

Evaluation analytique de la pollution

Les déchets solides mis en décharge ne sont que très rarement inertes. De nombreuses réactions physico-chimiques et biologiques interviennent non seulement entre les déchets et le milieu récepteur (sol, substratum géologique, nappes, ...), mais également au sein même de ces déchets (Sbaa *et al.*, 2001). Les recherches ont montré que les décharges non contrôlées ont un impact négatif sur l'environnement, surtout avec la présence des métaux lourds (Mehdi *et al.*, 2007). En effet les métaux lourds issus de ces décharges, sont pour la plupart très dangereux lorsque ceux-ci parviennent à contaminer les sols ainsi que les eaux de boisson (Belevi & Baccin, 1989).

A partir des résultats obtenus dans les chapitres précédents, il ressort que la décharge non contrôlée de Kef Oum Teboul peut présenter un risque potentiel pour les écosystèmes environnants, notamment sur le sol suite au dépôt anarchique des déchets directement sur le substrat, ainsi que présenter un risque sur les berges du lac Tonga suite au ruissèlement et des lixiviats issus des déchets vers la partie aval. Le diagnostic de la décharge a fait montrer que le métal présente la fraction la plus élevée, considéré comme la principale source des métaux. Pour cela, l'évaluation des quantités des métaux lourds au niveau de la décharge est nécessaire, ceci permettra d'évaluer leur potentiel polluant et, par conséquent d'entreprendre les mesures appropriées pour réduire son impact sur la santé et l'environnement

L'objectif de ce chapitre est d'évaluer le risque de contamination par ces métaux issus de la décharge notamment, le cadmium (Cd), le cuivre (Cu), le fer (Fe), le plomb (Pb), et le zinc (Zn). Certains paramètres physico-chimiques comme l'humidité, le pH et la matière organique ont été également déterminés afin de connaître les mécanismes géochimiques qui gouvernent la migration horizontale des métaux.

V-2. Matériel et méthodes

L'évaluation du degré de pollution métallique de la décharge sur les sols qui l'héberge d'une part et sur les sols des berges du lac Tonga d'autre part, a été effectuée à partir des prélèvements des échantillons de sols de surface à deux niveaux (la décharge et le lac Tonga), ensuite, les prélèvements ont subi une série d'analyses physico-chimiques (pH, matière organique (MO), humidité (H%), conductivité électrique (CE), capacité d'échange cationique(CEC) et granulométrie) et autre métallique (le cadmium (Cd), le cuivre (Cu), le fer (Fe), le plomb (Pb), et le zinc (Zn)).

V-2.1. Echantillonnage

Le prélèvement des échantillons a été effectué à deux niveaux :

- Au niveau de la décharge :

En utilisant la même segmentation effectuée dans le chapitre précédent (maillage de 10×10 m), nous avons sélectionnés 12 mailles d'une manière aléatoire pour les prélèvements des sols de surface ;

- Au niveau du lac Tonga :

Trois (03) points ont été sélectionnées, qui représentent des exutoires de trois ruisseaux qui font jonction avec les berges du lac (figure 40).

Les prélèvements des échantillons ont été effectués en deux saisons humide et sèche durant les années 2015 et 2016.

La répartition des points sélectionnés ainsi que leur dénomination est la suivante :

- Un point (P0) considéré comme témoin localisé dans la partie amont de la décharge
- Deux points au niveau du premier dépotoir (P1-1 ; P1-2)
- Trois points au niveau du deuxième dépotoir (P2-1 ; P2-2 et P2-3)
- Trois points au niveau du troisième dépotoir (P3-1, P3-2 et P3-3)
- Trois points au niveau du lac Tonga (J1, J2 et J3)

Le choix des points est réalisé suivant l'inclinaison de la pente (sens de l'écoulement des lixiviats).

