

Depuis la révolution industrielle au XIX^{ème} siècle, les métaux occupent une place prépondérante dans l'activité économique mondiale. Les industries du fer, de l'acier, de l'aluminium et du cuivre ont majoritairement contribué à notre développement technologique, à travers la conception d'outils et de machines de plus en plus sophistiqués, eux-mêmes permettant ensuite la fabrication de produits toujours plus évolués [2] et Depuis, le problème des métaux lourds sont devenu de plus en plus préoccupant et pose un (sérieux) problème particulier [3] **car ils** sont considérés comme de polluants graves qui peuvent affecter l'environnement à cause de leur rémanence et leur tendance à la bioaccumulation direct dans les organismes vivants ou indirectement par transfert par le biais de la chaine alimentaire [4].

Ces éléments métalliques sont, sous différentes formes, présents naturellement au sein de l'environnement à l'état de traces dont Ils sont nécessaires voire indispensables aux êtres vivants [5]. En revanche, et à une concentration élevée qui résulte des activités humaines, ils présentent une toxicité plus ou moins forte [6]. Ces métaux lourds ne présentent pas tous les mêmes risques en raison de leurs effets sur les organismes, leurs propriétés chimiques, physico-chimiques et biologiques. Leur toxicité est très variable et leur impact sur l'environnement très différent [7] [8].

Les problèmes associés à la contamination par les métaux lourds ont été tout d'abord mis en évidence dans les pays industrialisés, en raison de leurs développements industriels plus importants, et spécialement à la suite d'accidents dus à une pollution par le cadmium en Suède et le mercure au Japon (maladie de Minamata de 1949 à 1965).

Bien que le niveau des activités industrielles soit relativement moins élevé dans la plupart des pays africains, on y observe une prise de conscience croissante sur la nécessité de gérer rationnellement les ressources aquatiques et notamment de maîtriser les déversements de déchets dans l'environnement [4].

I. Généralités :

1.1.Définition des métaux lourds :

On appelle métaux lourds en générale toute élément métallique naturel, métaux ou dans certains cas métalloïdes (environ 65 éléments) dont la masse volumique est supérieure à 5-6 g/cm³, situé à partir de la quatrième période du tableau périodique. Ils ont en commun les propriétés suivantes :

- Structure cristalline à température ambiante, à l'exception du mercure qui est liquide,
- Aspect brillant,
- Ductilité, malléabilité,
- Électrons de conduction faiblement liés, d'où une propension à former des cations et des liaisons ioniques,
- Bonne, voire excellente conductivité thermique et électrique [2].

Ils englobent l'ensemble des métaux présentant un caractère toxique pour la santé et l'environnement. Les métaux lourds les plus souvent considérés comme toxique pour l'homme sont le plomb, le mercure, l'arsenic et le cadmium. D'autres comme le cuivre, le zinc, le chrome, pourtant nécessaires à l'organisme en petites quantités, peuvent devenir toxiques à doses plus importantes [8].

D'un point de vue biologique, on en distingue deux types en fonction de leurs effets physiologiques et toxiques :

- Certains métaux lourds sont des oligo-éléments indispensables à l'état de trace à la biologie de l'organisme, pour de nombreux processus cellulaires et qui se trouvent en proportion très faible dans les tissus biologiques (Loué, 1993). Certains peuvent devenir toxiques lorsque la concentration dépasse un certain seuil. C'est le cas du cuivre (Cu), du nickel (Ni), du zinc (Zn), du fer (Fe). Par exemple, le zinc (Zn), à la concentration du millimolaire, est un oligo-élément qui intervient dans de nombreuses réactions enzymatiques (déshydrogénases, protéinase, peptidase) et joue un rôle important dans le métabolisme des protéines, des glucides et des lipides [9] [10].
- alors que d'autres peuvent lui nuire gravement qui ont un caractère polluant avec des effets toxiques pour les organismes vivants même à faible concentration. Ils n'ont aucun effet bénéfique connu pour la cellule. C'est le cas du plomb (Pb), du mercure (Hg), du cadmium (Cd) [10].

