



**LA CONTAMINATION METALLIQUE DES EAUX DE
SURFACE ET DES EAUX SOUTERRAINES DE LA ZONE
MINIERE D'EXPLOITATION DES PHOSPHATES DE
HAHOTOE-KPOGAME (SUD-TOGO) : CAS DU CADMIUM,
PLOMB, CUIVRE ET NICKEL**

TANOAYI, G., GNANDI, K., AHOUDI, H., OURO-SAMA, K.

Laboratoire de Gestion, Traitement et Valorisation des Déchets (GTVD),
Faculté Des Sciences, Université de Lomé, B.P : 1515 Lomé, Togo.

tanouayit@yahoo.fr

RESUME

La présente étude vise à caractériser la pollution en éléments traces métalliques (Cd, Pb, Ni et Cu) des eaux de surface et des eaux souterraines de la zone minière d'exploitation des phosphates de Hahotoé-Kpogamé afin d'évaluer le risque sanitaire que court la population. Les échantillons ont été dosés par la méthode de spectrophotométrie d'absorption atomique. Il ressort des résultats que ces eaux de surface et souterraines sont contaminées par ces éléments traces métalliques en particulier par le plomb et le cadmium. Il a été observé les moyennes des teneurs maximales en cadmium de 24,74 µg/l et du plomb de 258,9 µg/l dans les eaux souterraines qui sont supérieures à la norme de l'OMS pour l'eau potable. Ces teneurs traduisent l'évidence de la mauvaise qualité de ces eaux avec des quotients de danger évalués supérieurs à 1 dans ces eaux souterraines. La consommation de ces eaux sans traitement préalable pourrait avoir des impacts négatifs sur la santé humaine en général et celle des enfants en particulier.

Mots clés : Phosphate de hahotoé-Kpogamé, eau de surface, eau souterraine, éléments traces métalliques, risque sanitaire.

ABSTRACT

This study aims to characterize the trace metal pollution (Cd, Pb, Ni and Cu) surface water and groundwater in the mining area of operation phosphates Hahotoè-Kpogamé to assess the health risk for people. Samples were analyzed by the method of atomic absorption spectrophotometry. The results show that the surface water and groundwater are contaminated by these trace metals in particular lead and cadmium. It has been observed average maximum levels of cadmium of 24.74 g / l and lead of 258.9 mg / l in groundwater who are higher than the WHO standard for drinking water. These levels reflect the evidence of the bad quality of these waters with higher hazard quotients measured at 1 in the groundwater. The consumption of these waters without treatment could have negative impacts on human health in general and children in particular.

Keywords: Phosphate-Hahotoè Kpogamé, surface water, groundwater, trace metals, health risk.

INTRODUCTION

Au Togo, les phosphates de Hahotoé et de Kpogamé en exploitation depuis 1962 contiennent de fortes concentrations en éléments traces métalliques (ETM) tels que le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le nickel (Ni), le zinc (Zn), le plomb (Pb), et le zircon (Zr) (Gnandi, 1998) retient l'attention. Le minerai brut de phosphate naturel exploité à Hahotoé-Kpogamé comporte deux grandes parties : la matière phosphatée et la gangue. Les phosphates sédimentaires les plus répandus sont les apatites. Ces dernières présentent une formule chimique générale $Me_{10}(XO_4)_6Y_2$ où : Me désigne un cation bivalent (Cd^{2+} , Ca^{2+} , Pb^{2+} , Hg^{2+} , Sr^{2+} , Ba^{2+} ...), XO_4 représente généralement un anion trivalent (PO_4^{3-} , ASO_4^{3-} , VO_4^{3-} , MnO_4^{3-} , ...) et Y un anion monovalent (F^- , OH^- , Cl^- , Br^- ...). Les apatites calciques (Me = Ca^{2+}) sont les plus importantes quantitativement et aussi du point de vue économique. A Hahotoé-Kpogamé, il s'agit d'une francolite, une fluoroapatite carbonatée de formule générale $Ca_{10}(PO_4)_{6-x}(CO_3F)_x(OH,F)_2$ où x est généralement voisin de 1 (Kunkel 1990, Van Kanwenberg et McClellan 1994, Tchangbedji et al., 2003). Les travaux de caractérisation chimique du minerai brut exploité à Hahotoé-Kpogamé et du minerai marchand ont été précédemment réalisés et les résultats montrent des concentrations élevées d'éléments traces.

L'impact de cette exploitation sur l'environnement immédiat a été étudié, et de façon spécifique sur les différents compartiments de l'environnement aquatique (eau, les solides en suspension, les sédiments, et les biotes). Il y a eu ainsi des études géochimiques, une évaluation des concentrations de certains éléments chimiques dans l'eau marine dû au rejet des déchets issus du traitement de

phosphate (Bodjock, 2003), et sur la bioaccumulation de ces ETM dans les crustacées et poissons de mer au lieu du déversement des déchets (Abbé, 2004). A Hahotoé-Kpogamé au lieu d'extraction et les petits villages environnant l'usine de traitement du phosphate, l'eau tirée souvent du puits, du forage et l'eau de surface sans aucun traitement préalable est utilisée comme eau de boisson. Comme le principal facteur de risque pour la santé humaine est la mauvaise qualité de l'eau et surtout de boisson dans les zones rurales, nous avons contribué à évaluer la qualité chimique des ressources en eau de ces milieux en ETM. Ainsi ce travail nous a permis d'évaluer les risques de pollution chimique des eaux douces de la zone minières d'exploitation du phosphate de Hahotoé-Kpogamé, de quelques villages autour de l'usine de traitement des phosphates et de l'eau marine au lieu du déversement des boues de phosphate traitées. Ce qui va permettre de savoir le niveau de pollution des ressources en eau douce et marine en ETM et évaluer le risque sanitaire que courent les populations de cette zone.

