



Journal Homepage: - www.journalijar.com
**INTERNATIONAL JOURNAL OF
 ADVANCED RESEARCH (IJAR)**

Article DOI: 10.21474/IJAR01/9981
 DOI URL: <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/9981>



RESEARCH ARTICLE

EVALUATION QUANTITATIVE DES RISQUES SANITAIRES ET ESTIMATION DE L'IMPACT SANITAIRE LIES A L'INGESTION D'UNE POLLUTION METALLIQUE DES EAUX DE CONSOMMATION EN MILIEU RURAL (HIRE, CÔTE D'IVOIRE).

Yapo Hermann Aristide Yapi¹, Amadou Kouyaté¹, Marc Irié. Gouli Bi², Bini Kouamé Dongui¹ and Albert Trokourey².

1. Université Jean Lorougnon GUEDE, Unité de Formation et de Recherche Environnement, Laboratoire des Sciences et Technologie de l'Environnement, BP 150 Daloa, Côte d'Ivoire.
2. Université Felix Houphouët Boigny, Unité de Formation et de Recherche des Sciences des Structures de la Matière, Laboratoire de Chimie Physique, Côte d'Ivoire.

Manuscript Info

Manuscript History

Received: 05 September 2019
 Final Accepted: 07 October 2019
 Published: November 2019

Key words:-

Waters, Pollution, Ingestion, Population, health risks.

Abstract

The present study aims to make the quantitative assessment of health risks and to estimate the impact to evaluate the health impact related to the ingestion of arsenic, cadmium, lead, nickel and zinc contained in groundwater of the Bonikro gold prospect and the city of Hiré. The contents of these metal trace elements were determined by ICP-AES. From the concentrations obtained, we calculated the Hazard Quotients, determine the different probabilities of occurrence of skin cancer and count the number of cases of skin cancer likely to appear within the population. From these results, it is noted that this population runs health risks with hazard quotients evaluated greater than 1. Also, high probability of occurrence of skin cancer that far exceed the reference value of 1.10^{-5} with cases of skin cancer that could reach 4.3% of village populations.

Copy Right, IJAR, 2019,. All rights reserved.

Introduction:-

Nos sociétés connaissent une détérioration accélérée de leur environnement et des écosystèmes qui concourent à la vie. Les pollutions environnementales sont définies comme un déséquilibre entre l'environnement et l'activité anthropique (Quenel, 2004). Les rapports de production contemporains ont une force d'action dans l'évolution et la destruction des systèmes écologiques sans commune mesure avec ceux du passé. L'interdépendance entre les phénomènes sociaux et naturels est de plus en plus marquée et le développement de problèmes de santé liés à l'environnement atteste de l'imbrication des équilibres écologiques et des enjeux sanitaires (Boutaric, 2010). De nouvelles maladies apparaissent et les questions à traiter ne sont plus seulement celles de toxicité aiguë liée à des doses importantes, mais aussi celles de toxicité chronique liée à l'exposition à de faibles doses de polluants (Boutaric, 2010) notamment les éléments traces métalliques (ETM).

La pollution métallique est et demeurera toujours un problème d'actualité compte tenu des nombreuses nuisances causées par celle-ci. Cette pollution est problématique du fait de la non biodégradabilité et l'accumulation des éléments traces métalliques (ETM) dans l'environnement (Makhouk et al., 2011; Pétré, 2008)

Corresponding Author:-Yapo Hermann Aristide Yapi.

Address:-Université Jean Lorougnon GUEDE, Unité de Formation et de Recherche Environnement, Laboratoire des Sciences et Technologie de l'Environnement, BP 150 Daloa, Côte d'Ivoire.

Les études que nous avons effectuées en 2012 et 2013 sur le prospect aurifère de Bonikro et dans la ville de Hiré ont permis de faire l'évaluation quantitative et qualitative de la pollution métallique. Les résultats de cette étude ont fait l'objet de plusieurs publications scientifiques (Yapi et al., 2014a; Yapi et al., 2014b). Cependant, l'aspect risque encouru par la population n'a pas été abordé. Aussi, cette présente étude porte essentiellement sur l'Evaluation Quantitative des Risques Sanitaires (EQRS). L'EQRS est maintenant de plus en plus utilisée pour répondre aux interrogations spécifiques et précises de populations vivant, à une échelle locale, des situations environnementales dégradées (InVS/afssset, 2005).

Cette étude se traduit par le calcul des Quotients de Dangers (QD) pour les effets à seuil, l'Excès de Risque Individuel (ERI) pour les effets sans seuil et le calcul de l'Impact Sanitaire (IS) pour déterminer le nombre de cas de cancers cutanés susceptibles de se produire au sein de la population.

Matériels et méthode :-

Présentation de la zone d'étude

Notre zone d'étude est située entre 06°15'08.6 et 06°10' de latitude nord et 005°23'44.8 et 005°16'32.1 de longitude ouest. Le climat est de type équatorial avec une pluviométrie moyenne d'environ 1200 mm. La pédologie de la zone d'étude présente plusieurs profils de sols notamment des granitoïdes équants et orientés hétérogènes, des schistes, des filons et blocs de quartz, des métadacites, des roches vertes à structures initiales totalement effacées (Yacé, 1982). Ils appartiennent tous aux groupes de sols suivants: plinthosol, ferralsol, et gleysol (Atsé, 2007). Tous ces sols résultent d'une altération longue et intense, avec une fraction argileuse composée essentiellement de kaolinite (Atsé, 2007). Les principaux minéraux sulfureux présents sont la pyrite, la galène, la bismuthine, la blende et la chalcopryrite (Sonnendrucker, 1967). Les minéraux accessoires sont le mispickel, la stibine (Sonnendrucker, 1967).