Chapitre I : les métaux lourds

Le terme métaux lourds, «heavy metal», implique la notion des « **éléments de traces métalliques** » pour décrire ces mêmes éléments [10]. On qualifie d'élément trace tout élément dont la concentration moyenne dans la croûte terrestre est inférieure à 0.1 % (ou 1000 ppm) [2] et ils représentent ainsi 0,6 % de la lithosphère [11]. La plupart de ces éléments font partie de la famille chimique des métaux et métalloïdes. Ainsi les éléments étudiés sont désignés sous le terme général d'Eléments Traces Métalliques (ETM) [12]

CLASSIFICATION PERIODIQUE DES ELEMENTS

Période	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII
1 couche K	1 H Hydrogène 1.008																	2 He Hélium 4.003
2 couche L	3 Li Lithium 6.941	4 Be Béryllium 9.012											5 B Bore 10.811	6 C Carbone 12.011	7 N Azote 14.007	8 O Oxygène 15.999	9 F Fluor 18.998	10 Ne Neon 20.180
3 couche M	11 Na Sodium 22.990	12 Mg Magnésium 24.305											13 Al Aluminium 26.982	14 Si Silicium 28.086	15 P Phosphore 30.974	16 S Soufre 32.06	17 Cl Chlore 35.45	18 Ar Argon 39.948
4 couche N	19 K Potassium 39.098	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.956	22 Ti Titane 47.88	23 V Vanadium 50.942	24 Cr Chrome 51.996	25 Mn Manganèse 54.938	26 Fe Fer 55.845	27 Co Cobalt 58.933	28 Ni Nickel 58.69	29 Cu Cuivre 63.546	30 Zn Zinc 65.38	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.64	33 As Arsenic 74.922	34 Se Sélénium 78.96	35 Br Brome 79.904	36 Kr Krypton 83.798
5 couche O	37 Rb Rubidium 85.468	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.906	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.906	42 Mo Molybdène 95.94	43 Tc Technetium 98	44 Ru Ruthénium 101.07	45 Rh Rhodium 102.91	46 Pd Paladium 106.42	47 Ag Argent 107.87	48 Cd Cadmium 112.41	49 In Indium 114.82	50 Sn Étain 118.71	51 Sb Antimoine 121.76	52 Te Tellure 127.6	53 I Iode 126.91	54 Xe Xénon 131.29
6 couche P	55 Cs Césium 132.91	56 Ba Baryum 137.33	57 La Lanthane 138.905	58 Ce Cérium 140.12	59 Pr Praseodyme 140.908	60 Nd Néodyme 144.24	61 Pm Prométhée 145	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.925	66 Dy Dysprosium 162.50	67 Ho Holmium 164.930	68 Er Erbium 167.259	69 Tm Thulium 168.930	70 Yb Ytterbium 173.054	71 Lu Lutétium 174.967	
7 couche Q	87 Fr Francium 223	88 Ra Radium 226	89 Ac Actinium 227	90 Th Thorium 232	91 Pa Protactinium 231	92 U Uranium 238	93 Np Neptunium 237	94 Pu Plutonium 244	95 Am Américium 243	96 Cm Curium 247	97 Bk Berkélium 247	98 Cf Californium 251	99 Es Einsteinium 252	100 Fm Fermium 257	101 Md Mendelevium 258	102 No Nobelium 259	103 Lw Lawrencium 260	

Légende

- nombre de masse de l'isotope le plus abondant = nombre de nucléons
- numéro atomique = nombre de protons
- masse molaire atomique en g.mol⁻¹
- symbole
- nom

- Hydrogène
- Métaux vrais
- Métaux de transition
- "Métalloïdes"
- Non métaux
- Gaz rares
- Lanthanides
- Transuraniens

☆ : Radioactif et préparé par synthèse

G : Gaz

L : Liquide

Figure 01 : classification périodique des éléments chimiques

1.2.Origines naturelles et humaines des métaux lourds dans l'environnement :

Les sources des métaux lourds peuvent être introduites dans l'environnement par l'intermédiaire de sources naturelles et humaines (anthropologiques).

Les métaux lourds sont redistribués naturellement dans l'environnement par les processus géologiques et les cycles biologiques.

Les activités industrielles et technologiques diminuent cependant le temps de résidence des métaux dans les roches, ils forment de nouveaux composés métalliques, introduisent les métaux dans l'atmosphère par la combustion de produits fossilifères.

