

Etude De Comportement Du Colorant Textile Acide Blue 74 Dans Le Sol Par La Méthode De Lixiviation Sur Colonne

Onintsoa RAKOTOARINALA^{1,2}, Rova RAKOTOBE¹, Tahina RANDRIANANTOANDRO¹

¹ Laboratoire de Chimie de l'Environnement, Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo – Madagascar

² Laboratoire du Centre National de Recherche Industrielle et Technologique, rue Rasamimanana, Fiadanana - Antananarivo



Résumé - Contexte : Les effluents d'une entreprise textile œuvrant dans le lavage et de délavage de jeans sont fortement chargés en colorant bleu d'indigo ou Acid Blue 74 (AB74). Ils sont déversés en grande quantité directement dans la rivière avoisinante. On peut donc avoir un grand risque écologique et une contamination de la nappe souterraine. La concentration du colorant répandu dans le rejet peut atteindre un pic de $343 \pm 2 \text{ mg L}^{-1}$ qui varie instantanément selon l'activité de l'usine. **Objectif :** L'objectif de ce manuscrit est d'étudier le comportement du colorant AB74 lorsqu'il est en contact avec le sol lors du déversement dans le milieu naturel. **Méthodes :** Le comportement du colorant et la mobilité de l'ion sodium soluble dans la solution colorée ont été étudiés par utilisation de la méthode de lixiviation à flux descendant, par les tests de percolation et par le test d'adsorption en batch. **Résultat :** les expériences nous ont montré que le colorant bleu peut être transféré en profondeur à travers des sols sableux et sablo-limoneux, mais les sols argileux peuvent le retenir et se comportent comme un filtrant. Le temps d'infiltration dépend de la texture de sol: très rapide dans le sable (45 cm h^{-1}) et lente dans les sols argileux ($1,87 \text{ cm h}^{-1}$). Par contre, l'ion sodium du colorant est fortement mobile. Après une certaine saturation du sol, le sodium est désorbé et transporté avec l'eau par écoulement vertical. On peut dire que l'ion sodium s'adsorbe et se désorbe facilement dans le sol. Dans ce cas, lors du déversement des rejets chargés en colorant dans l'environnement, la pollution des nappes souterraines est fortement probable.

Mots clés – eaux usées; colorant textile; transfert dans le sol; lixiviation

Abstract -Context: Effluents from washing and bleaching jeans are highly loaded with indigo blue dye called Acid Blue 74 (AB74). They are dumped in large quantities directly into the near river. There can be a great ecological risk and contamination of the groundwater. The concentration of the spilled dye in the release can reach a peak of $343 \pm 2 \text{ mg L}^{-1}$ which varies instantaneously depending on plant activity. **Object:** this manuscript studies the behaviour of dye AB74 when in contact with soil after her spilled into the environment. **Methods:** The behaviour of the dye and the mobility of the soluble sodium ion in the coloured solution were studied by the use of the leaching method on a down-flow, by the percolation tests and with batch-type procedures. **Results:** Experiments showed us that blue dye can be transported in depth through sandy and sandy-loam soils, but clay soils can retain it and act as a filter. Infiltration time depends on soil texture: very fast in sand (45 cm h^{-1}) and slow in clay soils (1.87 cm h^{-1}). However, the soluble sodium ion in the dye is highly mobile. After some soil saturation, sodium is desorbed and transported by vertical flow. It can be said that the sodium ion adsorbs and desorbs easily in the soil. In this case, during spilling effluent dye-laden into the environment, groundwater pollution is highly probable.

Keywords - wastewater; textile dye; soil transfer; leaching.

I. INTRODUCTION

Actuellement, la surproduction de vêtements dans le monde a un impact néfaste sur notre planète. Les industries textiles, surtout lors de la phase de teinture et d'ennoblissement, utilisent principalement des produits chimiques et des colorants naturels ou artificiels. Cependant, ces colorants sont à l'origine de la pollution des eaux de surface, des nappes phréatiques et peuvent être

