




Réf projet : PR2301553

Réf rapport
PR2301553_240926_Métaux


Rapport du 26/09/2024


 Lisa CHAMART


 lisa.chamart@spw.wallonie.be

Département

Assistance Technique

 Nicolas GRAINDORGE
Françoise PIRARD

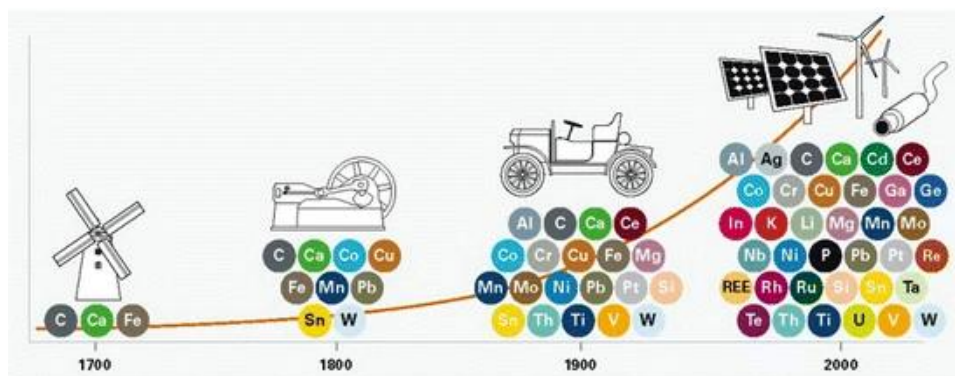
 ngraindorge@cebedeau.be
fpirard@cebedeau.be

 +32(0)4 254 98 25

RESRECOVERY

MESURE 32 : RÉCUPÉRER LES RESSOURCES PRÉSENTES DANS LES EAUX USÉES.

PARTIE 4 : VALORISATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES



(Zepf, Achzet and Reller, 2014)

CENTRE DE RECHERCHE ET D'EXPERTISE POUR L'EAU

CEBEDEAU ASBL
Allée de la découverte, 11 B53
4000 Liège

IBAN : BE02 2400 6287 9040
TVA : BE0402 381 833

TABLE DES MATIÈRES

I.	Introduction	1
I-1.	Contexte	1
I-2.	Effluents concernés	3
I-3.	Utilisateurs finaux	3
II.	Ressources contenues dans les effluents	6
II-1.	Eaux usées urbaines et produits associés	6
II-2.	Eaux usées industrielles et minières	16
II-2.1.	Effluents de désulfuration des fumées des centrales thermiques	16
II-2.2.	Lixiviats de centres d'enfouissement	17
II-2.3.	Effluents industriels	18
III.	Aspects financiers de la récupération des métaux et criticité des ressources	18
III-1.	Aspects financiers	19
III-2.	Criticité des ressources	20
III-3.	Analyse des données	23
IV.	Technologies de récupération des métaux	27
IV-1.	Adsorption	30
IV-1.1.	Adsorption-réduction	31
IV-1.2.	Adsorption-oxydation	32
IV-2.	Résines échangeuses d'ions	32
IV-3.	Procédés membranaires	34
IV-3.1.	Ultrafiltration (UF/PEUF/MEUF)	35
IV-3.2.	Adsorption et ultrafiltration	35
IV-3.3.	Nanofiltration	35
IV-4.	Electrodialyse	35
IV-5.	Extraction par solvant	36
IV-6.	Précipitation	36
IV-7.	Coagulation-floculation	37
IV-8.	Flottation	38
IV-9.	Traitement des solides par voie humide	38
IV-10.	Procédé thermochimique	38
IV-11.	Bioremédiation	38
IV-11.1.	Phytoremédiation	39
IV-11.2.	Bioremédiation microbienne	39
V.	Etude de cas	41
V-1.	Laboratoire KWR	41
V-2.	Sublimus	44
V-3.	Procédé Chromofora	44
V-4.	Le Projet intelWATT	44
V-5.	Projet ReWaCEM (Resource Recovery from Industrial Waste Water by Cutting Edge Membrane Technologies)	45

VI.	<i>Métaux dans les effluents urbains et industriels en Région wallonne</i>	46
	VI-1. Effluents urbains	46
	VI-2. Effluents industriels.....	50
VII.	<i>Synthèse</i>	52
VIII.	<i>Bibliographie</i>	54
IX.	<i>Annexe</i>	1

<p>RESRECOVERY PARTIE 4 : RECUPERATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES</p>	<p>PR2301553_240926_Métaux</p>
	<p>Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD avec la collaboration d'Arthur PRON et Manon DOSSIER</p>
	<p>Page 3 sur 55</p>

I. INTRODUCTION

I-1. Contexte

La majorité des métaux sont des ressources finies, exploitées de plus en plus activement depuis les années 1950 au vu de la demande de plus en plus importante. Le contexte géologique et géopolitique ne facilite pas l'approvisionnement en métaux. Ceux-ci sont inégalement répartis au sein de la croûte terrestre et on observe ainsi de nombreux monopoles sur l'extraction et la production de matières premières minérales. C'est par exemple le cas du cobalt avec 60% des ressources mondiales situées en République Démocratique du Congo ou des terres rares avec 98 % des besoins de l'Union Européenne (UE) assurés par la Chine. Ou encore du lithium avec un monopole concentré sur 5 entreprises à l'échelle mondiale. L'Europe, dont la Belgique, est un territoire largement tributaire des importations de métaux étant donné qu'elle dispose de peu de sites d'extraction. L'UE montre donc le souhait de réduire sa dépendance à l'accès aux matières premières critiques à l'égard des pays tiers. S'inscrivant dans la démarche d'économie circulaire adoptée par la commission européenne, l'UE s'est fixé un objectif de recyclage de 25% de sa consommation annuelle provenant du recyclage domestique en 2030.

Après avoir été extraits, ces métaux sont renvoyés dans l'environnement. Les stations d'épuration sont un des derniers sites où les métaux passent avant d'être déchargés dans l'environnement, ce qui suggère que les différents effluents des stations d'épuration peuvent être la cible d'une récupération. Les métaux se retrouvent dans les eaux traitées et dans les boues. La récupération de ces métaux va dépendre de plusieurs paramètres tels que le coût de la récupération (qui va dépendre lui-même de la concentration dans l'effluent), le prix du marché et la criticité de ces ressources. Cette criticité, spécifique à un territoire, est un indicateur qui a été développé à la suite de l'inégale répartition des métaux sur la Terre. Celui-ci permet d'indiquer un état des ressources pour un territoire et est basé sur trois piliers :

- L'importance stratégique
- Le risque d'approvisionnement
- L'impact environnemental

La criticité des métaux a été évaluée selon des méthodes analogues à l'économie circulaire mais quelque peu différentes sur deux des piliers : le risque d'approvisionnement ainsi que l'importance stratégique. Ceci a permis une adaptation avec l'ajout du pilier impact environnemental qui s'ajuste aux exigences du contexte de la station d'épuration. Concernant ce pilier environnement, la méthodologie choisie implique les métaux déjà suivis par la réglementation liée à l'assainissement (qualité des cours d'eau, compostage des boues...).

Huit métaux (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb et Zn) ont été activement étudiés dans le passé, non pas dans un objectif de récupération, mais plutôt dans le but de protéger l'environnement de leur toxicité. De nombreux pays développés ont adopté des législations encourageant l'utilisation généralisée de systèmes de traitement biologique et physicochimique des eaux usées pour lutter contre l'accumulation des métaux dans l'environnement. Au cours des dernières décennies, les flux de déchets riches en métaux lourds, critiques, précieux et en terres rares ont été de plus en plus reconnus comme une source

RESRECOVERY PARTIE 4 : RECUPERATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Métaux
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD avec la collaboration d'Arthur PRON et Manon DOSSIER
	Page 1 sur 55

secondaire prometteuse. Par conséquent, l'attention s'est déplacée de l'élimination des métaux à leur récupération. Extraire les métaux de ces déchets/effluents peut réduire la pression sur les ressources naturelles et l'exploitation des métaux produits par l'extraction minière traditionnelle. Des efforts significatifs ont été déployés dans le développement de nouvelles technologies de récupération des métaux, et les progrès sont évidents. Cependant, les procédés actuels sont généralement basés sur des technologies qui produisent de nouveaux déchets au travers de réactions chimiques, de précipitation par exemple, induisant des pollutions secondaires. D'autres métaux liés à nos nouvelles habitudes de vie se retrouvent également dans ces eaux. Ceux-ci proviennent de notre quotidien : des cosmétiques, des catalyseurs de voitures, de la joaillerie etc... Ces utilisations évoluent en même temps que l'avancement des nouvelles technologies, comme indiqué à la Figure I-1 .

Les besoins mondiaux en métaux et terres rares ont connu une croissance exponentielle depuis les premières phases d'industrialisation, les raisons en sont d'une part la croissance démographique et d'autre part l'évolution technologique et la diversification des usages. Les prévisions des besoins futurs conservent la même tendance de croissance, accentuée par des objectifs globaux de transition énergétique et de digitalisation. Au niveau mondial, l'Agence Internationale de l'énergie (AIE) estime que les besoins en ressources minérales en 2040 seront multipliés par un facteur 6 pour atteindre l'objectif de zéro émission nette de CO₂ en 2050. Le secteur de la robotique est dépendant de 22 métaux critiques, celui des drones de 26 sur 26 et celui de l'éolien de 5 sur 26. Au niveau européen, d'après une étude de la KUL (Gregoir Liesbet and van Acker Karel, 2022), les besoins en nickel, cobalt et lithium nécessaires à la transition énergétique seront respectivement multipliés par 2, 3 et 35 d'ici 2050. À titre d'exemple une éolienne nécessite 17 kg de terres rares et une voiture électrique nécessite 5 à 9 kg de cobalt.

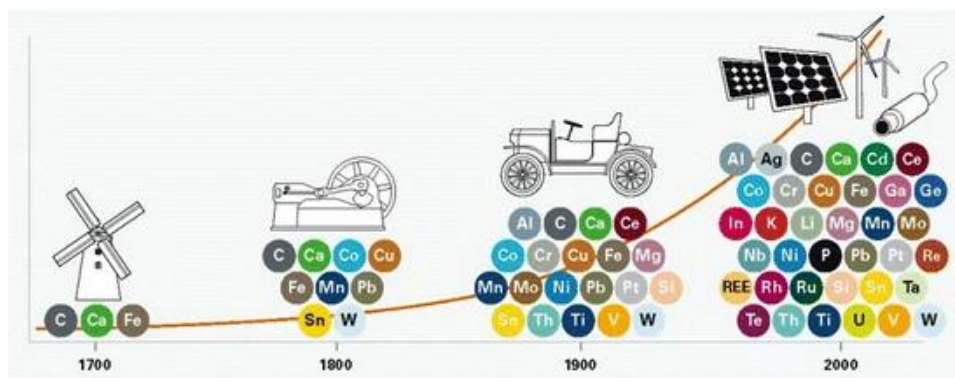


Figure I-1 : Éléments les plus utilisés dans la production d'énergie (Zepf, Achzet and Reller, 2014)

Le principal problème rencontré lors de la récupération des métaux dans les eaux usées est la concentration à laquelle ces métaux se trouvent. En effet, des pertes ont lieu lorsque la concentration dans un milieu est trop faible pour envisager une récupération, phénomène appelé « pertes dissipatives ». Des techniques de concentration sont donc parfois nécessaires, telles que des procédés membranaires, d'adsorption, d'échange d'ions pour les eaux, ou encore l'incinération pour les déchets organiques solides.

<p>RESRECOVERY PARTIE 4 : RECUPERATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES</p>	<p>PR2301553_240926_Métaux</p>
	<p>Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD avec la collaboration d'Arthur PRON et Manon DOSSIER</p>
<p>Page 2 sur 55</p>	

Selon (E Varennes *et al.*, 2021), les métaux les plus présents en Europe (> g/jour.EH) dans les eaux résiduaires urbaines sont (par ordre décroissant de concentration) : Na, Ca, K, Mg et Fe. Certains métaux, comme l'arsenic, le bore ou encore le lithium, ont une concentration plus importante dans les effluents liquides que dans les effluents solides, il est donc plus intéressant de les récupérer dans les eaux traitées. Pour d'autres métaux, comme pour le cuivre, le plomb ou encore le chrome, leur concentration est plus élevée dans les boues de station d'épuration.

Les conclusions des travaux de recherches dans ce domaine montrent que la viabilité économique n'est pas forcément assurée même si la concentration en métaux est importante. Et inversement, la récupération des métaux présents en faible concentration pourrait être financièrement opportune. La valeur économique des métaux fluctue, leur disponibilité et les relations internationales aussi, c'est pourquoi il est important de faire un état des lieux des ressources secondaires en métaux disponibles et de périodiquement l'actualiser au contexte.

Ce rapport passe en revue les sources secondaires potentielles dans le secteur de l'assainissement des eaux industrielles et domestiques, les différents éléments métalliques disponibles, les concentrations attendues ainsi que l'avancée technologique des procédés de séparation et de récupération de ces derniers.

(ADEME, no date) (Varennes, Blanc, Azaïs and J. M. Choubert, 2023)

I-2. Effluents concernés

Dans le contexte de circularité évoqué précédemment la notion de mine urbaine a vu le jour (Brunner, 2011), considérant les effluents domestiques et industriels comme de potentiels gisements. Ainsi les systèmes d'assainissement font partie intégrante de la notion de mine urbaine, ces derniers transportent de nombreux composants valorisables, considérés actuellement comme des déchets à éliminer est non comme des ressources potentielles.

Les effluents concernés par la récupération des métaux peuvent provenir de différentes sources (centralisées ou décentralisés) et de différentes natures (solide, liquide). On en retrouve dans les eaux usées domestiques et industrielles, mais aussi dans les boues, les cendres d'incinération et lixiviats de décharge, les drainages miniers acides et les eaux de process (rinçage, perméat) et les eaux de ruissellement.

I-3. Utilisateurs finaux

Le Tableau I-1 reprend les principales applications des différents métaux.

RESRECOVERY PARTIE 4 : RECUPERATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Métaux
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD avec la collaboration d'Arthur PRON et Manon DOSSIER
	Page 3 sur 55

Tableau I-1 : Utilisation des principaux métaux dans les secteurs industriels¹

métal	Application	métal	Application	métal	Application
Ag	électrique, électronique photovoltaïque brasure photographie joaillerie	Ga	Semi conducteurs LED Cellules photovoltaïques	Re	Superalliages catalyseurs
Al	emballage construction Aéronautique, spatial et transport	Ge	Semi-conducteur catalyseur	Ru	Catalyseur Revêtement d'électrodes Electronique
As	protection du bois verre fonderie tannerie chimie phytosanitaires	Hf	Super alliages Découpe et soudure plasma Nucléaire	Sb	Retardateur de flamme Batteries Plastiques
Au	joaillerie électronique dentisterie	Hg	Catalyseur	Sc	Alliages (Al) Lampes halogènes
B	sidérurgie centrales nucléaires pyrotechnie électronique	In	Films minces pour écrans LCD	Se	Métallurgie Verre Agriculture Pigments Catalyseur Électronique Photovoltaïque
Ba	radiologie électronique pyrotechnie	Li	Batteries Céramique, verre	Si	Alliage aluminium Silicones Photovoltaïque
Be	Composants industriels Défense, aérospatial Électronique Télécom Energie	Mg	Alliages Désulfuration de l'acier	Sn	Brasures Fer blanc Fabrication de verre plat Chimie (organostanneux)
Bi	en substitution du plomb, par exemple dans les munitions et les « plombs » de pêche	Mn	Sidérurgie Acier/alliages Piles et batteries	Ta	Condensateurs Superalliages Microélectronique Outils de coupe (carbures de Ta)
Cd ²	Batteries Ni-Cd Alliages	Mo	Aciers de construction Aciers inoxydables Chimie (catalyseurs) fonderie	Te	Photovoltaïque Thermoélectricité Métallurgie Caoutchouc

¹ <https://lelementarium.fr/>

² L'entreprise Flaurea Chemicals, basée à Ath, est une grande consommatrice/transformatrice de cadmium

Ce	Verre et céramique	Nb	Aciers (automobile)	Ti	Aéronautique Superalliage Médical (prothèses) Alliages à mémoire de forme
Co	Voitures électriques Téléphones Superalliage	Ni	Aciers inoxydables Alliages Batteries	U	Nucléaire
Cr	Sidérurgie (acier)	Os	revêtements d'or sur verre détection ADN	V	Aciers et alliages
Cs	formiate de césium (forages pétroliers)	Pb	Accumulateurs (automobile) Verre Oxydes	W	Outils de coupe (carbure) Aciers et alliages Lubrifiant 'sulfure)
Cu	Électricité, électronique Construction	Pd Pt Rh	Catalyse automobile Bijouterie Chimie Verre	Zn	Galvanisation Bronze laiton et autres alliages Anodes sacrificielles
Fe	Acier Chlorure ferrique	Rb	Fibres optiques	Zr	Nucléaire alliages

<p>RESRECOVERY PARTIE 4 : RECUPERATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES</p>	<p>PR2301553_240926_Métaux</p>
	<p>Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD avec la collaboration d'Arthur PRON et Manon DOSSIER</p>
	<p>Page 5 sur 55</p>

II. RESSOURCES CONTENUES DANS LES EFFLUENTS

II-1. *Eaux usées urbaines et produits associés*

Une méta-analyse réalisée par (Varennnes, Blanc, Azaïs and J. M. Choubert, 2023) a récupéré des informations relatives à la composition en métaux de diverses matrices :

- Eaux usées brutes
- Eaux usées traitées
- Boues de station d'épuration
- Cendres de boues de station d'épuration

Ces informations sont exprimées en flux journalier rapporté à un équivalent habitant (g/jour.EH) pour pouvoir comparer les informations entre elles, tout en émettant certaines hypothèses (flux d'eau journalier par équivalent habitant). Certaines valeurs ont également été déduites, telles que le flux journalier en métaux des eaux usées brutes qui est la somme de celui des eaux usées traitées et des boues de station d'épuration. Les informations exploitées sont résumées au Tableau II-1.

Tableau II-1 - Informations issues d'une revue de la littérature et utilisées par (Varennnes, Blanc, Azaïs and J. M. Choubert, 2023)

Territoire	Nombre de métaux documentés	Nombre d'analyses	Eaux usées brutes	Eaux traitées	Boues brutes	Cendres de boues	Capacité de Traitement
Danemark - Copenhague	26	1	F (tonne/jour)	F (tonne/jour)	F (tonne/jour)	F (tonne/jour)	235 000 EH
France	21	6	C (µg/L)	C (µg/L)	C (mg/kgMS)	/	2 900 – 250 000 EH
Suisse	69	64	F (mg/jour.hab)	C (µg/L)	C (mg/kgMS)	/	1 375 – 425 000 EH
USA	53	94	/	/	C (mg/kgMS)	/	/
Royaume-Uni	6	10	/	/	C (ppb)	C (ppb)	/
Allemagne	54	24	/	/	/	C (mg/kgMS)	/
<i>F : Flux C : Concentration</i>							

Les flux journaliers de métaux par équivalent habitant (eaux usées brutes danoises, françaises et suisses) et par ordre décroissant sont représentés au graphique de la Figure II-1.

data provenance  Choubert et al., 2011  Vriens et al., 2017  Yoshida et al., 2015

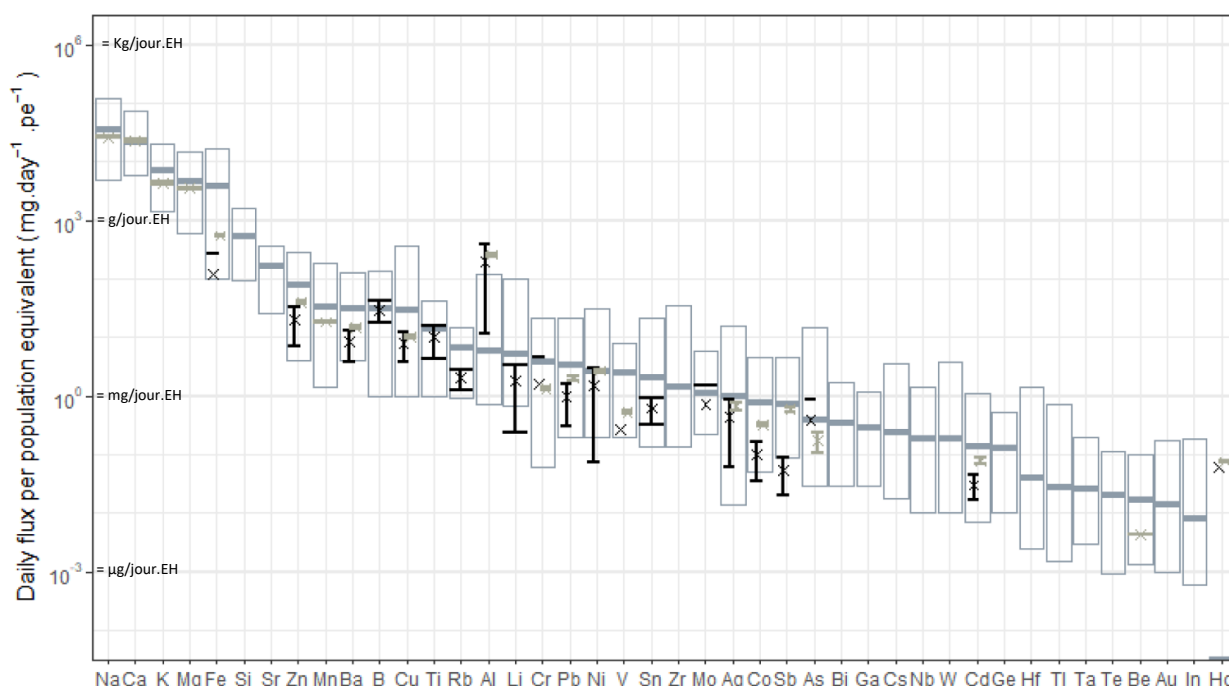


Figure II-1 - Flux journalier de métaux rapporté par équivalent habitant dans les eaux usées brutes (g/jour.EH). Les données Suisses sont en gris (N=64), les données Françaises sont en noir (N=6) et les données Danoises sont en brun clair (N=1). (Varenes, Blanc, Azaïs and J. M. Choubert, 2023)

Pour la plupart des métaux, des valeurs comparables sont observées dans les 3 pays, à l'exception du fer, de l'aluminium et de l'antimoine. Selon (Varenes, Blanc, Azaïs and J. M. Choubert, 2023), la différence concernant le fer peut s'expliquer par l'utilisation de chlorure ferrique comme coagulant dans la station d'épuration, mais les écarts pour l'aluminium et l'antimoine restent inexpliqués. À noter que le polychlorure d'aluminium est un adjuvant courant pour la floculation dans les stations d'épuration. Toutefois, dans le cas où il s'agirait bien de ces ajouts qui causeraient une variation des valeurs du fer et de l'aluminium, cela indiquerait que les analyses auraient été réalisées sur l'eau en cours (ou post) traitement et non pas sur les eaux brutes.

Ces résultats montrent que **Na, Ca, K, Mg et Fe** présentent des flux supérieurs à 1 g/jour.EH comparables aux flux de phosphore par exemple.

En revanche, **Re, Os, Ir, Pt, Pd et Rh** sont trop rarement mesurables pour calculer les flux moyens quotidiens par équivalent population.

Le graphique repris à la Figure II-2 reprend divers exemples de concentration en métaux dans des boues de station d'épuration. Il est à noter, sans surprise, que le **Fe** est l'élément le plus présent dans les boues de station d'épuration, avec une teneur située entre 10 et 100 g/kgMS.

