

TABLE DES MATIERES

<i>DÉDICACE</i>	IV
REMERCIEMENTS	V
RÉSUMÉ :	VI
TABLE DES MATIERES	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	XI
LISTE DES FIGURES	XIV
LISTE DES ACRONYMES.....	XV
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE 1 : CONTEXTE ET OBJECTIF DE RECHERCHE	3
1.1. LES PRODUITS ET LES PROBLÈMES D’OBSOLESCENCE TECHNOLOGIQUE.....	3
1.1.1. <i>Cycle de vie d'un produit</i> :	3
1.1.2. <i>Obsolescence technologique</i>	4
1.1.3. <i>DÉEE mondial</i>	5
1.1.4. <i>Problèmes environnementaux</i>	6
1.1.5. <i>Ressources perdues</i>	7
1.1.6. <i>Cycle vert : Produit en fin de vie (EOL)</i>	9
1.2. CHAÎNE LOGISTIQUE INVERSE	10
1.2.1. <i>Conception de la chaîne logistique inverse des EE en fin de vie</i>	10
1.2.2. <i>Limites de la logistique inverse</i>	12
1.3. PRÉSENTATION DE L’APPLICATION DE LA RECHERCHE: RECYCLE 3R MAURICIE....	13

1.3.1. <i>Recycle 3R Mauricie</i>	13
1.3.2. <i>Québecor</i>	13
1.3.3. <i>Présentation du programme de recherche</i>	14
1.3.4. <i>Positionnement de maîtrise dans le programme de la recherche</i>	15
1.4. PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE.....	16
1.5. QUESTIONS DE RECHERCHE	16
1.6. BUT GÉNÉRAL.....	17
1.7. OBJECTIFS	17
CHAPITRE 2 - REVUE DE LA LITTÉRATURE : LECTURE DES TECHNOLOGIES DE RECYCLAGE DES PCB	18
2.1. COMPOSITION DES CARTES ELECTRONIQUES	18
2.2. CLASSIFICATION DES CARTES ELECTRONIQUES	19
2.3. POTENTIEL ECONOMIQUE.....	22
2.4. TECHNOLOGIES DE RECYCLAGES DES PCB.....	23
2.4.1. <i>Pyrométallurgie</i>	26
2.4.2. <i>Hydrométallurgie</i>	31
2.5. COMPARAISON HYDROMÉTALLURGIE - PYROMÉTALLURGIE	36
2.5.1. <i>Analyse du tableau de comparaison</i>	38
2.5.2. <i>Interprétation</i>	40
CHAPITRE 3 : MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE	41
3.1. CHOIX DE LA TECHNOLOGIE DE RECYCLAGE.....	41
3.1.1. <i>Chaîne logistique actuelle de Recycle 3R Mauricie</i>	41
3.1.2 <i>Caractéristiques des équipements récupérés de Recycle 3R Mauricie</i>	42

3.1.3. <i>Choix de la technologie de traitement</i>	46
3.2. PLAN DE LA RECHERCHE	46
3.3. CHOIX DE LA MÉTHODE AIDANT À LA DÉCISION.....	48
3.4. PROCESSUS D'ANALYSE HIÉRARCHIQUE : AHP	49
3.5. CRITÈRES DE SÉLECTION.....	51
3.6. MÉTHODE DELPHI	53
CHAPITRE 4 : PROCESSUS DE RECYCLAGE PAR LA VOIE HYDROMÉTALLURGIQUE	54
4.1. TRAITEMENTS D'APPLICATION DU PROCESSUS HYDROMÉTALLURGIQUE	54
4.2. TRAITEMENTS PHYSIQUES.....	56
4.2.1. <i>Prétraitement</i> :	56
4.2.2. <i>Déchiquetage et broyage</i>	56
4.2.3. <i>Séparation</i>	56
4.3. TRAITEMENTS CHIMIQUES	57
4.3.1. <i>Lixiviation I : Métaux de base</i>	59
4.3.2. <i>Lixiviation II, III: Métaux précieux</i>	59
4.3.3. <i>Comparaisons des Réactifs : Choix des alternatives de lixiviation</i>	65
4.3.4. <i>Purification</i>	67
4.4. TRAITEMENT ÉLECTROCHIMIQUE : LA RÉCUPÉRATION DES MÉTAUX	67
CHAPITRE 5 : APPLICATION DE LA MÉTHODE AHP SUR LES ALTERNATIVES DE LIXIVIATION DES MÉTAUX PRÉCIEUX DES PCB	68
5.1. LA STRUCTURE HIÉRARCHIQUE DU PROBLÈME.....	68

5.2. LA COMPARAISON BINAIRE : APPLICATION DE LA MÉTHODE DELPHI.....	70
5.2.1. <i>Comparaison binaire des critères</i>	70
5.2.2. <i>Comparaison binaire des sous-critères</i>	75
5.2.3. <i>Comparaison binaire des alternatives selon chaque sous-critère</i>	77
5.3. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS FINAUX ET LE CHOIX DE L'ALTERNATIVE DE LIXIVIATION HYDROMÉTALLURGIQUE	85
5.4. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS.....	86
CONCLUSION GÉNÉRAL	88
REFÉRENCE	91
ANNEXE 1 : PROTOCOLES D'HYDROMÉTALLURGIQUES	97
ANNEXE 2 : LA LIXIVIATION	100
ANNEXE 3 : L'APPLICATION DU AHP	103

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1. 1: QUANTITÉS DES DEEE PRODUITS EN 2014	6
TABLEAU 2.1 CLASSIFICATION DES DÉCHETS DE PCB	19
TABLEAU 2.2: CONCENTRATION MOYENNE DES MÉTAUX PRÉCIEUX DANS CERTAINS DÉCHETS DE PCB	21
TABLEAU 2.3: ESSAIS LABORATOIRES DES TECHNIQUES PYROMETALLURGIQUES	27
TABLEAU 2. 4: ESSAIS LABORATOIRES DES TECHNIQUES HYDROMETALLURGIQUE	35
TABLEAU 2.5: COMPARAISON DE L'HYDROMÉTALLURGIE ET PYROMÉTALLURGIE SUR DIFFÉRENTS CRITÈRES.....	37
TABLEAU 3.1: QUANTITÉ DES ÉQUIPEMENTS REÇUS ET DE CHAQUE COMPOSANT DÉSASSEMBLÉ POUR L'ANNÉE 2016	44
TABLEAU 3.2 : ESTIMATION DU CONCENTRATION DES MP PAR TYPE D'EQUIPEMENT PAR PCB.....	45
TABLEAU 3.3: ÉCHELLE D'ÉVALUATION SELON SAATY (1989).....	50
TABLEAU 3.4: COEFFICIENT D'INCOHÉRENCE ALÉATOIRE.....	51
TABLEAU 3.5: EXPLICATIONS DES SOUS-CRITÈRES CHOISIS	52
TABLEAU 4.1: ESSAIS LABORATOIRES DE LIXIVIATION PAR THIOSULFATE TIRÉ DE LA LITTÉRATURE.....	61
TABLEAU 4.2: ESSAIS LABORATOIRES DE LIXIVIATION PAR THIOURÉE TIRÉ DE LA LITTÉRATURE.....	62
TABLEAU 4.3: ESSAIS LABORATOIRES DE LIXIVIATION PAR IODE TIRÉ DE LA LITTÉRATURE	63
TABLEAU 4.4: ESSAIS LABORATOIRES DE LIXIVIATION PAR CHLORURE TIRÉ DE LA LITTÉRATURE.....	64

TABLEAU 4.5: COMPARAISON DES ALTERNATIVES DE LIXIVIATION DES MÉTAUX PRÉCIEUX	65
TABLEAU 5.1: MATRICE DE COMPARAISON BINAIRE CRITÈRE - CRITÈRE	71
TABLEAU 5.2: MATRICE DE COMPARAISON BINAIRE CRITÈRE - CRITÈRE	73
TABLEAU 5.3: MATRICE DE CALCUL DE L'INDICE DE COHÉRENCE ET LE RATIO DE COHÉRENCE DE LA MATRICE BINAIRE DU CRITÈRE	74
TABLEAU 5.4: VECTEUR PROPRE NORMALISÉ, IC ET RC DE LA COMPARAISON BINAIRE DES SOUS-CRITÈRES DU CRITÈRE TECHNIQUE	75
TABLEAU 5.5: VECTEUR PROPRE NORMALISÉ DE LA COMPARAISON BINAIRE DES SOUS-CRITÈRES DU CRITÈRE ÉCONOMIQUE	76
TABLEAU 5.6: VECTEUR PROPRE NORMALISÉ DE LA COMPARAISON BINAIRE DES SOUS-CRITÈRES DU CRITÈRE ENVIRONNEMENTAL	76
TABLEAU 5.7: VECTEUR PROPRE NORMALISÉ DE LA COMPARAISON BINAIRE DES ALTERNATIVES POUR LE COÛT DE LIXIVIATION	77
TABLEAU 5.8: VECTEUR PROPRE NORMALISÉ DE LA COMPARAISON BINAIRE DES ALTERNATIVES POUR LE COÛT DE TRAITEMENT	78
TABLEAU 5.9: VECTEUR PROPRE NORMALISÉ DE LA COMPARAISON BINAIRE DES ALTERNATIVES POUR LE RISQUE DE TOXICITÉ.....	79
TABLEAU 5.10: VECTEUR PROPRE NORMALISÉ DE LA COMPARAISON BINAIRE DES ALTERNATIVES POUR LA CORROSIVITÉ.....	80
TABLEAU 5.11: VECTEUR PROPRE NORMALISÉ DE LA COMPARAISON BINAIRE DES ALTERNATIVES POUR LA FAISABILITÉ TECHNOLOGIQUE	80
TABLEAU 5.12: VECTEUR PROPRE NORMALISÉ DE LA COMPARAISON BINAIRE DES ALTERNATIVES POUR LE TAUX DE LIXIVIATION DU RÉACTIF.....	81

TABLEAU 5.13: VECTEUR PROPRE NORMALISÉ DE LA COMPARAISON BINAIRE DES ALTERNATIVES POUR LE DEGRÉ DE PURETÉ DES MP RÉCUPÉRÉS.....	83
TABLEAU 5.14: VECTEUR PROPRE NORMALISÉ DE LA COMPARAISON BINAIRE DES ALTERNATIVES POUR LA VITESSE DE LIXIVIATION DU RÉACTIF	84
TABLEAU 5.15: VECTEUR PROPRE NORMALISÉ DE LA COMPARAISON BINAIRE DES ALTERNATIVES POUR LA RECYCLABILITÉ DE L'AGENT DE LIXIVIATION.....	84
TABLEAU 5.16: LES VECTEURS PROPRES GLOBAUX DES CRITÈRES ET LE VECTEUR PROPRE GLOBAL FINAL DES ALTERNATIVES	85

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1.1: COMPARAISON ENTRE UN CYCLE DE VIE NORMAL ET UN CYCLE DE VIE MODERNE RÉTRÉCIE D'UN PRODUIT	4
FIGURE 1.2: CONCENTRATION MOYENNE DE L'OR DANS CERTAINS DÉCHETS DE PCB.....	9
FIGURE 1.3: CYCLE DE RÉUTILISATION DES ÉQUIPEMENT ÉLECTRIQUES ET ÉLECTRONIQUES EN FIN DE VIE.	11
FIGURE 1.4: CYCLE DE LA CHAÎNE LOGISTIQUE INVERSE ET LES PRINCIPALES CONTRAINTES DE RÉCUPÉRATIONS DE VALEUR.....	15
FIGURE 2.1: REVENUS MOYEN DE RECYCLAGE DES PCB	23
FIGURE 2.2: ALTERNATIVES DE RECYCLAGE DES CARTES ÉLECTRONIQUES	25
FIGURE 2.3: PROCÉDES HYDROMÉTALLURGIQUES DE RECYCLAGE DES PCB DE TELEPHONE CELLULAIRE.	34
FIGURE 3.1: CHAÎNE LOGISTIQUE INVERSE DE RECYCLE 3R MAURICIE	42
FIGURE 3.2: FLUX DE DÉSASSEMBLAGE DE RECYCLE 3R MAURICE	43
Figure 3.3 : Plan de la recherche du projet de maîtrise.....	62
FIGURE4.1: PRINCIPAUX TRAITEMENTS POUR L'APPLICATION DU PROCESSUS HYDROMÉTALLURGIQUE	55
FIGURE 4.2: PROCESSUS DES PROCÉDÉS DE TRAITEMENT HYDROMÉTALLURGIQUE.....	58
FIGURE 5.1: STRUCTURE HIÉRARCHIQUE DU PROBLÈME DE CHOIX D'ALTERNATIVE DE LIXIVIATION DES PCB POUR RÉCUPÉRER LES MP	69

LISTE DES ACRONYMES

AHP	Analyse hiérarchique des procédés
DEEE	Les déchets des équipements électriques et électroniques
DET	Déchets des équipements de télécommunication
EEE	Équipements électriques et électroniques
IC	Indice de Cohérence
MP	Métaux précieux
PCB	Les cartes électroniques
RC	Ratio de Cohérence
VPN	Vecteur Propre Normalisé
VPG	Vecteur Propre Global
VPGF	Vecteur Propre Global Final

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Aujourd'hui, les industries évoluent dans une vague d'innovation technologique qui stimule la recherche de l'excellence sur toutes les échelles. Pour tirer leur épingle du jeu et conserver leur part du marché, elles sont obligées d'intégrer et de s'adapter aux besoins des consommateurs. Par conséquent, les unités industrielles développent de nouveaux produits et donnent naissance à des besoins non classiques aux consommateurs dans le but de leur offrir un style de vie de plus en plus luxueux. Ce facteur amène à une accélération remarquable de la modernisation des chaînes de production, ainsi qu'au lancement des nouvelles gammes de produits. Cette révolution dans les technologies affecte exclusivement le cycle de vie du produit qui est rendu de plus en plus court.

L'obsolescence technologique est un terme relié exclusivement au développement technologique. Il explique le rétrécissement du cycle de vie des produits et les nouvelles formes de dysfonctionnement de ces derniers. Cette incompatibilité entre les générations des produits engendre une augmentation des déchets électroniques produits par les équipements désuets.

Depuis la fin du XX^e siècle, des enjeux ont commencé à se développer, concernant la protection de l'environnement et les ressources naturelles, se présentant par les règlements de développement durable, selon la définition de Brundtland 1987« *le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs propres besoins* ».

Ces déchets électroniques menacent l'environnement avec leurs effets toxiques dus aux composants dangereux. Cependant, ces équipements contiennent plusieurs ressources de métaux pouvant être traitées et réutilisées. Ceci peut être une solution pour rationaliser l'utilisation des ressources naturelles non durable et éliminer le problème de ces déchets nocifs.

Dans cette étude, on s'intéresse au recyclage des déchets des équipements de télécommunication (DET) et la récupération des métaux précieux issus des PCB. Pour atteindre cet objectif, une recherche a été effectuée dans la revue de littérature sur ;

- Le contenu des cartes électroniques et leurs classifications.
- Les technologies de recyclage des PCB.
- Une comparaison entre la voie hydrométallurgie et Pyrométallurgie.
- Les procédés d'hydrométallurgie et les alternatives de lixiviation des métaux précieux.

Ce mémoire est divisé en cinq chapitres. Le chapitre 1 « contexte et objectif de recherche » met l'accent sur le contexte général du projet, les notions de la chaîne de logistique inverse et le programme de recherche incluant ce projet. Ensuite, le chapitre 2 « Revue de la littérature » présente la composition et la classification des PCB selon le type d'équipement et les technologies de recyclage possibles. Le chapitre 3 « méthodologie de recherche » montre la méthodologie suivie par cette étude et définit les éléments nécessaires pour l'application. Suit par le chapitre 4 « les procédés de recyclage des PCB par la voie hydrométallurgie » explique les principales étapes de cette technologie et les alternatives de lixiviation. Enfin, le chapitre 5 « Application de la méthode AHP sur les alternatives de lixiviation hydrométallurgique des MP de PCB », développe l'application de la méthode AHP sur les alternatives choisies selon des critères de sélection.

CHAPITRE 1 : CONTEXTE ET OBJECTIF DE RECHERCHE

Dans ce chapitre le contexte général et le cadre professionnel du projet seront présentés, ainsi que la problématique et les objectifs de la recherche.

1.1. Les produits et les problèmes d'obsolescence technologique

La mondialisation rend le marché de plus en plus ouvert, ce qui explique la forte concurrence de développement. Aujourd'hui, la survie de ces entreprises dépend de leurs parts du marché. D'énormes investissements dans les départements de recherche et de développement sont ainsi appliqués pour prendre l'avantage. Tous ces facteurs favorisent l'accélération des changements technologiques et le rétrécissement du cycle de vie des produits.

1.1.1. Cycle de vie d'un produit :

Le cycle de vie d'un produit se divise principalement en quatre phases. D'abord, la « conception et développement » du produit. Ensuite, la phase de « production et distribution ». Puis, « l'utilisation et entretien ». Et finalement, « la fin de vie » et la mise au rebut. La figure 1.1 présente les modifications des cycles de vie « normal » et « moderne rétrécie » du produit. Les changements sont principalement révélés lors de la deuxième et la troisième phase.

Premièrement, la phase de production et distribution : à la fin du stade de maturité, la courbe du cycle moderne a tendance à baisser plus rapidement que le cycle normal. En effet, le développement des nouvelles technologies favorise la conception rapide des nouveaux produits. La stratégie des entreprises est alors d'arrêter la production de l'ancien produit pour laisser la place au nouveau.