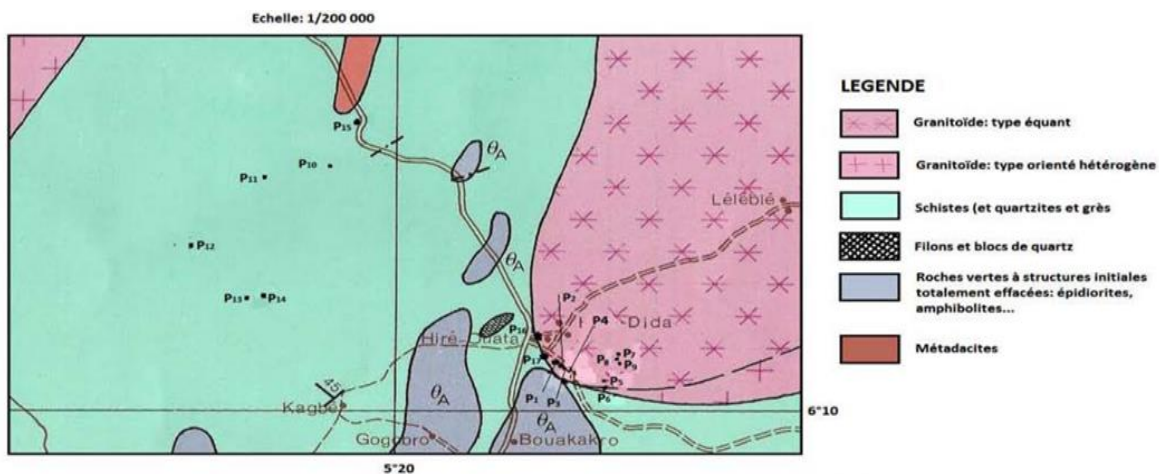
Echantillonnage

Les prélèvements des échantillons ont été effectués au cours de quatre campagnes dans les mois de décembre 2012, février, août et octobre 2013. Au cours de l'étude, les prélèvements ont été effectués entre 7h et 18h.

Pour cette étude, nous avons retenu 9 stations.

P₁, P₂, P₉, P₁₀, P₁₁, P₁₂, P₁₃, P₁₅ et P₁₆, (Figure 1) sont des stations où des échantillons d'eaux souterraines ont été prélevés. P₁, P₂, P₉ et P₁₆ sont des échantillons d'eaux de puits paysans. Ces puits familiaux sont situés au milieu des lieux d'habitations des différents quartiers de la ville de Hiré (Côte d'Ivoire).

P₁₀, P₁₁, P₁₂, P₁₃, P₁₅, sont des échantillons d'eaux de pompes villageoises. Ces pompes sont les principales sources d'approvisionnement en eau de consommation des habitants des villages de Bonikro (P₁₀), Konankro (P₁₁), Chantier (P₁₂), Petit Bouaké (P₁₃) et Bandamankro (P₁₅).



Figur1:-Situation géographique des différentes stations de prélèvements et carte géologique du secteur de Hiré. (Direction de la géologie, 1982)

Mesures des paramètres physicochimiques Mesure des paramètres physiques

Dans chacun des sites, la température, le pH, la conductivité et le potentiel redox (Eh) ont été mesurés *in-situ* à l'aide d'un multimètre HACH HQ 40 d.

Des échantillons d'eaux ont été prélevés à l'aide de bouteille en plastique de 1L, remplies jusqu'au ras-bord et préalablement rincées avec l'eau de la station. Ils ont été ensuite acidifiés sur le terrain avec de l'acide nitrique (HNO₃), conservés à 4°C pour des analyses des paramètres chimiques (arsenic, cadmium, nickel, plomb, zinc) au laboratoire.

Mesure des paramètres chimiques

Les échantillons d'eaux prélevés ont été préalablement filtrés à l'aide d'un filtre GFC Wattman 0,45 µm puis analysés par spectroscopie d'émission dont la source est un plasma généré par un couplage inductif (ICP-AES) (Rodier et al., 2009). Le rôle du plasma est de casser les liaisons moléculaires pour produire des ions, atomes libres afin qu'ils soient excités.

Evaluation des risques sanitaires liés à la consommation des eaux polluées par les éléments acés métalliques (effet à seuil)

C'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)

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.

Evaluation de la relation dose réponse

Elle a pour but de définir une relation quantitative entre la dose administrée ou absorbée et l'incidence de l'effet, à partir de laquelle on établit 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 (IRIS, 1995; AFSSA, 2004).

Evaluation 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, à 1 L par jour (soit 1kg/j) pour les enfants et 0,75 L (soit 0,75 kg/j) par jour pour les nourrissons (OMS, 2004). 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 nourrissons de 0 à 2 ans 5 kg, des enfants de 2 à 15 ans 10 kg et celui d'un adulte est conventionnellement égal à 60 kg (IRIS, 1995);

Caractérisation du risque

Cette étape permet 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 peu 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.

Evaluation des risques sanitaires liés à la consommation des eaux polluées par les éléments traces métalliques (effet sans seuil)

L'évaluation des risques sanitaires pour les effets sans seuil se traduit par le calcul de l'Excès de Risque Individuel (ERI). Il représente la probabilité de survenue d'une pathologie pour les individus exposés, compte tenu du scénario construit. On parle d'excès de risque car cette probabilité est liée à l'exposition au polluant considéré et s'ajoute au risque de base présent dans la population. Il est généralement spécifique à une voie d'exposition et à un polluant (InVS/afssset, 2005).