MATERIEL ET METHODE

Echantillonnage

Les analyses ont porté sur les eaux de surface et eaux souterraines au lieu d'extraction des phosphates à Hahotoé et Kpogamé, des eaux souterraines (Goumou-Kopé et Dokondji) et des eaux marines au lieu du traitement des phosphates (figure 1).

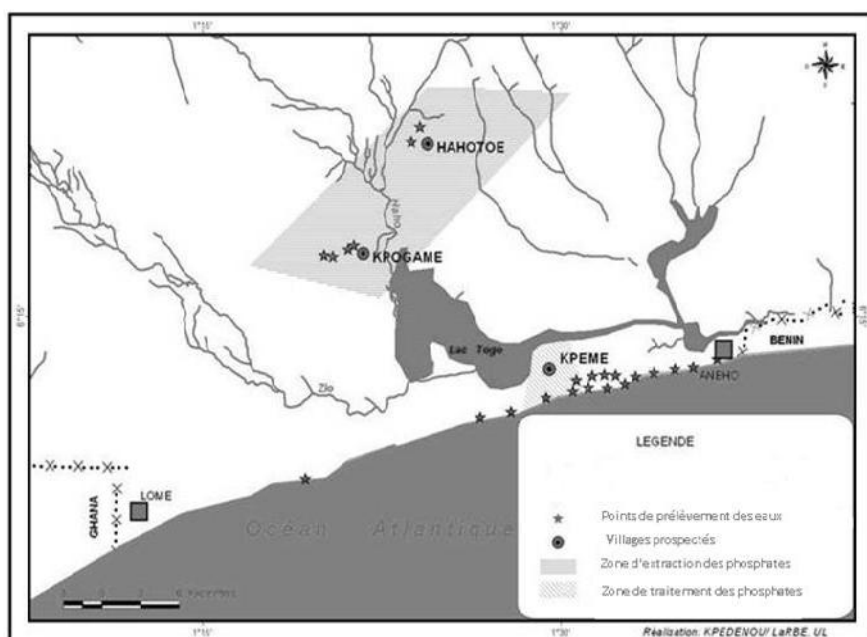


Figure 1 : Carte montrant la zone d'étude avec quelques points de prélèvement

Au total, 35 échantillons d'eau sont prélevés, dont 15 à Hahotoé et Kpogamé lieux d'exploitation du minerai de phosphate (eau de surface et eau souterraine), 15 au long de la côte d'Agbodrafo à Aného (eau marine et effluent de phosphate), 5 à Goumou-Kopé et Dokondji villages autour de l'usine de traitement des phosphates (eau de puits). Pour l'eau de surface à Hahotoé-Kpogamé, l'échantillonnage a été fait dans les étangs laissés par l'extraction du phosphate, et que ces eaux et les ressources halieutiques de celles-ci sont utilisées par la population. Quant aux eaux souterraines, les puits et les forages dans le milieu sont les points de prélèvement, où l'eau tirée est utilisée comme eau de boisson. Afin nous avons complété ceux-ci par les eaux de mine prélevées dans les carrières en activité.

Les eaux marines sont prélevés tout au long du littoral, de Agbodrafo où sont jetés les déchets solides de phosphate, en passant par le point de rejet des boues liquides à Kpémé, jusqu'à l'exutoire à Aného. Les échantillons sont prélevés dans les flacons plastiques préalablement lavés à l'acide nitrique et rincés à l'eau distillée. Par ailleurs, les flacons sont remplis de manière à ce qu'il n'y ait pas d'air au-dessus de l'échantillon. Les échantillons sont acidifiés avec quelques gouttes d'acide nitrique avant le dosage des éléments traces (IGCC/UNIDO/UNDP/UNEP/GEP/NOAA/NEPAD, 2009).

Analyses physico-chimiques

Les mesures du pH, de la conductivité électrique et de la température ont été effectuées sur les échantillons à l'aide d'un pH-mètre de type Crison pH25 et d'un conductimètre WTW cond 315i. Le dosage des différents éléments minéraux dans l'eau est fait par le spectromètre d'absorption atomique du type Thermo Electron Corporation.S.Serie AA Spectrometer. Les éléments traces métalliques (Cd, Cu, Pb, et Ni) sont dosés directement des échantillons prélevés comme le recommande le manuel de formation pour la surveillance de la pollution côtière et marine de la région du GCLME (IGCC/UNIDO/UNDP/UNEP/GEP/NOAA/NEPAD, 2009).

Evaluation des risques sanitaires liés à la consommation des eaux polluées par les éléments traces métalliques

L'évaluation des risques sanitaires est une méthode qui permet d'estimer par calcul les risques pour la santé auxquels est soumise une population exposée à une pollution particulière d'origine industrielle ou naturelle. L'évaluation des risques sanitaires liés à la consommation de l'eau polluée par les éléments traces suivra quatre principales étapes (ADEME, 2007 ; ASTEE, 2006).