Il faut différencier la part qui résulte de la contamination d'origine humaine (anthropogène) et la part naturelle (géogène) [13] [8].

Il faut avoir présent à l'esprit que ces éléments se trouvent dans notre environnement quotidien sous des formes chimiques très diverses. En effet, à côté des formes minérales les plus simples par exemple le Pb^{2+} , les métaux lourds peuvent exister aussi sous forme organique, c'est-à-dire combinés à un atome de carbone (exemple : le Plomb tétra-éthyl des essences) mais aussi sous forme de complexe (exemple la salicylate de plomb) ou encore sous forme de chélate (exemple : complexe de plomb EDTA) [14].

1.2.1. Les sources naturelles :

En effet, la plupart des 'métaux lourds' sont des éléments constitutifs de la croûte terrestre présents au sein des minerais. Ils sont aussi très présents dans les sédiments océaniques [15], et à la suite des processus naturels d'altération des roches, les éléments traces métalliques sont naturellement présents dans les roches [11] [12] pour constituer le fond géochimique [16] [10].

L'ensemble des processus d'érosion et des cycles hydrologiques les dispersent dans tous les compartiments de la planète : atmosphère, lithosphère, hydrosphère et biosphère [18]. Leur dispersion est ainsi liée à des processus naturels [17] [12] mais également à l'activité volcanique, l'altération des continents et les incendies de forêts. La contribution des volcans peut se présenter sous forme d'émissions volumineuses dues à une activité explosive, ou d'émissions continues de faible volume, résultant notamment de l'activité géothermique et du dégazage du magma [19] [8]

Il y a donc des sources de contamination naturelles. Une fois en circulation, les métaux se distribuent dans tous les compartiments de la biosphère : terre, air, océan.

Les échanges sont permanents et se chiffrent par milliers ou centaines de milliers de tonnes. Les flux naturels sont complétés par les flux d'origine anthropique [20].

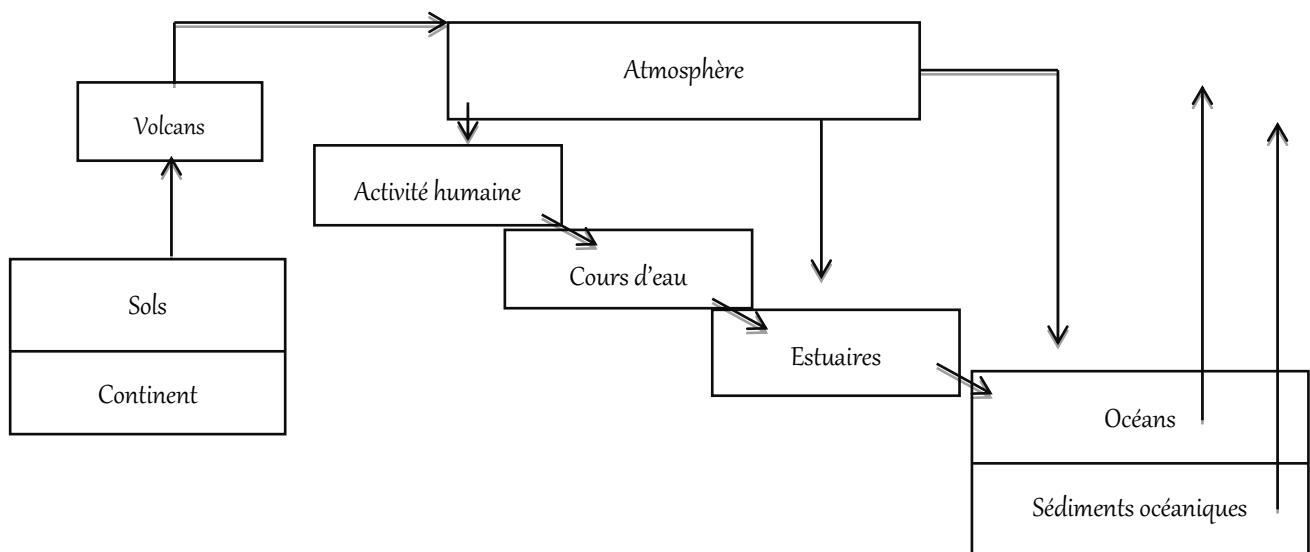


Figure 02 : Cycle géochimique simplifiés des métaux lourds [20]

1.2.2. Les sources anthropologiques

Les métaux provenant d'apports anthropiques sont présents sous des formes chimiques assez réactives et entraînent de ce fait des risques très supérieurs aux métaux d'origine naturelle qui sont le plus souvent immobilisés sous des formes relativement inertes [8] [21].