nuisibles pour la santé une fois évacués dans l'environnement. La production mondiale des colorants est estimée à plus de 800 000 tonnes par an [1]. Une grande partie de ces colorants, approximativement 140 000 tonnes par an, sont rejetées dans la nature lors des étapes de fabrication et coloration des tissus [2]. La pollution croissante par des industries textiles a donné lieu à des cours d'eau inutilisables. En 2015, 70% des cours d'eau en Chine sont pollués par les substances provenant des textiles dont les colorants sont parmi les principales sources de contamination de l'environnement sur place [3]. A Madagascar, les entreprises franches se développent et se propagent dans toutes les grandes villes. 95% de ces entreprises travaillent sur les secteurs textiles. Jusqu'à maintenant, le textile tient la 2ème place de tous les produits exportés par Madagascar. Malgré l'existence des réglementations concernant la possession des unités de traitements de rejets, la plupart de ces industries rejettent des effluents peu ou pas traités dans les cours d'eau et dans les zones marécageuses. A part les effluents domestiques, les pollutions générées par les entreprises textiles constituent la principale source de la pollution à Antananarivo. Parfois, ces effluents sont chargés en colorants et sont évacués directement dans la nature. Ces eaux polluées sont parfois utilisées par les citoyens à l'irrigation et à la lessive. Notre site se situe à Tanjombato (Antananarivo) où quelques usines textiles ont évacué ses eaux colorées directement dans la rivière Ikopa. L'objectif de notre étude est de déterminer les comportements du colorant textile Acid Blue 74 (AB74) lorsqu'il entre en contact avec le sol. Normalement, le colorant se comporte différemment selon les propriétés, chimique ou physique du sol. Dans ce cas, nous avons effectué des tests en laboratoire sur le transfert du colorant à travers d'une colonne de sol et la mobilité de l'ion sodium soluble dans la solution d'essai. On a utilisé la méthode de lixiviation sur colonne à flux descendant [4,5], des tests de percolations du sol ainsi que des tests d'adsorption en batch [6]. Trois types de sol prélevés sur sites font l'objet de cette étude : sol à sable fin et sol sablo- limoneux prélevé dans la rivière, un sol argileux prélevé près du site.

II. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. Échantillonnage

Pour le sol, on a utilisé trois types de sol à différentes textures (sableux, sablo-limoneux et argileux). Les échantillons de sol ont été prélevés dans les couches superficielles entre 0 à 20 cm de profondeur. Ils ont été séchés à l'air et à la température ambiante et ensuite tamisés à 2 mm. Ils ont été homogénéisés soigneusement, afin d'accroître la reproductibilité des résultats. Avant leur utilisation, les sols ont été entreposés à température ambiante et conservés à l'air.

La solution utilisée est 400 mg/l du colorant Ab74 (Sigma-Aldrich). C'est la concentration qui est similaire à celle de la concentration dans le rejet brut déversé dans la rivière.

2.2. Processus de lixiviation

Le processus de lixiviation est une méthode par lequel une substance chimique migre vers le bas à travers un profil de sol ou une colonne de sol [7]. Le remplissage et le tassement du sol dans les colonnes requièrent une cuillère, un piston et un appareil à vibrations. Les colonnes de lixiviation (*Fig. 1*) sont remplies avec un sol préparé, séché à l'air et tamisé, jusqu'à une hauteur d'environ 30 cm. Pour que le sol soit homogène dans les colonnes, il y est introduit par petites quantités, puis pressé par un piston tout en soumettant simultanément la colonne à de petites vibrations, jusqu'à ce que le sommet de la colonne du sol ne s'enfonce plus. Une fois remplies, les colonnes de sol sont mouillées avec l'eau distillée, de bas en haut, de façon que l'eau chasse l'air retenu dans les pores du sol. Après, on laisse les colonnes s'équilibrer et l'excès d'eau s'égoutte par gravité. Ensuite, la solution colorée a été introduite à la surface de colonne sous forme de pluie artificielle par une burette [8]. Les lixiviats sont recueillis à l'aide d'un bécher par fraction de temps. Les teneurs en sodium dans les lixiviats ont été déterminés à chaque fois à l'aide d'un photomètre à flamme (JENWAY PFP7).



