



HAL
open science

Présence de substances chimiques dans l'eau potable en Haïti : Un axe de recherche en santé environnementale

Alexandra Emmanuel, Evens Emmanuel

► **To cite this version:**

Alexandra Emmanuel, Evens Emmanuel. Présence de substances chimiques dans l'eau potable en Haïti : Un axe de recherche en santé environnementale. Evens Emmanuel et Ketty Balthazard-Accou (Eds). COVID-19, Santé-Environnement, Productivité Scientifique : Regards sur la période du confinement à l'Université Quisqueya, 2021. <hal-05048482>

HAL Id: hal-05048482

<https://hal.science/hal-05048482v1>

Submitted on 28 Apr 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC0 1.0 - Universal - International License

Présence de substances chimiques dans l'eau potable en Haïti : Un axe de recherche en santé environnementale

Alexandra Emmanuel¹ et Evens Emmanuel^{1,2}

¹ Groupe Haïtien d'Études et de Recherche en Environnement et Santé (GHERES), Pétion-Ville, Haïti

² Université Quisqueya, Laboratoire Santé-Environnement (LS-E), Port-au-Prince, Haïti

Résumé

L'environnement géophysique de la République d'Haïti est caractérisé par des phénomènes climatiques hydrologiques et biogéographiques, et un relief marqué par son aspect accidenté. La majeure partie du territoire est occupée par des montagnes formées de calcaire. Les dénivellations sont très marquées. Le morcellement est une autre caractéristique du relief. Ces imperfections environnementales juxtaposées à des conditions socio-économiques difficiles et à des actions anthropiques soulèvent des questions quant à une éventuelle pollution chimique métallique des ressources en eau du pays. En effet, la prédominance du calcaire dans la géologie haïtienne génère une dureté de l'eau, et dans le cas où la concentration en magnésium est inférieure à 7 mg/l, cette eau peut être à l'origine de maladies cardio-vasculaires. Des études menées sur plusieurs points d'eau montrent une dureté totale supérieure à 200 mg/l. À Port-au-Prince, des concentrations de plomb allant de 40 µg/L à 90 µg/L et des risques élevés de Cr (III) ont été mesurés et estimés dans les eaux souterraines et l'eau potable. Des concentrations de fluor allant de 0 à 2 mg/l ont été obtenues à partir de ressources en eau. Des concentrations supérieures à 1,5 mg/l ont été trouvées dans des aquifères alluviaux. Les risques chroniques pour la santé publique, tels que les maladies cardiovasculaires, la détérioration du développement psychologique des enfants, les changements fonctionnels et morphologiques irréversibles des reins et la fluorose dentaire, sont tributaires des ressources en eau d'Haïti. L'exposition aux produits chimiques semble constituer une menace pour la santé publique en Haïti, qu'il convient d'étudier. L'objectif de cette étude est : (i) d'analyser la contribution de la géologie et des actions anthropogéniques dans l'altération de la qualité de l'eau, (ii) d'examiner la toxicologie des produits chimiques détectés dans l'eau distribuée à Port-au-Prince.

Mots-clés : *pollution chimique, eau potable, santé environnementale, géologie médicale, One Health, Haïti*

1. Introduction

L'eau est essentielle au maintien de la vie, mais elle est aussi la source de nombreuses maladies pour les êtres vivants [1]. Avec l'augmentation de la population et le développement des activités industrielles, les ressources en eau de surface et les eaux souterraines sont de plus en plus polluées. L'homme est donc exposé à de nombreuses substances chimiques présentes dans l'eau de boisson.

Plusieurs substances chimiques (organiques et inorganiques) ont été identifiées dans l'eau potable, et les sources de pollution du système d'eau potable sont multiples [2]. Parmi ces polluants, la littérature fait état notamment de sous-produits de désinfection au chlore [3-5], de fluor [6-8], de plomb [9, 10], de chrome [11-13], de cadmium [14, 15], de nitrates [16, 17], de pesticides [18, 19], de dureté [20, 21], d'arsenic [22, 23], etc. La présence de substances chimiques dans l'eau potable municipale est une préoccupation majeure pour la santé. En effet, certaines substances détectées dans l'eau potable ont fait l'objet d'études épidémiologiques [1]. Les effets sur la santé rapportés dans la littérature donnent lieu à différents cas de cancers, à des problèmes de reproduction (malformations) et à des maladies cardiovasculaires et neurologiques. L'eau potable est donc une voie d'exposition importante aux substances chimiques.

Les polluants, en particulier les métaux lourds, sont libérés dans l'environnement à partir d'un large éventail de sources naturelles et anthropiques [24]. Les métaux lourds sont omniprésents dans l'environnement, à des concentrations variables dans l'air, la roche mère, le sol, l'eau et toutes les matières biologiques [25, 26]. Les principales sources anthropiques sont les effluents industriels et urbains, les eaux de ruissellement, les équipements de production et de distribution d'eau potable et les procédés de traitement de l'eau potable [1]. La présence de métaux lourds dans l'environnement constitue une source potentielle de pollution du sol et des eaux souterraines.

En Haïti, les travaux réalisés dans le domaine de la qualité physico-chimique des eaux ont visé des polluants tels que : le plomb, le chrome [27], le fluor [28]. Des concentrations excessives de dureté ont également été observées dans les ressources en eau [29]. Ces concentrations d'origine naturelle s'ajoutent à celles générées par des actions anthropiques, telles que la mauvaise gestion des déchets solides, l'absence de réseaux d'assainissement urbain et de stations d'épuration, qui ne font qu'augmenter le taux d'exposition humaine à ces polluants. Ces expositions aux substances chimiques continuent de mettre en danger les Haïtiens et plusieurs exemples mettent en lumière les réalités de la gestion des risques liés aux produits chimiques toxiques dans les pays en développement [30]. Le fait que le bassin hydrographique de Port-au-Prince soit principalement constitué d'aquifères karstiques [31], les eaux de pluie, polluées par les particules atmosphériques de substances issues des activités industrielles, et les eaux usées urbaines alimentent, à travers la géologie dominante, les eaux souterraines, laissant ainsi supposer que les ressources en eau de cette région soient soumises à une importante pollution chimique.

L'impact sur la santé humaine des matériaux naturels tels que l'eau, les roches et les minéraux est connu depuis des milliers d'années, mais il y a eu peu d'études systématiques et multidisciplinaires sur la relation entre les matériaux et les processus géologiques et la santé humaine (domaine d'étude communément appelé géologie médicale) [32]. Afin de mieux comprendre, dans les zones urbaines et rurales d'Haïti, les différentes voies d'exposition et les causes d'un certain nombre de problèmes de santé environnementale générés par l'exposition à de fortes concentrations de produits chimiques essentiels et non essentiels pour l'organisme qui sont détectés dans l'eau potable, il semble pertinent que les géoscientifiques, les chercheurs en sciences de l'environnement et de la santé, ainsi que les spécialistes de la santé publique associent leurs compétences pour aborder le problème de la pollution de l'eau destinée à la consommation humaine en tenant compte de deux principales sources de dégradation qualitative de l'eau : "les apports géologiques et les actions anthropiques". L'objectif de cette étude est : (i) d'analyser la contribution de la géologie et des actions anthropiques dans l'altération de la qualité de l'eau, (ii) de faire le point sur la toxicologie des substances chimiques détectées dans l'eau distribuée à Port-au-Prince.

2. Géologie médicale et santé environnementale dans le contexte géographique de Port-au-Prince

2.2.1. Santé environnementale et évaluation des risques sanitaires liés aux mélanges chimiques dans l'eau potable.

Au cours des années 1950, des formes d'inquiétude se sont progressivement manifestées face à l'état de dégradation de l'environnement et à ses conséquences néfastes pour la survie des écosystèmes et pour le développement [33]. En effet, depuis cette décennie, la relation environnement-santé humaine est devenue une préoccupation majeure dans le domaine de la santé publique. Les questions des sols contaminés, des émanations des décharges, de la destruction de la couche d'ozone, du réchauffement climatique, de la contamination des aliments, des radiations émises par les appareils ménagers, des nouveaux risques biologiques... font partie des sujets d'intervention des autorités gouvernementales [34].

Abenhaim [35] affirme que "les questions de santé environnementale sont parmi les plus complexes à étudier pour les scientifiques et les plus difficiles à résoudre pour les décideurs politiques. D'abord, parce qu'il est rare que les expositions soient pures, ce qui laisse la place à de nombreux facteurs de confusion. Ensuite, parce que les contaminations sont généralement en quantité relativement faible, à la limite des effets observables. Enfin, parce que les conséquences de l'exposition se produisent souvent à long terme" [35]. L'exposition à des mélanges chimiques est une réalité qui semble dicter la nécessité d'accorder une grande attention à l'identification des dangers, à l'évaluation de l'exposition et à la caractérisation des risques [36], des mélanges dans l'eau destinée à la consommation humaine. Contrairement à cette réalité environnementale, la réalité

toxicologique est que, jusqu'à récemment, la plupart des recherches menées dans ce domaine ont été consacrées à des études sur les effets de substances agissant indépendamment, sans tenir compte des interactions ou des effets combinés entre les polluants à l'intérieur de l'organisme humain [37].

En Haïti, dans tous les travaux réalisés sur le risque sanitaire lié à la pollution de l'eau potable par des substances chimiques, la caractérisation du risque a été faite sur la base des effets indépendants des polluants étudiés. Cette approche fournit des informations sur le niveau d'exposition de la population à une substance mais ne permet pas d'évaluer les interactions entre les différents polluants détectés dans l'eau distribuée. Il est maintenant largement reconnu que l'étude des effets combinés des mélanges chimiques dans l'eau potable fait partie intégrante de la santé publique [37]. La caractérisation des actions combinées des mélanges chimiques pose le problème de la définition de l'effet antagoniste, additif ou synergique. Il est donc important de comprendre la terminologie qui décrit l'effet combiné des agents en termes de mécanisme d'action. Il y a 70 ans, trois concepts de base de l'action commune ou de l'interaction de la combinaison de produits chimiques ont été définis par des biomathématiciens [38-40] et ils sont toujours valables aujourd'hui.

