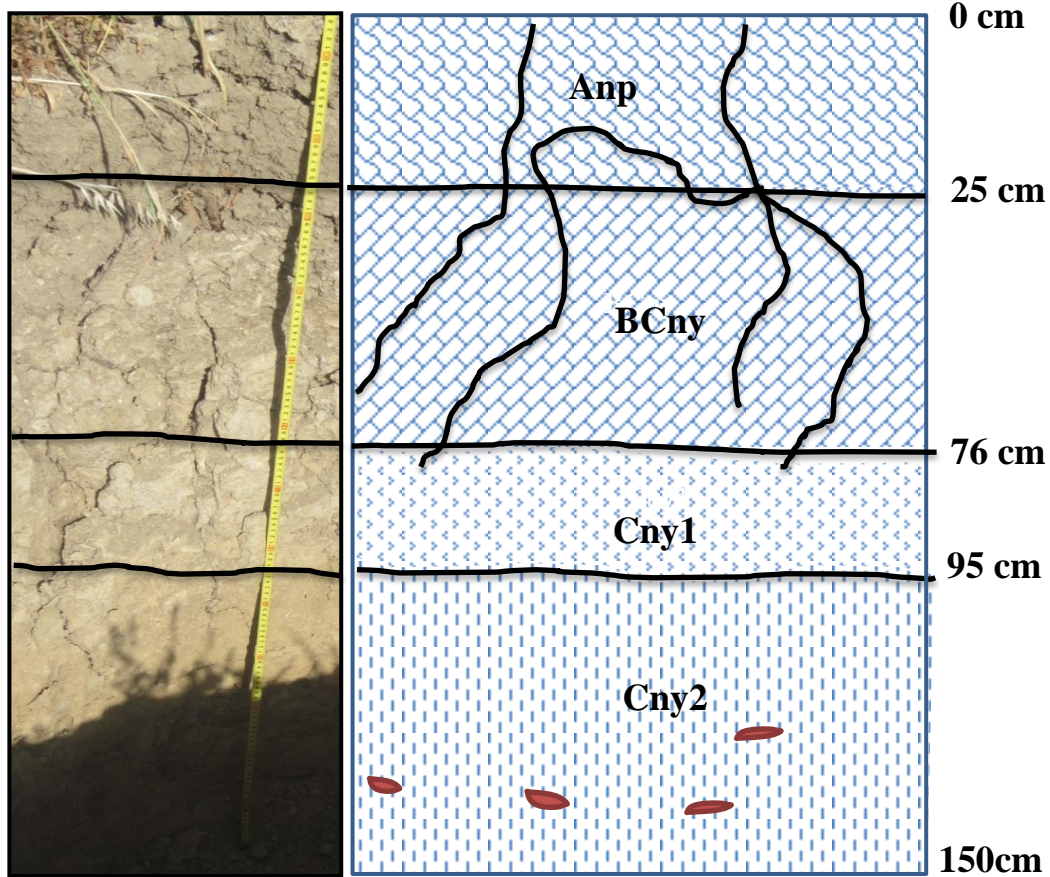


Photo 6. Profil A

Figure 58. Coupe schématique du profil A



Photo 7. Fentes de retrait

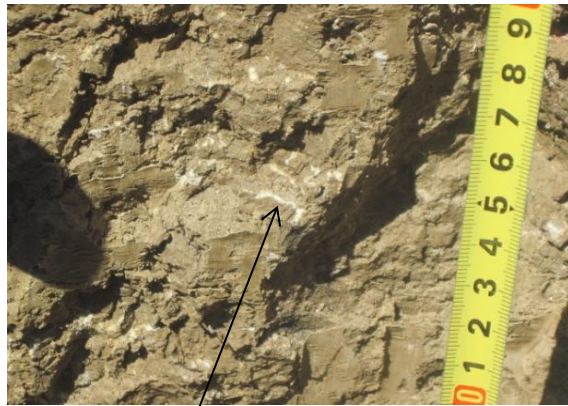


Photo 8. Accumulations gypseuses

Ce profil est développé sur des alluvions, sa profondeur est supérieure à 150 cm. Il est caractérisé par la présence de fentes jusqu'à une profondeur de 70 cm du profil. Ces fentes sont plus larges en surface (1 à 2cm) et deviennent moins épaisses en profondeur.

- **L'horizon de surface (Anp)** est un horizon cultural, bien différencié et organique. Il se distingue par sa structure polyédrique angulaire fine et sa texture argilo-limoneuse;
- **L'horizon de sub-surface (BCny)** se distingue du premier par sa structure polyédrique anguleuse grossière et par la présence de tâches blanchâtres sous forme de pseudo-mycéliums ;
- **Le troisième horizon (Cny1)** se caractérise par sa texture limono-argileuse et sa structure massive à éclats anguleux et par la présence de tâches blanchâtres moins nombreuses que l'horizon sus-jacent.
- **L'horizon de profondeur (Cny2)** est limoneux et il est marqué par la présence de quelques tâches d'hydromorphie (oxydo-réduction < 5%).

3) Résultats analytiques du profil A

a) Propriétés physiques et physico-chimiques du profil A

Les résultats analytiques sont présentés dans le **tableau.21 de l'Annexe.10**, et les résultats statistiques sont présentés dans le **tableau.46**.

- Le gypse

Les teneurs en gypse sont faibles dans l'horizon de surface, elles oscillent entre 2.16 % et 5.6 %, avec une moyenne du profil de 4.6 % et un coefficient de variabilité élevé. Ces valeurs sont cependant supérieures à 5% à partir de l'horizon de sub-surface.

- Le calcaire

Les teneurs en calcaire sont homogènes au niveau du profil, elles varient de 11.8% à 16.6% pour le calcaire total et de 6.3 à 7.3%, pour le calcaire actif, avec une moyenne respective de 14.8 et 6.8 % et un faible coefficient de variabilité. Le profil, est moyennement calcaire.

- La matière organique

Le taux de matière organique diminue avec la profondeur, et varie entre 1.3%, en profondeur à 3.8 % dans l'horizon cultural (Ap), avec une moyenne de 2.1 % et un coefficient de variabilité très élevé.

- La granulométrie

Nous remarquons que les fractions granulométriques prédominantes sont les fractions argileuses et limoneuses. Dans l'horizon de surface, les argiles et les limons ont pratiquement les mêmes taux qui sont respectivement de 45 et 49 %. Dans l'horizon de sub-surface, la fraction argileuse prédomine avec un taux de 53 %. La fraction sableuse est très peu représentée et varie entre 4 et 7 %. Nous observons au niveau des horizons profonds une diminution de la fraction argileuse (53 à 20%) et une forte augmentation de la fraction limoneuse (43 à 73 %). Tous les horizons ont des textures argilo-limoneuses sauf pour le troisième horizon qui présente une texture limono-argileuse et l'horizon de profondeur qui présente une texture limoneuse. Nous remarquons aussi que le coefficient de variabilité pour l'argile est élevé pour ce profil.

Tab.46. Statistiques descriptives des propriétés physiques et physico-chimiques du profil A

Paramètres	M0 %	Calcaire (%)	Gypse %	Granulométrie (%)		
				Argile	Limon	Sable
<i>Moy</i>	2,1	14,8	4,6	38,3	55,8	6,0
<i>Max</i>	3,7	16,6	5,6	53,0	73,0	7,0
<i>Min</i>	1,3	14,0	4,6	20,0	43,0	4,0
<i>CV %</i>	54,58	11,8	35,41	37,18	23,4	23,57

b) Composition du complexe adsorbant

Les résultats du complexe adsorbant sont présentés dans le **tableau.22 de l'Annexe.10**, et les résultats statistiques sont présentés dans le **tableau.47**.

- La capacité d'échange cationique (CEC)

Les valeurs de la capacité d'échange cationique sont comprises entre 15.6 et 35.4 meq/100g de terre. La moyenne de la CEC est de 29.3 (meq/100g) et le coefficient de variation est modéré (15.6%).

- Les bases échangeables

La garniture cationique du complexe adsorbant (**Tab.47 ; Fig.59**) révèle que le calcium échangeable constitue l'essentiel du complexe adsorbant avec un taux moyen de 51 % de la CEC, ensuite vient le sodium (26%), le magnésium (20%), et le potassium (3%).

La moyenne du calcium échangeable dans le profil est de 15.6 meq/100g et le coefficient de variation est faible (13.6%). Le magnésium présente des teneurs appréciables de la capacité d'échange cationique (20 %) avec une moyenne de 6 meq/100g et un coefficient de variation modéré de 33 %, alors que les teneurs du potassium sont relativement faibles (3%) pour une moyenne de 01 meq/100g et un coefficient de variation élevé de 47.6%.

Pour le sodium, il présente des teneurs qui oscillent entre 20.7 et 44 % de la CEC pour une moyenne de 8 meq/100g, avec un coefficient de variation modéré de 26.1%. Les pourcentages de sodium échangeable $ESP > 15 \%$, au niveau de chaque horizon, suggèrent que tous les horizons sont sodiques (**USDA, 2010**).

