

Évaluation de la toxicité des hydrocarbures aromatiques polycycliques contenus dans les sols de deux zones agroécologiques du Mali

Evaluation of the toxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from two agroecological zones in Mali

Vital TRAORÉ

Maître de Conférences, Enseignant chercheur
Faculté des Sciences et Techniques (FST) Bamako, République du Mali
Université des Sciences, des Techniques et des Technologies de Bamako (USTT-B),

Souleymane Bathiè KONÉ

Maître-Assistant, Enseignant chercheur
Faculté des Sciences et Techniques (FST) Bamako, République du Mali
Université des Sciences, des Techniques et des Technologies de Bamako (USTT-B),

Edmond Ahoua SIKA

UFR- Sciences et Gestion de l'Environnement,
Université d'Abobo-Adjamé, Abidjan,
République de la Côte d'Ivoire

Drissa KEÏTA

Infirmier d'État de Santé, Assistant
Association Santé Communautaire Kalaban Coura ACI (ASACO-KALA-ACI),
République du Mali

Arouna DEMBÉLÉ

DESS en Sciences Biologiques, Commission Nationale pour UNESCO au Mali
Faculté des Sciences et Techniques (FST) Bamako, République du Mali
Université des Sciences, des Techniques et des Technologies de Bamako (USTT-B),

Daniel TRAORÉ

Programme National de Lutte contre le Paludisme, Rue Quartier du fleuve, Bamako,
République du Mali.

Fallaye KANTÉ

Faculté des Sciences et Techniques (FST) Bamako, République du Mali
Université des Sciences, des Techniques et des Technologies de Bamako (USTT-B),

Date de soumission : 05/04/2025

Date d'acceptation : 11/06/2026

Pour citer cet article :

TRAORÉ. V. & al. (2026) « Évaluation de la toxicité des hydrocarbures aromatiques polycycliques contenus dans les sols de deux zones agroécologiques du Mali », Revue Internationale du chercheur « Volume 7 : Numéro 2 » pp : 1362-1380

Résumé

Introduction : L'agriculture comblant les besoins alimentaires de 40% de la population mondiale, contribue à 45% du PIB du Mali. Cependant, cette activité entraînerait la pollution des sols par des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). **Objectifs :** Évaluer la toxicité des HAP contenus dans les sols agricoles de la Zone CMDT (Sikasso) et Zone Office du Niger (Ségou). Elle a consisté spécifiquement à (i) déterminer la teneur des sols de ces deux zones agroécologiques en HAP, et enfin (ii) déterminer les effets néfastes de ces HAP sur les mammifères et l'homme. **Méthodes :** la détermination de la teneur en HAP a été effectuée à l'aide du chromatographe en phase gazeuse couplé à un spectromètre de masse. Le pouvoir cancérigène ou mutagène d'un HAP a été déterminé selon Ames et *al.* (1975) sur *Salmonella typhimurium* (TA-97; TA-98; TA-100; TA-102; TA-1535 et TA-1537) sur le milieu *Salmonella-Shigella* (SS) à 37° C durant 48 ou 72 heures d'incubation. **Résultats :** Nos résultats obtenus ont montré que (i) les deux sols d'étude renferment 9 HAP (naphtalène, 1-méthylaphtalène, 2-méthylaphtalène, acénaphène, phénanthrène, méthylphénanthrène, fluorène, fluoranthène et pyrène) et leur présence serait d'origine anthropique, et (ii) les effets cancérigènes, mutagènes, tératogènes et autres maladies ont été observés. **Conclusion :** 9 HAP testés 8 sont mutagènes sur *Salmonella typhimurium*, soit un taux de 88,88 % ; 6 HAP induisent le cancer *in vivo* chez les souris ou les rats, soit un taux de 44,44 %, d'où la nécessité de protéger les producteurs agricoles et leurs consommateurs, qui encourent des risques de santé.

Mots clés : *Évaluation; toxicité; HAP; Zone CMDT; Zone Office du Niger.*

Abstract

Introduction: Agriculture which contributes the 40% food needs of world's population and 45% of Mali's GDP. However, this activity could lead to soil pollution by polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). **Objectives:** To evaluate PAHs toxicity present in agricultural soils areas to Sikasso (CMDT) and to Segou (Niger Office). It specifically consisted to (i) determine PAHs content in soils of these two agro-ecological areas, and (ii) determine the harmful PAHs effects on mammals and humans. **Methods:** The determination of PAH content was carried out using gas chromatograph-mass spectrometer. PAHs carcinogenic or mutagenic potential was determined according to Ames, and *al.* (1975) on *Salmonella typhimurium* (TA-97; TA-98; TA-100; TA-102; TA-1535 and TA-1537) on *Salmonella-Shigella* (SS) medium at 37° C in 48 or 72 incubation hours. **Results:** Our results showed that (i) both studied soils contain nine PAHs (naphthalene, 1-methylnaphthalene, 2-methyl-naphthalene, acenaphthene, phenanthrene, methyl-phenanthrene, fluorene, fluoranthene and pyrene); and that their presence is likely anthropogenic origin, carcinogenic, mutagenic and teratogenic effects, as well as other diseases have been observed. **Conclusion:** In the 9 PAHs tested, 8 are mutagenic in *Salmonella typhimurium*, representing 88.88% rate ; 6 PAHs induce cancer *in vivo* on mice or rats, representing 44.44% rate, hence the need to protect farmers and consumers from health risks.

