

Déversement des déchets toxiques en Côte d'Ivoire : suivi de l'efficacité de l'opération de dépollution à partir d'indicateurs de pollutions résiduelles

OI ADJIRI¹
VICTOR KOUAMÉ²
CHARLES KOUADIO
NIANGORAN¹
GBOMBÉLÉ SORO³
JEAN BIÉMI³

¹ Université Jean
Lorougnon Guédé
UFR environnement
Département des sciences
de la terre
BP 150 Daloa
Côte d'Ivoire
<oiadjiri@gmail.com>
<kniangoran@hotmail.fr>

² Université Nangui
Abrogoua
UFR SGE
Laboratoire des sciences
de l'environnement
02 BP 801 Abidjan 02
Côte d'Ivoire
<kvictor2@yahoo.fr>

³ Université Félix
Houphouët Boigny
UFR SRTM
Département des sciences
et techniques de l'eau
et du génie
de l'environnement
(DSTEGE)
22 BP 582 Abidjan 22
Côte d'Ivoire
<marc_soro@yahoo.fr>
<jbiemi@yahoo.fr>

Tirés à part :
O. Adjiri

Article reçu le 17 août 2017,
accepté le 21 novembre 2017

doi: 10.1684/ers.2018.1145

Résumé. Suite aux déversements des déchets toxiques à Abidjan en 2006, une entreprise a été chargée par le gouvernement ivoirien de la dépollution des sites contaminés. L'objectif de cette étude est de vérifier l'efficacité des méthodes et techniques de dépollution utilisées, à partir de polluants traceurs que nous avons identifiés dans des études antérieures (le soufre et le chlore). Parmi ces deux polluants traceurs, seul le soufre a été considéré par l'entreprise comme le plus pertinent en termes de rémanences et de risques sanitaires. Cependant, la composition des déchets n'étant pas parfaitement connue, toute recherche exhaustive et ciblée d'une substance n'était pas faisable. Pour prendre en compte cette difficulté, en plus de la teneur en soufre, l'opérateur a toutefois dosé dans le sol résiduel la concentration en hydrocarbures totaux. Les concentrations obtenues suite à nos analyses ont été comparées à celles des échantillons témoins pédologiquement identiques et prélevés suffisamment loin des sites de déversements. Les valeurs de pollutions résiduelles obtenues sont dans les mêmes ordres de concentrations que le fond pédogéochimique anthropique des échantillons témoins (< 100 ppm pour les hydrocarbures totaux et < 1 ppm pour le soufre). Ces concentrations traduisent l'efficacité des méthodes et techniques de décontamination utilisées par l'opérateur.

Mots clés : République de Côte d'Ivoire ; décharges de déchets toxiques ; remédiation de site ; pollution environnementale.

Abstract

Toxic waste spills in Côte d'Ivoire : follow-up of the effectiveness of the cleanup operation according to residual pollution indicators

After toxic waste spills in Abidjan in 2006, a company was commissioned by the Ivorian government to clean up contaminated sites. The objective of this study is to verify the effectiveness of the cleanup methods and techniques used by this operator, with tracer pollutants that we identified in previous studies (sulfur and chlorine). Of these two tracer pollutants, the company considered only sulfur sufficiently relevant, in terms of persistence and health risks. However, since the composition of the waste is not fully known, exhaustive and targeted search for any one substance was not feasible. To offset this difficulty, the operator measured the total hydrocarbon concentration in the residual soil in addition to the sulfur content. The concentrations obtained from our analyses were compared to those of the pedologically identical control samples, taken sufficiently far from the spill sites. The residual pollution concentrations obtained are all in the same order of magnitude as the background geochemical values in the anthropogenic soil (<100 ppm for total hydrocarbons and < 1 ppm for sulfur). These concentrations reflect the effectiveness of the decontamination methods and techniques used by the operator.

Key words: Republic of Cote d'Ivoire; toxic waste dumps; site remediation; environmental pollution.

Pour citer cet article : Adjiri O, Kouamé V, Niangoran CK, Soro G, Biémi J. Déversement des déchets toxiques en Côte d'Ivoire : suivi de l'efficacité de l'opération de dépollution à partir d'indicateurs de pollutions résiduelles. *Environ Risque Sante* 2018 ; 17 : 147-154. doi : 10.1684/ers.2018.1145