L'activité humaine n'a apporté aucun changement dans les volumes de métaux lourds. Il n'y a ni création, ni suppression. Elle a surtout changé la répartition des métaux, les formes chimiques (ou spéciations) et les concentrations par l'introduction de nouveaux modes de dispersion (fumées, égouts, voitures...). Si une partie des métaux lourds part directement dans le sol et les eaux, l'essentiel est d'abord émis dans l'atmosphère avant de rejoindre les deux autres éléments [20].

Les sources anthropogènes sont les suivantes:

- Effluents d'extractions minières
- Effluents industriels
- Effluents domestiques et ruissellements orageux urbains
- Lessivage de métaux provenant de décharges d'ordures ménagères et de résidus solides
- Apports de métaux provenant de zones rurales, par exemple métaux contenus dans les pesticides
- Sources atmosphériques, par exemple combustion de carburants fossiles, incinération des déchets et émissions industrielles, Activités pétrochimiques [22] [4].

Chapitre I : les métaux lourds

Tableau 01 : Rapport du flux lié à l'activité humaine et le flux naturel des métaux lourds

Eléments	Flux liés a l'homme/flux naturel (%)
Cadmium	1.897
Mercure	27.500
Chrome	1.610
Arsenic	2.786
Plomb	34.583

Tableau 02: Sources industrielles et agricoles des métaux présents dans l'environnement [24]
[4]

Utilisations	Métaux
Batteries et autres appareils électriques	Cd, Hg, Pb, Zn, Mn, Ni,
Pigments et peintures	Ti, Cd, Hg, Pb, Zn, Mn, Sn, Cr, Al, As, Cu, Fe
Alliages et soudures	Cd, As, Pb, Zn, Mn, Sn, Ni, Cu
Biocides (pesticides, herbicides)	As, Hg, Pb, Cu, Sn, Zn, Mn
Agents de catalyse	Ni, Hg, Pb, Cu, Sn
Verre	As, Sn, Mn
Engrais	Cd, Hg, Pb, Al, As, Cr, Cu, Mn, Ni, Zn-
Matières plastiques	Cd, Sn, Pb
Produits dentaires et cosmétiques	Sn, Hg
Textiles	Cr, Fe, Al
Raffineries	Ni, V, Pb, Fe, Mn, Zn
Carburants	Ni, Hg, Cu, Fe, Mn, Pb, Cd

Cette contamination a plusieurs origines telles que la combustion de fossiles, les gaz d'échappement des véhicules, l'incinération, l'activité minière, l'agriculture et les déchets liquides et solides. Mais elle peut également être d'origine naturelle via les volcans, l'activité des sources thermales, l'érosion, l'infiltration, etc. Le tableau suivant (tiré d'une étude de Lantzy et Mackenzie) montre le rapport entre le flux lié à l'activité humaine et le flux naturel.

D'autre part, le cadmium, l'arsenic, et surtout le mercure et le plomb sont introduits dans l'environnement, de façon quasi exclusive par l'homme [4].

Cd, Ni, Pb et Zn ont majoritairement une origine anthropique, alors que Cr, Cu et Sb ont une origine naturelle prépondérante [12]

II. Rôle biologiques :

Les ETM sont largement assimilés au sein de la biosphère. En effet, certains (en particulier Cu, Co, Cr, Ni, Zn) ont des fonctions biologiques connues (de catalyseurs enzymatiques notamment) et sont indispensables au fonctionnement de certains être vivants, mais deviennent toxiques au-delà d'un certain seuil [114]. D'autres éléments (comme Sb, Cd, Pb) n'ont pas de fonction identifiée à ce jour chez les êtres vivants et sont considérés comme toxiques à de faibles concentrations dans les milieux [114]. Lorsque les éléments toxiques présentent des analogies avec d'autres éléments non toxiques (exemple Cd/Zn), ils peuvent être assimilés à leur place et être ainsi intégrés dans des cycles biologiques [115]

La biosphère, et dans le cas des écosystèmes forestiers, la végétation participe largement au recyclage des ETM, qui peuvent intégrer les cycles de la végétation [116]. De plus, la végétation constitue une interface vivante entre l'atmosphère et le sol.