RESRECOVERY PARTIE 4 : RECUPERATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Métaux
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD avec la collaboration d'Arthur PRON et Manon DOSSIER
	Page 7 sur 55

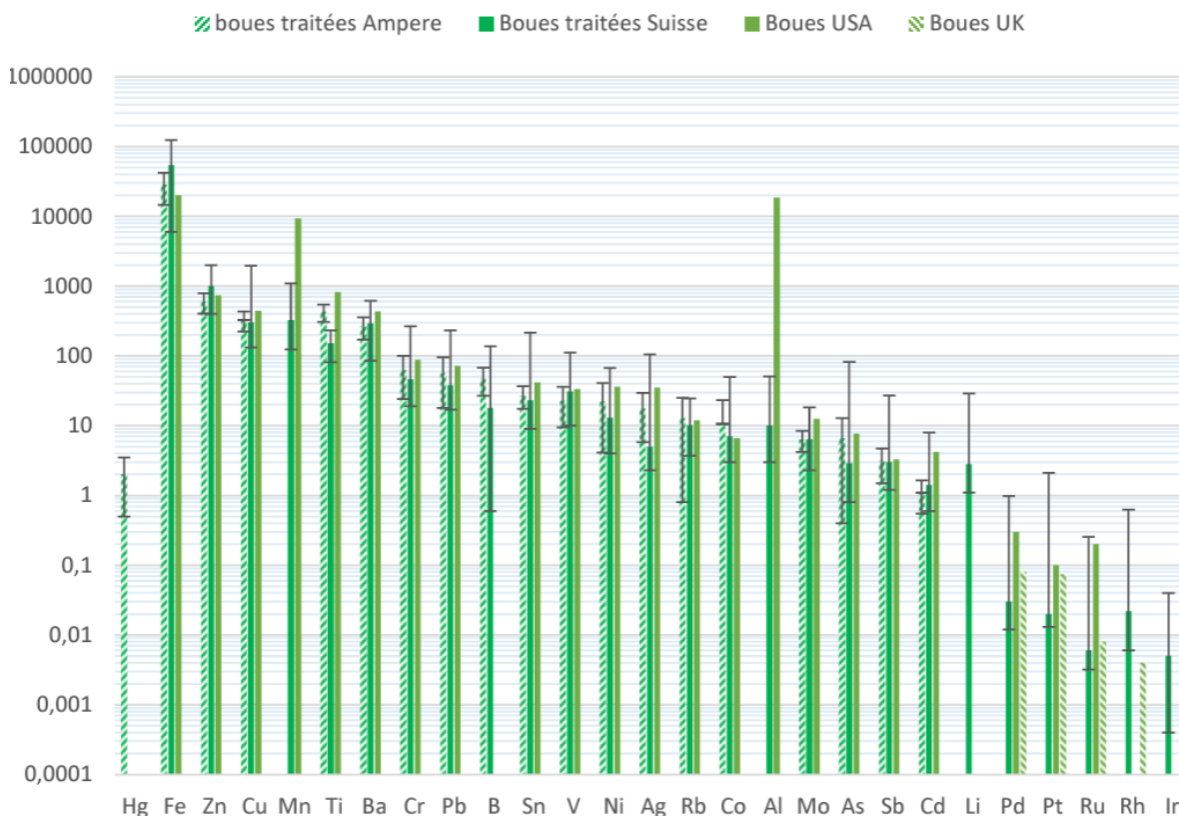


Figure II-2 - Teneur en métaux dans les boues en mg/kgMS³. (Varenes, 2021)

Le graphique de la Figure II-3 montre la partition des métaux entre les phases dissoutes et particulaires dans les eaux usées brutes. Cette représentation permet de prédire les flux de métaux à travers la station d'épuration : la fraction dissoute tend à demeurer principalement dans les eaux usées traitées, car elle n'est pas efficacement éliminée par les différents procédés de traitement de la station (à moins d'une sorption ou d'une complexation avec la matière organique). En revanche, la fraction particulaire se retrouve dans les boues grâce au traitement primaire (floculation) et/ou aux étapes de décantation ou de filtration.

³ Le projet Amperes est un projet français

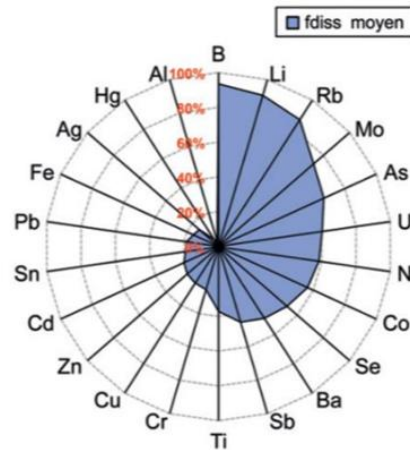


Figure II-3 - Partition des métaux entre la phase dissoute (100%) et la phase particulaire (0%) (Vareennes, 2021)

La Figure II-4 montre la concentration en métaux dans les boues brutes, déshydratées et digérées à partir des données de la station d'épuration de Venlo. De la même manière, la Figure II-5 montre la charge annuelle en métaux estimée dans les eaux brutes, l'effluent traité et les boues d'une station d'épuration néerlandaise d'1 million d'EH.

Les tableaux de la Figure II-6 comparent les ordres de grandeur de concentrations des métaux dans divers flux obtenus sur base des différentes études. Ces flux sont les suivants :

- Eaux usées brutes
- Eaux usées traitées
- Boues de station d'épuration
- Cendres de boues de station d'épuration incinérées

À noter que le graphique repris à la Figure II-7 compare également la part de métaux passant de la phase aqueuse à la phase solide.

Trois métaux ont une teneur moyenne supérieure à 5000 mg/kgMS (Al, Ca, Fe). Le magnésium, le potassium, le calcium et le sodium ont les concentrations les plus élevées dans l'eau (> 9000 µg/L) et les teneurs les plus élevées (> 2 g/kgMS) dans chacune des quatre matrices solides. 17 métaux sur 49 ont une teneur moyenne supérieure à 0,5 mg/kgMS dans les boues (Ag, As, B, Cd, Co, Ga, Ge, Hg, Mo, Nb, Ni, Rb, Sb, Sn, V, W, Zr). Les platinoïdes (Pt, Pd, Ru, Rh, Ir, Os) sont à peine détectés dans les matrices aqueuses mais sont quantifiés dans les cendres à des concentrations inférieures à 0,5 mg/kgMS. Il peut être remarqué que la matrice dans laquelle les métaux se retrouvent dépend de leurs propriétés physico-chimiques et de leur affinité avec la matière organique. Bien que les concentrations en métaux, ainsi que leur répartition dans les matrices, varient significativement selon les procédés installés dans les stations d'épuration des eaux usées, il est démontré que la concentration de certains métaux (arsenic, bore, lithium et rubidium) reste inchangée (dans une marge de 10 %) dans les matrices liquides. Comme le **bore** est l'un des métaux les plus concentrés dans la ligne principale de traitement des eaux usées, il devient intéressant de le récupérer dans les eaux usées traitées. Le deuxième tableau suggère que la plupart (> 85 %) du béryllium, du cuivre, du plomb, du chrome et du cadmium entrant dans les eaux usées se retrouve dans les matrices solides. Dans les eaux usées brutes non traitées, les métaux les

RESRECOVERY PARTIE 4 : RECUPERATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Métaux
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD avec la collaboration d'Arthur PRON et Manon DOSSIER
Page 9 sur 55	

plus intéressants à récupérer seraient le titane et le baryum. En effet, ils figurent parmi les plus concentrés et semblent plus uniformément répartis entre les matrices de sortie liquides et solides. À noter que le facteur de concentration moyen des métaux par une étape d'incinération est de 4 ± 1 sur 5 métaux (Pt, Pd, Ru, Rh, Ir) mais devrait être calculé sur un plus grand nombre de métaux.

Un gisement d'un métal est considéré comme compétitif s'il est plus riche que les autres en ce métal. Il s'avère que Cs, Hf, Rb, Na et Ti ont un facteur d'enrichissement⁴ dans les boues proche de 1, ce qui signifie que leurs concentrations relatives à celle de l'aluminium dans la croûte terrestre et dans la matrice des boues sont comparables. Cette dernière n'est donc pas intéressante pour récupérer ces éléments. Les métaux avec un facteur d'enrichissement supérieur à 1000 sont **Ag, Au, Ir, Pd et Ru**. Cependant, ils ont les concentrations les plus faibles, ce qui peut présenter un défi technologique pour l'extraction et la purification. En comparant la composition des nodules polymétalliques de fond marins avec celle des boues, dix métaux communs sont présents (Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Ti, V, Zn). Le facteur d'enrichissement indique qu'il est plus intéressant d'extraire le cobalt et le nickel des dépôts sous-marins avec des facteurs d'enrichissement respectifs de 114 et 64, contre 2 et 6 respectivement dans les boues. D'autres facteurs, tels que les technologies d'extraction disponibles, la quantité estimée, etc., devraient être pris en compte.

En comparant les eaux usées brutes et traitées avec l'eau de mer, il s'avère que l'eau de mer dispose d'un plus grand potentiel en raison de concentrations plus élevées dans la plupart des métaux. Certains dépôts géothermiques présentent des concentrations plus élevées que les concentrés des usines de désalinisation. Les concentrats issus de l'osmose inverse produits par les usines de désalinisation concentrent l'eau de mer entre 1,5 et 1,9 fois en certains métaux tels que le lithium, le magnésium ou le potassium. La récupération du sodium (sous forme de chlorure ou d'hydroxyde), du magnésium (sous forme d'hydroxyde ou de carbonate) et du potassium (sous forme d'hydroxyde) est techniquement faisable à partir de l'eau de mer ou de concentrat de désalinisation, mais ne soutient pas l'économie circulaire. La faisabilité technique de la récupération à partir des eaux usées brutes ou traitées devrait être étudiée pour les régions sans géographie côtière ou dépôts géothermiques afin d'être évaluée selon d'autres critères tels que l'impact environnemental et l'analyse coût-bénéfice. (Varenes, Blanc, Azais and J. M. Choubert, 2023)

⁴ Le facteur d'enrichissement est un ratio permettant de comparer la teneur d'un élément dans un gisement par rapport à sa teneur de référence. Par exemple, le gisement observé est la matrice boue et le gisement de référence est la croûte terrestre. Dans le cas de la comparaison de minerais créés par des formations géologiques distinctes, la teneur s'exprime vis à vis d'un élément normalisant plutôt que de la masse totale de matériaux. L'aluminium est l'élément normalisant le plus souvent utilisé pour la classification des mines. Le facteur d'enrichissement s'écrit

$$\text{alors : } \frac{[M]_{\text{boues}} / [Al]_{\text{boues}}}{[M]_{\text{croûte}} / [Al]_{\text{croûte}}} \text{ (Varenes, 2021)}$$

RESRECOVERY PARTIE 4 : RECUPERATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Métaux
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD avec la collaboration d'Arthur PRON et Manon DOSSIER
	Page 10 sur 55

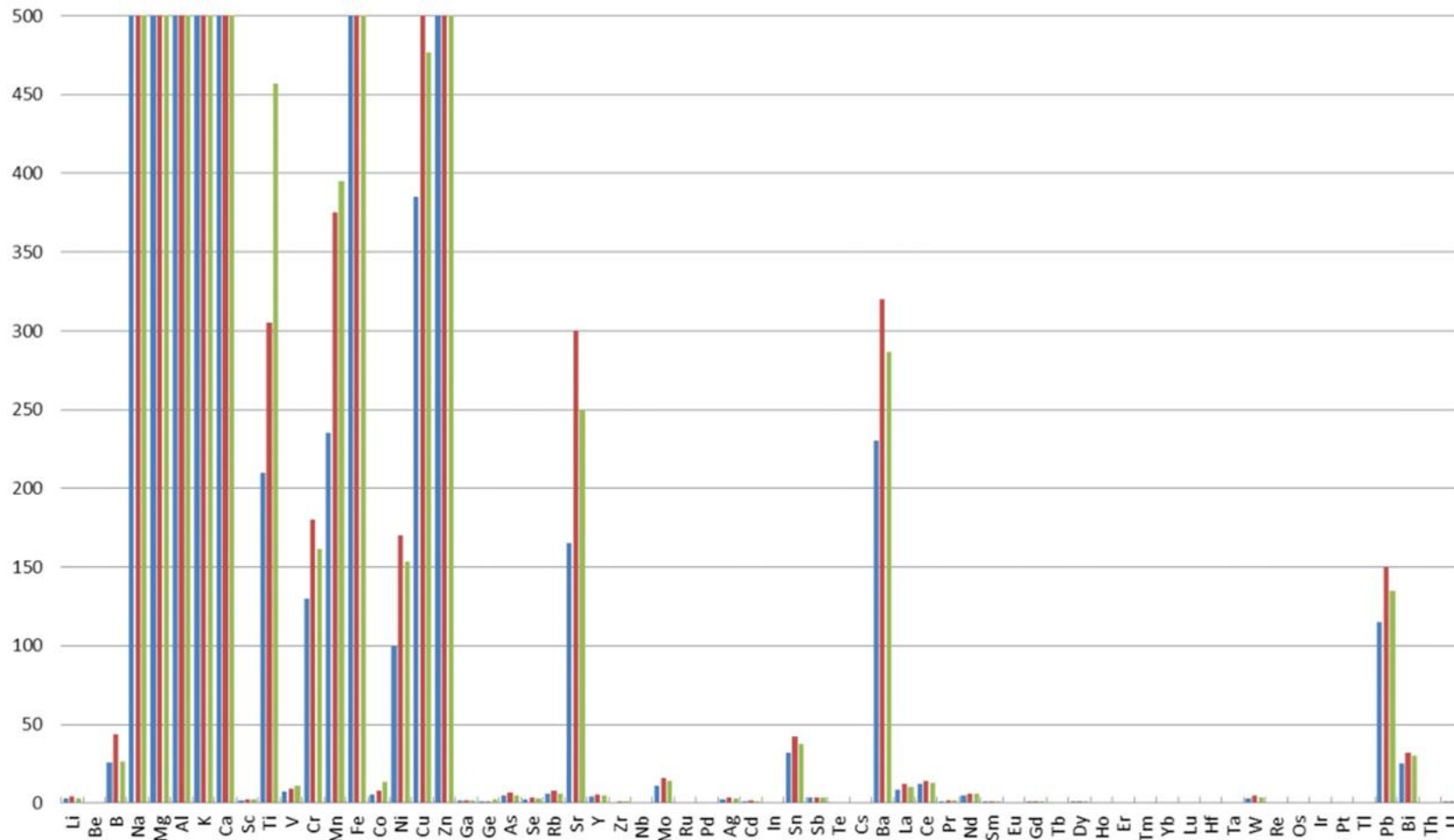


Figure II-4 – Concentration en métaux (mg/kg MS) dans les boues brutes (bleu), fermentées (rouge) et déshydratées (vert) de la station d'épuration de Venlo (échelle tronquée à 500 mg/kg MS) (Roest, de Buijzer and Palmen, 2018)

<p>RESRECOVERY PARTIE 4 : RECUPERATION DES METAUX DANS LES EAUX USEES</p>	<p>PR2301553_240926_Métaux</p>
	<p>Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD avec la collaboration d'Arthur PRON et Manon DOSSIER</p>
	<p>Page 11 sur 55</p>

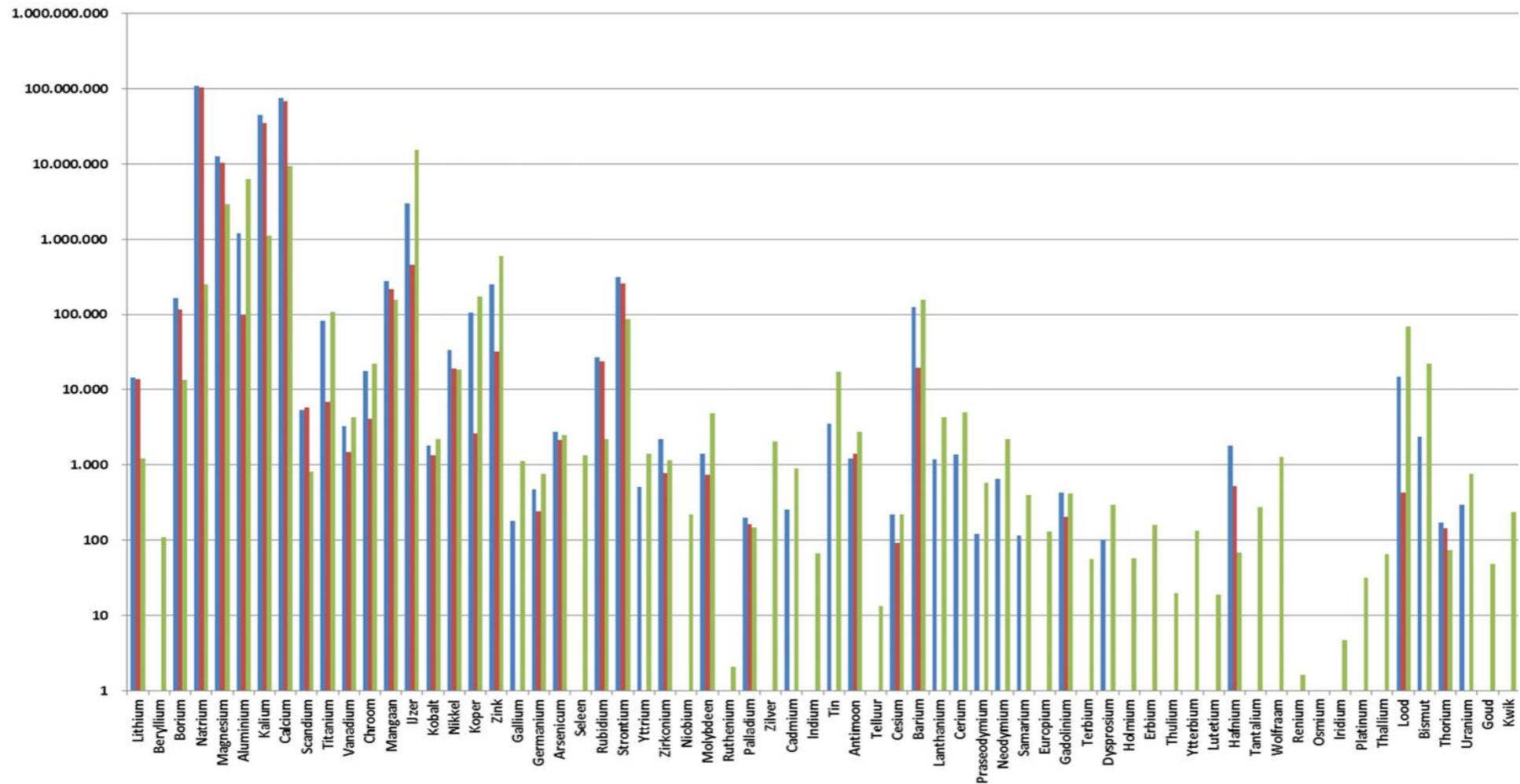


Figure II-5 - Charge potentielle en métaux dans les eaux brutes [bleu], l'effluent traité [rouge] et les boues [vertes] des stations d'épuration néerlandaises (kg/an/10⁶ EH ; échelle logarithmique). (Roest, de Buijzer and Palmen, 2018)

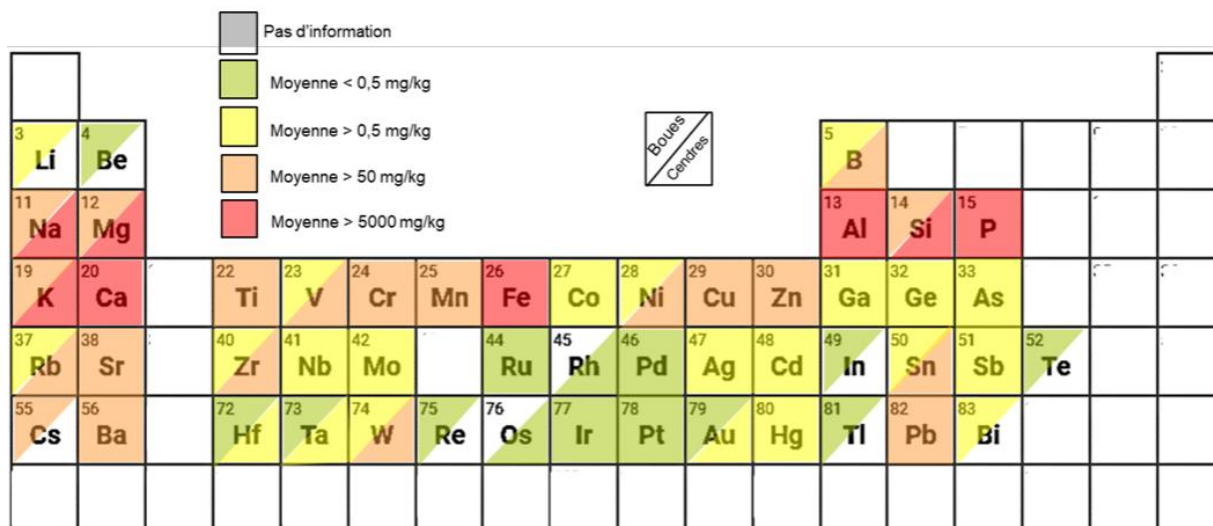
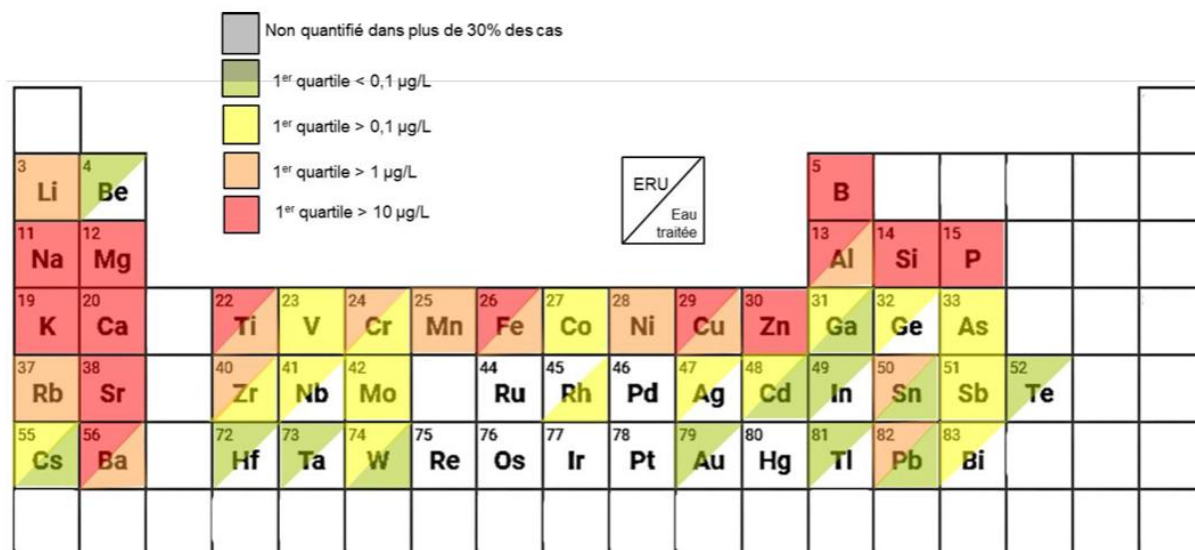


Figure II-6 - Concentration de 49 métaux et du phosphore comparées dans des matrices liquides (au-dessus) (eau brute et eau traitée) et dans des matrices solides (en dessous) (boues brutes et cendres de boues). Dans le premier tableau, les données font référence au 1^{er} quartile par manque de données homogènes entre les différentes études compilées (Varenes, 2021)

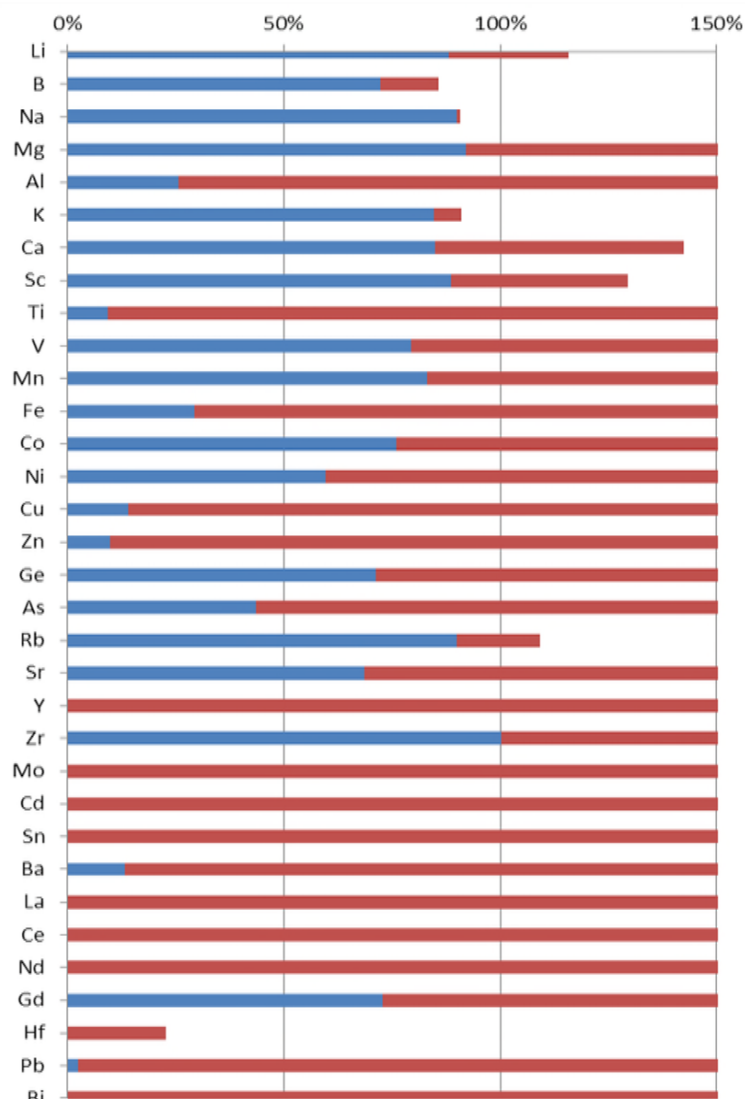


Figure II-7 - Part de métaux éliminés de l'eau brute via l'effluent traité [bleu] ou la boue [rouge], plafonnée à 150%. En théorie 100%. (Roest, de Buijzer and Palmen, 2018)

II-1.1.1. Exemples de concentration en métaux dans les eaux brutes de station d'épuration

Une étude (Roest, de Buijzer and Palmen, 2018) a été réalisée au Pays-Bas consistant à analyser la concentration de 66 éléments dans l'eau potable, les eaux usées brutes et traitées, dans les boues et les cendres de boues de quelques stations d'épuration aux Pays-Bas (ANNEXE 1 à ANNEXE 5)

Les résultats montrent que les 66 éléments sont présents de manière (au-dessus du seuil de quantification) dans un ou plusieurs des flux.