Keywords : *Evaluation; Toxicity; PAHs; CMDT area; Niger Office area.*

Introduction

L'agriculture comble les besoins alimentaires de 40 % de la population mondiale, assure la production des fourrages et des plantes commerciales et contribue à 45 % du PIB du Mali (FAO, FIDA, OMS, PAM et UNICEF, 2022). Cependant, cette activité entraînerait les rejets des substances organiques. Parmi les substances chimiques polluantes retrouvées dans l'environnement, on note les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Les HAP forment une vaste classe de contaminants organiques exclusivement constitués d'atomes de carbone et d'hydrogène, formés par la condensation d'au moins deux cycles aromatiques à 6, ou parfois, 5 atomes de carbone (Bensabath, 2017). Dans l'environnement, les HAP les plus présents et les plus mobiles vont du naphthalène formé de 2 cycles jusqu'au coronène formé de 7 cycles. Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) constituent un mélange de nombreux composés, tels que les benzènes mono et polyalkylés et les polyaromatiques. De toxicité élevée, ils ne représentent en général, que 10 à 30 % d'un pétrole brut. Les composés alkylés sont, la plupart du temps, plus abondants que les molécules homologues non substituées dont ils dérivent (Bensabath, 2017). Certains cycles aromatiques peuvent être associés à des noyaux saturés (cycle à 5 ou 6 carbones). De tels composés sont qualifiés de naphthénoaromatiques. Ces HAP proviendraient de combustion naturelle comme les feux de forêts, de la combustion incomplète de la matière organique à haute température (Bensabath, 2017). Ils émaneraient de l'activité industrielle comme l'industrie du charbon (cokeries, usines à gaz), ainsi que les émissions des véhicules, la fumaison (grillade, fumage, chauffage de l'huile de cuisine) et la poussière urbaine (Bensabath, 2017). Ces composés organiques entraîneraient des effets néfastes sur la flore et la faune de l'environnement et l'homme.

Les composés toxiques d'origine anthropique incluent les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), qui sont des polluants ubiquitaires détectés et absorbés dans l'air, l'eau et surtout le sol (Wilcke, 2007). Dans les sols agricoles, trente-trois de ces HAP sont prioritaires par l'OMS du fait de leur forte rémanence, leur toxicité et leur caractère mutagène et cancérigène (Mélodie, 2021 ; Sparfel, 2018). Ces composés engendrent des effets néfastes sur la santé animale et humaine (Mélodie, 2021). Le caractère liposoluble entraîne un fort potentiel de bioaccumulation et de biomagnification des HAP. En effet, on note une augmentation de leur concentration à chaque maillon de la chaîne alimentaire. Cette étude pourrait-elle contribuer à réduire les risques sanitaires encourus par les paysans producteurs du coton et du riz et les populations locales vivant dans ces deux zones d'excellence agricole au Mali ?

Deux tests biologiques avec un degré de signification $p < 0,05$ ont été utilisés, afin de détecter le cancer induit chez la souris (*in vivo*) et de prédire le potentiel mutagène des HAP contenus dans ces sols en boîte de Pétri incubées à 37° C pendant 48 ou 72 heures à l'aide des souches de *Salmonella typhimurium in vitro* (Alcasabas, et al., 2001 ; Ames, et al, 1975).

1. OBJECTIFS

1.1. Objectif général

Évaluer la toxicité des hydrocarbures aromatiques polycycliques contenus dans les sols agricoles de la Zone CMDT et Zone Office du Niger pour les mammifères et l'homme.

1.2. Objectifs spécifiques

- Déterminer la teneur des sols agricoles de la Zone CMDT et Zone Office du Niger en hydrocarbures aromatiques polycycliques ;
- Déterminer les effets néfastes de ces hydrocarbures aromatiques polycycliques sur les mammifères et l'homme.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. Zone et site d'étude

Dans les zones d'étude, la prévalence du cancer, d'hépatites B et C et maladies neurologiques variait entre (7,1%), (11%) et (16%), aggravée par des facteurs environnementaux (pollution de l'air, l'eau et sol), propices à la persistance des agents pathogènes (OMS, 2022).

2.1.1. Zone d'étude

Zone cotonnière ou Zone CMDT du Mali

Les zones cotonnières du Mali sont situées entre le 4°15'00'' et le 10°15'00'' de longitude Ouest et le 10°15'00'' et 14°15'00'' de latitude Nord avec une superficie d'environ 150 000 km² et une population estimée à 5,6 millions d'habitants en 2009 (INS, 2012). La Zone CMDT couvre l'ensemble de la région de Sikasso, la totalité des cercles de Bla, Baraoueli et une importante partie des cercles de Tominian et San dans la région de Ségou ; l'ensemble des cercles de Kati, Kangaba, Dioila et Koulikoro dans la région de Koulikoro et enfin, tout le cercle de Kita dans la région de Kayes. La zone CMDT couvre trois zones climatiques : une zone semi-aride (soudanienne-Nord) comprise entre les isohyètes 500 mm et 900 mm, une zone semi-humide (soudanienne-Sud) comprise entre 900 mm et 1 100 mm et une zone humide

(guinéenne-Nord) situé au-delà de 1 100 mm (Traoré, et al., 2012). En zone cotonnière on distingue trois types de sols : sols peu évolués sur reliefs cuirassés ; sols sur matériau d'altérations kaolinique de bas glacis ; et sols des plaines et de bas-fonds) et deux types de paysages (une savane soudanienne boisée à *Khaya senegalensis*, *Vitellaria paradoxa*, *Parkia bigloboza* et diverses combrétacées ; une savane arbustive et arborée à *Borassus*).

Pour la campagne 2011-2012 les estimations portant sur la production nationale du coton seront chiffrées à 700 000 tonnes (Traoré, et al., 2012).