Tableau 47. Paramètres statistiques du complexe adsorbant du profil A

Paramètres	Complexe Absorbant (meq/100g)				CEC (meq/100g)	ESP (%)
	K^+	Na^+	Mg^{++}	Ca^{++}		
<i>Min</i>	0,6	5,8	4,3	13,5	24,5	20,7
<i>Max</i>	1,6	10,8	8,4	18,4	35,4	44,0
<i>Moy</i>	1,0	8,0	6,0	15,6	29,3	28,2
<i>CV %</i>	47,6	26,1	33,0	13,6	15,6	38,8

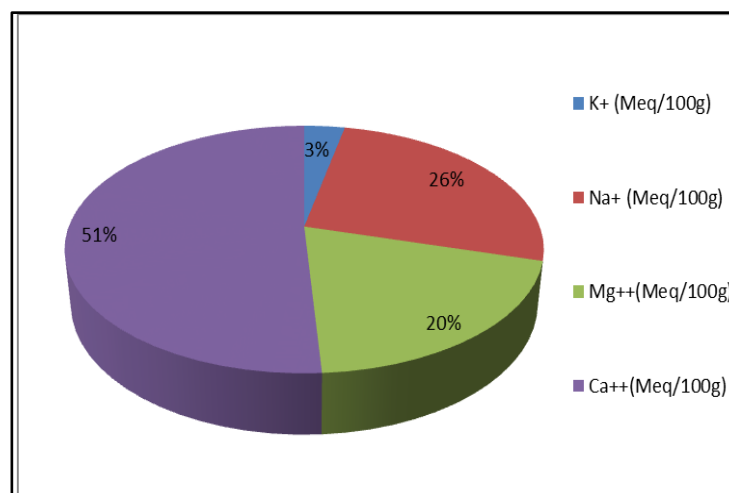


Figure 59. Composition cationique moyenne du complexe adsorbant du profil A

c) Composition de la solution du sol

Les résultats analytiques et statistiques des différents paramètres de la solution du sol sont indiqués, respectivement, dans le **tableau.23 de l'Annexe.10** et le **tableau 48**.

- La conductivité électrique

La distribution des sels en fonction de la profondeur (**Tab.48**) révèle une forte salinité de l'horizon de profondeur (CE= 23.2 dS/m) et une faible salinité de l'horizon de surface (CE= 2.42 dS/m). Cette CE est relativement plus faible que celle des autres horizons du profil. Ce phénomène serait dû à une lixiviation des sels provoquée par les pluies (la description a été réalisé après la saison humide) et qui se seraient accumulés au niveau des horizons de profondeur, provoquant une augmentation de la CE (CE=23.2dS/m). La salinité augmente sensiblement dans les deux horizons Cny1 et Cny2 pour atteindre respectivement les valeurs de 20.6 et 23.2 dS/m. Ce résultat indique que le profil salin est descendant.

- Le pH

Le **tableau 48** indique que le pH est supérieur à 8 avec une moyenne de 8.3. Ces valeurs correspondent à une réaction du sol relativement alcaline, caractéristique principale des sols calcaires et des sols salés.

- Le SAR

Les valeurs du SAR varient de 14.3 pour les horizons de surface et de sub-surface à 23.1 pour les horizons de profondeur (**Tab.48**), les faibles valeurs du SAR dans les horizons de surface et de sub-surface sont dues, probablement aux valeurs de la CE, qui ne sont pas très élevées (2.42 dS/m <CE< 9.9 dS/m).

- Les cations de la solution du sol

Selon la **figure 60**, le cation Na^+ est le plus représenté avec un taux moyen de 66.4% et une concentration qui varie entre 62 meq/l et 207 meq/l. Le Ca^{++} vient en deuxième position avec un taux de 17.6% avec des teneurs qui varient entre 9.6 meq/l et 54.2 meq/l. Le Mg^{++} se situe en troisième position avec un taux de 15.7% et des concentrations qui varient entre 12.75 meq/l et 52.54 meq/l, alors que le K^+ vient en dernière position avec un taux de 0.3%, et des teneurs qui varient entre 0.56 meq/l et 0.72 meq/l.

De ce fait, le classement des cations est de type : $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{++} > \text{Mg}^{++} > \text{K}^+$

- Les anions de la solution du sol

Selon la **figure 61**, l'anion Cl^- est le plus représenté avec un taux moyen de 72.4% et une concentration qui varie entre 55 meq/l et 218.1 meq/l. Le SO_4^- vient en deuxième position avec un taux de 26.8% avec des teneurs qui varient entre 23.1 meq/l et 60.8 meq/l. Le

HCO₃⁻ vient en dernière position avec un taux de 0.8% et des teneurs qui varient entre 1 meq/l et 2 meq/l.

Tableau 48. Statistiques descriptives des paramètres de la solution du sol du profil A

Para- mètres	pH	CE dS.m ⁻¹	Cations (meq.l ⁻¹)				Anions (meq.l ⁻¹)			SAR
			Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	
Min	8.18	2,4	61,73	9,60	12,75	0,56	55	1,0	23,1	14,28
Max	8,67	23,2	207,40	54,20	52,54	0,72	218,1	2,0	60,8	23,12
Moy	8.3	13,9	134,78	35,78	31,92	0,65	137,98	1,5	51,2	18,58
CV%	2.7	68,6	42,42	40,88	48,32	6,98	51,22	38,5	36,6	20,00

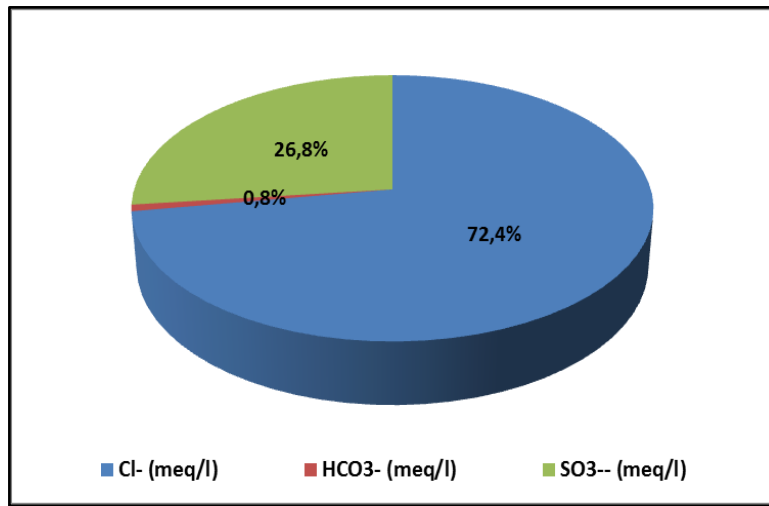


Figure 60. Répartition moyenne des cations dans la solution du sol du profil A

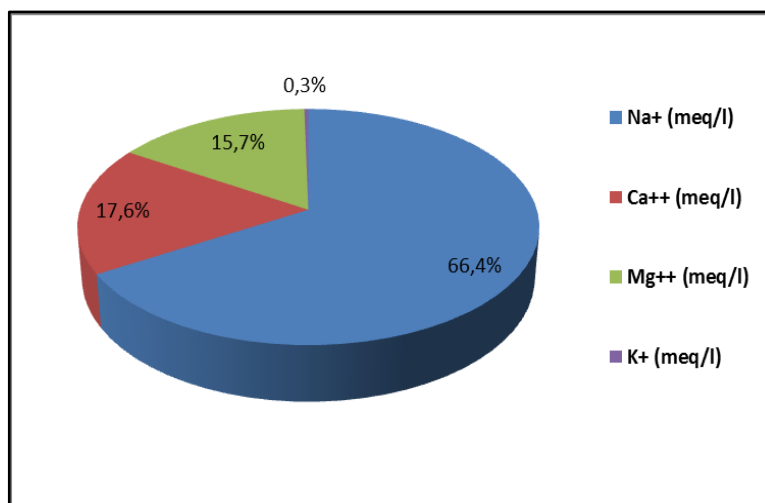


Figure 61. Répartition moyenne des anions dans la solution du sol du profil A

4) Synthèse des résultats morphologiques et analytiques

Sur le plan morphologique, le profil A se caractérise par une structure polyédrique fine dans l'horizon de surface et devient moyenne au niveau de l'horizon de sub-surface à massive vers la base.

Il est caractérisé par la présence de tâches blanchâtres qui correspondraient à des accumulations gypseuses (4.6 à 5.6%) constituant ainsi un trait morphologique et pédogénétique important de ce sol.

Les taches d'oxydoréduction sont faibles (< 5%) et n'apparaissent que dans l'horizon de profondeur.

Par ailleurs, la texture est dominée par les argiles (45 à 53%) dans la partie supérieure du profil et une augmentation des limons (58 à 73%), dans sa partie inférieure. Les sables sont très peu représentés (4 à 7%). Le taux de matière organique diminue, avec la profondeur, et varie de 3.7% à 1.3%. Le calcaire est présent dans tout le profil, avec des taux homogènes qui se situent autour de 15%.

Les principaux résultats analytiques indiquent que le profil A se caractérise par un profil salin descendant, faiblement salé en surface à fortement salé en profondeur (2.42 dS/m < CE < 23.2 dS/m) et par un SAR important (14.28 < SAR < 23.12). Le pourcentage de sodium échangeable est fort (20.7% < ESP < 47%) et le pH est légèrement alcalin à alcalin (8.18 < pH < 8.67). Les ions prédominants de la solution du sol sont les chlorures (70%) et le sodium (67%). Le faciès chimique de la solution du sol est de type **chloruré-sodique**.

5) Classification du profil A

Les résultats morphologiques et analytiques du profil A suggèrent que ce sol remplit les conditions des critères diagnostiques du sous ordre des Gypsis (ordre des Aridisols) tels que définis par la classification USDA (Soil Taxonomy, 2010).

Tableau 49. Critères diagnostiques du profil A

Profils	E (cm)	Gypse (%)	E*Gypse	SAR	ESP (%)
Profil A	122 > 15	5.38 > 5	656.7 > 150	18.58 > 13	28.2 > 15

Selon les résultats représentés dans le **tableau.49**, l'épaisseur de l'horizon gypsiq est supérieure à 15cm (122cm) et le pourcentage du gypse est supérieur à 5 % (5.38 %) et le produit E*Gypse est supérieur à 150 (656.7).

Pour situer notre sol à un niveau avancé dans cette classification, nous avons retenu les suffixes suivants :

- **Sodic** : il y a plus de 15 % de sodium échangeable sur le complexe d'échange ou un SAR > 13 dans les 100 premiers cm de profondeur. Le profil A présente un SAR >13 et un ESP > 15 % (tableau), de ce fait il est Sodic.