Les auteurs déduisent extrapolent ces résultats pour estimer (ANNEXE 6) la charge totale potentiellement présente dans les différents flux (influent, effluent et boues) pour l'ensemble du parc épuratoire hollandais (soit un peu plus de 24 millions d'EH).

Sur base de cette étude, (Roest, de Buijzer and Palmen, 2018) donnent plusieurs informations :

- La récupération des métaux dans l'eau potable n'est pas recommandée en raison de leur faible teneur.
- Il est conseillé de se concentrer sur l'élimination des métaux dans l'eau usée brute des stations d'épuration plutôt que dans les boues, en raison de la complexité du milieu.
- Certains métaux (cuivre, zinc, argent, titane, palladium, fer, or, tungstène) sont jugés intéressants pour la récupération en raison de leur valeur potentielle et de leur présence dans les flux d'eaux usées.

RESRECOVERY PARTIE 4 : RECUPERATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Métaux
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD avec la collaboration d'Arthur PRON et Manon DOSSIER
	Page 15 sur 55

II-2. Eaux usées industrielles et minières

Il existe un grand nombre d'effluents pouvant être ciblés pour la récupération des métaux, tels que les effluents d'industries chimique, hydrométallurgique, sidérurgique, de centrales thermiques, d'exhaures de mines, ou encore les lixiviats de centres d'enfouissement technique. La composition de ces effluents est propre à chaque site. Il n'est donc pas possible d'établir une liste représentative de la concentration des divers éléments récupérables. Toutefois, certains effluents peuvent avoir des concentrations assez similaires.

Le passé minier Belge a laissé des traces, telles que des galeries d'exhaure, creusées dans certaines configurations de paysage pour laisser l'eau s'écouler naturellement des galeries. Malgré l'arrêt de l'exploitation de ces sites qui remonte parfois à plus d'un siècle, la mise à nu de certains minerais, et la dissolution des métaux par suite de leur oxydation et acidification, est toujours une source de pollution. Cette pollution peut être notamment remarquée par la présence de dépôts rougeâtres, typiques d'oxydes de fer. L'abandon de l'exploitation de ces mines a aussi causé un remplissage des galeries d'eau, qui se charge ensuite en métaux et qui déborde dans les aquifères en plus des cours d'eaux. En particulier, les mines de fer, de zinc et de plomb (sous forme de sulfures) étaient actives en région Wallonne. Dans le cas des mines plus récentes, un traitement doit être prévu pendant plusieurs décennies consistant à oxyder le fer, précipiter les métaux sous forme d'hydroxydes, décanter et filtrer les dernières traces de matières en suspension. Ce traitement doit être mis en place jusqu'à ce que la teneur en métaux dans les effluents redevienne compatible avec le milieu naturel. (Suez - Degremont, no date)

II-2.1. Effluents de désulfuration des fumées des centrales thermiques

Les fumées issues des centrales thermiques nécessitent une désulfuration, généralement réalisée par lavage des gaz par voie humide. L'effluent résiduel contient un grand nombre de métaux dissous à des valeurs généralement supérieures aux normes de rejet. Un exemple de la composition de ces effluents est repris dans le Tableau II-2. (Suez - Degremont, no date)

Tableau II-2 - Exemple d'analyse d'effluents de lavage de gaz (Suez - Degremont, no date)

Eléments	Concentration (mg/L)
Mg	50 à 4000
Ca	300 à 5000
Cr	0,5
Cd	0,05 à 0,1
Pb	0,5 à 1,5
Hg	0,008 à 0,05
Cu	0,2 à 0,8
Zn	0,5 à 1,5
As	0,3 à 0,8
V	2 à 15

RESRECOVERY PARTIE 4 : RECUPERATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Métaux
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD avec la collaboration d'Arthur PRON et Manon DOSSIER
	Page 16 sur 55

Se	1 à 4
Be	1 à 2
Sb	0,1 à 0,4
B	1 à 10

II-2.2. Lixiviats de centres d'enfouissement

Les lixiviats de centres d'enfouissement de déchets peuvent contenir des concentrations relativement importantes de métaux et métaux lourds, en fonction du type de déchets, de l'âge du dépôt et de conditions locales, telles que la pluviosité. (Baun and Christensen, 2004) synthétisent au Tableau II-3 des données issues de la littérature. Les ordres de grandeurs sont en général inférieurs aux influents de STEP rapportés en II-1.1.1.

Tableau II-3 : Concentrations typiques en métaux (lourds) et autres paramètres dans les lixiviats de centres d'enfouissement (tiré de (Baun and Christensen, 2004)) – les concentrations sont en mg/L sauf autrement spécifié.

Parameter	Range	Country	Ref.	Parameter	Range	Country	Ref.	Parameter	Range	Country	Ref.	Parameter	Range	Country	Ref.
pH	4.5-9	D	a, b	NH ₄	39-3860	D	a, b	Fe	3-2100	D	a, b	Cu	0.004-1.4	D	a, b
	4.5-8.6	DK	c, d		0.05-910	DK	c, d		0.08-180	DK	c, d		0.0005-0.67	DK	c, d
	4.5-8.2	USA	e, f		< 0.25-1560	UK	g		10-1100	USA	e, f		0.18-1.30	USA	f
	6.4-8.0	UK	g		84-2070	HK	h		0.1-664	UK	g		< 0.02-0.16	UK	g
	7.2-8.4	HK	h		21-292	N	f		1.14-5	HK	h		0.01-0.13	HK	h
	5.9-7.0	N	f		103-1247	F	i		11.5-234	N	f		0.008-0.085	N	f
7.8-8.4	F	i						0.3-10	F	i					
COD ¹	500-60,000	D	a, b	SO ₄	10-1750	D	a, b	Mn	0.03-65	D	a, b	Hg	0.0002-0.05	D	a
	16-2300	DK	c, d		0.5-820	DK	c, d		0.01-20	DK	c, d		0.00005-	DK	c, d
	50-62 000	USA	e, f		< 5-739	UK	g		0.06-23.2	UK	g		0.019	UK	g
	< 10-33 700	UK	g		10-100	N	f		0.05-1.30	HK	h		< 0.0001-		
	147-1670	HK	h		<5-506	F	i				0.001				
	110-9425	N	f												
400-8000	F	i													
TOC ²	1-670	DK	c, d	Ca	10-2500	D	a, b	As	0.005-1.6	D	a, b	Ni	0.02-2.05	D	a, b
	2.8-5690	UK	g		6-660	DK	c, d		0.0005-0.13	DK	c, d		0.001-3.2	DK	c, d
	30-1700	N	f		60-1440	UK	g		< 0.001-0.049	UK	g		0.10-1.20	USA	f
	100-2700	F	i		99-400	N	f				< 0.03-0.33		UK	g	
				15-246	F	i			0.04-0.18	HK	h				
									0.005-0.12	N	f				
Spec. cond. ³ (µS/cm)	190-8900	DK	c, d	Na	50-4000	D	a, b	Cd	0.0005-0.14	D	a, b	Pb	0.008-1.02	D	a, b
	500-35 000	USA	e		7-1000	DK	c, d		0.00002-0.030	DK	c, d		0.0005-1.5	DK	c, d
	503-18 400	UK	g		10-3700	USA	e		0.001-0.130	USA	e, f		< 0.1-1.40	USA	f
	2500-12 000	HK	h		12-3000	UK	g		< 0.01-0.03	UK	g		< 0.04-0.28	UK	g
	655-3380	N	f		132-1190	HK	h		< 0.01-0.02	HK	h		0.03-0.12	HK	h
	5000-18 200	F	i		34.8-462	N	f		0.0001-0.002	N	f		0.001-0.015	N	f
				519-2957	F	i									
TAL ⁴ (meq/l)	6-230	D	a	Mg	40-1150	D	a, b	Co	0.004-0.95	D	a, b	Zn	0.03-120	D	a, b
	4-88	DK	c, d		3-430	DK	c, d		0.001-0.010	DK	c, d		0.00005-7.2	DK	c, d
	26-130	USA	f		18-470	UK	g		0.004-0.033	N	f		5.3-155	USA	f
	75-180	UK	g		9-63	HK	h				< 0.01-6.70		UK	g	
	6.2-41	N	f		13-96	N	f				0.13-2.55		HK	h	
	12-139	F	i		51-271	F	i				0.055-2.65		N	f	
									0.1-0.7	F	i				
Cl	100-5000	D	a, b	K	10-2500	D	a, b	Cr	0.03-1.6	D	a, b				
	10-3200	DK	c, d		1-1100	DK	c, d		0.0005-1.3	DK	c, d				
	10-6000	USA	e		2.7-1480	UK	g		0.05-1.05	USA	f				
	27-3410	UK	g		78-632	HK	h		< 0.04-0.56	UK	g				
	140-1337	HK	h		21.3-219	N	f		0.02-0.23	HK	h				
	68-680	N	f		202-1612	F	i		0.002-0.17	N	f				
	750-2185	F	i												

¹ Chemical oxygen demand; ²Total organic carbon; ³Specific conductivity; ⁴Total alkalinity.

^aEhrig (1988); ^bEhrig (1983); ^cKjeldsen and Christophersen (2001); ^dJørgensen and Kjeldsen (1995); ^eKrug and Ham (1997); ^fJohansen and Carlson (1976); ^gRobinson (1995); ^hChu et al. (1994); ⁱClement and Thomas (1995).

D, Germany; DK, Denmark; F, France; HK, Hong Kong; N, The Netherlands; UK, United Kingdom; USA, United States of America.

II-2.3. Effluents industriels

Un large spectre de métaux peuvent être présents dans différents effluents industriels, rarement seuls ce qui limite significativement les possibilités de récupération sélective.

On citera par exemple les effluents de tannerie et de l'industrie du cuir (Cr, K, Mg, Na), de fonderie et de traitement de surface des métaux (Au, cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, Pd, Pt, Se, Si, Zn), impressions et teinture (Cr, Sb), activités minières (Ag, As, B, Ca, Cd, Cu, fe, K, Mn, Na, Ni, Pb, Pd, Pt, Sb, Se, Si, Th, U, Zn) (Staszak and Wieszczycka, 2023)

III. ASPECTS FINANCIERS DE LA RÉCUPÉRATION DES MÉTAUX ET CRITICITÉ DES RESSOURCES

RESRECOVERY PARTIE 4 : RECUPERATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Métaux
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD avec la collaboration d'Arthur PRON et Manon DOSSIER
	Page 18 sur 55

III-1. Aspects financiers

(Varenes, Blanc, Azaïs and J. M. Choubert, 2023) ont réalisé une revue de la littérature et ont collecté des informations financières concernant le prix du marché des métaux en 2019 (1\$ = 0,8931€), provenant des transactions moyennes issues des bilans annuels de l'USGS (United States Geological Survey).

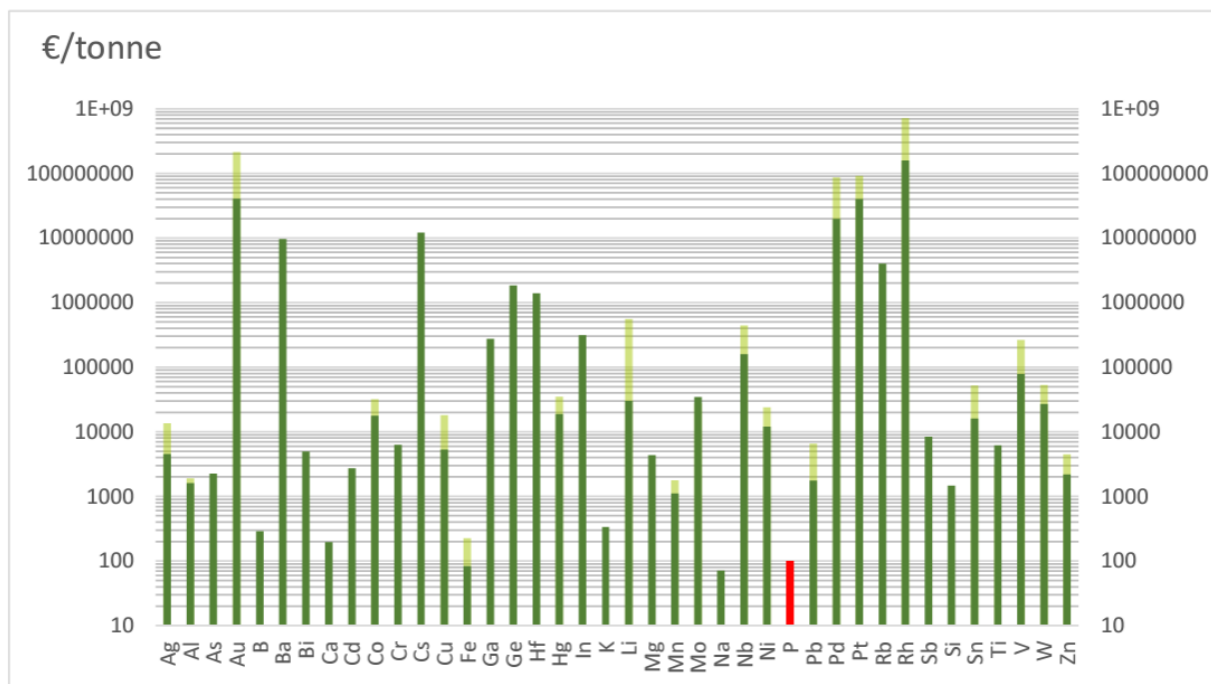


Figure III-1 - Cours des métaux en 2019 (vert foncé) et extrapolation en 2039 (vert clair) (Varenes, 2021)

Le potentiel financier (€/an) y a été défini par le revenu annuel maximal associé à la récupération de chaque métal. Celui-ci est estimé en multipliant ces deux paramètres :

- Le prix moyen de transaction en 2019 (€/tonne)
- Le flux annuel de métaux contenu dans les eaux usées brutes (tonne/an), pour une station d'épuration d'un million d'EH.

La Figure III-2 montre le potentiel financier annuel de la récupération des métaux dans une station d'1 M EH. Celui-ci varie du cadmium avec 20 €/an à 30 000 000 €/an pour le silicium. La plupart des métaux (Pb, Bi, Ah, In, Co, W, B, Cr, Sn et Fe) montrent un potentiel financier de l'ordre du millier d'€/an, tandis que d'autres métaux ont un potentiel de l'ordre de 100 000 €/an (Al, Ca, Cs, Rh et Au), voire 1 000 000 €/an (Rb, Mg, K, Na). Parmi les métaux avec un haut potentiel financier, on retrouve notamment deux profils extrêmes :

- Le groupe Au, Pd, Pt, Rh : entre 20 000 et 200 000 €/an malgré leur faible concentration.

RESRECOVERY PARTIE 4 : RECUPERATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Métaux
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD avec la collaboration d'Arthur PRON et Manon DOSSIER
	Page 19 sur 55

- Le groupe Mg, Na, Ca et K : potentiel financier de 440 000 €/an malgré leur faible prix de marché, au vu de leur concentration très importante (> 1500 t/an)

À noter que le prix des métaux dépend très fortement de leur forme, de leur pureté et de leur conditionnement, ce qui peut expliquer le prix particulièrement élevé de certains métaux, pourtant retrouvés en concentration abondante dans la croûte terrestre ou encore dans l'eau de mer (silicium, magnésium).

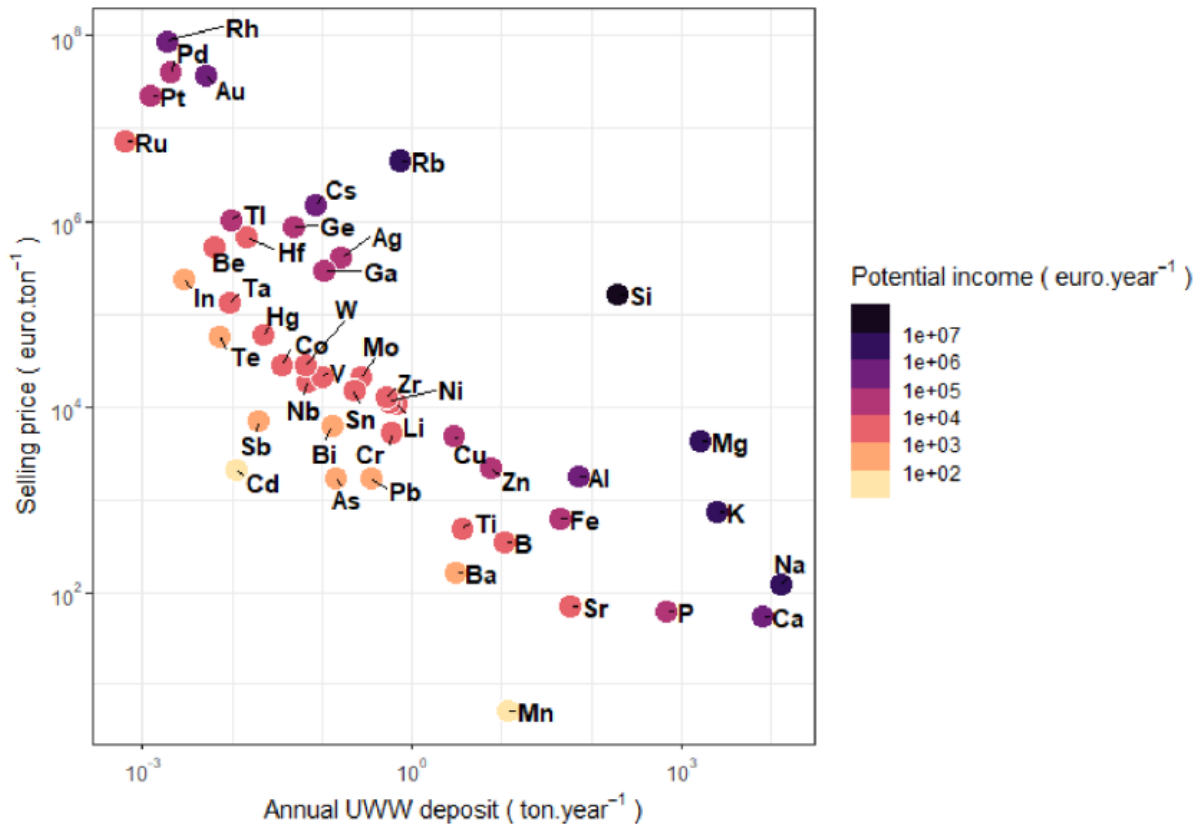


Figure III-2 - Potentiel financier pour la récupération totale de 47 métaux et du phosphore, basé sur les prix de vente moyens de l'année 2019 et le gisement annuel dans les eaux usées urbaines pour 1 MEH (Varenes et al., 2023)

III-2. Criticité des ressources

(Varenes, Blanc, Azais and J. M. Choubert, 2023) se sont basés sur la criticité pour évaluer l'importance des métaux à partir d'une adaptation des trois piliers de la criticité décrits par (Graedel et al., 2015) qui permet d'évaluer le risque d'approvisionnement des métaux et leur importance pour l'industrie. Les données utilisées proviennent principalement du BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières), le service géologique national français, ou, en l'absence de ces données, de l'évaluation de l'Union européenne.

Le BRGM utilise une échelle de notation de 1 à 5, où 5 représente le niveau le plus élevé de **risque d'approvisionnement**. Cette évaluation prend en compte divers aspects tels que la quantité et la

RESRECOVERY PARTIE 4 : RECUPERATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Métaux
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD avec la collaboration d'Arthur PRON et Manon DOSSIER
Page 20 sur 55	

concentration géographique des ressources et réserves, la concentration des mines et des raffineries, les restrictions au libre-échange des matières premières, ainsi que les problèmes environnementaux spécifiques à l'industrie.

L'importance pour l'industrie est une estimation de la perception du risque associé à une éventuelle pénurie d'approvisionnement, évaluée par les représentants de l'industrie.

Pour évaluer le **pilier environnemental**, la méthode utilisée prend en considération la réglementation française lorsque le métal est surveillé dans la matrice finale (comme les normes de qualité environnementale pour les eaux de surface, les niveaux de concentration dans les boues pour leur application au sol ou au compostage, etc.). Les métaux qui ne sont pas surveillés sont catégorisés comme ayant une faible importance pour ce pilier. Le Tableau IX-1 montre l'évaluation environnementale de 49 métaux, basée sur la fréquence à laquelle ces métaux sont mentionnés dans différentes réglementations concernant les matrices environnementales suivantes : décharges, amendement des sols par épandage, compostage, la directive-cadre européenne sur l'eau et la surveillance des eaux de surface. Une cotation de 1 à 5 est utilisée (1 correspond à un métal qui n'est jamais mentionné et 5 à un métal surveillé/ réglementé dans toutes les matrices prises en compte). Il apparaît que le cadmium, le plomb, le mercure et le nickel ont le plus haut score, suivi du zinc, cuivre et chrome, arsenic, molybdène, baryum et antimoine. Si on se focalise sur l'aspect environnemental, ces éléments pourraient être plus susceptibles que les autres d'être la cible d'une élimination et d'une récupération.

Tableau III-1 - Quarante-neuf métaux classés selon leur évaluation dans le pilier environnemental (Varenes, Blanc, Azais and J. M. Choubert, 2023)

Metal	Landfill (1)	Spreading (2)	Composting (3)	WFD (4)	RSDE / SW state (5)	SW monitoring (6)	Mark	Metal	Landfill	Spreading	Composting	WFD	RSDE / SW state	SW monitoring	Mark
Bi							1	W							1
B							1	Zr							1
Ca							1	Al						X	1,67
Cs							1	Be						X	1,67
Ga							1	Co						X	1,67
Ge							1	Fe						X	1,67
Au							1	Li						X	1,67
Hf							1	Mg						X	1,67
In							1	Ag						X	1,67
Ir							1	Tl						X	1,67
Mn							1	Sn						X	1,67
Nb							1	Ti						X	1,67
Os							1	V						X	1,67
Pd							1	Sb	X					X	2,33
Pt							1	Ba	X					X	2,33
K							1	Mo	X					X	2,33
Re							1	As	X		X		X	X	3,67
Rh							1	Cr	X	X	X		X	X	4,33
Rb							1	Cu	X	X	X		X	X	4,33
Ru							1	Zn	X	X	X		X	X	4,33

Si						1	Cd	X	X	X	X	X	X	5
Na						1	Pb	X	X	X	X	X	X	5
Sr						1	Hg	X	X	X	X	X	X	5
Ta						1	Ni	X	X	X	X	X	X	5
Te						1								

- (1) : Décision n° 2003/33/CE du 19/12/02 établissant des critères et des procédures d'admission des déchets dans les décharges, conformément à l'article 16 et à l'annexe II de la directive 1999/31/CE
- (2) : Arrêté du 8 janvier 1998 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles pris en application du décret n° 97-1133 du 8 décembre 1997 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées
- (3) : La norme NF U 44-051 : Amendements organiques - Dénominations spécifications et marquage.
- (4) : Directive Cadre européenne sur l'Eau, 2000/60/CE
- (5) : Arrêté du 24 août 2017 modifiant dans une série d'arrêtés ministériels les dispositions relatives aux rejets de substances dangereuses dans l'eau en provenance des installations classées pour la protection de l'environnement
- (6) : Arrêté du 25 janvier 2010 établissant le programme de surveillance de l'état des eaux en application de l'article R. 212-22 du code de l'environnement

Les métaux les plus critiques sont ceux pour lesquels au moins deux des trois critères sont classés comme forts ou très forts. En ce qui concerne les métaux non critiques évalués par l'Union européenne, ils seraient considérés comme « moins critiques » en cas de faible ou moyen niveau d'impact environnemental. Ceux pour lesquels un fort impact environnemental est identifié sont automatiquement classés comme « plus critiques ».

La Figure III-3 montre les informations issues de l'analyse de criticité des métaux pour chaque pilier (importance stratégique (pour l'industrie française), risque d'approvisionnement et régulations environnementales).