Un navire russe, le « Probo Koala », battant pavillon panaméen et affrété par l'entreprise Trafigura Beheer, a déchargé, dans la nuit du 19 au 20 août 2006, 528 tonnes de déchets toxiques dans des camions citernes [1]. Ces déchets ont été par la suite répandus à divers endroits du district d'Abidjan. Aussitôt après, la population locale a commencé à manifester des saignements de nez, nausées, maux de tête, irritations de la peau et des yeux, ainsi que des difficultés respiratoires. Le nombre important de personnes intoxiquées (plus de 100 000) se plaignant de problèmes de santé et les décès (17 décès) enregistrés suite à ces intoxications ont conduit à une investigation qui a montré que les déchets étaient composés de substances chimiques très dangereuses [2]. Le navire Probo Koala qui les transportait est reparti juste après laissant derrière lui morts et désolations dans les familles et un choc dans tout le pays. Cette catastrophe écologique et sanitaire de grande envergure continue de hanter nos populations [3]. Les premiers indices fournis concernant la composition chimique de ces déchets ont révélé des traces d'hydrogène sulfuré, de mercaptan, de soude caustique [1, 4], des éléments traces métalliques (ETM) cancérigènes, neuro- et reprotoxiques (CNR) tels que le plomb (Pb), cadmium (Cd), mercure (Hg), chrome (Cr), cobalt (Co), etc., de fortes teneurs de soufre et de chlore et des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) cancérigènes, mutagènes et reprotoxiques (CMR) [5].

Passés l'effet de surprise et les atermoiements du début de la crise, les autorités ivoiriennes ont essayé de circonscrire le mal. Ainsi, un Comité interministériel chargé de la gestion, du suivi et de l'évaluation des actions relatives à la dépollution des sites de déversements des déchets liquides dangereux dans le district d'Abidjan a été créé par arrêté n° 165 du 28 août 2006. Ce comité était composé de représentants de 13 ministères et présidé par le ministre d'État, ministre du Plan, avec l'assistance technique et scientifique du Centre ivoirien anti-pollution (CIAPOL) et du Bureau national d'études techniques et de développement (BNEDT). Il s'agissait pour ce comité de procéder à un certain nombre de mesures sanitaires, notamment : la fermeture des structures et infrastructures d'élevages et de commercialisation d'animaux ; l'abattage systématique des animaux à cycle court (volailles, porcs, lapins) ; l'interdiction de la coupe et du transport du fourrage (herbes, feuillages) en provenance des sites contaminés ; la fermeture de la pêche sur tout le plan d'eau lagunaire du district d'Abidjan ; la vidange et l'assèchement des étangs piscicoles dans les bas-fonds se trouvant aux alentours des sites de déversements ; et la décontamination des sites pollués. Toutes ces actions visaient à trouver des solutions à court terme. Dans le même élan, le 17 septembre 2006, une opération de dépollution des zones contaminées a été entreprise par les autorités à partir de ressources techniques et scientifiques d'experts externes.

Devant la complexité des questions soulevées par cette pollution, la présente étude a été initiée afin de vérifier l'efficacité de l'opération de décontamination. Des travaux antérieurs d'Adjiri et al. [5] ont permis de mettre en évidence deux indicateurs de pollution de résidus pétroliers qui devraient être suivis durant la dépollution : le soufre et le chlore, et ce, en raison de leur forte concentration, de leur réactivité et persistance. Pour la présente étude, il s'agissait de vérifier si ces indicateurs ont été considérés comme indicateurs de suivi de dépollution par l'opérateur commis à cet effet et d'évaluer l'efficacité de la méthode de dépollution utilisée.

Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude est le district d'Abidjan. Elle s'étend sur un périmètre d'environ 50 km sur 40 km et comporte 13 communes. Elle est située au sud de la Côte d'Ivoire, entre 350 000 m et 420 000 m en abscisses et entre 570 000 m et 620 000 m en ordonnées, dans le référentiel UTM 30N (*figure 1*).

La population est estimée à 4 707 404 habitants, avec un taux d'accroissement de 2,8 % par an et une densité de population de 14 528 habitants au km² [6]. Le climat est de type équatorial de transition ou attiiéen. La pluviométrie moyenne annuelle est comprise entre 1 500 et 1 700 mm [7]. La géologie est celle du bassin sédimentaire côtier ivoirien. Le profil géologique est constitué du haut vers le bas d'argile sableuse, de sables moyens, de sables grossiers et du socle granitique. Ce bassin sédimentaire recèle trois types de nappe : la nappe de l'aquifère du Quaternaire, celle de l'aquifère du Crétacé supérieur et celle de l'aquifère du Continental terminal. Cette dernière est captée par les champs de la Société de distribution d'eau de la Côte d'Ivoire (Sodeci) pour l'alimentation en eau potable des populations [8]. La profondeur des forages de ces champs varie entre 70 et 90 m.