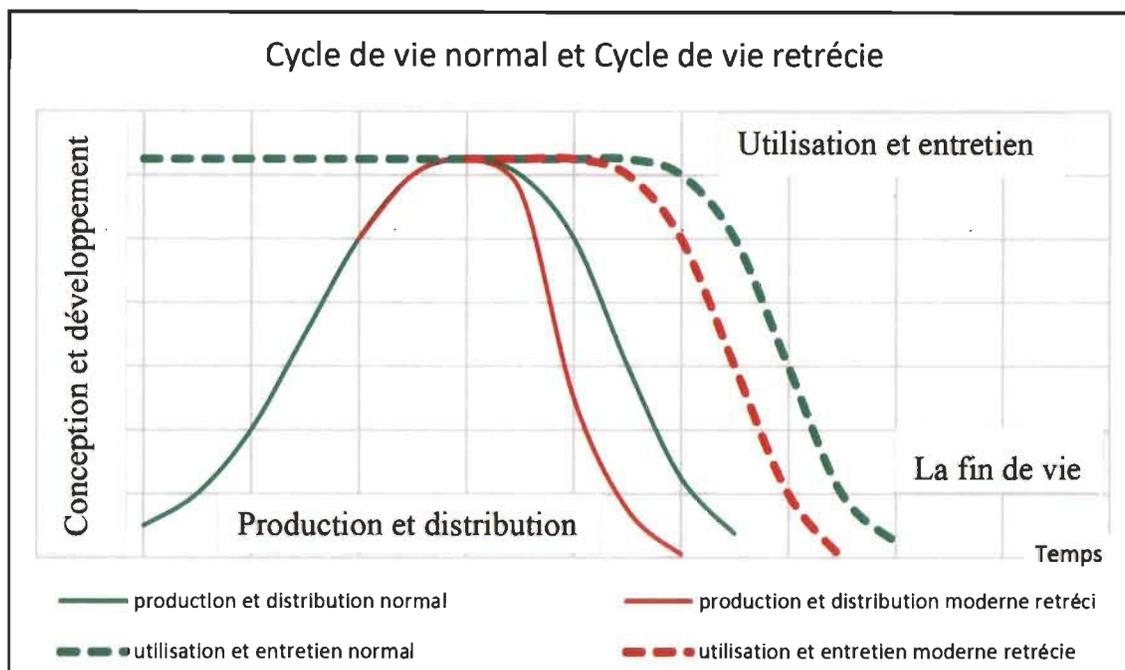


Figure 1.1: Comparaison entre un cycle de vie normal et un cycle de vie moderne rétrécie d'un produit (Modifiée de Jean-Samuel Wienin, 2000)

Deuxièmement, la phase d'utilisation et entretien : les nouvelles technologies introduites, offrent des options plus luxueuses pour les utilisateurs. De plus, elles ne sont pas nécessairement compatibles avec les anciens produits, ce qui explique l'abandon rapide de l'équipement par le consommateur. C'est l'obsolescence technologique.

1.1.2. Obsolescence technologique

L'obsolescence technologique est un terme relié directement aux équipements qui présentent un certain déphasage ou incompatibilité avec les nouvelles technologies du marché ce qui accélère la phase de la fin de vie. Selon Aladeojebi (2013) l'obsolescence technologique peut-être classifiée en trois catégories. La première est liée à la conception d'une durée de vie limitée. La deuxième est liée à une conception pour une réparation

limitée. La troisième est celle liée à l'esthétique du design où le produit est conçu pour s'user facilement.

Un autre type d'obsolescence connu pour les produits électroniques, l'obsolescence technique ou précoce, les producteurs offrent de nouveaux produits plus performants pour remplacer le produit actuel, le consommateur abandonne son appareil fonctionnel volontairement afin d'obtenir la performance promise du nouveau produit.

Depuis les vingt dernières années, la fréquence des technologies qui passent à la désuétude est en augmentation continue ce qui a créé des problèmes spatiaux et environnementaux. Selon Thomas (2016) les ventes des équipements électriques et électroniques ont atteint 51 millions de tonnes (Mt) dans le monde en 2013, versus 39 MT des DEEE produites. Cependant, le taux de collecte est estimé de 10 Mt seulement.

1.1.3. DEEE mondial

La quantité des DEEE produits par le monde en 2014 est évaluée de 41,8 millions de tonnes, soit 5,9 kg par habitant. Le tableau 1.1 présente un exemple de la quantité de ces déchets générés par quelques pays. La moyenne de cette quantité par habitant montre que les pays développés procurent les portions les plus élevées de ces déchets comparativement au tiers monde. Par exemple, la Suisse avec 8 millions d'habitants produit plus que vingt fois les déchets électroniques de l'Inde avec une population de 1255,6 millions. (Baldé et al., 2015).

Selon Planetoscope, le monde a généré environ 44.7 millions de tonnes de déchets électriques et électroniques en 2016, soit une augmentation de 8 % par rapport à 2014. Les appareils de communication sont en augmentation moyenne de 2 % par an. Selon l'Union internationale des télécommunications, 80 % de DEEE ne présente aucun historique de traçabilités ni de recyclage.

Tableau 1.1: Quantités des DEEE produits en 2014 (Baldé et al., 2015)

Pays	DEEE (mille tonnes)	DEEE/habitant (kg)	Population (millions)
Suisse	213	26,3	8,1
Royaume Uni	1511	23,5	64,2
États-Unis	7072	22,1	319,7
Allemagne	1769	21,6	81,5
Belgique	242	21,4	11,3
Canada	725	20,4	35,5
Australie	468	20	23,4
Japon	2200	17,3	127,1
Mexique	958	8,2	117
Brésil	1412	7	201,4
Chine	6033	4,4	1367,5
Inde	1641	1,3	1255,6

1.1.4. Problèmes environnementaux

La sensibilisation des populations pour le retour des déchets dans les centres de recyclage reste encore un sujet non convenablement développé. Le consommateur a la tendance à mettre ses déchets électroniques dans les ordures ou sur les trottoirs. Deux études d'Environnement Canada en 2003 ont montré que les sites d'enfouissement

canadiens reçoivent annuellement environ 140 mille de tonnes des déchets électroniques qui infectent graduellement les nappes phréatiques et ultimement présentent des effets nocifs sur le système neurologique des êtres vivants à la suite de la consommation de l'eau. En effet, ces déchets électroniques, selon la même étude, exposent environ 4750 tonnes de plomb.

D'un autre côté, à cause de l'énorme fabrication des appareils électroniques, le Programme des Nations Unies pour l'environnement (UNEP) annonce le risque d'épuisement de plusieurs métaux exclusifs au développement technologique. À titre d'exemple, la quantité de fabrication des cartes électroniques neuves est environ de 2 millions de tonnes par an. Cependant, la production annuelle de ces PCB provenant de déchets des cartes recyclées est évaluée à 500 mille tonnes seulement, avec une croissance estimée de 5 % par an.

1.1.5. Ressources perdues

La plupart des produits abandonnés sont fonctionnels et comportent plusieurs composants encore susceptibles d'être reconditionnés. En plus, les DEEE possèdent des métaux précieux comme le cuivre, le fer et l'or ce qui donne une valeur importante à ces déchets qui représentent une véritable fortune. Selon « *boliden sustainability report* » une tonne de cellulaires peut enfermer entre 500 et 700 grammes d'argent et 150 à 400 grammes d'or, tandis qu'une tonne de minerai brut peut représenter seulement 4.2 g d'argent et 0.2 g d'or.

Selon l'organisme Recyclage des produits électroniques Canada (EPSC) le recyclage des MP des PCB est 40 fois plus rentable que les extraire du minerai. Ce qui signifie que les déchets électroniques représentent une mine industrielle de métaux, surtout de l'or, qu'il ne faut pas rater.

En 2014, le taux de rejet a augmenté de 2 MT selon l'Université des Nations unies soit de 41 Mt au total de déchets de valeur estimée de 48 milliards d'euros, dont le un sixième seulement ont été recyclées adéquatement.

Selon Recyc-Québec, 80 % des composants informatiques et électroniques sont réutilisables ou recyclables. Néanmoins, 6 % seulement de ces équipements électroniques sont recyclés au Québec.

Dans les déchets des équipements électroniques, le composant le plus riche en termes de métaux est le circuit imprimé (PCB) ou la carte électronique, ce composant constitue le cerveau de l'appareil et présente la partie qui couvre le potentiel à développer la technologie. Selon Wang et al., (2016) un circuit imprimé (PCB) est un support qui regroupe des composants électroniques, afin de réaliser un système électronique. Les matériaux présents dans les PCB peuvent être classés en trois groupes: organiques 30%, métaux 40% et céramiques 30%. La composition d'un PCB varie considérablement selon le type de l'équipement.

Les équipements de télécommunication possèdent définitivement des PCB plus riches en métaux précieux étant donné que leurs fonctionnements sont reliés par des connexions délicates aux différents réseaux extérieurs. Ces connexions ne doivent pas rencontrer d'erreurs ou de mauvais fonctionnements. L'or est un métal connu par sa connectivité fiable ce qui explique sa grande présence dans ce type d'équipement comparativement aux autres métaux. Selon la figure 1.2, la teneur d'or dans les PCB des ET comme les téléphones, les ordinateurs, les GPS, les routeurs, etc. peut atteindre jusqu'à 600 grammes par tonne de déchets. De plus, ces équipements contiennent aussi de l'argent et du palladium, de cuivre, etc. (Chancerel, 2010; Holgersson et al., 2018).

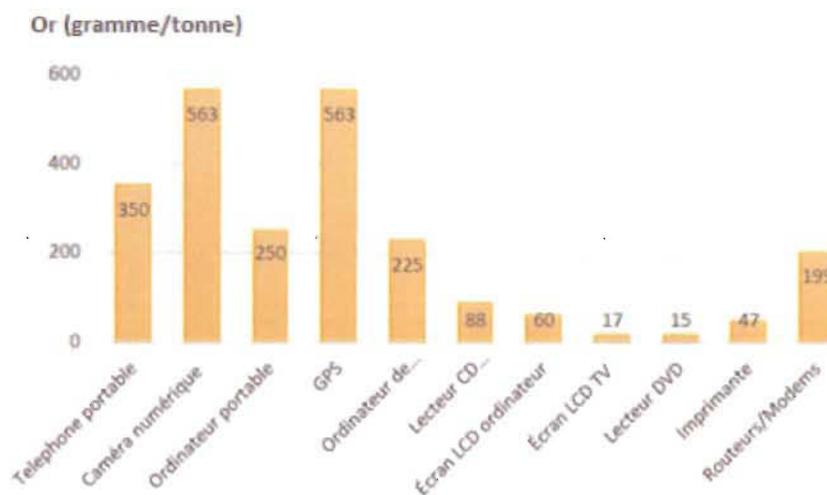


Figure 1.2: Concentration moyenne de l'Or dans certains déchets de PCB (interprété de Chancerel, (2010))

1.1.6. Cycle vert : Produit en fin de vie (EOL)

Quand le consommateur décide de mettre son équipement au rejet, le produit est considéré en phase final c'est la fin de la vie. Plusieurs projets ont été réalisés afin d'étudier cette phase qui a été négligée pendant des dizaines années.

Le cycle vert montre une vision optimiste et satisfaisante pour la EOL des produits. Il permet à la fois de résoudre les problèmes environnementaux, d'économiser les ressources naturelles et de récupérer les composants et les métaux que renferment ces déchets. Cependant, il ne faut pas ignorer les limites de cette solution.

D'une part, Il faut récupérer le maximum d'équipements rejetés par les consommateurs afin de rentabiliser les coûts du projet. D'autre part, beaucoup de contraintes liées à l'application des projets du traitement comme la faisabilité technique à l'échelle industrielle, le coût d'application, la pollution engendrée par les traitements, etc. font partie de la chaîne de logistique inverse.

1.2. Chaîne logistique inverse

La logistique inverse est une nouvelle stratégie pour la gestion de la récupération de valeur des déchets. Thierry et al. (1995, p. 114) présente la logistique inversée comme étant « *la gestion des produits, des composants et des matériaux usés ou éliminés* ». L'objectif est de récupérer au maximum la valeur économique contenue dans les produits rejetés et de réduire l'impact environnemental en diminuant la quantité de déchets ultime. La chaîne logistique inverse se résume dans la suite des activités : le collecte, le triage et l'inspection, le traitement, et la revente. (Fleischmann et al., 2005 ; Guide et al.2000).

1.2.1. Conception de la chaîne logistique inverse des EE en fin de vie

Les opérations et la gestion de la logistique inversée est très différente au classique. Fleischmann et al. (2005) ont conclu que les deux premières étapes (le collecte et l'inspection) sont les plus compliquées à maîtriser dans la conception de la chaîne inversée et elles sont aussi les clés de la réussite de cette gestion.

- *Collecte*

C'est la première activité à maîtriser dans la chaîne logistique inverse. Plusieurs problèmes rendent cette étape compliquée comme l'approvisionnement incertaine. Deux stratégies peuvent prendre lieu pour gérer ce phénomène soit (1) collecte des équipements à partir du marché, généralement pour un certain coût d'achat revient à l'utilisateur ou (2) collecte des équipements mis au déchet, généralement gratuit mais implique d'autres types de dépenses. Cette dernière stratégie est la plus adaptée par les entreprises de recyclage cependant, son contrôle est plus compliqué car elle nécessite beaucoup de gestion et planification (Guide et al.2000).

- *Inspection/Tri*

L'inspection et le triage sont des étapes cruciales. Le choix de traitement pour les équipements en fin de vie aura une incidence directe sur la rentabilité du système de logistique inverse. Les équipements triés seront examinés et classés selon l'option de

traitement la plus rentable. Plusieurs facteurs font partie de l'évaluation des DEEE comme, l'état de l'équipement retourné, les coûts de traitement, la possibilité ou non d'un marché de revente, etc. (Ziout et al., 2014).

- *Traitement de réutilisation*

Le choix de traitement est affecté à l'équipement selon trois critères : la disponibilité de la technique, le coût du traitement et les effets environnementaux. Nnorom et Osibanjo (2010) ont nommé et analysé les priorités des différentes options de réutilisation des DEEE comme montre la figure 1.3.

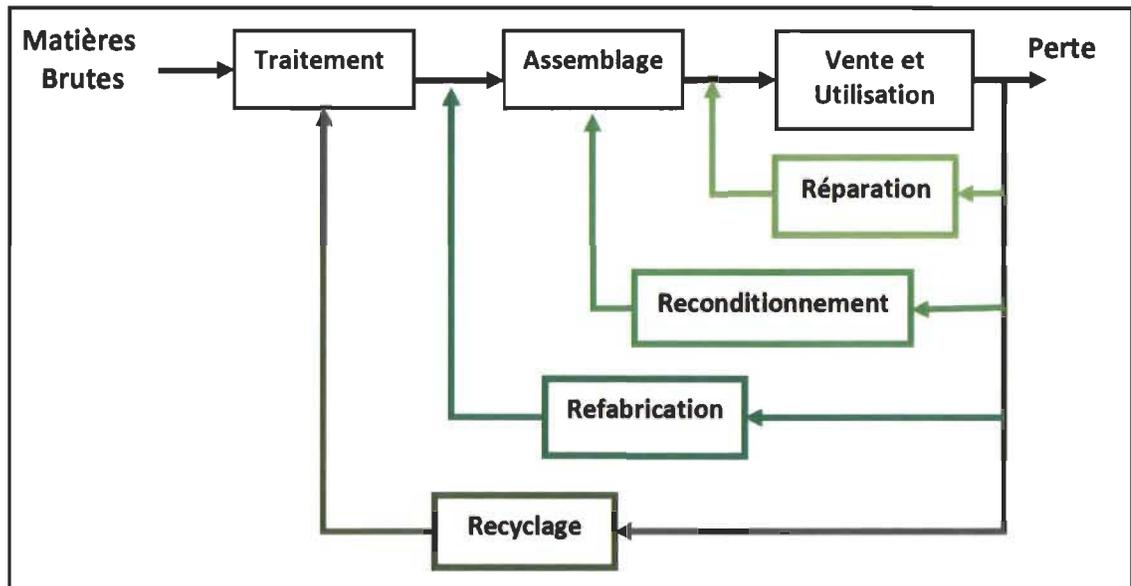


Figure 1.3: Cycle de réutilisation des équipements électriques et électroniques en fin de vie. (Nnorom et Osibanjo, 2010)

La production d'un équipement nécessite le traitement des matières brutes pour fabriquer les composants, puis l'assemblage de ces derniers, enfin le mettre en vente. Entre les différentes étapes de la production, on peut instaurer des sources de matière provenant des produits rejetés. Selon la condition de déchets, quatre options peuvent être envisagées :

- (1) **La réparation**, consiste à réparer le produit, le remettre à neuf, ou le réintroduire sur le marché à un prix raisonnable.
- (2) **Le reconditionnement**, c'est la récupération des composants des EEE et les réassemblés après vérification pour donner le même produit original.
- (3) **La refabrication** nécessite la récupération des composants d'un produit pour être assemblé avec de nouveaux matériaux afin de donner un nouveau produit.
- (4) **Le recyclage** est l'option la plus compliquée. Elle implique la récupération des matériaux dans la forme brute ou vierge. C'est un processus personnalisé par type de produit. Le recyclage est actuellement l'option la plus pratiquée pour des équipements électroniques non valorisables.

Après les activités de recyclage, la fonction et l'identité des équipements et de ses éléments constitutifs sont perdues, seulement les matériaux recyclables sont récupérés (Thierry et al.1995). Généralement, les coûts élevés d'investissement en technologies de recyclage et la faible valeur récupérée, exigent que le volume de traitement soit important pour assurer la viabilité économique du projet (Agrawal et al 2015).

1.2.2. Limites de la logistique inverse

Pour assurer la réussite du projet de recyclage, une chaîne de logistique inverse efficace doit être planifiée. Geyer et Jackson (2004) ont condensé les contraintes de la chaîne de logistique inverse sur trois niveaux :

(1) **Contrainte liée au retour** : Trois approches peuvent être appliquées pour optimiser le réseau de logistique inverse (Coyle et al, 2003) soit les approches heuristiques, les méthodes mathématiques ou la simulation.

(2) **Contrainte liée au traitement** : À l'échelle industrielle, les deux technologies de recyclage des produits électroniques sont : les pyrométallurgiques et les hydrométallurgiques (Jadhav et Hocheng ,2015).

(3) Contrainte liée aux consommations des produits récupérés : C'est une nouvelle culture de consommation et de gestion qui nécessite encore de la sensibilisation et de l'introduction au sein de nos quotidiens.

1.3. Présentation de l'application de la Recherche: Recycle 3R Mauricie

Cette maîtrise fait partie de plusieurs recherches interreliées pour la conception de la chaîne logistique inverse des Déchets de ET de Recycle 3R Mauricie. Un partenariat entre Québecor, Recycle 3R Mauricie et l'UQTR a pris lieu dans le but de déterminer les clés de réalisation de ce projet pour la récupération des MP à partir des ET.

1.3.1. Recycle 3R Mauricie

Recycle 3R Mauricie est un organisme à but non lucratif de la catégorie : « Associations et organismes des domaines de la santé et des services sociaux pour la revente de matériel recyclé ». Il est associé à (SIT) Service d'Intégration au Travail Mauricie et il a comme mission principale la création de l'emploi, notamment pour les personnes qui éprouvent des troubles mentaux. Ses principales activités sont le démantèlement, la revente directe et la réparation des DET.

- Fonctionnement de Recycle 3R Mauricie

Le désassemblage des ET est présentement l'activité principale de recycle 3R Mauricie. La réparation et la revente directe sont des alternatives en développement. Les différents types d'équipements collectés par recycle 3R Mauricie sont classés en 3 catégories : Les décodeurs, les routeurs et les modems. Le désassemblage des équipements reçus donne lieu à quatre composants : plastique, métaux, carte électronique (PCB) et disque dur dans certains cas.

1.3.2. Québecor

Québecor est une entreprise québécoise qui offre plusieurs filières de service comme la télécommunication et les médias. Ses activités se présentent par sa filiale

Québecor Média. Parmi ses entreprises les plus connues, Vidéotron, l'une des principales compagnies de télécommunication au Canada, offre des services de câblodistribution, d'accès Internet, du téléphone par câble et sans-fil.