- L'identification du danger des substances chimiques : elle permet de sélectionner les substances à prendre en compte dans l'évaluation quantitative du risque sanitaire (EQRS) et d'identifier les effets qui peuvent en dériver : effet aigu, subchroniques chronique, effet à seuil, effet sans seuil.
- L'évaluation de la relation dose réponse : elle à pour but de définir une relation quantitative entre la dose administrée ou absorbée et l'incidence de l'effet, à partir de laquelle on établie les valeurs toxicologiques de référence (VTR) ou Dose de Référence (RfD). Dans le cadre de cette étude, les VTR relatives aux éléments étudiés seront choisies d'après (Bisson et *al.*, 2009)
- L'évaluation de l'exposition : Cette étape consiste à déterminer les voies de passage de la substance étudiée de la source vers le récepteur humain, ainsi qu'à estimer la fréquence, la durée et l'importance de l'exposition. Ceci aboutit au calcul de la dose journalière d'exposition (DJE). Les scénarios d'exposition où l'individu est le plus exposé (hypothèse maximaliste) seront utilisés. De ce fait, nous envisageons les scénarios d'exposition suivants : Dans cette étude, la consommation moyenne en eau de boisson est estimée à 2 l par jour (soit 2kg/j) pour les adultes et à 1,5 l par jour (soit 1,5kg/j) pour les enfants (Volatier, 2000). il sera considéré que l'individu consomme cette quantité d'eau 7 jours/7 jours.

La dose journalière d'exposition aux polluants par la consommation de l'eau polluée est déterminée de la manière suivante:

$$DJE = C \times Q \times F / P$$

DJE : Dose journalière d'exposition liée à la consommation de l'eau polluée (mg/kg/j) ;

C : Concentration d'exposition relative à l'eau polluée exprimée en mg/kg;

Q : Quantité de l'eau consommée par jour, exprimée en kg/j ;

F : Fréquence ou taux d'exposition (sans unité): l'eau est consommée 7j/7j d'où F= 1;

P : Poids corporel de la cible (kg) ;

Le poids corporel moyen des enfants de 0 à 15 ans est de 28 kg et celui d'un adulte est conventionnellement égale à 70 kg selon US EPA (ASTEE, 2003) ;

- La caractérisation du risque : représente une estimation de l'incidence et de la gravité des effets indésirables susceptibles de se produire dans une population humaine en raison de l'exposition à l'ensemble des substances. La caractérisation du risque pour les effets à seuil est exprimée par le quotient de danger (QD). Il est calculé pour la voie d'exposition orale (consommation de l'eau) de la manière suivante :

$$QD = DJE / RfD$$

DJE = Dose Journalière d'Exposition (mg/kg/j)

RfD = Dose de Référence (mg/kg/j) ou VTR

Si $QD < 1$ la survenue d'un effet toxique est peut probable

Si $QD > 1$ l'apparition d'un effet toxique ne peut pas être exclu

Cette formule s'applique à chaque substance prise individuellement et ne renseigne pas sur l'effet résultant de l'exposition à un mélange de substances.

Traitement des données

Les logiciels Microsoft Excel 2007 et STATISTICA version 5.1 ont été utilisés pour le traitement des données. Le test t de Student au seuil de 5% a été utilisé pour comparer les concentrations en éléments traces métalliques trouvées aux valeurs normes préconisées par l'OMS.

RESULTATS ET DISCUSSION

Le pH et la conductivité des échantillons des eaux analysés

Le pH et la conductivité des eaux de surface et souterraine de Hahotoé et Kpogamé

Le pH des eaux de surface de Hahotoé et Kpogamé varie de 6,62 à 7,39 et se trouve dans la norme préconisée par l'OMS en ce qui concerne l'eau potable (6,5-9,5). Quant aux eaux souterraines le pH varie entre 4,46 à 8,14 où seul le puits à Akoumapé est hors norme avec un bas pH de 4,46 (acide).

La conductivité des eaux de surface de Hahotoé et de Kpogamé varie de 127,8 à 1223 $\mu\text{S}/\text{cm}$ où 42,85% des eaux répondent à la norme de l'OMS. Ces eaux de surfaces par rapport à leur conductivité présentent une minéralisation globale qui varie de faible à élevée. Les deux étangs à Kpogamé-Est qui présentent une minéralisation élevée serait dû à leur vieillesse. Quant aux eaux souterraines la conductivité varie de 252 à 1056 $\mu\text{S}/\text{cm}$ où toutes ne répondent pas à la valeur norme de l'OMS. La minéralisation globale varie de moyenne à élevée. Alors nous constatons que la minéralisation est plus importante dans les eaux souterraines que dans les eaux de surface à part l'écart relevé au niveau des deux étangs de Kpogamé.

Le pH et la conductivité des eaux marines au lieu du déversement des déchets de phosphate et des eaux de puits (eau souterraine) autour de l'usine.

Le pH des eaux marines varie de 7,13 à 8,15 et que l'effluent est légèrement acide (pH= 6,31). On note une augmentation du pH au point de déversement de l'effluent jusqu'à Aného d'où l'influence du rejet d'effluent acide sur cette eau marine côtière. Quant aux eaux de puits des deux villages, le pH varie de 7,55 à 8,41 et se trouve entre les valeurs normes préconisées par l'OMS en ce qui concerne l'eau potable.

La conductivité des eaux marines varie de 19910 à 53200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ce qui traduit une minéralisation élevée de ces eaux. Cette conductivité augmente au point de déversement de l'effluent jusqu'à Aného, tout comme le pH. La conductivité de l'eau prélevée sous le pont est faible (19910 $\mu\text{S}/\text{cm}$) par rapport aux autres est dû au mélange de l'eau douce du lac d'Aného à celle de l'océan correspondant donc à une eau saumâtre. Quant aux eaux de puits de Dokondji et de Goumou-Kopé la conductivité varie de 274 à 1381 $\mu\text{S}/\text{cm}$ où toutes ne sont pas conformes à la valeur norme de l'OMS pour l'eau potable. La minéralisation globale est moyenne à élevée.