A cet effet, le profil étudié appartient à : *l'Ordre des Aridisols ; Sous Ordre des Gypsid ; Grand Groupe des Haplogypsid ; Sous-Groupe des Sodic Haplogypsid.*

Il correspond aux sols *Salins à complexe sodique* de la classification CPCS (1967).

VI.8.3. Caractérisation du profil B

1) Données générales

Le profil se situe au sud-ouest de la parcelle d'étude, délimitée au sud par un drain tertiaire, au nord par autre drain tertiaire et l'ouest par un drain secondaire.

- Coordonnées géographiques : 0°29' 36.7'' longitude Est et 35°44' 0.1'' de latitude Nord;

- Altitude : 62m ;

- Date de description: 16/09/2012 ;

- Temps : Ciel clair ;

- Précédent climatique : Il a plu dans la région les jours précédents.

- Topographie : Terrain plat ;

- Matériaux d'origines : Alluvions ;

- État de surface : Jeune plantation d'olivier

V.3.2. Description morphologique

Anp (0 à 25cm) : Sec; couleur 10 YR 6/3, argilo-limoneux; structure polyédrique angulaire fine à moyenne; poreux; plastique; collant; peu compacte; friable; absence d'éléments grossiers; moyennement organique; présence fentes verticales, présence de racines fines, forte activité biologique ; présence de tâches blanchâtres hétérogènes ; vive effervescence à l'Hcl généralisée ; transition nette régulière.

BCny (25 à 70cm) : humide; couleur 10 YR 6/3; argilo-limoneux; structure polyédrique anguleuse grossière; collant; compact; peu friable; porosité structurale importante; absence d'éléments grossiers; présence de fentes verticales; présence de racines mortes; moyennement organique; activité biologique moyenne; plastique; présence de tâches blanchâtres sous forme de pseudo-mycéliums; vive effervescence à l'Hcl généralisée; transition nette et régulière.

Cnz1 (70 - 120 cm) : humide; couleur 10YR 6/6; limoneux; structure massive à éclat anguleux; moyennement compact; moyennement friable ; collant ; plastique ; très poreux ; très fragile; absence d'éléments grossiers ; non organique ; présence de traces noirâtres correspondant à des anciennes racines, faible activité biologique ; présence de petites taches blanchâtres; présence de quelques tâches d'hydromorphie (oxydo-réduction) de couleur grisâtres et ocres, vive effervescence à l'Hcl, généralisée ; transition régulière et nette.

Cnz2 (120 - 150 cm) : humide; couleur 10YR 6/6; limoneux; structure massive; peu compact ; très friable; collant; plastique; très peu poreux; très fragile, non organique; présence de traces noirâtres correspondant à des anciennes racines, faible activité biologique; diminution des tâches blanchâtres; présence de tâches d'hydromorphie (oxydo-réduction) de plus nombreuses que l'horizon sus-jacent, vive effervescence à l'Hcl généralisée.

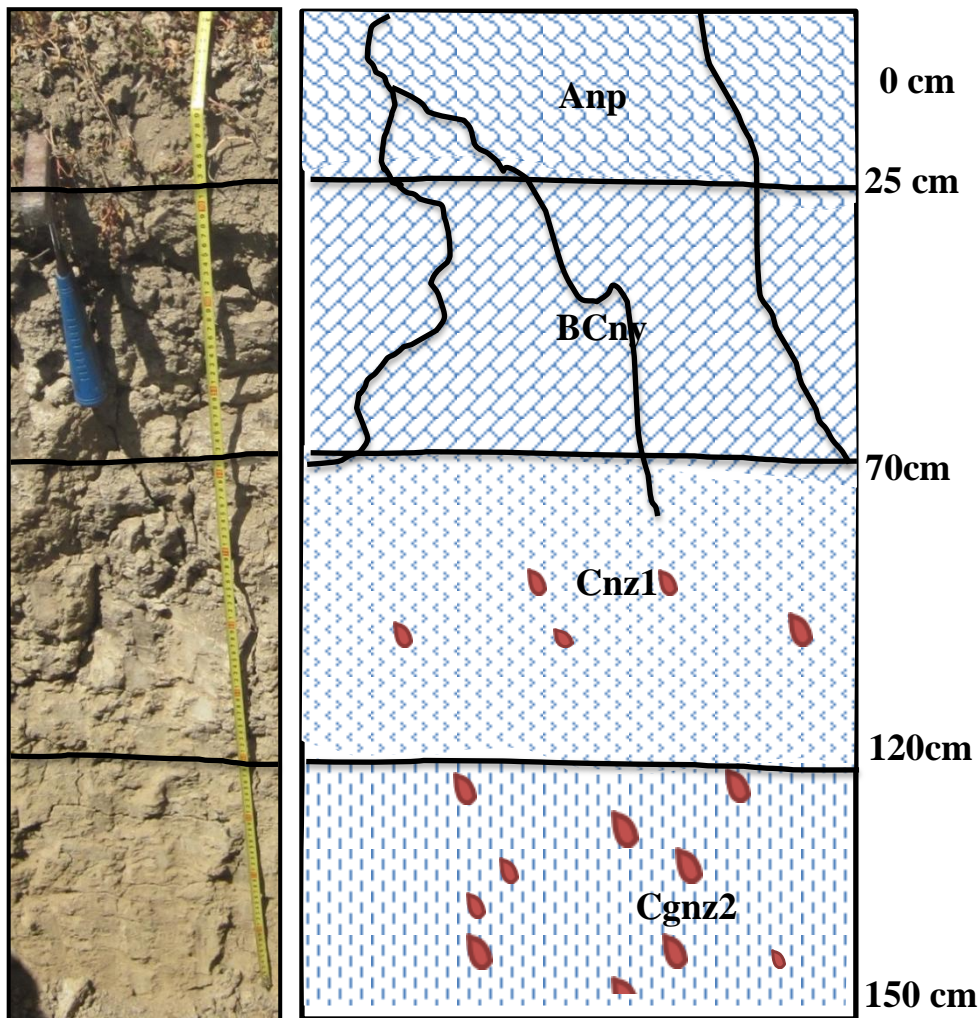


Photo 9. Profil B

Figure 62. Coupe schématique du profil B



Photo 10. Accumulations salines

Ce profil est développé sur des alluvions, sa profondeur est supérieure à 150 cm. Il est caractérisé par la présence de fentes jusqu'à une profondeur de 70 cm du profil. Le profil est caractérisé par la présence de fortes accumulations salines dans les horizons de profondeur, ainsi que de quelques tâches d'oxydo-réduction à partir de 70 cm mais deviennent plus accentuées en profondeur.

L'horizon de surface (Anp) est un horizon cultural, bien différencié et organique. Il se distingue par sa structure polyédrique angulaire fine et sa texture argilo-limoneuse;

L'horizon de sub-surface (BCny) se distingue du premier par sa structure polyédrique anguleuse moyenne et par la présence de tâches blanchâtres sous forme de pseudo-mycéliums (Gypse) ;

Le troisième horizon (Cnz1) se caractérise par sa texture limoneuse, en présence d'une fraction de sable (18.5%), et une structure massive. Les tâches blanchâtres correspondent aux accumulations salines. Il est fortement salé et se caractérise par la présence de quelques tâches d'hydromorphie;

L'horizon de profondeur (Cgnz2) est limoneux et il se distingue par la présence de tâches d'hydromorphie, plus accentuées à la base du profil.

3) Résultats analytiques du profil B

1) Propriétés physiques et physico-chimiques du profil B

Les résultats analytiques sont présentés dans le **tableau.24 de l'Annexe.11**, et les résultats statistiques sont présentés dans le **tableau.50**.

- Le gypse

Les teneurs en gypse sont faibles dans l'horizon de surface, elles oscillent entre 2.98 % et 6.2 %, avec une moyenne du profil de 4.3 % et un coefficient de variabilité modéré. Ces valeurs sont cependant supérieures à 5% à partir de l'horizon de sub-surface.

- Le calcaire

Les teneurs en calcaire sont homogènes au niveau du profil, elles varient de 11.9% à 17.4% pour le calcaire total et de 5.3 à 8.5%, pour le calcaire actif, avec une moyenne respective de 14.5 et 6.8 % et un faible coefficient de variabilité. Le profil, est donc moyennement calcaire.

- La matière organique

Le taux de matière organique diminue avec la profondeur, et varie entre 1.0 %, en profondeur à 3.1 % dans l'horizon cultural (Anp), avec une moyenne de 1.7 % et un coefficient de variabilité très élevé.

- La granulométrie

Nous remarquons que les fractions granulométriques prédominantes sont les fractions argileuses et limoneuses. Dans l'horizon de surface, les argiles et les limons ont pratiquement les mêmes taux qui sont respectivement de 49 et 46 %. Dans l'horizon de sub-surface, la fraction argileuse prédomine avec un taux de 49 %. La fraction sableuse est moyennement représentée et varie entre 5 et %. Nous observons au niveau des horizons profonds une diminution de la fraction argileuse (53 à 20%) et une forte augmentation de la fraction limoneuse (43 à 73 %). Le premier et le deuxième horizon présentent des textures argilo-limoneuses, alors que le troisième et le dernier horizon sont limoneux. Nous remarquons aussi que le coefficient de variabilité pour l'argile est élevé pour ce profil (**Tab.50**).

Tableau 50. Statistiques descriptives des paramètres du profil B

Paramètres	M0 (%)	Calcaire (%)	Gypse (%)	Granulométrie (%)		
				Argile	Limon	Sable
<i>Moy</i>	1,7	14,5	4,3	33,8	55,8	10,8
<i>Max</i>	3,1	17,4	6,2	49,0	69,0	19,0
<i>Min</i>	1,0	11,9	3,0	18,0	46,0	5,0
<i>E. type</i>	0,9	2,2	1,4	17,6	11,6	6,9
<i>CV %</i>	55,8	15,5	31,9	52,2	20,8	64,6

2) Composition du complexe adsorbant

Les résultats du complexe adsorbant sont présentés dans le **tableau.25 de l'Annexe.11** et le **tableau 51**.