- *Relation Recycle 3R Mauricie avec Québecor:*

Recycle 3R Mauricie reçoit à partir des centres de collectes de Vidéotron (fournisseur potentiel), différents types d'équipements de télécom désuets. Il reçoit aussi de la même entreprise des armoires et des cartes électroniques de type industriel et qui sont retirées du service pour donner suite au remplacement de technologies.

1.3.3. Présentation du programme de recherche

Afin d'atteindre ses objectifs, Recycle 3R Mauricie explore présentement les procédés de recyclage des ET en fin de vie. En plus de ses activités actuelles, l'organisme a mis en place un programme de recherche et développement afin de trouver des solutions durables pour le recyclage et la récupération des MP des cartes électroniques. Ce programme va permettre à Recycle 3R Mauricie de devenir un chef de file au Canada dans ce domaine.

- *Objectifs du projet*

L'objectif principal de ce programme de recherche est la conception d'une chaîne logistique inverse efficace, pour valoriser les déchets des ET, compatible avec le fonctionnement du recycle 3R Mauricie.

- *Les objectifs secondaires sont distribués dans les projets suivants :*

- (1) Développement d'un outil de prévision des équipements en EOL (Ktari, 2018)
- (2) Développement d'un outil d'optimisation pour l'élaboration du nouveau chaîne logistique inverse de Recycle 3R Mauricie
- (3) Sélection de la méthode de traitement adéquate pour la récupération des MP
- (4) Optimisation des performances et développement d'un procédé prototype

- *Contraintes liées à la chaîne logistique inverse*

La viabilité de la gestion de récupération des DEEE est fortement liée aux flux informationnels disponibles sur l'équipement à traiter, comme les quantités, la qualité, l'état de retour, les composants, le marché de revente, etc. Les contraintes pour ce projet se divisent en trois principales :

- (1) Contrainte de collecte : Approvisionnement de retour incertain.
- (2) Contrainte de traitement : processus de récupération compliqué.
- (3) Contrainte de la demande : Marché incertain.

1.3.4. Positionnement de maîtrise dans le programme de la recherche

La figure 1.4, présente les activités de la chaîne logistique inverse des DEEE, ainsi que ses contraintes et leurs emplacements sur la chaîne inversée. Comme définie auparavant, la gestion de récupération de valeur présente trois contraintes. Cette recherche contribue à l'explication et la résolution des contraintes liées au traitement. Plus spécifiquement, étudier le troisième projet du programme de recherche : la sélection de la technologie de traitement adéquate pour la récupération des MP à l'état brute.

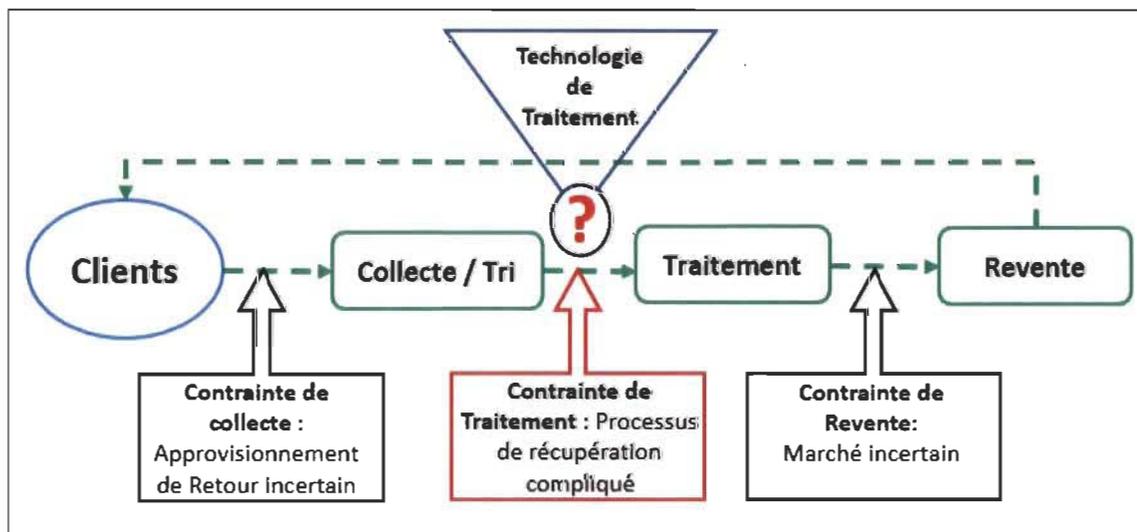


Figure 1.4: Cycle de la chaîne logistique inverse et les principales contraintes de récupérations de valeur

La démarche proposée pour atteindre cet objectif est la suivante : premièrement, choisir la technologie de recyclages des PCB selon l'efficacité avec les données et les paramètres de l'entrepreneur. Deuxièmement, identifier les critères de choix et les alternatives de recyclages de la technologie choisie. Finalement, la détermination de l'alternative de recyclage à prendre pour le projet. Le choix de la technologie appropriée doit tenir compte des conditions de l'entreprise, tels que le budget disponible, la quantité et les types de déchets, la faisabilité technique et les coûts de traitement ainsi que les coûts environnementaux.

1.4. Problématique générale

La production des équipements de télécommunication et d'informatique est en augmentation continue, par conséquence, les déchets électroniques sont aussi en croissance annuelle importante. Ces augmentations menacent directement l'environnement à l'échelle mondiale avec les risques de pollution et l'épuisement des ressources naturelles. La situation actuelle du monde, sur laquelle se basent toutes les prochaines générations, est très sensible au niveau de la production. Le traitement des déchets est une solution adoptée par l'humain depuis des siècles dans plusieurs secteurs comme le plastique, le verre, le papier, le métal, etc. Il possède deux impacts écologiques majeurs, réduire les déchets donc diminuer la pollution et rationaliser l'utilisation des ressources naturelles non durable.

La récupération des métaux précieux à l'état brute avec les procédés développés actuellement, présente plusieurs limites étroitement liées:

- La faisabilité technique du procédé et sa stabilité
- L'impact environnemental, des dégagements toxiques et nocifs
- La faisabilité économique et la rentabilité du projet

1.5. Questions de recherche

Les problématiques exposées engendrent les questions suivantes :

- Quelles sont les quantités possibles à récupérer des MP à partir des PCB? Et comment peut-on classer les EEE pour le choix de traitement?
- Quels sont les étapes et les procédés de recyclage pour les technologies hydrométallurgie et Pyrométallurgie? Et quels sont les avantages et les inconvénients d'application pour chaque?
- Quels sont les critères de choix à prendre en considération pour le choix de procédés? Et quelle est la méthode adéquate à appliquer pour la prise de choix?

1.6. But général

Le but de cette recherche est la valorisation des équipements en fin de vie par le recyclage des circuits imprimés pour la récupération des métaux précieux contenus dans les déchets des équipements de télécommunication.

1.7. Objectifs

Les objectifs qui découlent de ce but sont :

- Comparaison de l'hydrométallurgie et le Pyrométallurgie pour le choix de la technologie adéquate.
- Étude approfondie du processus d'application des procédés hydrométallurgiques.
- Identification des alternatives de lixiviations hydrométallurgique pour la récupération des MP.
- Détermination du réactif de lixiviation selon les critères de choix par l'application de la méthode aide à la décision, AHP.

CHAPITRE 2 - REVUE DE LA LITTÉRATURE : LECTURE DES TECHNOLOGIES DE RECYCLAGE DES PCB

Ce chapitre présente une revue de la littérature des recherches de solutions de recyclages des PCB. Pour cette partie la recherche est effectuée pour les éléments suivants :

- La composition des cartes électroniques et leurs classements.
- Les technologies de recyclage : hydrométallurgie et Pyrométallurgie.

2.1. Composition des Cartes électroniques

Un circuit imprimé (PCB, *printed circuit board*) est un support qui sert à relier les composants électroniques. Selon Zagouras et al. (2017) le cuivre est le composant métallique principal étant donné qu'il a la meilleure conductivité électrique dans la catégorie des métaux non précieux. Il est composé de plusieurs couches fines de cuivre séparées par un matériau isolant tel que la résine d'époxy, l'antimoine et du brome. À l'aide d'une lixiviation chimique, des circuits avec des pastilles sont gravés sur les couches de cuivre. Ensuite, pour établir une liaison électrique entre ces couches où les composants sont soudés sur le circuit, les pastilles sont perforées et une couche fine de palladium est déposée à l'intérieur afin d'éviter l'oxydation. Les composants électroniques sont soudés à l'aide d'une sorte de patte formée d'un alliage d'étain-argent-cuivre (Thomas, 2016).

La composition varie considérablement selon le type d'équipement. Les composants électroniques recouvrent une large gamme de métaux comme l'aluminium (radiateurs), l'acier inoxydable (les éléments de connexion), le fer et le cuivre (transformateurs), le palladium et le tantale (les condensateurs), le nickel (les résistances), l'or (les microprocesseurs et les dépôts de surface des connexions), etc. En outre, des plastiques thermoforables, des vernis, des résines, des céramiques et des électrolytes chimiques complètent cette panoplie de composants (Thomas, 2016).

Finalement, pour établir des liaisons entre l'équipement électronique et son circuit imprimé une autre couche fine d'or est déposée sur la face en cuivre de la carte afin de faciliter cette installation.

2.2. Classification Des Cartes électroniques

Il n'existe pas une classification universelle pour les PCB. Cependant, il y'a quelques auteurs qu'ont adaptés leurs propres classifications selon la teneur des métaux précieux sur la carte. L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME, 2008) a reconnu principalement deux classes des PCB, les cartes « riches » sont considérablement abondantes en composants de connexion sur lesquels sont déposées les couches de MP, et les cartes « pauvres » qui disposent des teneurs de faibles à négligeables des métaux précieux. Certains repreneurs distinguent trois qualités de cartes selon leurs teneurs en métaux comme montre le tableau 2.1 où la classification est basée principalement sur la présence de trois métaux; l'or, le cuivre et l'argent. À partir de cette classification, le triage et le choix du technologie de recyclage des déchets électroniques seront plus simples et efficaces. La concentration de l'or dans les cartes riches est évaluée à plus que 150 g/t et d'au moins 500 g/t d'argent ce qui permet d'évaluer mieux l'investissement dans le processus de recyclage selon la classe de la carte électronique (ADEME, 2008).

Tableau 2.1 Classification des déchets de PCB (ADEME, 2008)

	Cartes pauvres	Cartes intermédiaires	Cartes riches
OR	1 à 50 g/t	50 à 150 g/t	>150 g/t
Argent	150 à 250 g/t	250 à 500 g/t	>500 g/t
Cuivre	15%	15 à 20 %	15 à 20 %

Généralement, les métaux précieux se concentrent dans les parties les plus critiques du PCB. L'or est le meilleur métal utilisé dans les PCB de haute valeur. La localisation des métaux précieux dépend de l'équipement et de la configuration des PCB (ADEME, 2008).

- **Pourquoi l'or dans les PCB ?** L'or est facilement formé et manipulé pour les connecteurs, les fils et les contacts de relais. En plus, sa conductivité de l'électricité est très efficace, les connexions en or peuvent tolérer des températures élevées. Il peut aussi conduire des petites tensions de courant suffisantes pour les équipements électriques. Même les applications minces d'or peuvent fournir des contacts fiables et stables avec une faible résistance. Cependant, les variations d'épaisseur peuvent être utilisées pour répondre à l'exigence d'application spécifique aux destinations de l'équipement. Bien que l'argent et le cuivre offrent des propriétés de conductivité plus élevées, chacun d'entre eux est sujet à la corrosion, générant une résistance au courant. Pour réduire le coût des matériaux, aujourd'hui, d'autres métaux peuvent être alliés avec de l'or comme le nickel ou le cobalt, tout en gardant les mêmes caractéristiques (Perez, 2016).

Le poids des PCB varie d'un équipement à l'autre, il peut avoir moins que 0.1% comme il peut avoir 10% d'un écran plat. Leurs valeurs se présentent principalement dans les métaux qu'elles possèdent (Zagouras et al., 2017). Le circuit imprimé d'un téléphone intelligent présente un cinquième de la masse totale, dont 40% de cette masse est constituée juste de cuivre. Selon Thomas (2016), on peut récupérer jusqu'à 500 (g/t) d'or à partir des cartes électroniques, en plus du palladium et d'argent, alors que la teneur des mines d'or à ciel ouvert est inférieure à (1g/t). Les procédures de recyclage pour la récupération des métaux prennent en considération la teneur de ces matières dans l'équipement afin de choisir le protocole (paramètres, les solvants...) convenable pour optimiser la récupération. Le tableau 2.2 présente la concentration des métaux précieux dans les PCB de quelques équipements (en gramme/tonne).

Tableau 2.2: Concentration moyenne des métaux précieux dans certains déchets de PCB
(Chancerel, 2009; Holgersson et al., 2018)

Source de carte	Concentration MOYENNE (g/t)		
	Or (Au)	Argent (Ag)	Palladium (Pd)
Telephone portable	350	1380	210
Caméra numérique	563	3057	42
Ordinateur portable	250	1000	110
GPS	563	5033	688
Ordinateur de bureau	225	1000	90
Lecteur CD ordinateur	88	2203	52
Écran LCD ordinateur	60	250	19
Écran LCD TV	17	280	10
Lecteur DVD	15	115	4
Imprimante	47	350	9
Routeurs/Modems	199	35	19

Ces valeurs montrent que la teneur des métaux précieux est effectivement très variable. Prenant à titre d'exemple l'or, qui est le métal le plus précieux, sa densité peut aller de 200 g/t dans les modems jusqu'à 563 g/t dans les GPS et les caméras numériques tandis que dans d'autres équipements, la concentration ne dépasse pas quelques dizaines de grammes par tonne comme les imprimantes et les écrans LCD. Malgré cela, les déchets électroniques les moins importants disposent plus de teneur en or que les mines (Chancerel, 2009; Holgersson et al., 2018)

Selon le tableau 2.1 de classification des cartes électroniques, les équipements suivants contiennent des cartes riches : Téléphone portable, Caméra numérique, Ordinateur portable, GPS, Ordinateur de bureau, Routeurs et Modems. Ces appareils sont des équipements de télécommunications nécessitant une haute qualité de performance et des connexions électroniques fiables et résistantes aux températures élevées.

2.3. Potentiel économique

Baldé et al., (2014) ont évalué la valeur estimée des déchets électroniques générés dans le monde à 48 milliards de dollars. Les PCB sont les composants les plus importants, elles représentent entre 40% et 90% de la valeur totale des déchets électroniques (Golev et al., 2016). Bien que l'or existe en petite concentration, il représente au moins 60% de la valeur totale des métaux récupérés. Sur **la figure 2.1**, Cucchiella et al. (2015) ont montré que le revenu moyen de recyclage d'un kilogramme des PCB des téléphones portables et de téléphones intelligents est beaucoup plus importante que le coût unitaire de ce produit vu qu'ils sont plus riches en concentration des MP.

Le marché de recyclage est en développement continu, d'une valeur de 3.34 milliards de dollars US, aujourd'hui ce secteur ouvre environ 28 000 offres d'emplois uniquement à l'Europe. En 2013, le Canada a récupéré 8 000 tonnes des déchets électroniques dédiés pour réutilisation sachant que le revenu de recyclage est estimé 20 300 dollars par tonne des PCB recyclés pour cette même année (Ktari, 2018)

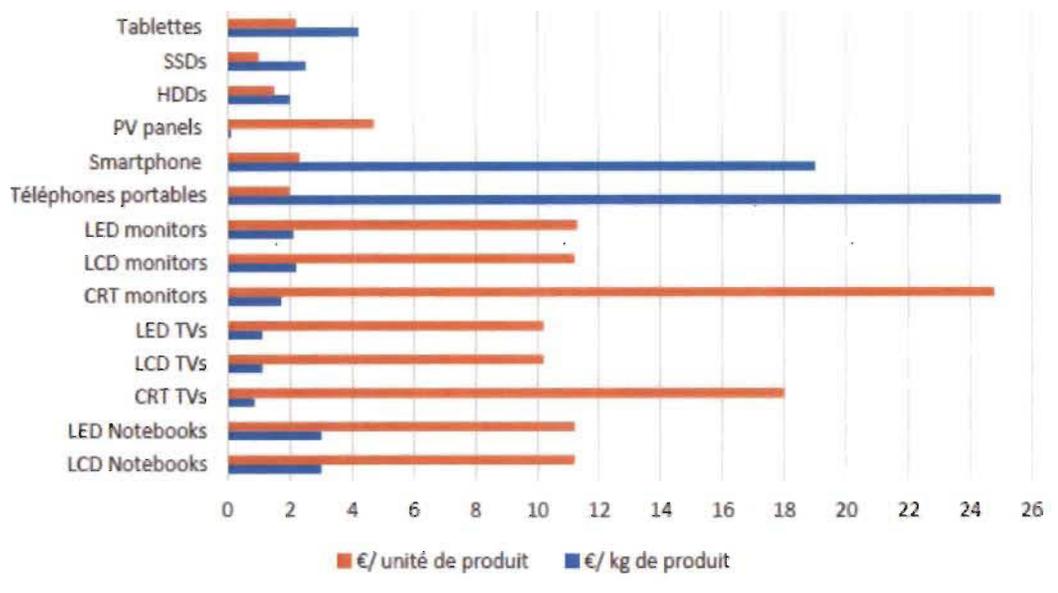


Figure 2.1: Revenus moyen de recyclage des PCB (Cucchiella et al.,2015)

2.4. Technologies de recyclages des PCB

Le recyclage est la dernière option de valorisation d'un produit en fin de vie, il consiste à démonter de tous les composants et à traiter tous les matériaux pour les ramener à leurs états bruts, ce qui rend le recyclage la solution la plus compliquée et coûteuse par rapport aux autres options de reconditionnement et réutilisation.

La composition chimique des cartes électroniques est très complexe et variable. Ce qui rend les traitements métallurgiques des cartes électroniques difficile et délicat. Les technologies appliquées actuellement ne sont pas optimisées pour éliminer ces problèmes. Généralement, elles assurent une récupération incomplète des métaux et engendrent des impacts environnementaux nocifs à cause de la présence du plastique, des fibres de verre, d'aluminium, d'halogènes, de la résine et d'autres métaux avec des effets antagonistes lors d'une réaction métallurgique (Thomas, 2016).