As, B, Ba, Be, Bi, Co, Cr, Cu, Hf, Hg, Li, Mg, Nb, Ni, Pb, Pd, Pt, Rh, Sb, Sr, V, W, Zn, Zr sont les métaux les plus critiques, vingt d'entre eux sont même classés fort à très fort dans au moins deux des trois piliers. As, Hg, Pb et Zn sont principalement critiques en raison du risque environnemental qui leur est associé. Ces listes sont vouées à évoluer en fonction des conditions géopolitiques, industrielles ou réglementaires. (Varenes, Blanc, Azaïs and J. M. Choubert, 2023)

RESRECOVERY PARTIE 4 : RECUPERATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Métaux
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD avec la collaboration d'Arthur PRON et Manon DOSSIER
	Page 22 sur 55

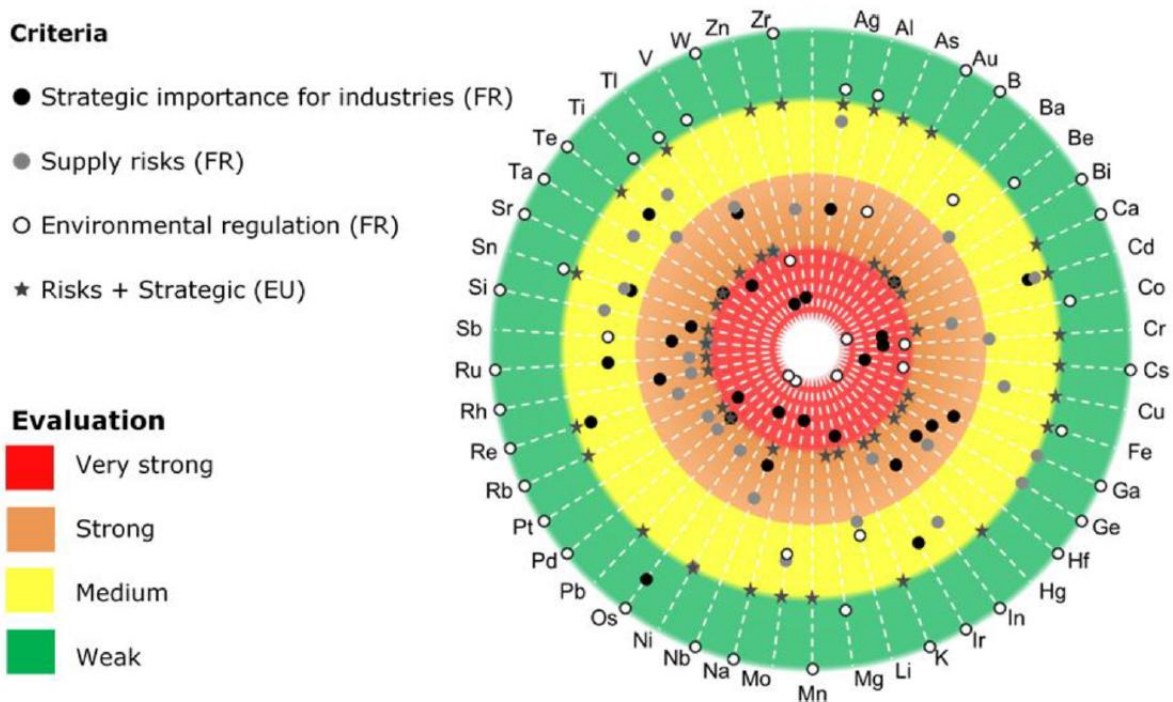


Figure III-3 - Évaluation de 49 métaux sur les piliers qui définissent la criticité pour les STEP françaises (Varenes, Blanc, Azaïs and J. M. Choubert, 2023)

III-3. Analyse des données

Le graphique repris à la Figure III-4 montre que certains métaux pourraient être une source économique intéressante s'ils étaient récupérés et purifiés. En tête de liste, le **magnésium** se montre particulièrement intéressant (7 €/EH.an). Pour le calcium, potassium et sodium rassemblés, le potentiel financier annuel serait de 3,3 M€/an pour une STEP de 1M EH.

Les métaux les plus présents dans la réglementation environnementale (Tableau IX-1 et Figure III-3) ne sont pas forcément les plus intéressants économiquement pour une récupération (en particulier Pb, Cd, Hg). La décision concernant le chrome et le nickel est plus complexe : bien qu'ils présentent un faible potentiel financier, ils sont stratégiques, risqués et réglementés dans de nombreux compartiments. Les caractéristiques physico-chimiques du **chrome** indiquent qu'il est principalement présent dans les matières en suspension des eaux usées urbaines, ce qui suggère qu'il pourrait être récupéré à partir de cette fraction. En revanche, le nickel est réparti de manière équitable entre les eaux usées traitées et les matières en suspension, ce qui suggère qu'il est peu probable qu'il soit un candidat pour une technologie de récupération de métaux.

Le **palladium** et le **platine** sont plus précieux et garantissent au moins un rendement de 0,01 € par habitant et par an. Il serait préférable de les récupérer à partir des matières en suspension solides, où leur concentration est légèrement plus élevée (Figure II-6). Ces conclusions dépendent de la forme sous laquelle les métaux sont disponibles et des prix unitaires (€ par kilogramme). Ainsi, les prix du marché des métaux sont plus élevés que les prix de la bourse, dans un rapport allant de 10 à 10.000. Par exemple,

RESRECOVERY PARTIE 4 : RECUPERATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Métaux
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD avec la collaboration d'Arthur PRON et Manon DOSSIER

le fer peut être acheté pour 38 €/kg, l'arsenic pour 22.000 €/kg et le rhénium pour 530 000 €/kg dans le catalogue de réactifs chimiques de Merck, par rapport à des cours boursiers de 0,62 /kg, 1,72 €/kg et 86.700 €/kg respectivement. Ces différences s'expliquent par la pureté du produit et les conditionnements : les métaux sont généralement commercialisés avec une pureté de plus de 95 % et en petites quantités. Certains mélanges ou minerais peuvent également représenter un intérêt économique qui doit être étudié dans une perspective d'économie circulaire au niveau régional.

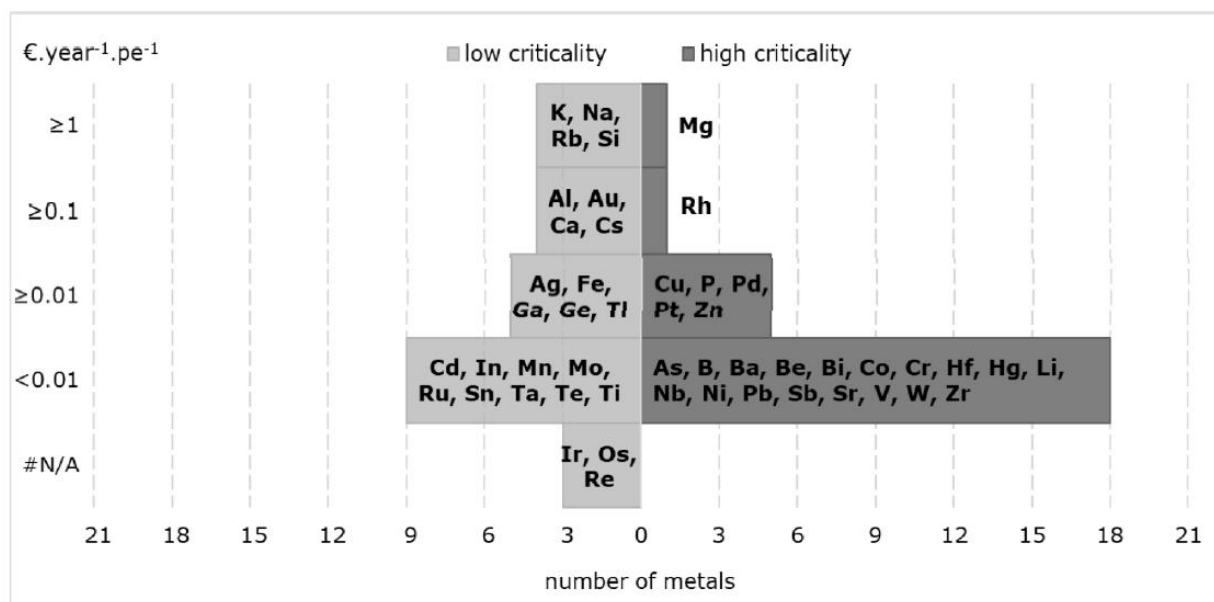


Figure III-4 - Classification des métaux selon leur potentiel financier ramené par EH (€/EH.an) et leur criticité (Varenes, Blanc, Azais and J. M. Choubert, 2023)

Le Tableau III-2 fait la synthèse des différents critères pris en compte par les auteurs des études précédemment citées (essentiellement les auteurs français). L'intérêt de la récupération au regard d'un critère donné est classé par couleur (vert (très favorable) -orange-jaune-rouge (très défavorable)). La facilité de récupération liée à la matrice (eau ou boues) est également prise en compte pour tenter de mettre en évidence les métaux « prometteurs » : en bleu à partir de l'effluent, en brun à partir des boues. On notera que les auteurs hollandais n'arrivent pas aux mêmes conclusions.

Tableau III-2 : Synthèse des critères pris en compte pour l'évaluation des métaux ((Elodie Varennes et al., 2021) ; (Varennes, Blanc, Azaïs and J.-M. Choubert, 2023) (Roest, de Buijzer and Palmen, 2018)

	gisement dans les ERU	Criticité (très) haute (France)	Haut potentiel financier	majoritairement vers effluents liquides	majoritairement vers boues	shortlist d'intérêt NL	Commentaire
Mg	X	X	X	X			gisement important-criticité importante-potentiel financier important (7€/EH.an)
Ca	X		X	X			gisement et potentiel financier
K	X		X	X			gisement et potentiel financier
Na	X		X	X			gisement et potentiel financier
Fe	X		X		X	X	réutilisation comme réactif directement dans la STEP
Cu	X	X	X		X	X	potentiel financier trop bas, présent dans les boues, pas de récupération sélective
B	X	X	X	X			gisement et criticité
Cr	X	X	X		X		potentiel financier trop bas, présent dans les boues, pas de récupération sélective
Li	X	X	X	X			gisement et criticité
Ni	X	X	X	X			gisement et criticité
Sr	X	X	X	X			gisement et criticité
V	X	X	X		X		critique - récupération dans les boues/les cendres mais faible potentiel financier
Ba	X	X		X			gisement et criticité
Zn	X	X	X		X	X	criticité uniquement environnementale
Pb	X	X			X		criticité uniquement environnementale
Al	X		X		X		réutilisation comme réactif directement dans la STEP
Rb	X		X	X			gisement et potentiel financier
Si	X		X	X			gisement et potentiel financier
Ag	X		X		X	X	
Mo	X		X		X		
Sn	X		X		X		
Ti	X		X		X	X	
Mn	X				X		
Be	X	X	X		X		critique - récupération dans les boues/les cendres mais faible potentiel financier
Co	X	X	X		X	X	critique - récupération dans les boues/les cendres mais faible potentiel financier
Hf	X	X	X				
Nb	X	X	X				

W	X	X	X		X	X	critique - récupération dans les boues/les cendres mais faible potentiel financier
Zr	X	X	X		X		critique - récupération dans les boues/les cendres mais faible potentiel financier
Bi	X	X					
Sb	X	X				X	
Hg	X	X	X				criticité uniquement environnementale
As	X	X		X			criticité uniquement environnementale
Au	X		X			X	
Cs	X		X				
Ga	X		X			X	
Ge	X		X				
Ta	X		X			X	
Cd	X				X		
In	X					X	
Te	X						
Rh	X	X	X		X		très critique - potentiel financier - récupération dans les boues/les cendres
Pd	X	X	X		X	X	très critique - potentiel financier - récupération dans les boues/les cendres
Pt	X	X	X		X		très critique - potentiel financier - récupération dans les boues/les cendres
Ir	X					X	
Os	X						
Re	X						
Ru			X				
Ce						X	
Sc							
Se							
U							

À remarquer, le magnésium est une exception de par ses très fortes concentrations, sa criticité (CRM – UE) et son potentiel financier important. Il s’agit donc d’une cible idéale, peu importe la matrice dans laquelle il est retrouvé.

Enfin, le coût et la faisabilité des technologies de récupération doivent également rentrer en compte dans les critères. (Varenes, Blanc, Azaïs and J. M. Choubert, 2023) (Varenes, 2021)

IV. TECHNOLOGIES DE RÉCUPÉRATION DES MÉTAUX

La possibilité de récupérer les métaux dépend du type de métal et de sa forme chimique. Par exemple, un métal peut être présent sous forme dissoute ou adsorbée sur des particules, ainsi le chrome (III) est essentiellement présent sous forme particulaire ou adsorbée sur des particules, tandis que le chrome (IV) est principalement présent sous forme dissoute. La spéciation de métaux tels que l'arsenic, le chrome et le manganèse est très complexe. Cela s'applique à presque tous les éléments sauf les alcalins et alcalino-terreux, donc aux métaux de transition, actinides, lanthanides. En milieu aqueux aéré, ces derniers sont souvent présents sous forme oxydée.

Dans le cas de la lixiviation acide à partir, par exemple, des cendres, de nombreux métaux peuvent être présents sous forme dissoute à faible pH et avoir une charge positive. Cela affecte la manière dont le métal peut être récupéré, les techniques diffèrent évidemment selon que le métal est dissous ou adsorbé.

La sélection d'une technologie (Tableau IV-1) pour récupérer les métaux présents dans les eaux et les boues dépend de plusieurs facteurs, notamment les types de métaux présents, leurs concentrations initiales, ainsi que la présence d'autres composés. Ce choix est également influencé par divers critères tels que l'impact environnemental, les coûts d'investissement et de fonctionnement, la flexibilité et la fiabilité. Dans la plupart des cas, les données disponibles sur les technologies de récupération proviennent de tests réalisés sur des eaux synthétiques dopées, où un seul métal est souvent présent à des concentrations élevées. A priori, les technologies qui seraient les plus adaptées sont **l'adsorption**, la **précipitation** et **l'échange d'ions**.

Au vu de la faible concentration des métaux dans les différentes matrices, et de la composition de celles-ci, une étape préliminaire de concentration et/ou de conversion chimique des métaux est souvent nécessaire en combinant dès lors plusieurs technologies. Le Tableau IV-2 reprend un ensemble de technologies utilisées pour 1) concentrer, 2) sélectionner et 3) transformer.

Il faut également distinguer élimination et récupération : le défi réside dans le fait que tant pour un flux aqueux que pour un flux solide tel que les cendres (qui peuvent éventuellement générer un flux aqueux après traitement), on part d'une solution contenant un large éventail de métaux (et d'autres substances). Pour une récupération ciblée, une technologie sélective est nécessaire. Si le seul objectif est de retirer un métal (par exemple pour améliorer la qualité des boues), une technique moins sélective peut suffire. (Roest, de Buijzer and Palmen, 2018) Mais il ne s'agit plus dans ce dernier cas de récupération de ressources valorisables.

RESRECOVERY PARTIE 4 : RECUPERATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Métaux
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD avec la collaboration d'Arthur PRON et Manon DOSSIER
	Page 27 sur 55

Tableau IV-1 – Principales technologies de récupération des métaux dans les eaux, boues et cendres issues de stations d'épurations, basé sur (Roest, de Buijzer and Palmen, 2018)

forme	Eaux brutes	Boues de STEP	Cendres de boues
Cation/Oxyde	Précipitation chimique Technologie (bio)électrochimique Électrodialyse Échange d'ions Technologie membranaire Adsorption Biosorption Électrolyse membranaire Photocatalyse	Échange d'ions	Échange d'ions
Matière organique	Technologie électrochimique	Coagulation chimique Flottation Technologie électrochimique Bio-lixiviation Extraction supercritique	Coagulation chimique Flottation Pyro- ou hydrométallurgie Bio-lixiviation Extraction supercritique
Matière inorganique	Technologie électrochimique	Technologie électrochimique Bio-lixiviation Extraction supercritique	Pyro- ou hydrométallurgie Bio-lixiviation Extraction supercritique

Tableau IV-2 – Plusieurs technologies peuvent être combinées pour concentrer les métaux, les sélectionner et /ou les transformer (Varenes, 2021)

Procédé	Concentrer	Sélectionner	Transformer
Coagulation-floculation	*	**	***
Précipitation	**	*	***
Electrochimie	**	***	*
Echange d'ions	**	***	*
Sorption-désorption	*	*	
Filtration membranaire	***	*	
Bioaccumulation	***	**	
Thermique	***		*
Solubilisation		*	**
Gélification		***	**
Ozonation			***

RESRECOVERY PARTIE 4 : RECUPERATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Métaux
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD avec la collaboration d'Arthur PRON et Manon DOSSIER
	Page 28 sur 55

Réduction chimique			**
Bio-lixiviation & extraction par solvants		**	
Flottation		**	

Le Tableau IV-3 compare les différentes techniques pouvant être utilisées pour récupérer les métaux dans les eaux usées, sur base des avantages et inconvénients. Les différentes technologies sont décrites dans la suite de ce chapitre.

Tableau IV-3 - Avantages et inconvénients de technologies de récupération de métaux des eaux usées (Abidli et al., 2022a)

<i>Techniques de Récupération</i>	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
<i>Adsorption</i>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ efficace même à faible concentration ✓ simple ✓ Relativement économique (régénération/recyclage et réutilisation des adsorbants) ✓ Faible production de boues ✓ Polyvalence : de nombreux choix d'adsorbants ✓ Stabilité et durabilité : supportent une large gamme de conditions de température et de pH 	<ul style="list-style-type: none"> × Faible sélectivité × Production de déchets ; adsorbants usagés × Toxicité : consommation élevée de produits chimiques nocifs pour la désorption × Dépendance de la structure et des propriétés de chaque adsorbant
<i>Échange d'ions</i>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Haute performance et sélectivité ✓ Prélèvement rapide et efficace ✓ production de boues faible ou nulle ✓ Régénération facile de la résine ; durée de vie prolongée ✓ Compacité 	<ul style="list-style-type: none"> × Coût élevé des matières premières × Phénomènes d'encrassement × Désactivation par oxydation de la résine par les produits chimiques × Performance fortement dépendante du pH et de la température × Inadapté pour le retrait simultané de plusieurs métaux
<i>Séparation par membrane</i>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Haute performance et sélectivité de séparation pour l'élimination des ions de métaux lourds ✓ Opérations simples et pratiques ✓ Moins de consommation de produits chimiques ✓ Compacité 	<ul style="list-style-type: none"> × Faible flux/écoulement de perméat × Problèmes d'encrassement et d'obstruction de membrane × Coût opérationnel et de maintenance élevé (consommation d'énergie et remplacement/régénération de la membrane suite aux phénomènes d'encrassement) × Faible stabilité mécanique sous haute pression × Risque de causer une pollution secondaire

<i>Extraction par solvant</i>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Conception et mise en œuvre simples ✓ Efficacité élevée ✓ Permet la récupération directe des métaux 	<ul style="list-style-type: none"> × Moins efficace à faible concentration × Utilisation de solvants hautement toxiques × Conditions de fonctionnement dangereuses : risque d'incendie (solvant inflammable) × Coût opérationnel élevé (solvants usagés non recyclables/non réutilisables) × pollution secondaire (élimination des solvants usagés dangereux)
<i>Précipitation chimique</i>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Procédé simple, pratique et direct ✓ Haut niveau d'efficacité et de sélectivité ✓ Méthode peu coûteuse (produits chimiques relativement peu coûteux) ✓ Accès immédiat aux métaux éliminés sous forme de produits à valeur ajoutée ✓ Peut être facilement combiné avec d'autres méthodes de traitement 	<ul style="list-style-type: none"> × Moins efficace à faible concentration × Peut nécessiter des étapes de prétraitement/pré-concentration × Nécessite l'ajout d'une grande quantité de produits chimiques/agents précipitants × Procédé fortement dépendant du pH × Production de boues hautement toxiques causant une pollution secondaire et des problèmes d'élimination × Procédé lent de précipitation des métaux et de sédimentation × La séparation et la récupération des précipités peuvent être difficiles
<i>Coagulation-floculation</i>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Opérations simples, pratiques et directes ✓ Grande capacité de déshydratation ✓ Efficacité relativement élevée pour l'élimination des métaux lourds 	<ul style="list-style-type: none"> × Consommation élevée de produits chimiques × Coût opérationnel élevé (nécessite souvent des agents coagulants/floculants coûteux) × Peut causer une pollution secondaire en générant une grande quantité de boues
<i>Flottation</i>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Haute sélectivité et efficacité d'élimination des métaux ✓ Faible génération de boues ✓ Opération simple et directe ✓ Débits de débordement élevés ✓ Fort potentiel pour les applications industrielles 	<ul style="list-style-type: none"> × Moins efficace à faible concentration × Consommation élevée d'énergie × Investissement initial, coût d'exploitation et de maintenance élevés
<i>Bioremédiation</i>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Procédé respectueux de l'environnement ✓ Opérations simples ✓ Efficacité élevée ✓ Grande résistance aux conditions difficiles ✓ Approvisionnement fiable : micro-organismes 	<ul style="list-style-type: none"> × Cinétique lente × Mécanismes encore peu compris × Méthode non entièrement établie, plus de recherche est nécessaire × Croissance lente (phytoremédiation)

IV-1. Adsorption

Le procédé d'adsorption être défini comme le transfert, la fixation et l'accumulation de contaminants sur une surface solide à partir de milieux aqueux grâce à divers phénomènes tels que la coordination de surface, la complexation, l'attraction électrostatique, les forces de van der Waals intermoléculaires, etc. Les substances adsorbées considérées peuvent être sous forme dissoutes ou encore sous forme particulaires.

RESRECOVERY PARTIE 4 : RECUPERATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Métaux
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD avec la collaboration d'Arthur PRON et Manon DOSSIER
	Page 30 sur 55

L'adsorbant est placé dans des colonnes dans lesquelles sont envoyées les eaux usées contenant le métal devant être récupéré. L'adsorbant peut être de plusieurs natures, organique ou minéral, fonction du ou des métaux à récupérer. Quand il est saturé, un procédé de désorption est ensuite réalisé par voie thermique ou, plus généralement, élution par un solvant adapté à l'adsorbant. Le flux résultant est ainsi plus concentré que l'eau usée initiale et peut subir ensuite d'autres procédés pour sélectionner et concentrer le métal.

Les sorbants sont de multiples natures : charbon actif, gel de silice, alumine activée, zéolites, silicates, polymères, ou encore des déchets tels que des cendres volantes, du laitier, de l'hydroxyde de titane, des oxydes de fer et autres composites... Certains matériaux naturels, tels que les zéolites, peuvent être modifiés pour accroître la sélectivité et l'efficacité d'adsorption, par exemple pour Pb, Cd, Cr, À noter que les zéolites captent également des métaux par un procédé d'échange d'ions.

Les adsorbants organiques peuvent être une alternative pour récupérer les métaux présents dans les eaux usées. Ainsi la biosorption utilise des adsorbants naturels, tels que les coques de noisette, la cendre de coque de riz, la coque de jacquier, etc., en les modifiant chimiquement comme pour du charbon activé. Les hydrogels, des polymères hydrophobes réticulés, peuvent également être utiles pour la récupération des métaux.

Dans le cas de la récupération des métaux, les adsorbants montrant les meilleures efficacités sont le gel de silice, l'alumine activée, le charbon activé et les zéolites. (Kagalkar, Som and Dharaskar, 2023)

IV-1.1. Adsorption-réduction

Le procédé d'adsorption-réduction repose sur l'utilisation de matériaux adsorbants fonctionnels avancés qui combinent à la fois des capacités physique d'adsorption et chimique de réduction. Ces matériaux ont démontré leur efficacité dans la capture et la réduction de plusieurs polluants métalliques, notamment le chrome, le plomb, l'argent, le mercure, l'or et l'uranium. Parmi ces matériaux, les adsorbants à base de nano-fer zéro-valent et leurs dérivés sont largement utilisés. Ceux-ci présentent des caractéristiques favorables telles qu'une forte activité de surface, un fort potentiel de réduction, et une propriété de récupération magnétique. Cependant, malgré ces avantages, ils présentent des limitations telles que l'agglomération des particules, limitant ainsi leur utilisation à grande échelle. Une étude récente a toutefois démontré la faisabilité à grande échelle de la récupération d'or à partir d'effluents industriels (effluents d'hydrométallurgie) : 5 kg d'or récupérés à partir de 120.000 m³ d'effluents(Li *et al.*, 2019)

Le mécanisme de récupération des métaux par adsorption-réduction implique souvent la réduction des ions métalliques en présence de métaux zéro-valents, ce qui conduit à la formation de composés métalliques moins toxiques. Par exemple, dans le cas du cuivre, l'adsorption sélective de Cu(II) est

RESRECOVERY PARTIE 4 : RECUPERATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Métaux
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD avec la collaboration d'Arthur PRON et Manon DOSSIER
	Page 31 sur 55

réalisée via un processus de cémentation⁵, entraînant la réduction des ions cuivre en cuivre métallique. De manière similaire, la réduction du chrome hexavalent (Cr(VI)) en chrome trivalent (Cr(III)) est réalisée, suivie de la co-précipitation des produits.

D'autres matériaux tels que le dioxyde de titane, le sulfure de molybdène, les nanotubes de carbone, le graphène oxydé et divers matériaux carbonés poreux ont été étudiés pour leur capacité à adsorber et réduire les ions métalliques des eaux usées. Après le processus d'adsorption-réduction, les adsorbants chargés de métaux peuvent être régénérés et recyclés à l'aide de traitements alcalins (typiquement NaOH), acides (HCl, HNO₃, H₂SO₄) ou de chélation (EDTA), permettant ainsi leur réutilisation pour plusieurs cycles d'adsorption-désorption. (Abidli *et al.*, 2022a)

IV-1.2. Adsorption-oxydation

Ce procédé combiné et/ou simultané d'adsorption-oxydation est principalement conçu pour l'élimination de polluants métalliques spécifiques des eaux usées, tels que l'antimoine (oxydation de Sb(III) en Sb(V)), le thallium (oxydation de Tl(I) en Tl(III)) et surtout l'arsenic (oxydation d'As(III) en As(V)). Cette technologie s'avère très efficace pour l'élimination des métaux, néanmoins, des méthodes efficaces de désorption doivent encore être mises au point pour permettre la réutilisation du sorbant et la récupération des métaux. (Abidli *et al.*, 2022a)

IV-2. Résines échangeuses d'ions

L'échange d'ions est une méthode communément utilisée pour l'élimination et la récupération des métaux des eaux usées. Les résines échangeuses d'ions spécifiques sont largement disponibles commercialement et peuvent être considérées comme une catégorie particulière d'adsorbant. Dans un processus d'échange d'ions typique, la réaction chimique réversible d'échange se produit entre un ion de la solution contaminée et un ion de charge similaire attaché à la phase solide (résine).