Dans cette étude, nous avons calculé l'excès du risque individuel associé à l'ingestion pendant les vies entières de 70 et 58 ans (OMS, 2004; CIA, 2017), respectivement pour la population mondiale et ivoirienne, d'une eau dont la concentration $C_i = n * C_{LQ}$ est supérieure à la limite de qualité.

$$ERI_{(n * C_{LQ}, 70 \text{ ans})} = 10 \left[\left(n * C_{LQ} * \frac{\text{Consommation}}{\text{Poids}} \right) * ERU * \left(\frac{2 \text{ ans}}{70 \text{ ans}} \right) \right] + 3 * \left[\left(n * C_{LQ} * \frac{\text{Consommation}}{\text{Poids}} \right) * ERU * \left(\frac{13 \text{ ans}}{70 \text{ ans}} \right) \right] + 1 * \left[\left(n * C_{LQ} * \frac{\text{Consommation}}{\text{Poids}} \right) * ERU * \left(\frac{55 \text{ ans}}{70 \text{ ans}} \right) \right]$$

ERI: Excès de risque individuel

ERU: Excès de Risque Unitaire

C_{LQ} : Concentration égale à la limite de qualité

Il faut noter qu'afin de prendre en compte une éventuelle susceptibilité particulière des nouveaux nés et des jeunes enfants, l'US-EPA propose d'appliquer un facteur de 10 pour une période allant à 2 ans et un facteur de 3 pour la période de 2 à 15 ans.

Calcul de l'Impact Sanitaire

Les deux résultats immédiats d'une évaluation quantitative des risques sanitaires sont l'excès de risque individuel (ERI) et le quotient de danger (QD) (InVS/afssset, 2005). En s'appuyant sur la connaissance de l'effectif de population exposée, un nombre de cas attendus de maladie et/ou un pourcentage de la population susceptible d'être touché par une pathologie peuvent être calculés. Ils représentent une expression populationnelle des conséquences de santé de l'exposition considérée, encore appelée Impact Sanitaire (IS). Cette expression est de plus en plus sollicitée pour conduire la communication et appuyer les décisions que ce soit, par exemple, pour disposer d'une appréciation de l'ampleur du problème de santé publique, ajuster une autorisation d'émission polluante ou analyser la pertinence de mettre en place une étude épidémiologique (InVS/afssset, 2005). L'impact sanitaire (IS) se calcule à partir de l'ERI précédemment défini et de la taille N de la population considérée par la formule suivante (InVS/Safsset, 2005):

$$IS = N * ERI$$

Résultats:

Température, pH, conductivité et les ETM dans les eaux souterraines

La température moyenne des eaux souterraines étudiées est en dessous de 30°C. Ces températures varient entre 27 et 30°C (**Tableau 1**).

De cette étude, on retient que les eaux souterraines provenant des villages de Chantier et de Konankro et certaines de la ville de Hiré notamment les stations P₁, P₉ et P₁₆ sont acides. Les autres stations sont sensiblement basique (pH < 8) (**Tableau 1**). Les eaux du puits paysans (P₂ (pH = 7,6)) sont les plus basiques. Il faut ajouter cette eau de boisson est la plus minéralisée. En effet, la conductivité mesurée est de 1887,83 µs/cm (**Tableau 1**).

Il faut ajouter que les eaux souterraines les plus acides sont les plus faiblement minéralisées.

Par ailleurs, de cette étude, on note la présence de l'arsenic, du cadmium du plomb du nickel et du zinc dans les eaux de boissons étudiées. Il faut noter que les eaux de boissons du village de Bonikro présentes des concentrations maximales en arsenic (181,3 µg/L), plomb (135,25 µg/L) et nickel (2,78 mg/L) (**Tableau 1**). Pour le cadmium (291 µg/L) et le zinc (574 mg/L) leurs teneurs maximales ont été déterminées dans les eaux souterraines du village de Chantier (**Tableau 1**).

Tableau 1:-Valeurs moyennes de la température, du pH et de la conductivité dans les eaux souterraines (Yapi, 2014a; Yapi, 2014b)

St	Temp (°C)	pH	Cond (µs/cm)	As (µg/L)	Cd (µg/L)	Pb (µg/L)	Ni (mg/L)	Zn (µg/L)
P ₁	28,9	6,9	643,6	108,3	185	85,5	1,31	404,75
P ₂	28,57	7,60	1887,83	33	202	22,25	1,5	180,5
P ₉	28,1	5,69	220,25	33	159	4,25	2,68	313
P ₁₀	29,07	7,35	270,25	181,3	78	135,25	2,78	363
P ₁₁	27,4	6,11	230,33	66,5	86	96,5	0,65	484
P ₁₂	28,37	4,92	143,67	61,2	291	24	1,75	574
P ₁₃	27,43	7,42	200,33	106,6	107	192	1,48	564
P ₁₅	28,9	7,30	247	156	78	88,5	1,1	432
P ₁₆	28,63	5,47	397	101	385	21	1,1	478
OMS	20-25	6,5-9,5	250	10	1	10	220	3(mg/L)

Evaluation des risques sanitaires liés à la consommation des eaux polluées par les éléments traces métalliques (effet sans seuil)

Les éléments traces retenus pour l'EQRS sont l'arsenic, le cadmium, le plomb, le nickel et le zinc. Ceci à cause de leur présence en quantité évaluable dans les eaux provenant des pompes villageoises du prospect aurifère de Bonikro et des puits paysans de la ville de Hiré. Aussi, de la disponibilité de leurs VTR et leurs effets toxiques sur la santé humaine. 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) pour les effets à seuil, l'ATSDR (2007) recommande pour le cadmium (Cd) $2 \cdot 10^{-4}$ m/kg/j, l'As $3 \cdot 10^{-4}$ mg/Kg/j (IRIS, 1995), le plomb $3,5 \cdot 10^{-3}$, le nickel l'US EPA (1996) recommande $2 \cdot 10^{-2}$ mg/kg/j et $3 \cdot 10^{-1}$ mg/kg/j pour le zinc (IRIS, 1995)

Les résultats de l'estimation des DJE par ingestion d'eaux de pompes villageoises et de puits paysans chez les nourrissons, les enfants et les adultes sont consignés dans les tableaux 2, 3, 4, 5 et 6.