Fig. 1 : Colonnes de verre utilisées pour les tests (hauteur : 40cm ; diamètre interne : 4cm)

2.3. Test de percolation

Le test de percolation permet d’effectuer la mesure de la vitesse d’infiltration verticale d’une eau (Ki.) à travers d’un sol. La capacité d’infiltration est définie comme la quantité d'eau, par surface et par unité de temps, qui pénètre dans le sol. Plusieurs méthodes peuvent être effectuées, in situ ou en laboratoire, dont les résultats sont fiables et précis. Dans notre cas, la capacité de filtration du sol a été calculée sur la base de la méthode de Henin [9, 10]

$$K = \frac{I \cdot V}{h \cdot S}$$

K : vitesse de percolation en cm/h

I : hauteur de la colonne de sol (hormis les 2 cm de graviers)

V : volume en cm³ d’eau recueillie par heure

h : hauteur en cm entre la limite inférieure de la colonne et la surface libre de l’eau

S : section intérieure du tube en cm²

Les résultats sont classifiés selon le coefficient de perméabilité présenté dans le *tableau 1*.

TABLEAU 1 : CLASSIFICATION DE LA PERMEABILITE DU SOL [11]

	Taux de perméabilité (cm/h)	
	Limite inférieure	Limite supérieure
Très faible	-	< 0,13
Faible	0,13	0,3
Modérément faible	0,5	2
Modéré	2	6,3
Modérément forte	6,3	12,7
Forte	12,7 -	25
Très forte	> 25	-

2.4. Adsorption par ratio sol/solution

Les expériences de type batch comprennent la relation entre la masse de sol, le volume de solution, le temps d’équilibre entre eau/sol. On a maintenu le sol humide afin de ne pas modifier les propriétés d’adsorption du sol [6]. Pour trouver des résultats pertinents, on a utilisé les ratios masse de sol / volume de solution de 1 : 2, 1 : 4 et 1 : 8 qui représentent par exemple 1 gramme de sol sec pour 2 ml de solution. Le temps d’équilibre était de 24 heures. Cette méthode permet de mieux comprendre l’interaction entre le soluté et la matrice solide. La courbe de l’isotherme est présentée par la quantité du soluté dans la phase solide et la concentration finale du soluté à l’équilibre. [12,13].

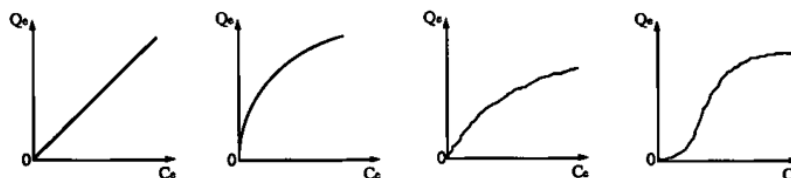


Fig. 2 : Différentes formes d'isothermes d'adsorption d’après Giles [13]

III. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Propriété de la molécule

Le colorant AB74 a comme formule globale $C_{16}H_8N_2Na_2O_8S_2$ ($M = 466,35 \text{ g mol}^{-1}$). Il fait partie de la famille des indigoïdes. Sa longueur d'onde maximale d'absorption se situe entre 610 et 611 nm. La structure de la molécule est représentée sur la Fig. 3.

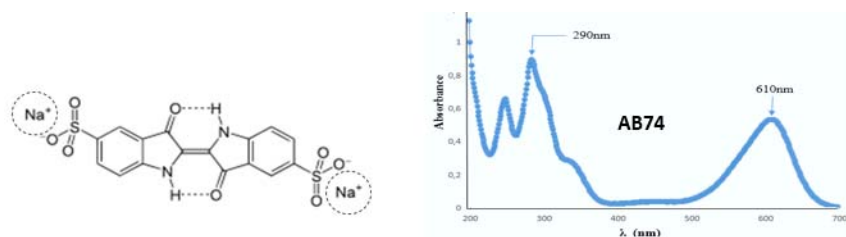


Fig. 3 : Formule et spectre de l' Indigo carmin ou Acid Blue 74 (AB74)

L'AB74 est fortement soluble dans l'eau (10 g L^{-1} à 25 °C). Lorsqu'on le dissout dans l'eau distillée, les ions sodium se dissocient de la molécule-mère et donnent des ions sodium libres. C'est pourquoi la teneur en sodium dans la solution d'AB74 augmente au fur et à mesure que la concentration en colorant augmente. Les valeurs expérimentales permettent de tracer la courbe d'étalonnage ci-après (Fig. 4). C'est une droite d'équation $y = 0,08x$ (avec y : teneur en sodium exprimée en mg.L^{-1} et x : concentration en colorant exprimée en mg.L^{-1}).