Zone Office du Niger ou zone rizicole du Mali

La Zone Office du Niger du Mali est une vaste zone inondable d'environ 40 000 km² qui s'étire selon un axe sud-ouest/nord-est (de Ké-Macina à Tombouctou) sur plus de 350 km entre les parallèles 17° et 13° Nord et les méridiens 2°30 et 6°30 Ouest. Il est parcouru par un réseau très dense et hiérarchisé de défluentés alimentés par le fleuve Niger et par son confluent, le Bani, qui le rejoint à Mopti. L'Office du Niger est localisé dans la région de Ségou au centre du Mali. Il occupe l'essentiel du delta intérieur du Niger et constitue des zones d'agriculture pluviale. Il est divisé en secteurs de production. Le climat de la zone Office du Niger est de type soudano-sahélien caractérisé par des températures moyennes très élevées et par l'alternance de deux saisons : une saison humide pluvieuse et une saison sèche (Aubréville, 1949). Les précipitations annuelles varient de 200 à 600 mm (FAO, 2005). En zone Office comme le reste du pays, la pluviométrie est régie par le mouvement alternatif de deux types de vents (l'harmattan, venant du Nord-Est et la mousson venant du Sud-Est, cette dernière apporte les masses d'air humide qui provoquent les précipitations). Les sols de la zone Office du Niger sont des sols hydromorphes et vertisols caractérisés par l'excès d'eau lié à l'engorgement temporaire ou permanent d'une partie de leur profil. Parmi les espèces ligneuses dominantes on trouve : *Combretum micranthum*, *Commiphora africana*, *Guiera senegalensis*, *Grevia bicolor*, *Lannea acida*, *Pterocarpus lucens*, *Sclerocarya birrea* (Traoré et al., 2012).

En zone office les rendements dépassent souvent 6 tonnes de riz paddy à l'hectare dans les casiers et 4 tonnes à l'hectare en hors casier (Traoré, et al., 2012).

2.1.2. Site d'étude

Ce travail a été conduit dans le Laboratoire de Chimie Organique de la Faculté de Chimie, le Laboratoire de Génétique de la Faculté de Biologie, tous de l'Université d'État de Moscou nommée Lomonossov, V.M. (Fédération de Russie) et le Laboratoire de Microbiologie du Sol

(LMS) de la Faculté des Sciences et Techniques (FST)/Université des Sciences, des Techniques et des Technologies de Bamako (USTT-B).

2.2. Matériel

2.2.1. Matériel physique

Les sols agricoles pollués par des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) ont été utilisés.

2.2.2. Matériel biologique

Les souris et les rats (petits mammifères) ont été utilisés comme indicateurs, afin de déterminer les effets précoces engendrés par des HAP (polluants) au niveau de l'ADN (Mélodie, 2021 ; Sparfel, 2018 ; OMS, 1998).

2.2.3. Milieu de culture utilisé

Le milieu de culture utilisé est *Salmonella-Shigella* (SS) pour les souches de *Salmonella typhimurium* (Downes & ITO, 2001).

2.3. Méthodes

2.3.1. Échantillonnage de sols

Deux parcelles expérimentales (champs de dimension 40 x 30 m), situées entre 11°38'58" N et 7°37'03" W ; entre 10°18'9" N et 6°05'77" W, ont été retenues pour prélèvement d'échantillons. Au total, deux échantillons de sol ont été prélevés à l'aide d'une tarière de diamètre 7 cm à une profondeur de 20 cm pour la zone CMDT et de 40 cm pour la zone Office du Niger, afin de tenir compte du système racinaire des deux cultures. Ces prélèvements ont été effectués pour déterminer la teneur en hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Dix points de prélèvement ont été considérés pour chaque champ. Tous les échantillons prélevés dans la même parcelle agricole ont été mélangés, puis un échantillon composite de 5 kg de sol a été considéré. Ces échantillons ont été mis dans des sacs étiquetés et transportés aux différents laboratoires.

2.3.2. Détermination de la teneur des sols d'étude en HAP

10 g d'échantillons de sol ont été broyés à l'aide d'un mortier en porcelaine, puis tamisés à l'aide d'un tamis de 1 mm de diamètre. Ensuite ce broyat a été mis dans une cuvette d'ondes ultracourtes contenant 20 mL de dichlorométhane ou d'hexane pendant 10 minutes pour obtenir l'extrait (solution du sol). Dans la seconde étape, il y a transfert de solvant du dichlorométhane

à l'hexane si les HAP sont purifiés sur colonne de gel de silice. Finalement, dans la troisième étape, l'extrait d'un volume d'1 mL a été concentré, puis analysé par la méthode standard à l'aide de la chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse (GC-MS) fonctionnant dans le mode d'acquisition d'ions sélectifs. La concentration des HAP a été déterminée par comparaison des surfaces chromatographiques obtenues à un temps de rétention donné entre l'échantillon et celles de chacun des étalons d'HAP, tout en tenant compte des surfaces obtenues pour les étalons volumétriques (standards internes comme naphthaline, phénanthrène et pyrène). Le résultat obtenu (exprimé en $\mu\text{g}/\text{kg}$) a été rapporté et corrigé en fonction de la récupération de l'étalon de recouvrement associé à un groupe d'HAP selon la méthode décrite par l'OMS (1998).