L'étude du cycle biogéochimique des ETM consiste en l'étude de l'ensemble des processus impliqués dans la circulation des éléments entre le sol et la plante, la plante et le sol. Ces cycles sont ouverts à l'atmosphère [12].

III. Caractéristiques et particularités de quelques métaux lourds :

Les métaux lourds repose sur le fait qu'ils sont très utiles, voire indispensables à l'homme. En effet, de par leurs propriétés, ils entrent dans la composition d'une grande variété de produits, et se retrouvent à de nombreux niveaux: métallurgie, chimie, pharmacie, énergie, etc. Il semble donc assez difficile de s'en passer et de les substituer [25].

Parmi les éléments chimiques minéraux, les métaux occupent une place prépondérante dans notre monde moderne car ils interviennent dans la plupart des secteurs d'activité. Par ailleurs, ils sont, pour beaucoup d'entre eux, indispensables au monde vivant (fer, zinc...) parfois en très faible quantité (oligo-éléments essentiels). Certains de ces oligo-éléments (chrome, nickel, manganèse...) indispensables à petite dose, deviennent toxiques a forte concentration. Enfin, il y a des métaux comme le mercure, le plomb et le cadmium qui sont uniquement toxiques pour les organismes vivants [24] [4].

1. Les éléments traces essentiels :

Ils sont indispensables au déroulement des processus biologiques mais à de très faibles quantités, deviennent toxiques à fortes concentrations. C'est le cas du fer(Fe), cuivre(Cu), zinc(Zn), cobalt(Co), manganèse(Mn), chrome(Cr), molybdène(Mo), sélénium(Se), nickel(Ni), Vanadium(V), Titane(Ti), Arsenic (As).

1.1.Le fer (Fe) :

Le fer (du latin ferrum) est un élément métallique blanc argenté de symbole Fe et de numéro atomique 26. C'est le 4^e élément le plus abondant dans la croûte terrestre. Proche de l'aluminium par ses propriétés, c'est le plus abondant des métaux [28].

L'utilisation du fer est largement appliquée sous forme d'acier dans la construction. Mais, Fe est aussi utilisé dans l'industrie technologique sous forme de fer métallique et d'oxydes depuis des décennies pour fixer des informations analogiques ou numériques sur des supports appropriés (bandes magnétiques, cassettes audio et vidéo, disquettes).

Le fer est un oligoélément indispensable à la vie, il entre dans la composition de l'hémoglobine dont la principal minéral de fer est l'hématite, il est présent sous forme combinées à des petites quantités dans les eaux naturelles, les plantes et le sang ainsi que dans les nutriments qu'on retrouve dans les aliments essentiel pour l'homme (et les autres organismes [27] [26] [28]).

A l'état libre, le fer métallique se trouve dans les météorites en générale alliée au nickel. Sa présence dans l'eau peut avoir diverses origines : lessivage des terrains avec dissolution des roches et des minerais contenus dans le sous-sol ; rejets industriels (pollutions minières, métallurgiques, sidérurgiques) ; corrosion des canalisations métalliques (en fonte ou en acier) ou existence de dépôts antérieurs [32] et la fabrication des engrais [28].

1.2.Le Cuivre (Cu):

C'est un métal de couleur rougeâtre, de symbole Cu et numéro atomique 29 il possède une haute conductivité thermique et électrique. Moyennement abondant dans la croûte terrestre, le cuivre est inégalement réparti à la surface du globe et la plupart des gisements sont situés dans l'hémisphère sud. Le cuivre existe à l'état natif ou combiné à d'autre corps, comme le soufre [28].

A très faible dose, Le cuivre est un élément essentiel chez l'homme, les animaux et les plantes. En effet l'organisme ne peut croître complètement en son absence. Il ne peut être remplacé par un autre élément, impliqué dans de nombreuses voies métaboliques, notamment pour la formation d'hémoglobine et la fonction immunitaire et maturation des polynucléaires neutrophiles. De plus, il est un co-facteur spécifique de nombreuses enzymes et métalloprotéines de structure en intervenant contre le stress oxydant [31] [30] [29].