Pour l'arsenic, le cadmium, le nickel et le zinc la survenue d'un effet toxique est certaine pour toutes les tranches de la population qui consomme les eaux souterraines des différents sites étudiés. En effet, les quotients de dangers calculés sont toutes supérieures à 1 (QD >> 1) (Tableau 2, 3, 5, 6).

Aussi, pour le plomb la survenue d'un effet toxique est certaine pour les nourrissons et les enfants dans la majorité des eaux de consommation étudiées à l'exception des stations P₂, P₉ et P₁₆ (Tableau 4). Par contre, chez les adultes la survenue d'un effet toxique est peu probable (QD < 1) (Tableau 4) sauf pour les stations P₉ et P₁₂ où (QD > 1).

Tableau 2:-Dose journalière d'exposition et quotient de danger chez les nourrissons, les enfants et les adultes pour l'arsenic

St	Conc (µg/L)	DJA	Nou	Enf	Adt	DJE*10 ⁻³			QD		
						Nou	Enf	Adt	Nou	Enf	Ad
P ₁	108,3	310 ⁻⁴	5	10	60	16,2	10,83	3,6	54,1	36,1	12
P ₂	33	310 ⁻⁴	5	10	60	4,95	3,3	1,1	16,5	11	3,67
P ₉	33	310 ⁻⁴	5	10	60	4,95	3,3	1,1	16,5	11	3,67
P ₁₀	181,3	310 ⁻⁴	5	10	60	27,2	18,13	6,04	90,65	60,43	20,14
P ₁₁	66,5	310 ⁻⁴	5	10	60	9,97	6,65	2,22	33,25	22,17	7,39
P ₁₂	61,2	310 ⁻⁴	5	10	60	9,18	6,12	2,04	30,6	20,4	6,8
P ₁₃	106,6	310 ⁻⁴	5	10	60	16	10,66	3,55	53,3	35,53	11,84
P ₁₅	156	310 ⁻⁴	5	10	60	23,4	15,6	5,2	78	52	17,33
P ₁₆	101	310 ⁻⁴	5	10	60	15,2	10,1	3,37	50,5	33,67	11,22

*Nou. Nourrisson, Enf. Enfant, Adt. Adulte, St.Station

Tableau 3:-Dose journalière d'exposition et quotient de danger chez les nourrissons, les enfants et les adultes pour le cadmium.

St	Con (µg/L)	DJA	Nou	Enf	Ad	DJE*10 ⁻³			QD		
						Nou	Enf	Ad	Nou	Enf	Ad
P ₁	185	2 10 ⁻⁴	5	10	60	27,75	18,5	6,1	138,7	92,5	30,83
P ₂	202	2 10 ⁻⁴	5	10	60	30,3	20,2	6,73	151,7	101,1	33,7
P ₉	159	2 10 ⁻⁴	5	10	60	23,85	15,9	5,3	119,3	79,5	26,5
P ₁₀	78	2 10 ⁻⁴	5	10	60	11,7	7,8	2,6	58,5	39	13
P ₁₁	86	2 10 ⁻⁴	5	10	60	12,9	8,6	2,87	64,5	43	14,3
P ₁₂	291	2 10 ⁻⁴	5	10	60	43,65	29,1	9,7	215,8	145,5	48,5
P ₁₃	107	2 10 ⁻⁴	5	10	60	16,05	10,7	3,57	80,25	53,5	17,8
P ₁₅	78	2 10 ⁻⁴	5	10	60	11,7	7,8	2,6	58,5	39	13
P ₁₆	385	2 10 ⁻⁴	5	10	60	57,75	38,5	12,8	288,7	192,5	64,2

Tableau 4:-Dose journalière d'exposition et quotient de danger chez les nourrissons, les enfants et les adultes pour le Plomb

St	Conc (µg/L)	DJA	Nou	Enf	Ad	DJE*10 ⁻³			QD		
						Nou	Enf	Ad	Nou	Enf	Ad
P ₁	85,5	3,510 ⁻³	5	10	60	12,83	8,55	2,85	3,56	2,37	0,79
P ₂	22,25	3,510 ⁻³	5	10	60	3,34	2,25	0,741	0,93	0,62	0,21
P ₉	4,25	3,510 ⁻³	5	10	60	0,64	0,43	0,14	0,18	0,12	0,04
P ₁₀	135,25	3,510 ⁻³	5	10	60	20,29	13,52	4,51	5,63	3,76	1,25
P ₁₁	96,5	3,510 ⁻³	5	10	60	14,47	9,65	3,22	4,02	2,68	0,89
P ₁₂	24	3,510 ⁻³	5	10	60	3,6	2,4	0,8	1	0,67	0,22
P ₁₃	192	3,510 ⁻³	5	10	60	2,88	19,2	6,4	8	5,33	1,78
P ₁₅	88,5	3,510 ⁻³	5	10	60	13,27	8,85	2,95	3,6875	2,46	0,82
P ₁₆	21	3,510 ⁻³	5	10	60	3,15	2,1	0,7	0,87	0,58	0,19

Tableau 5:-Dose journalière d'exposition et quotient de danger chez les nourrissons, les enfants et les adultes pour le nickel.