2.3.3. Détermination des effets néfastes de ces HAP sur les mammifères et l'homme

Pour cela, 10 mg d'un HAP (classé très toxique selon l'OMS et selon l'échelle de toxicité de Hodge et Sterner) mélangés avec l'huile d'olive ont été administrés *in vivo* à l'aide d'une seringue de 0,8 mm de diamètre dans les souris et les rats pendant 13 à 15 semaines et au *triplicata* (OMS, 1998). Après ce délai, on a procédé à la palpation des différentes parties des animaux-test. La présence de tumeurs démontre que le composé à tester est cancérigène (**génomotoxique**, c'est-à-dire capable d'altérer le matériel génétique, ou **non génomotoxique** – sans altération de l'ADN ou de la structure et du nombre de chromosomes *via* les multiples mécanismes conduisant au cancer (Alcasabas, et al., 2001). Ainsi, le test d'Ames ou test biologique permet de déterminer le potentiel cancérigène ou mutagène d'un composé chimique (Ames, et al, 1975). Il sert à détecter des mutations ponctuelles résultant de la substitution, de l'addition ou de la délétion d'une ou de plusieurs paires de base pyriques et pyrimidiques de l'ADN (Maron & Ames, 1983 ; Ames, et al, 1975). Ce test d'Ames consiste à examiner si une substance chimique est capable d'induire des mutations chez une bactérie : *Salmonella typhimurium* « his » (Maron & Ames, 1983). Les souches de *Salmonella typhimurium* utilisées sont porteuses d'une mutation sur l'un des gènes gouvernant pour la synthèse de l'acide aminé histidine. Cette mutation « his* » rend les souches incapables de se développer sur milieu de culture dépourvu d'histidine. Avec une fréquence propre à chaque souche, ces mutations « his* » peuvent réverter spontanément vers « his* ». Les bactéries porteuses de cette mutation réverse, peuvent alors pousser sur milieu dépourvu de cet acide aminé. La fréquence de ces mutations réverses peut être considérablement augmentée en exposant les bactéries à un agent mutagène. Le test d'Ames permet de quantifier l'induction de ces mutations réverses « his* »

(Maron & Ames, 1983). Une substance peut ne pas être mutagène sous sa forme primitive, mais peut agir par l'intermédiaire de l'un ou de plusieurs de ses métabolites. Dans le test d'Ames cette métabolisation est assurée en ajoutant au mélange souche/substance un activateur métabolique appelé S9 mix (homogénat de foie de rat contenant les enzymes plus du NADPH). Lors de chaque essai des contrôles doivent être réalisés pour chacune des souches utilisées :

- taux de réversion spontanée ;
- absence de réponse du solvant utilisé (témoin négatif) ;
- réponse à des mutagènes de référence avec et sans S9 mix (témoins positifs).

De plus la stérilité des échantillons, du ou des solvants et du S9 mix doit être vérifiée. Au cours de cette étude, les essais ont été réalisés sur les souches TA 97a, TA 98 (détectent des mutations par décalage du cadre de lecture), TA 100 et TA 102 (détectent des mutations de type substitutions de paires de bases), avec et sans activation métabolique (S9 mix à 5 % de S9). La souche TA 102 est particulièrement sensible aux mutagènes ayant des propriétés oxydantes. Les échantillons ont été testés bruts d'une part et après concentrations des micropolluants d'autre part (extraits organiques et lyophilisats). Afin d'assurer la stérilité des échantillons, ceux-ci ont été filtrés sur filtre de porosité 0,22 µm (Millipore) préalablement à la réalisation du test.



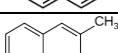




En résumé, on laisse des cultures fraîches de bactéries se développer jusqu'à la fin de la phase exponentielle ou jusqu'au début de la phase stationnaire de croissance (environ 10⁹ cellules par mL). Des cultures en fin de phase stationnaire ne doivent pas être utilisées. Il est essentiel que les cultures utilisées pour cet essai présentent une concentration élevée de bactéries viables. La concentration peut être déterminée à partir des données historiques sur les courbes de croissance des souches bactériennes utilisées ou, lors de chaque essai, par la détermination du nombre de cellules viables à l'aide de la méthode par étalement. Pour la méthode par étalement (Maron & Ames, 1983 ; Ames, et al., 1975) sans activation métabolique, on ajoute généralement 0,05 mL ou 0,1 mL de la solution à tester, 0,1 mL de culture bactérienne fraîche (contenant environ 10⁸ cellules viables) et 0,5 mL de tampon stérile à 2,0 mL de gélose de recouvrement. Pour l'essai avec activation métabolique, on mélange habituellement 0,5 mL du mélange d'activation métabolique contenant une quantité adéquate de fraction post-mitochondriale, les bactéries et la substance d'essai, ou une solution de celle-ci, avec 2,0 mL de gélose de recouvrement. Le contenu de chaque tube est mélangé et versé sur la surface d'un milieu minimal gélosé. On laisse la gélose de recouvrement se solidifier avant incubation. Après toutes les boîtes de Pétri d'un essai donné doivent être incubées à 37° C pendant 48 ou 72 heures. À la fin de la période



d'incubation, on compte dans chaque boîte le nombre de colonies his-révertantes. Au moins cinq souches de bactéries *Salmonella* ont été employées. Il s'agit de TA-97a, TA-98, TA-100, TA-102, TA-1535 et TA-1537. Les données de l'expérience sont représentées sous forme de moyenne des colonies de six (6) boîtes de Pétri. On parle d'effet mutagène lorsque le quotient du nombre de colonies « his* » révertantes poussées sur l'agar de la solution à tester et celui du témoin est supérieur à 1,8. (Kotelevtsev, et al., 2000). Cet effet témoigne de la présence des perturbants génotoxiques provoquant soit la permutation, soit la réversion, soit le doublement, soit le décalage des bases puriques fondamentales constituant l'ADN. Le degré de signification est $p < 0,05$ (Zeiger, et al., 1992). D'autres effets néfastes sur les mammifères et l'homme ont été observés selon la méthode décrite par l'OMS (1998).