Il a une importance capitale dans l'entretien des processus biologiques. Chez les mollusques, le sang renferme un pigment respiratoire à base de cuivre, l'hémocyanine [28].

Le cuivre est considéré comme l'élément le plus mobile des métaux lourds, par référence aux processus supergènes.

En métallurgie, il entre dans de nombreux alliages. Les sels de cuivre (sulfate, acétate, dérivés organiques) sont utilisés comme fongicides ou algicides en agriculture, pour les traitements chimiques de surfaces, la fabrication de peintures et de céramiques. En dehors des pollutions industrielles ou de traitements agricoles, ce métal provient habituellement de la corrosion des tuyauteries de distribution. Le cuivre présent dans les racines est entièrement sous forme complexée, mais la pénétration racinaire doit quand même se réaliser à l'état de formes dissociées [34]

Le cuivre provient essentiellement du rejet des eaux usées urbaines et industrielles (métallurgie, chimie) et du lessivage des sols agricoles. Le cuivre est bio disponible pour les organismes sous le degré d'oxydation (I) ou (II), à partir de sels inorganiques ou de complexes organiques [33].

1.3.Le Zinc (Zn) :

Le Zn appartient au groupe II B de la classification périodique des éléments. C'est un oligo-élément présent naturellement dans la croûte terrestre [23]. On ne le trouve pas à l'état libre dans la nature, mais sous forme d'oxyde de zinc (ZnO), de silicates (2ZnO , SiO_2 , H_2O), de carbonates de zinc (ZnCO_3)...etc

A l'état pur le zinc est un métal cristallin, insoluble dans l'eau. Son origine artificiel ne peut être qu'industrielle.

Le zinc est principalement sous forme de sulfure (blende) est assez uniformément distribué dans les roches magmatiques (40 à 120 mg.kg.).

Comme le cuivre, le zinc est un métal essentiel et plus abondants chez l'homme, il est nécessaire à la vie d'un grand nombre d'organismes, en quantité généralement faible (besoins 15mg/jour).

Il intervient au niveau de la croissance, du développement osseux et cérébral, de la reproduction, du développement fœtal, du goût et de l'odorat, des fonctions immunitaires et de la cicatrisation des blessures.

Sa toxicité pour les organismes aquatiques n'en fait pas un contaminant prioritaire, bien qu'il agisse, à de fortes concentrations, sur la reproduction des moules et la croissance des larves [14].

Il est aussi utilisé en agriculture [27], comme apport d'oligo-élément, essentiellement en zone de sols fortement calcaires. La culture la plus sensible à la carence ou l'insuffisance en zinc est probablement le maïs. Des symptômes d'insuffisance apparaissent aussi sur la plupart des arbres fruitiers [26] [27].

1.4.Arsenic (As) :

Avec le plus célèbre d'entre eux, l'arsenic, bien connu des empoisonneurs depuis la plus haute antiquité. Très peu présent dans la croûte terrestre qui peut exister sous différentes formes organiques et inorganiques, l'arsenic est un constituant essentiel des cellules ou il fait office de catalyseur [35].

L'arsenic est présent à l'état de trace dans toute matière vivante, dans les combustibles fossiles de type fuel lourd. C'est aussi un élément que l'on retrouve dans les combustibles minéraux solides comme le charbon et la houille [15].

L'arsenic et ses composés minéraux ont de très nombreuses applications industrielles et agricoles pour éliminer une multitude d'organismes ou en réduire le nombre. Les traitements fongicides pour les semences et l'application d'insecticides sur les cultures sont des exemples d'utilisations passées. Dont certaines ont été abandonnées. Aujourd'hui, l'arsenic et ses dérivés sont employés dans les applications suivantes: traitement du bois sous pression, fabrication d'émail et de céramique en verrerie, durcissement des alliages de cuivre et de plomb en métallurgie [25].