Appréciation des teneurs moyennes en éléments traces métalliques des eaux dans chaque village

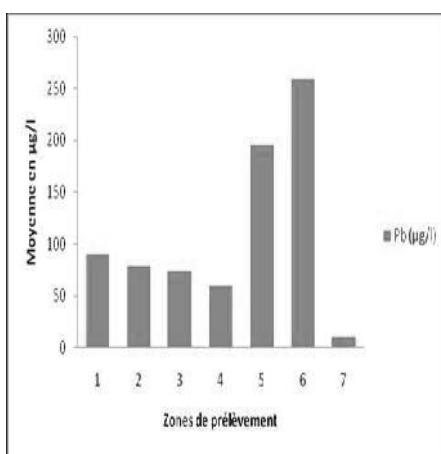
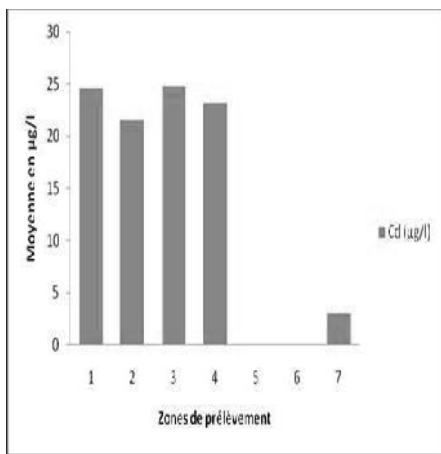


Figure 2 : Histogramme des teneurs moyennes en cadmium des eaux. (1) eau de surface à Kpogamé, (2) eau de surface à Hahotoé, (3) eau souterraine à Kpogamé, (4) eau souterraine à Hahotoé, (5) eau souterraine à Dokondji, (6) eau souterraine à Goumou-Kopé, (7) OMS.

Figure 3: Histogramme des teneurs moyennes en plomb des eaux. (1) eau de surface à Kpogamé, (2) eau de surface à Hahotoé, (3) eau souterraine à Kpogamé, (4) eau souterraine à Hahotoé, (5) eau souterraine à Dokondji, (6) eau souterraine à Goumou-Kopé, (7) OMS.

La contamination métallique des eaux de surface et des eaux souterraines de la zone minière d'exploitation des phosphates de Hahotoe-Kpogame (Sud-Togo) : Cas du cadmium, plomb, cuivre et nickel

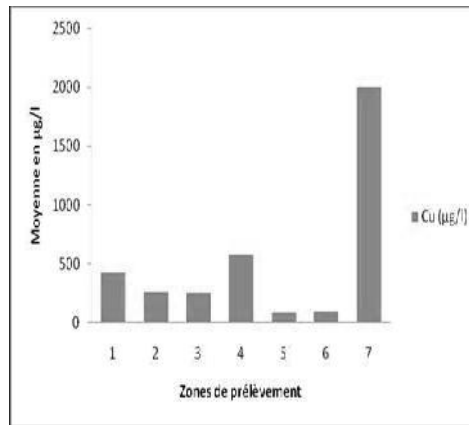
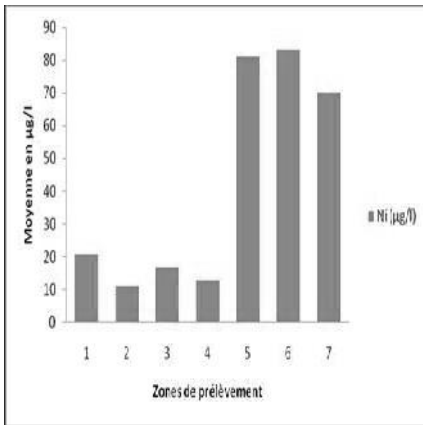


Figure 4 : Histogramme des teneurs moyennes en nickel des eaux. (1) eau de surface à Kpogamé, (2) eau de surface à Hahotoé, (3) eau souterraine à Kpogamé, (4) eau souterraine à Hahotoé, (5) eau souterraine à Dokondji, (6) eau souterraine à Goumou-Kopé, (7) OMS.

Figure 5 : Histogramme des teneurs moyennes en cuivre des eaux. (1) eau de surface à Kpogamé, (2) eau de surface à Hahotoé, (3) eau souterraine à Kpogamé, (4) eau souterraine à Hahotoé, (5) eau souterraine à Dokondji, (6) eau souterraine à Goumou-Kopé, (7) OMS.

La figure 2 montre que la concentration minimale en cadmium se trouve dans les eaux souterraines de Dokondji et de Goumou-Kopé où les valeurs sont inférieures au seuil de détection de l'appareil. La concentration maximale (24,74 µg/l) s'observe dans les eaux souterraines à Kpogamé. On constate donc que les eaux de surface et les eaux souterraines de Kpogamé-Hahotoé sont polluées en cadmium. Des différences significatives de teneur en Cd ont été notées (test t au seuil de 5%). Les teneurs moyennes en Cd de l'eau de surface et souterraine de Kpogamé et de Hahotoé sont significativement supérieures à la valeur norme de L'OMS [(eau de surface Kpogamé : $t = 8,26$; $p < 0,014$), (eau souterraine Kpogamé : $t = 8,88$; $p < 0,0008$), (eau de surface Hahotoé : $t = 9,72$; $p < 0,002$), (eau souterraine Hahotoé : $t = 7,18$; $p < 0,01$)].