Les résines d'échange d'ions acides et basiques possèdent divers groupes fonctionnels, notamment des groupes à base de N/O/S (par exemple, carboxyliques, sulfoniques, amines, groupes ammonium quaternaire), qui permettent de tels phénomènes d'échange d'ions réversibles et peuvent également mettre en jeu des complexes de surface et des voies d'attraction électrostatique. Les résines d'échange d'ions, qu'elles soient synthétiques ou naturelles, possèdent une grande capacité d'échange, ce qui leur permet de retirer efficacement les ions métalliques contaminants des solutions aqueuses. L'un des principaux avantages de ces résines est leur spécificité, fournissant une capacité de séquestration préférentielle des ions métalliques cibles en présence d'autres co-ions.

Il est à noter principalement deux types de résines : les résines échangeuses de cations et les résines échangeuses d'anions. Néanmoins, puisque la plupart des ions métalliques présents dans les eaux usées

⁵ La cémentation est une technique couramment utilisée en hydrométallurgie. Cette réaction d'oxydoréduction consiste à réduire un métal plus électronégatif qui se dépose sur un métal moins électronégatif, ce dernier passant en solution (métal sacrificiel).

RESRECOVERY PARTIE 4 : RECUPERATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Métaux
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD avec la collaboration d'Arthur PRON et Manon DOSSIER
	Page 32 sur 55

sont chargés positivement, l'utilisation de résines échangeuse de cations pour la récupération des métaux est plus courante. Les résines échangeuses de cations fortement acides possèdent souvent des groupes acides sulfoniques, tandis que celles ayant des propriétés faiblement acides ont souvent des groupes acides carboxyliques. La capacité sélective d'une résine échangeuse pour un ion particulier dépend du choix du polymère, de la structure de la résine, des groupes fonctionnels, et peut également être influencée par le type de contact avec le fluide (résine à contre-courant, colonnes à co-courant, etc.).

Des solutions de désorption, telles que des régénérants acides ou alcalins ou des agents chélatants et des sels, sont utilisées pour la régénération des résines saturées.

La Figure IV-1 montre en exemple l'efficacité d'élimination/récupération de différents métaux des eaux usées brutes de la station de Dongemond (NL) à partir de deux résines (MAC3 (cationique faible) et S1567 (cationique forte)).

Le rendement d'élimination du MAC3 est généralement plus élevé que celui du S1567. Pour l'élimination de certains métaux spécifiques, comme le lithium, le potassium ou le strontium, la résine S1567 a toutefois un rendement d'élimination plus élevé. Il convient également de noter que pour le S1567, un rendement d'élimination négatif a été déterminé beaucoup plus fréquemment (que pour le MAC3). Cela indique que le métal concerné est lessivé de la résine et/ou des matériaux utilisés.

Un processus de régénération adapté, la combinaison de différentes résines mises en œuvre ou encore la modification des conditions de traitement (pH par exemple) peuvent permettre la récupération séquentielle de plusieurs ions métalliques (Abidli *et al.*, 2022b)

RESRECOVERY PARTIE 4 : RECUPERATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Métaux
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD avec la collaboration d'Arthur PRON et Manon DOSSIER
	Page 33 sur 55

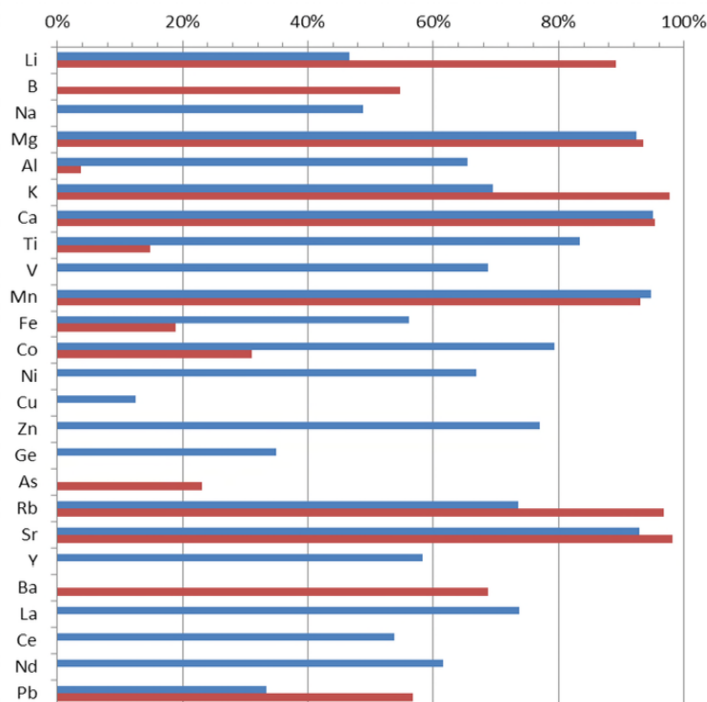


Figure IV-1 - Rendement d'élimination par métal de l'influent de la station d'épuration des eaux usées Dongemond après traitement avec la résine échangeuse d'ions MAC3 [bleu] et S1567 [rouge] (Roest, de Buijzer and Palmen, 2018)

IV-3. Procédés membranaires

La filtration membranaire constitue une méthode simple et efficace pour la récupération des métaux présents dans les eaux usées municipales. Cette approche repose sur l'utilisation de membranes semi-perméables qui agissent comme des barrières minces entre deux milieux, permettant ainsi le passage sélectif des composants souhaités (permeat) tout en retenant les autres (rétenant contenant les métaux devant être retenus ou récupérés).

Différents types de procédés membranaires ont été développés, notamment la microfiltration (MF), l'ultrafiltration (UF), la nanofiltration (NF), l'osmose inverse (RO) et la distillation membranaire (MD), pour n'en nommer que quelques-uns. Typiquement, les membranes de MF (taille des pores : 0,1–5 µm) sont capables de rejeter des particules telles que les protozoaires et les bactéries ; les membranes d'UF (taille des pores : 0,01–0,1 µm) peuvent éliminer les virus, les huiles émulsionnées, les colloïdes et les protéines ; les membranes de NF peuvent éliminer des particules plus petites (taille : 0,001–0,01 µm) ; tandis que les membranes de RO peuvent rejeter des particules extrêmement plus petites (taille : 0,001–0,0001 µm). En plus du mécanisme basé sur l'exclusion de taille, les mécanismes assistés par adsorption sont également une voie majeure vers l'élimination des contaminants des eaux usées en utilisant des membranes, principalement contrôlés par la capacité de sorption et le taux d'adsorption de la surface fonctionnelle.

Chaque méthode de filtration membranaire est influencée par des paramètres tels que la concentration des métaux, le pH et la pression, qui peuvent être ajustés pour optimiser l'efficacité de la récupération.

RESRECOVERY PARTIE 4 : RECUPERATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Métaux
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD avec la collaboration d'Arthur PRON et Manon DOSSIER
	Page 34 sur 55

En outre, des matériaux spécifiques, tels que les biopolymères, peuvent être intégrés aux membranes pour améliorer leur capacité de récupération des métaux. En résumé, les techniques de filtration membranaire offrent des solutions polyvalentes et efficaces pour la récupération des métaux à partir des eaux usées municipales. (Kagalkar, Som and Dharaskar, 2023) (Abidli *et al.*, 2022a)

IV-3.1. Ultrafiltration (UF/PEUF⁶/MEUF⁷)

Les membranes d'ultrafiltration conventionnelles ont du mal à retenir efficacement les ions métalliques en raison de leur taille de pore relativement grande. Pour résoudre ce problème, des stratégies telles que l'ultrafiltration améliorée par polymère et l'ultrafiltration améliorée par micelles ont été développées. Dans le processus d'ultrafiltration améliorée, des polymères hydrosolubles ou des surfactants forment des complexes polymère-métal ou des micelles avec les ions de métaux lourds, augmentant ainsi leur rétention par les membranes d'ultrafiltration. Ces approches ont montré une efficacité élevée dans l'élimination des métaux des eaux usées. Les polymères et surfactants peuvent être régénérés et réutilisés (décomplexation par ajustement du pH par exemple). On note néanmoins des effets de compétition avec d'autres cations présents dans la matrice. (Abidli *et al.*, 2022a)

IV-3.2. Adsorption et ultrafiltration

De nombreuses recherches récentes portent sur la fonctionnalisation des membranes d'ultrafiltration dans le but de combiner les mécanismes d'exclusion stérique et d'adsorption des métaux. L'inclusion de groupements pouvant créer des liaisons de coordination avec les métaux est considérée comme l'une des méthodes les plus efficaces pour améliorer les performances des membranes, notamment d'UF (Abidli *et al.*, 2022a).

IV-3.3. Nanofiltration

Les membranes de nanofiltration fonctionnalisées ou composites présentent des avantages intéressants et des performances prometteuses pour la rétention des métaux lourds, atteignant des éliminations de plus de 98% pour certains métaux lourds et terres rares dans des eaux usées acides de mines. (Abidli *et al.*, 2022a)

IV-4. Electrodialyse

L'électrodialyse est un procédé de séparation qui utilise un empilement de membranes alternativement sélectives aux anions et aux cations, séparées par des feuilles d'espacement. Son objectif est d'éliminer les sels métalliques de l'eau en appliquant une tension électrique. Lorsque les eaux usées traversent cet empilement de membranes en présence d'un courant électrique, les ions se déplacent dans des directions opposées : les anions migrent vers l'anode et les cations vers la cathode. Cette migration crée des zones d'eau plus ou moins concentrée entre les membranes.

⁶ polymer-enhanced ultrafiltration

⁷ micelle-enhanced ultrafiltration

RESRECOVERY PARTIE 4 : RECUPERATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Métaux
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD avec la collaboration d'Arthur PRON et Manon DOSSIER
	Page 35 sur 55

Les membranes utilisées dans l'électrodialyse sont généralement des copolymères de styrène et de divinylbenzène. Elles sont conçues pour être sélectives aux anions ou aux cations, permettant ainsi le transport sélectif des ions. En conséquence, les eaux usées sont appauvries en ions dans certains compartiments, tandis que d'autres s'enrichissent en ions métalliques. (Kagalkar, Som and Dharaskar, 2023)

Ce procédé peut fonctionner de manière continue, offrant une récupération plus rapide des métaux, ou en mode batch, plus lent. Il est largement utilisé pour éliminer les sels métalliques des eaux usées. Dans un système d'électrodialyse, les ions sont transportés à travers des membranes échangeuses d'ions sous l'effet d'un courant électrique direct. Cette unité comprend au moins trois compartiments, avec une anode et une cathode aux extrémités, entre lesquelles une différence de potentiel est appliquée pour séparer les ions métalliques des eaux usées.

IV-5. Extraction par solvant

L'extraction par solvant est une méthode utilisée couramment en hydrométallurgie, où les métaux sont extraits de la phase aqueuse vers une phase non miscible dans l'eau. Cette technique, également utilisée dans le raffinage des métaux, repose sur la distribution préférentielle des substances ciblées dissoutes entre deux phases non miscibles. Les solvants organiques sont principalement utilisés. Une extraction combinant plusieurs extractants peut être adoptée pour les solutions complexes contenant divers métaux. Les liquides ioniques⁸, en tant qu'extractants innovants, ont également été utilisés avec succès pour l'extraction des métaux des eaux usées, offrant des avantages écologiques et une facilité de manipulation. Bien que l'extraction par solvant offre des avantages significatifs, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour développer des systèmes plus efficaces, en particulier pour le traitement simultané de multiples contaminants, en tenant compte des interactions complexes entre les composés présents dans les eaux usées. En outre, une attention particulière est nécessaire pour concevoir des systèmes d'extraction durables utilisant des solvants verts, afin de favoriser la circularité des matériaux et l'économie circulaire. (Abidli *et al.*, 2022a)

IV-6. Précipitation

La précipitation est une solution efficace pour éliminer et récupérer les métaux des eaux usées. Parmi les différentes méthodes de traitement, celle-ci se distingue comme une approche efficace et largement utilisée pour extraire les métaux précieux et toxiques des effluents industriels et domestiques. Cette méthode a été largement utilisée dans le traitement de divers types d'eaux usées, tels que les eaux de production pétrolière, les eaux de drainage minier acide, les eaux de résidus miniers et les eaux de métallurgie. Les principaux mécanismes de la précipitation impliquent la formation de composés métalliques insolubles, suivie de la sédimentation et de la récupération des précipités par filtration.

⁸ Les liquides ioniques sont des sels organiques avec des points de fusion particulièrement bas, se trouvant généralement sous forme liquide dès 25°C. Ils combinent les caractéristiques avantageuses des liquides moléculaires et des sels fondus conventionnels en une combinaison de propriétés que l'on ne trouve que dans cette classe de substances.

RESRECOVERY PARTIE 4 : RECUPERATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Métaux
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD avec la collaboration d'Arthur PRON et Manon DOSSIER
	Page 36 sur 55

Une des voies de précipitation les plus couramment utilisées est la précipitation des sulfures. Cette approche permet la récupération des métaux précieux tels que l'argent, l'or et le platine, ainsi que des métaux toxiques comme le mercure et l'arsenic. Les sulfures métalliques précipités peuvent être facilement récupérés sous forme de nanopoudres, offrant ainsi des opportunités de recyclage et d'utilisation dans des applications variées, de la dépollution à la catalyse.

La précipitation de struvite émerge également comme une stratégie prometteuse pour la récupération simultanée de métaux et de nutriments tels que l'azote et le phosphore. Bien que traditionnellement utilisée pour la récupération du phosphore sous forme d'engrais, cette méthode peut être adaptée pour la récupération de métaux tels que le zinc, le cuivre et le nickel.

La précipitation de carbonates et d'oxydes/hydroxydes métalliques offre également des possibilités de récupération des métaux alcalino-terreux, des métaux de transition et des métaux lourds. Ces méthodes sont particulièrement efficaces pour les solutions aqueuses contenant des concentrations élevées en métaux, offrant ainsi une solution pour les effluents industriels riches en contaminants métalliques.

Cependant, malgré ses avantages, la précipitation présente des défis tels que la génération de boues toxiques, la nécessité d'avoir une concentration minimale suffisante et la nécessité de développer des précipitants plus efficaces et respectueux de l'environnement. Ainsi, la recherche future devrait se concentrer sur le développement de stratégies de précipitation durables pour réduire l'impact environnemental et favoriser une gestion efficace des métaux dans les eaux usées. (Abidli *et al.*, 2022a)

IV-7. Coagulation-floculation

Le processus de coagulation-floculation est considéré comme l'une des méthodes les plus importantes et couramment utilisées pour le traitement des eaux usées industrielles en raison de sa simplicité et de son efficacité élevée. Cette technique implique deux processus distincts : la coagulation, qui déstabilise les particules en suspension, et la floculation, qui les agglomère pour former des floccs plus volumineux. Les agents de coagulation, tels que le sulfate d'aluminium et le chlorure ferrique, neutralisent les charges repoussantes des particules, favorisant ainsi leur agrégation. Ensuite, les flocculants, tels que les polymères chélateurs et les polyélectrolytes, sont ajoutés pour renforcer la formation de floccs et faciliter leur sédimentation. Cette méthode est efficace pour éliminer divers polluants, y compris les ions métalliques, des milieux aqueux. Différents agents de coagulation et de floculation, tels que le polychlorure d'aluminium et l'acide polyacrylique, ont été utilisés avec succès pour la récupération des métaux. De plus, l'utilisation de matériaux respectueux de l'environnement, tels que la chitine et les polysaccharides, offre des solutions écologiques pour le traitement des eaux usées. Cependant, malgré ses avantages, la coagulation-floculation présente des inconvénients tels que la génération de boues toxiques et la nécessité de développer des coagulants et des flocculants plus durables. Des efforts de recherche supplémentaires sont nécessaires pour développer des méthodes de traitement plus respectueuses de l'environnement et économiquement viables pour la récupération des métaux dans les eaux usées. (Abidli *et al.*, 2022a)

RESRECOVERY PARTIE 4 : RECUPERATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Métaux
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD avec la collaboration d'Arthur PRON et Manon DOSSIER
	Page 37 sur 55

IV-8. Flottation

La flottation est une méthode de séparation solide-liquide qui repose sur l'introduction de bulles d'air dans un milieu aqueux contenant des particules solides. Ces bulles d'air transportent sélectivement les particules solides vers la surface, où elles forment une mousse qui peut être facilement écumée pour séparer les particules solides du liquide. Ce processus gagne en popularité pour le traitement des eaux usées en raison de son efficacité et de sa simplicité. La flottation peut être classée en trois principales approches de récupération des métaux : la flottation d'ions, la précipitation-flottation et la flottation d'adsorption. La flottation d'ions repose sur l'utilisation de surfactants chargés pour former des particules solides fines qui se fixent aux bulles d'air, facilitant ainsi la séparation des métaux des eaux usées. La précipitation-flottation implique la précipitation des métaux suivie de leur flottation, tandis que la flottation d'adsorption utilise des adsorbants pour fixer les métaux avant la flottation.

En résumé, la flottation est une technique prometteuse pour l'élimination des métaux des eaux usées en raison de sa simplicité, de sa rapidité et de son efficacité. Cependant, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour réduire les coûts opérationnels et améliorer l'impact environnemental de cette technique. Cela pourrait inclure le développement de collecteurs plus écologiques et la recherche de moyens de valoriser les sous-produits générés par le processus de flottation. (Abidli *et al.*, 2022a)

IV-9. Traitement des solides par voie humide

Le traitement chimique par voie humide acide vise à récupérer les métaux des matières solides. La lixiviation acide, réalisée avec des acides forts tels que H_2SO_4 ou HCl , permet de dissoudre les métaux présents en phase solide. Cette méthode est hautement dépendante du pH et contrôlée en température. En revanche, la lixiviation alcaline est moins efficace car la plupart des métaux ne se dissolvent pas dans les solutions alcalines. Les métaux récupérés sont ensuite séparés des autres composants par des méthodes telles que l'extraction liquide-liquide, la nanofiltration, ou la précipitation. Les températures plus élevées facilitent le procédé de récupération des métaux, bien que certains métaux lourds puissent rester dans les boues résiduelles. (Kagalkar, Som and Dharaskar, 2023)

IV-10. Procédé thermochimique

Ce procédé consiste à ajouter des chlorures ($NaCl$, KCl , $MgCl_2$ ou $CaCl_2$) à des cendres à des températures élevées ($800^\circ C - 1000^\circ C$). La formation de chlorures de certains métaux, volatils, permet leur élimination dans les gaz de combustion, avec une efficacité pouvant atteindre 98%. Les gaz sont ensuite traités et les métaux peuvent ensuite être récupérés. (Kagalkar, Som and Dharaskar, 2023)

IV-11. Bioremédiation

La bioremédiation, utilisant des organismes vivants comme les plantes et les micro-organismes, offre une solution écologique et économique pour éliminer les polluants des eaux usées. En se concentrant sur les métaux lourds, les techniques de bioremédiation visent à extraire ces polluants des eaux contaminées. Les deux principales approches sont la phytoremédiation, impliquant l'utilisation de plantes, et la remédiation assistée par micro-organismes. Des progrès récents dans ce domaine montrent un potentiel prometteur pour une gestion durable des eaux usées contaminées par les métaux.

RESRECOVERY PARTIE 4 : RECUPERATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Métaux
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD avec la collaboration d'Arthur PRON et Manon DOSSIER
	Page 38 sur 55

IV-11.1. Phytoremédiation

La phytoremédiation est une méthode de dépollution basée sur les plantes, utilisée principalement pour absorber et accumuler les ions métalliques présents dans les eaux usées. Cette technique offre divers mécanismes d'action, tels que la phytoextraction, la phytodégradation et la phytofiltration, et peut être mise en œuvre à travers différents processus.

La sélection appropriée des espèces végétales est essentielle pour une phytoremédiation efficace. De plus, la phytoremédiation peut être combinée à d'autres méthodes de traitement des eaux usées, telles que l'électrocoagulation, pour améliorer son efficacité. Les plantes chargées en métaux peuvent être réutilisées pour d'autres applications, comme la production de biogaz, ce qui renforce la durabilité du processus de dépollution et favorise la récupération globale des ressources. De même, la capacité des plantes à accumuler les métaux dans leurs feuilles suggèrent la possibilité des les en extraire par incinération et traitement des cendres.

IV-11.2. Bioremédiation microbienne

Bien que la phytoremédiation soit une technique peu coûteuse et efficace, elle présente des limitations qui entravent son application à grande échelle, notamment la croissance lente des plantes et le processus de dépollution prolongé. En réponse, la remédiation microbienne émerge comme une alternative efficace pour éliminer les ions de métaux lourds des eaux usées.

Les micro-organismes, tels que les bactéries, les microalgues et les champignons, possèdent des groupes électro-négatifs abondants sur leur paroi cellulaire, facilitant ainsi leur capacité à extraire les ions de métaux lourds. Ces organismes offrent divers mécanismes de dépollution, notamment la biosorption, la bioaccumulation et la biotransformation, qui influent sur la spéciation et la solubilité des métaux.

La biosorption, en particulier, est une méthode rentable et respectueuse de l'environnement pour éliminer les ions de métaux des eaux. Vu la nature exclusivement physico-chimique du processus, les micro-organismes morts y participent également efficacement. Ils agissent en liant les métaux aux composants de leur paroi cellulaire par des interactions chimiques et physiques variées. Par exemple, certains micro-organismes ont montré une forte capacité d'adsorption pour des métaux précieux tels que l'or et le palladium, même dans des conditions extrêmement acides. De plus, l'immobilisation de ces micro-organismes sur divers supports solides a permis d'améliorer leur séparation et leur récupération, ainsi que leur performance globale dans la biosorption des métaux. Par exemple, des algues immobilisées sur des billes d'alginate de sodium/calcium ont montré une efficacité accrue pour la dépollution simultanée des métaux et des colorants réactifs dans les eaux usées.

La bio-oxydation et la bio-réduction sont également deux processus clés de bioremédiation utilisés pour éliminer les polluants métalliques des milieux aqueux en utilisant des microorganismes. La bio-réduction implique la conversion des métaux par une réduction enzymatique qui génère des produits moins nocifs et des nanoparticules plus faciles à manipuler que les méthodes chimiques traditionnelles. La bio-oxydation utilise des microorganismes oxydants de métaux pour transformer les polluants métalliques en formes moins toxiques ou plus facilement extractibles. Par exemple, certaines souches bactériennes

RESRECOVERY PARTIE 4 : RECUPERATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Métaux
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD avec la collaboration d'Arthur PRON et Manon DOSSIER
	Page 39 sur 55

sont capables d'oxyder l'arsenic (III) en arsenic (V) ou l'antimoine (III) en antimoine (V), rendant ces métaux plus faciles à éliminer ou à immobiliser. Ces processus peuvent être utilisés en combinaison avec des adsorbants naturels ou synthétiques pour augmenter l'efficacité de l'élimination des métaux des milieux aqueux.

La bioprécipitation implique l'utilisation de microorganismes pour induire la formation de divers précipités, tels que des carbonates métalliques, des oxalates métalliques, des phosphates métalliques et des sulfures métalliques.

En particulier, la précipitation de sulfures métalliques induite par les bactéries sulfato-réductrices (SRB) est une méthode en expansion pour la dépollution des métaux lourds. Celles-ci utilisent des composés organiques donneurs d'électrons pour réduire le sulfate en sulfure, qui réagit ensuite avec les polluants métalliques pour former des précipités de sulfure métallique hautement insolubles. Ce processus permet la récupération sélective et la séparation des métaux présents dans les milieux aqueux en fonction de leur solubilité et de leurs interactions favorables avec les SRB.

La bio-floculation utilise des bio-floculants produits par des microorganismes pour éliminer les métaux lourds des eaux usées. Ces bio-floculants sont des polymères à longue chaîne principalement composés de polysaccharides et de protéines. Ils agissent en neutralisant les charges ou en formant des ponts entre les particules, favorisant ainsi l'agrégation des contaminants en floccs précipitables. Plusieurs microorganismes sont utilisés pour produire ces bio-floculants, et des recherches sont en cours pour améliorer leur production à grande échelle et réduire les coûts. La bio-floculation offre une alternative respectueuse de l'environnement et efficace pour traiter les eaux usées contaminées par les métaux lourds.

La bio-lixiviation est une méthode peu coûteuse utilisée pour éliminer les métaux des milieux aqueux en mobilisant les ions métalliques à partir de composés insolubles, comme les oxydes métalliques et les sulfures métalliques, dans la phase liquide. Elle est réalisée par des microorganismes spécifiques qui agissent directement sur les composés solides ou libèrent des agents de lixiviation dans le milieu de traitement, tels que des acides organiques et inorganiques, des espèces redox ou des ligands complexants. Cette méthode permet également de récupérer des métaux précieux à partir de diverses sources. Les microorganismes, tels que les bactéries chimio-lithoautotrophes, les bactéries cyanogènes et les champignons produisant des acides organiques, jouent un rôle clé dans ce processus. Malgré son efficacité, la bio-lixiviation présente encore des défis, notamment en termes de cinétique de lixiviation lente et de mobilité accrue des métaux dans l'environnement. Cependant, avec une gestion appropriée des effluents, elle peut être une méthode respectueuse de l'environnement comparée aux méthodes de lixiviation chimique classiques. (Abidli *et al.*, 2022a)

RESRECOVERY PARTIE 4 : RECUPERATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Métaux
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD avec la collaboration d'Arthur PRON et Manon DOSSIER
	Page 40 sur 55

V. ETUDE DE CAS

Deux projets ont été cités par (Varenes, 2021) s'étant focalisés sur la récupération des métaux dans les eaux usées, l'un aux Pays-Bas et l'autre en Belgique. Toutefois, tous les résultats n'ont pas été publiés. Cela montre qu'il y a un intérêt certain dans la récupération des métaux des eaux usées.