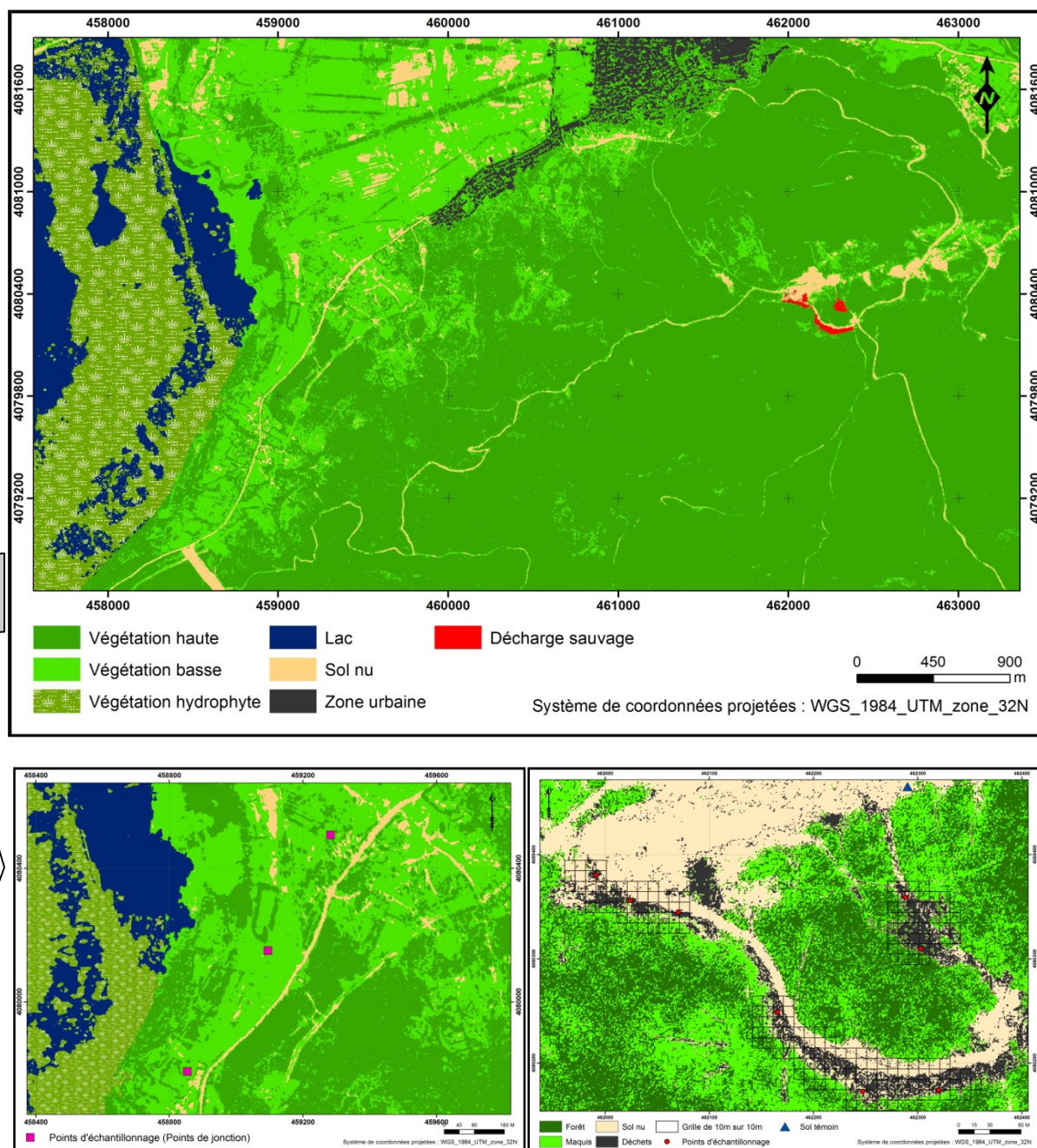


Figure 40. Localisation des points d'échantillonnage de sol dans la zone d'étude (**Réalisées par Chekchaki, 2018**)

V-2.2. Analyse des échantillons

Les échantillons prélevés sont séchés à l'air, broyés et tamisés à 2 mm.

Paramètres mesurés

pH : le pH est mesuré selon la méthode normalisée (**NF ISO 10390**) qui consiste de mettre en suspension le sol préparer avec l'eau désionisée en utilisant le rapport sol/liquide = 1/5 puis on agite pendant 5min, la suspension est ensuite laissée au repos pendant 2h pour enfin effectué la mesure à l'aide d'un pH-mètre.

CE : selon la méthode INRA, la conductivité est mesurée avec un conductimètre d'une suspension de 5g de sol et 25ml d'eau désionisée après une agitation pendant 1 heure ensuite laissée au repos pendant deux heures.

Humidité : elle est déterminée par la méthode normée **AFNOR NF U 44-171**, qui consiste à mettre à l'étuve l'échantillon de sol à 105°C pendant 24h.

MO : est obtenue par calcination de l'échantillon séché à 480°C pendant quatre heures dans un four à moufle selon la méthode (**NF EN 13039, AFNOR 2000**).

Granulométrie : est mesurée par la méthode robinson qui conforme aux normes **NEN5357 et ISO/DIS 11277**

Principe : après suppression des substances organiques (par attaque à l'eau oxygénée à 30 volumes, d'abord à froid, puis à chaud), et des carbonates (par attaque à l'acide chlorhydrique à froid, puis à chaud), le sol est ensuite dispersé par agitation rotative dans des flacons de 1000ml après adjonction d'hexamétophosphate de sodium (1 g/litre de suspension), la méthode ROBINSON est basée sur la différence de vitesse de sédimentation entre les particules légères et les plus grosses. La sédimentation des particules résulte des deux forces opposées : gravité et friction entraînant un mouvement dans un milieu fluide. Dans la méthode "ROBINSON", un échantillon est pipeté à différentes périodes et à différentes profondeurs de la suspension du prélèvement dans une éprouvette. Durée et profondeur sont déterminées à l'aide de la loi de stokes. La suspension pipetée est condensée et séchée et la pesée détermine le ratio de masse de la fraction pipetée.

CEC : la détermination de la capacité d'échange cationique est mesurée par la norme **AFNOR NF X 31-130**, l'échantillon est d'abord saturé en ions ammonium (NH_4^+) par percolations successives d'une solution d'acétate d'ammonium ($\text{CH}_3\text{CO}_2\text{NH}_4$) à 1 mol/L. Après avoir éliminé l'excès d'ions ammonium par percolations d'alcool éthylique, on procède ensuite à leur échange par une solution de chlorure de sodium à 1 mol/L.

Les ions ammonium déplacés sont dosés par spectrophotométrie sur la solution précédente, une fois filtrée. Les concentrations trouvées sont converties en cmol+/kg (centimoles de charges positives par kilogramme de sol).

Les métaux lourds : le dosage des métaux est effectué par absorption atomique au niveau du Centre de Recherche Scientifique et Technique en Analyses Physico-chimiques (CRAPC), après une minéralisation par attaque acide des échantillons à l'eau régale (mélange d'acide chlorhydrique et d'acide nitrique) durant 16 heures à température ambiante, puis à ébullition avec reflux pendant 2 heures.

Calcul du Facteur de contamination (FC) et l'indice de la charge de pollution (PLI) :

Ces deux facteurs sont utilisés pour l'évaluation de la contamination métallique des sols.

Facteur de contamination (FC)

La FC est le rapport obtenu en divisant la concentration de chaque métal dans le sol par sa valeur de fond. Dans notre étude la concentration du point témoin **P0** est utilisée comme valeur fond compte tenu de sa localisation plus ou moins éloignée des dépôts.

$$FC = C_{\text{métal lourd}} / C_{\text{fond du métal}}$$

Les valeurs de FC obtenues sont interprétées comme il a suggéré **Hakanson (1980)**,

Où : $FC < 1$ indique une faible contamination ; $1 < FC < 3$ une contamination modérée ;

$3 < FC < 6$ une contamination importante et $FC > 6$ une contamination très élevée.