Les limites du test d'Ames s'expliquent par le fait qu'il aurait une différence de toxicité entre les milieux naturels tributaires de conditions climatiques et celles du laboratoire. Les résultats obtenus *in vivo* et *in vitro* ont été extrapolés sur l'homme avec moins de mesures directes sur la population.

3. RÉSULTATS

Tableau N°1 : Teneur (mg/kg) en HAP contenus dans les sols des deux zones agroécologiques (Zone CMDT et Zone Office du Niger)

N°	HAP	Structure chimique	N° CAS	Teneur (mg/kg de sol)			
				Limites de détection	Zone CMDT	Zone Office du Niger	Normes FAO/OMS (2019)
					Teneur calculée	Teneur calculée	
1	Naphtalène		91-20-3	0,001	11,66d	23,50d	0,01
2	1-Méthyl-naphtalène		90-12-0	0,001	17,17b	12,0g	0,03
3	2-Méthyl-naphtalène		91-57-6	0,001	15,66c	22,50e	0,03
4	Acénaphène		83-32-9	0,001	11,0d	47,0b	0,01
5	Phénanthrène		85-01-8	0,001	38,0a	79,0a	0,01
6	Méthyl-phénanthrène		832-69-9	0,001	5,76f	11,10f	0,01
7	Fluorène		86-73-7	0,001	3,30h	39,10c	0,01

8	Fluoranthène		206-44-0	0,001	6,90e	15,50f	0,01
9	Pyrène		129-00-0	0,001	4,30g	12,30g	0,01

Source : élaboration de auteurs

Chaque valeur représente la moyenne de 6 répétitions. Dans la même colonne, les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 % pour le test de Fisher.

Tableau N°2: Effets néfastes des HAP sur les mammifères et l'homme

HAP	Classe CIRC	Effets néfastes des HAP sur les mammifères et l'homme
Naphtalène	2B	Le naphtalène ne cause pas directement la mutation sur <i>Salmonella typhimurium</i> . Par contre, en présence de la fraction hépatique S9, il est mutagène sur les souches de <i>Salmonella typhimurium</i> , TA97, TA98, TA 100, TA102, TA1535 et TA1537 et induit respectivement des mutations par substitution de paires de bases de l'ADN, des mutations ponctuelles et dommages oxydatifs, des mutations par substitution de paires de bases de l'ADN et par décalage de cadre de lecture. Il provoque des tumeurs pulmonaires bénignes chez la souris à la dose de 10 mg/kg pendant plus de 90 jours.
1-Méthyl-naphtalène	3	Le naphtalène méthylé provoque le cancer in vivo chez la souris/ou rat et la mutation sur <i>Salmonella typhimurium</i> TA97a, TA98, TA 100, TA102, TA1535 et TA1537 du même type que le naphtalène. Ces résultats montrent l'existence d'une relation entre la formation d'adduits à l'ADN et l'activité du gène p53 et induit par ce composé dans des zones spécifiques des oncogènes K- et H-ras de papillomes (tumeurs bénignes de la peau à 714 mg/kg) de souris conformément aux études épidémiologiques chez les mammifères (OMS,1998). Des effets pulmonaires à partir de la dose de 7,80 mg/kg chez les souris.
2-Méthyl-naphtalène	3	Ces mêmes résultats de 1-Méthylnaphtalène ont été observés dans le test <i>in vivo</i> et le test d'Ames pour 2-Méthylnaphtalène.

Acénaphène	3	L'acénaphène n'est pas oncogène dans le test <i>in vivo</i> chez la souris. Il est mutagène sur au moins deux des souches <i>Salmonella typhimurium</i> TA98, TA 100. En effet, TA98 détecte les mutations par décalage du cadre de lecture (mutations <i>frameshift</i>). Sa cible génétique (le gène <i>hisD3052</i>) possède une séquence répétitive favorisant les additions ou délétions de bases, tandis que TA100 prédit les mutations par substitution de paires de bases (plus précisément, une transition G-C → A-T dans le gène <i>hisG46</i>) (Mélodie, 2021 ; OMS, 1998). Une augmentation du poids du foie accompagnée d'altérations hépatiques a été observée chez les souris pour les doses de 350 et de 700 mg/kg/jour.
Phénanthrène	3	Le phénanthrène n'est pas oncogène dans le test <i>in vivo</i> chez la souris. Il est mutagène sur au moins deux des souches <i>Salmonella typhimurium</i> TA98, TA 100 à partir de 200 mg/kg après 60 jours dans le test d'Ames (INERIS, 2023). Certains métabolites du phénanthrène augmentent la prévalence de l'asthme chez les enfants âgés de 1 à 5 ans et des maladies cardio-vasculaires. Il induit la transformation de lymphocytes T régulateurs en lymphocytes Th2 (OMS, 1998).
Méthyl-phénanthrène	3	Le méthylphénanthrène n'est pas cancérigène. Il est mutagène sur 6 souches de <i>Salmonella typhimurium</i> TA97a, TA98, TA 100, TA102, TA1535 et TA1537. Chez le rat, ses dérivés induisent des effets hépatiques, rénaux et un stress oxydatif significatifs à des doses variant de 50 à 150 mg/kg (OMS, 1998).
Fluorène	3	Le fluorène n'est pas oncogène. Il est mutagène sur au moins deux des souches de <i>Salmonella typhimurium</i> TA98, TA 100 avec et sans activation métabolite (S9). Chez les souris et les rats des effets hématologiques, une diminution du poids du foie et de la concentration d'hémoglobine ont été établis à 125 mg/kg/jour pour le fluorène (Mélodie, 2021 ; Sparfel, 2018 ; OMS, 1998).