La concentration minimale (59,35 µg/l) en plomb se trouve dans les eaux souterraines à Hahotoé. La concentration maximale en plomb (258,9 µg/l) s'observe dans les eaux souterraines de Goumou-Kopé (figure 3). Toutes ses eaux sont donc polluées par le plomb, mais il existe un écart de concentration en plomb plus élevé des eaux souterraines de Dokondji et de Goumou-Kopé par rapport à celles de Hahotoé-Kpogamé. Ceci peut s'expliquer par l'effet de la salinité sur la solubilité de cet élément chimique. La teneur moyenne en Pb de l'eau de surface de Hahotoé est significativement supérieure à la valeur norme

de l'OMS ($t = 3,97$; $p < 0,02$).

La figure 4 montre que la concentration minimale (11,2 µg/l) en nickel se trouve dans les eaux de surface à Hahotoé. La concentration maximale (83,13 µg/l) s'observe dans les eaux souterraines de Goumou-Kopé. On constate donc que les eaux souterraines de Dokondji et de Goumou-Kopé sont polluées par le nickel.

La concentration minimale (90,25 µg/l) en cuivre se trouve dans les eaux souterraines de Dokondji. La concentration maximale (573,9 µg/l) s'observe dans les eaux souterraines à Hahotoé (figure 5). On note la présence du cuivre dans toutes les eaux jusqu'à une concentration de 573,9 µg/l, mais ceux-ci restent inférieurs à la norme (extensive) fixée par l'OMS qui considère ce métal comme un oligoélément pour l'organisme humain.

La contamination des eaux de surfaces et des eaux souterraines de Hahotoé et de Kpogamé serait due au lessivage des remblais de sols miniers de phosphates par les eaux de pluies et de leurs infiltrations dans les nappes souterraines, car les études effectuées par Ghandi en 1998 sur les sols miniers de Hahotoé-Kpogamé ont montré des teneurs en cadmium qui varient de 0,2 à 43 ppm, en plomb de 15 à 140 ppm, en nickel de 15 à 432 ppm et en cuivre de 18 à 356 ppm. Quant à la contamination des eaux souterraines de Dokondji et de Goumou-Kopé, elle serait due à la poussière de phosphate que reçoivent ces villages de l'usine de traitement des phosphates et du lessivage des sols pollués. En effet les sols autour de l'usine de traitement des phosphates sont pollués avec des concentrations en plomb qui varient de 11,595 à 13,74 ppm, en nickel de 42,265 à 59,525 ppm et en cuivre de 32,325 à 36,225 ppm dans le village de Goumou-Kopé (Aduayi-Akue, 2010). La contamination diffuse par les eaux domestiques et autres (carburant, peinture, batteries, piles...) serait négligeable car se sont des milieux ruraux.

C'est ce que montre la conductivité de ces eaux qui est témoin de la minéralisation globale des eaux. Cette minéralisation des eaux est liée à la mobilisation des éléments du substrat géologique dépendante des conditions physico-chimiques du milieu. Alors la condition directe qui serait à la base de cette minéralisation élevée est l'extraction des phosphates qui favoriserait le lessivage et l'infiltration.

Les étangs laissés par l'extraction après le remblai en cône constituent de véritables réceptacles des éléments chimiques lessivés par l'eau de ruissellement sur un substrat géologique remanié. En même temps les nappes souterraines sont alimentées par ces étangs de façon continue par infiltration. Quant aux eaux souterraines de Dokondji et de Goumou-Kopé, la minéralisation élevée de celles-ci serait due aux poussières des phosphates et de la remontée de l'eau marine vers les nappes souterraines. Ces poussières sont issues de l'usine de traitement des phosphates avec des concentrations en éléments traces métalliques élevées (Tchangbedji et al, 2003). L'eau marine qui remonte ces nappes est elle-même fortement minéralisée à cet endroit par le rejet des effluents et déchets solides des phosphates.

Appréciation des teneurs en éléments traces métalliques des eaux marines

Les résultats montrent que dans l'effluent, les teneurs sont de 19,17 µg/l en cadmium, 41,56 µg/l en plomb, 58,47 µg/l en nickel, 21,35 µg/l en cuivre. En amont comme en aval du déversoir de l'effluent les teneurs en cadmium sont inférieures à la limite de détection de l'appareil. Quant aux autres éléments traces métalliques leurs teneurs en amont (Agbodrafo) du déversoir sont plus élevées qu'en aval (vers Aného). Ce qui veut dire que les déchets solides mobilisent plus ces métaux lourds dans l'eau marine, mais il faut noter aussi l'impact du warf qui crée en amont immédiat la stagnation de l'eau de mer.

Cette pollution marine est caractérisée par le rejet des déchets boueux directement dans la mer, issus du traitement des phosphates et qui contiennent des éléments traces toxiques. En premier lieu, l'aspect de l'eau de mer au long de la côte Kpémé-Aného n'est pas bleuâtre comme celui de la côte de Lomé (couleur naturelle de l'eau de mer) ; elle est plutôt jaunâtre. Ce changement de la couleur est la conséquence visuelle du rejet des boues issues du traitement du minerai brut et laisse soupçonner une pollution de cette côte. L'analyse chimique du surnageant de ces déchets boueux révèle la présence de tous les éléments dosés (surtout les métaux lourds). Nos résultats ne s'écartent pas trop des teneurs obtenues par Ouro-Salim en 2004 dans le surnageant des déchets boueux (cadmium : 0,064 µg/l, plomb : 0,5 µg/l) (Ouro-Salim, 2004).