Indice de charge de pollution (PLI)

L'indice de charge de pollution (PLI) a été proposé par **Tomlinson *et al.*, 1980** ; pour détecter le niveau de pollution des éléments chimique dans un échantillon donné et qui permet une comparaison de ces niveaux entre les sites et à différents moments, il a pour expression :

$$PLI = \sqrt[n]{(FC_1 \times FC_2 \times FC_3 \times \dots \times FC_n)}$$

Où 'n' est le nombre de métaux étudiés ($n = 5$ dans notre étude)

FC facteur de contamination,

Selon **Chakravarty & Patgiri (2009)**, lorsque la valeur $PLI > 1$ indique que le sol est pollué tandis que la valeur $PLI \leq 1$ indique l'absence de pollution.

Analyse statistique

Dans le but d'établir une relation entre les différents paramètres étudiés et afin de comprendre les mécanismes qui gouvernent le comportement des métaux dans le sol de la décharge, un traitement statistique par analyse en composantes principales (ACP) a été appliqué à l'ensemble des paramètres en saison humide et sèche.

L'ACP est une technique statistique qui permet de prendre en compte un grand nombre de paramètres (pas seulement deux) et de mettre en évidence les corrélations entre les variables, ainsi qu'entre les variables et les échantillons.

Pour notre étude, une ACP est réalisée avec le logiciel « **XLSTAT 2016** » en utilisant comme variables : le pH, la matière organique (MO), le taux des argile, la CEC, le cadmium (Cd), le cuivre (Cu), le fer (Fe), le plomb (Pb) et le zinc (Zn) mesurés et comme individus les 12 points de prélèvements effectués au niveau de la décharge et des berges du lac pendant les deux saisons (sèche et humide).

La méthode est utilisée afin de mettre en évidence les tendances, les corrélations et les phénomènes susceptibles d'influencer la répartition des éléments métalliques dans le sol de la décharge. Ainsi, à faire dégagée une typologie de la contamination métallique.

V-3. Résultats

V-3.1. Paramètres physicochimiques

La valeur moyenne de chaque analyse correspondante a été calculée suite à trois répétitions effectuées. Les résultats obtenus des deux saisons (sèche et humide), sont regroupés dans les tableaux 20 et 21, et représentés par les figures 41-44.

Tableau 20 : Résultats des analyses physicochimiques du sol dans la zone d'étude durant la saison sèche

	pH	CE (µS/cm)	H (%)	MO (%)
Minimum	4,58	53,6	0,54	2,7
Maximum	7,59	1639	3,8	19,33
Moyenne	6,40	460,49	1,75	8,52
Ecart-type	0,90	488,83	0,98	6,29

Tableau 21 : Résultats des analyses physicochimique du sol dans la zone d'étude durant la saison humide

	pH	CE (µS/cm)	H (%)	MO (%)
Minimum	5,46	122	0,12	1,4
Maximum	8,51	2435	9,6	21,9
Moyenne	7,01	453,77	3,15	7,1
Ecart-type	0,98	649,05	2,56	5,77

V-3.1.1. Le pH

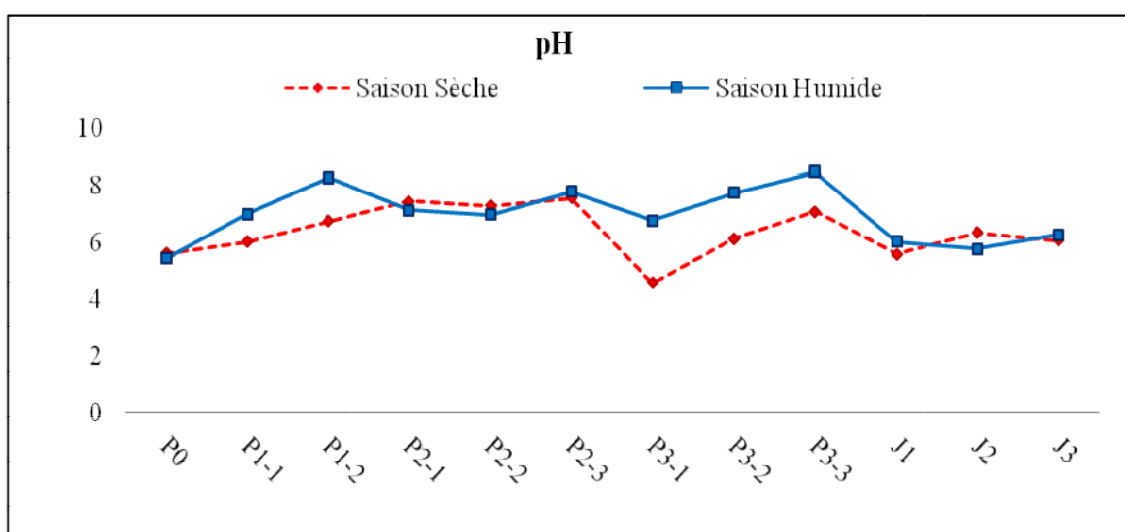


Figure 41. Variation des mesures du pH dans la zone d'étude durant la saison sèche et humide

Au niveau du point témoin ainsi qu'aux points de jonction le pH est légèrement acide durant les deux saisons, alors qu'au niveau de la décharge il est légèrement acide à neutre pendant la saison sèche et neutre à légèrement basique dans la saison humide, sauf pour le point (P3-1) le pH reste acide pour les deux saisons ;