Fluoranthène	3	Le fluoranthène est à la fois cancérigène (promoteur tumoral) <i>in vivo</i> chez le rat à la dose de 150 mg/kg de poids corporel/jour lors d'expositions subchroniques de 90 jours et mutagène sur <i>Salmonella typhimurium</i> TA97a, TA98, TA 100, TA102, TA1535 et TA1537 du même type que le naphtalène. Des effets du fluoranthène sur le développement sensorimoteur et le comportement de l'animal exposé <i>in utero</i> ou au cours de la lactation à la dose de 170 mg/kg/jour.
Pyrène	3	Le pyrène n'est pas oncogène chez la souris, mais est mutagène sur <i>Salmonella typhimurium</i> TA98, TA 100, TA102, TA1535 et TA1537. Une pathologie rénale tubulaire et une diminution pondérale des reins à la dose de 75 mg/kg/jour pour le pyrène (Mélodie, 2021 ; Sparfel, 2018 ; OMS, 1998).

Source : élaboration de auteurs

4. DISCUSSION

Nos résultats obtenus ont montré que les deux sols agroécologiques du Mali renferment neuf hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) (naphtalène, 1-méthylaphtalène, 2-méthylaphtalène, acénaphène, phénanthrène, méthylphénanthrène fluorène, fluoranthène et pyrène), dont leur teneur dans les sols d'étude dépasse largement la norme FAO/OMS (2016). Ce dépassement de la teneur en HAP dans ces sols serait principalement d'origine anthropique : transport urbain, usage des combustibles fossiles, unités industrielles, feux de forêts, défrichage, combustion incomplète du charbon et du bois. Certains HAP sont très peu mobiles et persistent dans l'environnement (Bliefert & Perraud, 2001) à cause de leur caractère lipophile. De ce fait, lorsqu'un organisme est exposé à un contaminant, des réactions enzymatiques s'opèrent dans le but d'essayer de l'éliminer. Le mécanisme de biotransformation a pour but de transformer les HAP parents en métabolites plus polaires favorisant leur excrétion par la bile ou l'urine. Le processus de biotransformation augmente la solubilité de la substance en transformant le HAP initialement hydrophobe en métabolite plus polaire, donc plus hydrosoluble. Le métabolite formé est ainsi stocké dans la bile jusqu'à son excrétion (Van der Oost, et al., 2003). La structure moléculaire de certains types de HAP les amène à être transformés dans l'organisme en composés extrêmement toxiques, appelés époxydes. Les époxydes réagissent très facilement avec l'ADN, ce qui peut entraîner des mutations génétiques

menant parfois au cancer. Certains HAP peuvent également affecter la reproduction ou le développement fœtal. Ces effets néfastes ont été démontrés chez des animaux, mais le risque existe également pour l'homme, par exemple le benzo(a)pyrène est particulièrement toxique, puisque ses effets cancérigènes sont prouvés pour l'homme et qu'on le considère aussi comme mutagène, tératogène et toxique pour le développement. Ainsi, le naphthalène peut franchir la barrière placentaire chez la femme et provoque l'anémie, l'hémorragie et les hallucinations. Aussi, 1-méthyl-naphthalène et 2-méthyl-naphthalène sont peu dangereux pour les petits mammifères (rats et souris) moins toxiques pour l'homme par rapport au naphthalène. Par contre, ils sont toxiques pour les organismes aquatiques (hydrofaune). Les composés 1-méthyl-naphthalène et 2-méthyl-naphthalène sont moins toxiques pour l'homme par rapport au naphthalène. On note des effets létaux à partir d'une concentration de 50 µg/kg pour le phénanthrène chez l'amphipode (*Hyalella azteca*), crustacé amphipode vivant dans les eaux dulçaquicoles et de 38 % chez les amphipodes (*Diporeia* spp.), zooplanctons des grands lacs a été observée après une exposition de 19 jours pour tous les HAP à une concentration égale à 73,2 mg/kg dans les sédiments. Le fluorène est toxique pour les organismes benthiques et les poissons. Cette molécule chimique induit des troubles hépatiques et hématologiques chez les animaux. Le fluorène pourrait exposer l'homme au cancer. Le fluorène est génotoxique pour l'homme (Hileman, 1994). Des effets spécifiques du pyrène seraient observés sur les œufs du poisson, le foie et les reins des animaux. Chez les animaux cette molécule induirait des troubles hépatiques et hématologiques. Chez l'homme le pyrène est mutagène qu'oncogène. Le pyrène combine avec le benzène pour former le benz[a]pyrène, composé lourd associé à des particules fines, qui s'accumulerait facilement dans les organismes vivants (Traoré, 2009).

Concernant les effets tératogènes, de nombreuses anomalies morphologiques ont été observées après expositions aux HAP. Le syndrome du Blue Sac Disease (BSD) correspond à une réponse physiologique de l'organisme similaire pour de nombreux polluants organiques, dont font partie les HAP. Ce syndrome est caractérisé par la prévalence d'œdèmes péri-cardiaque et vitellin, la torsion de la colonne vertébrale (cyphose, lordose, scoliose), des anomalies cranio-faciales (absence ou atrophie de la mâchoire inférieure, anomalie de la taille ou de la pigmentation des yeux) et des altérations du développement du cœur (taille, position, orientation) (Scott & Hodson, 2008 ; Rhodes & Chinnaiyan, 2005).