St	Conc (mg/L)	DJE	Nou	Enf	Ad	DJE*10 ⁻³			QD		
						Nou	Enf	Ad	Nou	Enf	Ad
P ₁	1,31	2.10 ⁻²	5	10	60	196,5	131	43,67	9,825	6,55	2,183
P ₂	1,5	2.10 ⁻²	5	10	60	225	150	50	11,25	7,5	2,5
P ₉	2,68	2.10 ⁻²	5	10	60	402	268	89,33	20,1	13,4	4,467
P ₁₀	2,78	2.10 ⁻²	5	10	60	417	278	92,67	20,85	13,9	4,633
P ₁₁	0,65	2.10 ⁻²	5	10	60	97,5	650	21,67	4,875	3,25	1,083
P ₁₂	1,75	2.10 ⁻²	5	10	60	262,5	175	58,33	13,125	8,75	2,917
P ₁₃	1,48	2.10 ⁻²	5	10	60	222	148	49,33	11,1	7,4	2,47
P ₁₅	1,1	2.10 ⁻²	5	10	60	165	110	36,67	8,25	5,5	1,83
P ₁₆	1,1	2.10 ⁻²	5	10	60	165	110	36,67	8,25	5,5	1,83

Tableau 6:-Dose journalière d'exposition et quotient de danger chez les nourrissons, les enfants et les adultes pour le zinc

St	Conc (µg/L)	DJA	Nou	Enf	Ad	DJE *10 ⁻³			QD		
						Nou	Enf	Ad	Nou	Enf	Ad
P ₁	404,75	3 10 ⁻¹	5	10	60	60,71	40,47	13,49	202,37	134,92	44,97
P ₂	180,5	3 10 ⁻¹	5	10	60	27,08	18,05	6,02	90,25	60,17	20,06
P ₉	313	3 10 ⁻¹	5	10	60	46,95	31,3	10,43	15,65	104,33	34,78
P ₁₀	363	3 10 ⁻¹	5	10	60	54,45	36,3	12,1	18,15	121	40,33
P ₁₁	484	3 10 ⁻¹	5	10	60	72,6	48,4	16,13	242	161,33	53,78
P ₁₂	574	3 10 ⁻¹	5	10	60	86,1	57,4	19,13	287	191,33	63,78
P ₁₃	564	3 10 ⁻¹	5	10	60	84,6	56,4	18,8	282	0,188	62,67
P ₁₅	432	3 10 ⁻¹	5	10	60	64,8	43,2	14,4	216	144	48

P ₁₆	478	3 10 ⁻¹	5	10	60	71,7	47,8	15,93	239	159,33	53,11
-----------------	-----	--------------------	---	----	----	------	------	-------	-----	--------	-------

Evaluation des risques sanitaires liés à l'ingestion de l'arsenic contenus dans les eaux souterraines pour les effets sans seuil.

Du tableau 7, on retient que les niveaux de risque pour les deux types de population sont du même ordre de grandeur (10⁻³) (Tableau 7). Cependant, la probabilité d'apparition de cancer de la peau est plus élevée au niveau de la population ivoirienne. Pour les différentes stations, les risques d'apparition de cas de cancers sont plus élevés au sein de la population du village de Bandamankro (P₁₅ (ERI= 29 10⁻³)). Par contre, ceux consommant les eaux de boisson des quartiers Koko (P₂ (ERI = 6,2 10⁻³)) et Baoulé (P₉ (ERI= 6,2 10⁻³)) sont moins exposés aux risques d'apparition de cancers cutanés.

Tableau 7:-Estimation du niveau de risque et l'impact sanitaire lié à la consommation d'une eau présentant un dépassement de la limite de qualité en arsenic

Stations	Niveau de dépassement de la valeur guide (µg/L)	Nombre d'habitants	Dépassement pour toute une vie (70 ans)		Dépassement pour toute une vie (51 ans)	
			ERI	IS	ERI	IS
P ₁	10,83 * 10	< 100	20 10 ⁻³	< 0,2	25,8 10 ⁻³	< 0,258
P ₂	3,3 * 10	< 100	6,2 10 ⁻³	< 0,062	7,9 10 ⁻³	< 0,79
P ₉	3,3 * 10	< 100	6,2 10 ⁻³	< 0,062	7,9 10 ⁻³	< 0,79
P ₁₀	18,13 * 10	1000	34 10 ⁻³	34	43,2 10 ⁻³	43
P ₁₁	6,65 * 10	1000	12,4 10 ⁻³	12,4	15,8 10 ⁻³	15,8
P ₁₂	6,12 * 10	1000	11,4 10 ⁻³	11,4	14,6 10 ⁻³	14,6
P ₁₃	10,66 * 10	1000	20 10 ⁻³	20	25,4 10 ⁻³	25,4
P ₁₅	15,6 * 10	1000	29,2 10 ⁻³	29,2	37,2 10 ⁻³	37,2
P ₁₆	10,1 * 10	< 100	19 10 ⁻³	< 0,19	24,1 10 ⁻³	< 0,241

Evaluation de l'impact sanitaire

La population de la sous-préfecture de Hiré estimée à 54075 habitants. Cependant, de manière plus précise, l'évaluation de l'impact sanitaire se portera sur les populations des villages de Bonikro P₁₀, Konankro P₁₁, Chantier P₁₂, de petit Bouaké P₁₃ et Bandamankro P₁₅. Le nombre d'habitant pour ces différents villages n'excède pas 1000. Aussi ceux des quartiers Koko P₁ et P₂, Baoulé P₃ et Assahédé P₉ ne peuvent excéder 100. Il faut noter que ces stations sont situées au milieu des lieux habitations

Des résultats du tableau 7, on retient que le nombre de cas de cancers de la peau qui puisse se produire au sein de la population villageoise est compris entre 0 et 43 soit au maximum 4,3 % de la population. Les faibles valeurs d'IS (IS<1) ont été obtenues pour les différentes stations de la ville de Hiré (P₁, P₂, P₉ et P₁₆). Par contre, ceux obtenus pour les différents villages sont tous supérieurs à 10 (P₁₀, P₁₁, P₁₂, P₁₃ et P₁₅).