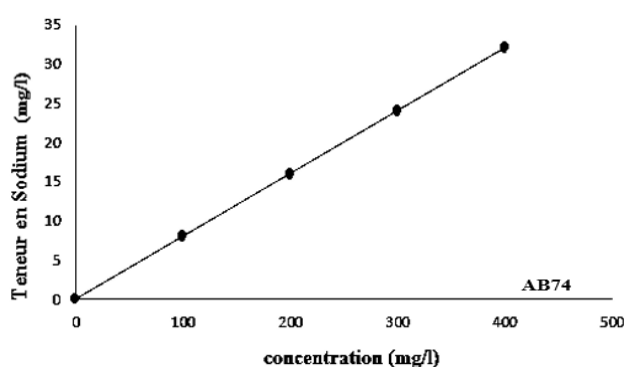


Fig. 4 : Courbe d'étalonnage du sodium à partir de la solution du colorant AB74

Les analyses physico-chimiques de la substance d'essai montrent que la concentration en sodium soluble dans la solution pure du colorant AB74 est de 32 mg L^{-1} (Tableau 2). Le colorant est complètement soluble et ne possède pas de matières en suspension (MeS). En matière de pollution, la présence du colorant entraîne une augmentation de la teneur en matière organique avec une valeur de la DCO de $302,08 \text{ mg L}^{-1}$. La substance d'essai préparée ne possède aucune impureté.

TABLEAU 2 : PROPRIÉTÉ PHYSICO-CHIMIQUE DE LA SOLUTION DU COLORANT [AB74]=400 mg L^{-1}

	Couleur	pH	CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	MeS (mg L^{-1})	Na^+ (mg L^{-1})	Ca^{2+} (mg L^{-1})	Mg^{2+} (mg L^{-1})	SO_4^{2-} (mg L^{-1})	DCO (mg L^{-1})
Solution d'essai (AB74)	Bleu foncé	3,69	270	0,00	32,00	0,00	0,00	32,29	302,08

3.1. La vitesse d’infiltration dans les trois types de sols

La vitesse de percolation de la solution colorée est exprimée K_{SF} (pour le sable fin ou sol sableux), K_{SL} (pour sol sablo-limoneux) et K_A (pour le sol argileux). Les résultats obtenus (Tableau 3) nous montrent que le sol argileux présente une forte imperméabilité. Sa vitesse de percolation est très lente ($1,87 \text{ cm h}^{-1}$). Cela signifie que l’argile ne laisse pas facilement la solution colorée s’infiltrer en profondeur. Le sol argileux peut former donc un obstacle à l’infiltration verticale des colorants chimiques même s’ils sont très solubles. Quant au sol sableux, la vitesse de percolation est très rapide. Il laisse la solution colorée circuler jusqu’ en profondeur et ne retient pas les colorants solubles dans la solution. Les couleurs du lixiviat sont encore bleues foncées, c’est-à-dire que le colorant passe à travers du matériau. Enfin, l’horizon sablo-limoneux a une propriété intermédiaire. La vitesse de percolation est modérée (5 cm h^{-1}). L’infiltration en profondeur est possible mais la vitesse de percolation peut être influencée par la concentration en soluté.

TABEAU 3 : VITESSE DE PERCOLATION DE LA SOLUTION COLOREE DANS LES TROIS DIFFERENTS TYPES DE SOL

	Vitesse de percolation	Infiltration	Classe de perméabilité [11]
Sol sableux	$K_{SF}=45 \text{ cm h}^{-1}$	Très rapide	Très forte
Sol sablo-limoneux	$K_{SL}=5 \text{ cm h}^{-1}$	Moyenne	Modérée
Sol argileux	$K_A=1,87 \text{ cm h}^{-1}$	Lente	Modérément faible

La texture du sol joue un rôle important dans l’infiltration du colorant en profondeur. La couche argileuse peut ralentir le transport des polluants vers les horizons inférieurs. A savoir que plusieurs facteurs peuvent influencer le transfert du soluté tel que les facteurs physiques (la taille des particules, la surface spécifique exposée à la lixiviation aspect physique de la solution, la température..), chimique (pH du sol, pH de la solution, les processus de complexation, les réactions chimiques ...) et biologiques [11]. Dans un cours d’eau, comme la rivière Ikopa, l’écoulement d’eau réduira l’infiltration directe des colorants sur le point de déversement. Le courant d’eau emmène les polluants en aval du site, ce qui entraîne des risques majeurs pour les usagers quotidiens de l’Ikopa. Cette rivière sert aux Citadins à l’usage domestique et à l’usage agricole (Fig. 5).