- La capacité d'échange cationique (CEC)

Les valeurs de la capacité d'échange cationique sont comprises entre 21.9 et 34.7 meq/100g de terre. La moyenne de la CEC est de 25.9 (meq/100g) et le coefficient de variation est modéré (23%).

- Les bases échangeables

Selon la **figure 63**, la garniture cationique du complexe adsorbant révèle que le calcium échangeable constitue l'essentiel du complexe adsorbant avec un taux moyen de 52 % de la CEC, ensuite vient le magnésium (25%), le sodium (20%), et le potassium (3%).

La moyenne du calcium échangeable dans le profil est de 12.6 meq/100g et le coefficient de variation est modéré (28.7%). Le magnésium présente des teneurs appréciables de la capacité d'échange cationique (25 %) avec une moyenne de 8.2 meq/100g et un coefficient de variation modéré de 31.9 %, alors que les teneurs du potassium sont relativement faibles (3%) pour une moyenne de 0.8 meq/100g et un coefficient de variation élevé de 45.9%.

Pour le sodium, il présente des teneurs qui oscillent entre 15.1 et 32.1% de la CEC pour une moyenne de 4.91 meq/100g, avec un coefficient de variation élevé de 40.9%. La moyenne de l'ESP, dans le profil est de 19.7% avec un coefficient de variation élevé de (41.7%). Les pourcentages de sodium échangeable ESP > 15 %, au niveau de chaque horizon, suggèrent que tous les horizons sont sodiques (USDA, 2010).

Tableau 51. Paramètres statistiques du complexe adsorbant du profil B

Paramètres	Complexe Absorbant (meq/100g)				CEC (meq/100g)	ESP %
	K^+	Na^+	Mg^{++}	Ca^{++}		
<i>Min</i>	0,35	3,57	4,37	9,52	21,95	15,15
<i>Max</i>	1,28	7,04	8,72	17,59	34,75	32,07
<i>Moy</i>	0,84	4,97	6,01	12,63	25,90	19,74
<i>CV %</i>	45,95	33,91	31,86	28,76	22,99	41,73

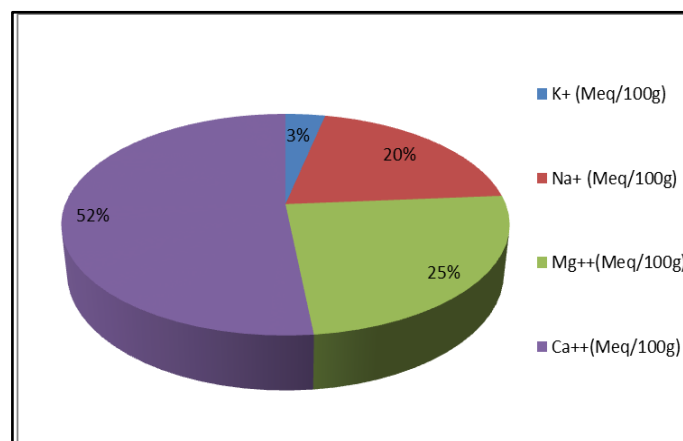


Figure 63. Composition cationique moyenne du complexe adsorbant du profil B

3) Composition de la solution du sol

Les résultats analytiques et statistiques des différents paramètres de la solution du sol sont indiqués dans le **tableau.25 de l'Annexe.11 et le tableau 52.**

- La conductivité électrique

La distribution des sels, en fonction de la profondeur, révèle une forte salinité de l'horizon de profondeur (CE= 45 dS/m) par rapport à l'horizon de surface (CE= 14.75 dS/m). Cette CE est plus faible que celle des autres horizons du profil. Ce phénomène serait dû à une lixiviation des sels provoquée par les pluies comme pour le cas du profil A (la description a été réalisée après la saison humide) et qui se seraient accumulés au niveau des horizons de profondeur, provoquant une augmentation de la CE (CE=45 dS/m). La salinité augmente sensiblement dans les deux horizons Cnz1 et Cnz2 pour atteindre respectivement les valeurs de 45 et 38.8 dS/m. Ce résultat indique que le profil salin est descendant.

- Le pH

Les résultats montrent que le pH est supérieur à 8, avec une moyenne de 8.4. Ces valeurs correspondent à une réaction du sol relativement alcaline, caractéristique principale des sols calcaires et des sols salés.

- Le SAR

Les valeurs du SAR varient de 18.4 pour les horizons de surface à 49.7 pour les horizons de profondeur. Les valeurs du SAR sont plus faibles dans les horizons de surface, par rapport à ceux, en profondeur. Ceci est dû, probablement, aux valeurs de la CE, qui sont aussi plus faibles (14.8 dS/m), en surface par rapport à celles, en profondeur (45 dS/m).

- Les cations de la solution du sol

La **figure 64** montre que le cation Na^+ est le plus représenté avec un taux moyen de 73% et une concentration qui varie entre 132.6 meq/l et 460.3 meq/l. Le Mg^{++} vient en deuxième position avec un taux de 15% avec des teneurs qui varient entre 27.7 meq/l et 87.1 meq/l. Le Ca^{++} se situe en troisième position avec un taux de 11% et des concentrations qui varient entre 38.3 meq/l et 64.6 meq/l, alors que le K^+ vient en dernière position avec un taux de 1%, et des teneurs qui varient entre 0.5 meq/l et 0.9 meq/l.

De ce fait, le classement des cations est de type : $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{++} > \text{Ca}^{++} > \text{K}^+$

- Les anions de la solution du sol

Selon la **figure 65**, l'anion Cl^- est le plus représenté avec un taux moyen de 76.9% et une concentration qui varie entre 108.2 meq/l et 473.1 meq/l. Le SO_4^{--} vient en deuxième position avec un taux de 22.6% avec des teneurs qui varient entre 71.9 meq/l et 91.5 meq/l.

Le HCO_3^- vient en dernière position avec un taux de 0.8% et des teneurs qui varient entre 1 meq/l et 3 meq/l.

Tableau 52. Statistiques descriptives des paramètres de la solution du sol du profil B

Paramètres	pH	CE dS.m ⁻¹	Cations (meq.l ⁻¹)				Anions (meq.l ⁻¹)			SAR
			Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	
Min	8.3	14,8	132,6	38,3	27,7	0,5	108,2	71,9	1,0	18,4
Max	8.5	45,0	460,3	64,6	87,1	0,9	473,1	91,5	3,0	49,7
Moy	8.4	30,9	288,0	50,1	59,6	0,7	285,0	83,7	1,8	31,7
CV%	1	44,1	47,9	22,2	41,9	23,1	56,7	10,1	54,7	41,4

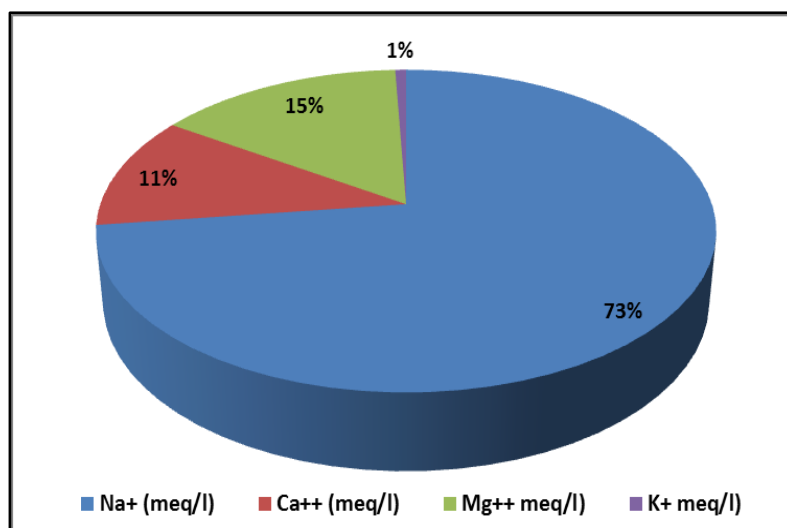


Figure 64. Répartition moyenne des cations dans la solution du sol du profil B

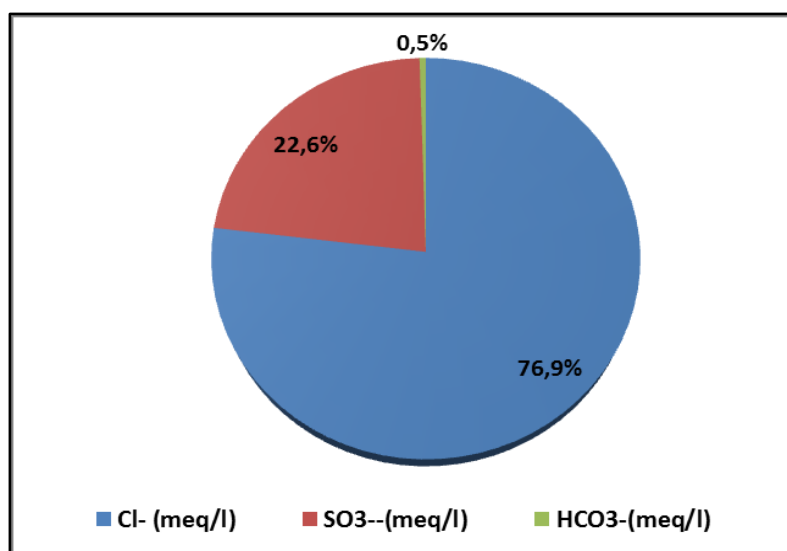


Figure 65. Répartition moyenne des anions dans la solution du sol du profil B

4) Synthèse des résultats morphologiques et analytiques du profil B

Sur le plan morphologique, le profil B se caractérise par une structure polyédrique fine dans l'horizon de surface et devient moyenne au niveau de l'horizon de sub-surface à massive vers la base.