En effet, Bliss [38] a identifié trois modes d'action des constituants d'un mélange vis-à-vis des organismes vivants :

1. "*Action conjointe indépendante*" : dans ce type d'action, les constituants agissent sur des sites d'action différents et la réponse biologique d'un constituant n'est pas influencée par un autre.
2. "*Action conjointe similaire*" : les constituants agissent sur les mêmes sites d'action et la réponse biologique d'un constituant n'est pas influencée par un autre. C'est l'approche la plus utilisée pour l'étude des mélanges.
3. "*Action synergique*" : lorsque la réponse d'un mélange ne peut être connue par les réponses isolées des constituants. La réponse d'un mélange dépend des effets combinés de ses constituants.

Les trois principes de base de l'action commune des polluants sont théoriques. Cependant, ces concepts devront très probablement être abordés en même temps, en particulier lorsque les mélanges sont constitués de plus de deux composés et lorsque les cibles (des individus plutôt que des cellules) sont plus complexes.

Fox et al. [41] considèrent l'évaluation des risques des mélanges chimiques ou l'évaluation des risques cumulatifs (ARC) comme l'étape la plus récente dans l'évolution de l'évaluation. L'USEPA [42,43] définit cette approche comme une analyse, une caractérisation et une éventuelle quantification des risques combinés pour la santé humaine ou l'environnement dus à de multiples substances ou facteurs de stress. Cette définition suggère que l'additivité est le mode d'action initialement accepté pour la mise en œuvre de l'ERC.

L'EPA [44] a mis au point la méthode de l'indice de danger (HI) pour la mise en œuvre de l'évaluation des risques cumulatifs. Cette approche évalue d'abord les effets d'une

substance indépendamment des autres. L'HI est calculé en divisant la concentration d'exposition mesurée ou estimée par la concentration de référence (RfC) :

HI = concentration d'exposition mesurée ou estimée / RfC

Pour HI < 1, la concentration d'exposition est inférieure à la valeur seuil et n'a aucun effet sur la santé. En revanche, pour HI ≥ 1, la concentration d'exposition dépasse la valeur seuil, et il est recommandé de poursuivre les recherches sur les effets du polluant sur la santé, en calculant la métrique de danger HM.

HM = Concentration d'exposition mesurée ou estimée / NOAEL ou LOAEL ajusté

Sur la base de l'action additive des polluants, l'application du modèle HI ou HM pour évaluer la concentration de l'exposition due aux mélanges chimiques peut également être exprimée :

$$LCE = \frac{C_1}{M_1} + \frac{C_2}{M_2} + \frac{C_n}{M_n} \leq 1 \quad \text{Eq. 1}$$

LCE : Limite de la concentration d'exposition

C1, C2 et Cn : concentrations observées.

M : Concentration maximale acceptable (valeur seuil)

Dans les unités de distribution où la chloration est appliquée à une eau brute riche en matière organique, une situation ou un processus assez courant en Haïti, les populations desservies sont exposées à un certain nombre de substances chimiques (par exemple les sous-produits de désinfection (SPD)), très connues pour leurs effets néfastes sur la santé humaine, notamment la survenue de cancers [45, 46]. En l'absence de normes nationales pour la qualité de l'eau potable, Haïti applique les lignes directrices de l'Organisation mondiale de la santé. L'application du modèle HI ou HM dans l'évaluation des effets combinés des sous-produits pourrait être, de manière simplifiée, réalisée à partir de :

$$THMs = \frac{EcCHBr_3}{TS_{WHO}CHBr_3} + \frac{EcCHBr_2Cl}{TS_{WHO}CHBr_2Cl} + \frac{EcCHBrCl_2}{TS_{WHO}CHBrCl_2} + \frac{EcCHCl_3}{TS_{WHO}CHCl_3} < 1 \quad \text{Eq. 2}$$

THM : Trihalométhanes

CE : concentration d'exposition

CHBr3 : Bromoforme

CHBr2Cl : Chlodibromométhane

CHBrCl₂ : Bromodichlorométhane

CHCl₃ : Chloroforme

TSWHO : Valeur seuil de l'OMS

Différents types de mélanges complexes nécessitent différentes approches, et l'utilité d'une certaine approche dépend du contexte dans lequel on est confronté à un mélange, et de la quantité, du type et de la qualité des données disponibles sur la chimie et la toxicité du mélange [47]. La littérature scientifique rapporte la présence de plusieurs substances détectées dans l'eau potable en Haïti [26, 27, 28, 29]. De plus, le MSPP et l'OMS [48] notent "la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine ne fait l'objet d'aucun contrôle. Dans un tel contexte, l'étude des effets combinés de plusieurs substances chimiques dans l'eau de boisson et l'évaluation des risques générés pour la santé humaine constituent un thème important de recherche transdisciplinaire en santé publique.

2.2.2. Géologie médicale et approche ONE HEALTH dans l'évaluation des risques sanitaires de l'eau potable en Haïti.

Située entre 18° et 20°6' de latitude Nord et entre 71°20' et 74°30' de longitude Ouest, Haïti partage avec la République Dominicaine "l'île d'Hispaniola" qui est la deuxième plus grande île des Caraïbes. Sa capitale, Port-au-Prince, est située au fond du golfe de La Gonâve, en bordure sud de la plaine du Cul-de-sac et au nord du bassin versant du Massif de la Selle (Figure 1). Les principales municipalités qui constituent la communauté urbaine de Port-au-Prince sont Port-au-Prince, Delmas, Pétion-ville, Croix-des-bouquets, Gressier et Carrefour.

Haïti est exposé à un déséquilibre écologique considérable, caractérisé par des inondations catastrophiques associées à des pluies torrentielles et des ouragans, des tremblements de terre dévastateurs, et la déforestation [49]. D'autres problèmes, résultant de ce déséquilibre, incluent l'utilisation des terres formant le périmètre immédiat des sources et des puits, l'assèchement des zones humides, l'érosion des sols arables, la diminution du débit des sources et des eaux souterraines, l'intrusion de l'eau de mer, l'obstruction des égouts et la pollution fécale [50]. En outre, Haïti est l'un des pays les plus vulnérables au changement climatique [51]. De manière générale, l'environnement géophysique d'Haïti est caractérisé par un relief accidenté. La majeure partie du territoire est occupée par des montagnes formées de calcaire et d'aquifères karstiques [31], [52-54]. L'existence d'aquifères karstiques conditionne par temps de pluie la contamination des eaux souterraines par des pollutions de surface. En effet, les principales caractéristiques des aquifères karstiques sont l'existence de réseaux irréguliers de pores, de fissures, de fractures et de conduits de formes et de tailles variées. Une telle structure, d'une hétérogénéité physique et géométrique importante, entraîne des conditions hydrauliques complexes et la variabilité spatiale et temporelle des paramètres

hydrauliques. Après une averse, une recharge rapide et turbulente des eaux souterraines se produit par drainage dans de grands conduits avec un volume élevé d'eau non filtrée [55].

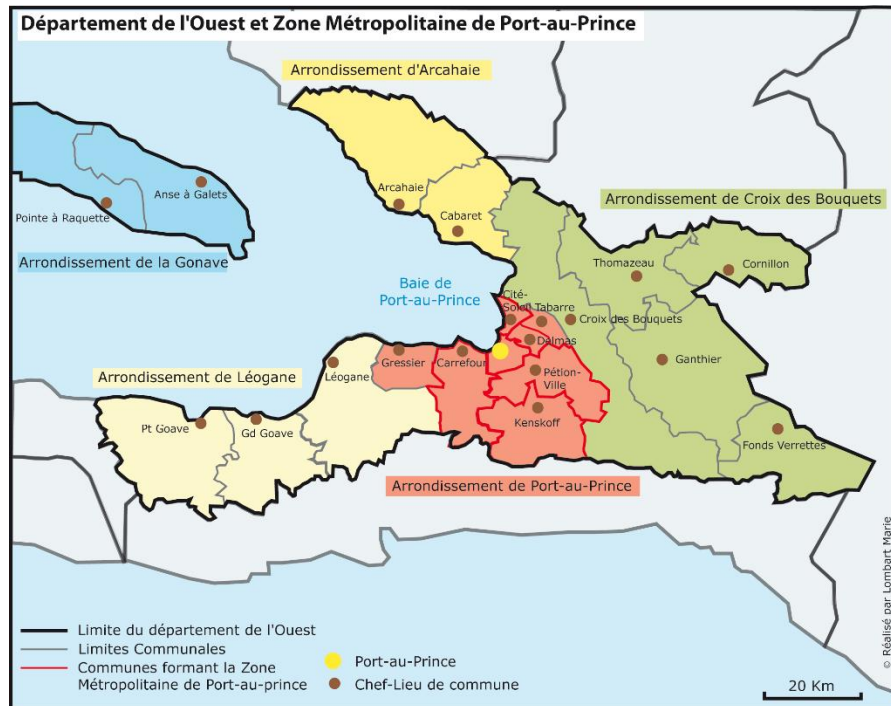


Figure 1 : Carte du département de l'Ouest d'Haïti et de la zone métropolitaine de Port-au-Prince [56]

Les ressources en eau souterraine à Port-au-Prince sont vulnérables à la contamination liée à l'infiltration d'eaux polluées telles que les lixiviats, les fosses septiques, les eaux de ruissellement, les rejets d'huiles usées, la sur-irrigation et les rejets industriels [49]. Ces sources de recharge des eaux souterraines peuvent contenir des composés organiques et inorganiques qui peuvent être sous forme dissoute et colloïdale ou associés à des particules. La caractérisation microbiologique et physico-chimique des ressources en eau souterraine dans la zone métropolitaine de Port-au-Prince met en évidence, entre autres, la présence de métaux lourds [57], de coliformes fécaux [27] et d'oocystes de *Cryptosporidium* [58]. En plus des contaminations bactériennes et métalliques, il a été constaté que les aquifères en Haïti sont également exposés à la pollution de l'eau de mer [49]. Selon Gonfiantini et Simonot [59], l'eau salée est légèrement enrichie en isotopes lourds par rapport à l'eau douce souterraine, ne montrant aucune déviation par rapport à la ligne droite des eaux météoriques. Dans la région de Port-au-Prince, la salinité des eaux souterraines est le résultat d'une intrusion d'eau de mer due à une exploitation intensive [59].