Fig. 5 : La vie quotidienne de l’Ikopa (a) berceau des eaux usées (b) lessive ©Alamy (c) pêche (d) irrigation des rizières

3.2. Mobilité de l’ion sodium dans les sols

Les résultats de l’analyse des échantillons issus des essais de lixiviation sont utilisés soit pour simuler un scénario de lixiviation sur le terrain, soit pour évaluer certaines propriétés intrinsèques spécifiques du matériau. La solubilité des éléments chimiques dans la solution est un facteur majeur de comportement de lixiviation. Ainsi, la solubilité des composés inorganiques est fortement influencée par le pH et le potentiel redox, tandis que la solubilité des constituants organiques est essentiellement liée à sa polarité [14]. Les figures ci-dessous (Fig. 6) nous montrent deux phases : i) première phase : lessivage avec de l’eau distillée permettant l’appauvrissement du sol en minéraux, ii) deuxième phase : la lixiviation de la solution colorée. Lorsque la concentration maximale en sodium est atteinte, la colonne est ensuite lessivée avec de l’eau distillée pour connaître la désorption des ions dans le sol. Les lixiviats collectés font ensuite l’objet de l’analyse chimique (concentration en sodium).

En solution, le colorant AB74 libère l’ion Na^+ de ses groupements sulfonates en donnant de l’acide sulfonique- $\text{R-SO}_3\text{H}^+$, d’où sa propriété acide. En contact avec le sol, l’ion sodium libre peut s’adsorber sur le complexe adsorbant du sol. Cette adsorption peut être due, soit par des attractions électrostatiques, soit par la formation de liaisons chimiques directes de type ionique, covalente

ou complexe sur le système adsorbant du sol. Les résultats nous montrent que les courbes de lixiviation obtenues présentent la même allure, sous forme d'une cloche, mais la durée de l'expérience varie en fonction de la texture du sol (Fig. 6).

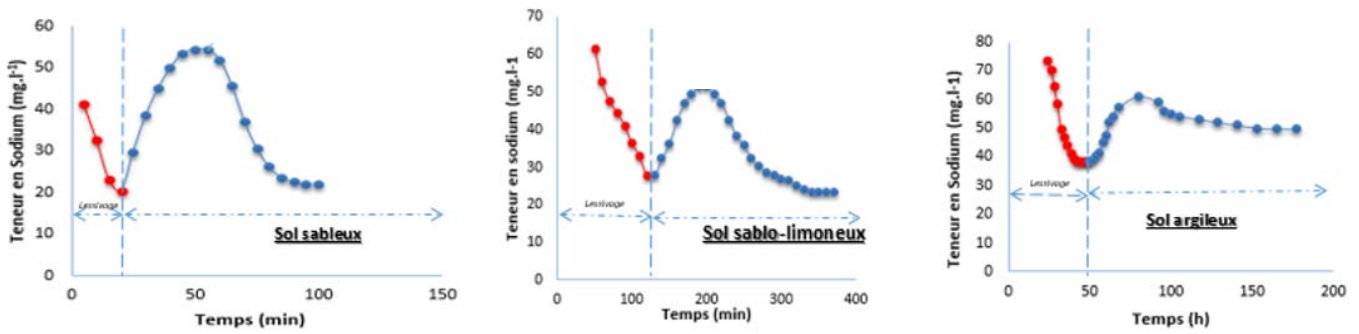


Fig.6 : Resultats des tests de lixiviation du colorants AB74 (400mg L⁻¹) sur les différents sols

Lors de la lixiviation, on remarque que le temps de contact avec le sol influe sur la qualité de lixiviat. Lorsque le temps de contact entre le sol et la solution augmente, on observe que la quantité des ions lixiviée augmente [15]. La solution extraite au maximum les minéraux solubles présents dans le sol. En comparant l'aspect des lixiviats, on observe que le sable fin et le sol sablo-limoneux laissent passer le colorant à travers la colonne de sol, d'où la couleur bleue des lixiviats. Pour le sol argileux, le colorant bleu est retenu aux premiers horizons du sol. Le lixiviat est presque incolore. D'après ces résultats, on peut dire que les ions sodium présent dans le colorant s'adsorbent et se désorbent facilement dans les sols mais le temps de transfert dépend essentiellement de la propriété texturale du sol traversé. En réalité, la solubilité des composés minéraux peut être influencée par la présence d'autres constituants. En particulier, les phénomènes d'adsorption, la concurrence pour les ligands (c.-à-d les groupes ou les ions attachés à un ion métallique central) et l'« effet ionique commun » influent sur la solubilité des constituants inorganiques et, par conséquent, sur leur disponibilité pour le lessivage [14].