V-3.1.2. La conductivité électrique

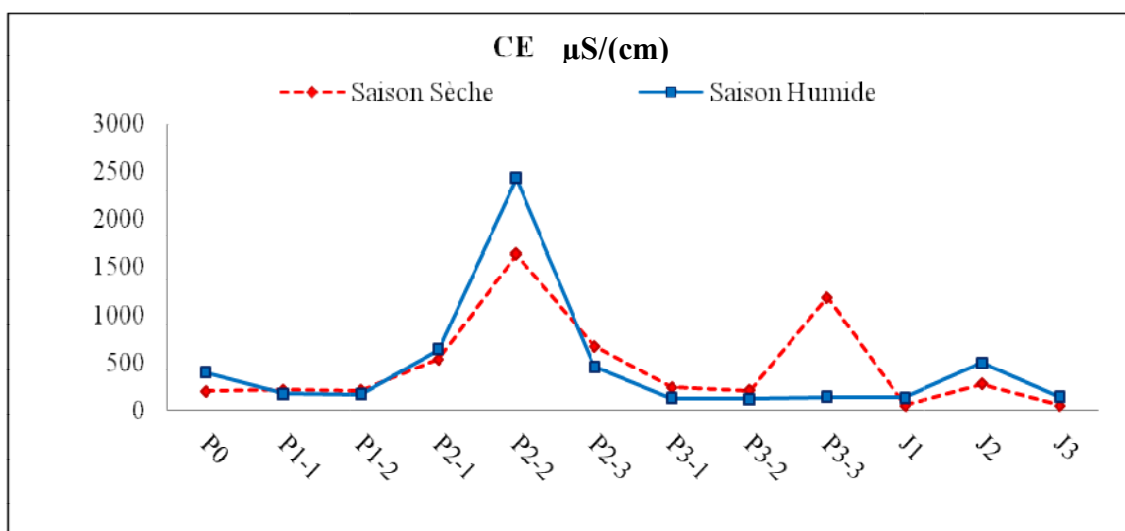


Figure 42. Variation des mesures de la conductivité électrique dans la zone d'étude durant la saison sèche et humide

Les valeurs enregistrées de la conductivité varient entre 53,6μS/cm et 1639μS/cm pendant la saison sèche et entre 122μS/cm et 2435μS/cm pendant la saison humide, les valeurs les plus

élevées sont observées au niveau de la décharge tandis que les plus faibles sont au niveau de jonction ;

V3.1.3. L'humidité

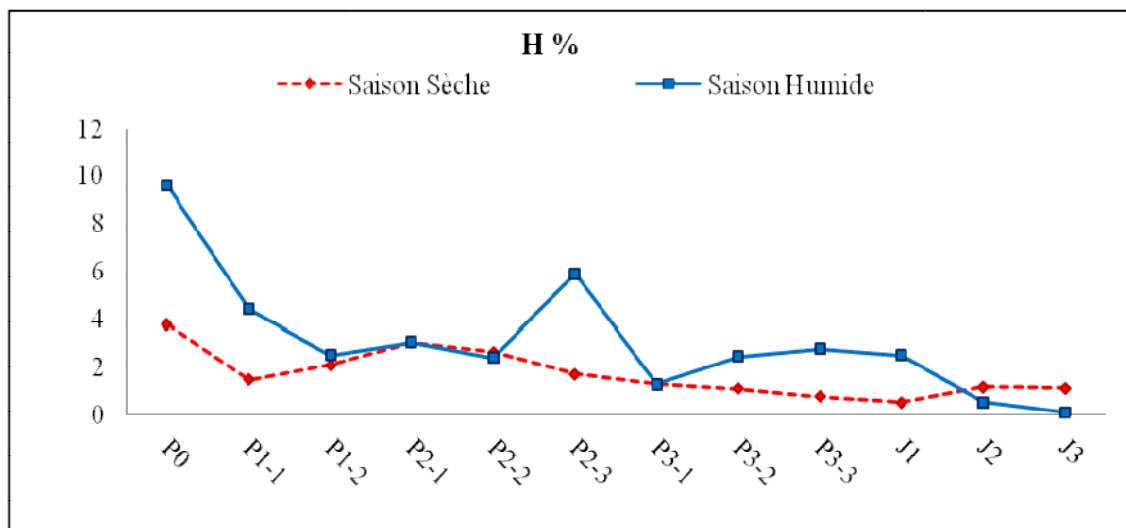


Figure 43. Variation des mesures de l'humidité dans la zone d'étude durant la saison sèche et humide

La valeur maximale de l'humidité est enregistré au niveau du point témoin que ce soit pour la saison sèche 3,8% ou humide 9,6%, tandis que la valeur minimale est enregistré au niveau des point de jonctions pour les deux saisons, au niveau de la décharge les valeurs varient entre 0,8% pendant la saison sèche et 5,92% au niveau de la saison humide ;