Il est caractérisé par la présence de tâches blanchâtres qui correspondraient à des accumulations gypso-salines, surtout dans l'horizon **BCny** qui présente un taux de gypse de 6.32%.

Les tâches d'oxydoréduction forment environ 5 à 7% de la matrice du sol et apparaissent à partir du troisième horizon.

Par ailleurs, la texture est dominée par les argiles (49%) dans la partie supérieure du profil et une augmentation des limons (69%) dans sa partie inférieure. Les sables affichent une augmentation, dans la partie inférieure du profil (13.6 à 18.5%). Le taux de matière organique diminue, avec la profondeur, et varie de 3.1% à 1.0%. Le calcaire est présent dans tout le profil, avec des taux homogènes qui se situent autour de 14.5%.

Les principaux résultats analytiques indiquent que le profil B se caractérise par un profil salin descendant, fortement salé ($14.75 \text{ dS/m} < \text{CE} < 45 \text{ dS/m}$) et par un SAR important ($18.38\% < \text{SAR} < 49.7\%$). Le pourcentage de sodium échangeable est important ($15.15\% < \text{ESP} < 32.07\%$) et le pH est légèrement alcalin à alcalin (8.3 à 8.5). Les chlorures (73%) et le sodium (71%) sont les ions prédominants de la solution du sol. Le faciès chimique de la solution du sol est de type **chloruré-sodique**.

5) Classification du profil B

Les résultats morphologiques et analytiques (tableaux. et) du profil A suggèrent que ce sol remplit les conditions des critères diagnostiques du sous ordre des Salids (ordre des Aridisols) tels que définis par la classification USDA (**Soil Taxonomy, 2010**).

Tableau 53. Critères diagnostiques du profil B

Profils	E (cm)	CEps (dS/m)	E*CE	Gypse (%)	E (cm)*Gypse
Profil B	80 > 15	41.9 > 30	3352 > 900	6.19 > 5	297.1 >150

Selon les résultats représentés dans le **tableau.53**, l'épaisseur de l'horizon salique est supérieure à 15cm (80cm) et la CEps est supérieure à 30 dS/m (41.9 dS/m) et le produit E*CEps est supérieur à 900 (3352).

Pour situer notre sol à un niveau avancé dans cette classification, nous avons retenu les suffixes suivants :

- **Gypsic** : il y a plus de 05% de Gypse (6.19%) dans un horizon qui a plus de 15cm d'épaisseur (48cm) avec un produit Gypse*E supérieur à 150 (297.1), de ce fait il est Gypsic.

A cet effet, le profil étudié appartient à l'*Ordre des Aridisols* ; *Sous Ordre des Ordre des Salids* ; *Grand Groupe des Haplosalids* ; *Sous-Groupe des Gypsic Haplosalids*.

Il correspond aux sols Salins à complexe sodique de la classification CPCS (1967).

VI.8.4. Caractérisation du profil C

1) Données générales

Le profil se situe au nord-ouest de la parcelle d'étude, délimitée au sud par un drain tertiaire, et à l'ouest par un drain secondaire.

- Coordonnées géographiques 0° 29' 36,8'' longitude Est et 35° 44' 7'' de latitude Nord;
- Altitude : 61m ;
- Date de description: 16/09/2012 ;
- Temps : Ciel clair ;
- Précédent climatique : Il a plu dans la région les jours précédents.
- Topographie : Terrain plat ;
- Matériaux d'origines : Alluvions ;
- État de surface : Jeune plantation d'olivier.

2) Description morphologique du profil C

Anp (0 à 25cm) : Sec; couleur à l'état sec 10 YR 6/4 argilo-limoneux; structure polyédrique angulaire fine à moyenne; poreux; plastique; collant; peu compacte; friable; absence d'éléments grossiers; moyennement organique; présence de fissures, présence de racines fines, forte activité biologique; présence de tâches blanchâtres hétérogènes; vive effervescence à l'Hcl généralisée ; transition nette régulière.

BCnyz (25 - 70cm) : Humide; couleur 10YR 5/4; argilo-limoneux; structure polyédrique anguleuse grossière; collant ; compact; peu friable; porosité structurale importante; absence d'éléments grossiers; présence de fentes verticale(plus épaisses au sommet et moins épaisses à la base); présence de racines mortes; moyennement organique; activité biologique moyenne; plastique; présence de tâches blanchâtres sous forme de pseudo-mycéliums; présence de quelques taches d'hydromorphie (oxydo-réduction) de couleur grisâtres et ocre, vive effervescence à l'Hcl généralisée; transition nette et régulière.

Cgnyz (70 - 150 cm): humide; couleur 10YR 6/3; argilo-limoneux ; structure massive à éclat anguleux; moyennement compact ; moyennement friable ; collant ; plastique ; très poreux ; très fragile ; absence d'éléments grossiers ; non organique ; présence de traces noirâtres correspondant à des anciennes racines, faible activité biologique; présence de nombreuses taches d'hydromorphie (oxydo-réduction) de couleur grisâtres et ocres, présence de taches blanchâtres; vive effervescence à l'Hcl, généralisée.

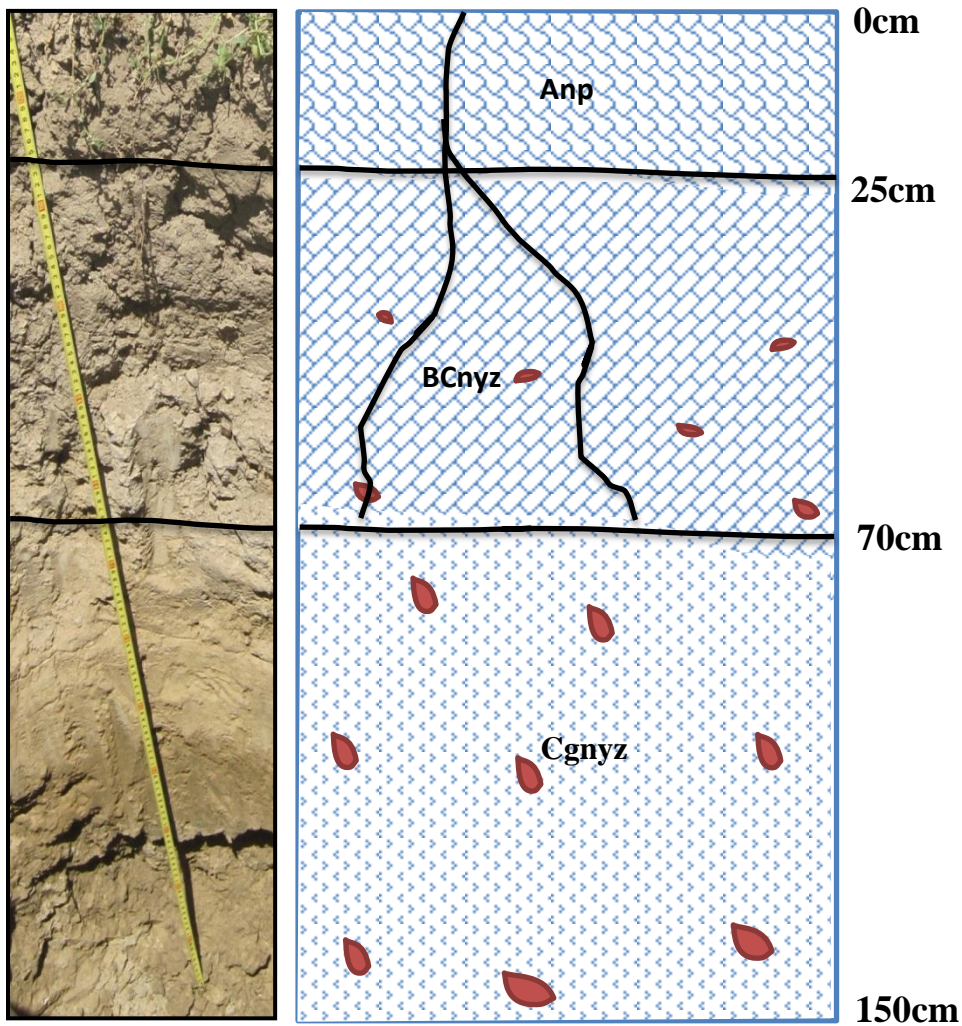


Photo 11. Profil C **Figure 66.** Coupe schématique du profil C



Photo 12. Couche de pseudo-sable

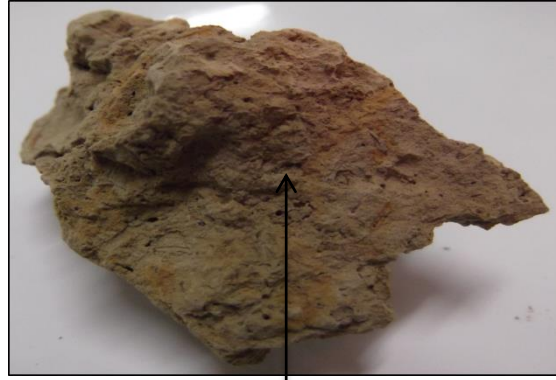


Photo 13. Tâches d'oxydo-réduction

Ce profil est développé sur des alluvions, sa profondeur est supérieure à 150 cm. Il est caractérisé par la présence de fentes et l'apparition d'une fine couche de pseudo-sable à la surface du sol. Le profil est caractérisé par la présence de très fortes accumulations salines dans les horizons de profondeur, ainsi que de fortes tâches d'oxydo-réduction à partir de 50 cm.