Yazıcı et al., (2009) ont défini les différents choix des procédés possibles pour recycler les PCB tel qu'illustré sur **la figure 2.2**. Les PCB sont reçus généralement dans leurs équipements originaux. Ils passent dans une première étape au désassemblage et à la récupération des PCB puis dans une deuxième étape à une série de traitement appliqué sur ces cartes pour aboutir aux récupérations des métaux à l'état brut. Une séquence de trois types de traitement est essentielle :

- (1) Traitement physique : Consiste d'abord à désassembler les composants des cartes pour les dépolluer, puis à un déchiquetage et enfin à un filtrage des particules pour récupérer les métaux non-ferreux.
- (2) Traitement métallurgique-chimique : deux technologies peuvent être appliquées afin assurer la fusion des métaux. Soit le Pyrométallurgie par des traitements thermiques ou l'hydrométallurgie par des traitements chimiques .
- (3) Traitement électrochimique : Selon plusieurs facteurs (la technique choisie pour le traitement métallurgique, la qualité de la matière à traiter, le métal visé à récupérer) plusieurs procédés peuvent être appliqués pour assurer la purification et la récupération sélective des métaux précieux.

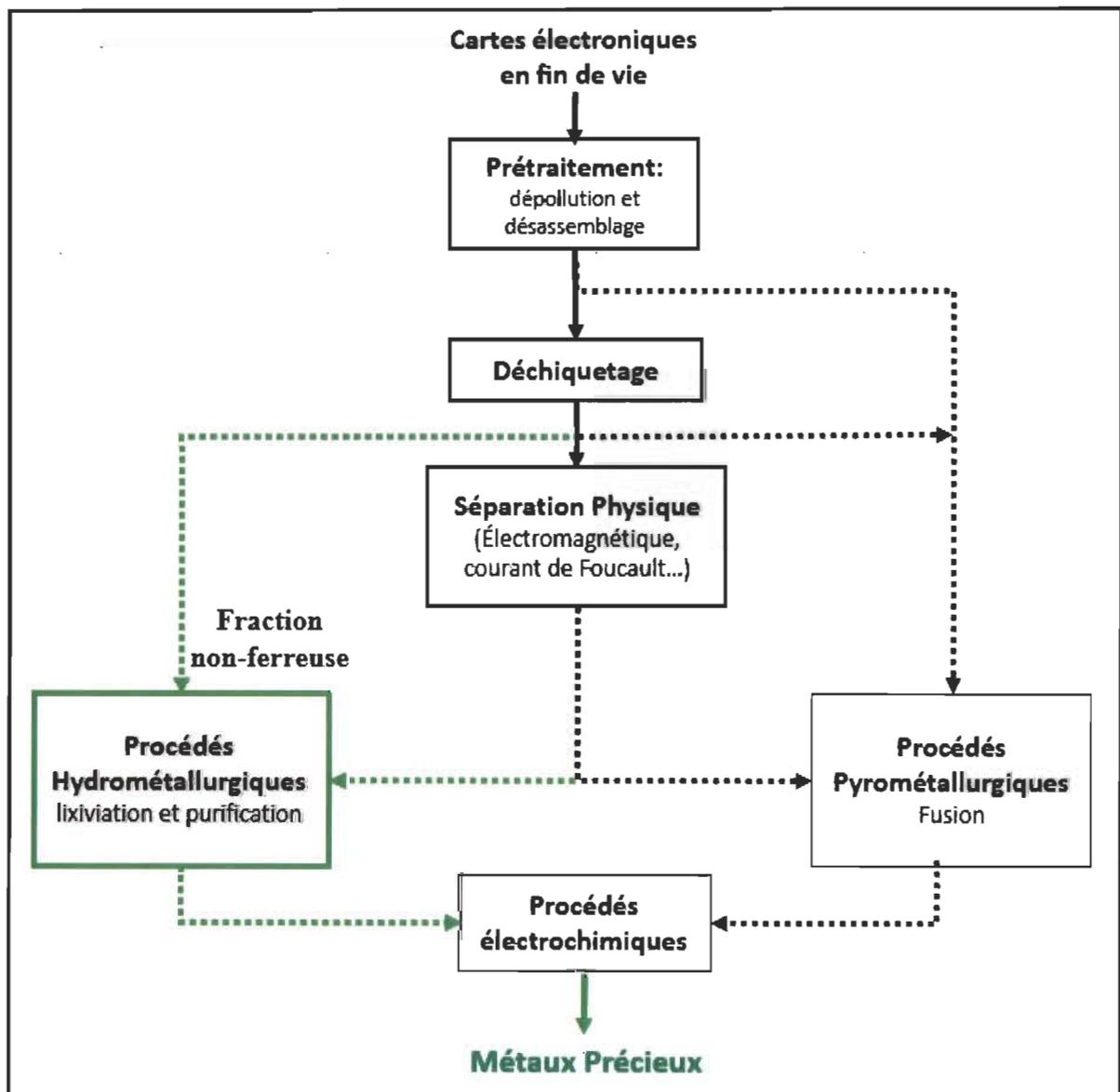


Figure 2.2: Alternatives de recyclage des cartes électroniques (modifié de Yazıcı et al. (2009))

2.4.1. Pyrométallurgie

La Pyrométallurgie est la voie classique de récupération des métaux ferreux. C'est un procédé basé principalement sur les traitements thermiques pour créer des réactions chimiques et éliminer des fractions non voulues comme le plastique. Les principales technologies de Pyrométallurgie sont l'incinération (combustion), la Pyrolyse, la fusion dans le four à plasma, le crevage et les réactions en phase gazeuse à haute température (Cui et Zhang, 2008).

- *La combustion*

La technique de **combustion** consiste à brûler les déchets électroniques broyés dans un four à haute température (environ 1 100° C). Les impuretés peuvent être enlevées de deux manières: soit volatilisées par une réaction chimique ou par la chaleur, soit converties en scories qui s'élèvent à la surface du métal fondu ou sous forme de boues qui descendent au fond. Cependant, l'énergie et les gaz résultants de la présence de résines et de plastiques dans les PCB limitent la proportion des cartes traitées à 10 % à la fois dans un four. Au-delà de cette limite, le processus devient instable (Thomas, 2016).

- *La pyrolyse*

Selon (Thomas, 2016) la **pyrolyse** présente un concept différent permettant d'obtenir un produit brut riche en métaux ce qui facilite son traitement dans les fonderies de cuivre. La technologie est basée sur l'élimination du plastique et de la résine en utilisant la technique d'évaporation et fissuration thermique. La pyrolyse est une technique qui permet d'augmenter la performance des fonderies de cuivre. Cette technique est notamment utilisée par l'entreprise Boliden en Suède, une entreprise qui explore, extrait et traite des métaux de base et des métaux précieux...

- *Le traitement supercritique*

C'est un type de prétraitement qui utilise de l'eau ou du gaz comme le dioxyde de carbone avec une température d'environ 300°C. Le but de ce prétraitement est de séparer

la fraction métallique de la fraction organique, mais aussi d'éliminer l'effet toxique des plastiques contaminés par des retardateurs de flamme à base de brome (Thomas, 2016).

La première application du Pyrométallurgie sur les PCB a été dans les fonderies de cuivre vu la teneur importante de cette matière sur les cartes. Les traitements technologiques d'une fonderie de cuivre se composent de deux étapes : La fusion et le raffinage par électrolyse. Les métaux rares sont généralement perdus dans les flux de matière concentrés ce qui rend la récupération moins évidente.

2.4.1.1. Projets sur les techniques Pyrométallurgique développés en laboratoire

Des techniques et des essais en laboratoire ont été développés par plusieurs organismes autour du monde pour la récupération des métaux des PCB par la voie de la Pyrométallurgie. Les détails de ces techniques, les organismes, les investissements, ainsi que les résultats sont présentés dans le tableau 2.3.

Tableau 2.3: Essais laboratoires des techniques Pyrométallurgiques (tiré de Thomas (2016))

L'organisme du recherche	La technique développer	Résultat
SCANARC, SUÈDE	Combustion à 1500 °C	Résultat non satisfaisant
MORPHOSIS, HAVRE	Programme R&D, utilise la technologie du plasma	Gagnée concours mondial pour l'innovation

Tableau 2.3 : Essais laboratoires des techniques Pyrométallurgiques (Suite)

<p>UMICOREM, BELGIQUE</p>	<p>Un procédé complet avec le traitement des déchets gazeux a été développer.</p> <p>Four de fusion aboutit à deux fractions: scorie de plomb et scorie de cuivre mélanger avec les métaux précieux.</p> <p>Raffinage par électrolyse donne cuivre pur et des boues du métaux précieux.</p>	<p>Des bons résultats pour la récupération de cuivre.</p> <p>Séparation incomplète des Métaux Précieux</p>
<p>TERRA NOVA, FRANCE, 2010, 20 M€</p>	<p>Four à pyrolyse. Limite de T = 500°C pour éviter la fusion des métaux et des fibres de verre</p>	<p>Séparation incomplète</p>
<p>LS, CORÉE et GEM, CHINE 2014/2015</p>	<p>Four à Pyrolyse, même technique du TERRA NOVA ,2010 à T = 500°C</p>	<p>Pas de résultats affichés</p>
<p>BOLIDEN, SUÈDE</p>	<p>Pyrolyse à 1150°C</p>	<p>Réaction violente et instable,</p> <p>Séparation incomplète</p>

Tableau 2.3 : Essais laboratoires des techniques Pyrométallurgiques (Suite)

<p>PANASONIC, 2010</p> <p>Capacité : 500 tonnes par an</p>	<p>Pyrolyse par granulés de dioxyde de titane comme catalyseur d'oxydation à T=500°C :</p> <p>Les cartes immergées dans les granulés chauffés et brassées par des pales.</p> <p>Pas de carbone résiduel.</p> <p>Élimination du plastique et de la résine.</p> <p>Séparation du dioxyde de titane par tamisage.</p>	<p>Le procédé n'est pas viable économiquement</p> <p>Forte consommation de dioxyde de titane (produit coûteux).</p>
<p>L'UNIVERSITÉ DE DIJON, FRANCE, 140 M€</p>	<p>La Solvolyse, alternative de Pyrolyse (Peu Développé)</p>	<p>Des effluents liquides difficilement traités</p>
<p>La SOCIÉTÉ TND en partenariat le BRGM, le CNRS et la SOCIÉTÉ SEPAREX</p>	<p>Eau en condition supercritique : P= 250 bars et T= 600°C</p> <p>Réduit en poudre les fibres de verre.</p> <p>Séparation facile</p> <p>Rendement métal de 98 % est atteint.</p>	<p>Lauréat de la phase 2 concours mondial pour l'innovation.</p> <p>En phase démonstration</p>

2.4.1.2. Analyse des Résultats des techniques Pyrométallurgiques développés

Les résultats affichés par les essais appliqués permettent de trier les procédés de Pyrométallurgie selon l'efficacité de la technique pour la récupération des métaux précieux. Quatre situations résument les résultats :

- (1) Récupération incomplète ou partielle des MP pour la majorité des essais pour les techniques suivantes : Combustion à 1500 °C, Four de fusion, Four à Pyrolyse Température T=500 °C et four à Pyrolyse à T = 1150°C
- (2) Des essais réussis à l'échelle laboratoire avec des prix d'innovation pour : technologie du plasma et Eau en condition supercritique : Pression = 250 bars et T = 600°C
- (3) Un essai réussi à l'échelle industrielle avec des coûts extrêmement élevés, ce qui oblige l'arrêt du projet pour la Pyrolyse par granulés de dioxyde de titane T=500°C
- (4) Un essai d'un nouveau procédé peu développé « La Solvolyse » entraîne des déchets liquides difficiles à traiter et aucun résultat affiché pour la qualité des MP récupérés.

En conclusion la plupart des procédés Pyrométallurgie aboutissent à des récupérations incomplètes des MP. Cette technique a démontré son efficacité pour récupérer particulièrement le cuivre qui est la fonction principale des fonderies industrielle. Mais, la technique présente aussi des coûts d'investissement assez importants, des instabilités dans certains cas et des effluents toxiques difficiles à traiter. Néanmoins, l'eau en condition supercritique est un nouveau concept qui a abouti à des récupérations de l'ordre de 98 % des métaux dans des essais laboratoire selon La SOCIÉTÉ TND. L'industrialisation de ce procédé peut être intéressante, reste à avoir les coûts d'investissement pour une telle application.

2.4.2. Hydrométallurgie

L'origine de l'hydrométallurgie remonte à la période des alchimistes lorsque la transmutation des métaux de base en or était leur principale occupation (Habashi et al., 1993).

Il fait partie des méthodes de métallurgie extractive. Ces procédés nécessitent l'implication d'une chimie aqueuse pour extraire les métaux à partir des minerais et des PCB aussi. Les étapes de l'hydrométallurgie sont : la lixiviation des métaux, la séparation des fractions solide/liquide, la purification de la fraction liquide et la récupération des métaux (raffinage) (Cui et Zhang, 2008; Luyima et al., 2011).

2.4.2.1. Lixiviation

La lixiviation est la phase clé du traitement hydrométallurgie. À l'aide d'un oxydant, le réactif chimique attaque les particules broyées du PCB et dilue les métaux dans le liquide. Cependant, la présence de cuivre en quantité importante dans la fraction non ferreuse des déchets de PCB rend la lixiviation de l'or difficile et coûteuse. Pour cela, un minimum de deux lixiviations doit avoir lieu pour que la technique soit efficace.

la lixiviation I préalable par un acide et un oxydant est recommandée avant la lixiviation II de l'or par d'autres agents solvant (Safarzadeh et al., 2007). Cette Méthode consiste alors à appliquer une série de lixiviation acide ou caustique des déchets métaux de base (Cuivre, zinc, plomb, etc.) suivie d'une série de lixiviation des métaux précieux.

La lixiviation des métaux précieux implique l'oxydation et la complexation simultanée du métal dissous. En fonction du métal à traiter, plusieurs agents de lixiviation peuvent être impliqués dans la réaction. Les alternatives les plus couramment étudiées sont l'eau régale, les halogénures (Chlore, Iode), le cyanure, la thiourée et le thiosulfate avec l'ions Fe^{3+} ou Cu^{2+} comme oxydant (Jing-ying, et al., 2012; Sabir Syed, 2012).

- *Eau régale*

L'eau régale ou l'eau royale dont les molécules ($\text{HNO}_3 + 3 \text{HCl}$) sont très efficaces, elles permettent d'avoir un taux de dissolution d'or bien élevé comparé aux autres agents. Il est appliqué habituellement en laboratoire en raison de son taux de corrosion élevé. En plus, la gestion des eaux usées excessivement acides est très difficile (Jing-ying et al., 2012).

- *Cyanure*

Au cours du dernier siècle, la lixiviation par le cyanure (CN^-) a été largement utilisée pour récupérer de l'or à partir des mines en raison de sa grande efficacité et de son coût relativement faible (Sabir Syed, 2012). Le principal inconvénient de cette méthode est la production d'une énorme quantité d'eaux usées toxiques contaminées par le cyanure, ce qui peut entraîner des dommages environnementaux sérieux (Jing-ying et al., 2012).

- *Thiosulfate*

Le thiosulfate ($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$) a montré de bons taux de récupération à l'échelle laboratoire qui dépassent dans certaines recherches les 90%. En plus de ça, ce réactif ne présente pas de problèmes environnementaux, il est à la fois non-toxique et non-corrosif. En outre, la lixiviation au thiosulfate présente moins d'interférence des cations étrangers. Le principal problème avec cet agent est la consommation élevée du réactif pendant la réaction (Feng et Van Deventer, 2002a, 2002b; Sabir Syed, 2012).

- *Thiourée*

La thiourée ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$) est un agent complexant, dans des conditions très acides ($\text{pH} = 1-2$), en présence d'un oxydant (Fe^{3+}), il forme un complexe cationique fortement soluble avec l'or. Dans le cas des déchets de PCB, la thiourée présente une haute sélectivité et une bonne efficacité pour la récupération de l'or et de l'argent. Cependant, comparé à d'autres agents de lixiviation, il présente une faible stabilité (Birloaga et al., 2013).

- *Halogénures*

Les halogénures sont des agents de lixiviation potentielle en raison de leurs fiabilités et hautes stabilités chimiques. Contrairement à l'iodure (I^-), le coût de consommation du chlorure (Cl^-) peut être atténué par la régénération du solvant en circuit fermé. Cependant, l'utilisation de cette substance présente l'entrave de forte corrosivité et la nécessité d'assurer des conditions spécifiques d'oxydation. Pour l'iode les recherches ne sont pas nombreuses et peu développées malgré les bonnes propriétés qu'il possède. Le seul ennui de ce réactif connu est le coût élevé du produit (Kim et al., 2011; Tuncuk et al., 2012; Xu et al., 2010)

La figure 2.3 présente un processus d'une série de lixiviation à trois paliers présenté par Quinet et al. (2005) pour les PCB des cellulaires. La première lixiviation est celle du cuivre en utilisant l'acide sulfurique comme réactif et une réaction de précipitation pour la récupération du métal. La deuxième est pour le palladium avec le chlorure et une cémentation. Finalement, la troisième pour la lixiviation de l'or et de l'argent avec le cyanure, puis, une adsorption sur carbone actif, ensuite, une combustion pour récupérer les métaux précieux raffinés.