L'environnement géophysique de Port-au-Prince, l'inefficacité du système d'assainissement (collecte et traitement des déchets solides, drainage et traitement des eaux usées, etc.), qui contribuent à la qualité microbiologique et physico-chimique de

l'eau distribuée par les réseaux publics à la population, donnent lieu à un environnement épidémiologique particulier où l'eau génère plusieurs dangers pour la santé des consommateurs. Dans un tel contexte, l'évaluation et la gestion des risques sanitaires associés aux eaux destinées à la consommation humaine nécessitent une approche pluridisciplinaire et font appel à des chercheurs, des techniciens et des spécialistes dans plusieurs domaines des sciences de la vie et de la terre ainsi que des sciences humaines et sociales.

L'Agenda 2030 pour le développement durable de l'Organisation des Nations unies (ONU) établit des objectifs et des cibles dans des domaines d'importance critique pour l'humanité [60-62]. En effet, les ODD sont liés les uns aux autres, la réussite de l'un dépendant souvent de la résolution de problèmes généralement associés à un autre objectif [60]. Ils constituent donc une approche universelle et transversale concernant tous les pays, au Nord comme au Sud. Concernant la question de l'eau, l'objectif 6 - accès à l'eau potable et à l'assainissement - vise à répondre aux défis de l'eau potable, de l'assainissement et de l'hygiène pour les populations, ainsi qu'aux enjeux concernant les écosystèmes aquatiques. En l'absence de ressources en eau et d'assainissement de qualité et durables, les progrès dans plusieurs autres domaines des Objectifs de développement durable, notamment la santé, l'éducation et la réduction de la pauvreté, seront également retardés [60]. Cet objectif, pris au prisme de la situation du contexte urbain et hydrologique, ainsi que de l'environnement géophysique d'Haïti, suscite des inquiétudes. Cependant, le lancement par les autorités publiques et les agences de financement de grands programmes de recherche ayant pour objectif de générer et d'appliquer des connaissances, de promouvoir des innovations dans les sciences de la vie et de la terre, ainsi que dans les sciences humaines et sociales, dans un contexte de transdisciplinarité serait d'une grande utilité, voire indispensable au développement pour atteindre les différents objectifs [63]. En effet, la géologie médicale, la science qui traite de la relation entre les facteurs géologiques naturels et les problèmes de santé humaine et animale [32], et l'approche One Health, une approche qui tente de rassembler les chercheurs en médecine / santé publique, les chercheurs vétérinaires et les scientifiques de l'environnement pour s'attaquer aux problèmes de santé, fournit un cadre théorique adéquat pour aborder les problèmes de santé environnementale résultant de la dégradation de l'environnement naturel à Port-au-Prince.

L'interconnexion de la santé humaine, animale et environnementale est au cœur de l'approche "Une seule santé", un prisme de plus en plus important à travers lequel les gouvernements, les ONG (organisations non gouvernementales) et les praticiens envisagent la santé humaine [64]. Mazet et al. [65] notent : "Une implication importante de l'approche One Health est que les interventions politiques intégrées qui s'attaquent simultanément et de manière holistique aux causes multiples et interdépendantes d'une mauvaise santé humaine - eau insalubre et rare, manque d'assainissement, insécurité alimentaire et proximité entre les animaux et les humains - auront des effets bénéfiques sur la santé beaucoup plus importants que les politiques qui ciblent chacun de ces

facteurs individuellement et de manière isolée". Par sa nature même, l'approche One Health est transdisciplinaire, puisqu'elle repose sur des agronomes, des anthropologues, des économistes, des éducateurs, des ingénieurs, des entomologistes, des épidémiologistes, des hydrologues, des microbiologistes, des nutritionnistes, des médecins, des professionnels de la santé publique, des sociologues et des vétérinaires qui travaillent en collaboration pour améliorer et promouvoir la santé humaine et animale" [65].

3. Chimie et toxicologie de certains polluants détectés dans l'eau distribuée à Port-au-Prince.

3.3.1. Présence de fluor dans l'eau de boisson et risque pour la santé humaine

Le fluor, 13^{ème} élément le plus abondant dans la croûte terrestre, est essentiel à la vie humaine [66]. Le fluor élémentaire n'est presque jamais présent dans la nature, mais le fluorure est largement distribué dans la croûte terrestre, principalement sous forme de fluorine, cryolithe, apatite, mica, hornblende et fluorine [67-68].

Le fluor participe à la formation des os et des dents et contribue à leur solidification. Il pénètre dans l'organisme sous forme de fluorures par le biais de l'eau potable, des aliments, de l'air, des médicaments et des produits cosmétiques. Il est connu pour avoir des effets bénéfiques et néfastes sur l'homme [69]. En effet, sa carence est depuis longtemps liée à l'incidence des caries dentaires [70], tandis qu'un apport excessif prolongé a été associé à la fluorose [71]. De vastes populations dans certaines parties du monde en développement souffrent des effets de la fluorose endémique chronique [70].

La source la plus importante d'apport en fluor dans le corps humain est l'eau potable [72]. Selon l'OMS [73], la valeur recommandée pour le fluor dans l'eau de boisson est de 1,5 mg/L, en raison du risque croissant de fluorose dentaire à des concentrations plus élevées et du fait que des niveaux progressivement plus élevés conduisent à des risques croissants de fluorose squelettique. Cette valeur est plus élevée que celle recommandée pour la fluoration artificielle des réserves d'eau pour la prévention des caries dentaires, qui est généralement de 0,5 à 1,0 mg/L. L'OMS [74] recommande aux États membres de tenir compte de la consommation d'eau de boisson et de l'apport de fluorure provenant d'autres sources lorsqu'ils fixent une norme. Néanmoins, une teneur de 1 mg/l d'ions fluorure est approximativement la concentration souhaitable dans l'eau fournie à la population pour assurer une santé dentaire optimale [75]. Cependant, plusieurs facteurs, dont la température, peuvent influencer cette valeur optimale qui varie d'une région climatique à l'autre.

Il est donc important de déterminer cette dose optimale pour chaque région selon qu'elle se trouve en zone tempérée ou en zone tropicale [76]. Dean [77] a montré que la concentration optimale de fluor en fonction de la température ambiante est de 1,0-1,2 mg/l.

La dose optimale de fluor dans l'eau de boisson est définie comme la quantité de fluor qui diminue la prévalence des caries dentaires en l'absence de fluorose significative] [78-80]. La fluorose est la déminéralisation de l'émail dentaire par ingestion excessive de fluorure pendant les années de calcification de la dent [81]. Ce phénomène, observé chez les enfants, peut aller d'une fluorose légère à une manifestation sévère. En effet, Dean, [78] a observé que 10% des enfants consommant de l'eau contenant 1,0 mg/l de fluorure pouvaient développer une fluorose bénigne. Il est rapporté dans la littérature que les enfants vivant dans le sud-ouest des Etats-Unis développent une fluorose sévère, beaucoup plus importante que ceux vivant dans le midwest, alors que les deux groupes sont exposés à des systèmes d'approvisionnement en eau contenant la même concentration de fluor [82]. D'autres études ont suggéré que la température extrêmement élevée du sud-ouest est un facteur majeur contribuant à l'augmentation de la demande en eau potable et à l'augmentation de la fluorose dentaire sévère et endémique [80, 81, 82].

En Haïti, des études réalisées sur les ressources en eau de la région hydrographique Centre-Sud d'Haïti (Figure 2), ont révélé des concentrations en fluor comprises entre 0 et 2 mg/l [83],[28]. Les différentes localités de cette région sont exposées à une température moyenne journalière variant de 17 à 36°C.

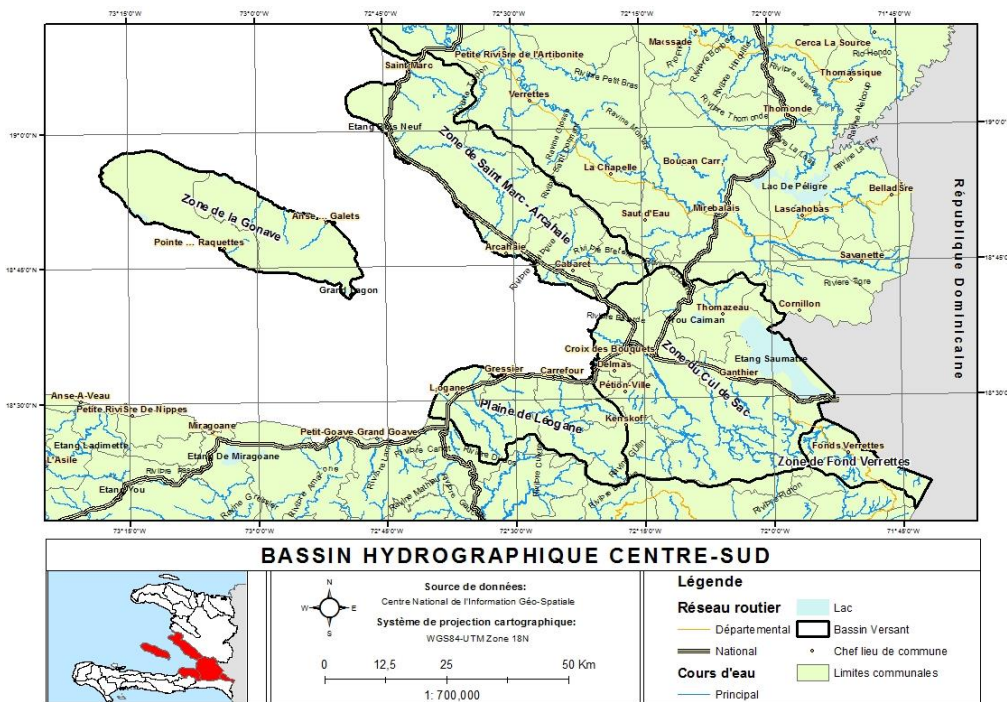


Figure 2 : Carte de la région hydrographique "Centre-Sud" d'Haïti

Ces observations conduisent d'une part à s'interroger sur les problèmes de caries dentaires et de fluorose dont peuvent souffrir les populations des zones étudiées et, d'autre part, à déterminer la dose optimale de fluor dans l'eau destinée à la consommation

humaine. de la région hydrographique Centre-Sud de la République d'Haïti. L'exposition au fluor est un problème majeur de santé publique, en particulier pour les enfants. En effet, l'ingestion d'eau à forte concentration en fluor pendant les phases de croissance et de développement de l'enfant a été associée à des problèmes mentaux et physiques [84-86].