L'horizon de surface (Anp) est un horizon cultural, bien différencié et organique. Il se distingue par sa structure polyédrique angulaire fine et sa texture argilo-limoneuse;

L'horizon de sub-surface (BCnyz) se distingue du premier par sa structure polyédrique anguleuse moyenne et par la présence de fortes accumulations de sels;

Le troisième horizon (Cgnyz) se caractérise par son épaisseur (80cm), sa texture argilo-limoneuse, et sa structure massive. Les tâches blanchâtres correspondent aux accumulations salines. Il est très fortement salé et se caractérise par la présence de fortes tâches d'oxydo-réduction.

3) Résultats analytiques du profil C

a) Propriétés physiques et physico-chimiques du profil C

Les résultats analytiques sont présentés dans le **tableau.27 de l'Annexe.12**, et les résultats statistiques sont présentés dans le **tableau 54**.

- Le gypse

Les teneurs en gypse oscillent entre 4.4 et 5.3 %, avec une moyenne du profil de 05 % et un coefficient de variabilité faible. Mise à part l'horizon de surface, les valeurs du gypse sont supérieures à 5%.

- Le calcaire

Les teneurs en calcaire sont homogènes au niveau du profil, elles varient de 10.6% à 19.4% pour le calcaire total et de 7.8 à 8.8%, pour le calcaire actif, avec une moyenne respective de

14.1 et 8.1 % et un coefficient de variabilité faible pour le calcaire actif et modéré pour le calcaire total. Le profil, est moyennement calcaire.

- **La matière organique**

Le taux de matière organique diminue avec la profondeur, et varie entre 0.7%, en profondeur à 2.6 % dans l'horizon cultural (Anp), avec une moyenne de 1.3 % et un coefficient de variabilité très élevé.

- **La granulométrie**

Les fractions granulométriques prédominantes sont les fractions argileuses et limoneuses. Dans l'horizon de surface, les argiles et les limons ont pratiquement les mêmes taux qui sont respectivement de 49 et 48 %. Dans l'horizon de sub-surface, la fraction argileuse prédomine avec un taux de 58 %. La fraction sableuse est très peu représentée et varie entre 1 et 3 %. Nous observons au niveau des horizons profonds une diminution de la fraction argileuse (40%) et une forte augmentation de la fraction limoneuse (55 %). Tous les horizons ont une textures argilo-limoneuse. Nous remarquons aussi que le coefficient de variabilité de l'argile est faible pour ce profil (14.1%) (**Tab.54**).

Tableau 54. Statistiques descriptives des paramètres du profil C

<i>Paramètres</i>	<i>M0</i> (%)	<i>Calcaire</i> (%)	<i>Gypse</i> (%)	<i>Granulométrie (%)</i>		
				<i>Argile</i>	<i>Limon</i>	<i>Sable</i>
Moy	1,3	14,1	5,0	50,3	47,7	2
Max	2,6	19,4	5,3	58,0	55,0	3
Min	0,7	10,6	4,4	44,0	40,0	1
CV %	82,3	33,1	9,5	14,1	15,7	50

b) Composition du complexe adsorbant

Les résultats du complexe adsorbant sont présentés dans le **tableau 55** et le **tableau.28** de l'**Annexe.12**.

- **La capacité d'échange cationique (CEC)**

Les valeurs de la capacité d'échange cationique sont comprises entre 27.8 et 30 meq/100g de terre. La moyenne de la CEC est de 29.1 (meq/100g) avec un faible coefficient de variation (4%).

- **Les bases échangeables**

Selon la **figure 67** montre, la garniture cationique du complexe adsorbant révèle que le calcium échangeable constitue l'essentiel du complexe adsorbant avec un taux moyen de 47 % de la CEC, ensuite vient le sodium (32%), le magnésium (18%), et le potassium (3%).

Le tableau 56 montre que la moyenne du calcium échangeable dans le profil est de 14.8 meq/100g et le coefficient de variation est faible (9.9%). Le magnésium présente des teneurs appréciables de la capacité d'échange cationique (18%) avec une moyenne de 5.6 meq/100g et un coefficient de variation élevé de 35.1 %, alors que les teneurs du potassium sont relativement faibles (3%) pour une moyenne de 0.9 meq/100g et un coefficient de variation faible de 13.1%.

Pour le sodium, il présente des teneurs qui oscillent entre 18.3 et 50.9% de la CEC pour une moyenne de 9.9 meq/100g, avec un coefficient de variation très élevé de 50.7%. La moyenne de l'ESP, dans le profil est de 33.6% avec un coefficient de variation élevé de (48.9%). Les forts pourcentages de sodium échangeable ESP > 15 %, au niveau de chaque horizon, suggèrent que tous les horizons sont sodiques (USDA, 2010).

Tableau 55. Paramètres statistiques du complexe adsorbant du profil C

Paramètres	Complexe Absorbant (meq/100g)				CEC (meq/100g)	ESP %
	K^+	Na^+	Mg^{++}	Ca^{++}		
<i>Min</i>	0,8	5,1	3,8	13,2	27,8	18,3
<i>Max</i>	1,0	15,1	7,7	16,1	30,0	51,0
<i>Moy</i>	0,9	9,9	5,6	14,8	29,1	33,6
<i>CV %</i>	13,1	50,7	35,1	9,9	4,0	48,9

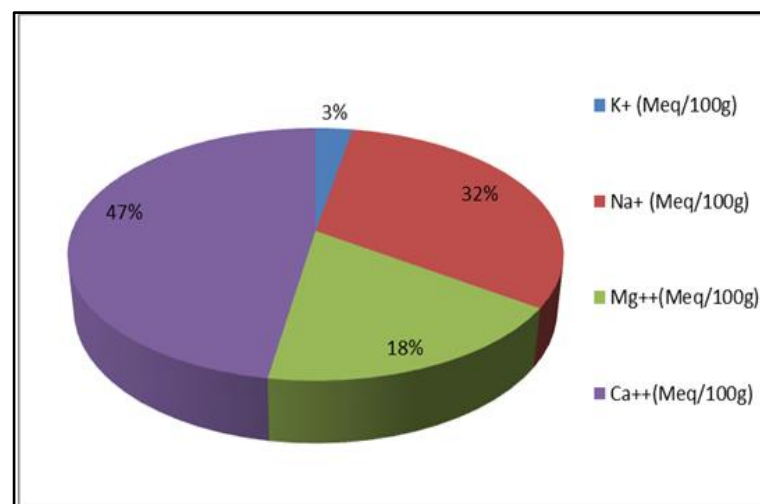


Figure 67. Composition cationique moyenne du complexe adsorbant du profil C

c) Composition de la solution du sol

Les résultats analytiques et statistiques des différents paramètres de la solution du sol sont indiqués dans le **tableau.29 de l'Annexe.12** et le **tableau 56**.

- La conductivité électrique

La distribution des sels en fonction de la profondeur, révèle une très forte salinité de l'horizon de profondeur (CE= 50.1 dS/m) par rapport à l'horizon de surface de surface (CE= 8.4 dS/m). Cette CE est plus faible que celle des autres horizons du profil. Ce phénomène serait dû à une lixiviation des sels provoquée par les pluies comme pour le cas des profils A et B (la description a été réalisé après la saison humide) et qui se seraient accumulés au niveau des horizons de profondeur, provoquant une augmentation de la CE (CE=35.5 dS/m), au niveau de l'horizon médian. La salinité augmente sensiblement dans les deux horizons BCnyz1 et Cgnyz2 pour atteindre respectivement les valeurs de 35.5 et 50.1 dS/m. Ce résultat indique que le profil salin est descendant.

- Le pH

Les résultats montrent que le pH est supérieur à 8 avec une moyenne de 8.5. Ces valeurs correspondent à une réaction du sol relativement alcaline, caractéristique principale des sols calcaires et des sols salés.

- Le SAR

Les valeurs du SAR varient de 14.2 pour les horizons de surface à 55.6 pour les horizons de profondeur, les valeurs du SAR dans les horizons de surface sont plus faibles par rapport à ceux, en profondeur. Ceci est dû, probablement, aux valeurs de la CE, qui sont faibles (8.4 dS/m) par rapport à celles, en profondeur (50.1 dS/m).

- Les cations de la solution du sol

Selon la **figure 68**, le cation Na^+ est le plus représenté avec un taux moyen de 78% et une concentration qui varie entre 92.6 meq/l et 517.4 meq/l. Le Mg^{++} vient en deuxième position avec un taux de 10.8% avec des teneurs qui varient entre 15.1 meq/l et 72.1 meq/l. Le Ca^{++} se situe en troisième position avec un taux de 10.1 % et des concentrations qui varient entre 35 meq/l et 50.6 meq/l, alors que le K^+ vient en dernière position avec un taux de 1%, et des teneurs qui varient entre 0.8 meq/l et 1 meq/l.