Au total, 16 sites de déversements de déchets toxiques ont été identifiés. Ces sites sont principalement des bidonvilles et des quartiers populaires. La commune d'Abobo (quartier populaire) située au nord de la ville a enregistré le plus grand nombre, avec à elle seule huit sites [9].

Matériels et méthodes

Techniques de dépollution des surfaces contaminées utilisées par l'opérateur

La pollution due aux déversements des déchets toxiques à Abidjan est telle qu'elle pouvait être comparée

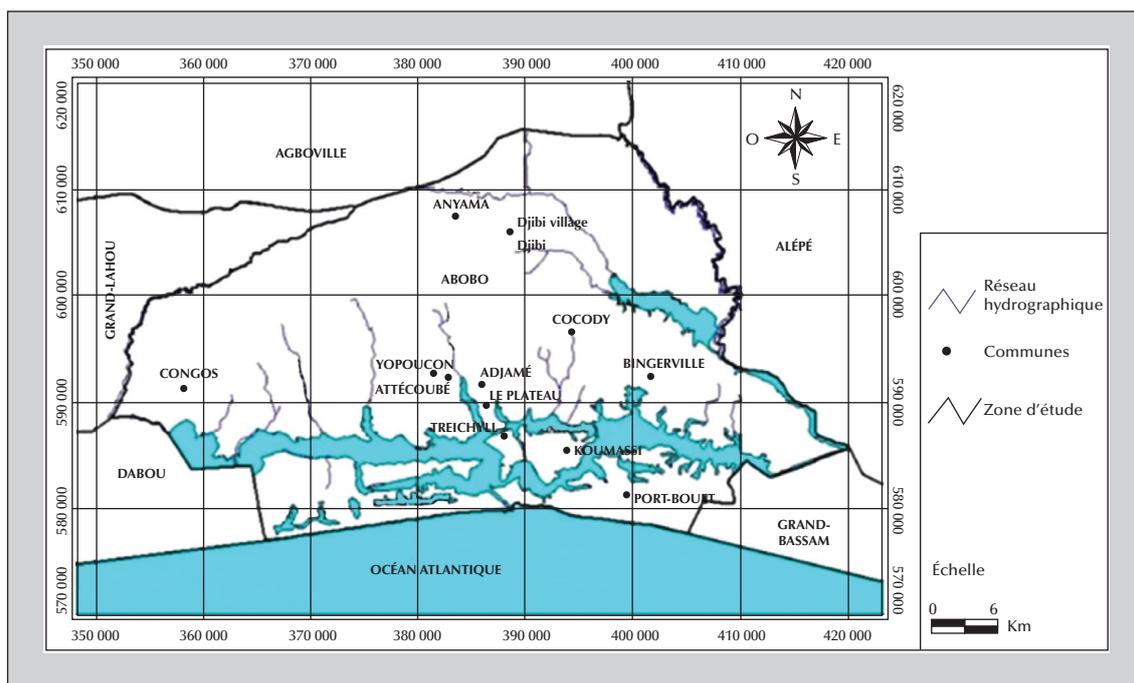


Figure 1. Présentation de la zone d'étude.

Figure 1. The area under study.

à un véritable égout de résidus pétroliers à ciel ouvert. Pour ce type de pollution on distingue, selon Collet [10], les techniques de traitement *in situ* (sans excavation), les techniques sur site (avec excavation) et les techniques *ex situ* ou hors site (traitement après excavation). Ces dernières sont privilégiées pour le traitement des pollutions ponctuelles sur des surfaces réduites et sont généralement suivies, lorsque les polluants s'y prêtent, de méthodes visant à accélérer les processus de biodégradation. Elles ont été retenues par l'opérateur chargé de la dépollution des sites contaminés. Dans la pratique, sur le terrain, les travaux effectués ont été les suivants :

- le lavage du béton contaminé avec de l'eau et des produits neutralisants suivis du conditionnement des effluents dans des fûts de 200 et 300 litres, de classe X ou T, approuvés par l'Organisation des Nations Unies (ONU) et fermés hermétiquement ;
- le pompage des déchets liquides mélangés au lixiviat, curage du fond boueux, et leur conditionnement dans des *big bags* de 1 m³ conformes aux normes ONU et fermés hermétiquement ;
- le dragage de terres contaminées et leur conditionnement dans des *big bags* de 1 m³ conformes aux normes ONU et fermés hermétiquement.

Ces différents fûts et *big bags* contenant les déchets ont été entreposés temporairement en plein air, soit sur le lieu de curage, soit sur le lieu de dragage après avoir pris le soin d'imperméabiliser le sol avec une membrane

d'argile, jusqu'à la fin de l'opération de dépollution. Tous ces déchets ont ensuite été conditionnés dans des entrepôts fermés, à sol bétonné, à Vridi, zone portuaire, dans des containers de 1 m³ en acier galvanisé avec une soupape et un revêtement intérieur. Ils devraient être par la suite exportés en France pour traitements et éliminations définitifs [11].