3.3.1. Dureté de l'eau et santé humaine

La dureté est la mesure traditionnelle de la capacité de l'eau à réagir avec le savon et décrit la capacité de l'eau à lier le savon pour former de la mousse, une réaction chimique préjudiciable au processus de lavage [87]. La dureté de l'eau résulte du contact des eaux souterraines avec les formations rocheuses. Elle correspond à la somme des concentrations d'ions métalliques polyvalents dissous, dont $\text{Ca}^{(2+)}$ et $\text{Mg}^{(2+)}$ sont prédominants. Les sources d'ions métalliques sont généralement des roches sédimentaires, dont les plus courantes sont le calcaire (CaCO_3) et la dolomie ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) [66].

Le Ca et le Mg sont présents sous forme d'ions simples $\text{Ca}^{(2+)}$ et Mg^{2+} avec des niveaux de Ca variant de dizaines à des centaines de mg/L et des concentrations de Mg variant d'unités de dizaines de mg/L [88]. Le magnésium est nettement moins abondant que le calcium dans les roches et dans la plupart des eaux naturelles. En outre, les concentrations de magnésium dans l'eau sont beaucoup plus faibles que celles du calcium. Elles sont généralement inférieures à 50 mg/L, bien que des valeurs supérieures ou égales à 100 mg/L soient stockées en particulier dans les climats froids [87].

La dureté (en mg équivalent CaCO_3/L) peut être déterminée en substituant la concentration de calcium et de magnésium, exprimée en mg/L, dans l'équation suivante [89] :

$$\text{Dureté totale} = 2,497 (\text{Ca}^{(2+)}, \text{mg/L}) + 4,118 (\text{Mg}^{(2+)}, \text{mg/L}) \quad \text{Eq. 3}$$

Chaque concentration est multipliée par le rapport entre le poids de la formule de CaCO_3 et le poids atomique de l'ion ; ainsi, les facteurs 2,497 et 4,118 sont inclus dans la relation de dureté [89].

La dureté est le plus souvent exprimée en milligrammes d'équivalent carbonate de calcium par litre [90]. L'eau contenant du carbonate de calcium à des concentrations inférieures à 60 mg/l est généralement considérée comme douce ; 60-120 mg/l, modérément dure ; 120-180 mg/l, dure ; et plus de 180 mg/l, extrêmement dure [91]. Bien que la dureté soit causée par des cations, elle peut également être discutée en termes de dureté carbonatée (temporaire) et non carbonatée (permanente) [90].

Le calcium et le magnésium sont essentiels pour le corps humain [90]. Ils contribuent à la formation et à la solidification des os et des dents et jouent un rôle dans la diminution de l'excitabilité neuromusculaire, du système myocardique, du cœur et de la contractilité

musculaire, de l'information intracellulaire, de la transmission et de la contractilité sanguine [92], [87-88]. Ils jouent également un rôle majeur dans le métabolisme de presque toutes les cellules de l'organisme et interagissent avec de nombreux nutriments [93]. Cependant, un apport insuffisant ou excessif de l'un ou l'autre de ces nutriments peut avoir des conséquences néfastes sur la santé [90].

Selon l'OMS [90] "*Des apports insuffisants en calcium ont été associés à des risques accrus d'ostéoporose, de néphrolithiase (calculs rénaux), de cancer colorectal, d'hypertension et d'accident vasculaire cérébral, de maladie coronarienne, de résistance à l'insuline et d'obésité. La plupart de ces troubles peuvent être traités, mais pas guéris. En l'absence de preuves irréfutables du rôle du calcium en tant qu'élément contribuant à ces maladies, les besoins en calcium ont été estimés sur la base des résultats en matière de santé osseuse, dans le but d'optimiser la densité minérale osseuse.*

Dans une large mesure, les individus sont protégés des apports excessifs de calcium par un mécanisme d'absorption et d'élimination intestinale étroitement régulé par l'action de la 1,25-dihydroxyvitamine D, la forme hormonale active de la vitamine D. Lorsque l'absorption de calcium est supérieure aux besoins, l'excès est excrété par les reins chez les personnes en bonne santé qui ne présentent pas d'insuffisance rénale" [90].

Le magnésium est le quatrième cation le plus abondant dans l'organisme et le deuxième cation le plus abondant dans le liquide intracellulaire [90]. Dans le système cardiovasculaire, le magnésium est l'élément candidat. Il joue un rôle important en tant que cofacteur et activateur de plus de 300 réactions enzymatiques dont la glycolyse, le métabolisme de l'ATP, le transport d'éléments tels que Na, K et Ca à travers les membranes, la synthèse des protéines et des acides nucléiques, l'excitabilité neuromusculaire et la contraction musculaire [94]. Cela peut intervenir dans différents mécanismes dont le principal est l'effet antagoniste du calcium qui peut être direct ou indirect [95].

De faibles niveaux de magnésium sont associés à un dysfonctionnement endothélial, à une augmentation des réactions vasculaires, à des niveaux élevés de protéine C-réactive (un marqueur pro-inflammatoire qui est un facteur de risque de maladie coronarienne) et à une diminution de la sensibilité à l'insuline. Un faible taux de magnésium a été impliqué dans l'hypertension, les maladies coronariennes, le diabète de type 2 et le syndrome métabolique. La carence en magnésium a été impliquée dans la pathogenèse de l'hypertension, certaines études épidémiologiques et expérimentales démontrant une corrélation négative entre la pression artérielle et les niveaux de magnésium sérique. Toutefois, les données issues d'études cliniques sont moins convaincantes [90].

En effet, la dureté de l'eau est devenue un problème de santé publique important [96]. Kobayaski [97] a montré une relation entre la dureté de l'eau et l'incidence des maladies vasculaires. La littérature scientifique a rapporté l'existence d'une relation entre la mortalité par maladie cardiovasculaire et la dureté de l'eau [98-99], [100]. Miyake et Iki [101] ont observé une absence d'association entre la dureté de l'eau et la mortalité due aux maladies coronariennes au Japon. Néanmoins, de nombreuses études couvrant de

nombreux pays suggèrent une telle corrélation et, d'un point de vue géochimique, elle mérite d'être étudiée sérieusement [88]. Sur la base des informations disponibles dans la littérature sur l'association entre la dureté de l'eau et l'incidence des maladies cardiovasculaires (MCV), Eisenberg [102] a considéré que le Mg semble être l'élément de base. En effet, une eau naturelle extrêmement dure avec une concentration en CaCO₃ supérieure à 200 mg/l et une concentration en magnésium inférieure à 7 mg/l peut affecter différents organes dont la physiologie cardiovasculaire [87].

En Haïti, des études sur les eaux de source utilisées pour alimenter une partie de la population de la zone métropolitaine de Port-au-Prince (MAPP), la plus importante zone urbaine du pays, ont montré une dureté totale supérieure à 200 mg/l, avec une concentration en magnésium inférieure à 7 mg/l [29]. Par ailleurs, des concentrations en magnésium allant de 5,58 à 6,9 mg/l ont été mesurées dans les eaux souterraines de la zone métropolitaine de Port-au-Prince [103]. Boire de l'eau pauvre en Mg augmente significativement la probabilité de mortalité cardiovasculaire [104]. Catling et al. [105] ont trouvé des preuves significatives d'une association inverse entre les niveaux de magnésium dans l'eau potable et la mortalité cardiovasculaire à la suite d'une méta-analyse d'études cas-témoins. En Haïti, les maladies cardiovasculaires (MCV) sont désormais la principale cause de mortalité chez les adultes [106-107].

3.3.1. Pollution des eaux souterraines par les métaux lourds et santé humaine

Les métaux sont des constituants naturels de la croûte terrestre. La distribution et le devenir des métaux dans l'environnement sont régis par leurs propriétés et l'influence des facteurs environnementaux [108]. Dans les compartiments environnementaux, les métaux lourds constituent une préoccupation écologique et de santé humaine car les métaux lourds ne sont pas dégradés biologiquement comme certains polluants organiques [109]. Les métaux exercent des effets biologiques qui peuvent être bénéfiques ou nocifs. De nombreux métaux tels que le Fe, le Cu, le Co, le Mn, le Zn et le Cr sont essentiels pour l'homme, et des états de carence accompagnés d'anomalies cliniques ont été identifiés [110, 108, 27]. D'autres métaux tels que le Hg, le Pb, le Cd et l'As ne sont pas connus pour être essentiels pour les animaux [110]. Les éléments essentiels peuvent également avoir des effets toxiques à des doses élevées.