Dans les eaux marines, les résultats montrent la présence de tous les éléments chimiques dosés sauf le cadmium où les valeurs sont inférieures à la limite de détection de l'appareil. Ceci peut s'expliquer par les travaux de Gnandi et al sur la distribution spatiale des particules sédimentaires dans la mer et leurs teneurs en éléments traces (Gnandi et al, 1999). Les sédiments du domaine littoral (plus riche en sable) sont plus pollués par le cadmium que ceux du large (plus riche en argile). La répartition de ce métal entre la phase liquide et la phase solide sera la conséquence directe. Plus la concentration du métal est élevée dans la phase solide (sédiments) moins sera celle dans la phase liquides avec une faible solubilité. C'est cette observation qui est faite dans les eaux marines du littoral où les teneurs en cadmium sont inférieures à la valeur limite de détection de l'appareil. On observe la même chose dans les eaux de puits de Goumou-Kopé et de Dokondji où le cadmium serait plus lié à la phase solide, car les sols de ces villages de la côte sont classés dans la catégorie des sols minéraux peu évolués qui sont plus riches en sable.

Nous avons observés pour la majorité des éléments analysés que leurs teneurs augmentaient du point du rejet des boues vers l'aval (vers Aného) et aussi pour les paramètres pH et conductivité. Ceci peut s'expliquer par le transport des rejets boueux et solides au niveau du milieu marin par la dérive littorale (plus forte du côté Est) et au courant du rip (courant dirigés vers le large). Ces courants transportent sur de grandes distances les sédiments naturels et anthropiques le long des côtes et vers le large et sont à l'origine de la propagation des déchets miniers phosphatés qui polluent la côte Togolaise.

Evaluation du risque sanitaire lié à la consommation des eaux souterraines de la zone d'exploitation des phosphates de Hahotoé-Kpogamé.

Les éléments traces retenus pour cette évaluation sont le cadmium, le plomb, le cuivre et le nickel. Ceci, à cause de leur présence en quantité évaluable dans les eaux souterraines des zones d'extraction et de traitement des phosphates, de la disponibilité de leur VTR et de leurs effets toxiques sur la santé humaine. En effet, ces eaux souterraines sont utilisées comme eau de boisson par la population sans aucun traitement préalable. Cette évaluation porte sur la voie orale et concerne les expositions chroniques uniquement.

Les VTR retenues pour cette étude sont celles issues principalement des études épidémiologiques chez l'homme, les plus protectrices donc les plus faibles et les années de révision les plus récentes. Ainsi, selon le rapport de l'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS) (Bisson et al., 2009), pour les effets chroniques à seuil, l'ATSDR (*Agency for Toxic Substances and Disease Registry*) recommande pour le Cd 2.10^{-4} mg/kg/j et pour le Cu 0,01 mg/kg/j, l'OMS préconise pour le Pb $3,5. 10^{-3}$ mg/kg/j et pour le Ni l'US EPA recommande 2.10^{-2} mg/kg/j.

Les résultats de l'évaluation de l'exposition au Cd, Pb, Ni et Cu liée à la consommation de l'eau ainsi que les quotients de danger (QD) correspondants chez les adultes et les enfants dans la zone d'extraction et de traitement des phosphates sont reportés dans les tableaux 1 et 2.

Tableau 1: Dose journalière d'exposition et quotient de danger chez les enfants et les adultes au lieu d'extraction des phosphates.

ETM	C	DJA	P		DJE		QD	
			Enfant	Adulte	Enfant	Adulte	Enfant	Adulte
Cd	0,024	0,0002	28	70	0,0013	0,0007	6,42	3,42
Pb	0,0668	0,0035	28	70	0,0036	0,0019	1,02	0,55
NI	0,0148	0,02	28	70	0,0008	0,0004	0,04	0,02
Cu	0,415	0,01	28	70	0,0222	0,0119	2,22	1,19

Tableau 2: Dose journalière d'exposition et quotient de danger chez les enfants et les adultes au lieu de traitement des phosphates.

ETM	C	DJA	P		DJE		QD	
			Enfant	Adulte	Enfant	Adulte	Enfant	Adulte
Pb	0,2275	0,0035	28	70	0,0122	0,0065	3,48	1,86
Ni	0,0821	0,02	28	70	0,0044	0,0023	0,22	0,12
Cu	0,0933	0,01	28	70	0,0050	0,0027	0,50	0,27

La contamination métallique des eaux de surface et des eaux souterraines de la zone minière d'exploitation des phosphates de Hahotoe-Kpogame (Sud-Togo) : Cas du cadmium, plomb, cuivre et nickel