V-1. Laboratoire KWR

Le laboratoire KWR, basé aux Pays-Bas, a travaillé sur un projet de récupération des métaux présents dans l'eau, les boues et les cendres volantes d'Amsterdam. Ce projet, divisé en deux phases, a pris fin le 31 décembre 2019. La première étape avait impliqué la mesure des flux de 66 éléments dans diverses matrices pour évaluer le potentiel de récupération (voir II-1).

La seconde phase, quant à elle, visait à évaluer en laboratoire l'efficacité et la faisabilité de la récupération de métaux par plusieurs technologies et dans plusieurs matrices pour la sélection des métaux préalablement identifiés. (Roest, de Buijzer and Palmen, 2018) (Varenes, 2021)

Les auteurs de l'étude se sont concentrés sur la récupération des métaux dans les flux liquides de STEP (et plus spécifiquement dans l'influent) pour deux raisons :

- La récupération à partir de la matrice solide des boues est beaucoup plus complexe qu'à partir d'une matrice liquide et
- L'élimination des métaux de l'eau à traiter ensuite biologiquement permet d'améliorer la qualité des boues produites par la station.

Ils ont néanmoins testé et recommandent la poursuite des recherches concernant la récupération à partir des cendres volantes d'incinération des boues, après dissolution par attaque acide. Ils ont également envisagé la récupération à partir de concentrat d'osmose inverse appliquée pour le polissage des effluents de STEP.

Les métaux considérés comme les plus intéressants par les auteurs sont le cuivre, le zinc, l'argent, le titane, le palladium, le fer, l'or et le tungstène, en raison de leur présence dans les effluents, de leur rareté et/ou de leur valeur marchande, ainsi que le lithium et le cobalt en raison de leur rareté et de leur implication dans le secteur des énergies renouvelables.

Les technologies de récupération envisagées sont la précipitation chimique, l'échange d'ions et la voie électrochimique (électrolyse et électrocoagulation).

Les résultats obtenus sont encourageant en termes de possibilité d'enrichissement : toutes les combinaisons testées ont permis d'obtenir des flux plus concentrés en métaux sans toutefois obtenir une sélectivité suffisante, en raison de la complexité des matrices traitées. Une combinaison de technologies serait donc nécessaire pour isoler spécifiquement les métaux recherchés.

Les principaux résultats obtenus sont synthétisés au Tableau V-1.

RESRECOVERY PARTIE 4 : RECUPERATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Métaux
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD avec la collaboration d'Arthur PRON et Manon DOSSIER
	Page 41 sur 55

Tableau V-1 : Principales observations expérimentales

Technologie Matrice	Précipitation (hydroxydes)	Échange d'ions	Electrochimie
Influent	Significative pour Cu, Ti, Fe Limitée pour Zn	Efficace pour Li, Ti, Fe, Ag, Zn, Cu Permet de se rapprocher (peut-être atteindre) des normes (hollandaises) de qualité des boues pour l'épandage agricole en ce qui concerne Cu	
Cendres volantes	La précipitation en série (différents pH) permet d'éliminer en profondeur une large gamme de terres rares et d'autres métaux.	Grande affinité pour Cu, Zn Efficace pour Fe, Ag	Fe, Ti et W bien éliminés (98 – 98 et 70%). Performances sur Zn et Cu moindre que prévu (8 et 6%)
Concentrat RO	Efficace pour Fe, Ti, Zn	Efficace pour Zn et Fe (90 et 60%). Seulement 20% d'élimination du cu.	
	Pas efficace pour Li, malgré la concentration très élevée (2,5 mg/L)		
Remarques	Impossible de traiter tout le flux en raison des quantités de réactifs nécessaires aux modifications du pH. Les techniques de précipitations peuvent également être utilisées pour enrichir sélectivement la phase liquide en certains métaux moins bien précipités (par exemple en métaux rares ou précieux : Au, Ag, Pt, Rb ou Li). Toutefois, la dilution par les réactifs de précipitation limite l'effet d'enrichissement	L'efficacité et la sélectivité dépendent du type de résine et de pH.	Les méthodes électrochimiques semblent prometteuses pour une étape ultérieure de raffinage : récupération à partir d'un flux déjà enrichi. D'autres recherches sont nécessaires pour optimiser le processus (par exemple, développement d'électrode en carbone vitreux réticulé)

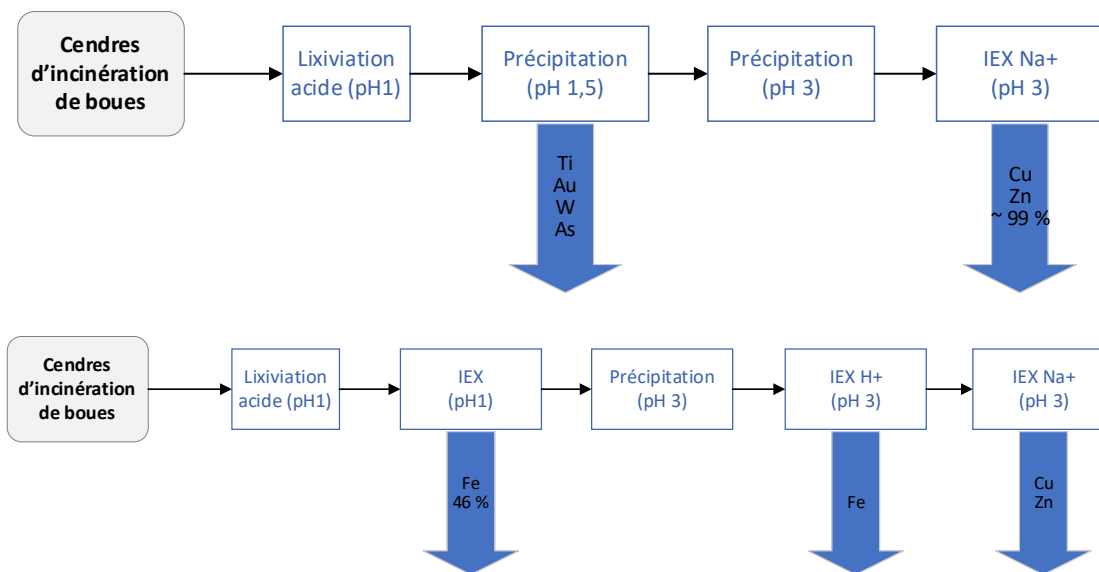
Les auteurs proposent ensuite des scénarios de traitement combinant plusieurs technologies (précipitations, multiples échanges d'ions et électrochimie) pour la production d'une solution enrichie en Zn et Cu (nécessitant une étape ultérieure de récupération). Les meilleurs rendements financiers

RESRECOVERY PARTIE 4 : RECUPERATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Métaux
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD avec la collaboration d'Arthur PRON et Manon DOSSIER
	Page 42 sur 55

(estimation en première approche) seraient obtenus à partir des cendres d'incinération de boues. La récupération à partir de l'influent serait nettement moins prometteuse d'un point de vue économique.

De nombreux procédés permettent la récupération du phosphore à partir des cendres d'incinération des boues (par exemple Ash2Phos ou Ecophos – voir rapport thématique Phosphore). Selon les auteurs il est concevable d'adapter/compléter ces procédés pour cibler les métaux.

Sur base des résultats expérimentaux, les auteurs proposent quelques schémas de mise en œuvre, tels que représentés à la Figure V-1.



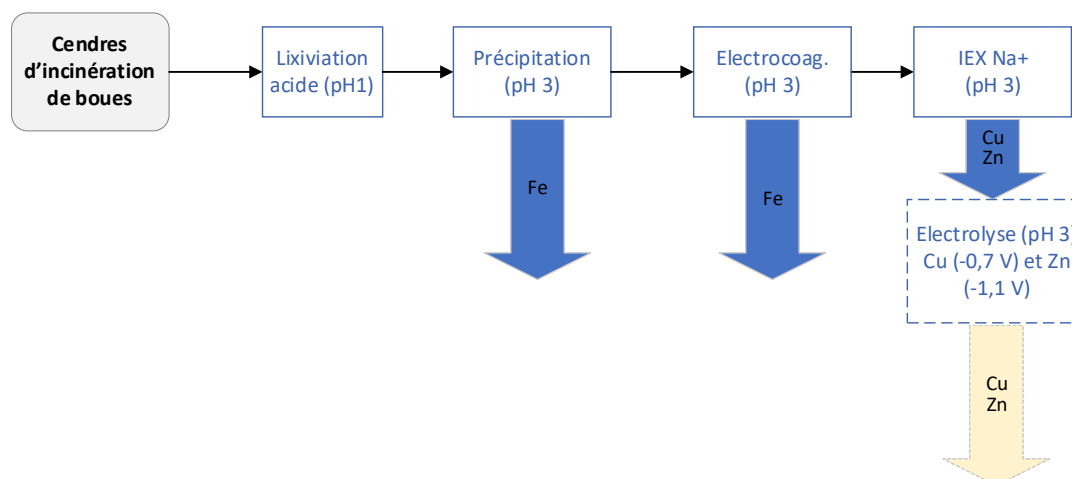


Figure V-1 : Exemple de scénarios proposés pour la récupération des métaux Fe, Cu et Zn (Muñoz Sierra Julian et al., 2019)

V-2. Sublimus

Le projet SUBLIMUS s'est focalisé sur la récupération de métaux précieux : or, argent et platinoïdes dans les boues des deux stations d'épuration bruxelloises après oxydation par voie humide (= « technosable »).

Le projet étudie la biolixiviation des métaux ainsi que leur biosorption sur des nanomatériaux et, notamment, sur la levure de bière. Les premiers résultats ont permis d'évaluer un potentiel de récupération de 480 kg par an pour l'argent et de 17 kg par an pour l'or. Ces valeurs étaient du même ordre de grandeur que les concentrations répertoriées par (Varenes, 2021) pour l'or, tandis qu'il y a un facteur 3 pour l'argent. Les différentes communications du projet dans la presse francophone ont mis en avant que le choix s'était porté sur ces métaux en raison de leur teneur dans la matrice solide, du même ordre de grandeur que celle des mines classiques (environ 1 g d'or et 10 g d'argent par tonne de boue). (Varenes, 2021)

V-3. Procédé Chromofora

La société suédoise Chromofora a mis au point un procédé de récupération sélective des métaux (Selmext) par combinaison de technologies d'extraction, de complexation puis de séparation par ultrafiltration. Ce procédé est notamment mis en œuvre à l'usine de récupération et traitement de déchets de la société Ragn Sells à Fagerliden (S). Ce procédé peut être utilisé pour récupérer les terres rares et des métaux tels que Cu ou Zn (Chromofora, Stefan Wall-Qvist, communication personnelle).

V-4. Le Projet intelWATT

RESRECOVERY PARTIE 4 : RECUPERATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Métaux
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD avec la collaboration d'Arthur PRON et Manon DOSSIER
Page 44 sur 55	

Financé par l’Union européenne (Horizon 2020), le projet intelWATT (2020-2024) a notamment testé la récupération par technique membranaire (TRL7) d’électrolyte du Cr (III) d’eau de rinçage d’une installation d’électrodéposition en vue de sa réutilisation.

V-5. *Projet ReWaCEM (Resource Recovery from Industrial Waste Water by Cutting Edge Membrane Technologies)*

Le projet ReWaCEM a suivi 4 installations pilotes de récupération d’acide des bains acide de l’industrie de traitement des métaux. Les installations combinent des technologies membranaires de pointe (dialyse de diffusion et distillation membranaire) pour le recyclage de l’acide (> 90% de récupération) et la précipitation des métaux dans les flux résiduaire (ReWaCEM Resource Recovery from Industrial Waste Water by Cutting Edge Membrane Technologies, 2019).

Les installations pilotes ont permis la récupération de :

- Oxyde de Fe (III) dans une entreprise de galvanisation à chaud par trempage (TECNOZINCO – Carini, Italie) ;
- Cuivre à partir d’un flux de sulfate de cuivre dans une entreprise de galvanoplastie (ELECTRONIQUEL – Gijón, Espagne)
- Or des effluents d’une usine de circuits imprimés (AT&S – Fehring, Autriche)

RESRECOVERY PARTIE 4 : RECUPERATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Métaux
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD avec la collaboration d’Arthur PRON et Manon DOSSIER
	Page 45 sur 55

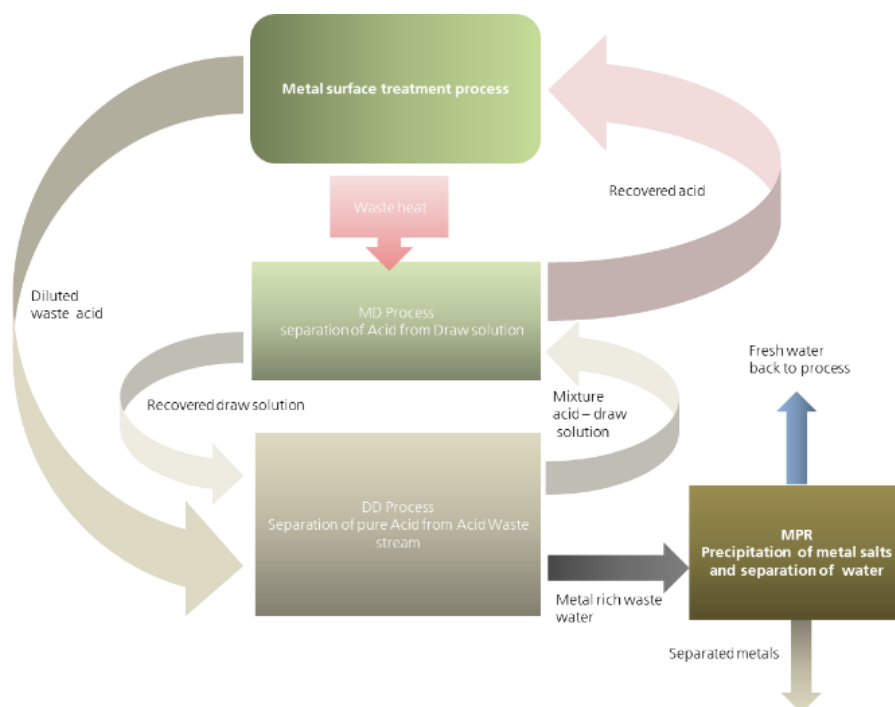


Figure V-2 : Principe du procédé ReWaCEM (source : Fraunhofer ISE)

VI. MÉTAUX DANS LES EFFLUENTS URBAINS ET INDUSTRIELS EN RÉGION WALLONNE

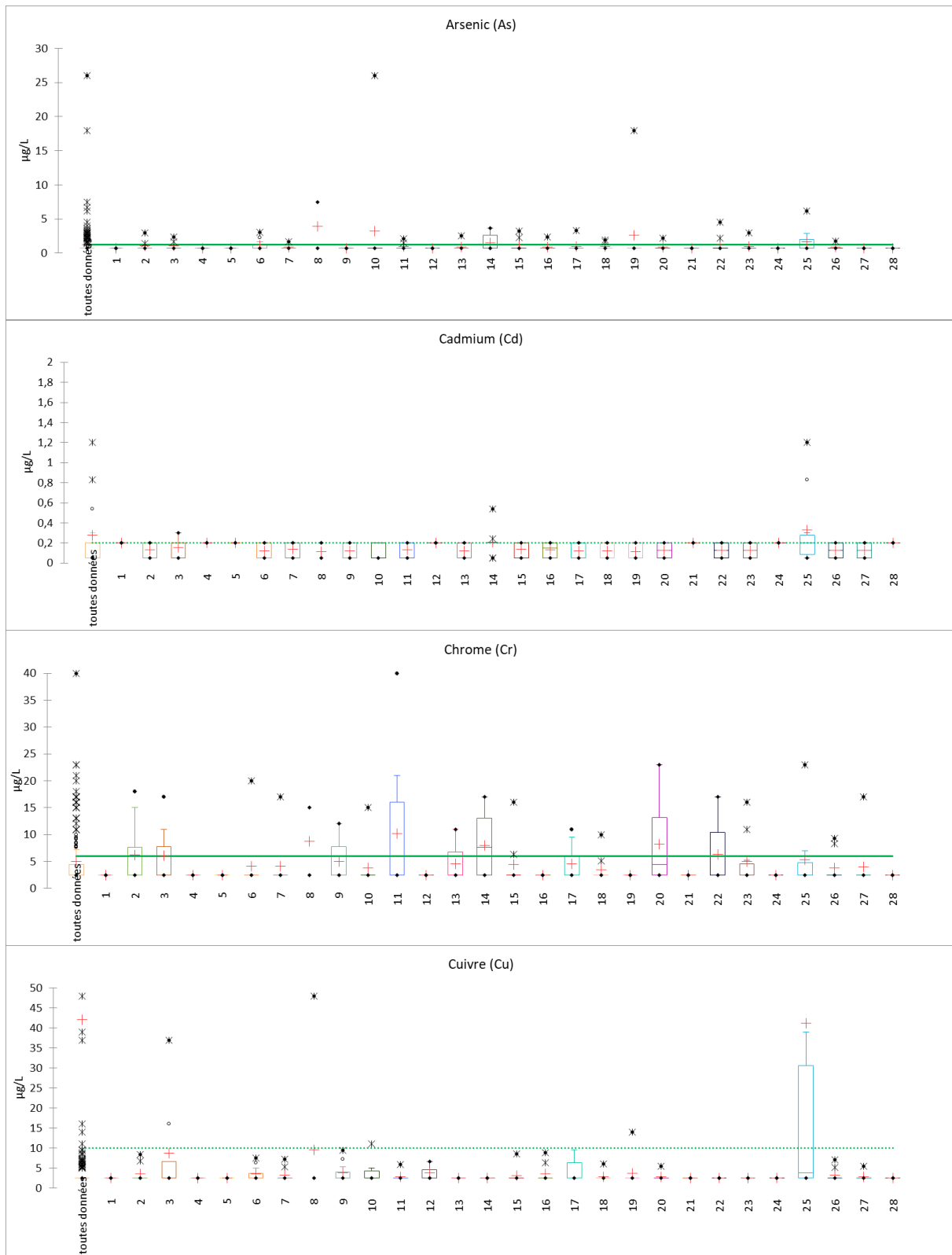
Les concentrations en métaux dans les effluents, tant urbains qu'industriels, en Région wallonne sont peu documentées.

VI-1. Effluents urbains

Les graphiques de la Figure VI-1 comparent les concentrations de certains métaux en sortie de station d'épuration, déterminée dans le cadre de la déclaration des émissions au registre européen avec les concentration moyennes rapportées par (Muñoz Sierra Julian *et al.*, 2019) pour quelques STEP néerlandaises (ANNEXE 1). Les moyennes globales (218 résultats d'analyse en RW sur 28 STEP) sont comparées à la Figure VI-2. On notera que :

- La concentration moyenne en cuivre dans les effluents RW est anormalement haute en raison de quelques valeurs extrêmes « accidentelles » (moyenne : 9,2 µg/L alors que le Q75 est < LOQ) ;
- Le phénomène inverse semble se produire pour le nickel (la concentration à la STEP de Venlo nettement plus élevée que les autres STEP, tire la moyenne vers le haut).

<p>RESRECOVERY PARTIE 4 : RECUPERATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES</p>	<p>PR2301553_240926_Métaux</p>
	<p>Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD avec la collaboration d'Arthur PRON et Manon DOSSIER</p>



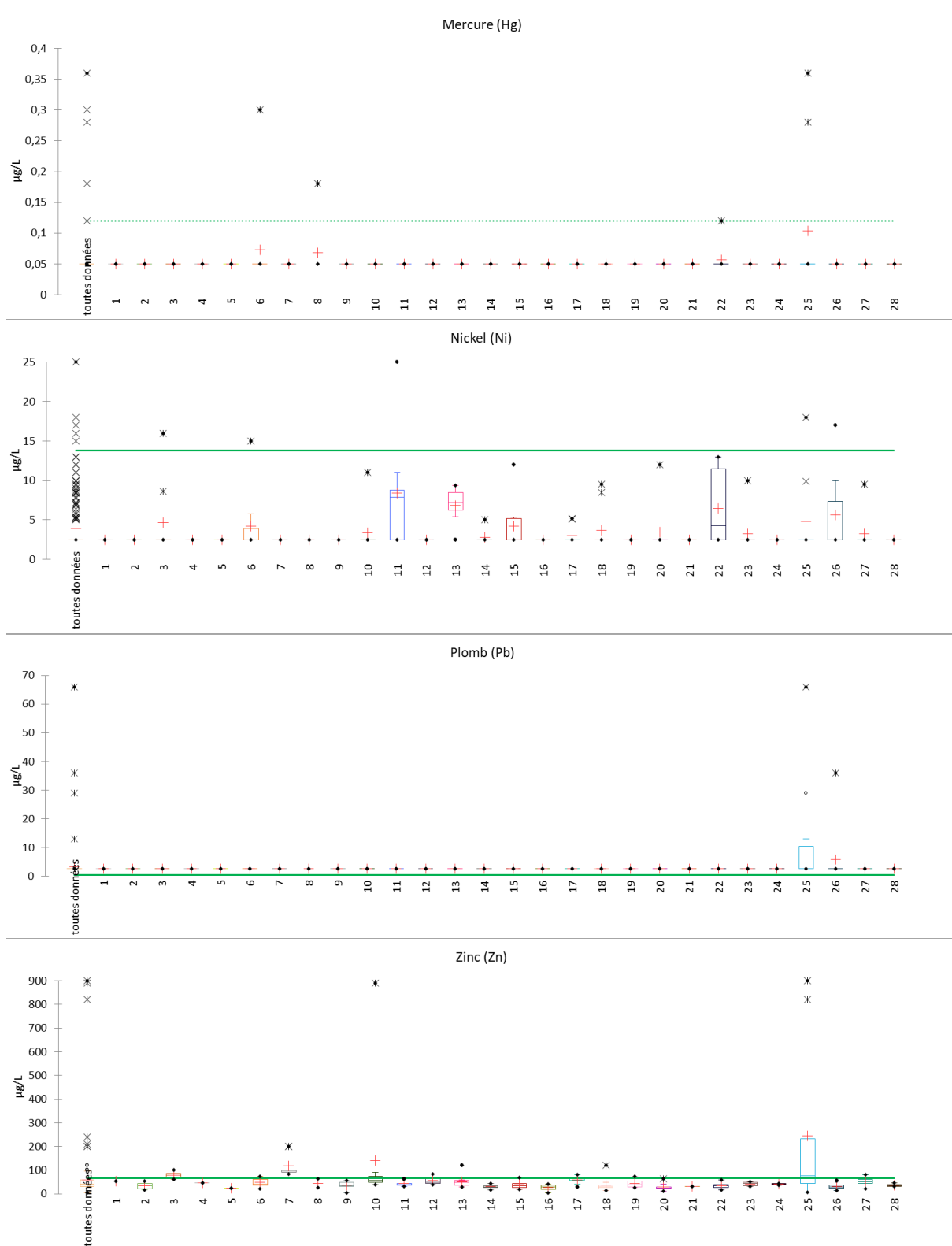


Figure VI-1 : Concentrations en métaux lourds à la sortie de quelques STEP en Région wallonne (le trait vert représente la concentration moyenne rapportée par (Muñoz Sierra Julian et al., 2019) -un trait en pointillés signifie < LOQ⁹)

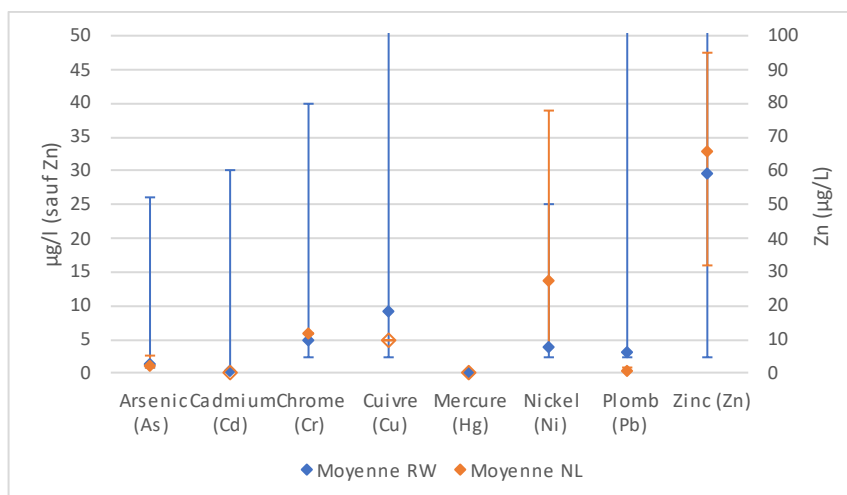


Figure VI-2 : Concentrations moyennes de certains métaux dans les effluents de STEP¹⁰

En première approche et à titre indicatif, nous utilisons les ordres de grandeurs issus de la Figure II-1 pour estimer les gisements des métaux identifiés comme les plus intéressants au Tableau III-2.