En Haïti, des métaux lourds (plomb, chrome et nickel) ont été mesurés dans les eaux souterraines [27].

a. Effets du chrome sur la santé humaine

Le chrome est l'un des métaux lourds considérés comme un polluant majeur. Il a été largement utilisé dans les processus industriels pour le tannage du cuir, la préparation des teintures et des peintures, la fabrication des textiles, les papeteries, la préservation du bois, la production d'acier inoxydable et la photographie [111]. Le chrome existe dans plusieurs états d'oxydation. Les formes les plus stables et les plus courantes sont le

chrome trivalent, Cr(III), et le chrome hexavalent, Cr(VI), qui présentent des propriétés biochimiques et une toxicocinétique différentes [112-113]. Les composés de Cr(III) sont naturellement présents sous forme d'oxydes, d'hydroxydes ou de sulfates et sont nécessaires à la nutrition humaine pour le métabolisme du glucose, des graisses et des protéines [114]. En revanche, les composés de Cr(VI) sont principalement d'origine anthropique et hautement toxique ; leur nature mutagène et cancérigène et leur état d'oxydation élevé renforcent leur capacité à pénétrer dans les cellules vivantes [114]. L'interchangeabilité du Cr(III) et du Cr(VI) dépend de leur concentration en solution, du pH, du potentiel d'oxydoréduction (Eh) du milieu et de la présence ou de l'absence d'un oxydant ou d'un réducteur puissant [115], [111].

La toxicité du chrome dépend directement de son état de valence, le chromate hexavalent Cr(VI) et le chromate trivalent Cr(III) étant les plus intéressants [112]. La biodisponibilité orale varie en fonction de l'état de valence, le Cr(VI) étant plus facilement absorbé. Le Cr(VI) peut être décomposé en Cr(III) dans l'environnement acide de l'estomac [111]. L'exposition aiguë au chrome se traduit par une irritation immédiate des yeux, du nez, de la gorge et des voies respiratoires, qui se traduit par une sensation de brûlure, une congestion, une épistaxis et une toux. L'ulcération, le saignement et l'érosion de la cloison nasale sont le signe d'une exposition chronique. La toux, les douleurs thoraciques, la dyspnée et l'asthme induit par le chrome indiquent une exposition à des produits solubles à base de chrome [113]. Si une exposition chronique est suspectée, en conjonction avec une perte de poids, une toux et une hémoptysie, cela suggère le développement d'un carcinome bronchogénique. Les manifestations dermatologiques comprennent des ulcérations indolores et à cicatrisation lente des doigts, des articulations et des avant-bras. L'ingestion est marquée par des nausées, des vomissements, des douleurs abdominales, une prostration et la mort associée à l'urémie [114].

b. Effets du plomb sur la santé humaine

L'eau potable est l'une des principales sources d'exposition humaine au plomb [115]. Le plomb cible particulièrement le système nerveux, le sang et les reins [116]. De nombreuses études ont trouvé des associations entre l'exposition environnementale au Pb à faible niveau et la maladie rénale chronique, un terme général pour des troubles hétérogènes affectant la structure et la fonction des reins (CKD) [117-118]. L'exposition au plomb à long terme peut générer des changements rénaux fonctionnels et morphologiques irréversibles [119], une neuropathie motrice distale et éventuellement des crises d'épilepsie et le coma [120]. Les nourrissons et les jeunes enfants sont plus sensibles aux effets du plomb, qui est en outre transporté par le placenta jusqu'au fœtus [121]. L'accumulation de plomb chez le fœtus et le jeune enfant peut entraîner des perturbations du développement en termes de déficience neurologique caractérisée par une diminution des facultés cognitives, réversible ou non, évaluée par des tests psychomoteurs tels que le test de QI (Quotient Intellectuel) verbal [109, 27]. La période où le QI est le plus affecté s'étend de la naissance à environ 4 ans [122].

La littérature scientifique sur la pollution de l'eau par le plomb indique que "le plomb reste un problème dans l'eau potable dans de nombreuses régions du monde, des millions de propriétés étant desservies par des systèmes de distribution contenant des composants en plomb. Des liens étroits ont été établis entre l'exposition humaine au plomb et les effets sur la santé des adultes et des enfants. En conséquence, les niveaux autorisés de plomb dans l'eau potable ont généralement été abaissés. La mise en œuvre de ces réglementations est difficile avec les contrôles disponibles. Les recommandations futures pour aspirer à une absence totale de plomb dans l'eau potable sont les suivantes : (i) améliorer l'échantillonnage, la surveillance et la modélisation ; (ii) élargir l'application des dispositifs à court terme au point d'utilisation ; (iii) remplacer tous les tuyaux en plomb et la plomberie par des réglementations applicables et une sensibilisation accrue du public" [123 -126].

c. Effets du Nickel sur la santé humaine

Le nickel est insoluble dans l'eau. Cependant, lorsqu'il est sous forme de particules exceptionnellement fines, il s'ionise sous forme de Ni (II) dans l'eau et dans les fluides corporels tels que le sang. Lors d'une exposition orale, les principaux effets observés sont la mort d'un enfant après l'ingestion de 570 mg de nickel/kg [127] et des troubles intestinaux tels que nausées, crampes abdominales et diarrhées [128]. Des effets immunologiques, hématologiques, hépatiques, rénaux, génotoxiques sur le développement embryonnaire et la reproduction ont été rapportés en fonction de la voie de pénétration dans l'organisme [129].

Conclusion

L'objectif de cette étude est : (i) d'analyser la contribution des facteurs géologiques et des actions anthropogéniques dans l'altération de la qualité de l'eau à Port-au-Prince. La toxicologie des produits chimiques de trois métaux lourds (chrome, plomb et nickel) et du fluorure, substances détectées dans les eaux souterraines et l'eau du robinet, a été examinée. Les informations disponibles sur les effets des métaux lourds sélectionnés mettent en évidence les risques chimiques majeurs, notamment pour les enfants, liés au Pb (II), Cr (III), Cr (VI) et Ni (II) contenus dans les eaux souterraines ont également été caractérisés. Le niveau de pollution des ressources en eau souterraine dans la zone métropolitaine de Port-au-Prince ne nécessite pas seulement l'application d'une approche basée sur des procédés de traitement de l'eau. Il traduit également la nécessité d'aborder la question de la qualité des eaux destinées à la consommation humaine dans cet espace urbain à partir d'une approche transdisciplinaire basée sur les théories de la géologie médicale et l'approche One Health. En effet, le niveau de pollution organique et minérale de ces ressources peut compromettre les rares efforts consentis pour atteindre les ODD, plus particulièrement les 3, 6, 11, 13. Les résultats disponibles dans la littérature et utilisés dans le cadre de ce travail indiquent clairement l'existence de toxicités chroniques des métaux lourds à l'état de traces (Cr, Pb, Ni), du fluor et de la dureté de l'eau de boisson sur l'organisme humain et sur les tissus rénaux. Dans le futur, il sera nécessaire d'initier des travaux de recherche sur les effets combinés de ces substances à partir

d'observations sur des animaux de laboratoire et de procéder ensuite à des modélisations pour enfin arriver à comprendre certaines interactions qui peuvent exister entre ces polluants.

Références

1. Kılıç, Z. (2020). L'importance de l'eau et l'utilisation consciente de l'eau. *Int J Hydro*. 4(5):239-241. DOI: 10.15406/ijh.2020.04.00250
2. Calderon R. L. (2000). L'épidémiologie des contaminants chimiques de l'eau potable. *Food and chemical toxicology*, 38, S13-S20. [https://doi.org/10.1016/S0278-6915\(99\)](https://doi.org/10.1016/S0278-6915(99))
3. Ghernaout, D. et Elboughdiri, N. (2020). Les sous-produits de désinfection : Presence and Elimination in Drinking Water. *Open Access Library Journal*, 7(2), 1-27. [https://doi.org/10.1016/S0278-6915\(99\)](https://doi.org/10.1016/S0278-6915(99))
4. Hamidin, N., Yu, Q. J. et Connell, D. W. (2008). Human health risk assessment of chlorinated disinfection by-products in drinking water using a probabilistic approach. *Water research*, 42(13), 3263-3274. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.02.029>
5. Krasner, S. W., McGuire, M. J., Jacangelo, J. G., Patania, N. L., Reagan, K. M., & Aietta, E. M. (1989). The occurrence of disinfection by-products in US drinking water. *Journal-American Water Works Association*, 81(8), 41-53. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1989.tb03258.x>
6. Fuge, R., Andrews, M.J. (1988). Fluorine in the UK environment. *Environ Geochem Health* 10, 96-104. <https://doi.org/10.1007/BF01758677>
7. Pitter, P. (1985). Formes d'apparition du fluor dans l'eau potable. *Water Research*, 19(3), 281-284. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(85\)90086-7](https://doi.org/10.1016/0043-1354(85)90086-7)
8. Deshmukh, A. N., Wadaskar, P. M. et Malpe, D. B. (1995). Fluor in environment : A review. *Gondwana Geol. Mag*, 9, 1-20.
9. Levallois, P., Barn, P., Valcke, M., Gauvin, D., & Kosatsky, T. (2018). Conséquences pour la santé publique de la présence de plomb dans l'eau potable. *Rapports actuels sur la santé environnementale*, 5(2), 255-262. <https://doi.org/10.1007/s40572-018-0193-0>
10. Hayes, C. R. et Skubala, N. D. (2009). Le plomb dans l'eau potable pose-t-il encore un problème dans l'Union européenne ? *Journal of Water and Health*, 7(4), 569-580. <https://doi.org/10.2166/wh.2009.110>
11. Groupe EFSA sur les contaminants de la chaîne alimentaire (CONTAM). (2014). Avis scientifique sur les risques pour la santé publique liés à la présence de chrome dans les aliments et l'eau potable. *Journal de l'EFSA*, 12(3), 3595.