V-3.1.4. La matière organique

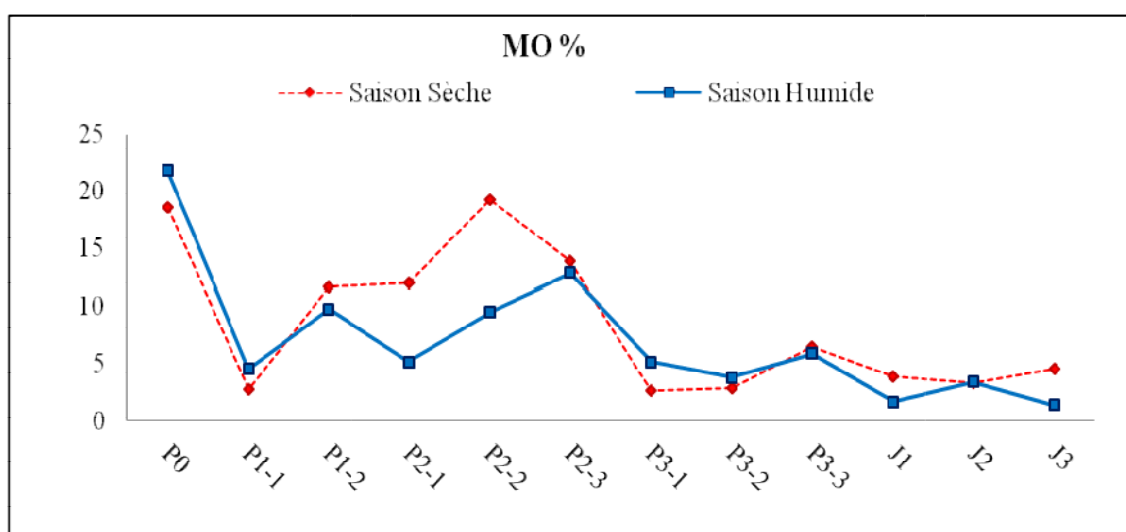


Figure 44. Variation des mesures de la matière organique dans la zone d'étude durant la saison sèche et humide

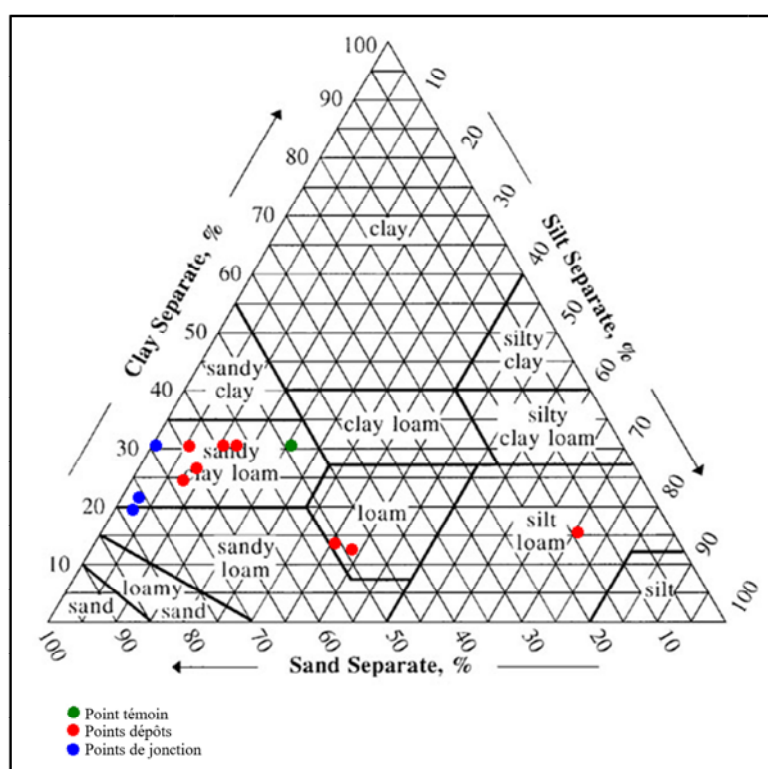
Le suivie de la matière organique démontre une forte teneur au niveau du point témoin et aux niveaux des dépôts 1 et 2, elle diminue au niveau du dépôt 3 et aux points de jonctions que ce soit pour la saison sèche ou humide.

V-3.1.5. La granulométrie

Les résultats des analyses granulométriques sont présentés dans le tableau ci-dessous

Tableau 22 : Résultats des analyses granulométriques du sol dans la zone d'étude

	Argile (%)	Limons (%)	Sable (%)
Minimum	12	2,4	14,83
Maximum	43,2	67,6	83,81
Moyenne	25,3	19,267	60,032
Ecart-type	9,39	19,202	17,636



Clay : Argile ; Loam : Limon ; Sand : Sable.

Figure 45. Triangle textural des sols de la zone d'étude

La figure ci-dessus dévoile la dominance de la classe « limon argilo-sableuse » pour presque la totalité des points prélevés, l'analyse de la fraction minérale de ces sols démontre l'abondance des sables et limons, avec des moyennes de 60,03 et 19,26% respectivement, indiquant que le sol est perméable favorisant les infiltrations, cela concorde avec une faible présence des argiles qui enregistrent une moyenne qui ne dépasse pas les 25%.

Interprétation

D'une manière générale, l'humidité de sol enregistre des valeurs moyennes à faibles que ce soit dans la décharge ou dans les points de jonction, présentant ainsi une forte perméabilité qui peut se traduire par une faible rétention de l'eau, ce caractère est confirmé par l'analyse granulométrique qui s'interprète par des sols riches en limons et sable, pauvres en argile ;

Les fortes teneurs en matière organique sont observées au niveau de la décharge notamment à la saison sèche, cela peut être attribué au type des déchets ménagés souvent très riches en matières organiques, durant la saison humide ces teneurs se diminuent, en effet les précipitations favorisent les phénomènes de solubilisation et le drainage des matières solubles ;

Les valeurs du pH démontrent des sols légèrement acides à neutres pendant la saison sèche, contrairement à la saison humide les sols étudiés sont neutres à légèrement basiques ;

La conductivité électrique est similaire pour les deux saisons (humide et sèche) elle augmente au niveau de la décharge en particulier au dépôt 2, pour ensuite se diminuer aux points de jonction.

V-3.1.6. Capacité d'échange cationique

Les résultats de l'analyse des bases échangeables ainsi que la capacité d'échange cationique sont regroupés dans les tableaux 23-26 et présentés par les figures 46-51.