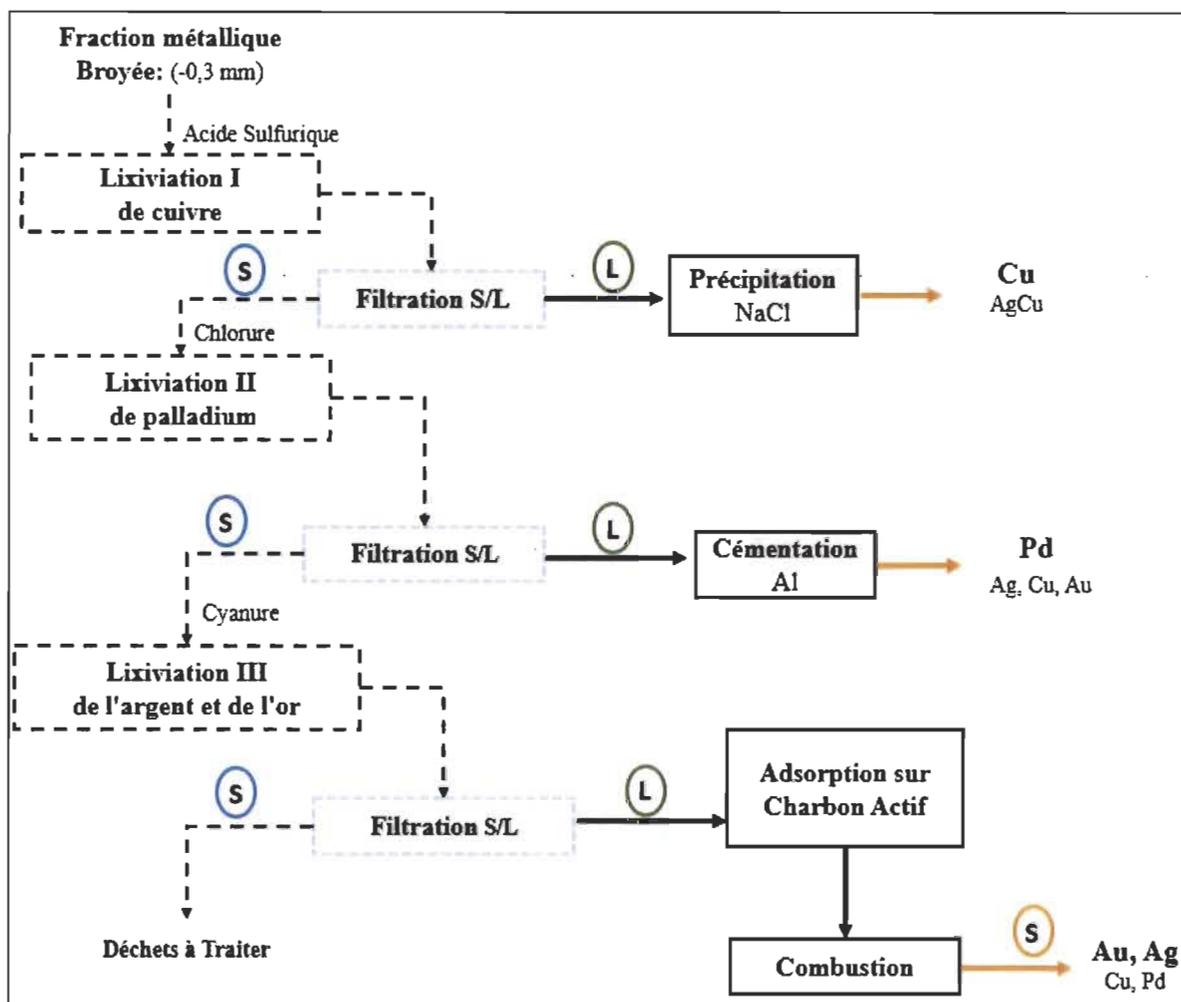


Figure 2.3: Procédés hydrométallurgiques de recyclage des PCB de téléphone cellulaire. Modifié de Quinet et al. (2005)

2.4.2.2. Projets sur les techniques hydrométallurgiques développés en laboratoire

Des protocoles et des essais en laboratoire ont été développés par plusieurs organismes autour du monde pour la récupération des métaux des PCB par la voie hydrométallurgie. Les détails des réactifs, les organismes ainsi que les résultats des essais sont présentés dans le tableau 2.4.

Tableau 2.4: Essais laboratoires des techniques hydrométallurgique (tiré de Thomas (2016))

L'organisme du recherche	La technique développer	Résultat
CAMBRIDGE et THE LONDON IMPERIAL COLLEGE, 2000		L'obsolescence rapide de ces composants diminue les bénéfices.
ITALIENNE ENGITEC, Italie, 2008	<p>-L'acide fluoroborique faire fondre les soudures d'étain et de plomb pour libérer les composants électroniques de la carte pour réutilisation.</p> <p>- l'eau régale pour extraire les MP</p>	<p>L'existence du fer et de l'aluminium augmente la consommation de l'acide et un dégagement très important de résidus ultimes.</p> <p>Le tantale et le palladium sont mal récupérés.</p>
MANAGEM, MAROC	Fondée sur l'acide sulfurique pour récupérer le cuivre en premier lieu, puis les MP en deuxièmes lieu.	Pas de résultat satisfaisant

Tableau 2.4 : Essais laboratoires des techniques hydrométallurgique (Suite)

<p>ITRIMEXM avec ULTROMEX, ANGLETERRE, 550 000 £</p>	<p>Récupération de l'étain des PCB à l'aide de l'acide fluoroborique ou l'acide fluorosilicique</p>	<p>Pas de résultats afficher</p>
---	---	----------------------------------

2.4.2.3. Analyse des résultats des techniques hydrométallurgiques

La voie hydrométallurgie pour le recyclage des PCB est nouvellement instaurée par rapport au Pyrométallurgie. Elle a été initialement mise en place pour des raisons techniques (simplicité et maîtrise du procédé) et économiques (Cui et Zhang, 2008). Cependant la lixiviation est un processus compliqué et délicat. Elle nécessite des paramétrages et beaucoup d'essais afin de trouver le mélange idéal pour la réaction. Les essais en laboratoire sont peu développés et ne montre pas de résultats satisfaisants. En revanche, les résultats des recherches théoriques montrent qu'un protocole bien étudié d'hydrométallurgie avec des paramètres ajustés de la réaction de lixiviation peut aboutir à une récupération de plus que 95% des MP.

2.5. Comparaison Hydrométallurgie - Pyrométallurgie

Le tableau 2.5 présente une comparaison entre les deux technologies hydrométallurgie et Pyrométallurgie, tirée de plusieurs recherches de la littérature. La comparaison des deux alternatives est faite sur plusieurs paliers afin de couvrir toutes les faces engendrées par l'application de ces deux techniques (Akcil et al., 2015; Behnamfard et al., 2013; Jadhav et Hocheng, 2015; Kamberović et al., 2011; Luyima et al., 2011; Quinet et al., 2005; Rocchetti et al., 2013; Safarzadeh et al., 2007; S Syed, 2006; Thomas, 2016; Tuncuk et al., 2012).

Tableau 2.5: Comparaison de l'hydrométallurgie et Pyrométallurgie sur plusieurs critères.

Critères de comparaison	Sous-critère de comparaison	Les technologies de recyclage	
		Hydrométallurgie	Pyrométallurgie
Facteur économique	Coût d'investissement	Faible	Élevé
	Coût d'exploitation	Moyen	Moyen
	Consommation d'Énergie	Faible	Élevé
	Consommation de réactifs chimique	Élevé	Faible
Traitement des PCB	En Faible teneur d'or	Possible	Difficile
	En petit quantités	Possible	Difficile
	Taux de récupération	Moyen à Élevé	Moyen
Stabilité technique	Complexité	Élevé	Faible à Moyen
	Contrôle et flexibilité	Élevé	Faible

Tableau 2.5 : Comparaison de l'hydrométallurgie et Pyrométallurgie sur plusieurs critères. (Suite)

	Applicabilité industrielle pour PCB	À développer	Existe et À adapter
Impact Environnementaux	Déchets solide ultime	Faible	Moyen
	Déchets gazeux	Négligeable	Élevé
	Déchets liquide	Moyen	Négligeable

2.5.1. Analyse du tableau de comparaison

Le tableau de comparaison montre les faiblesses et les avantages de chaque technologie selon plusieurs critères. Le Pyrométallurgie présente plusieurs faiblesses sur plusieurs niveaux par rapport à l'hydrométallurgie.

- Facteurs économiques

Le coût d'investissement du **Pyrométallurgie** est très élevé, selon Natureo Finance ce coût est évalué de 2 à 5 mille euros par tonne de cartes traitées par an. Effectivement, il est appliqué principalement dans les fonderies de cuivre et le coût d'adaptation de ces derniers pour traiter les PCB est très élevé, de plus la nécessité d'une expertise importante en métallurgie est requise. Autrement, l'utilisation d'une haute température pour récupérer les métaux précieux précipités dans le cuivre exige une consommation d'énergie intense ce qui ajoute des coûts d'exploitation (Jadhav et Hocheng, 2015; Rocchetti et al., 2013; Tuncuk et al., 2012).

D'un autre côté, la voie **hydrométallurgie** est applicable avec des coûts de capital relativement faible. La dépense dans cette technique est canalisée dans les coûts des réactifs chimiques utilisés et le coût d'exploitation (Behnamfard et al., 2013; S Syed, 2006).

- *Traitement de PCB*

L'hydrométallurgie, offre un taux de récupération élevé. En plus, ses processus sont relativement adaptés aux applications à petite échelle. Ce procédé offre de bons taux de récupération même pour les cartes à faibles teneurs en MP (Behnamfard et al., 2013; S Syed, 2006).

Bien que le **Pyrométallurgie** fournit des déchets de haute qualité riches en métaux précieux et en cuivre, la scorie engendrée est très pâteuse dû à la composition chimique des fibres de verre en plus la présence d'aluminium, celui-ci rend l'étape de la séparation partielle, d'où un taux de récupération médiocre selon Boliden en Suède.

- *Stabilité technique*

L'hydrométallurgie est un procédé compliqué et nécessite plusieurs recherches pour développer des protocoles d'applications selon le type de carte à traiter et les matériaux qu'elle renferme. De plus, cette technique offre quand même un bon niveau de stabilité et de contrôle de processus ainsi qu'une flexibilité satisfaisante (Behnamfard et al., 2013; S Syed, 2006).

Le Pyrométallurgie se caractérise par un mécanisme simple, toutes ses techniques se basent sur l'application des hautes températures pour fondre et fusionner les déchets. Cette température élevée peut engendrer des réactions violentes à cause de la présence du plastique et de la résine, ce qui peut causer l'instabilité du processus.

- *Impacts environnementaux*

Toutes les applications chimiques engendrent des produits secondaires ou des déchets. Généralement, la complication réside dans le traitement et la neutralisation de ces effluents. Autant que ces derniers sont complexes et abondants autant que cette opération est difficile et coûteuse.

Le Pyrométallurgie génère des gaz toxiques (dioxines et de furannes) à cause des retardateurs de flamme halogènes. Le traitement de ces gaz est une condition obligatoire pour l'application de ce procédé. (Behnamfard et al., 2013; Rocchetti et al., 2013)

Les déchets de **l'hydrométallurgie** présentent un impact environnemental relativement réduit et des traitements plus simples et efficaces (S Syed, 2006; Tuncuk et al., 2012).

2.5.2. Interprétation

Plusieurs recherches et essais ont été développés vers les techniques **Pyrométallurgique** pour le recyclage des PCB. Le cuivre est un élément facile à récupérer, en revanche les MP et particulièrement l'or présentent des problèmes d'instabilité et difficultés pour contrôler le processus, ce qui explique les récupérations incomplètes des MP dans la plupart des essais.

L'hydrométallurgie est une technique qui offre une certaine stabilité et contrôle des réactions chimiques, mais, une bonne étude du protocole est obligatoire pour passer aux applications à l'échelle industrielle.

Quelques études (Cui et Zhang, 2008; Jadhav et Hocheng, 2015) ont proposés le recours à des traitements hydrométallurgie avec l'électrochimie pour affiner et récupérer les MP existants dans les scories des réactions pyrométallurgique. La combinaison des deux technologies en question était appliquée réellement par Terra Nova, dans un projet qui s'appelle SISENVA, cette expérience a démontré que les traitements hydrométallurgiques assurent la récupération des métaux à partir de la scorie engendrée par la pyrolyse.

CHAPITRE 3 : MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

3.1. Choix de la technologie de recyclage

Le but de cette recherche est de choisir la technologie de traitement des PCB convenables pour l'entreprise recycle 3R Mauricie. Dans la revue de littérature, une lecture et analyse des deux technologies ainsi qu'une comparaison ont été réalisées.

L'analyse des données de l'entreprise a été réalisée dans un rapport interne présenter à l'entreprise afin de situer la situation actuelle par rapport au projet. Les principaux résultats sont présentés dans la partie suivante (Elbounjimi, Ben ameur et Ktari, 2017).

3.1.1. Chaîne logistique actuelle de Recycle 3R Mauricie

La figure 3.1 montre la chaîne logistique inverse de Recycle 3R Mauricie. Les retours sont constitués majoritairement d'équipements de télécom (service internet et TV) en fin de vie qui sont expédiés à l'usine centrale de St-Tite à partir des 4 centres de collecte (Boucherville, Longueuil, Québec et St-Hubert). Le triage des retours se fait par l'usine de St-Tite en tenant compte du type d'équipement et de la disponibilité des ressources (humaines et matériel). L'usine alimente les autres centres de désassemblage (Shawinigan, Trois-Rivières et Louiseville). Le désassemblage (démantèlement) est l'activité principale des quatre centres de traitement de recycle de 3R Maurice. Les équipements qui comprennent des disques durs sont affectés à l'usine de St-Tite en raison de la disponibilité d'un poste de vérification et d'effacement des données. La réparation de certains équipements (ex : amplificateurs) se fait uniquement par des personnes qualifiées au sein du centre de Trois-Rivières. Après traitement, les métaux et les cartes électroniques (PCB) sont vendus au client AIM, Trois-Rivières. Les disques durs sont

demandés par Surplus 2D, Saint-Jean-sur-Richelieu. Les équipements réparés sont envoyés à d'autres clients.

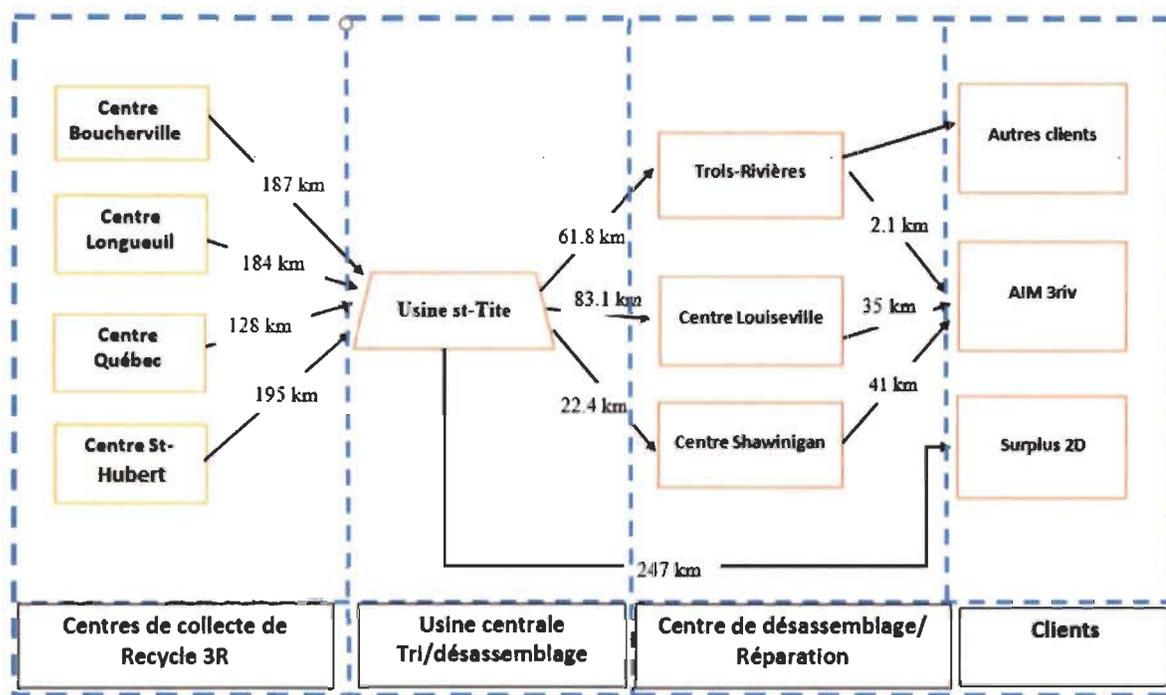


Figure 3.1: Chaîne logistique inverse de Recycle 3R Mauricie

3.1.2 Caractéristiques des équipements récupérés de Recycle 3R Mauricie

- *Flux des équipements de télécommunications et les composants récupérés*

Les équipements reçus par l'usine sont principalement des modems, des décodeurs et des routeurs. Le désassemblage de ces équipements donne lieu à quatre composants : plastique, métaux, carte électronique (PCB) et disque dur dans le cas de certains types de décodeur, Figure 3.2.

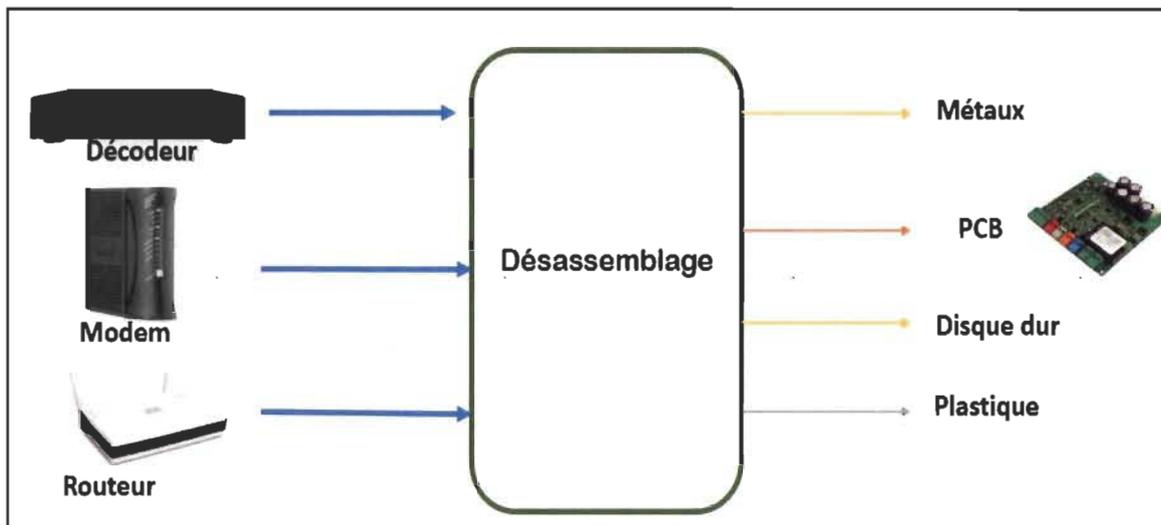


Figure 3.2: Flux de désassemblage de Recycle 3R Maurice

- *Quantités des composants désassemblés*

La quantité totale reçue de chaque composant est calculée en multipliant la quantité totale de l'équipement au rapport de la masse du composant par la masse unitaire totale de l'équipement. Le tableau 3.1 présente les quantités récupérées de chaque composant pour l'année 2016.

Les trois catégories d'équipements présentent une grande masse de cartes électroniques, la proportion de PCB est d'environ 31 à 42% de la masse totale de l'équipement.

Tableau 3.1: Quantité des équipements reçus et de chaque composant désassemblé pour l'année 2016

	Catégories d'équipements			Total de la quantité annuelle
	Décodeurs	Routeurs	Modems	
Nombre total (unité)	59 668	53 463	152 804	265 935
Quantité totale (Kg)	122 344,41	18 444,58	75 680,12	216 469,11
PCB(Kg)	38 069,93	7048,02	31964,71	77 082,66
Disque dur (Kg)	11 972,74	0	0	11 972,74
Plastique (Kg)	9 824,67	10294,38	42599,88	62 718,93
Métaux (Kg)	62 454,25	1102,18	1115,53	64 671,96
Déchets résiduels (piles)(kg)	22,82	0	0	22,82

- *Estimation des concentrations de MP dans les routeurs et les modems*

Les concentrations moyennes de métaux précieux dans chaque famille d'équipements sont calculées en supposant que les métaux précieux ne peuvent être présents que dans les PCB (Gmünder, 2007). La formule suivante a été appliquée pour le calcul de la quantité du métal précieux contenue dans chaque famille d'équipements.

$$Q_{mp} = C_{MP/PCB} \times \sum_1^N Q_{PCB} \quad \text{Équation 3.1}$$

Avec :

$C_{MP/PCB}$: Concentration moyenne du MP dans la PCB de l'équipement

Q_{PCB} : Quantité en Kg de PCB contenue dans l'équipement

N : Nombre de types d'équipement dans une famille

Le tableau 3.2 présente l'estimation des MP continue par chaque famille d'équipement, selon la concentration affichée dans l'étude de Holgersson et al 2017. En raison de manque de données de la littérature sur les teneurs de métaux précieux dans les décodeurs, l'estimation sera limitée aux décodeurs/modem. L'estimation des concentrations moyennes de métaux précieux ne tient pas compte des variations selon les modèles et les fabricants des équipements. Les PCB des routeurs et des modems sont considérés de la même catégorie (Holgersson et al 2017).