Techniques d'échantillonnage

Différents échantillons de sols et/ou d'eaux ont été prélevés par notre équipe après chaque opération de dépollution par site. Au total, huit sites d'échantillonnages sur les 16 sites de déversements ont été concernés par la présente étude. Ces sites ont été identifiés selon le critère d'importance de volume de déchets déversés. Ce volume a été évalué à partir du nombre de camions citernes ayant effectué le déversement, chaque citerne ayant un volume moyen estimé à 25 m³. Il s'agit des sites d'Akouédo, Maca, Abobo plaque 1, Abobo derrière rail, Coco servie, Abobo route d'Alépé, Vridi, Koumassi (figure 2). La plupart des déversements s'étant effectués sur des surfaces réduites, différents échantillons de sols ont été prélevés à proportion égale, de façon aléatoire et systématique, dans les horizons superficiels, au centre d'une maille carré de côté estimé à 1 m. L'outil de prélèvement était une pelle et des dispositions particulières ont été prises

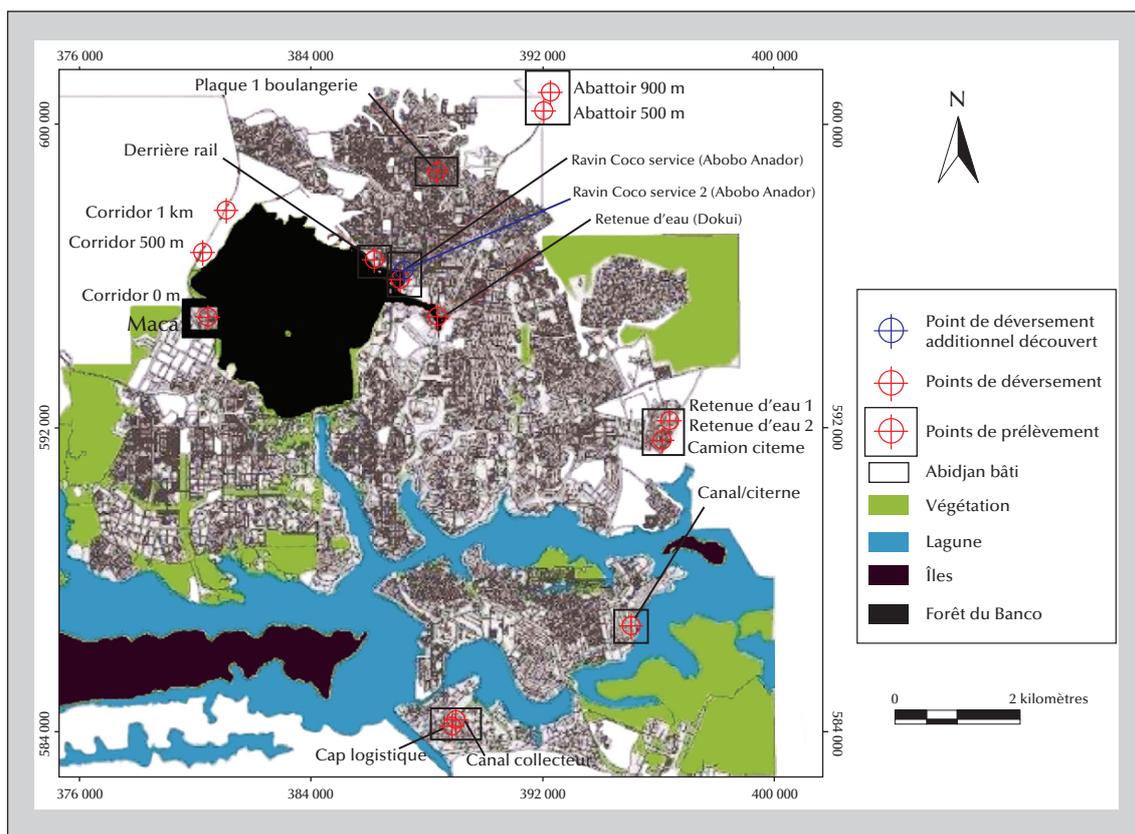


Figure 2. Carte montrant les points de déversements et d'échantillonnages ([18] modifié).