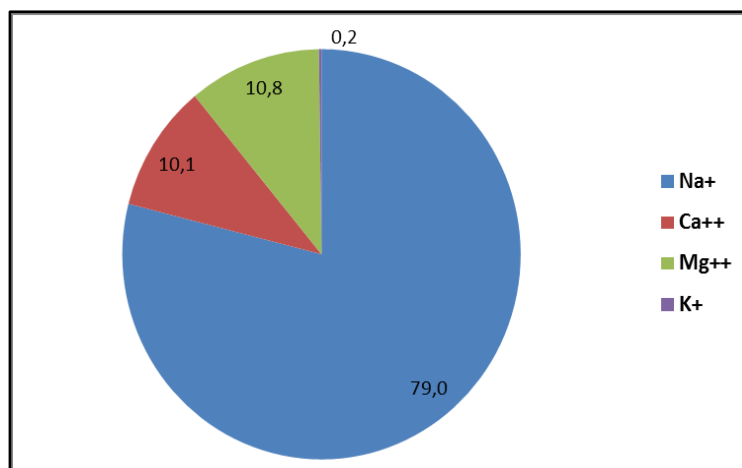
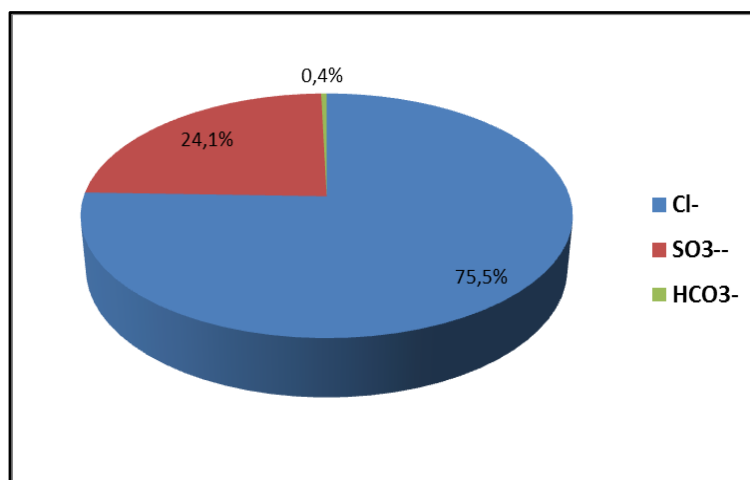
De ce fait, le classement des cations est de type : $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{++} > \text{Ca}^{++} > \text{K}^+$

- Les anions de la solution du sol

Selon la **figure 69**, l'anion Cl^- est le plus représenté avec un taux moyen de 75.5% et une concentration qui varie entre 49 meq/l et 493.6 meq/l. Le SO_4^{--} vient en deuxième position avec un taux de 24.1% avec des teneurs qui varient entre 75.3 meq/l et 64.4 meq/l. Le HCO_3^- vient en dernière position avec un taux de 0.4% et des teneurs qui varient entre 1 meq/l et 2 meq/l.

Tableau 56. Statistiques descriptives des paramètres de la solution du sol du profil C

Para- mètres	pH	CE _{ps} dS.m ⁻¹	Cations en (meq.l ⁻¹)				Σ ⁺	Anions en en (meq.l ⁻¹)			Σ ⁻	SAR
			Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺		Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻		
Min	8,3	8,4	92,6	35,0	15,1	0,8	143,8	49,0	75,3	1,0	126,3	14,2
Max	8,6	50,1	517,4	50,6	72,1	1,0	640,9	493,6	134,4	2,0	571,6	55,6
Moy	8,5	31,3	330,1	42,1	45,0	0,9	418,1	299,8	95,6	1,7	397,1	39,0
CV%	2	67,6	65,7	18,7	63,6	13,3	60,4	76,0	35,2	34,6	59,9	56,1

**Figure 68.** Répartition moyenne des cations dans la solution du sol du profil C**Figure 69.** Répartition moyenne des anions dans la solution du sol du profil C

4) Synthèse des résultats morphologiques et analytiques du profil C

Sur le plan morphologique, le profil C se caractérise par une structure polyédrique angulaire fine dans l'horizon de surface et devient moyenne, à éclats anguleux, au niveau de l'horizon de sub-surface et massive vers la base. Il est caractérisé par la présence de tâches blanchâtres qui correspondraient à des accumulations gypso-salines.

Le taux de gypse est supérieur à 5% dans tout le profil sauf dans l'horizon de surface. Concernant la texture, elle est dominée par les argiles (49%) dans la partie supérieure du profil et une augmentation des limons (55%) dans sa partie inférieure. Les sables sont très peu représentés mais augmentent progressivement vers la profondeur passant de 1 à 3%. Le taux de matière organique diminue, avec la profondeur, et varie de 2.6% à 0.7%. Enfin, ce profil est partout calcaire avec des taux homogènes qui se situent autour de 14.1%.

Les principaux résultats analytiques indiquent que le profil C se caractérise par un profil salin descendant très fortement salin ($8.39 \text{ dS/m} < \text{CE}_{\text{ps}} < 50.1 \text{ dS/m}$) et par un SAR important ($14.2\% < \text{SAR} < 55.6\%$). Le pourcentage de sodium échangeable est important ($18.31\% < \text{ESP} < 50.96\%$) et le pH est légèrement alcalin à alcalin (8.3 à 8.6). Les chlorures (77%) et le sodium (69 %) sont les ions prédominants de la solution du sol. Le faciès chimique de la solution du sol est de type chloruré-sodique.

5) Classification du profil C

Les résultats morphologiques et analytiques du profil A suggèrent que ce sol remplit les conditions de critères diagnostiques du sous ordre des Salids (ordre des Aridisols) tels que définis par la classification USDA (Soil Taxonomy, 2010).

Tableau 57. Critères diagnostiques du profil C

Profils	E (cm)	CE_{ps} (dS.m^{-1})	$\text{E} * \text{CE}_{\text{ps}}$	$\text{E} * \text{Gypse}$ (%)
Profil C	125 > 15	42.8 > 30	5350 > 450	653.1 > 150

Les résultats représentés dans le **tableau.57**, l'épaisseur de l'horizon salique est supérieure à 15cm (125cm) et la CE_{ps} est supérieure à 30 dS/m (42.8 dS/m) et le produit $\text{E} * \text{CE}_{\text{ps}}$ est supérieur à 900 (5350).

Pour situer notre sol à un niveau avancé dans cette classification, nous avons retenu les suffixes suivants :

- **Gypsic** : il y a plus de 05 % de Gypse (5.22%), dans un horizon qui a plus de 15cm d'épaisseur ($E = 125\text{cm}$) avec un produit ($\text{Gypse} * E$) est supérieur à 150 (653.1), de ce fait il est Gypsic.

A cet effet, le profil étudié appartient à l'*Ordre des Aridisols* ; *Sous Ordre des Salids* ; *Grand Groupe des Haplosalids* ; *Sous-Groupe des Gypsic Haplosalids*.

Il correspond aux sols **Salins à complexe sodique** de la classification CPCS (1967).

Discussion générale

A. Caractérisation de la salinité

Les résultats d'analyses de la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée (CE_{ps}) montrent un profil salin descendant, pour les deux campagnes de mesures. D'après ces résultats, la moyenne de la CE_{ps} du profil salin, est passée de 18.4 dS/m, au mois de Juin à 21.2 dS/m au mois de Novembre, soit une augmentation de l'ordre de 15.21%.

Concernant la répartition verticale de la salinité, nous distinguons deux types de profils salins : les profils salins de type convexe, sont concentrés dans le sud, et les profils salins descendants au nord de la parcelle.

Les résultats des rapports entre les lectures électromagnétiques verticales et horizontales, des deux campagnes de mesures, indiquent une forte concentration de la salinité en profondeur (Profil salin descendant).

L'analyse de la corrélation entre la CEM et les propriétés du sol est positive entre la CEM et la CE_{psc} ($0.74 < r < 0.889$), suivie par le pH ($0.74 < r < 0.854$), et la $Ced_{1/5}$ ($0.638 < r < 0.844$). Dans cette étude, nous avons aussi trouvé une relation positive entre la CEM et la teneur en eau ($0.547 < r < 0.678$), mais il n'y a pas de corrélation avec la texture (argile, limon et sable) et la matière organique.

L'utilisation des régressions multiples pour relier toutes les mesures de la CEM(V) à celles des conductivités électriques de l'extrait de pâte saturée des quatre horizons du sol (0-25cm ; 25cm-50cm ; 50cm-75cm ; 75cm-100cm) a montré une corrélation significative avec un coefficient de corrélation (r^2) supérieur à 0.8. L'analyse statistique des valeurs ainsi obtenues de la CE_{ps} calculée montrent que les valeurs minimales de la CE_{ps} , pour la campagne Juin 2012, sont observées dans la partie sud de la parcelle, avant le drain tertiaire, situé au centre, elles sont de 1.1 à 21.5 dS/m, alors que les valeurs maximales sont observées dans le nord de la parcelle et elles sont de 5.1 à 46 dS/m. Par contre les valeurs minimales de la CE_{ps} pour le mois de Novembre sont de 2 à 27.8 dS/m et les valeurs maximales de 7.5 à 46.3 dS/m. De ce fait, l'évolution de la salinité augmente du sud vers le nord de la parcelle.

Selon le test de **Kolmogorov-Smirnov**, sur la distribution de la conductivité électrique, l'horizon de surface de la campagne Juin 2012 et l'horizon de sub-surface et l'horizon (50-75cm) de la campagne Novembre 2012 suivent une loi normale. Les autres horizons ne suivent aucune des lois proposées (Log et Exponentielle).

L'analyse des cartes de salinité a permis de dégager les principaux résultats sur l'évolution saisonnière de la salinité, à savoir :

- La cartographie de la campagne Juin 2012 a montré, en premier lieu, l'existence d'une zone non salée, dans l'horizon de surface, au sud-est de la parcelle, qui disparaît ensuite, en Novembre 2012. Aussi, la salinité croît de façon régulière en se rapprochant de la limite nord de la parcelle, particulièrement après le drain tertiaire, situé au centre ;
- Les cartes krigées présentent des conductivités électriques plus fortes en profondeur et atteignent des valeurs de 62.36 dS/m, observées, au nord de la parcelle. Cette zone correspond à une micro-dépression, située avant la limite nord de la parcelle;
- Il y a, au sein de la parcelle d'étude, des zones très contrastées en termes de concentration en sels. Même en saison des pluies, l'effet de la pluviométrie naturelle semble insuffisant pour lisser les différences de salinité, à cause, probablement de l'insuffisance du drainage et la faible perméabilité du sol, suite à la dégradation de la structure ;
- Les profils salins moyens sont de type descendant. Cette forme dominante (profil descendant) n'est pas modifiée, au cours des saisons sèches ou humides. Cela pourrait être lié au climat, au drainage et à l'activité anthropique (travail du sol et irrigation).