Tableau 23 : Résultats des teneurs en bases échangeables du sol dans la zone d'étude durant la saison sèche

	Ca⁺⁺ (mg/l)	Mg⁺⁺ (mg/l)	Na⁺⁺ (mg/l)	K⁺⁺ (mg/l)
Minimum	0,25	0,18	0,01	0,70
Maximum	2,64	1,85	26,85	28,98
Moyenne	1,37	0,68	11,60	12,08
Ecart-type	0,82	0,52	8,52	8,65

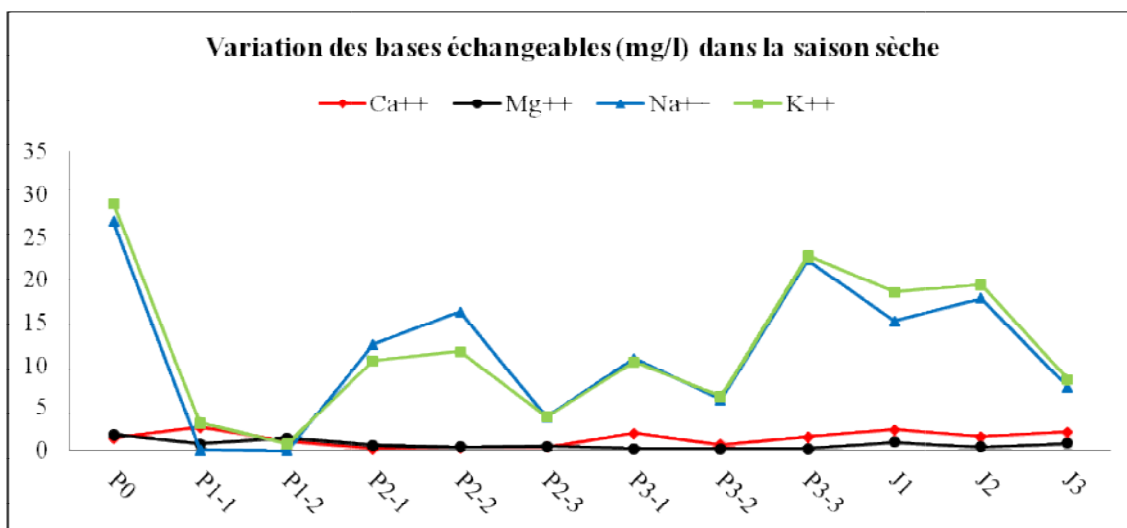


Figure 46. Variation des mesures des bases échangeables dans la zone d'étude durant la saison sèche

Les résultats des analyses des teneurs en bases échangeables durant la saison sèche fait ressortir la présence de deux groupes de courbe similaires, le premier est constitué de sodium et potassium, le second est représenté par le calcium et le magnésium, pour le premier groupe il représente les teneurs les plus fortes atteignant les 28,98mg/l de potassium enregistré au point témoin, pour le deuxième groupe les teneurs sont très faibles, elle varient entre 0,25 et 2,64mg/l et entre 0,18 et 1,85mg/l respectivement pour le calcium et le magnésium (tableau 23).

Tableau 24 : Résultats des teneurs en bases échangeables du sol dans la zone d'étude durant la saison humide

	Ca ⁺⁺ (mg/l)	Mg ⁺⁺ (mg/l)	Na ⁺⁺ (mg/l)	K ⁺⁺ (mg/l)
Minimum	1,07	0,16	0,00	2,19
Maximum	4,26	4,97	44,05	46,40
Moyenne	1,81	1,80	16,77	18,12
Ecart-type	0,91	1,25	16,38	15,80

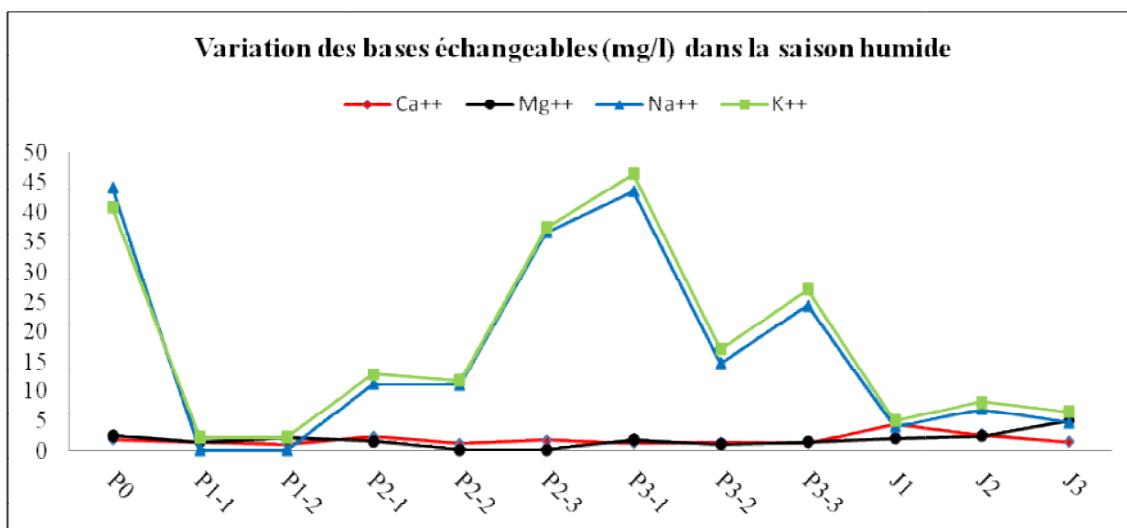


Figure 47. Variation des mesures des bases échangeables dans la zone d'étude durant la saison humide

Durant la saison humide, le même phénomène peut être distingué, avec des teneurs plus élevées aboutissant le double que celui de la saison sèche, les teneurs les plus élevées sont localisés au niveau du point témoin et dans le dépôt 3 (figure 47).