En 2021, des travaux antérieurs (INERIS, 2023) ont montré que la concentration de 15 HAP (sans acénaphthylène) variait de 430 µg/kg dans les forêts d'Oslo (Norvège), tandis que 608

$\mu\text{g}/\text{kg}$ dans le milieu rural du Royaume-Uni. Celle de l'antracène était en moyenne de 4 300 $\mu\text{g}/\text{kg}$ et du phénanthrène était de 4 600 $\mu\text{g}/\text{kg}$ de matière sèche contenus dans les boues de 40 stations d'épuration de France. En Tunisie, les sols irrigués aux eaux usées enregistraient des teneurs en HAP variaient généralement de 120 à 9 177 $\mu\text{g}/\text{kg}$. Au Nigéria, les concentrations de 28 HAP ciblés variaient entre 65 et 331 $\mu\text{g}/\text{kg}$ dans les sédiments. Yawetta (2024) a démontré que le sol de garage à Bamako (Mali) renferme six HAP prioritaires, dont la concentration de cinq de ces HAP, (dont 208,66 $\mu\text{g}/\text{kg}$ de sol pour l'antracène) est largement supérieure à la limite maximale des résidus fixée à 10 $\mu\text{g}/\text{kg}$ selon l'OMS (2023). La présence de ces HAP dans le sol serait liée aux activités de réparation des automobiles.

Chez l'homme, l'exposition aux hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) se traduit par la présence de nombreux adduits à l'ADN dans les lymphocytes, associée à un risque de développement de certains cancers. De plus, les expositions professionnelles aux HAP entraînent une diminution de la prolifération des lymphocytes T et celles aux fumées des feux de forêts et de bois produisent des changements dans les populations lymphocytaires. L'utilisation de cultures primaires de lymphocyte T humains peut se révéler utile pour mieux comprendre la régulation par les HAP de la réponse immune et proposer de nouveaux biomarqueurs d'exposition à ces contaminants environnementaux (Sparfel, 2018). Cette diminution de la réponse du système immunitaire augmentant ainsi les risques d'infection. L'OMS (1998) a montré que des HAP ont des effets sur la santé humaine, cardiovasculaires, reprotoxiques ou immunosuppresseurs. En somme, sur 9 HAP testés 8 sont mutagènes sur les souches de *Salmonella typhimurium* (TA-97a ; TA-98 ; TA-100 ; TA-102 ; TA-1535 ; TA-1537), soit un taux de 88,88 %. Ce taux élevé, à notre avis, pourrait être dû au faible nombre d'échantillons considérés. Par contre, 6 HAP rencontrés dans les sols d'étude induisent le cancer *in vivo* chez les souris ou les rats, soit un taux de 44,44 %.

Conclusion

Nos résultats obtenus ont montré que les deux sols d'étude renferment 9 HAP (naphtalène, 1-méthylaphtalène, 2-méthylaphtalène, acénaphène, phénanthrène, méthylphénanthrène, fluorène, fluoranthène et pyrène), dont leur teneur dépasse largement la norme fixée par l'OMS et leur présence serait principalement d'origine anthropique. Chez les animaux et l'homme, les effets cancérigènes, mutagènes, tératogènes, reprotoxiques et immunosuppresseurs ont été observés. Des maladies cardiovasculaires et complications respiratoires, l'obésité ont été notées



chez les patients exposées aux HAP, d'où l'intérêt de protéger les paysans et les consommateurs des produits agricoles, qui encourent des graves risques de santé.

BIBLIOGRAPHIE

1. Alcasabas, A.A., Osborn, A.J., Bachant, J., Hu, F., Werler, P.J., Bousset, K., Furuya, K., Diffley, J.F., Carr, A.M., Elledge, S.J. (2001). Mrc1 transduces signals of DNA replication stress to activate Rad53. *Nat Cell Biol*, 3, 958-965.
<https://doi.org/10.15252/emj.2018100681>
2. Ames, B.N., Kammen, H.O., Yamasaki, E. (1975). Hair dyes are mutagenic: identification of a variety of mutagenic ingredients. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 72 (6), 2423-2427. <https://doi.org/10.1073/pnas.72.6.2423>; doi: [10.1073/pnas.72.6.2423](https://doi.org/10.1073/pnas.72.6.2423)
3. Aubréville, A. (1949), *Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale*. Soc., Paris: Ed. Géogr. Marit. et Coll..
https://books.google.ml/books/about/Climats.html?id=4Yg-PQAACAAJ&redir_esc=y
4. Bensabath, T. (2017), *Approche préventive pour une réduction des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) dans les fours à pyrolyse : application à la cémentation gazeuse à basse pression*. Thèse de Doctorat, Lorraine : Université de Lorraine, Spécialité : Génie des Procédés et des Produits.
https://books.google.ml/books/about/Approche_pr%C3%A9ventive_pour_une_r%C3%A9duction.html?id=LMYf0AEACAAJ&redir_esc=y
https://theses.hal.science/tel-01710271/file/DDOC_T_2017_0064_BENSABATH.pdf
5. Bliefert, C., Perraud, R. (2001). *Chimie de l'environnement*, Bruxelles : Édition De Boeck.
<https://www.furet.com/media/pdf/feuilleter/9/7/8/2/8/0/4/1/9782804159450.pdf?srsId=AfmBOoppV1tXsYJvwrLHW0rWe3yw5Ap1iQBIGS0e6fftmry95L23ZEQ0>
<https://books.google.co.ug/books?id=S0rgDQAAQBAJ&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>
6. Downes, F.P. & ITO, K. (2001). *Compendium of Methods for the Microbiological Examination of Foods*, Washington DC : 4th Edition APHA, USA.
https://books.google.ml/books/about/Compendium_of_Methods_for_the_Microbiolo.html?hl=es&id=nz851G-cZf0C&redir_esc=y
7. FAO (Food and Agriculture Organization). (2005), *Système d'information de la FAO sur l'eau et l'agriculture au Mali*, Rome : FAO-Eau Terres et Eaux FAO Accueil. Aquastat.