Figure 2. Map showing the spills and sampling points ([18] amended).

pour éviter de prélever les parties en contact avec le matériel de prélèvement. Ces échantillons ont été par la suite homogénéisés et l'échantillon moyen retenu par site a été conditionné dans une bouteille borosilicaté de couleur sombre de 250 ml. Il a ensuite été conservé, hermétiquement à l'abri de la lumière, dans une glacière à une température de 4 ± 2 °C. Aussi, des échantillons liquides ont été prélevés à la surface des plans d'eau dépollués (du fait de la faible masse volumique des déchets déversés par rapport à l'eau : $750,6 \text{ kg/m}^3$), à l'aide de petits flacons fixés sur de petites tiges et reversés dans des bouteilles borosilicatés de couleur sombre de 100 ml. Les points de prélèvements par site étaient espacés de 2 m et recouvraient la surface totale des parties des plans d'eau dépollués. Ces échantillons ont été homogénéisés et l'échantillon moyen retenu par site a été conservé dans les mêmes conditions que les échantillons de sols. Ils ont tous été analysés le plus tôt possible.

Compte tenu du caractère toxique des déchets, des dispositions particulières ont été prises au cours du prélèvement des échantillons : utilisation de masques à gaz 3 M, combinaisons de protection du corps, bottes de

sécurité, lunettes de sécurité, gants de sécurité en polyester et casques de sécurité.

Identification de polluants traceurs de dépollution et évaluation de la dépollution

La composition des déchets n'étant pas parfaitement connue, toute recherche exhaustive et ciblée d'une substance n'était pas faisable. En conséquence, l'opérateur chargé de la dépollution s'est proposé de rechercher et doser des familles de composés, regroupés par classe chimique dans les matrices résiduelles (eaux, sols) : hydrocarbures totaux et soufre total. Les différentes concentrations ont été comparées à celles des échantillons témoins. Cette démarche semble être justifiée par Adjiri et al. [5]. En effet, selon les travaux de ces derniers, les indicateurs de dépollution à suivre sont la teneur en soufre et en chlore. Le chlore serait issu de la plupart des composés organochlorés présents dans les déchets [5]. Il intervient dans la fabrication de nombreux produits de

l'industrie chimique. En conséquence, l'opérateur, en recherchant les hydrocarbures totaux, prend non seulement en compte la teneur en hydrocarbures chlorés mais également l'ensemble des résidus d'hydrocarbures présents dans les déchets. Cette démarche est certes restrictive compte tenu des multiples usages du chlore, mais plus adaptée au contexte. D'autre part, selon Adjiri et al. [5], ces composés peuvent former des complexes avec les métaux et la matière organique présents dans le sol et contribuer à leur fixation temporelle sur les sites de déversements (rémanence). En les éliminant sur les sites par la décontamination, la démarche de l'opérateur présente l'avantage d'améliorer le confort olfactif et de diminuer les risques sanitaires inhérents.

Par ailleurs, l'évolution dans le temps des concentrations des substances polluantes présentes dans les matrices étudiées est dépendante des propriétés physico-chimiques des déchets et de celles des matrices qui les contiennent. En conséquence, un site non contaminé à un moment donné se trouvant à proximité d'un site contaminé peut ne plus l'être si la pollution initiale n'est pas supprimée. Pour tenir compte de ce facteur, les échantillons témoins ont été prélevés sur des sites de caractéristiques identiques mais suffisamment éloignés des sites contaminés pour éviter leur contamination *via* des transferts de polluants. En effet, comme en Côte d'Ivoire les niveaux de pollutions résiduelles dans les sols après décontamination ne sont ni calculés ni réglementés, la comparaison à des échantillons témoins de sol non contaminé est apparue comme la meilleure alternative pour juger de l'efficacité de l'opération de dépollution. Le sol ou l'ouvrage contaminé n'est considéré dépollué que si les valeurs des concentrations en soufre et en hydrocarbures totaux, après l'opération de décontamination, sont inférieures ou égales à celle de l'échantillon témoin. Dans le cas contraire, l'opération de dépollution est reprise. La technique d'échantillonnage utilisée est la même que celle utilisée pour les sites dépollués.

Méthodes d'analyse des échantillons

L'analyse des échantillons s'est faite par chromatographie gazeuse couplée à un détecteur à photométrie de flamme pulsée (CG-PFPD) pour le soufre et par chromatographie en phase gazeuse et détection par ionisation de flamme (GC-FID) pour les hydrocarbures totaux. Auparavant, le contenu de chaque bouteille (échantillons moyens de sols) a été renversé sur une feuille à revêtement téflonné et bien homogénéisé. Les pierres et autres matériaux non broyables ont été éliminés et le reste bien broyé et tamisé au pilon de façon à obtenir une poudre fine et sèche (la fraction destinée au dosage du soufre a été bien séchée). Seuls les tamisats de diamètre inférieur à 2 mm ont été utilisés pour les analyses. Au cours de cette étape, toutes les dispositions ont été prises pour éviter la contamination des échantillons.