Tableau 25 : Résultats des analyses de la capacité d'échange cationique du sol dans la zone d'étude durant la saison sèche et humide

	Saison sèche		Saison humide	
	S (mg/l)	T (meq/100g)	S (mg/l)	T (meq/100g)
Minimum	0,71	8,40	0,82	5,20
Maximum	8,54	47,20	9,85	16,00
Moyenne	3,94	19,64	4,19	12,07
Ecart-type	2,44	12,65	3,28	3,14

S : somme des bases échangeables ; T : capacité d'échange cationique

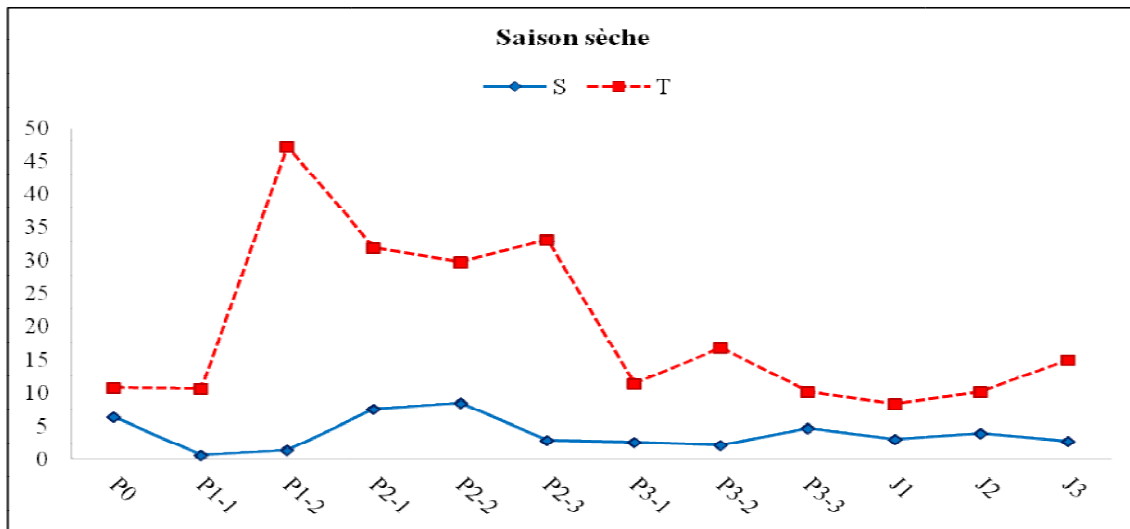


Figure 48. Variation des mesures de la capacité d'échange cationique dans la zone d'étude durant la saison sèche

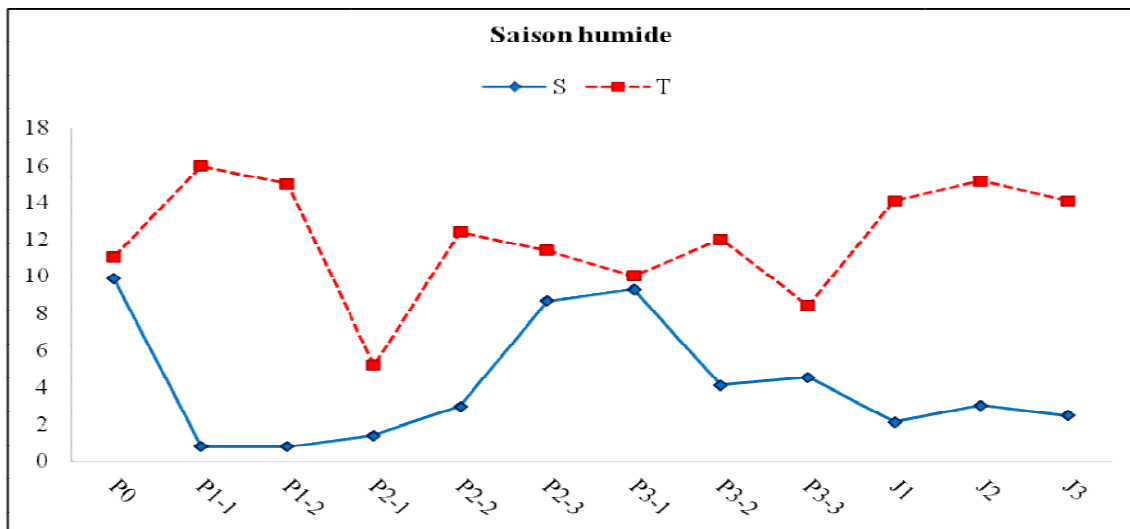


Figure 49. Variation des mesures de la capacité d'échange cationique dans la zone d'étude durant la saison humide

Durant la saison humide, tous les points échantillonnés enregistrent des valeurs de capacité d'échange cationique qui varient entre 5,2 et 16 meq/100g ce qui dévoile un sol avec une CEC moyenne à faible à savoir le point P2-1 qui enregistre la valeur minimale avec 5,2 meq/100g (tableau 25), cela peut être interpréter par la dominance des limons aux niveaux de tous les points, ainsi que les faibles teneurs en matière organique enregistrées, en effet la capacité d'échange cationique représente la quantité de cations que 100 g de sol peut piéger et retenir sur les argiles, la matière organique et/ou l'humus présents dans le sol, à un pH donné (Lano, 2014).

Durant la saison sèche, les résultats de la détermination de la CEC sont similaires à celles de la saison humide à l'exception des dépôts 1 et 2 qui présentent de fortes valeurs qui peuvent atteindre 47,2 meq/100g considérer comme une CEC élevée, ces fortes valeurs coïncident avec une hausse des teneurs en matière organique ainsi qu'une présence plus importante des argiles aux niveaux de ces sols.