L'homme peut être exposé à l'arsenic par le biais de la nourriture, de l'air ou même de l'eau. Le code de la santé publique fixe une limite de qualité pour l'eau potable de 10 microgrammes par litre, applicable depuis le 25 décembre 2003 [36]

1.5. Le manganèse (Mn) :

Le manganèse est un élément chimique métallique, blanc argenté, occupe la 12^{ème} place des éléments dans la croûte terrestre. C'est un oligo-élément indispensable ; on le trouve dans tous les tissus. Il intervient dans l'activité de nombreux enzymes impliquées dans la protection des cellules contre les radicaux libres. Il catalyse les réactions d'oxydo-réduction et la phosphorylation et favorise aussi l'hydrolyse des esters d'acides aminés et des peptides car il est indispensable au métabolisme des lipides ; il stimule la synthèse du cholestérol [14].

Le manganèse entre dans la composition de nombreux alliages avec le fer (ferromanganèses) avec le cuivre (bronze au manganèse) avec le titane, le nickel et l'aluminium. Il est utilisé comme fongicides pour les fruits, les légumes, les noix, les plantes d'ornement et pour traiter les champs agricoles contre le mildiou, la rouille et le brunissement des feuilles [37].

Totalité des grandes concentrations économiques de Manganèse correspond à des gisements stratiformes syngénétiques, sédimentaires ou hydrothermaux-sédimentaires (surtout en milieu détritique, mais aussi en milieu carbonaté) ou volcano-sédimentaires, résultant d'une précipitation chimique en milieu aqueux, sous conditions physico-chimiques favorables [32].

1.6. Chrome (Cr) :

L'occupe le 21^{ème} rang dans le classement des éléments par ordre d'abondance dans la croûte terrestre. Sa concentration moyenne dans les roches est de 100 mg/kg. Les traces de chrome présentes dans ces minéraux sont souvent responsables de leur couleur [40]. Le chrome appartient aux éléments de transition de la première série (**groupe VI B**), il existe sous plusieurs états d'oxydation depuis Cr (0), la forme métallique jusqu'à Cr (VI) [39]. Toutes les formes de chrome peuvent être toxiques à fortes doses mais la forme Cr(VI) est la plus toxique [38].

1.7. Nickel (Ni) :

Le nickel est un élément chimique métallique blanc argenté, fait partie de la triade du fer et occupe le huitième groupe des éléments de transition avec le fer et le cobalt. Il entre dans la composition de nombreux alliages en raison de ces caractéristiques de dureté et de résistance à la corrosion. Associé au cadmium, il entre dans la fabrication d'éléments de batteries. Son emploi comme catalyseur dans l'industrie (chimie organique). On le retrouve généralement associés au cyanure, au mercure à l'arsenic, et au chrome dans les eaux de surfaces et dans les eaux souterraines puisque sa rétention par le sol est difficile [42] [43].

Le fait que le nickel ne soit généralement pas retrouvé dans les eaux souterraines indique que la présence de ce métal est principalement liée aux activités humaines [44] [43] [45].

Le nickel joue un rôle essentiel dans de nombreux processus biologiques il intervient notamment comme cofacteur de l'uréase.

2. Les éléments traces non essentiels :

Ils n'ont aucun rôle biologique connu ; Ces derniers sont nommés toxiques tels que le plomb(**Pb**), le cadmium(**Cd**), le mercure(**Hg**) et l'antimoine(**Sb**) [46]. Les éléments traces sont des micropolluants de nature à entraîner des nuisances, même quand ils sont rejetés en quantités très faibles. Leurs toxicités se développent par bioaccumulation le long de la chaîne alimentaire.

Il est quasiment impossible de détecter la présence d'ETM dans l'eau, tant leur concentration y est faible ; c'est pourquoi ces éléments sont recherchés dans les sédiments et les organismes marins [28].

2.1.Le plomb (Pb) :

Le plomb (Tableau 1), élément du groupe IV-A du tableau périodique, de masse atomique 207,2 g/mol, possède une densité élevée de 11,3 g.cm⁻³. Le plomb possède un point de fusion de 327°C et sa température d'ébullition est d'environ 1700°C. Il est difficilement détruit, et non dégradable [41] [10].

C'est un métal lourd naturellement présent dans l'environnement terrestre et aquatique [37]. Il est largement présent dans la croûte terrestre sous trois formes essentielles: le plomb dissous, le plomb colloïdal et le plomb particulaire [14] liée plus ou moins fortement aux particules [10].