Résultats

Le *tableau 1* présente les résultats d'analyses effectuées sur les différents échantillons prélevés après les opérations de dépollution.

En dehors de la zone industrielle du site de Koumassi, les différentes analyses portées sur l'ensemble des échantillons moyens prélevés après les opérations de dépollution ont donné des valeurs se trouvant dans les mêmes gammes de concentrations que celles des échantillons témoins pour les deux groupes de paramètres étudiés.

Discussion

Les mesures d'Adjiri et al. [5] effectuées sur les échantillons des déchets toxiques prélevés juste après les déversements ont montré que les produits déversés par le navire Probo Koala sur divers sites à Abidjan en août 2006 sont des produits pétroliers (hydrocarbures et solvants halogénés en majorité), avec de fortes teneurs en soufre et en chlore. Ces résultats mettent en évidence l'enjeu majeur pour l'environnement que revêtent ces déversements qui, selon Ba-Ndaw [1], ont été volontaires et disséminés le même jour à divers endroits du district d'Abidjan sur des surfaces réduites. Ces surfaces auraient pu s'amplifier par la migration et la dispersion des polluants si la dépollution n'avait pas été réalisée rapidement.

La démarche de l'opérateur en charge de la dépollution était cohérente avec les préconisations sur le choix des techniques et méthodes à utiliser pour le traitement des sites contaminés par ce type de pollution, décrites par Berneim [12]. Une étude de Ernst & Young [13] a montré que les méthodes de traitement *ex situ* sont majoritairement utilisées en France. Elles ont permis de traiter, en 2010, près de 3 700 000 tonnes de déchets issus de sites industriels français contaminés. Ces déchets étaient composés de 30 % d'hydrocarbures totaux, 17 % de métaux lourds, 14 % de benzène, toluène, éthylbenzène et xylène (BTEX), 13 % de composés organo-halogénés volatils (CHOV), 9 % de composés organiques volatils (COV), 6 % d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et 4 % de polychlorobiphényles (PCB). Ces concentrations sont comparables à celles de déchets déversés à Abidjan.

En raison de l'inexistence de valeurs limites définissant des seuils dans le cas de dépollution de sites pollués en Côte d'Ivoire, les présents travaux se sont référés aux teneurs de sols pédologiquement identiques et suffisamment éloignés des sites contaminés. Les valeurs de pollutions résiduelles obtenues sont toutes dans les mêmes ordres de concentrations que le fond pédogéo-

Tableau 1. Résultats des analyses effectuées sur les échantillons.

Table 1. Results of the analyses of the samples.

Sites	Zones	Nature échantillons	Concentrations					
			Hydrocarbures totaux (concentration en ppm)			Soufre (concentration en ppm)		
			Con.	Témoin	LD/LQ	Con.	Témoin	LD en pg/s(S) /LQ
Akouédo	Akouédo 1	Sol	< 100	< 100	30/90	< 1	< 1	1/10 ⁻²
	Akouédo 2	Sol	< 100	< 100	30/90	< 1	< 1	1/10 ⁻²
	Akouédo 3	Sol	< 100	< 100	30/90	1,28	< 1	1/10 ⁻²
	Akouédo mare	Eau usée	< 100	< 100	30/90	< 1	1	1/10 ⁻²
Maca	Maca 1	Sol	< 100	< 100	30/90	< 1	< 1	1/10 ⁻²
	Maca 2	Sol	< 100	< 100	30/90	< 1	< 1	1/10 ⁻²
	Maca 3	Sol	< 100	< 100	30/90	< 1	< 1	1/10 ⁻²
	Maca 4	Sol	< 100	< 100	30/90	< 1	< 1	1/10 ⁻²
Abobo plaque 1	Boulangerie	Sol	< 100	< 100	30/90	< 1	< 1	1/10 ⁻²
Abobo derrière rail	Abobo forêt	Sol	< 100	< 100	30/90	< 1	< 1	1/10 ⁻²
Coco service	Haut du talus	Sol	< 100	< 100	30/90	< 1	< 1	1/10 ⁻²
	Flanc du talus	Sol	< 100	< 100	30/90	< 1	< 1	1/10 ⁻²
	Bas du talus	Sol	< 100	< 100	30/90	< 1	< 1	1/10 ⁻²
Abobo route Alépé	Abobo 1	Sol	< 100	< 100	30/90	< 1	< 1	1/10 ⁻²
	Abobo 2	Sol	< 100	< 100	30/90	< 1	< 1	1/10 ⁻²
	Abobo 3	Sol	< 100	< 100	30/90	< 1	< 1	1/10 ⁻²
	Abobo 4	Sol	< 100	< 100	30/90	< 1	< 1	1/10 ⁻²
Vridi	Cap logistique	Eau usée	< 100	< 100	30/90	< 1	< 1	1/10 ⁻²
	Canal enterré	Eau usée	< 100	< 100	30/90	< 1	< 1	1/10 ⁻²
	Canal ciel ouvert	Eau usée	< 100	< 100	30/90	< 1	< 1	1/10 ⁻²
Koumassi	Zone industrielle	Sol	365	292	30/90	< 1	< 1	1/10 ⁻²
	Boulangerie 1	Sol	< 100	< 100	30/90	< 1	< 1	1/10 ⁻²
	Boulangerie 2	Sol	< 100	< 100	30/90	< 1	< 1	1/10 ⁻²
	Boulangerie 3	Sol	< 100	< 100	30/90	< 1	< 1	1/10 ⁻²
	Boulangerie 4	Sol	< 100	< 100	30/90	< 1	< 1	1/10 ⁻²
	Boulangerie 5	Sol	< 100	< 100	30/90	< 1	< 1	1/10 ⁻²