3.3. Isotherme d'adsorption du colorant AB74

Les Fig. 7 présentent le comportement d'adsorption du colorant bleu sur les trois types de sol (sable fin, sol sablo-limoneux et sol argileux). Dans la nature, l'adsorption d'une substance chimique dans les sols fait intervenir différents facteurs (physique, chimique et biologique) qui peuvent agir simultanément ou séparément. Ces mécanismes sont parfois très complexes. Nos approches consistent à connaître uniquement le comportement d'adsorption du colorant en réalisant des mélanges d'adsorbants et de solutions en proportions variables dans des systèmes parfaitement agités appelés tests en milieu dispersé ou tests en batch [16]. Avec le sable fin, l'allure de la courbe est une droite. Il y a donc une répartition constante du colorant entre la phase liquide et la phase solide. Pour le sol sablo-limoneux et argileux (Fig.7 b-c), les courbes présentent des faibles pentes qui augmentent avec la concentration en soluté (Fig.7a). On peut dire que le colorant est en concurrence avec le solvant (eau) pour l'occupation des sites de fixation sur la phase solide [16, 17].

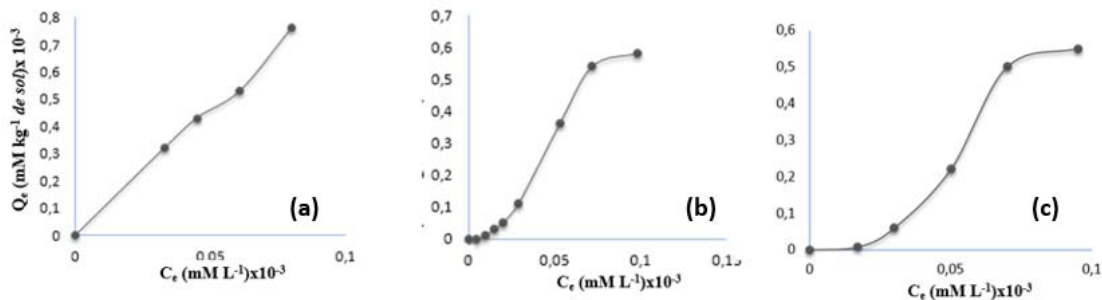


Fig. 7 : Courbe d'isotherme d'adsorption du colorant AB74 sur les différents sols

IV. Conclusion

Cette étude nous a permis de connaître le comportement du colorant AB74 et la mobilité de l'ion sodium de colorant à travers des différents types de sols. Une concentration de 400 mg L⁻¹ a été testée. On a observé que le colorant bleu migre à travers les colonnes de sols sableux et sablo-limoneux. Lorsque le sol se sature en colorant, le lixiviat devient bleu et la concentration en sodium augmente significativement jusqu'à une valeur approximative de 51 mg L⁻¹ qui est une valeur supérieure à celle du colorant initial ([Na⁺]=32 mg L⁻¹). Ce résultat nous montre que la solution d'essai a lessivé en même temps l'ion sodium dans le sol traversé. Le temps de transfert est 50 minutes dans le sol sableux et d'environ 3 heures dans le sol sablo-limoneux. Par contre, à travers le sol argileux, le processus est très lent, environ 80 heures. Le sol argileux filtre la totalité du colorant en surface de la colonne de sol. Le lixiviat collecté est incolore, mais il est fortement chargé en sodium qui est naturellement désorbé en même temps à travers du sol traversé. On sait que les phénomènes d'adsorption jouent un rôle important dans la lixivabilité des constituants inorganiques. Bref, on peut dire que le colorant bleu AB74 peut être totalement filtré par des sols fortement imperméables et la mobilité de l'ion sodium soluble dans la solution est effective. A cet effet, le processus d'adsorption et désorption de l'ion sodium est réversible et la migration du colorant en profondeur dépend essentiellement de la texture du sol récepteur. Dans un site de déversement de rejets fortement chargés en colorant, il faut toujours surveiller les risques écologiques de la zone environnante et prendre en compte la menace d'infiltration des polluants ainsi que la contamination des nappes souterraines.