Tableau 3.2 : Estimation du Concentration des MP par type d'équipement par PCB

MP	Concentrions MP en g/t Selon (Holgersson et al 2017) $C_{MP/PCB}$	Quantité de PCB / routeurs (Kg) Q_{PCB}	Quantité de MP/ Routeurs (Kg)	Quantité de PCB/ modems (Kg) Q_{PCB}	Quantité de MP/ modems (Kg)
Or	199	7048	1,4	31964	6,360
Argent	1213		8,549		38,772
Palladium	19		0,133		0,607

Selon les quantités des retours en 2016 et la qualité des DET reçus, la quantité de MP estimée à récupérer à partir des routeurs et des modems est d'environ 8 kg d'or, 47 kg d'argent et 0,8 kg de palladium.

3.1.3. Choix de la technologie de traitement

Les deux analyses des technologies de recyclage, ainsi que les données collectées et les estimations des MP récupérés ont été présentées aux directions de l'entreprise Recycle 3R Mauricie. À l'aide d'un comité d'expert, la direction a choisi d'appliquer **l'hydrométallurgie** comme technique de recyclage pour les PCB collectés.

Le choix a été basé principalement sur deux arguments. Étant donné (1) le coût d'investissement important pour réaliser la Pyrométallurgie ainsi que la récupération partielle de MP (ce qui nécessite peut-être à un recours à l'hydrométallurgie) en comparant à (2) la quantité totale des ET reçu par l'usine, l'hydrométallurgie présente les caractéristiques satisfaisantes pour la réalisation de ce projet.

3.2. Plan de la recherche

Selon la figure 3.3, après avoir choisi la technologie de recyclage, plusieurs réactifs de lixiviations des MP peuvent être dans les choix de traitement. Dans la revue de littérature, une panoplie de réactif de lixiviation a été présenté. Ceci a permis d'identifier les principales alternatives stratégiques pour la lixiviation des métaux précieux. Selon les recherches et des essais laboratoires : le cyanure, le thiourée, l'eau régale, le thiosulfate, le chlorure et l'iode sont les solvants qui apportent les meilleurs taux de récupération. Dans le prochain chapitre, une étude de l'hydrométallurgie plus détaillée du processus avec une comparaison générale sur l'ensemble des alternatives nommées sera appliquée afin de faire un premier triage. Enfin, dans le dernier chapitre une application de la méthode AHP sera appliquée pour aider à la décision du réactif.

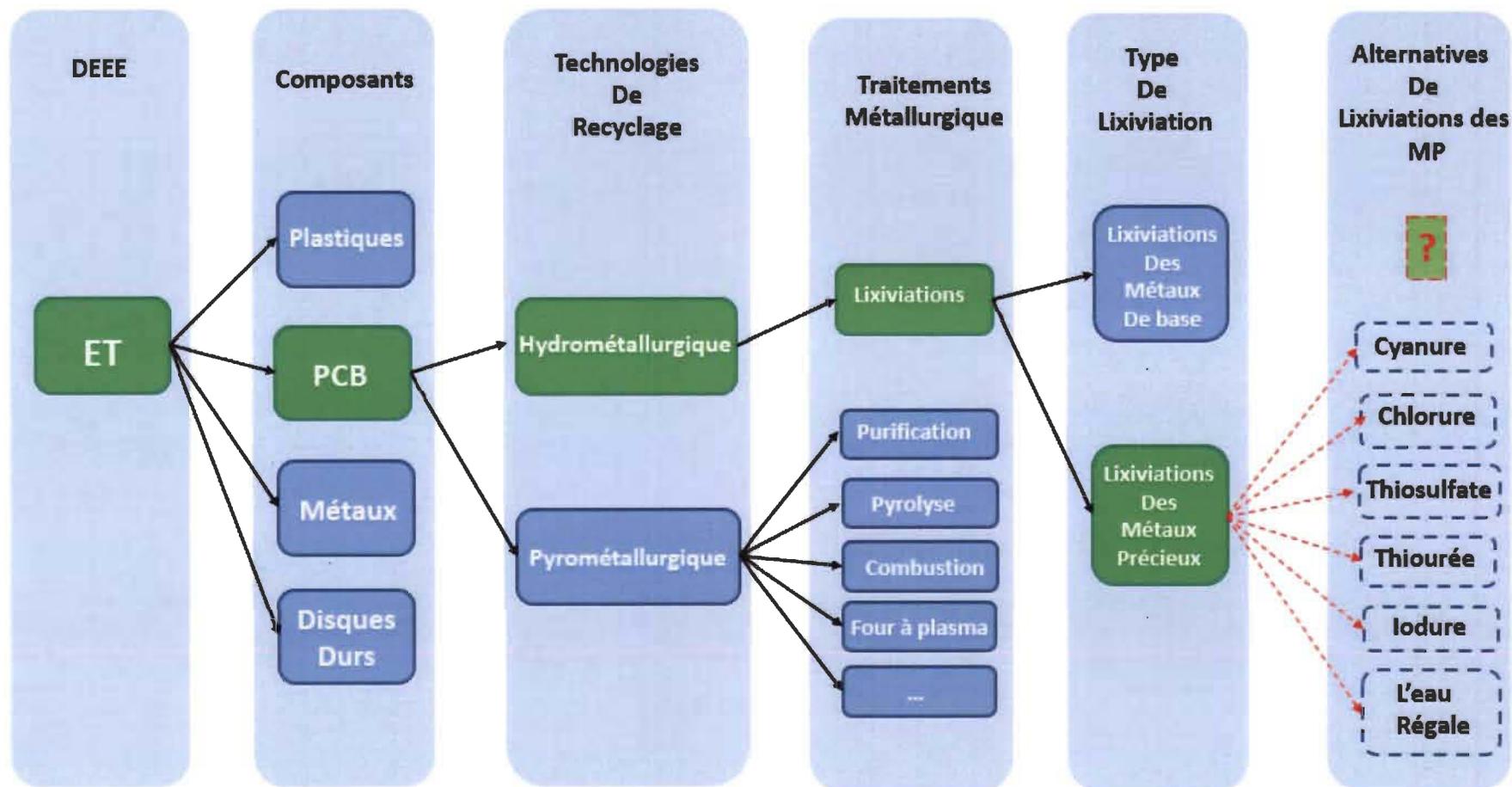


Figure 3.3 : Plan de la recherche du projet de maîtrise

3.3. Choix de la méthode aidant à la décision

Ces méthodes aident à prendre une décision en évaluant plusieurs options dans des situations où aucune possibilité n'est parfaite. Elles permettent d'adapter les facteurs technologiques, économiques, environnementaux, ...

La plupart des problèmes de prise de décision sur le choix des technologies requièrent la prise en compte de différents critères. L'analyse de décision multicritères semble être une méthodologie appropriée pour résoudre la plupart de ces problèmes de prise de décision stratégique. Trois catégories d'approche peuvent être appliquées selon la manière que les jugements seront agrégés (Schärlig, 1988) :

- (1) Agrégation complète : Faire associer tous les critères pour les simplifier en un seul critère.
- (2) Agrégation partielle : Cette méthode cherche à comparer des actions potentielles et puis les ordonner.
- (3) Agrégation locale : Cette méthode commence par choisir une solution de départ. Ensuite, elle applique des comparaisons avec toutes les autres alternatives et adapte à chaque fois le meilleur jusqu'au dernier.

Parmi les 3 catégories définies, l'agrégation complète semble être compatible dans sa façon de comparer avec les besoins de cette étude. En effet, la comparaison entre les alternatives doit se baser sur trois critères. Cependant, chacun de ces critères se présente dans plusieurs aspects différents. De nombreux chercheurs ont utilisé la méthode d'analyse hiérarchique des procédés (AHP) dans des circonstances semblables à cette étude. C'est une tactique efficace, connue pour sa simplicité d'utilisation, sa capacité à structurer des problèmes complexes et à fournir un jugement cohérent (Yusuff et Yee, 2001). Parmi les Avantages de la méthode AHP on cite :

- Elle prend en compte à la fois des aspects subjectifs et objectifs d'une décision, en réduisant les décisions complexes à une série de comparaisons par paires, puis en synthétisant les résultats
- Elle utilise des données dont les unités de mesure sont incommensurables
- Elle intègre une technique utile pour vérifier la cohérence des évaluations du décideur, réduisant ainsi la partialité dans le processus de prise de décision.

3.4. Processus d'analyse hiérarchique : AHP

L'AHP est une méthode développée par **Thomas L. SAATY**, en 1971. C'est un outil convenable pour décomposer les problèmes complexes en une structure hiérarchique détaillée. Elle permet aussi d'effectuer des comparaisons binaires, de déterminer les priorités. Aussi, à l'aide de l'indice de cohérence, l'utilisateur serait capable d'appuyer ou non les résultats donnés. L'AHP s'applique en trois étapes :

- (1) Décomposition du problème en structure hiérarchique dans laquelle on identifie tous les critères et les sous-critères de comparaison. Ces catégories de données constituent chacun un niveau de la représentation hiérarchique. Un problème est constitué par au minimum trois niveaux.

Niveau 0: Le sommet de la hiérarchie (la cible) est constitué d'un élément unique. C'est l'objectif cible ou l'objectif dominant.

Niveau 1: Englobe les critères de décision principaux.

Niveau 2: Contiens les sous-critères qui influencent la décision

Niveau n: Le dernier niveau de la hiérarchie comprend les différentes alternatives, choisies au préalable

- (2) Comparaison binaire entre les sous-critères de la même catégorie et les critères selon l'échelle d'évaluation proposée par SAATY dans le tableau 3.3. Ceci permet de déterminer et de synthétiser la priorité pour chaque sous-critère et critère et enfin, de trouver l'alternative qui possède les meilleures attributions.

Tableau 3.3: Échelle d'évaluation selon SAATY (1989)

Description	Valeur numérique
Les deux éléments ont une importance égale	1
L'élément en ligne est un peu plus important que celui en colonne	3
L'élément en ligne est plus important que celui en colonne	5
L'élément en ligne est beaucoup plus important que celui en colonne	7
L'élément en ligne est absolument plus important que celui en colonne	9
L'élément en ligne est un peu moins important que celui en colonne	1/3
L'élément en ligne est moins important que celui en colonne	1/5
L'élément en ligne est beaucoup moins important que celui en colonne	1/7
L'élément en ligne est absolument moins important que celui en colonne	1/9
Dans certain cas, si nous avons des difficultés pour évaluer, on pourra affiner en rajoutant des valeurs intermédiaires.	2, 4, 6, 8

- (3) Calcul des indices de cohérence (IC) et ratio de cohérence (RC) en appliquant les équations 1 et 2 avec le tableau 3.4. Plus IC est élevé plus les jugements sont incohérents et vice versa. Ensuite, il faut calculer la cohérence globale d'appréciation qu'est la moyenne des RC. Cette valeur ne doit pas dépasser 10%, sinon, une révision des tableaux de comparaison sera exigée.

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - K}{k - 1} \quad \text{Équation 3.2}$$

$$RC = \frac{IC}{CIA} \quad \text{Équation 3.3}$$

Avec k : le nombre d'éléments comparés

λ_{\max} : la valeur propre maximale de la matrice

CIA : le coefficient d'incohérence aléatoire

Tableau 3.4: Coefficient d'incohérence aléatoire (Lehoux et Vallée, 2004)

Nombre de Niveaux	1	2	3	4	5	6	7	8	9
CIA	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

3.5. Critères de sélection

La comparaison entre les alternatives n'est pas précise si on ne prend en considération que les trois critères de sélection globaux. Évidemment, chacun de ces derniers se divise en plusieurs indicateurs spécifiques. C'est ce qu'on appelle les sous-critères, tableau 3.5. Donc, une comparaison entre les alternatives selon le premier niveau seulement va éventuellement mener à un choix erroné. Les sous-critères sont l'arborisation du niveau 1. Ils couvrent alors les différents angles du critère afin d'assurer que la comparaison est complète et spécifique.

Tableau 3.5: Explications des sous-critères choisis

Critères (niveau 1)	Sous-critères (niveau 2)	Explications
Le critère technologique	<i>Faisabilité technologique</i>	La possibilité d'application de la technologie dans les conditions autorisées
	<i>Taux de lixiviation</i>	Les pourcentages de récupération des MP
	<i>Vitesse de lixiviation</i>	La durée nécessaire pour la solubilité des MP
	<i>Recyclabilité</i>	La possibilité de réutiliser le réactif
	<i>Degré de pureté</i>	La pureté des MP récupérés après lixiviation
Le critère économique	<i>Coût de lixiviation</i>	Le coût d'investissement et du réactif
	<i>Coût de traitement</i>	Le coût du traitement des déchets engendrés
Les critères environnementaux	<i>Toxicité</i>	Le niveau de toxicité des différentes sortes de déchets engendrés par l'opération
	<i>Corrosivité</i>	La corrosivité de l'atmosphère extérieur et de l'environnement intérieur

3.6. Méthode Delphi

Les décisions dans l'application de la méthode AHP seront prises par l'application de la méthode Delphi. C'est un mécanisme de prise de décision à l'aide d'experts qualifiés dans le domaine qui comprennent clairement le phénomène étudié. Son but est de mettre les convergences d'opinions évidentes et clarifier les consensus sur des sujets précis.

La méthode Delphi a été mise au point au début des années 1950 par Olaf Helmer et Norman Dalkey au sein de la RAND Corporation pour solliciter systématiquement le point de vue d'experts en matière de défense nationale et plus tard dans des domaines controversés du débat sociopolitique. (Custer et al., 1999).

Pour cette recherche, le choix de profil des experts est basé sur la connaissance au domaine de recyclage des cartes électronique par la voie hydrométallurgique, aux procédés chimiques et à l'environnements. Une consultation d'une dizaine d'expert et à des recherches a été effectuée pendant le remplissage des tableaux d'AHP.

CHAPITRE 4 : PROCESSUS DE RECYCLAGE PAR LA VOIE HYDROMÉTALLURGIQUE

Mieux organisée, l'hydrométallurgie peut améliorer le recyclage des cartes électroniques et aboutir à des taux de récupération des métaux théoriquement élevés. Plusieurs protocoles à l'échelle pilote ont été développés pour la récupération des métaux précieux à partir des déchets de PCB. (Annexe 1)(Behnamfard et al., 2013; Kamberović et al., 2011; Quinet et al., 2005). En se basant sur ces préalables, on définit les étapes hydrométallurgiques pour cette recherche.

4.1. Traitements d'application du processus hydrométallurgique

La récupération des MP par la voie hydrométallurgique nécessite le passage par trois traitements principaux après le prétraitement, comme montre la figure 4.1. (Akcil et al., 2015; Cui et Zhang, 2008; Rocchetti et al., 2013; Safarzadeh et al., 2007).

(1) Un traitement physique est un passage indispensable pour la réussite de la lixiviation. Effectivement, les métaux revêtus de plastique, de résine, de céramique... rendent l'attaque chimique plus difficile et affectent définitivement le taux de récupération des MP.

(2) Les particules des métaux non-ferreux résultant de la séparation électromagnétique subissent une série de lixiviation et donnent des solutions riches en métaux. Les solutés sont ensuite attaqués par des procédures de séparation et de purification comme la précipitation d'impuretés, l'extraction par solvant, l'adsorption et l'échange d'ions pour isoler les métaux. C'est le traitement chimique.

(3) Enfin, ces solutions raffinées sont traitées par des réactions électrochimiques comme l'électrolyse, cimentation, réduction chimique ou cristallisation pour la récupération des métaux à l'état solide et brut.

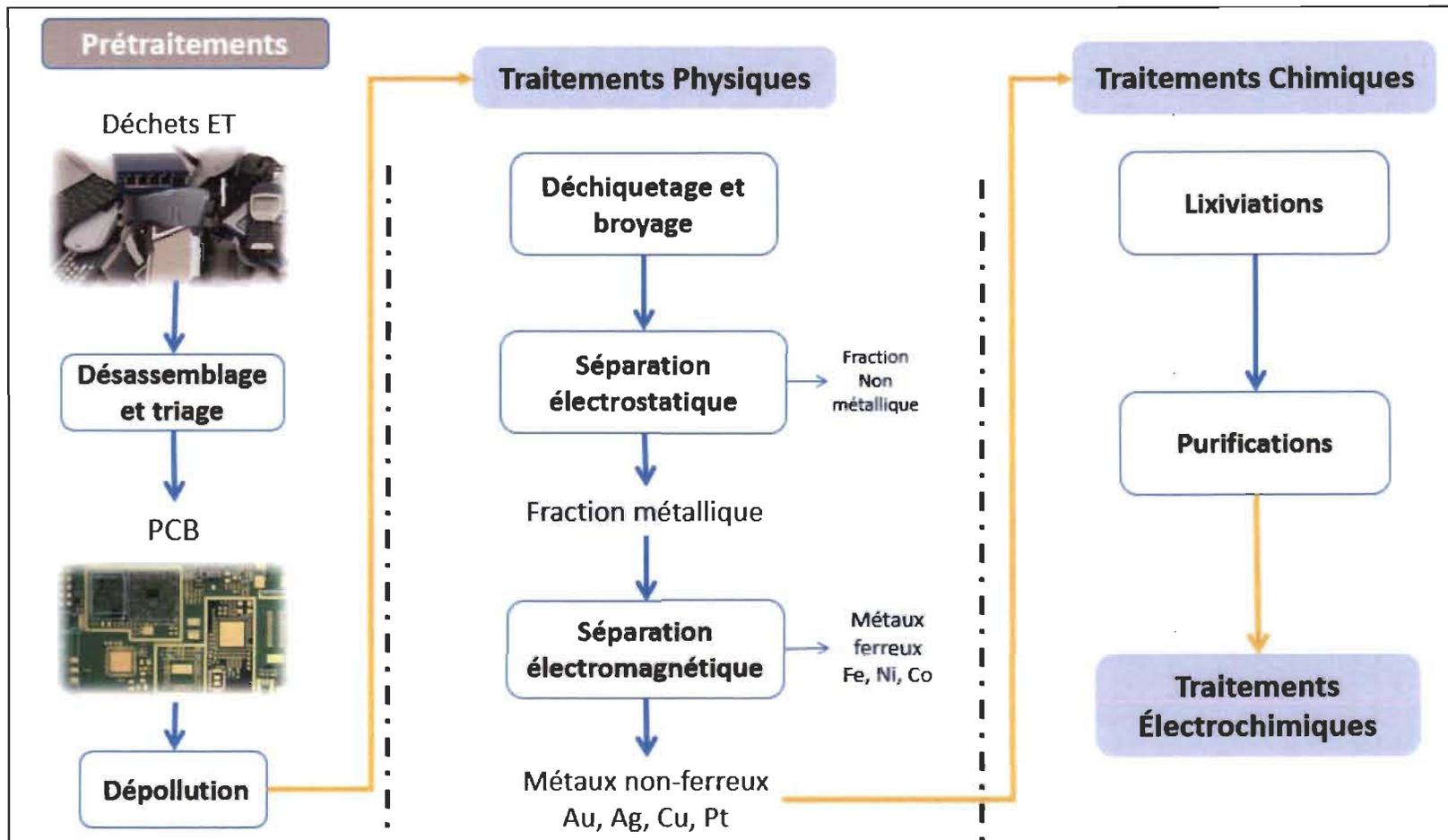


Figure 4.1: Principaux traitements pour l'application du Processus hydrométallurgique

4.2. Traitements physiques

Un traitement physique est nécessaire afin de réduire la complexité des étapes du traitement hydrométallurgie, notamment l'étape de lixiviation. Le traitement physique consiste d'abord à un démontage puis une série de déchiquetage et broyage et enfin des traitements de séparation pour récupérer les particules métalliques (Yamane et al., 2011).