La survenue d'un effet toxique provenant du cadmium, plomb et du cuivre lié à la consommation des eaux souterraines dans la zone d'extraction des phosphates est probable chez les enfants avec un plus grand QD observé pour le cadmium ($QD = 6,42 \gg 1$). Chez les adultes, on peut s'attendre à des effets toxiques pour le cadmium et le cuivre, mais peu probable pour le plomb ($QD = 0,55 < 1$) et le nickel ($QD = 0,02 < 1$). Dans la zone de traitement, seul pour le plomb l'on peut s'attendre à des effets toxiques aussi bien chez l'enfant ($QD = 3,48 > 1$) que chez l'adulte ($QD = 1,86 > 1$). L'on trouve également que les quotients de danger issus de la consommation de l'eau dans les deux zones pour les enfants sont tous supérieurs à ceux des adultes malgré la faible consommation journalière d'eau chez les enfants (1,5l pour l'enfant contre 2l pour l'adulte) d'après notre scénario. En effet, ce risque élevé à la survenance d'effet toxique chez les enfants serait dû à leur faible poids corporel et de leur fragilité sur le plan physiologique étant donné que les contaminants sont facilement absorbés dans leur organisme (RCAP, 1996). Les travaux de Gnandi et al (2007) sur la fluorose dentaire dans la zone de traitement des phosphates montrent que cette fluorose se rencontre beaucoup plus chez les enfants que chez les adultes, ce qui corrobore ce fait.

Dans ces zones d'extraction et de traitement des phosphates, plus de 90% de la population utilise ces eaux souterraines comme eau de boisson sans aucun traitement préalable tout en ignorant les effets des éléments traces métalliques sur la santé de l'homme. En effet, Le plomb et le cadmium sont les éléments traces les plus toxiques pour l'homme (Testud, 2005). Le plomb a pour cible majeure le système nerveux et les reins. Il présente également une toxicité hématologique dont l'anémie est la principale manifestation. Les effets neurotoxiques (saturnisme) restent les plus préoccupants. Des études épidémiologiques ont montré qu'une exposition au plomb à faible dose au cours de la vie fœtale pouvait conduire à l'apparition des anomalies congénitales et qu'une telle exposition durant l'enfance pouvait entraîner un déficit neuro-comportemental durable (Leblanc et al., 2006). Le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) a classé le plomb et ses dérivés inorganiques dans la catégorie 2B (potentiellement cancérigène pour l'homme). Le cadmium n'est pas un élément essentiel au métabolisme chez l'homme car il n'a aucune fonction connue dans le corps humain (Miquel, 2001). Les effets toxiques du cadmium sont nombreux, mais les principales atteintes de l'organisme suite à une exposition prolongée sont, chez l'homme comme chez l'animal, des atteintes de la fonction rénale. Le cadmium est à l'origine de la maladie « Itai-Itai » décrite au Japon, caractérisée par une insuffisance rénale associée à l'ostéoporose et à l'ostéomalacie (Payen, 2007). Il a été classé dans la catégorie 1 « cancérigène pour l'homme » par le CIRC. De nombreux cas d'intoxications chroniques au cuivre par l'eau de boisson ont été décrits ainsi que leurs manifestations cliniques : troubles gastro-intestinaux essentiellement et une hépato-splénomégalie marquée chez les enfants (Muller-Hocker et al., 1988 ; Spitalny, 1984). Chez la femme, la grossesse est associée à une augmentation de

la rétention de cuivre liée à une diminution de l'excrétion biliaire induite par les variations du statut hormonal et le fœtus est entièrement dépendant du taux de cuivre circulant dans le sang maternel (INERIS, 2005). Le nickel est à peu près sûrement indispensable à la nutrition animale à petite quantité et pour l'homme, mais il peut être dangereux lorsqu'on dépasse les quantités maximales tolérées. Les nausées, les vomissements et vertiges sont possibles après une exposition. Les embolies pulmonaires, les échecs respiratoires, les échecs de naissances, l'asthme et les bronchites chroniques, les réactions allergiques telles que des éruptions cutanées, ainsi que des problèmes cardiaques sont les conséquences liées à la toxicité du nickel (OMS, 1986).

CONCLUSION

Il ressort de nos résultats que les eaux de surface et souterraines de Hahotoé-Kpogamé (lieu d'extraction), de Goumou-Kopé et Dokondji (village autour de l'usine de traitement des phosphates) sont contaminés par ces éléments traces métalliques, en particulier par le plomb et le cadmium. On a pu observer les moyennes des teneurs maximales en cadmium de 24,74 µg/l et du plomb de 258,9 µg/l dans les eaux souterraines qui sont supérieures à la norme de l'OMS pour l'eau potable. Ces résultats traduisent l'évidence de la mauvaise qualité de ces eaux de surface et souterraines et l'influence des rejets de déchets phosphatés sur la qualité chimique de l'eau de mer. Partant de cette mauvaise qualité des eaux, les ressources de celles-ci seront polluées par les phénomènes de bioaccumulation et de bioamplification (travaux de Abbé sur le bioaccumulation du cadmium et du plomb par les espèces animales marines, de Agbeko sur le cas de la fluorose dentaire chez les enfants autour de l'usine de traitement des phosphates à Kpémé...). Ainsi, par la consommation de ces eaux et des ressources halieutiques l'homme sera exposé aux risques d'intoxication de ces métaux. Ce que montre l'évaluation des risques sanitaires de la consommation des eaux souterraines de cette zone par la population avec des quotients de danger supérieur à 1 traduisant la survenance des effets toxiques. Il se pose de ce fait un problème de santé publique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABBE K.D. (2004). Evaluation des conséquences du rejet des déchets phosphates dans la mer : étude de la bioaccumulation de quelques éléments chimiques toxiques par les espèces animales marines : cas du cadmium et du plomb, Mémoire GEE, ESTBA, Université de Lomé, Togo.
- ADEME/SYPREA/FP2E/INERIS (2007). Méthodologie d'évaluation quantitative des risques sanitaires relatifs aux substances chimiques, Convention 03 75 C 0093 et 06 75 C 0071, 45p.