<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/ce7066bb-a95d-4e8f-8b78-9bc54dc15f9a/content>

8. FAO/OMS (Food and Agriculture Organization/Organisation Mondiale de la Santé) (2016), Programme mixte FAO/OMS sur les normes alimentaires, Commission du Codex Alimentarius, Rome : Édition FAO.

<https://iris.who.int/items/2d0e9fec-0807-419e-b3a7-e8633b308ac1>

9. FAO, FIDA, OMS, PAM et UNICEF (2022), L'État de la sécurité alimentaire et de la nutrition dans le monde 2022. Réorienter les politiques alimentaires et agricoles pour rendre l'alimentation saine plus abordable, Rome : Edition FAO.

<https://www.fao.org/agrifood-economics/publications/detail/fr/c/1607779/>

10. Hileman, B. (1994). Environmental estrogens linked to reproductive abnormalities, cancer. Chem. Eng. News., 72 (5), 19-23. <https://doi.org/10.6016/ZdravVestn.2456>

11. INERIS (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques). (2023), Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), Paris : Édition INERIS, France.

https://www.ineris.fr/sites/default/files/contribution/Documents/21_HYDROCARBURES_AROMATIQUES_POLYCYCLIQUES_%28HAP%29%20v1.pdf

12. INS (Institut National de la Statistique). (2012), 4^{ème} Recensement Général de la Population et de l'Habitat (RGPH-2009), Bamako : Édition Institut National de la Statistique.

https://www.instat-mali.org/laravel-filemanager/files/shares/rgph/ramor09_rgph.pdf

13. Maron, D.M. & Ames, B.N. (1983). Revised Methods for the *Salmonella* Mutagenicity Test, Mutation Res., 113, 173-215.

<https://www.replace.be/sites/default/files/Revised%20methods%20for%20the%20Salmonella%20mutagenicity%20test.pdf>

14. Mélodie, V. (2021), Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP): effets sur la santé et évaluation du risque cancérigène, Thèse de Doctorat. Grenoble : Faculté de Médecine Générale de l'Université Grenoble Alpes ; Spécialité : Médecine Interne.

https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03736600/file/2021GRAL5139_valiere_melodie_dif.pdf

15. OMS (Organisation Mondiale de la Santé). ((1998, International Programme on Chemical Safety, Édition Organisation Mondiale de la Santé.

<https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/8c03f2d6-32e3-4b60-b651-c2e2c181506b/content>



16. Rhodes, D.R. & Chinnaiyan, A. M. (2005). Integrative analysis of the cancer transcriptome. *Nature Genetics*, 37 (6), S31-S37. DOI: [10.1038/ng1570](https://doi.org/10.1038/ng1570)
17. Scott, J,A. & Hodson, P,V. (2008). Evidence for multiple mechanisms of toxicity in larval rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) co-treated with retene and α -naphthoflavone. *Aquatic Toxicology*, 88 (3), 200-206.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0166445X08001318>
18. Sparfel, L. (2018). Effets immunotoxiques des hydrocarbures aromatiques polycycliques. *Les Cahiers de la Recherche Santé, Environnement, Travail*, 12, 29-31.
https://anses.hal.science/anses-01926984v1/file/201_CDLR_sparfel_effets_immunotoxiques_hydrocarbures_aromatiques_polycycliques.pdf
19. Traoré, V. (2009). Evaluating pollution by carcinogenic and mutagenic xenobiotics of aquatic ecosystems in Bamako and its surroundings. UNESCO. Keizo Obuchi Research Fellowships Programme in 2005-2006: Results Achieved UNESCO, Paris, France, 50-51. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000182197>
20. Traoré, V., Kanté, F., Yattara, I,I., Samaké, D., Keita, K., Coulibaly, A., Polykova, O,V., Kotelevtsev, S,V. (2012). Establishment of a promotional program of the valorization of the arable lands by biological depollution in the areas of Sikasso and Segou in Mali. *ISESCO Journal of Science and Technology*, 8 (13), 9-24.
https://applications.emro.who.int/imemrf/ISESCO_J_Sci_Technol/ISESCO_J_Sci_Technol_2015_11_19_51_59.pdf
21. Van, der, Oost, R., Beyer, J., Vermeulen, N, P. (2003). Fish bioaccumulation and biomarkers in environmental risk assessment: a review. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 13 (2), 57-149.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1382668902001266?via%3Dihub>
22. Wilcke, W. (2007). Global patterns of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil. *Geoderma*, 141 (3-4), 157-166.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706107002182>
23. Yawetta, F, (2024), Étude de la croissance *in vitro* des souches de *Burkholderia* sp. et de *Pseudomonas* sp. en présence d'un sol de garage de réparation d'automobiles contaminé par des HAP, Mémoire de Master de Sciences Biologiques. Université des Sciences et Techniques et de Technologies de Bamako, Mention : Microbiologie Appliquée.



24. Zeiger, E., Anderson, B., Haworth, S., Lawlor, T., Mortelmans, K. (1992). *Salmonella typhimurium* test IV. Results from the testing of 311 Chemicals. *environmental and Molecular Mutagenesis*, 19 (21), 2-141. DOI: [10.1002/em.2850190603](https://doi.org/10.1002/em.2850190603) ;
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/em.2850190603>
25. OMS, (Organisation Mondiale de la Santé). (2022), Guide technique pour la surveillance intégrée de la maladie et la riposte au Mali, Genève : Édition, OMS, Suisse.
https://files.aho.afro.who.int/afahobckpcontainer/production/files/Guide_SIMR_Mali_13_JAN_2022.pdf