4.2.1. Prétraitement :

La composition complexe et toxique des cartes électroniques nécessite le passage par une étape préliminaire visant à enlever les composants toxiques et non recyclables avant de passer au déchiquetage. C'est la dépollution et le désassemblage (Alzate et al., 2016).

4.2.2. Déchiquetage et broyage

Le déchiquetage est une opération de découpages des PCB en petits morceaux afin de rendre la séparation de la portion métallique et plastique plus facile et efficace.

Le broyage consiste à diminuer la dimension des particules des parties coupées. La taille de celui-ci est le sujet de plusieurs recherches scientifiques afin de déterminer la grandeur convenable pour optimiser le traitement chimique. Plus que les particules sont finement broyées (moins de 100 μ) plus que la séparation des métaux sera efficace, peuvent aboutir à des améliorations de la teneur au métal de 90 %. Effectivement, la taille des particules constitue un paramètre clé pour la lixiviation ultérieure (Thomas, 2016).

4.2.3. Séparation

Les PCB sont composés de plusieurs matériaux différents. On peut classer ces derniers en trois fractions : le plastique, les métaux ferreux et les métaux non-ferreux. (Cui et Zhang, 2008; Luyima et al., 2011) indiquent que les déchets de PCB contiennent plus de vingt types de métaux. Plusieurs procédés peuvent être appliqués. Par exemple, une

séparation électrostatique pour récupérer la fraction métallique en suite une séparation électromagnétique pour séparer les fractions ferreuse et non ferreuse(Yazıcı et al., 2009).

La séparation gravimétrique est une technologie permettant la récupération de 80% du métal, mais aussi, engendre des taux de déchet polluant important comme les plastiques chlorés et bromés , les résines phénoliques,... la fraction métallique est traitée alors plus facilement, malgré la présence de résine et de plastique (moins que 10%) (Thomas, 2016).

4.3. Traitements chimiques

La lixiviation est l'étape clé dans le procédé du traitement hydrométallurgie. C'est une opération chimique qui permet la dissolution sélective des métaux contenus dans la fraction non-magnétiques. La figure 4.2 présente les alternatives des procédés hydrométallurgiques pour la lixiviation des MP des PCB. (Behnamfard et al., 2013; Kamberović et al., 2011; Quinet et al., 2005)

La fraction non ferreuse des PCB est composée de plusieurs éléments métalliques différents. Le cuivre est le métal dominant, mais l'or est l'élément visé. Chacun de ces métaux possède des caractéristiques et propriétés différentes, ce qui influence les réactions selon les éléments et la façon d'opérer. (Luyima et al., 2011).

La lixiviation séquentielle est le meilleur choix pour récupérer les métaux précieux avec les moindres coûts (réactif), d'énergie et de délais. La sélection du protocole de lixiviation approprié nécessite une compréhension de la cinétique du processus et des ajustements des paramètres: Concentration des réactifs, Ph, T, vitesse d'agitation, etc.(Huang et al., 2009; Luyima et al., 2011; Tuncuk et al., 2012).

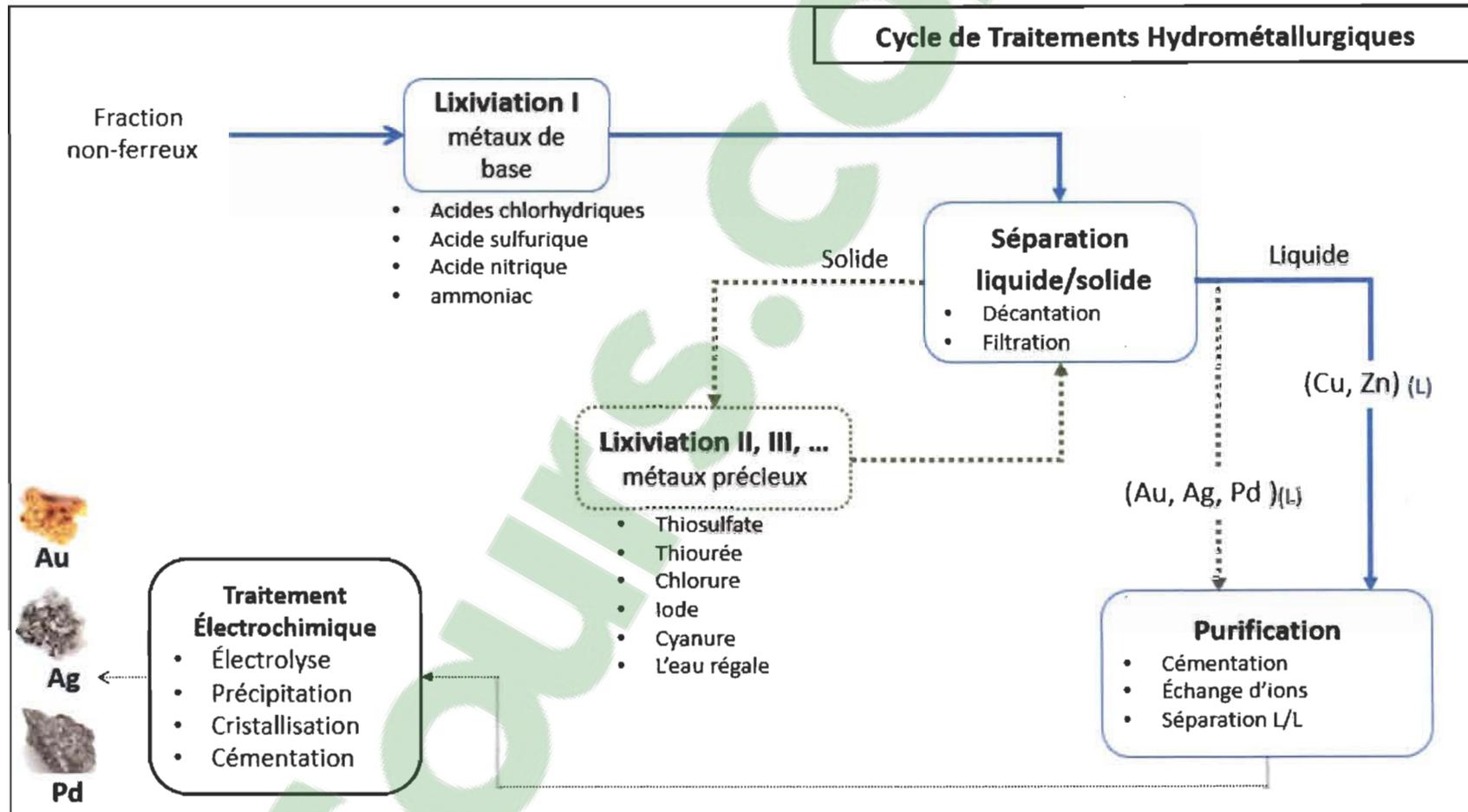


Figure 4.2: Processus des procédés de traitement hydrométallurgique

4.3.1. Lixiviation I : Métaux de base

La première lixiviation est réalisée par une attaque d'acide fort en présence d'un agent oxydant ce qui permet la dissolution des métaux de base comme le cuivre, le zinc, le plomb, etc. Dans une deuxième phase une séparation solide-liquide est appliquée donnant une solution impure riche en ces métaux et une partie solide enferme les MP. Enfin, la fraction liquide subit des purifications pour retirer les métaux à l'état pur et la fraction solide subit une deuxième lixiviation.

L'acide avec un réactif oxydant est largement utilisé pour la lixiviation des métaux de base des PCB. Les acides les plus connus pour cette opération sont l'acide sulfurique (H_2SO_4), l'acide chlorhydrique (HCl), l'eau régale et l'acide nitrique (HNO_3) avec divers oxydants comprenant le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2), le dioxygène (O_2), (Fe^{3+}) et (Cl_2) (Quinet et al., 2005).

Plusieurs chercheurs (Deveci et Ball, 2010; Jha et al., 2011; Kamberović et al., 2011; Yang et al., 2011) ont utilisé l'acide sulfurique avec le peroxyde d'hydrogène pour la dissolution étant donné qu'il est moins dangereux. D'autres ont essayé l'acide nitrique (HNO_3) et l'acide chlorhydrique (HCl) mais en raison de la réglementation environnementale et la nature corrosive de ces réactifs, ils ne sont pas considérés comme appropriés pour des applications industrielles.

4.3.2. Lixiviation II, III: Métaux précieux

Après avoir éliminé les métaux de base, la fraction solide obtenue subit d'autres lixiviations par des agents complexes, suivies par des opérations de purification et de raffinage pour récupérer les métaux précieux. Les effluents générés de ce processus peuvent être traités et les eaux réutilisées en circuit fermé (Akcil et al., 2015; Birloaga et al., 2013; Cui et Zhang, 2008; Rocchetti et al., 2013). Selon le métal à traiter, différents réactifs de lixiviation peuvent être appliqués. Pour la lixiviation des MP les réactifs suivants sont les plus connus.

- *Eau régale*

C'est un réactif efficace qui présente de bonnes réactions avec l'or, mais il est très corrosif et présente des déchets toxiques difficiles à traiter.(Jing-ying et al., 2012).

- *Cyanure*

C'est le réactif le plus utilisé dans le dernier siècle dans les mines d'or, il est populaire à cause de son efficacité pour récupérer l'or et son coût faible. Cependant, cette alternative dégage des effluents liquides hautement toxiques pour l'environnement (Sabir Syed, 2012).

- *Thiosulfate (Annexe 2.1)*

C'est un réactif qui ne présente pas de problèmes environnementaux. Le tableau 4.1 présente les résultats de deux essais laboratoires avec les paramètres de la réaction. Le réactif montre des taux de récupération intéressants. Néanmoins, il est connu pour une consommation élevée de réactif, ce qui augmente les coûts du traitement (Feng et Van Deventer, 2002a, 2002b; Sabir Syed, 2012).

Tableau 4.1: Essais laboratoires de lixiviation par thiosulfate tiré de la littérature

Référence	Taux de récupération	Paramètres de lixiviation					
		Concentration des réactifs	Ratio S/L	PH	T°C	Temps (h)	Agitation (t/min)
Ha, Lee, Jeong, Hai, and Jha (2010)	90% Au	0.12 M (NH ₄) ₂ S ₂ O ₃ 15 mM Cu 0.2 M NH ₃	NA	10	25	10	200
	98% Au	0.12 M (NH ₄) ₂ S ₂ O ₃ 20 mM Cu 0.2 M NH ₃	NA	10	25	2	200
Tripathi et al. (2012)	78.8% Au	0.1 M (NH ₄) ₂ S ₂ O ₃ 40 mM CuSO ₄	10	10	25	8	250

- Thiourée (*Annexe 2.2*)

Le tableau 4.2 présente deux essais laboratoires avec les paramètres de réactions.

Tableau 4.2: Essais laboratoires de lixiviation par thiourée tiré de la littérature

Référence	Taux de récupération	Paramètres de lixiviation					
		Concentration des réactifs	Ratio S/L	PH	T°C	Temps (h)	Agitation (t/min)
Birloaga et al. (2013))	75% Cu	2 M H ₂ SO ₄ ; 5% H ₂ O ₂	1/10	NA	25	3	300
	69% Au	20 g/L thiourée 6 g/L Fe ³⁺ + 0.5 M H ₂ SO ₄	1/10	1	25	NA	500
Behnamfard et al. (2013)	85.76% Au, 71.36% Ag	20 g/L thiourée;					
	13.99% Cu	6 g/ Fe ³⁺ 10 g/L H ₂ SO ₄	1,2/1,25	NA	25	3	200
	85.76% Cu	2 M H ₂ SO ₄ ; 35% H ₂ O ₂	1,2/1,25	NA	25	13	200

Le thiourée est un agent de lixiviation qui réagit dans des conditions très acide et en présence d'oxydant. Il présente une bonne pureté de MP récupérés. Mais, les taux de récupération de ces derniers ne sont pas les meilleurs. Les taux de récupérations des métaux ne dépassent pas 85% selon ces deux protocoles consultés.

- *Iodure*

Le tableau 4.3 présente deux essais laboratoires avec les paramètres des réactions.

Tableau 4.3: Essais laboratoires de lixiviation par iode tiré de la littérature

Référence	Taux de récupération	Paramètres de lixiviation					
		Concentration des réactifs	Ratio S/L	PH	T°C	Temps (h)	Agitation (t/min)
Xu et al. (2010)	95% Au	1.1% I 1.5% H ₂ O ₂ N(I ₂) : N(I ⁻) = 1 : 10	1/10	7	25	4	NA
Xiu, Qi, and Zhang (2015)	100% Cu	SCWO+HL I ₂ : I ⁻ = 1 : 5	1/10	9	25	2	300
	98.5% Au,						
	97.2% Pd,						
	99% Ag						

L'iode fait partie de la famille des halogénures, connu par sa stabilité chimique. Les études autour de cette alternative sont peu nombreuses à cause du coût de réactif extrêmement cher. Les résultats montrent de bons taux de récupération pour tous les métaux, soit les plus élevés par rapport aux autres alternatives, de l'ordre de 95 à 98% d'or, 100% de cuivre, 99% d'argent et 97% de pallidum.

- *Chlorure* (Annexe 2.3)

Le tableau 4.4 montre les résultats de lixiviation de deux essais laboratoire par le chlorure.

Tableau 4.4: Essais laboratoires de lixiviation par chlorure tiré de la littérature

Référence	Taux de récupération	Paramètres de lixiviation					
		Concentration des réactifs	Ratio S/L	PH	T°C	Temps (h)	Agitation (t/min)
Kim et al. (2011)	94% Cu 5% Au	2.0 mol/L HCl Cl ₂ généré électriquement	40	Varié	25	2.75	500
	93.6% Au 0.58% Cu	0.1 mol/L HCl Cl ₂ généré électriquement	160	Varié	25	10 min	600
Havlik, Orac, Berwanger, and Maul (2014)	85% Cu 55% Sn	1 M HCl	3/0.4	NA	80	3	NA

C'est un agent de lixiviation fiable et stable, fait partie des halogénures aussi. Il est disponible avec des coûts raisonnables. Le taux de récupération est intéressant pour le cuivre et pour l'or aussi à condition de suivre au moins deux lixiviations.

4.3.3. Comparaisons des Réactifs : Choix des alternatives de lixiviation

Le tableau 4.5 présente une première comparaison entre les réactifs de lixiviation des PCB pour récupérer les MP selon leurs caractéristiques qu'elle présente face à des critères potentiels.

Tableau 4.5: Comparaison des alternatives de lixiviation des métaux précieux

	Impact Environnemental	Cinétique de lixiviation	Coût de consommation	Effet corrosif	Faisabilité technologique
Cyanure	Élevé	Faible	Faible	Non-corrosive	Élevée
Eau régale	Élevée	Rapide	Élevé	Corrosive	Moyenne
Thiosulfate	Faible	Moyenne	Élevé	Non-corrosive	Faible
Thiourée	Faible	Moyenne	Élevée	Non-corrosive	Moyenne
Chlore	Moyen	Rapide	Moyen	Très-corrosive	Moyenne
Iode	Négligeable	Rapide	Très Élevé	Non-corrosive	Moyenne

- Impact environnemental

Les réactions chimiques produisent naturellement des déchets polluants s'ils ne sont pas traités et désinfectés convenablement en fin de réactions. Le cyanure et l'eau régale

présente des impacts environnementaux toxique plus élevée comparativement aux autres alternatives.

- *Coût de consommation*

En termes de coût, le cyanure est connu comme le réactif le moins cher. Cependant le chlore, qui peut être réutilisé dans d'autres lixiviations grâce à sa régénération, lui donne l'avantage dans ce terrain. Ce critère est un facteur principal dans le processus. Plusieurs recherches sont nécessaires pour trouver le meilleur procédé et paramètre de lixiviation afin d'atteindre un taux de récupération élevé avec les moindres coûts de consommation.

- *Cinétique de Lixiviation*

La cinétique de réaction est un facteur qui affecte la lixiviation indirectement, autant que la cinétique est élevée autant que la durée de récupération des MP est plus longue et par la suite, diminue la quantité traitée. Pour ajuster ce facteur, Il faut une consommation excessive de réactif pour gérer la durée, ce qui engendre des coûts plus élevés. Le cyanure présente une faible cinétique de lixiviation. Cependant, ce réactif est disponible avec des coûts non excessifs. L'eau régale, l'iode et le chlorure sont les réactifs favorables pour accomplir ce critère.

- *Effet corrosif*

En plus des déchets engendrés par la réaction chimique, des effets corrosifs peuvent s'ajouter aux impacts environnementaux de lixiviation. Seuls le chlore et l'eau régale présentent des effets indésirables à ce niveau.

- *Faisabilité technologique*

Les résultats théoriques et les essais laboratoires des réactifs de lixiviation prennent en considération exclusivement le déroulement de la réaction chimique avec le métal. La faisabilité technologique permet d'étudier les possibilités de réaliser le projet à l'échelle industrielle. Le cyanure est largement industrialisé pour la récupération de l'or à

partir des mines. Les autres alternatives nécessitent encore des recherches pour étudier ce point.

- *Choix des alternatives de recherche*

Vu les effets toxiques élevés sur l'environnement du cyanure et de l'eau régale, ces deux réactifs sont éliminés de la liste des alternatives pour cette étude. On prend alors les quatre alternatives restantes pour l'application du AHP.