Discussion:-

Température, pH et conductivité et les ETM dans les eaux souterraines

Les eaux souterraines étudiées sont chaudes. En effet, leur température moyenne est de 28, 37°C. Nous pourrions l'expliquer par la position géographique de notre zone d'étude. En effet, cette région dans un pays tropical, la température ambiante moyenne descend rarement en dessous de 25°C. Le pH moyen est de 6,53. L'écart relatif entre la valeur moyenne et la valeur de référence est de 6,7% qui sont inférieure à 10%. Ces eaux sont donc acceptables pour la consommation. Cependant, les eaux souterraines du village de Chantier (pH= 4,92) et des quartiers Koko (5,69) et Assahédé (5,47) (Tableau 1) sont très acides et non conformes à la directive de l'OMS pour les eaux de consommation (Tableau 1). Ces différentes valeurs de températures de pH et de conductivité mesurés dans les différentes stations sont dues aux caractéristiques géochimiques propres aux différentes stations.

Par ailleurs, ces mêmes caractéristiques géochimiques sont responsables de la pollution d'origine naturelle des eaux souterraines du prospect aurifère de Bonikro. Il faut ajouter à cette pollution d'origine naturelle, le mauvais entretien des puits paysans notamment les stations P₁ P₂, P₉ et P₁₆. En effet, l'eau ruisselant sur la paroi interne de ces puits entraîne la dissolution des minéraux qui y sont présents (Miramond, 2006).

En outre, le bassin de décantation de la mine d'or de Bonikro, les eaux d'infiltration du parc à résidus de stériles sont d'autant de vecteurs de pollution d'origines anthropiques des eaux souterraines. Il faut préciser que les villages de Bonikro, Petit bouaké, Bandamankro, Konankro et Chantier sont tous situés dans un rayon de 5 km de la mine d'or de Bonikro (Yapi et al., 2014a).

Evaluation des risques pour les effets à seuil: Quotient de Danger

Ces résultats obtenus au cours cette étude pour les effets sans seuil traduisent la pertinence de l'évaluation quantitative des risques sanitaires. En effet, pour des teneurs inférieures à la norme OMS des risques d'apparition de pathologie au sein de la population peuvent être certains. C'est le cas du nickel et du zinc. En effet, les teneurs obtenues pour ces ETM dans les eaux de boissons étudiées sont toutes inférieures à la norme de potabilité de l'OMS (**Tableau 1**). Cependant, les QD déterminés sont tous supérieurs à 1 (**Tableau 5, 6**) ce qui signifie ces eaux souterraines présentes des risques liés à l'ingestion du nickel et du zinc.

Le plomb par contre, nous avons des teneurs déterminées deux fois supérieures à la norme OMS (P_{12} (24 µg/L), P_{16} (21 µg/L)) cependant les Quotients de Dangers calculés sont inférieurs à 1 ($QD < 1$) (**Tableau 4**). D'où l'ingestion du plomb contenu dans ces eaux boisson du village Chantier (P_{12}) et celle de la ville de Hiré (P_{16}) peuvent donner lieu à des inquiétudes mais l'apparition de pathologies serait peu probable (**Tableau 4**). Il faut noter que toutes teneurs en plomb déterminées dans les eaux de consommation sont supérieures à la norme OMS pour les eaux potables.

Par ailleurs, malgré la faible consommation journalière d'eau chez les enfants (0,75L pour le nourrisson, 1L pour l'enfant contre 2L pour l'adulte) d'après notre scénario d'exposition, la survenance d'effet toxique chez les nourrissons et les enfants est supérieure à celle des adultes. Cela 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 (Vilaginès, 2003). Ce constat a été relevé par (Kamilou et al., 2014) lors l'évaluation des risques sanitaires causés par la bioaccumulation des métaux lourds chez des espèces halieutiques du système lagunaire togolais.

Aussi, que ce soit l'eau issue des pompes villageoises ou des puits paysans, elles sont utilisées comme eaux de boissons sans aucun traitement préalable tout en ignorant les effets des éléments traces métalliques sur la santé de l'homme. En effet, les ETM comme l'arsenic, le plomb et le cadmium présentes dans ces eaux souterraines font partie des éléments traces les plus toxiques pour l'homme (Testud, 2005).

Chez l'homme, l'absorption de l'arsenic est estimée à 95 % par voie orale (Zheng et al., 2002). Les effets aigus, suite à l'ingestion d'arsenic inorganique, sont typiquement gastro-intestinaux associant nausées, vomissements, hémorragies gastro-intestinales, douleurs abdominales et diarrhées qui prennent parfois l'aspect « eau de riz », décrite sous le nom de « cholera arsenical », pouvant conduire au décès. Ces symptômes surviennent rapidement, dans les heures suivant l'ingestion (ATSDR, 2007), (Kerjes, 1987). 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.