La contamination métallique des eaux de surface et des eaux souterraines de la zone minière d'exploitation des phosphates de Hahotoe-Kpogame (Sud-Togo) : Cas du cadmium, plomb, cuivre et nickel

- ADUAYI-AKUE A. (2010). Evaluation de la pollution par les métaux lourds des sols et des produits agricoles autour des sites de traitement des phosphates de Kpémé (sud Togo) : cas du cadmium, du plomb, du nickel et du cuivre, Mémoire DEA environnement, SSN, FDS, Université de Lomé, Togo.
- ASTEE (2003). Association Scientifique et Technique de l'Eau et de l'Environnement (ASTEE.). Guide pour l'évaluation du risque sanitaire dans le cadre de l'étude d'impact d'une UIOM, 60p.
- ASTEE (2006). Association Scientifique et Technique de l'Eau et de l'Environnement (ASTEE.). Guide méthodologique pour l'évaluation du risque sanitaire de l'étude d'impact des installations de compostage soumises à autorisation, 65p.
- BODJOCK K. (2003). Etude chimique de l'impact sur l'environnement du rejet des effluents du traitement des phosphates de Hahotoé-Kpogamé (Togo) dans la mer, Mémoire 358/03/GEE, ESTBA, Université de Lomé, Togo.
- DIRECTION GENERALE DE LA SANTE (2005). La qualité de l'eau potable en France : aspects sanitaires et réglementaires.
- ECOLE DES MINES DE SAINT-ETIENNE (2008). Méthodes spectrométriques d'analyse et de caractérisation, Axe " Génie des procédés", Centre spin.
- GNANDI K., TOZO K., AMOUZOUVI K., BABA G., TCHANGBEDJI G., KILLI K., AGBEKO K. (2007). Impact de l'exploitation minière sur la santé humaine : cas de la fluorose dentaire chez les enfants autours de l'usine de traitement des phosphates de Kpémé (Sud-Togo), J. Rech. Sci. Univ. Lomé (Togo), Vol. 8, N° 2 : Série A 17p.
- GNANDI K. (1998). Cadmium et autres polluants inorganiques dans les sols et sédiments de la région côtière du Togo : une étude géochimique, thèse, Université d'Erlangen-Nuremberg, Germany.
- GNANDI K., TOBSCHALL H.J. (1999). The pollution of marine sediments by trace elements in the coastal region of Togo caused by dumping of cadmium-rich phosphorite tailing into the sea. Environmental geology, Vol. 38, N°1.
- GREKONZI KONGOUA G.A. (2005). Contribution à la recherche sur l'élimination des traces des métaux toxiques dans les phosphates du Togo : cas du cadmium, DEA de chimie, Physico-Chimie des matériaux, FDS, Université de Lomé, Togo, p 8-9.
- IGCC/UNIDO/UNDP/UNEP/GEP/NOAA/NEPAD (2009). Marine pollution monitoring manual. A training manual for coastal and marine pollution monitoring for the GCLME region. Guinea Current Large Marine Ecosystem Project.
- INERIS (2005). Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques : Cuivre et ses dérivés. DRC-02-25590-02DF54.doc, version N°1-5-mars 05.

- LEBLANC J.C., VOLATIER J.L., SIROT V., NAWEL B.A. (2006). Etudes des consommations alimentaires de produits de la mer et imprégnation aux éléments traces, polluants et omega 3 (CALIPSO), AFSSA, INRA, 127p.
- MIQUEL G. (2001). Effet des métaux lourds sur l'environnement et la santé, Rapport 261, Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques, 365p.
- MULLER-HOCKER J., MEYER U., WIEBECKE B., HUBNER G., EIFE R., KELLNER M., SCHRAMEL P. (1988). Copper storage disease of the liver and chronic dietary copper intoxication in twofurther German infants mimicking Indian childhood cirrhosis. *Pathol Res Pract*, Vol. 183, N°1, 39-45.
- OMS (1986). Directives de qualité pour l'eau de boisson : critère d'hygiène et documentation à l'appui, Vol. 2, Genève, 341p.
- OMS (2006). Les lignes directives sur la qualité en eau potable : Référence en ce qui concerne la sécurité en matière de l'eau potable.
- OURO-SALIM I.A. (2004). Traitement des boues phosphates par la méthode de coagulation-floculation, Mémoire GEE, ESTBA, Université de Lomé, Togo.
- PAYEN P. (2007). Evaluation des risques liés à la consommation des produits de la pêche à pied récréative en Basse-Normandie, mémoire Ingénieur du Génie Sanitaire, Ecole Nationale de la Santé Publique, Rennes, 81p.
- SPITALNY K.C., BRONDUM J., VOGT R.L., SARGENT H.E., KAPPEL S. (1984). Drinking-water-induced copper intoxication in a Vermont family. *Pediatrics*, Vol. 74, N°6, 1103-1106.
- TCHANGBEDJI G., KILI, A., SAVARIAUL M.J., LACOUT J. L. (2003). Chemical and structural characterization of natural phosphate of Hahotoé (Togo), *Bull. Chem. Soc. Ethiop*, Vol.17, N°2, 1-8.
- TESTUD F. (2005). Pathologie toxique professionnelle et environnementale. 3ème éd, Eska, Paris, 672p.
- VOLATIER J.L. (2000). Enquête INCAA–Individuelle et Nationale sur les Consommations Alimentaires. CREDOC, AFSAA.