12. Zhitkovich, A. (2011). Chrome dans l'eau potable : sources, métabolisme et risques de cancer. *Chemical research in toxicology*, 24(10), 1617-1629. [dx.doi.org/10.1021/tx200251t](https://doi.org/10.1021/tx200251t)
13. Organisation mondiale de la santé. (2020). Le chrome dans l'eau de boisson (No. WHO/HEP/ECH/WSH/2020.3). Organisation mondiale de la santé.
14. Schroeder, H. A. et Vinton JR, W. H. (1962). Hypertension induite chez les rats par de petites doses de cadmium. *American Journal of Physiology-Legacy Content*, 202(3), 515-518. <https://doi.org/10.1152/ajplegacy.1962.202.3.515>
15. Gonzalez, S., Lopez-Roldan, R. et Cortina, J. L. (2013). Presence of metals in drinking water distribution networks due to pipe material leaching : a review. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 95(6), 870-889. <https://doi.org/10.1080/02772248.2013.840372>
16. Kumar, M. et Puri, A. (2012). A review of permissible limits of drinking water. *Indian journal of occupational and environmental medicine*, 16(1), 40. DOI : 10.4103/0019-5278.99696
17. Giammarino, M. et Quatto, P. (2015). Nitrates in drinking water : relationship with intensive livestock production. *Journal of preventive medicine and hygiene*, 56(4), E187.
18. Sjerps, R. M., Kooij, P. J., van Loon, A., & Van Wezel, A. P. (2019). Occurrence des pesticides dans les sources d'eau potable néerlandaises. *Chemosphere*, 235, 510-518. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.06.207>
19. Griffini, O., Bao, M. L., Barbieri, C., Burrini, D. et Pantani, F. (1997). Occurrence of pesticides in the Arno river and in potable water-a survey of the period 1992-1995. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 59(2), 202-209.
20. Wasana, H. M., Aluthpatabendi, D., Kularatne, W. M. T. D., Wijekoon, P., Weerasooriya, R., & Bandara, J. (2016). Qualité de l'eau potable et maladie rénale chronique d'étiologie inconnue (CKDu) : effets synergiques du fluorure, du cadmium et de la dureté de l'eau. *Environmental geochemistry and health*, 38(1), 157-168. DOI 10.1007/s10653-015-9699-7
21. Wasana, H. M., Perera, G. D., Gunawardena, P. D. S., Fernando, P. S., & Bandara, J. (2017). Normes de qualité de l'eau de l'OMS Vs Effet(s) synergique(s) du fluorure, des métaux lourds et de la dureté de l'eau potable sur les tissus rénaux. *Scientific Reports*, 7(1), 1-6. DOI : 10.1038/srep42516
22. Brown, K. G. et Ross, G. L. (2002). Arsenic, drinking water, and health : a position paper of the American Council on Science and Health. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 36(2), 162-174. <https://doi.org/10.1006/rtph.2002.1573>
23. He, J. et Charlet, L. (2013). A review of arsenic presence in China drinking water (Examen de la présence d'arsenic dans l'eau potable en Chine). *Journal of hydrology*, 492, 79-88. <http://dx.>

24. Nriagu, J. O. (1988). A silent epidemic of environmental metal poisoning ? *Environmental pollution*, 50(1-2), 139-161.
25. Bowen, H. J. M. (1979). *Environmental chemistry of the elements*. New York : Academic Press. 333p.
26. Fifi, U., Winiarski, T., & Emmanuel, E. (2013). Évaluation de la mobilité du plomb, du cuivre et du cadmium dans un sol calcaire de Port-au-Prince, Haïti. *International journal of environmental research and public health*, 10(11):5830-5843. <https://doi.org/10.3390/ijerph10115830>
27. Emmanuel, E., Pierre, M.G., Perrodin, Y. (2009). Contamination des eaux souterraines par les substances microbiologiques et chimiques rejetées par les eaux usées hospitalières : Évaluation du risque sanitaire pour les consommateurs d'eau potable. *Environ. Int.* 35, 718-726. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2009.01.011>
28. Emmanuel, E., Fanfan, P. N., Louis, R., & Michel, G. A. (2002). Détermination de la dose optimale de fluor de l'eau destinée à la consommation humaine de la région hydrographique Centre-Sud de la république d'Haïti. *Cahiers d'études et de recherches francophones/Santé*, 12(2), 241-5.
29. TRACTEBEL (1998). Définition des périmètres de protection pour les sources exploitées par la CAMEP. Bruxelles: Tractebel Development, 235 p.
30. Schwartzbord, J. R., Emmanuel, E., & Brown, D. L. (2013). La nourriture et l'eau potable d'Haïti : une revue des risques toxicologiques pour la santé. *Clinical Toxicology*, 51(9), 828-833. <https://doi.org/10.3109/15563650.2013.849350>
31. Butterlin, J. (1960) *Géologie générale de la République 'Haïti*. Institut des Hautes Etudes de l'Amérique Latine, Paris, p.194.
32. Finkelman, R. B., Centeno, J. A. et Selinus, O. (2005). The emerging medical and geological association. *Transactions of the American Clinical and Climatological Association*, 116, 155.
33. Mercier, M. (2002). *Johannesbourg 2002 : vers le développement durable ?*
34. Gérin, M. (2003). Avant propos. In. Gérin M, Gosselin P, Cordier S, Viau C, Quénel P, Dewailly E. *Environnement et santé publique. Fondements et pratiques*. Edisem, Éditions Tec & Doc, 2003, 1023 p. ISBN : 2-89130-193-5 (Edisem). ISBN : 2-7430-0603-X (Tec & Doc).
35. Abenhaim, L. (2003). Préfaces. In. Gérin M, Gosselin P, Cordier S, Viau C, Quénel P, Dewailly E. *Environnement et santé publique. Fondements et pratiques*. Edisem, Éditions Tec & Doc, 2003, 1023 p. ISBN : 2-89130-193-5 (Edisem). ISBN : 2-7430-0603-X (Tec & Doc).
36. Conseil national de la recherche. (1983). *Risk Assessment in the Federal Government : Managing the Process*. Washington DC : National Academy Press. 191p.

37. Groten, J. P. (2000). Mixtures and interactions. *Food and Chemical Toxicology*, 38, S65-S71.
38. Bliss, C. I. (1939). The toxicity of poisons applied jointly 1. *Annals of applied biology*, 26(3):585-615. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1939.tb06990.x>
39. Plackett, R. L. et Hewlett, P. S. (1948). Statistical aspects of the independent joint action of poisons, particularly insecticides : I. La toxicité d'un mélange de poisons. *Annals of applied biology*, 35(3):347-358 <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1948.tb07379.x>
40. Plackett, R. L. et Hewlett, P. S. (1952). Quantal responses to mixtures of poisons. *Journal of the Royal Statistical Society : Series B (Methodological)*, 14(2):141-154. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1952.tb00108.x>
41. Fox, M. A., Tran, N. L., Groopman, J. D. et Burke, T. A. (2004). Toxicological resources for cumulative risk : an example with hazardous air pollutants (Ressources toxicologiques pour le risque cumulatif : un exemple avec les polluants atmosphériques dangereux). *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 40(3), 305-311. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.03.026>
42. US EPA, 2003. The Feasibility of Performing Cumulative Risk Assessments for Mixtures of Disinfection By-products in Drinking Water (Faisabilité de l'évaluation des risques cumulés pour les mélanges de sous-produits de désinfection dans l'eau potable). Centre national pour l'évaluation environnementale, Cincinnati, OH. EPA/600/R-03/051.
43. US EPA, 2003. Cadre pour l'évaluation des risques cumulés. Forum sur l'évaluation des risques, Washington, DC.
44. AGENCE AMÉRICAINNE POUR LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT (EPA). (2000). Supplementary guidance for conducting health risk assessment of chemical mixtures (Guide supplémentaire pour l'évaluation des risques sanitaires des mélanges chimiques). U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency's), Risk Assessment Forum. Washington, DC. EPA/630/R-00/002.
45. Villanueva, C. M., Cordier, S., Font-Ribera, L., Salas, L. A., & Levallois, P. (2015). Aperçu des sous-produits de désinfection et de leurs effets sur la santé. *Current environmental health reports*, 2(1), 107-115. <https://doi.org/10.1007/s12400-015-0001-2>
46. Li, X. F., & Mitch, W. A. (2018). Sous-produits de désinfection de l'eau potable (SPD) et effets sur la santé humaine : défis et opportunités multidisciplinaires. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05440>
47. Feron, V. J. et Groten, J. P. (2002). Évaluation toxicologique des mélanges chimiques. *Food and chemical toxicology*, 40(6), 825-839. [https://doi.org/10.1016/S0278-6915\(02\)00021-2](https://doi.org/10.1016/S0278-6915(02)00021-2)
48. Ministère de la Santé Publique et de la Population (MSPP) et Organisation Mondiale de la Santé OMS (1998). Analyse de la situation sanitaire - Haïti. Port-au-Prince : Imprimerie Henri Deschamps Port-au-Prince.