Dans les pays arides et en régime naturel, les profils salins verticaux sont en ascendants, c'est-à-dire que les sels se concentrent à la surface des sols sous l'effet conjugué des remontées capillaires et de l'évaporation. Sous irrigation, au contraire, les sels sont drainés vers le bas du profil. Entre ces deux extrêmes, toutes les situations intermédiaires peuvent exister. Elles sont caractéristiques d'une situation pédologique ou d'un itinéraire technique donné (**Job et al, 1990**)

Selon **Servant (1975)**, **Guéro (2000)** et **Franzen (2005)**, le rôle des saisons est bien connu et joue un rôle important sur l'évolution de la salinité. En effet, le processus dominant est relié à l'état hydrique des sols : lorsque les sols sont secs, les sels remontent en surface par capillarité où s'accumulent par concentration dans la matrice du sol ; s'ils sont humides sous l'effet de la pluie ou de l'irrigation, les sels sont lixiviés en profondeur.

De telles fluctuations sont observées, dans les sols de la parcelle d'étude, au cours des deux campagnes de mesures, avec des redistributions verticales des sels qui modifient le profil de salinité en amplifiant ou en réduisant les différences de salinité entre les profondeurs. Néanmoins, nous avons constaté que la forme du profil de salinité, descendant, pourrait s'expliquer, principalement par l'usage de la parcelle, notamment par le fait qu'elle soit la-

bourée. L'influence de l'activité anthropique sur les flux hydriques et les flux salins apparaît ainsi dominante pour expliquer les variations verticales de la salinité.

B. Caractérisation des sols

En fonction des caractères morphologiques, ainsi que les teneurs en sels solubles, gypse et en sodium échangeable des divers horizons des profils étudiés, on peut distinguer, en allant du sud vers le nord de la parcelle :

- Le **profil A**, est situé dans la zone sud-est de la parcelle, dans laquelle ont été trouvées les plus faibles valeurs des conductivités électromagnétiques, se caractérise par un profil salin descendant, faiblement salé en surface à fortement salé en profondeur ($2.42 \text{ dS/m} < CE_{ps} < 23.2 \text{ dS/m}$) et par un SAR important ($14.28 < SAR < 23.12$) et un pourcentage de sodium échangeable fort ($20.7\% < ESP < 47\%$). La présence d'un horizon gypsique, dans le profil, situe ce type de sol au sous-Groupe des *Sodic Haplogypsis* de la classification Américaine(USDA), correspondant aux sols *Salins à complexe sodique* de la classification **CPCS (1967)**.
- Le **profil B**, situé dans la zone sud-ouest de la parcelle, est caractérisé par les fortes accumulations salines dans les horizons de profondeur, ainsi que la présence de quelques tâches d'oxydo-réduction à partir de 70 cm, mais plus accentuées en profondeur. Les principaux résultats analytiques indiquent que ce profil se caractérise par un profil salin descendant, fortement salé ($14.75 \text{ dS/m} < CE_{ps} < 45 \text{ dS/m}$), par un SAR important ($18.38\% < SAR < 49.7\%$), un pourcentage de sodium échangeable important ($15.15\% < ESP < 32.07\%$) et d'une teneur en gypse de plus de 5%. La présence d'un horizon salique, et d'un horizon gypsique, dans le profil, situe ce type de sol au sous-Groupe des *Gypsic Haplosalids* de la classification Américaine(USDA), correspondant aux sols *Salins à complexe sodique* de la classification **CPCS (1967)**.
- Le **profil C**, situé dans la zone nord-ouest de la parcelle se caractérise une très forte salinité ($8.39 \text{ dS/m} < CE_{ps} < 50.1 \text{ dS/m}$), un fort pourcentage de sodium échangeable ($18.3\% < ESP < 48.9\%$) et une teneur en gypse de 5% et plus. La présence d'un horizon salique et d'un horizon gypsique, dans le profil, situe ce type de sol au sous-Groupe des *Gypsic Haplosalids* de la classification Américaine(USDA), correspondant aux sols *Salins à complexe sodique* de la classification **CPCS (1967)**.

L'analyse des valeurs de la CE_{ps} , des différents horizons des profils, indiquent une forte concentration de la salinité, dans les horizons moyens et en profondeur, d'où le profil salin est descendant. Selon **Aubert (1976)**, les processus pédogénétiques peuvent modifier la morpho-

logie de ces horizons de moyenne profondeur. Dans ces sols salés assez argileux, comportant une nappe salée à moyenne profondeur, apparaissent des pseudo-mycéliums dits (gypso-salins). Selon **Aubert (1976)**, le dépôt du gypse prend naissance à la suite des échanges d'ions entre celui-ci et la solution qui le traverse en remontant de la nappe phréatique par capillarité. Dans certains sols il peut y avoir un véritable stockage du gypse à moyenne profondeur (**Aubert, 1976**).

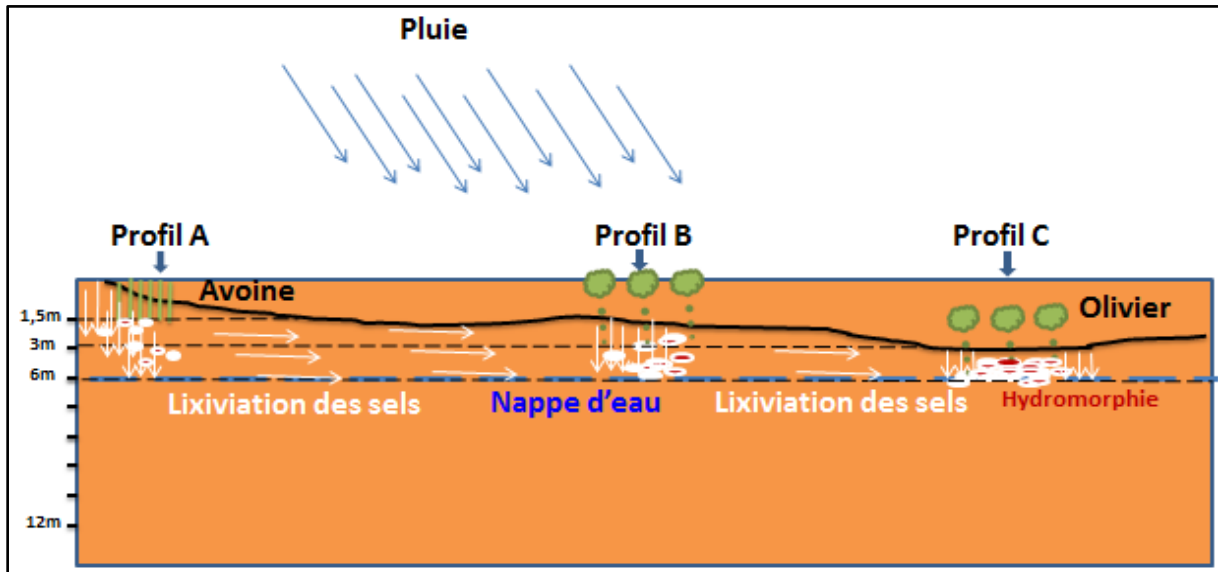


Figure 70. Mécanisme de la salinisation dans les sols de la parcelle (**période pluvieuse**)

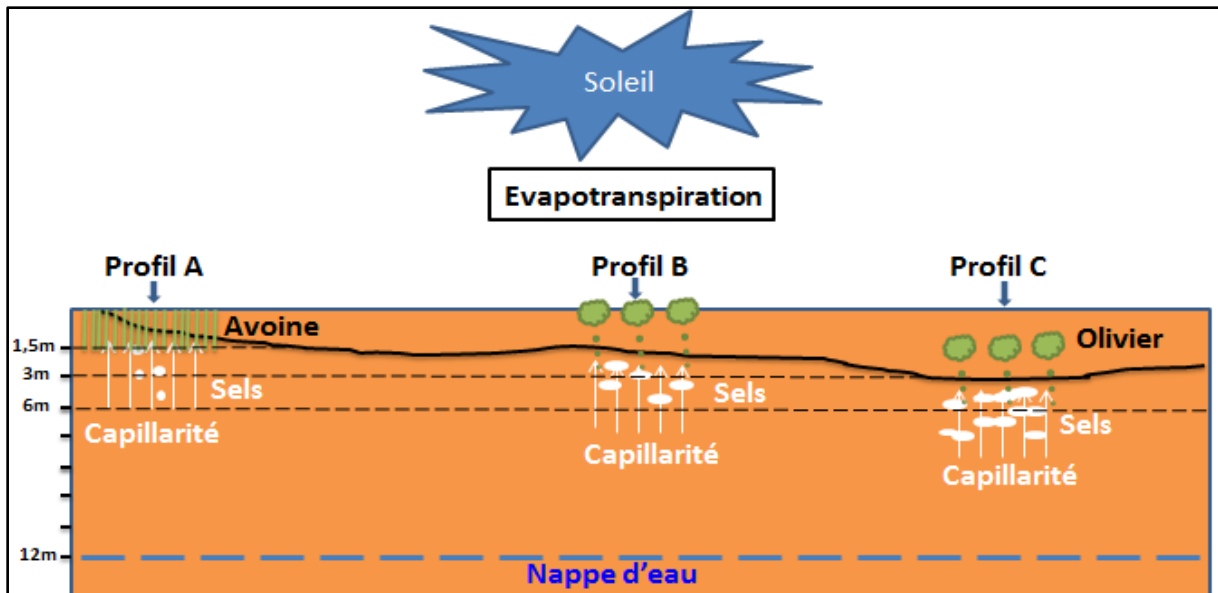


Figure 71. Mécanisme de la salinisation dans les sols de la parcelle (**période sèche**)