L'utilisation du plomb est directement liée à la métallurgie. Avec deux pics notables. La révolution industrielle a entraîné de nouvelles utilisations massives et une augmentation exponentielle depuis un siècle tout en se transformant radicalement. Pendant la première moitié du siècle, le plomb a été utilisé dans l'industrie, l'imprimerie et les peintures. Dans la seconde moitié du siècle, l'utilisation dominante était liée aux carburants automobiles, le plomb étant ajouté à l'essence comme antidétonant. Cette utilisation est aujourd'hui prohibée [20].

Le plomb se trouve naturellement à l'état de trace dans la croûte terrestre et dans tous les compartiments de la biosphère dont la concentration moyenne est approximativement de 20 ppm. L'érosion et les émissions volcaniques comptent pour la plupart des processus naturels mobilisateurs de Pb, mais les activités humaines sont de loin beaucoup plus significatives dans la mobilisation de Pb que les processus naturels. Le plomb est actuellement le 5ème métal le plus communément utilisé dans le monde [49,50, 51] [48].

2.2.Cadmium (Cd) :

Le cadmium est un élément naturel relativement rare dans la croûte terrestre (0.2 mg/kg), présent dans certains minerais (notamment le zinc) sous forme d'impuretés. Ce métal était inconnu jusqu'au XIXème siècle, jusqu'à ce que ses caractéristiques physico-chimiques soient mises en évidence et utilisées notamment dans les batteries. Le cadmium a été abondamment utilisé dans des utilisations diffuses pour protéger l'acier contre la corrosion (cadmiage), ou comme stabilisant pour les plastiques et les pigments [20].

Il s'agit d'un élément facilement volatile, il peut réagir avec les gaz tels que l'oxygène, le dioxyde de carbone, la vapeur d'eau, le dioxyde et trioxyde de soufre et l'acide chlorhydrique pour former des oxydes de cadmium (CdO), des carbonates (CdCO_3), des hydroxydes ($\text{Cd}(\text{OH})_2$), des sulfures (CdS) et des chlorures (CdCl_2). Le Cd est très facilement assimilé par les plantes.

Il est considéré comme le métal du XXe siècle car 65 % de la production mondiale ont été réalisés lors de ces quelques dernières dizaines d'années [23].

2.3.Mercure (Hg) :

C'est le seul métal liquide à température ambiante. C'est un métal qui se combine très facilement avec d'autres molécules, que ce soient des métaux (amalgames), des molécules inorganiques (sels) ou organiques (carbone) ; c'est un métal toxique d'où la toxicité vient de son extrême volatilité (puisque'il peut être facilement respiré), de sa relative solubilité dans l'eau et les graisses (il peut être facilement transporté dans le corps), et de sa capacité à se lier avec d'autres molécules qu'il va modifier ou dont il va transformer les fonctions [20].

Le mercure est rare dans le milieu naturel : il se trouve cependant, en traces, dans les roches, parfois dans des concentrations justifiant une exploitation. Le mercure, comme le plomb, est utilisé depuis l'Antiquité. Ses capacités à s'associer à d'autres métaux ont été mises à profit pour extraire l'or.

Le mercure a aussi été utilisé pour ses propriétés biologiques, y compris ses propriétés toxiques (comme biocide). Il a été utilisé en tannerie, en médecine, pour traiter la syphilis, par exemple. Comme le cadmium, le mercure est aujourd'hui utilisé pour ses propriétés physico-chimiques.

Il est utilisé dans la production du chlore et quelques produits de consommation ou de mesure (piles, thermomètres...). Ces utilisations sont en déclin. La production annuelle mondiale de mercure est de l'ordre de 3.000 tonnes. Pour chacun de ces éléments, la production primaire (à partir de minerais) est désormais complétée et sera bientôt doublée par la production secondaire, à partir de la valorisation de déchets. Comme dans le même temps, la consommation ne cesse de diminuer, la question qui se pose est celle de savoir comment et jusqu'où recycler un métal sur un marché en déclin [20].

L'abondance de mercure dans la croûte terrestre atteint 0,08 ppm. Sa concentration dans les sols non contaminés se situe à 0.007 ppm et dans les eaux douces peut varier de 0,01 à 10 ppm, bien que des concentrations aussi élevées que 1600 ppm ont été mesurées dans des eaux au contact avec les dépôts du cuivre dans l'Oural du sud [52] [48].