Les flux par EH sont estimés tels qu'au Tableau VI-1.

Tableau VI-1 : Flux en métaux (ordre de grandeur issu de la Figure II-1)

	mg/EH.j		Gisement potentiel estimé STEP RW (t/an)	Gisement potentiel estimé sur les 20 plus grosses STEP (t/an)	Gisement potentiel estimé STEP Liège Oupeye (t/an)
Mg	10 ^{3,5}	3.162	2.807	1.566	279,66
Fe	10 ^{3,5}	3.162	2.807	1.566	279,66
B	10 ^{1,5}	31,6	28,1	15,7	2,80
Li	10 ^{1,5}	31,6	28,1	15,7	2,80
Ni	10 ^{0,42}	2,63	2,3	1,3	0,23
Sr	10 ^{2,23}	169,8	151	84,1	15,02
Ba	10 ^{1,5}	31,6	28	15,7	2,80
Al	10 ^{0,7}	5,01	4,4	2,5	0,44
Rb	10 ^{0,7}	5,01	4,4	2,5	0,44
Si	10 ^{2,73}	537	477	266	47,49
Rh	nd				
Pd	nd				
Pt	nd				

⁹ Pour les données Région wallonnes, les valeurs < LOQ ont été égalées à LOQ/2

¹⁰ Les barres d'erreur indiquent la gamme de concentration observée

Capacité nominale (EH)		4.333.819	2.431.808	446.500
Charge (EH ¹¹)		2.404.750	1.356.642	242.289

VI-2. Effluents industriels

Sur base des déclarations PRTR 2007-2016 nous avons évalué l'ordre de grandeur des gisements en métaux pour les plus grosses industries des différents secteurs. On soulignera toutefois que, pour les industries rejetant en eau de surface, les charges déclarées sont celles après épuration.

Parmi les 8 métaux soumis à déclaration (listes basées sur des critères de protection du milieu récepteur), 3 seraient considérés comme intéressants sur base des critères synthétisés au Tableau III-2, abstraction fait du critère de présence dans les ERU évidemment.

Tableau VI-2 : Charges en métaux déclarées E-PRTR (moyenne 2007-2016)

	As kg/an	Cd kg/an	Cr kg/an	Cu kg/an	Hg kg/an	Ni kg/an	Pb kg/an	Zn kg/an
Charge annuelle totale	233 ± 50	159 ± 53	4344 ± 832	2288 ± 521	27 ± 10	2700 ± 527	1498 ± 405	37770 ± 9936
Charge moyenne par rejet	2,6 ± 0,5	2,1 ± 0,7	31,0 ± 7,8	14,6 ± 2,7	0,4 ± 0,1	19,4 ± 5,1	11,9 ± 4,2	211 ± 76

Les graphiques des Figure VI-3 comparent les charges déclarées par rubrique (découpage selon NACE révision 2 : 68 rubriques représentées, hors stations d'épuration).

L'axe des abscisses représente la quantité annuelle (moyenne) déclarée pour toutes les entreprises de la rubrique, et donne donc une idée du gisement total potentiellement disponible.

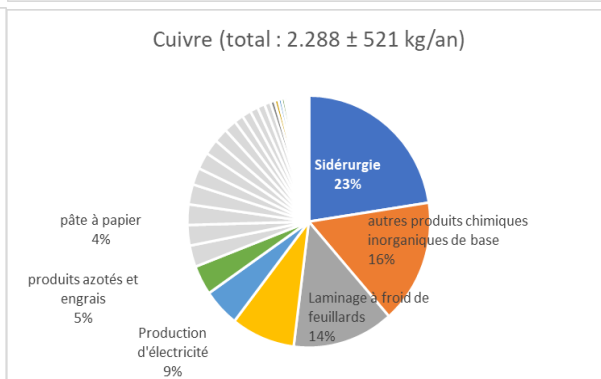
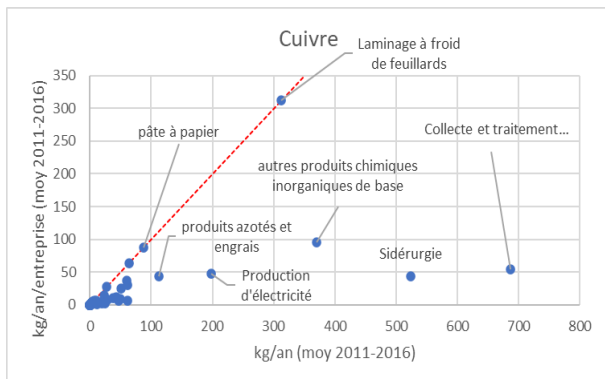
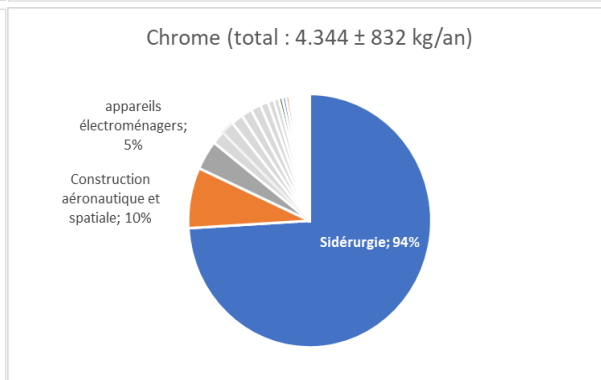
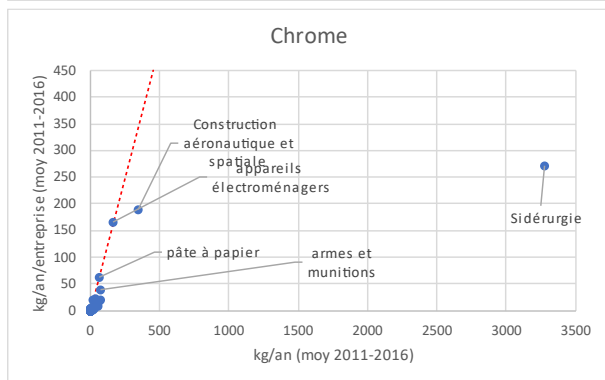
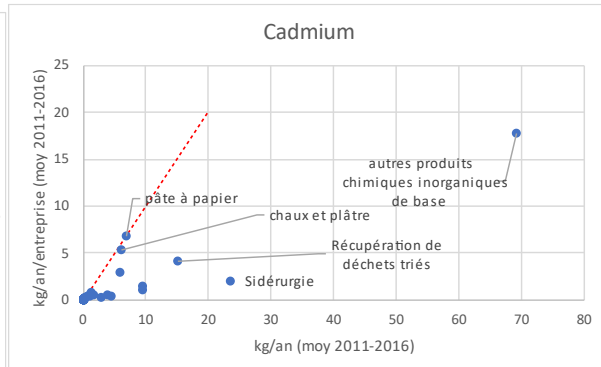
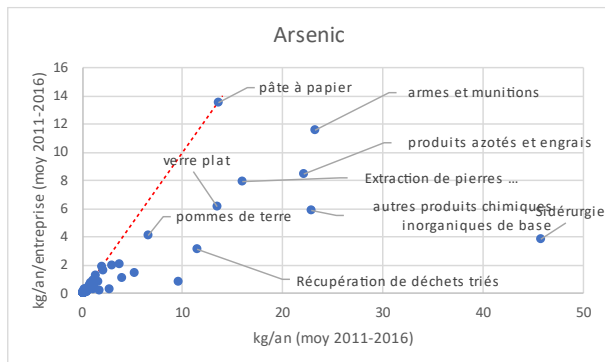
L'axe des ordonnées représente la charge moyenne par entreprise d'une rubrique donnée, et représente donc l'importance rejet (moyen) par entreprise du secteur.

Le trait rouge représente la première médiatrice : plus une rubrique est proche de la médiatrice, moins il y a d'entreprises déclarant dans cette rubrique/ce secteur.

Ces deux dernières caractéristiques donnent donc une image de « l'éclatement » du gisement en de +/- nombreux rejets.

¹¹ EH-DCO = 135 g/j

Pour les 3 métaux potentiellement les plus intéressants (Cuivre, Chrome et Nickel), c'est, sans surprise, le secteur de la sidérurgie qui représenterait le plus gros gisement, avec une assez grande dispersion (point éloigné de la médiatrice) mais des rejets en moyenne néanmoins assez importants. Le secteur de la chimie inorganique de base représenterait également un gisement non négligeable de cuivre et de nickel.



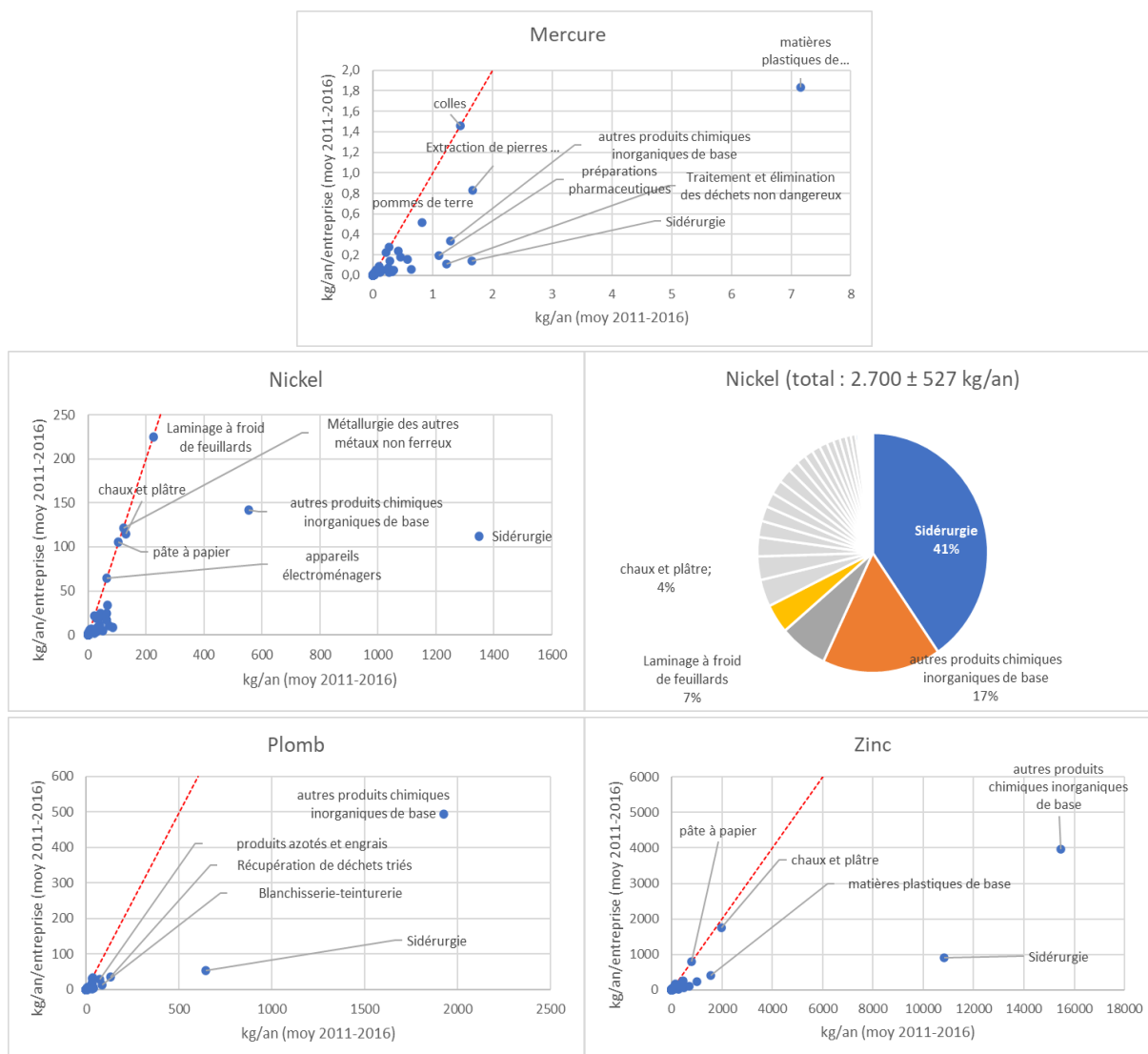


Figure VI-3 : Charges déclarées (métaux) par rubriques (NACE Rév2) sauf stations d'épuration
Données 2007-2016 sauf As (2007-2008 et 2010-2016) et Cr (2009-2016)

VII. SYNTHÈSE

Mis à part pour certains flux industriels spécifiques, bains de rinçage en traitement de surface, par exemple, très concentrés et contenant essentiellement des métaux, les filières de valorisation des métaux à partir des eaux usées sont encore loin de la maturité.

Si une vaste gamme de technologies existent, elles ont en générale été développées pour éliminer les métaux (et donc rejeter de l'eau « propre ») plutôt qu'à des fins de récupération de ceux-ci.

<p>RESRECOVERY PARTIE 4 : RECUPERATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES</p>	<p>PR2301553_240926_Métaux</p>
	<p>Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD avec la collaboration d'Arthur PRON et Manon DOSSIER</p>

Quelques métaux potentiellement intéressants (parmi lesquels Mg, Fe, B, Li, Ni, Sr, Ba, Al, Rb, Si) ont été identifiés.

Les gisements disponibles n'ont pas pu être quantifiés, faute de données. On estime néanmoins les ordres de grandeurs suivants (pour les 20 plus grosses STEP en RW) : quelques 100 à 1.000 t/an (Mg, Fe, Si) ou une dizaine de kg/an pour les autres métaux.

Les gisements industriels sont également une source potentiellement intéressante de métaux à récupérer, on pense essentiellement aux effluents de la sidérurgie et du secteur de la chimie inorganique.

On notera que les STEP urbaines, qui représentent 8,4 % des déclarants au registre PRTR représentent 18 % de la charge totale annuelle en métaux (entre 3 et 28 % selon les métaux). Les stations d'épuration les plus importantes représentent donc un gisement aussi considérable que les effluents industriels en ce qui concerne les métaux. Néanmoins, il est probable que les concentrations soient inférieure dans les effluents urbains et que la récupération soit dès lors moins efficace (en raison de la concentration faible) et plus couteuse (en raison des débits à traiter).

Comme pour les autres champs, les principaux aspects et implications liés à ces technologies sont synthétisés dans la grille annexée à l'ensemble des rapports.

RESRECOVERY PARTIE 4 : RECUPERATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Métaux
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD avec la collaboration d'Arthur PRON et Manon DOSSIER
	Page 53 sur 55

VIII. BIBLIOGRAPHIE

Abidli, A. *et al.* (2022a) 'Sustainable and efficient technologies for removal and recovery of toxic and valuable metals from wastewater: Recent progress, challenges, and future perspectives', *Chemosphere*. Elsevier Ltd. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133102>.

Abidli, A. *et al.* (2022b) 'Sustainable and efficient technologies for removal and recovery of toxic and valuable metals from wastewater: Recent progress, challenges, and future perspectives', *Chemosphere*, 292, p. 133102. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133102>.

ADEME (no date) *Les métaux: des ressources qui pourraient manquer?* Available at: <https://multimedia.ademe.fr/infographies/infographie-terres-rares-ademe/> (Accessed: 18 April 2024).

Baun, D.L. and Christensen, T.H. (2004) 'Speciation of heavy metals in landfill leachate: A review', *Waste Management and Research*, pp. 3–23. Available at: <https://doi.org/10.1177/0734242X04042146>.

Brunner, P.H. (2011) 'Urban mining a contribution to reindustrializing the city', *Journal of Industrial Ecology*, pp. 339–341. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00345.x>.

Graedel, T.E. *et al.* (2015) 'Criticality of metals and metalloids', *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(14), pp. 4257–4262. Available at: <https://doi.org/10.1073/pnas.1500415112>.

Gregoir Liesbet and van Acker Karel (2022) *Metals for Clean Energy: Pathways to solving Europe's raw materials challenge*.

Kagalkar, A., Som, G. and Dharaskar, S.A. (2023) 'Metal recovery from municipal wastewater treatment plants', in *Resource Recovery in Municipal Waste Waters*. Elsevier, pp. 41–56. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99348-7.00017-5>.

Li, S. *et al.* (2019) 'Recovery of gold from wastewater using nanoscale zero-valent iron', *Environmental Science: Nano*, 6(2), pp. 519–527. Available at: <https://doi.org/10.1039/C8EN01018H>.

Muñoz Sierra Julian *et al.* (2019) *Terugwinnen van metalen uit water, slib en vliegas Resultaten fase 2- Experimenten*. Available at: www.kwrwater.nl.

ReWaCEM Resource Recovery from Industrial Waste Water by Cutting Edge Membrane Technologies (2019). Available at: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/research-projects/rewacem.html> (Accessed: 18 September 2024).

Roest, K., de Buijzer, E. and Palmen, L. (2018) *Terugwinnen van metalen uit water, slib en vliegas Monitoringsresultaten en potentie*. Available at: www.kwrwater.nl.

Staszak, K. and Wieszczycka, K. (2023) 'Recovery of Metals from Wastewater-State-of-the-Art Solutions with the Support of Membrane Technology.', *Membranes*, 13(1). Available at: <https://doi.org/10.3390/membranes13010114>.

RESRECOVERY PARTIE 4 : RECUPERATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Métaux
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD avec la collaboration d'Arthur PRON et Manon DOSSIER
	Page 54 sur 55

Suez - Degremont (no date) 'Processus industriels et traitements des effluents résiduels'. Available at: <https://www.suezwaterhandbook.fr/procedes-et-technologies/processus-industriels-et-traitements-des-effluents-residuels> (Accessed: 26 April 2024).

Varenes, Elodie *et al.* (2021) *Etude technico-économique sur l'opportunité de récupération des métaux contenus dans les eaux usées domestiques*. Available at: <https://doi.org/10.15454/7EK0-KB27>.

Varenes, E *et al.* (2021) *Opportunités de récupération des métaux en station d'épuration Metal recovery opportunity in wastewater treatment plants*.

Varenes, E., Blanc, D., Azaïs, A. and Choubert, J.M. (2023) 'Upgrading wastewater treatment plants to urban mines: Are metals worth it?', *Resources, Conservation and Recycling*, 189. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106738>.

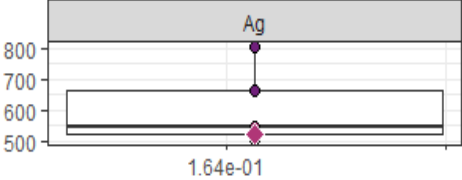
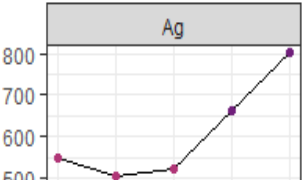
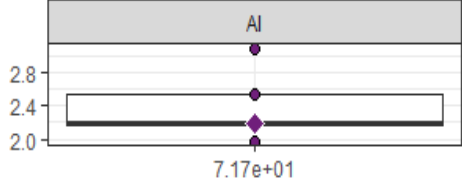
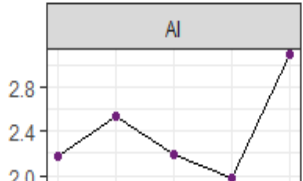
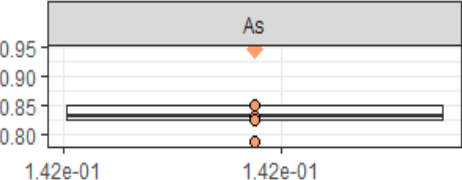
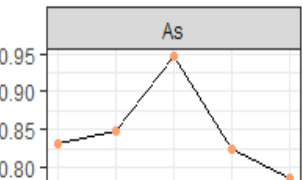
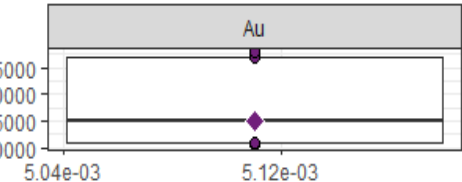
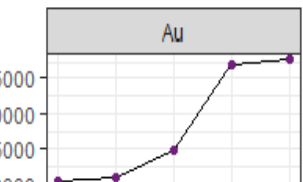
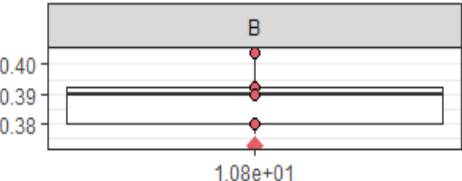
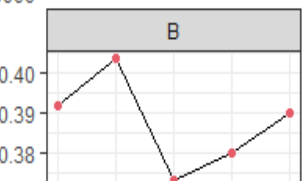
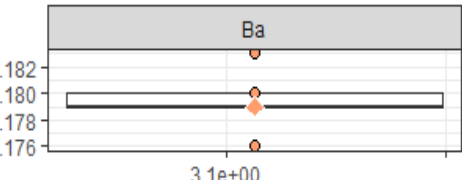
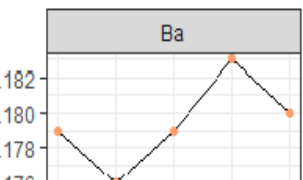
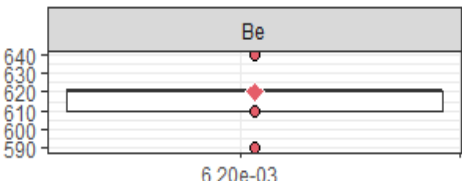
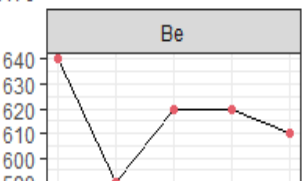
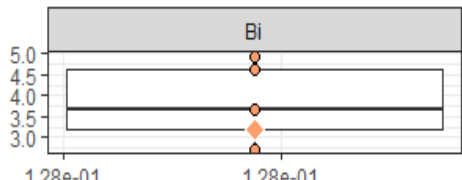

Varenes, E., Blanc, D., Azaïs, A. and Choubert, J.-M. (2023) 'Upgrading wastewater treatment plants to urban mines: Are metals worth it?', *Resources, Conservation and Recycling*, 189, p. 106738. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106738>.

Varenes, E., B.-B.D., G.L., L.C., & C.J.-M. (2021) *Etude technico-économique sur l'opportunité de récupération des métaux contenus dans les eaux usées domestiques*.

Zepf, V., Achzet, B. and Reller, A. (2014) 'Strategic Resources for Emerging Technologies', in *Competition and Conflicts on Resource Use*. Springer, pp. 259–272. Available at: <http://www.springer.com/series/6360>.