Boulangerie : zone à proximité d'une boulangerie ; Con. : concentration ; LD : limite de détection ; LQ : limite de quantification.

chimique anthropique des échantillons témoins. Ces concentrations sont toutes relativement supérieures aux limites de quantification des appareils de mesure et mettent en évidence l'efficacité des techniques d'analyse et de décontamination utilisées. Cette méthode de décontamination utilisant un environnement local témoin a déjà été utilisée en France afin d'évaluer si un site étudié présente des milieux dégradés, notamment en l'absence de valeurs réglementant ces milieux [14]. Elle permet d'évaluer, le cas échéant, la dégradation attribuable à l'installation ou au site étudié. En effet, en France, les valeurs seuils sont calculées au cas par cas en tenant compte des usages. Cependant, l'interprétation des concentrations résiduelles se base sur des concentrations dans des environnements témoins ainsi que, pour l'eau et

l'air, sur les valeurs réglementaires ou recommandées en fonction des usages (décret, lignes directrices et valeurs guides de l'Organisation mondiale de la santé [OMS] et de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail [Anses]) [15].

Aux États-Unis, pour s'assurer de l'efficacité des opérations de décontamination de sites pollués par des résidus pétroliers, la valeur de pollution résiduelle souvent admise est de 1 % d'hydrocarbures totaux, soit 10 g/kg de sol [16].

Toutes ces méthodes et techniques sont en phase avec celles déployées à Abidjan.

Par ailleurs, l'échantillonnage des sols constitue une partie importante d'une étude de caractérisation d'un terrain et fait aussi partie intégrante des travaux de

restauration. Il doit tenir compte des différentes particularités qui lui sont associées. En effet, il est important de connaître le plus précisément possible les caractéristiques physiques et chimiques du terrain à l'étude ainsi que celles des contaminants présents ou soupçonnés [17]. C'est d'ailleurs ce qui justifie les séries d'analyses réalisées à la demande des autorités ivoiriennes avant le démarrage des travaux de décontamination [5]. Nous pouvons donc affirmer que toutes les dispositions ont été prises pour une parfaite réussite desdits travaux. Toutefois, les travaux ayant démarré un mois après les déversements, les fortes pluies qui ont suivi les jours de déversements auraient contribué à leur dispersion et probablement leur évacuation dans les plans d'eau en aval des lieux de déversements [5]. Ainsi, comme d'autres milieux (sédiments, produits de la mer, de cultures, eau de boisson, air dans les habitations, etc.) d'exposition potentielle (directe ou indirecte) n'ont pas été explorés, la parfaite coordination des opérations de dépollution ne traduit pas la non-contamination des milieux indiqués.

Conclusion

Les opérations de dépollution des sites contaminés suite aux déversements des déchets toxiques en août 2006 à Abidjan ont été suivies par notre équipe de

recherche. Deux polluants traceurs ont été identifiés par l'opérateur (la teneur en soufre et en hydrocarbures totaux dans le sol). Cette démarche utilisant des polluants traceurs comme indicateurs de dépollution avait été validée précédemment par Adjiri et al. [5]. Des analyses de suivi de dépollution ont été réalisées par notre équipe sur des échantillons de sols décontaminés. Les concentrations obtenues ont été comparées à celles des échantillons témoins prélevés sur des sols non contaminés, considérés pédologiquement identiques, et suffisamment éloignés des sites de déversements. Les valeurs de pollutions résiduelles obtenues sont toutes du même ordre de concentrations que le fond géochimique anthropique des échantillons témoins (< 100 ppm pour les hydrocarbures totaux et < 1 ppm pour le soufre). Ces concentrations mettent en évidence l'efficacité des méthodes et techniques de décontamination utilisées par l'opérateur. ■