49. Fifi, U., Winiarski, T., Emmanuel, E. (2010). Impact du ruissellement de surface sur les aquifères de Port-au-Prince, Haïti. In : Eddie N. Laboy-Nieves, Matheus Goosen et Evens Emmanuel (éditeurs). *Environmental and Human Health : Risk Management in Developing Countries*. p.123-140. CRC Press. Taylor and Francis Group.
50. Saade L. 2006. Agir ensemble pour une gestion efficace des services d'eau potable et d'assainissement en Haïti. Nations Unies, Commission économique pour l'Amérique latine et les Caraïbes. Mexique, 44 p.
51. Kreft, S., Eckstein D., Melchior I. (2017). *Indice mondial des risques climatiques 2017, Qui souffre le plus des événements météorologiques extrêmes ? Weather-related Loss Events in 2015 and 1996 to 2015*, Bonn, Allemagne, Germanwatch, 31p.
52. Simonot, M. (1982). Les ressources en eau souterraine de la région de Port-au-Prince. Situation actuelle et recommandation. Port-au-Prince: PNUD (Programme des Nations Unies pour le Développement). 52p.
53. Desreumaux, C. (1987). Contribution à l'étude géologique des régions centrales et méridionales d'Haïti, (Grandes Antilles) du Crétacé à l'Actuel. Thèse de doctorat de l'Université de Bordeaux I. Bordeaux. 424p.
54. Maurasse F. (1990). Nouvelles données sur la stratigraphie de la péninsule méridionale d'Haïti. In : Actes du 1er Colloque sur la géologie d'Haïti, Port-au-Prince.
55. Denić-Jukić, V., & Jukić, D. (2003). Composite transfer functions for karst aquifers (fonctions de transfert composites pour les aquifères karstiques). *Journal of hydrology*, 274(1-4), 80-94. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00393-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00393-1)
56. Lombart, M., Pierrat, K., & Redon, M. (2014). Port-au-Prince : un "projectorat" haïtien ou l'urbanisme de projets humanitaires en question. *Cahiers des Amériques latines*, 2014(75), 97-124.
57. Emmanuel, E., Angerville, R., Joseph, O., Perrodin, Y. (2007). Human health risk assessment of lead in drinking water : a case study from Port-au-Prince, Haiti (Évaluation des risques pour la santé humaine du plomb dans l'eau potable : une étude de cas à Port-au-Prince, Haïti). *International journal of Environment and pollution*, 31(3-4), 280-291.
58. Damiani, C., Balthazard-Accou, K., Clervil, E., Diallo, A., Da Costa, C., Emmanuel, E., Totet, A., & Agnamey, P. (2013). Cryptosporidiose en Haïti : étonnamment, faible niveau de diversité des espèces révélé par la caractérisation moléculaire des oocystes de *Cryptosporidium* provenant des eaux de surface et des eaux souterraines. *Parasite* (Paris, France), 20, 45. <https://doi.org/10.1051/parasite/2013045>
59. Gonfiantini, R., et Simonot, M. (1989). Etude isotopique des eaux souterraines de la plaine de Cul-de-Sac, République d'Haïti (No. IAEA-TECDOC--502).

60. PNUD. (2015). Agenda 2030 pour le développement durable - Objectifs de développement durable. Nations unies. https://www.undp.org/content/dam/undp/library/corporate/brochure/SDGs_Booklet_Web_En.pdf.
61. Guterres, A. (2017). Rapport 2017 sur les objectifs de développement durable. Nations unies. <https://www.un.org/development/desa/publications/sdg-report-2017.html>.
62. Ramirez-Mendoza, R. A., Morales-Menendez, R., Melchor-Martinez, E. M., Iqbal, H. M., Parra-Arroyo, L., Vargas-Martínez, A. et Parra-Saldivar, R. (2020). Incorporer les objectifs de développement durable dans l'enseignement de l'ingénierie. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 14(3), 739-745. <https://doi.org/10.1007/s12008-020-00661-0>
63. TWAS (2016). Politique scientifique. Conseil consultatif scientifique du Secrétaire général des Nations unies. Académie mondiale des sciences (TWAS). <https://twas.org/united-nations-secretary-generals-scientific-advisory-board> (2016). Consulté le 15 juin 2019.
64. Nations unies (2008) Contribuer à un monde, une santé : Un cadre stratégique pour la réduction des risques de maladies infectieuses à l'interface animal-homme-écosystème. FAO/OIE/OMS/UNICEF/UNSIC/Banque mondiale. Disponible : http://un-influenza.org/files/OWOH_14Oct08.pdf.
65. Mazet, J. A., Clifford, D. L., Coppolillo, P. B., Deolalikar, A. B., Erickson, J. D., Kazwala, R. R. (2009). Une approche "une seule santé" pour lutter contre les zoonoses émergentes : le projet HALI en Tanzanie. *PLoS Med*, 6(12), e1000190. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000190>
66. Desjardins, R. (1988). Le traitement des eaux. 2^{ème} édition revue. Montréal : École Polytechnique de Montréal, 304p. ISBN : 2-553-00211-5.
67. IPCS. (2002). Fluorures. Genève, Organisation mondiale de la santé, Programme international sur la sécurité chimique (Critères d'hygiène de l'environnement 227 ; <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc227.htm> .
68. O'Mullane DM, Baez RJ, Jones S, Lennon MA, Petersen PE, Rugg-Gunn AJ, et al. (2016). Fluorure et santé bucco-dentaire. *Community Dent Health*. 33(2):69-99. Doi:10.1922/CDH_3707O'Mullane31
69. Indermitte, E., Saava, A. et Karro, E. (2009). Exposure to high fluoride drinking water and risk of dental fluorosis in Estonia. *International journal of environmental research and public health*, 6(2):710-721. DOI:10.3390/ijerph6020710
70. Edmunds M., Smedley P. (2005) Fluorure in natural waters. In : Selinus O., Alloway J. B., Centeno A. J., Finkelman B. R., Fuge R., Lindh U., Smedley P. *Essentials of Medical Geology*. Londres : Elsevier Academic Press, pp. 301-329. ISBN : 0-12-636341-2.

71. Chandra, S., Thergaonkar, V. P., Sharma, R. (1981). Water quality and dental fluorosis. *Indian journal of public health*, 25(1), 47-51.
72. OMS (2019). Prévenir la maladie grâce à des environnements sains : le fluor inadéquat ou en excès : un problème majeur de santé publique (No. WHO/CED/PHE/EPE/19.4. 5). Organisation mondiale de la santé.
73. OMS (2017). Directives de qualité pour l'eau de boisson, 4e édition intégrant le premier addendum. Genève, Organisation mondiale de la santé, pp. 370-373 <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/254637/9789241549950-eng.pdf>.
74. RGNDWM. (1993). Prévention et contrôle de la fluorose, aspects sanitaires. Vol. I. New Delhi : Rajiv Gandhi national drinking water mission (RGNDWM). 125p.
75. Sawyer, C.N., McCarty, P. (1967). *Chemistry for Sanitary Engineers*, McGraw-Hill Series in Sanitary Science and water Engineering. New York : McGraw-Hill. 455p.
76. Yam, A. A., Dioufndiaye, M., Badiane, M., & Sawadogo, G. (1995). Détermination de la dose optimale de fluor dans l'eau de boisson au Sénégal. *TSM. Techniques sciences méthodes, génie urbain génie rural*, (6), 488-490.
77. Dean, H.T. (1936). Fluorisation dentaire chronique endémique (émail marbré). *Jour Amer Medical Assn.* 107 : 1269-72.
78. Dean, H.T. (1941). Domestic water and dental caries. Une étude de 2 832 enfants blancs âgés de 12 à 14 ans de huit communautés de la banlieue de Chicago, y compris des études de *L. acidophilus* sur 1 761 enfants. *Public Health Repts.* 56 : 761-92.
79. Dean, H.T., Arnold, F.A. Jr, Elvove, E. (1942). Domestic water and dental caries. V. études complémentaires sur la relation entre le fluorure dans les eaux domestiques et les caries dentaires chez 4 4,25 enfants blancs âgés de 12 à 14 ans dans 13 villes de 4 Etats. *Public Health Repts.* 57 : 1155-71.
80. Lalumandier, J.A., Jones, J.L. (1999). Fluoride concentrations in drinking water. *Jour Amer Water Works Assn.* 91 : 42-51.
81. Galagan, D.J., Lamson, G.G. (1953). Climate and endemic dental fluoris. *Public Health Repts.* 68 : 497-508.
82. Szpunar, S.M., Burt B.A. (1987). Trends in the prevalence of dental fluoris in the United States : a review. *Jour Public Health Dentistry.* 47 : 71-9.
83. Angeville, R., Emmanuel, E., Nelson, J., Saint-Hilaire, P. (1999). Evaluation de la concentration en fluor dans les ressources en eau de la zone hydrographique "Centre-Sud" d'Haïti. Actes de la 8ème conférence annuelle de l'ACEPU et de la 4ème conférence de l'AIDIS Région 1, Jamaïque. CDROM.
84. Wang, S. X., Wang, Z. H., Cheng, X. T., Li, J., Sang, Z. P., Zhang, X. D., ... & Wang, Z. Q. (2007). Arsenic and fluoride exposure in drinking water : children's

- IQ and growth in Shanyin county, Shanxi province, China. Environmental health perspectives, 115(4), 643-647. [https://doi.](https://doi.org/10.1289/ehp.2007.115643)
85. Saxena, S., Sahay, A. et Goel, P. (2012). Effet de l'exposition au fluor sur l'intelligence des écoliers de Madhya Pradesh, Inde. Journal of neurosciences in rural practice, 3(2), 144. Doi : [10.4103/0976-3147.](https://doi.org/10.4103/0976-3147.104103)
 86. Seraj, B., Shahrabi, M., Shadfar, M., Ahmadi, R., Fallahzadeh, M., Eslamalu, H. F., & Kharazifard, M. J. (2012). Effet de la concentration élevée de fluorure d'eau sur le développement intellectuel des enfants à Makoo/Iran. Journal of Dentistry (Téhéran, Iran), 9(3), 221.
 87. Rubenowitz-Lundin, E. et Hiscock, K. M. (2013). Water hardness and health effects (dureté de l'eau et effets sur la santé). In : Essentials of Medical Geology. Springer, Dordrecht, 2013. p. 337-350.
 88. Eaton, A. D., Clesceri, L. S., Rice, E. W., Greenberg, A. E. et Franson, M. A. H. (2005). Méthodes normalisées pour l'examen de l'eau et des eaux usées. Washington D.C. : American public health association, 1015.
 89. Freeze, R.A., Cherry, J.A. (1979). Groundwater. Englewood Cliff : Prentice Hall. 604p.
 90. OMS (2011). La dureté de l'eau de boisson. Document de référence pour l'élaboration des Directives de l'OMS pour la qualité de l'eau de boisson. Genève : Organisation mondiale de la santé, Presses de l'OMS. 19p. WHO/HSE/WSH/10.01/10/Rev/1.
 91. McGowan, W. et Harrison, J. F. (2000). Water processing : residential, commercial, light industrial. Lisle, IL. Water Quality Association.
 92. Baker, S.B., Worthley, L.I.G. (2002). L'essentiel du métabolisme du calcium, du magnésium et du phosphate : partie I. Physiologie. Critical care resuscitation. 4 : 301- 306.
 93. Bootman M.D., Collins T.J., Peppiatt C.M., Prothero L.S., MacKenzie L., De Smet P., Travers M., Tovey S.C., Seo J.T., Berridge M.J., Ciccolini F., Lipp P. 2001. Calcium signalling-an overview. Semin Cell Dev Biol 12:3-10.
 94. Kožíšek, F. (2003). Importance pour la santé du calcium et du magnésium de l'eau potable. Institut national de santé publique, 29, 9285-6.
 95. Berthollet A. (2003). Le magnésium : un nutriment important. Forum Med Suisse. 27 : 638-640.
 96. Emmanuel, E., Simon, Y., & Joseph, O. (2013). Caractérisation de la dureté des eaux souterraines de Port-au-Prince. Un aperçu de l'importance sanitaire du magnésium dans l'eau potable. Aqua-LAC, 5(2), 35-43.
 97. Kobayashi J. 1957. On geographical Relations Between the Chemical Nature of River Water and Death Rate from Apoplexy, Berich. Ohara Inst. Landwirtsch. biol. 11 : 12-21.