Tableau 26 : Résultats des analyses des taux de saturation des sols dans la zone d'étude durant la saison sèche et humide

	Saison sèche	Saison humide
	Taux de saturation (S/T)	Taux de saturation (S/T)
Minimum	3,16	5,19
Maximum	59,17	92,9
Moyenne	25,729	38,496
Ecart-type	17,240	31,671

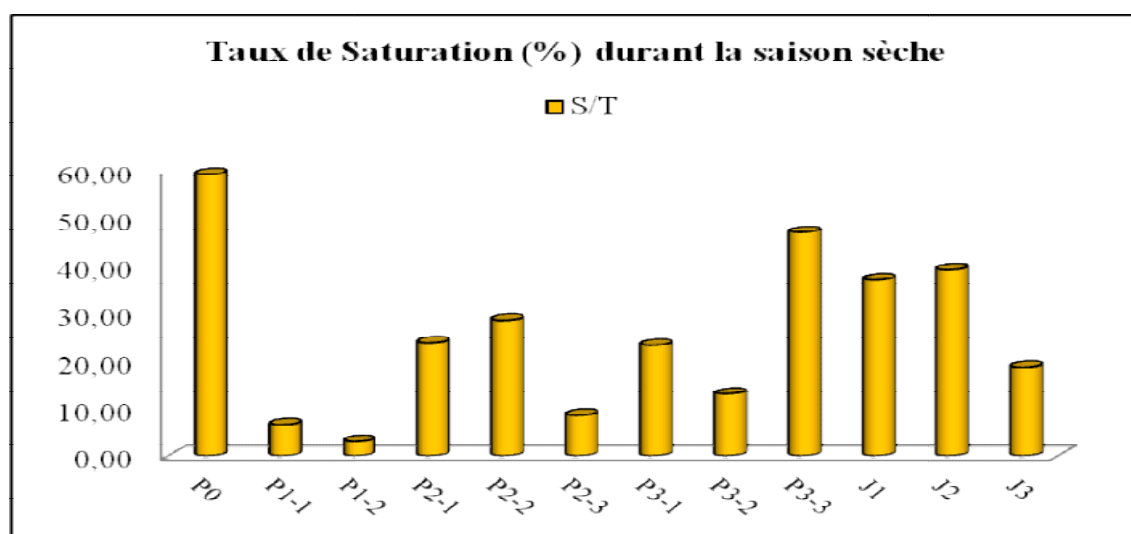


Figure 50. Variation des taux de saturation dans la zone d'étude durant la saison sèche

Selon la figure 50, une distribution inégale des valeurs des taux de saturation des sols au niveau de tous les points, le point témoin ainsi que les points de jonctions enregistrent les fortes valeurs, avec un maximum de 60%, au niveau de la décharge ces taux se régressent jusqu'à 3,16% (tableau 26).

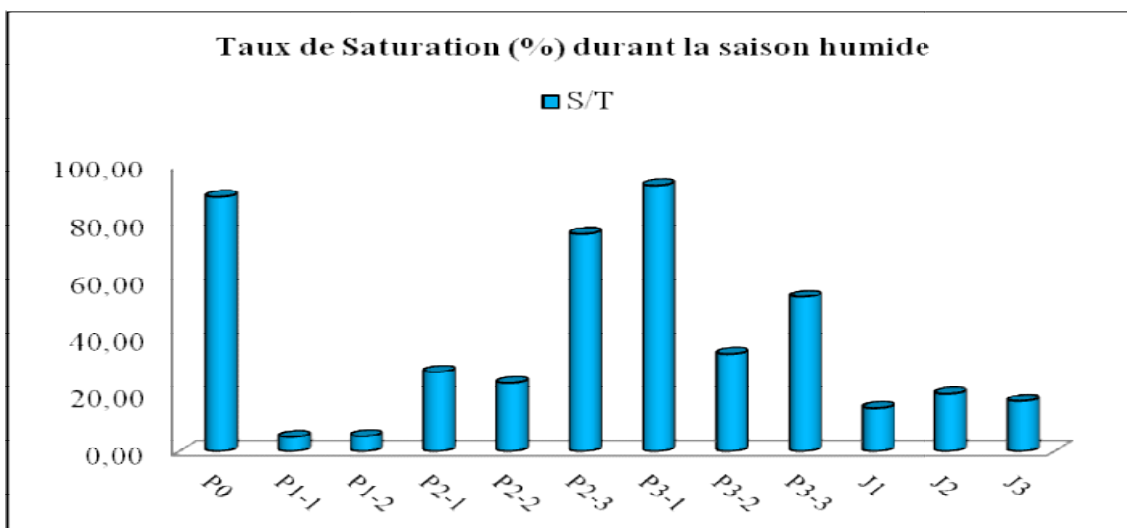


Figure 51. Variation des taux de saturation dans la zone d'étude durant la saison humide

Les valeurs des taux de saturation des sols prélevés durant la saison humide marquent une progression importante au niveau des dépôts 2 et 3 (figure 51), qui peuvent atteindre les 92,9% enregistré au niveau du point (P3-1) localisé au dépôt 3.

Interprétation

Selon les résultats obtenus, le taux de saturation des sols en bases échangeable varie d'un dépôt à l'autre et d'une saison à l'autre, le sol du point qui se trouve en aval de la décharge considéré comme point témoin, enregistre des taux de saturation très élevés de l'ordre de 59,17% et 89.1% en saison sèche et humide respectivement ;

Au niveau de la décharge, les dépôts 2 et 3 ont des taux de saturation plus élevés que le dépôt 1, le dépôt 3 possède le taux le plus élevé dans tous les points échantillonnés avec 92.9% en saison humide ce qui montre que le sol est organique et très chargés en éléments nutritifs, le dépôt 1 à un taux de saturation très faible que ce soit dans la saison sèche ou humide avec des valeurs qui ne dépassent pas les 6,68% cela est traduit par une par une somme de bases échangeables très faible indiquant que le complexe adsorbant est dessaturé ;

Aux points de jonctions, les taux de saturation des sols sont assez faibles, variant entre 18.78 et 39,22% en saison sèche et entre 15,19 et 20,11% en saison humide ;

Les teneurs en bases échangeables, démontrent que le sodium et le potassium au niveau de ces sols sont les plus important, représentant des saturations très élevées contrairement aux faibles valeurs de calcium et magnésium qui peuvent êtres considérés comme négligeables ;