RÉFÉRENCES

- [1] Mansour H. B., Boughzala O., Dridi D., Barillier D., Chekir-Ghedira L. et Mosrati R., (2011), Textiles dyes as a source of wastewater contamination: screening of the toxicity and treatment methods. *Journal of Water Science*; vol. 24 n° 3; 2011; pp. 209-238.
- [2] Mansour H. B., Mosrati R. , Corroler D. , Bariller D. , Ghedira K., Bariller D. et Chekir- Ghedira L. In vitro study of DNA damage induced by acid orange 52 and its biodegradation derivatives. *Environ. Toxicol. Chem.*, 28; 2009; pp. 489-495.
- [3] Weber E. J. et Adams R.L. Chemical-and sediment-mediated reduction of the azo dye disperse blue 79. »; *Environ. Sci. Technol.* Vol. 29; 1995; pp. 1163 -1190.
- [4] Odie L. et Aurioi J.C. Evaluation d'essais de détermination du comportement à la lixiviation de déchets utilisés en technique routière. » ; *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées* ; 2009 ; pp. 39-49.
- [5] Jackson D.R., Garrett B.C. et Bishop T.A. Comparison of batch and column methods for assessing the leachability of hazardous waste. *Environ. ScienceTechnology*, 18,1984, pp. 666-673
- [6] Roy W.R., Krapac I.G., Chou S.F.J., Griffin R.A., Batch-type procedures for estimating soil adsorption of chemicals. EPA/530-SW-87-006-F, U.S. Environmental Protection Agency, Illinois, 1991, 100 p
- [7] Holland P.T., Glossary of Terms Relating to Pesticides. IUPAC Reports on Pesticide (36).*Pure & Appl. Chem.* 68, 1996, pp. 1167-1193
- [8] OCDE, Essai n° 312: Lixiviation sur des colonnes de sol, Lignes directrices de l'OCDE pour les essais de produits chimiques, Section 3, Éditions OCDE, 2004, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264070578-fr>
- [9] Baize D., Guide des analyses en pédologie-Chapitre 21, INRA-Paris, 2e édition, ISSN 1150- 3912, 2000, pp. 195–198
- [10] Henin S., Gras R. et Monnier G. Le profil cultural Principes de physique du sol. Masson et Cie ; Paris, 1969, 331 p
- [11] FAO, Le sol – 9. Perméabilité du sol, Web : https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706f/x6706f09.htm, consulté le 5 mai 2022,
- [12] Calvet R., Adsorption of Organic Chemicals in Soils. *Environmental Health Perspectives*,(83), (1989), pp. 145-177
- [13] Giles C.H. McEwan T.H. et Nakhwa S.N. and Smith D., Studies in Adsorption. Part 11. A System of Solution Adsorption Isotherms, & its Use in Diagnosis of Adsorption Mechanisms & in Measurement of Specific Surface Areas of Solids. *J. Chem. Soc.*, 3, 1960, 3973-3993.

- [14] Washington State Department of Ecology, An Assessment of Laboratory Leaching Tests for Predicting the Impacts of Fill Material on Ground Water and Surface Water Quality. Publication No. 03-09-107, 2003, 173 p
- [15] Janusa, M.A., Bourgeois, J. C., Heard, G. E., Kliebert, N. M., et Landry, A.A., Effects of Particle Size and Contact Time on the Reliability of Toxicity Characteristic Leaching Procedure for Solidified/Stabilized Waste. *Microchemical Journal*, 59(2), 1998, pp.326-332. doi:10.1006/mchj.1998.1601
- [16] Gourdon R., Etude de l'adsorption-désorption de polluants organiques dans les sols, Approche méthodologique et application au pentachlorophénol et aux hydrocarbures aromatiques polycycliques, Etude RECORD n°94-0404/3A, 1997, 224 p
- [17] Weber W.J.J., McGinley P.M., Katz P.M., Sorption phenomena in surface systems: concepts, models and effects on contaminant fate and transport, *Water Resources Research*, 25(5), 1991, pp. 499-528