98. Schroeder, H. A. (1960). Relations entre la dureté de l'eau et les taux de mortalité dus à certaines maladies chroniques et dégénératives aux États-Unis. *Journal of Chronic Diseases*, 12(6), 586-591.
99. Sharett, A.R. (1979) The role of chemical constituents of drinking water in cardiovascular diseases. *Am J Epidemiol* 110:401-19.
100. Masironi, R. et Shaper, A. G. (1981). Epidemiological studies of health effects of water from different sources. *Annual review of nutrition*, 1(1), 375-400.
101. Miyake, Y. et Iki, M. (2004). Absence d'association entre la dureté de l'eau et la mortalité par maladie coronarienne au Japon. *International journal of cardiology*, 96(1), 25-28.
102. Eisenberg, M. J. (1992). Magnesium deficiency and sudden death. *American Heart Journal*. 124(2):544-549. [https://doi.org/10.1016/0002-8703\(92\)90633-7](https://doi.org/10.1016/0002-8703(92)90633-7)
103. Emmanuel, E. (2004). Évaluation de risques sanitaires et écotoxicologiques liées aux effluents hospitaliers, thèse de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Université de Lyon, France. p. 259
104. Kozisek, F. (2020). Réglementations relatives au calcium, au magnésium ou à la dureté de l'eau potable dans les États membres de l'Union européenne. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 112, 104589. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2020.104589>
105. Catling, L. A., Abubakar, I., Lake, I. R., Swift, L. et Hunter, P. R. (2008). A systematic review of analytical observational studies investigating the association between cardiovascular disease and drinking water hardness. *Journal of water and health*, 6(4), 433-442. <https://doi.org/10.2166/wh.2008.054>
106. Roth, G. A., Johnson, C., Abajobir, A., Abd-Allah, F., Abera, S. F., Abyu, G., ... & Ukwaja, K. N. (2017). Charge mondiale, régionale et nationale des maladies cardiovasculaires pour 10 causes, 1990 à 2015. *Journal of the American College of Cardiology*, 70(1), 1-25. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2017.04.052>.
107. Lookens, J., Tymejczyk, O., Rouzier, V., Smith, C., Preval, F., Joseph, I., ... & McNairy, M. (2020). La cohorte des maladies cardiovasculaires en Haïti : protocole d'étude pour une cohorte longitudinale basée sur la population. *BMC Public Health*, 20(1), 1-11. <https://doi.org/10.1186/s12889-020-09734-x>
108. Emmanuel, A., & Simon, Y. (2018). L'exposition environnementale au plomb et son impact sur la santé des enfants, des femmes enceintes et de la population générale en Haïti. *Haïti Perspectives*, 6(3):5-11.
109. Emmanuel, E., Angerville, R., Joseph, O. et Perrodin, Y. (2007). Human health risk assessment of lead in drinking water : a case study from Port-au-Prince, Haiti (Évaluation des risques pour la santé humaine du plomb dans l'eau potable : une étude de cas à Port-au-Prince, Haïti). *International journal of Environment and pollution*, 31(3-4):280-291.

110. Caussy, D., Gochfeld, M., Gurzau, E., Neagu, C. et Ruedel, H. (2003). Lessons from case studies of metals : investigating exposure, bioavailability, and risk (Leçons tirées des études de cas sur les métaux : étude de l'exposition, de la biodisponibilité et du risque). *Ecotoxicology and environmental safety*, 56(1):45-51. [https://doi.org/10.1016/S0147-6513\(03\)00049-6](https://doi.org/10.1016/S0147-6513(03)00049-6)
111. El Nemr, A., Khaled, A., Abdelwahab, O. et El-Sikaily, A. (2008). Treatment of wastewater containing toxic chromium using new activated carbon developed from date palm seed. *Journal of Hazardous Materials*, 152(1), 263-275. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.06.091>
112. McGrath SP, Smith S. 1990. Chrome et nickel. In : Alloway BJ, éditeur. *Heavy metals in soils*. New York (USA) : John Wiley & Sons, Inc. p 125-150.
113. Cervantes, C., Campos-García, J., Devars, S., Gutiérrez-Corona, F., Loza-Tavera, H., Torres-Guzmán, J. C., & Moreno-Sánchez, R. (2001). Interactions du chrome avec les micro-organismes et les plantes. *FEMS microbiology reviews*, 25(3), 335-347. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2001.tb00581.x>
114. [ATSDR] Agency for Toxic Substance and Disease Registry. (2000). Profil toxicologique du chrome. Atlanta, Georgia (USA) : U.S. Department of Health and Human Services. 461p.
115. Tadesse I, Isoaho SA, Green FB, Puhakka JA. 2006. Lime enhanced chromium removal in advanced integrated wastewater pond system. *Bioresource Technology* 97 : 529-34.
116. Académie des Sciences. (1998). Contamination des sols par les éléments traces : les risques et leur gestion. Rapport N° 42. Paris : Lavoisier Tec&Doc. 440p.
117. Robson, M. (2003). Méthodes d'évaluation de l'exposition aux métaux : facteurs de l'hôte humain. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 56(1), 104-109. [https://doi.org/10.1016/S0147-6513\(03\)00054-X](https://doi.org/10.1016/S0147-6513(03)00054-X)
118. Lewis R. Métaux. In : Ladou J, éditeur. *Occupational and environmental medicine*. New York : McGrawHill ; 1997. p. 405-39 (chapitre 27).
119. Fertmann, R., Hentschel, S., Dengler, D., Janßen, U. et Lommel, A. (2004). Lead exposure by drinking water : an epidemiological study in Hamburg, Germany (Exposition au plomb par l'eau de boisson : une étude épidémiologique à Hambourg, Allemagne). *International journal of hygiene and environmental health*, 207(3):235-244. <https://doi.org/10.1078/1438-4639-00285>
120. INERIS (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques). Plomb et ses dérivés, in Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques. Paris : INERIS ; ERIS-DRC-01-25590-ETSC-Api/SD-N 00df257, 90p.
121. Ab Latif Wani, A. A., et Usmani, J. A. (2015). Lead toxicity : a review. *Interdisciplinary toxicology*, 8(2):55. DOI : [10](https://doi.org/10.1007/s12010-015-0300-0).

122. Needleman, H. (2004). Le saturnisme. *Annu. Rev. Med.* 55:209-222. <https://doi.org/10.1146/annurev.med.55.091902.103653>
123. Christensen, J. M. (1995). Human exposure to toxic metals : factors influencing interpretation of biomonitoring results. *Science of the total environment*, 166(1-3):89-135. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)04478-J](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04478-J)
124. Cleymaet, R., Collys, K., Retief, D. H., Michotte, Y., Slop, D., Taghon, E., ... & Coomans, D. (1991). Relation entre le plomb dans l'émail dentaire de surface, le sang et la salive d'enfants résidant à proximité d'une usine de métaux non ferreux en Belgique. *Occupational and Environmental Medicine*, 48(10):702-709. <http://dx.doi.org/10.1136/oem.48.10.702>
125. Watt, G. C. M., Britton, A., Gilmour, H. G., Moore, M. R., Murray, G. D., & Robertson, S. J. (2000). Public health implications of new guidelines for lead in drinking water : a case study in an area with historically high water lead levels. *Food and Chemical Toxicology*, 38, S73-S79. [https://doi.org/10.1016/S0278-6915\(99\)00137-4](https://doi.org/10.1016/S0278-6915(99)00137-4)
126. Jarvis, P. et Fawell, J. (2021). Lead in drinking water-an ongoing public health concern ? *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 100239. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100239>
127. Daldrup, T., Haarhoff, K. et Szathmary, S. C. (1983). Fatal nickel sulfate poisoning. *Beitrag zur gerichtlichen Medizin*, 41, 141-144
128. Sunderman Jr, F. W., Hopfer, S. M., Sweeney, K. R., Marcus, A. H., Most, B. M., & Creason, J. (1989). Nickel absorption and kinetics in human volunteers. *Proceedings of the Society for Experimental Biology and Medicine*, 191(1), 5-11. <https://doi.org/10.3181/00379727-191-42881>
129. ATSDR (Agence pour le registre des substances toxiques et des maladies). Profil toxicologique du nickel. Atlanta, GA : U.S. Department of Health and Human Services ; 1993. (<http://www.atsdr.cdc.gov>).