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 neurocomportemental 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). Les études expérimentales disponibles pour juger de la cancérogénicité du nickel par voie orale sont peu nombreuses (OMS, 2005 ; Haber et al., 2000). Concernant plus spécifiquement l'exposition par l'eau de boisson, deux études épidémiologiques de type écologique ont cherché à établir un lien entre l'ingestion d'eau de boisson contenant des sels de nickel et certaines formes de cancer. Isacson et al., (1985) ont constaté un lien statistique entre les teneurs en nickel dans l'eau de boisson et le taux d'incidence du cancer de la vessie et des poumons. Après analyse de leurs résultats, ils en ont conclu que le nickel n'était pas un facteur de risque mais peut être un indicateur de contamination. Ling-wei et al., (1988) démontrent une corrélation entre la présence d'éléments traces dont le nickel dans l'eau de boisson et le cancer naso-pharyngien dans une région chinoise. La significativité du

résultat est limitée dans la mesure où l'échantillon de la population est petit et que du cadmium et du plomb sont présents conjointement dans cette eau.

L'intoxication aiguë par ingestion de zinc est relativement rare. Elle provoque des problèmes gastro-intestinaux et des diarrhées. Le potentiel cancérigène du zinc n'a pas été démontré jusqu'à ce jour (AFSSA, 2007)

Evaluation des risques pour les effets sans seuil: ERI et IS

Pour les substances cancérigènes comme l'arsenic, les calculs montrent une probabilité plus élevée d'apparition de cancer de la peau au sein de la population ivoirienne que celle de la population mondiale. Cela est dû à l'espérance de vie de cette population qui est inférieure à celle de la population mondiale.

Pour une population ingérant ces eaux de boissons des différents sites étudiés, les ERI obtenus sont supérieures 110^5 (OMS, 2004). Ce qui traduit de fortes probabilités d'apparition de cancer cutané au sein de la population liés à l'ingestion de l'arsenic. Ces chiffres sont très importants et inquiétants compte tenu de la vulnérabilité de la population villageoise. En effet, l'accès à des soins de santé est problématique pour cette population rurale compte tenu du manque de moyens financiers. Aussi, les centres de santé ne disposent pas de matériels nécessaires pour le dépistage des cas de cancers.

Par ailleurs, des résultats obtenus, on estime au maximum à 43 cas de cancers susceptibles d'être détectés au sein de cette population rurale consommant ces eaux de boisson durant toute une vie. Cependant, certaines stations notamment celles de la ville de Hiré (P_1 , P_2 , P_9 et P_{16}) ont des nombres de cas (IS) inférieures à 1 malgré des valeurs d'ERI élevés. Cela est dû à la taille de la population qui est inférieure à 100 (Tableau 7). Aussi, selon (InVS/afssset, 2005) pour une population de 10000 habitants et des valeurs d'ERI estimées à 10^4 on a des cas de cancers inférieurs à 1. Il faut préciser que ces résultats ne traduisent pas l'absence de possibilité d'apparition de cas de cancers.

En outre, si nous tenons compte de l'effectif de 54075 habitants de la sous-préfecture de Hiré, au moins 100 cas de cancers cutanés sont susceptibles de se produire au sein de cette commune.

Ces différents résultats au sein d'une même population justifient la pertinence des débats quant à l'utilisation de l'impact sanitaire dans l'EQRS. Certains experts revendiquent que les risques calculés dans le cadre d'une évaluation de risques pour la santé humaine ne se fondent pas sur la taille de la population exposée. C'est la raison pour laquelle il est défini des seuils de risques acceptables, en particulier par l'US-EPA. Ce souhait légitime de fixer des seuils d'acceptabilité équivalents quelle que soit la population exposée permet d'exiger le même niveau de risque quelle que soit la situation. Pour d'autres, en revanche, d'un point de vue scientifique, toutes les données disponibles devraient être prises en compte, et pas uniquement le seuil d'acceptabilité. Il paraît nécessaire de contrôler la réalité des calculs d'excès de risque en interprétant les valeurs de risque au regard de l'effectif de population exposée (InVS/afssset, 2005).

Conclusion:

L'Évaluation Quantitative des Risques Sanitaires révèle des risques certains d'apparition de pathologies au sein de la population des villages de Bonikro, Konankro, Chantier, Petit Bouaké Bonikro et de la ville de Hiré. En effet, les quotients de dangers calculés pour toutes les tranches de la population sont supérieurs à 1 pour les différents ETM étudiés contenus dans les eaux de boissons.

Cette étude révèle en outre, une forte probabilité d'apparition de cas de cancer de la peau au sein de cette population. En effet, les excès de risques individuels calculés pour liés à l'ingestion de l'arsenic provoquant des maladies de cancer de la peau sont tous dans l'ordre de 10^3 supérieurs à 10^5 . Aussi, les résultats issus de l'impact sanitaire mettent en évidence un nombre de cas cancer qui peut atteindre jusqu'à 4,3% de la population.

Références:

1. ADEME/SYPREA/FP2E/INERIS (2007). Méthodologie d'évaluation quantitative des risques sanitaires relatifs aux substances chimiques, Convention 2007.
2. AFSSA (2004). Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments. Evaluation des risques sanitaires liés au dépassement de la limite de la qualité de l'arsenic dans les eaux destinées à la consommation humaine.