RESRECOVERY PARTIE 4 : RECUPERATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES	PR2301553_240926_Métaux
	Rédigé par Nicolas GRAINDORGE et Françoise PIRARD avec la collaboration d'Arthur PRON et Manon DOSSIER
	Page 55 sur 55

IX. ANNEXE

Métal	Format	Évolution des prix de vente (\$US.kg-1) de 2017 à 2021	
Ag	lingots		
Al	Non allié, Alliages, Ferraille, Bauxite, alumine		
As	Arsenic métal, Oxyde d'arsenic		
Au			
B	Borates naturels, Acides boriques, Borax raffiné		
Ba	Barytine broyée		
Be	Alliage maître cuivre-beryllium		
Bi	Pureté à 99,99%		

RESRECOVERY

PARTIE 4 : VALORISATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES

Annexes

Métal	Format	Évolution des prix de vente (\$US.kg-1) de 2017 à 2021	
Ca	Chaux vive, Chaux hydratée		
Cd	Pureté à 99,95%		
Co	cathode		
Cr	Minerai, ferrochrome, métal		
Cs	>99,8%		
Cu	Cathode haute pureté		
Fe	Minerai de fer, oxyde de fer, Ferrailles lourdes composites, Laitier d'acier		
Ga	Pureté >99,99%		

RESRECOVERY

PARTIE 4 : VALORISATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES

Annexes

Métal	Format	Évolution des prix de vente (\$US.kg-1) de 2017 à 2021	
Ge	Métal et dioxyde		
Hf	brut		
Hg	Pureté à 99,99%		
In	brut		
K	MOP SOP SOPM muriate		
Li	Grade batterie		
Mg	Métal, ferraille, poudres et granules, alliages non travaillés		
Mn	Minerai, ferromanganèse, silicomanganèse		
Mo	Minerai, concentré, produits chimiques, pigments, ferroalliages, métaux		

RESRECOVERY

PARTIE 4 : VALORISATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES

Annexes

Métal	Format	Évolution des prix de vente (\$US.kg-1) de 2017 à 2021	
Na	Chlorure de sodium sous vide et à ciel ouvert, sel solaire, sel gemme, sel en saumure, soude caustique		
Nb	Ferroniobium		
Ni	Minerai et concentré, ferronickel, déchets, ferrailles, poudres, flocons		
P			
Pb			
Pd			
Pt			
Rb	Métal > 99,7%, formiate hydraté, acétate de rubidium, bromure, carbonate, chlorure et nitrate		
Rh			

RESRECOVERY

PARTIE 4 : VALORISATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES

Annexes

Métal	Format	Évolution des prix de vente (\$US.kg-1) de 2017 à 2021	
Ru			
Sb	Minerai et concentrés, Oxyde d'antimoine, Antimoine brut, Poudre, Déchets et ferrailles		
Si	Perlite, ferrosilicium 50%, ferrosilicium 75%, silicium métal, talc broyé		
Sn	Brut (allié ou non), déchets et ferrailles		
Sr	Célestite		
Ta	Tantalite		
cTe	Tellure à 99,95%		
Ti	Métal et pigment dioxyde de titane, rutile 95%, ilménite, leucoxène, laitier > 80%		
Tl	métal		

RESRECOVERY

PARTIE 4 : VALORISATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES

Annexes

Métal	Format	Évolution des prix de vente (\$US.kg-1) de 2017 à 2021	
V	Pentoxyde de vanadium		
W	Trioxide de tungstène		
Zn	Minerais, concentrés, zinc et peroxyde, brut et non allié, alliages, déchets et ferrailles		
Zr	Minerais, concentrés, ferrozirconium, brut et en poudre, déchets et ferrailles		

RESRECOVERY

PARTIE 4 : VALORISATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES

Annexes

ANNEXE 1. Composition de 4 eaux usées brutes avant et après traitement ($\mu\text{g/L}$) (Roest, de Buijzer and Palmen, 2018)

Element	Influent				Effluent				Gem. effluent
	Amersfoort	Kralingseveer	Nieuwgraaf	Venlo	Amersfoort	Kralingseveer	Nieuwgraaf	Venlo	
Li	8,5	12,7	4,7	17,3	8,9	13,7	6,4	15,3	11,1
Be	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20
B	294	132	62	136	233	115	68	101	130
Na	91479	84974	116554	94714	82175	81855	119308	80962	91075
Mg	7503	13396	8080	12178	7163	11587	6462	8033	8311
Al	110	78	74	60	63	63	96	8	58
K	34195	28446	28595	69290	24920	19222	18238	45847	27057
Ca	38583	70613	78523	51048	36600	75773	78780	43893	58762
Sc	4,6	3,9	4,5	4	4,7	4,7	5,2	4,1	4,7
Ti	35	34	26	50	3,3	5,3	5	3,1	4,2
V	0,9	0,7	< 1,0	0,9	< 1,0	< 1,0	0,7	< 1,0	0,5
Cr	< 10	< 10	< 10	15	< 10	< 10	< 10	7	6
Mn	97	334	200	118	82,7	5,5	183,3	59,3	82,7
Fe	656	385	404	556	195	213,3	203,3	176,7	197,1
Co	0,79	0,49	0,5	1,25	1,01	0,58	0,89	1,7	1,04
Ni	9,9	6,4	5,3	49,5	6,8	5,8	3,8	39	13,8
Cu	34,5	10,3	13,8	26,5	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Zn	114	75	108	135	32	95	79	56	66
Ga	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20
Ge	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	0,14	< 0,20	< 0,20	0,11
As	1,3	0,9	2,3	0,8	0,8	1	2,6	< 1,0	1,2
Se	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Rb	22	18	23	29	21	16	22	23	21
Sr	165	333	196	253	117	317	185	178	199
Y	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20
Zr	1,8	0,8	2,1	0,8	< 1,0	< 1,0	1,6	< 1,0	0,8
Nb	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Mo	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	0,8	1,5	2	1,2
Ru	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20
Pd	0,23	0,39	0,28	0,36	< 0,20	0,34	0,4	0,36	0,3
Ag	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	0,7	< 1,0	0,6
Cd	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20
In	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20
Sn	< 0,40	< 0,40	< 0,40	< 0,40	< 0,40	< 0,40	< 0,40	< 0,40	< 0,40
Sb	< 0,40	< 0,40	1,7	< 0,40	< 0,40	< 0,40	6,5	< 0,40	1,8
Te	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Cs	0,17	< 0,20	0,31	< 0,20	0,14	< 0,20	0,41	< 0,20	0,19
Ba	26	42	36	23	8,7	21,3	16	8,2	13,6
La	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20

RESRECOVERY

PARTIE 4 : VALORISATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES

Annexes

Element	Influent				Effluent				Gem. effluent
	Amersfoort	Kralingseveer	Nieuwgraaf	Venlo	Amersfoort	Kralingseveer	Nieuwgraaf	Venlo	
Ce	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20
Pr	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20
Nd	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20
Sm	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20
Eu	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20
Gd	0,32	< 0,20	0,22	0,17	0,33	< 0,20	0,26	< 0,20	0,2
Tb	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20
Dy	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20
Ho	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20
Er	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20
Tm	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20
Yb	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20
Lu	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20
Hf	1,1	< 1,0	2	< 1,0	< 1,0	< 1,0	1,8	< 1,0	0,8
Ta	< 0,40	< 0,40	< 0,40	< 0,40	< 0,40	< 0,40	< 0,40	< 0,40	< 0,40
W	< 0,40	< 0,40	< 0,40	< 0,40	< 0,40	< 0,40	< 0,40	< 0,40	< 0,40
Re	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20
Os	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20
Ir	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20
Pt	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20
Tl	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20
Pb	1,7	0,6	1	1,3	0,16	< 0,20	0,91	0,21	0,34
Bi	1,2	< 1,0	0,8	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Th	< 0,20	< 0,20	0,58	< 0,20	< 0,20	< 0,20	0,6	< 0,20	0,2
U	< 0,20	< 0,20	0,15	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20
Au	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0
Hg	< 0,12	< 0,12	< 0,12	< 0,12	< 0,12	< 0,12	< 0,12	< 0,12	< 0,12

RESRECOVERY

PARTIE 4 : VALORISATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES

Annexes

ANNEXE 2. *Concentration en métaux dans des boues primaires de stations d'épuration (mg/kgMS) (Roest, de Buijzer and Palmén, 2018)*

Element	Amersfoort	Kralingseveer	Nieuwgraaf	Gemiddelde
Li	0,7	3,2	2,1	2
Be	0,036	0,2	0,103	0,113
B	6	20	7	11
Na	695	1905	2825	1808
Mg	690	2180	1135	1335
Al	2495	4938	7625	5019
K	833	1700	1700	1411
Ca	6458	18973	12963	12798
Sc	0,4	1,5	1,1	1
Ti	37	100	59	65
V	1,5	10	3,4	5
Cr	5,4	23,5	10,6	13,2
Mn	70	388	134	197
Fe	3500	17450	3760	8237
Co	0,8	2,5	1,5	1,6
Ni	5,1	21	6,5	10,9
Cu	78	400	84	187
Zn	343	888	405	545
Ga	0,4	1,1	1,4	1
Ge	0,12	0,83	0,18	0,37
As	0,7	7,3	2,9	3,6
Se	0,7	2	1,1	1,3
Rb	1	4	4	3
Sr	38	153	44	78
Y	0,55	2	1,16	1,24
Zr	0,6	0,8	1	0,8
Nb	0,13	0,41	0,25	0,26
Mo	1,6	8,9	3,8	4,7
Ru	< 0,001	0,003	< 0,001	0,001
Pd	0,06	0,2	0,04	0,1
Ag	0,5	2,3	1,7	1,5
Cd	0,37	0,8	0,51	0,56
In	0,048	0,062	0,076	0,062
Sn	7	20	12	13
Sb	1,2	2,2	3,6	2,3
Te	0,008	0,021	< 0,005	0,01
Cs	0,08	0,46	0,33	0,29

RESRECOVERY

PARTIE 4 : VALORISATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES

Annexes

Element	Amersfoort	Kralingseveer	Nieuwgraaf	Gemiddelde
Ir	0,006	0,005	0,002	0,004
Pt	0,018	0,036	0,027	0,027
Tl	0,01	0,16	0,09	0,09
Pb	32	109	55	65
Bi	7,4	31,5	15	18
Th	0,15	0,15	0,05	0,12
U	0,12	1,7	0,33	0,71
Au	0,7	0,82	0,52	0,68
Hg	0,19	0,36	0,39	0,31
Ba	57	798	82	312
La	1,8	7,2	4,6	4,5
Ce	1,8	8,9	5,2	5,3
Pr	0,21	0,95	0,51	0,55
Nd	0,9	3,5	1,9	2,1
Sm	0,14	0,61	0,35	0,37
Eu	0,04	0,31	0,1	0,15
Gd	0,15	0,67	0,38	0,4
Tb	0,02	0,09	0,05	0,05
Dy	0,1	0,42	0,24	0,25
Ho	0,02	0,08	0,05	0,05
Er	0,05	0,22	0,13	0,14
Tm	0,01	0,03	0,02	0,02
Yb	0,04	0,2	0,11	0,12
Lu	0,01	0,03	0,02	0,02
Hf	0,62	0,06	0,07	0,25
Ta	1,92	1,1	1,35	1,45
W	0,5	1,8	2,25	1,52
Re	< 0,001	0,004	< 0,001	0,002
Os	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001

RESRECOVERY

PARTIE 4 : VALORISATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES

Annexes

ANNEXE 3. Concentration des métaux contenus dans les boues secondaires (mg/kgMS) (Roest, de Buijzer and Palmen, 2018)

Element	Amersfoort	Kralingseveer	Nieuwgraaf	Venlo	Gemiddelde
Li	1	0,8	2,3	4,1	2
Be	0,08	0,06	0,16	0,4	0,18
B	24	7	26	26	21
Na	2060	270	1620	2110	1515
Mg	8445	3985	7320	7235	6746
Al	7220	1430	3675	6055	4595
K	11975	4540	11345	8895	9189
Ca	11215	4775	9050	13970	9753
Sc	0,62	0,4	1,2	1,9	1
Ti	165	55	165	240	156
V	3,3	1,5	4,6	7,3	4,2
Cr	8,7	4,9	12	130	38,9
Mn	160	105	120	230	154
Fe	33495	6260	11780	21760	18324
Co	1,8	0,7	1,9	5,1	2,4
Ni	10	7,1	17	92	31,5
Cu	225	165	285	340	254
Zn	610	285	730	1180	701
Ga	1,3	0,3	0,93	1,3	1
Ge	1,7	0,31	0,72	1,3	1,01
As	3,5	2,5	4,1	4,8	3,7
Se	1,7	1,1	2,7	2,5	2
Rb	5	2	7,1	6,6	5
Sr	130	63	71	165	107
Y	0,98	0,73	1,9	4	1,9
Zr	2,1	0,45	1,7	0,94	1,3
Nb	0,1	0,1	0,27	0,5	0,24
Mo	6	3	9	10	7,1
Ru	0,005	< 0,001	0,005	0,004	0,004
Pd	0,13	0,02	0,095	0,3	0,14
Ag	1,3	0,9	2,4	3,1	1,9
Cd	0,93	0,33	1	1,2	0,87
In	0,037	0,002	0,14	0,089	0,07
Sn	18	8	22	33	20
Sb	1,1	0,4	5,8	2,3	2,4
Te	0,013	< 0,005	0,006	0,024	0,011
Cs	0,13	0,15	0,49	0,52	0,32
Ba	140	565	200	225	283

RESRECOVERY

PARTIE 4 : VALORISATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES

Annexes

La	3,9	2,7	6,3	11	6
Ce	4,1	3,2	9,3	13	7,4
Pr	0,49	0,37	0,85	1,6	0,83
Nd	1,9	1,3	3,3	5,8	3,1
Sm	0,3	0,24	0,61	1,2	0,59
Eu	0,11	0,18	0,19	0,3	0,2
Gd	0,36	0,27	0,67	1,2	0,63
Tb	0,05	0,03	0,085	0,17	0,08
Dy	0,21	0,16	0,44	0,89	0,43
Ho	0,04	0,03	0,086	0,18	0,09
Er	0,11	0,08	0,23	0,48	0,23
Tm	0,01	0,01	0,03	0,063	0,03
Yb	0,09	0,08	0,2	0,41	0,2
Lu	0,013	0,011	0,029	0,063	0,029
Hf	0,064	0,057	0,046	< 0,005	0,056
Ta	1,2	1,8	1,2	1	1,3
W	2	0,8	4,1	3,9	2,7
Re	0,003	0,003	0,007	0,003	0,004
Os	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Ir	0,037	0,026	0,046	0,031	0,035
Pt	0,057	0,033	0,11	0,052	0,063
Tl	0,03	0,07	0,094	0,18	0,09
Pb	66	45	83	125	80
Bi	45	17	50	33	36
Th	< 0,001	< 0,001	0,08	0,18	0,07
U	0,54	1,1	2,5	1,1	1,3
Au	-	-	-	-	-
Hg	-	-	-	-	-

RESRECOVERY

PARTIE 4 : VALORISATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES

Annexes

ANNEXE 4. Concentration en métaux dans des boues digérées de stations d'épuration (mg/kgMS) (Roest, de Buijzer and Palmén, 2018)

Element	Amersfoort	Kralingseveer ²	Nieuwgraaf	Venlo	gemiddelde
Li	2,8	2,6	3,3	3,9	3,1
Be	0,21	0,2	0,2	0,53	0,29
B	47	46	34	44	43
Na	2470	2053	4250	1540	2578
Mg	4770	8452	6915	6205	6585
Al	23915	6675	6860	7850	11325
K	7010	9937	9750	10985	9420
Ca	21945	19843	20685	18555	20257
Sc	2	1,6	1,8	2,1	1,9
Ti	190	162	175	305	208
V	9,7	16	9	9,1	11
Cr	30	31	23	180	66
Mn	280	588	215	375	365
Fe	27040	26817	12165	30190	24053
Co	3,7	3,2	3,1	7,7	4,4
Ni	22	24	16	170	58
Cu	335	457	260	530	395
Zn	1390	978	995	1740	1276
Ga	3,8	1,7	1,7	1,8	2,2
Ge	1,3	1	0,47	1,3	1
As	6,4	11	6	7	7
Se	2,8	2,8	2,7	3,4	2,9
Rb	6,6	7,6	10	7,9	8
Sr	195	238	105	300	210
Y	2,7	2,3	2,6	5,6	3,3
Zr	4,1	1,5	1,3	1	2
Nb	0,44	0,48	0,42	0,49	0,46
Mo	9,4	11	10	16	11,4
Ru	0,005	0,005	0,003	0,008	0,005
Pd	0,21	0,2	0,09	0,39	0,22
Ag	4,6	2,6	2,9	3,4	3,4
Cd	1,6	1,1	4,3	1,6	2,2
In	0,17	0,067	0,16	0,15	0,137
Sn	46	21	27	42	34
Sb	4	2	18	3,8	7
Te	0,043	0,011	0,006	0,021	0,02
Cs	0,37	0,45	0,63	0,69	0,53
Ba	255	772	220	320	392
La	8,6	7,3	8,9	12	9,2
Ce	9,9	8,8	9,5	14	10,6

RESRECOVERY

PARTIE 4 : VALORISATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES

Annexes

Element	Amersfoort	Kralingseveer ^a	Nieuwgraaf	Venlo	gemiddelde
Pr	1,1	0,94	0,97	1,6	1,15
Nd	4,4	3,6	3,8	6,3	4,5
Sm	0,75	0,65	0,72	1,3	0,86
Eu	0,23	0,29	0,21	0,35	0,27
Gd	0,78	0,7	0,76	1,3	0,89
Tb	0,1	0,09	0,1	0,18	0,12
Dy	0,53	0,46	0,51	1	0,63
Ho	0,096	0,087	0,095	0,2	0,119
Er	0,28	0,24	0,26	0,56	0,34
Tm	0,034	0,03	0,03	0,07	0,04
Yb	0,23	0,21	0,23	0,47	0,29
Lu	0,031	0,029	0,03	0,068	0,039
Hf	0,067	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,019
Ta	< 0,002	0	0,014	0,014	0,012
W	2,2	2,2	3,6	4,8	3,2
Re	< 0,001	0	0,002	0,002	0,002
Os	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Ir	0,007	0,007	0,004	0,035	0,013
Pt	0,056	0,073	0,079	0,073	0,07
Tl	0,015	0,091	0,055	0,13	0,073
Pb	155	125	125	150	139
Bi	41	35	31	32	35
Th	0,17	0,05	0,04	0,07	0,08
U	0,97	2,5	1,5	1,2	1,5
Au	0,6	0,5	0,38	0,35	0,5
Hg	0,63	0,44	0,63	0,57	0,57

RESRECOVERY

PARTIE 4 : VALORISATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES

Annexes

Page 14 sur 19

ANNEXE 5. Concentration en métaux dans le centrat issu de la digestion anaérobie des boues de stations d'épurations Néerlandaises (mg/L) (Roest, de Buijzer and Palmen, 2018)

Element	Amersfoort	Kralingseveer	Nieuwgraaf	Venlo	gemiddeld
Li	18	50	8,4	28	26
Be	0,26	2,3	< 0,20	< 0,20	0,69
B	400	610	81	510	400
Na	97915	9535	127935	84255	79910
Mg	16160	84400	30620	70480	50415
Al	45860	84600	450	690	32900
K	219800	428800	243400	408400	325100
Ca	62980	243160	54600	40200	100235
Sc	6,2	28	4,6	4,2	10,8
Ti	555	3120	380	110	1041
V	13	200	< 1,0	< 1,0	54
Cr	47	385	< 10	61	125
Mn	575	6280	62	205	1781
Fe	45400	278400	3010	17750	86140
Co	35	44	8,5	41	32
Ni	110	320	15	340	196
Cu	590	5695	23	51	1590
Zn	2120	9800	130	265	3079
Ga	5,9	18	0,36	0,26	6,1
Ge	2,8	14	0,42	2,2	4,9
As	57	125	11	65	65
Se	10	31	< 10	< 10	13
Rb	105	180	115	115	129
Sr	365	2435	84	160	761
Y	4	23	< 0,20	0,4	6,9
Zr	7,3	42	< 1,0	< 1,0	12,6
Nb	< 1,0	1,2	< 1,0	< 1,0	0,7
Mo	17	110	< 1,0	17	36
Ru	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20
Pd	0,26	2,7	< 0,20	< 0,20	0,79
Ag	6,4	24	< 1,0	< 1,0	7,9
Cd	2,1	9,2	0,26	< 0,20	2,9
In	< 0,20	0,28	< 0,20	< 0,20	0,15
Sn	39	125	< 0,40	2,5	41,7
Sb	4,9	23	4,7	< 0,40	8,2
Te	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Cs	2,2	6,8	1,9	5,2	4
Ba	365	8055	15	26	2115

RESRECOVERY

PARTIE 4 : VALORISATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES

Annexes

La	11	72	0,34	0,64	21
Ce	13	87	0,36	0,74	25,3
Pr	1,4	9	< 0,20	< 0,20	2,7
Nd	5,7	35	< 0,20	0,36	10,3
Sm	0,94	6,3	< 0,20	< 0,20	1,9
Eu	0,28	2,7	< 0,20	< 0,20	0,8
Gd	1,3	6,9	0,32	< 0,20	2,2
Tb	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20
Dy	0,7	4,2	< 0,20	< 0,20	1,3
Ho	< 0,20	0,82	< 0,20	< 0,20	0,3
Er	0,36	2,3	< 0,20	< 0,20	0,7
Tm	< 0,20	0,3	< 0,20	< 0,20	0,15
Yb	0,28	1,8	< 0,20	< 0,20	0,57
Lu	< 0,20	0,28	< 0,20	< 0,20	0,15
Hf	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Ta	< 0,40	< 0,40	< 0,40	< 0,40	< 0,40
W	7,6	18	< 0,40	3,9	7,4
Re	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20
Os	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20
Ir	0,24	0,62	< 0,20	< 0,20	0,27
Pt	0,22	0,6	< 0,20	< 0,20	0,3
Tl	< 0,20	0,3	< 0,20	< 0,20	0,2
Pb	170	1145	4,8	7,1	332
Bi	51	330	< 1,0	< 1,0	96
Th	< 0,20	3,6	< 0,20	< 0,20	1
U	1,5	22	< 0,20	< 0,20	5,9
Au	<2,0	4	<2,0	<2,0	1,8
Hg	0,74	3,8	< 0,12	< 0,12	1,2

RESRECOVERY

PARTIE 4 : VALORISATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES

Annexes

Page 16 sur 19

ANNEXE 6. Charge potentielle des métaux dans les eaux brutes, les eaux traitées et les boues de stations d'épuration néerlandaises (tonnes/an) (Roest, de Buijzer and Palmen, 2018)

Element	Influent (ton/jaar)	effluent (ton/jaar)	afgevoerd slib (ton/jaar)
Li	15	14	1
Be	-	-	0,1
B	166	117	13
Na	110.313	103.516	250
Mg	12.595	10.315	2.892
Al	1.186	97	6.325
K	45.158	35.036	1.112
Ca	74.932	67.895	9.304
Sc	5	6	1
Ti	81	7	109
V	3	1	4
Cr	18	4	22
Mn	278	218	156
Fe	2.996	452	15.569
Co	2	1	2
Ni	34	19	18
Cu	106	3	174
Zn	253	32	603
Ga	0,2	-	1
Ge	0,5	0,2	1
As	3	2	3
Se	-	-	1
Rb	27	24	2
Sr	311	256	87
Y	1	-	1
Zr	2	1	1
Nb	-	-	0,2
Mo	1	1	5
Ru	-	-	0
Pd	0,2	0,2	0,1
Ag	-	-	2
Cd	0,3	-	1
In	-	-	0,1
Sn	4	-	17
Sb	1	1	3

RESRECOVERY

PARTIE 4 : VALORISATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES

Annexes

Te	-	-	0
Cs	0,2	0,1	0
Ba	125	20	157
La	1	-	4
Ce	1	-	5
Pr	0,1	-	1
Nd	1	-	2
Sm	0,1	-	0,4
Eu	-	-	0,1
Gd	0,4	0,2	0,4
Tb	-	-	0,1
Dy	0,1	-	0,3
Ho	-	-	0,1
Er	-	-	0,2
Tm	-	-	0
Yb	-	-	0,1
Lu	-	-	0
Hf	2	1	0,1
Ta	-	-	0,3
W	-	-	1
Re	-	-	0
Os	-	-	-
Ir	-	-	0
Pt	-	-	0
Tl	-	-	0,1
Pb	15	0,4	68
Bi	2	-	22
Th	0,2	0,1	0,1
U	0,3	-	1
Au	-	-	0
Hg	-	-	0,2

RESRECOVERY

PARTIE 4 : VALORISATION DES METAUX DANS LES EAUX USÉES

Annexes

Tableau IX-1 - Quarante-neuf métaux classés selon leur évaluation dans le pilier environnemental (Varennes, Blanc, Azais and J. M. Choubert, 2023)

Metal	Symbol	Landfill	Spreading	Composting	WFD	RSDE / SW state	SW monitoring	Mark
Bismuth	Bi							1,00
Bore	B							1,00
Calcium	Ca							1,00
Cesium	Cs							1,00
Gallium	Ga							1,00
Germanium	Ge							1,00
Gold	Au							1,00
Hafnium	Hf							1,00
Indium	In							1,00
Iridium	Ir							1,00
Manganese	Mn							1,00
Niobium	Nb							1,00
Osmium	Os							1,00
Palladium	Pd							1,00
Platinum	Pt							1,00
Potassium	K							1,00
Rhenium	Re							1,00
Rhodium	Rh							1,00
Rubidium	Rb							1,00
Ruthenium	Ru							1,00
Silicium	Si							1,00
Sodium	Na							1,00
Strontium	Sr							1,00
Tantalum	Ta							1,00
Tellurium	Te							1,00
Tungsten	W							1,00
Zirconium	Zr							1,00
Aluminum	Al						X	1,67
Beryllium	Be						X	1,67
Cobalt	Co						X	1,67
Iron	Fe						X	1,67
Lithium	Li						X	1,67
Magnesium	Mg						X	1,67
Silver	Ag						X	1,67
Thallium	Tl						X	1,67
Tin	Sn						X	1,67
Titanium	Ti						X	1,67
Vanadium	V						X	1,67
Antimony	Sb	X					X	2,33
Barium	Ba	X					X	2,33
Molybdenum	Mo	X					X	2,33
Arsenic	As	X		X		X	X	3,67
Chromium	Cr	X	X	X		X	X	4,33
Copper	Cu	X	X	X		X	X	4,33
Zinc	Zn	X	X	X		X	X	4,33
Cadmium	Cd	X	X	X	X	X	X	5,00
Lead	Pb	X	X	X	X	X	X	5,00
Mercury	Hg	X	X	X	X	X	X	5,00
Nickel	Ni	X	X	X	X	X	X	5,00

Landfill : Décision n° 2003/33/CE du 19/12/02 établissant des critères et des procédures d'admission des déchets dans les décharges, conformément à l'article 16 et à l'annexe II de la directive 1999/31/CE

Sludge agricultural use (spreading): Arrêté du 8 janvier 1998 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles pris en application du décret n° 97-1133 du 8 décembre 1997 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées

Composting : La norme NF U 44-051 : Amendements organiques - Dénominations spécifications et marquage.

The European Water Framework Directive (WFD): Directive Cadre européenne sur l'Eau, 2000/60/CE

Search for Dangerous Substances in the Environment programmes (RSDE): Arrêté du 24 août 2017 modifiant dans une série d'arrêtés ministériels les dispositions relatives aux rejets de substances dangereuses dans l'eau en provenance des installations classées pour la protection de l'environnement

State and monitoring of surface water (SW): Arrêté du 25 janvier 2010 établissant le programme de surveillance de l'état des eaux en application de l'article R. 212-22 du code de l'environnement