Remerciements et autres mentions

Financement : nous adressons nos sincères remerciements au Groupe Séché Environnement et au Bureau national d'études techniques et de développement pour leur précieuse collaboration au cours de la réalisation de l'étude et au directeur général du groupe EOULEE pour son appui financier et matériel ; **liens d'intérêts** : les auteurs déclarent ne pas avoir de lien d'intérêt.

Références

1. Safiatou BN. *Synthèse communication sur la crise déchets toxiques dans le district d'Abidjan*. Abidjan : Primature, 2006.
2. Amnesty international. *Une vérité toxique. À propos de Trafigura du Probo koala et du déversement de déchets toxiques en Côte d'Ivoire*. Londres : Amnesty International et Greenpeace, 2012.
3. LIDHO, FIDH, MIDH. *L'affaire du « Probo Koala » ou la catastrophe du déversement des déchets toxiques en Côte d'Ivoire*. Londres : Greenpeace/Aslund, 2011.
4. OCHA. *Rapporteur spécial des Nations unies sur les déchets toxiques*. Abidjan : Organisation mondiale de la santé, Bureau de la coordination des affaires humanitaires, 2006.
5. Adjiri OA, Dongo K, Doulaye K, Biémi J. Caractérisation des impacts chimiques des déchets toxiques déversés à Abidjan (Côte d'Ivoire) : recherche d'indicateurs de suivi des pollutions résiduelles après dépollution. *Environ Risque Sante* 2014 ; 13 : 50-9.
6. Institut national de la statistique (INS). *Recensement général de la population et de l'habitat, rapport d'exécution et présentation des principaux résultats*. Abidjan : INS, 2014.
7. Kouamé KJ. *Contribution à la gestion intégrée des ressources en eaux (GIRE) du district d'Abidjan (sud de la Côte d'Ivoire) : outils d'aide à la décision pour la prévention et la protection des eaux souterraines contre la pollution*. Abidjan : Université de Cocody, 2007.
8. Kouamé IK, Goné DL, Savané I, Koffi K, Lobasse E, Diallo M. Caractérisation physico-chimique des eaux de forages du champ captant Nord Riviera au voisinage de la décharge d'Akouédo (Abidjan-Côte d'Ivoire). *Sci Nat* 2006 ; 3 : 199-213.
9. Tiembre I, Koné AB, Dongo K, Tanne M, Zinsstag J, Cissé G. Aspects épidémiologiques et cliniques de l'intoxication par les déchets toxiques dans le district d'Abidjan. *Cah Sante* 2009 ; 19 : 189-94.
10. Collet P. Traitement des sols : l'excavation et le stockage toujours privilégiés. *Environ Tech* 2013 ; 329 : 50-4.
11. PNUE. *Pollution à Abidjan. Communiqué PNUE-Plan d'urgence*. Abidjan : ONUCI, 2006.
12. Bernheim Yves. Typologies des techniques de réhabilitation des sites pollués. In: Bonhommeau X, El Bahloul I, Le Cloirec P et al., eds. *Gestion des sites et sols pollués*. Saint-Denis: Techniques de l'ingénieur, 1999.

13. Young E. *Taux d'utilisation et coût des différentes techniques et filières de traitement des sols et des eaux souterraines pollués en France, synthèse des données 2010*. Paris : ADEME, 2012.

14. Acardis. *Plan de gestion. Communauté urbaine de Lille. Site Agache – Perenchies*. Lille : Acardis, 2010.

15. Badreddine R, Velly N, Ramel M. *Synthèse des valeurs réglementaires pour les substances chimiques, en vigueur dans l'eau, les denrées alimentaires et dans l'air en France au 31 décembre 2015*. Paris : INERIS, 2017.

16. American Petroleum Institute. *Risk-based methodologies for evaluating petroleum hydrocarbon impacts at oil and natural gas E&P sites*. Washington DC : API, 2001.

17. CEAE. *Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales. Cahier 5 : échantillonnage des sols*. Centre d'expertise en analyse environnementale. Québec : CEAE, 2010.

18. Dongo K, Koné BA, Tiembré I, et al. Exposition environnementale à des déchets contenant du mercaptan, des hydrocarbures aromatiques et de l'hydrogène sulfuré (Abidjan). *Environ Risque Sante* 2009 ; 8 : 519-27.