3. ASTEE (2006). Association Scientifique et Technique de l'Eau et de l'Environnement. Guide méthodologique pour l'évaluation du risque sanitaire de l'étude d'impact des installations de compostage soumises à autorisation.
4. ATSDR (2007). Toxicological Profile for Lead. In ATSDR. Agency for Toxic*Substances and Disease Registry.
5. Atsé, A.R.M. (2007). Etude environnemental du projet aurifère de Bonikro en Côte d'Ivoire.
6. Institut de l'énergie et de l'environnement de la francophonie. Fiche technique moged.
7. Boutaric, F. (2010). L'appropriation de la méthode de l'évaluation des risques sanitaires en France. *Ecologie et politique*, N°40, 117-135. *Ecologie & politique* 2012/2(N°40), pp117-135. CIA world factbook-version du mars 11, 2017.
8. Haber, L.T., Diamond, G.L., Zahao, Q., Erdreich, M.L. (2000). Identification and dose response of ingested nickel-soluble salts. *Regul. Toxicol. Pharmacol*, 31: pp: 231-241.
9. INS-SODE (2014). Recensement général de la population et de l'habitat. Répertoire des localités: région du Lôh Djiboua, Hiré, Côte d'Ivoire, 9p.
10. InVS/afset (2005). Estimation de l'impact sanitaire d'une pollution environnementale et évaluation quantitative des risques sanitaires. Synthèse provisoire du rapport. SANITAIRES, 2005.
11. IRIS (1995). Mercuric chloride (HgCl₂). In USEPA: Integrated Risk Information System. CASRN 7487-94-7.
12. Isacson, P., Bean, J.A., Splinter, R., Olson, D.B., and Kohler, J. (1985). Drinking Water and Cancer Incidence in Iowa: III. Association of Cancer with Indices of Contamination, *Am. J. Epidemiol*, 121: pp: 856-869. Kamilou, O.S, Hodabalo, D.S., Kissao, G., Komlan, M. A, Ezzo, J.B. (2014).
13. Evaluation des risques sanitaires de la bioaccumulation de métaux lourds chez des espèces halieutiques du système lagunaire togolais. *Vertigo*, volume 14 N°2
14. Kerjes, M.P., Maurer, J.R., Trestrail, J.H. (1987). An analysis of arsenic exposures referred to the Blodgett Regional Poison Center. *Vet Human Toxicol*, vol 29 N°1: pp: 75-78.
15. Leblanc, J.C., Volatier, J.L., Sirot V., Nawel B.A. (2006). Etudes des consommations alimentaires de produits de la mer et impregnation aux éléments traces, polluants et omega 3 (CALIPSO), AFSSA, INRA, 127p.
16. Ling-Wei, X., Shao-Xian, L., Ji-Wen 1, Xiao-Juan, Z., Lian L. (1988). Trace element content in drinking water of nasopharyngeal carcinoma patients. *Trace Elem Med*, 5: pp: 93-6.
17. Makhoukh, M., Sbaa, M., Berrahou, A., Vanclooster, M. (2011). Contribution à l'étude de l'impact d'un site minier abandonné dans la haute Moulouya sur la qualité de l'ouest Moulouya. *Afriques Sciences*, 07 (3): pp: 34-48.
18. Miquel G (2001). Les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé. Paris, rapport N° 261 du sénat, avril 2001, 366 p.
19. Miramond, N., Miau, D., Brochard, F., (2006). Diagnostic du Phénomène Drainage Minier Acide (DMA) sur des mines d'or primaire en Guyane françaises. Evaluation des risques associés. Rapport, GEM Impact-DIREN. Guyane française.
20. OMS (2004). Tetrachloroethylene in: Guidelines for Drinking-water Quality, third edition, volume 1.
21. OMS (2005). Evaluation des risques sanitaires liés au dépassement de la limite de qualité du nickel dans les eaux destinées à la consommation humaine, Fiche 12.
22. Perrine, P (2007). Evaluation des risques liés à la consommation des produits de la pêche à pied récréative en basse-normandie. Ecole National de la santé publique.
23. Pétré, M. A. (2008). Etude de la spéciation des métaux dissous en seine, relation avec le pH et la matière organique dissoute. Paris, Université Pierre et Marie Curie, Ecole des mines de Paris et Ecole Nationale du Génie Rural et des eaux et forêts. 46 p.
24. Quenel, P., Bourdillon, F., Brücker, G., Tabuteau, D. (dir) (2004). La santé et l'environnement. Traité de santé publique. Paris : Flammarion
25. Rodier, J., Bazin, C., Broutin, J.P., Chambon, P., Chapsaup, H., Rodi, L. (2009). L'analyse de l'eau : Eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer. Paris, Ed Dunod.
26. Sonnendrucker, P. (1967). Etude de la synthèse sur l'or en Côte d'Ivoire: La région aurifère du pays Dida. SODEMI Rapport 200.
27. Testud, F (2004). Engrais minéraux. EMC Toxicologie, 672p.
28. US EPA (IRIS) (1996). Nickel, soluble salts-reference dose chronic oral exposure. <http://www.epa.gov/ngispgm3/irs/>.
29. Vilaginès, R. (2003). Eau, Environnement et santé publique. Introduction à l'hydrologie. Editions Tec & Doc, 2^{ème} édition, 109p.
30. Yacé, I. (1982). Etude géologique du volcanisme éburnéen dans les parties centrales et méridionales de la chaîne précambrienne de Fettekro (Côte d'Ivoire). Bulletin de la direction des mines.

31. Yapi, Y.H.A., Dongui, B.K, Trokourey, A., Barima, Y.S.S., Essis, Y., Atheba, P. (2014). Evaluation de la pollution métallique des eaux souterraines et de surface dans un environnement minier aurifère à Hiré (Côte d'Ivoire). International Journal of Biological and Chemical Sciences, volume 8 N°3: pp : 1281-1289.
32. Yapi, Y.H.A., Dongui, B.K., Barima, Y.S.S., Atheba, G.P., Trokourey, A. (2014). Speciation of Arsenic, Cadmium, Chrome and Lead in Gold Mining Environment (Côte d'Ivoire): Effect of pH and Redox Potential. Vol 3 issue 6: pp: 641-647.
33. Zheng Y., Wu J., Ng J.C., Wang, G. and Lian W. (2002) - The absorption and excretion of fluoride and arsenic in humans. Toxicol Lett, 133, 1: pp: 77-82.