4.3.4. Purification

La lixiviation est en général non sélective d'une façon complète. Avec les métaux récupérés, la solution enferme aussi des impuretés qui peuvent perturber l'élaboration du métal désiré ou nuire sa pureté. Après la séparation solide liquide, une réaction de purification doit avoir lieu. Selon le type de lixiviation, plusieurs technologies peuvent être appliquées afin de séparer le résidu inerte de la solution comme la cémentation électrochimique, l'échange d'ions, la décantation, la filtration, la centrifugation, etc.

4.4. Traitement électrochimique : La récupération des métaux

La récupération du métal nécessite habituellement la formation du métal. C'est la solidification de la partie liquide purifiée et raffiner pour donner le métal brut recherché. Parmi les technologies utilisées pour assurer cette opération on nomme l'électrolyse, la cristallisation, la précipitation, la réduction chimique, etc.

Parfois, l'étape de purification coïncide avec l'étape d'élaboration du métal comme dans le cas de la cémentation de l'or par le zinc (Safarzadeh et al., 2007).

CHAPITRE 5 : APPLICATION DE LA MÉTHODE AHP SUR LES ALTERNATIVES DE LIXIVIATION DES MÉTAUX PRÉCIEUX DES PCB

Ce chapitre est dédié à l'application de la méthode AHP sur les données collectées afin de dévoiler l'alternative compatible aux critères de la lixiviation.

5.1. La structure hiérarchique du problème

La figure 5.1 illustre l'arbre hiérarchique de la méthode AHP pour le problème du choix d'alternative de lixiviation des métaux précieux contenus dans les cartes électroniques.

- **Objectif** : L'objectif de cette application est la sélection du meilleur réactif parmi l'ensemble des alternatives selon les critères de choix.
- **Alternatives** : Les alternatives de lixiviation les plus couramment utilisées dans la récupération des MP contenus dans les déchets de PCB comprennent, le thiosulfate, la thiourée, le chlorure et l'iode (Jing-ying et al., 2012; Sayed, 2012, Cui et al., 2008, Akil et al 2015).
- **Critères et sous-critères** : Le choix de la meilleure technologie de récupération doit tenir compte des critères techniques, économiques et environnementaux (Krikke, 1998). L'identification des sous-critères potentiels est faite en se basant sur les travaux de recherches antérieures sur la lixiviation des métaux précieux contenus dans les déchets électroniques. La sélection d'une technique appropriée de lixiviation des métaux d'intérêt nécessite une compréhension de la cinétique du processus de lixiviation, à savoir la composition chimique et granulométrie du déchet, le PH, la température, le potentiel d'oxydo-réduction et la vitesse d'agitation de la solution de lixiviation (Quinet et al 2005; Kamberovic, 2011; Luyima et al ,2011; Behnamfard et al ,2013 Birloaga et al,2013).

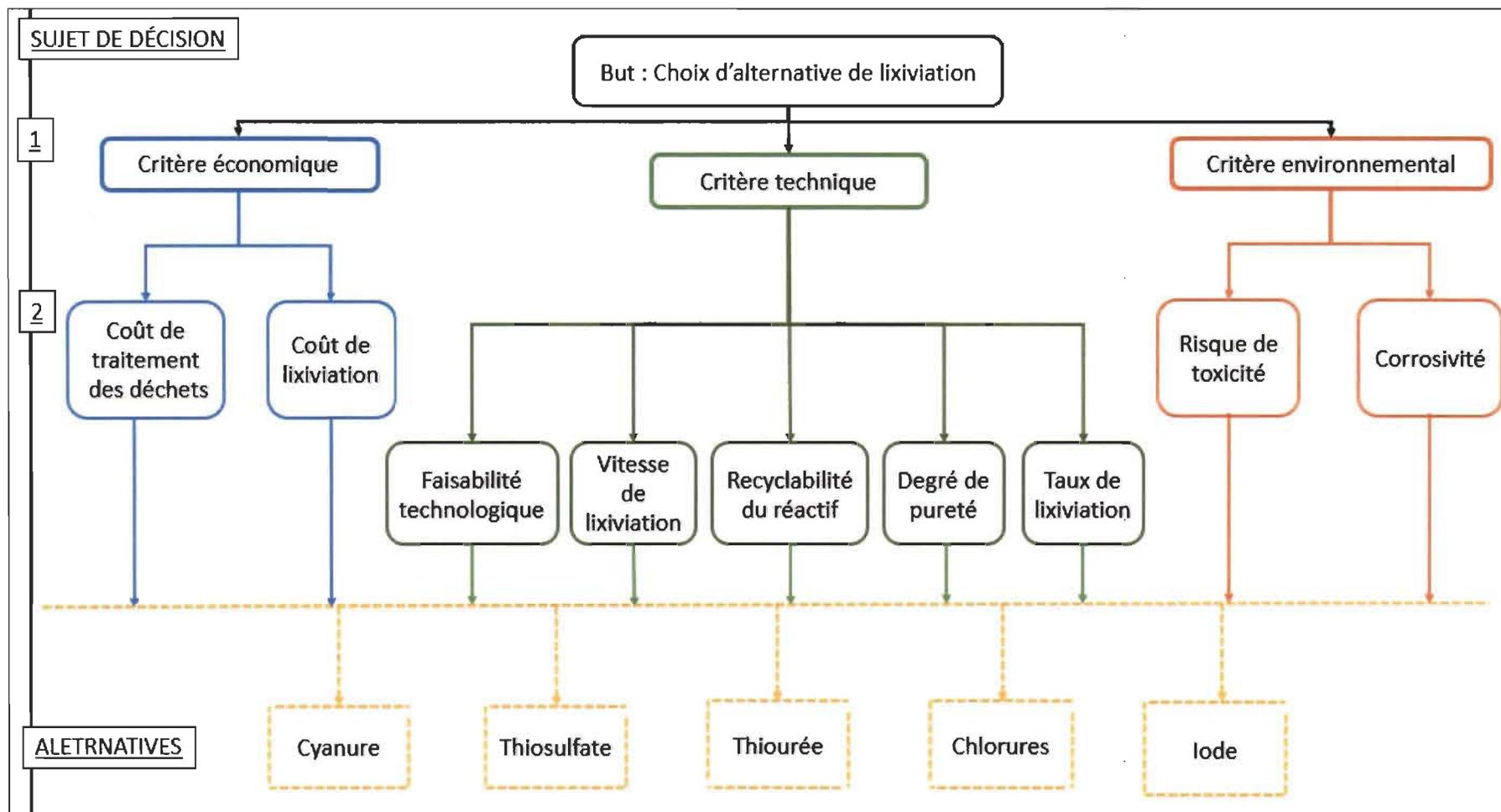


Figure 5.1: Structure hiérarchique du problème de choix d'alternative de lixiviation des PCB pour récupérer les MP

5.2. La comparaison binaire : Application de la méthode Delphi

Après avoir défini les différents niveaux du problème, on passe à l'étape de comparaison des éléments de chaque niveau pour déterminer le poids des critères, des sous-critères et des alternatives selon chaque sous-critère. Les décisions prises dans cette application du AHP sont basées sur trois piliers :

- Un groupe de chercheurs dans le domaine, qui ont une bonne connaissance des procédés de l'hydrométallurgie et de la lixiviation de l'or.
- Des résultats des essais laboratoire des autres recherches sur les alternatives, pour appuyer les décisions prises ou vérification en cas des opinions différentes.
- Un entrepreneur et une spécialiste en environnement dans le domaine afin de valider les résultats par des jugements professionnels au niveau de l'importance du critère.

5.2.1. Comparaison binaire des critères

À ce niveau, les trois critères de comparaison ont la même importance face au choix. Ce qui n'est pas fiable lors de la décision. En effet, le poids d'une alternative qui présente de bonnes attributions au niveau environnemental et technique, mais pas économique est de 2/3 qui est égale à une autre qui apporte de bons résultats sur le niveau technique et économique, mais pas environnemental. La solution est de donner des points d'importance pour chaque critère permettant ainsi de favoriser le poids de l'un par rapport à l'autre.

Afin de classer l'importance des trois critères principaux, trois tableaux ont été remplis séparément avec l'échelle SAATY(tableau 3.3), par l'équipe des chercheurs et des professionnels. Puis, dans une réunion de discussion avec les intervenants, un tableau 5.1 final est émis pour cette comparaison.

Tableau 5.1: Matrice de comparaison binaire critère - critère

Matrice A	Critère économique	Critère technique	Critère environnemental
Critère économique	1	1/3	2
Critère technique	3	1	3
Critère environnemental	1/2	1/3	1

La lecture du tableau, se fait selon les lignes. Par exemple, le critère économique de la ligne 1 est deux fois plus important que le critère environnemental du colonne 3.

Les trois critères sont importants pour la faisabilité du projet. Le critère technique est le cœur du projet, il présente tous les éléments qui sont en relation directe avec la réaction chimique et les résultats de lixiviation. Ceci explique son importance par rapport aux autres. Le critère économique et le critère environnemental sont d'importance semblable. En effet, l'économie est nécessaire pour la survie du projet et d'un autre côté, il faut prendre le critère environnemental en considération pour avoir l'approbation du gouvernement.

Afin de calculer le poids de ces éléments, il faut calculer la matrice normalisée, présentée au tableau 5.2, et obtenir le vecteur propre (ou poids) normalisé.

Le vecteur propre normalisé présente le poids accordé à chaque critère selon les circonstances de l'objectif de cette application. Conformément à l'importance accordée dans la matrice de comparaison, le critère technique présente un poids de 59% sur le résultat du choix final, suivi par le critère économique avec 25% et enfin le critère environnemental avec 16%.

On passe enfin à la vérification de la cohérence des jugements pour vérifier que les importances attribuées dans la matrice de comparaison binaire des critères sont homogènes entre eux. Le tableau 5.3 est le produit de la matrice A remplie dans le tableau 5.1 par le vecteur propre normalisé calculer dans le tableau 5.2. Le tableau 5.3 présente le λ_{Max} , l'Indice de cohérence et le ratio de cohérence de la matrice du critère.

Le calcul de l'indice de cohérence IC dans le tableau 5.3 a donné une valeur qui tend vers 0, ce qui indique que les valeurs accordées sont bien cohérentes, ceci est bien confirmé dans le Ratio de cohérence avec une valeur bien inférieur à 10% (selon la norme de SAATY). Donc les jugements sont cohérents et le pourcentage que la matrice était remplie aléatoirement ne dépasse pas 5% seulement.

Les mêmes démarches et calculs seront appliqués pour toutes les prochaines comparaisons binaires pour obtenir le vecteur propre normalisé (VPN), l'indice de cohérence et le ratio de cohérence de chaque matrice. Dans la prochaine partie, on se limite à présenter les VPN, les IC et les RC de chaque matrice. Le calcul complet sera détaillé dans l'annexe 3.

Tableau 5.2: Matrice de comparaison binaire critère – critère normalisée

	Critère économique	Critère technique	Critère environnemental	Somme	Vecteur propre normalisé (VPN)
Critère économique	0,22	0,20	0,33	0,76	25%
Critère technique	0,67	0,60	0,50	1,77	59%
Critère environnemental	0,11	0,20	0,17	0,48	16%
Somme	1,00	1,00	1,00	3,00	100%

Tableau 5.3: Matrice de calcul de l'Indice de cohérence et le ratio de cohérence de la matrice binaire du critère

A x VPN	Critère économique	Critère technique	Critère environnemental	SOMME	SOM/VPN		
Critère économique	0,25	0,20	0,32	0,77	3,04	λ_{Max}	3,05
Critère technique	0,76	0,59	0,48	1,82	3,09	IC	0,03
Critère environnemental	0,13	0,20	0,16	0,48	3,02	RC	4,65%

5.2.2. Comparaison binaire des sous-critères

- Critère technique

Le critère technique avec un poids qui dépasse la moitié est décisif pour cette application. C'est pour cela que ce critère est décortiqué en plusieurs sous-critères afin de comparer les alternatives sur le maximum de niveaux. Le tableau 5.4, présente les VPN, le IC et le RC. La valeur de RC prouve que la matrice est cohérente.

Le Taux de lixiviation du réactif présente un élément important dans l'application du projet, mais avant cela, la faisabilité technologique de réactif doit être confirmée pour passer à l'action. Les trois facteurs restants sont également importants, mais leurs influences touchent le projet dans une deuxième étape.

Tableau 5.4: Vecteur propre normalisé, IC et RC de la comparaison binaire des sous-critères du Critère technique

Sous-critères	Vecteur propre normalisé		
Faisabilité technologique	33%		
Taux de lixiviation	30%		
Vitesse de lixiviation	7%	λ_{Max}	5,215
Recyclabilité	11%	IC	0,054
Degré de pureté	20%	RC	4,81%

- Critère économique

Le critère économique se divise pour cette étude en deux éléments seulement, donc la comparaison se fait entre ces deux derniers ce qui ne présente aucune crainte pour la

cohérence de jugement. En effet, le IC et le RC prendront automatiquement la valeur 0, selon le tableau de « *coefficient d'incohérence aléatoire* ». Alors le tableau 5.5 présente seulement le VPN.

Tableau 5.5 : Vecteur propre normalisé de la comparaison binaire des sous-critères du Critère économique

Sous-critères	Vecteur propre normalisé
Coût de lixiviation	83%
Coût de traitement	17%

Dans le processus de lixiviation, le coût du réactif présente le principal investissement du projet. Ce qui explique, son poids important dans le jugement de l'alternative. Le coût de traitement des déchets est aussi en relation discrète avec l'environnement, en général autant que les déchets sont toxiques autant que leur traitement est plus coûteux.

- *Critère environnemental*

De même le critère environnemental possède deux sous-éléments seulement, le tableau 5.6 présente le poids d'importance de chaque.

Tableau 5.6: Vecteur propre normalisé de la comparaison binaire des sous-critères du Critère environnemental

Sous-critères	Vecteur propre normalisé
Toxicité	87%
Corrosivité	13%

Les réactions chimiques engendrent des déchets à l'état gazeux, liquide ou solide. Ces déchets présentent des risques de toxicité différents d'un réactif à l'autre. Des codes et des réglementations sont exigés par les gouvernements selon leurs niveaux de tolérance à ces substances sur son territoire. Alors ceci est la principale contrainte qui peut se présenter pour le déroulement du projet sur le côté environnemental.

5.2.3. Comparaison binaire des alternatives selon chaque sous-critère

Selon chaque sous-critère, les alternatives possèdent des caractéristiques différentes qui peuvent le favoriser ou non. La présente partie, indique pour chaque VPN la meilleure alternative du sous-critère associé.

5.2.3.1. Critères économiques :

- Coût de lixiviation

L'iodure et le thiourée sont des réactifs dispendieux, ce qui défavorise leurs positions pour le coût de réactif, tandis que le chlorure et le thiosulfate présentent des prix abordables. Le tableau 5.7 présente les attributions de VPN.

Tableau 5.7: Vecteur propre normalisé de la comparaison binaire des alternatives pour le coût de lixiviation.

Les alternatives	VPN-coût de lixiviation		
Thiosulfate	33%		
Thiourée	12%	λ_{Max}	4,16
Chlorure	51%	IC	0,05
Iodure	4%	RC	5%

- Coût de traitement

Le coût du traitement des déchets est relié à leurs qualités, comme présente le tableau 5.8, l'iodure est un élément non-toxique ce qui explique son bon attribut à ce niveau.

Tableau 5.8: Vecteur propre normalisé de la comparaison binaire des alternatives pour le coût de traitement.

Les alternatives	VPN-Coût de traitement		
Thiosulfate	11%		
Thiourée	5%	λ_{Max}	4,18
Chlorure	29%	IC	0,06
Iodure	54%	RC	6%

5.2.3.2. Critères environnementaux :

- *Risque de Toxicité*

Le tableau 5.9 présente les vecteurs propres normalisés de chaque alternative selon le Risque de Toxicité qu'elles présentent lors et après la lixiviation.

Tableau 5.9: Vecteur propre normalisé de la comparaison binaire des alternatives pour le Risque de toxicité

Les alternatives	VPN-Risque de Toxicité		
Thiosulfate	28%		
Thiourée	6%	λ_{Max}	4,11
Chlorure	19%	IC	0,04
Iodure	47%	RC	4%

- *Corrosivité*

Le chlorure est un réactif très corrosif et il nécessite un bon contrôle des conditions d'oxydation afin d'atténuer cette contrainte. Ce qui explique son faible poids attribué au tableau 5.10.

Tableau 5.10: Vecteur propre normalisé de la comparaison binaire des alternatives pour la corrosivité

Les alternatives	VPN-Corrosivité		
Thiosulfate	29%		
Thiourée	14%	λ_{Max}	4,13
Chlorure	5%	IC	0,04
Iodure	52%	RC	4%

L'iodure apporte les meilleures conditions environnementales, ce réactif ne provoque aucun problème de toxicité ni de corrosivité. En deuxième position le thiosulfate se présente mieux sur les deux critères par rapport aux autres.

5.2.3.3 Critères techniques :

- *Faisabilité technologique*

La faisabilité technologie renferme plusieurs paramètres fortement liés comme l'existence d'un procédé éprouvé pour réaliser le projet, les conditions d'acquisition de la technologie, les types d'équipements nécessaires, etc. le tableau 5.11 présente les VPN des alternatives vis-à-vis la faisabilité technique.

Tableau 5.11: Vecteur propre normalisé de la comparaison binaire des alternatives pour la Faisabilité technologique

Les alternatives	VPN-Faisabilité technologique		
Thiosulfate	33%		
Thiourée	16%	λ_{Max}	4,14
Chlorure	46%	IC	0,05
Iodure	5%	RC	5%

- *Taux de lixiviation du réactif*

Le tableau 5.12 présente les VPN attribués aux alternatives pour le taux de lixiviation. Ce sous-critère est un élément clé dans la réussite de la lixiviation. Il présente la quantité des MP récupérés à la fin de la réaction, c'est pour cela que toutes les alternatives sélectionnées ont révélés des taux intéressants entre 85 et 98%. L'iodure a rendu les meilleurs taux (98%) suivie par le chlorure avec des taux de l'ordre de 95% dans les essais laboratoires présentés au chapitre 4.

Tableau 5.12: Vecteur propre normalisé de la comparaison binaire des alternatives pour le taux de lixiviation du réactif

Les alternatives	VPN-Taux de lixiviation du réactif		
Thiosulfate	15%		
Thiourée	6%	λ_{Max}	4,14
Chlorure	31%	IC	0,05
Iodure	49%	RC	5%

- *Degré de pureté des métaux récupérés*

Toutes les alternatives présentent des taux de lixiviation considérables. Cependant, la pureté du métal récupéré n'est pas évidente. Le tableau 5.13 illustre les VPN de degré de pureté attribués par alternatives. Le chlorure à la suite d'une double lixiviation permet d'obtenir une bonne sélection de métaux récupérés. Le degré de pureté implique ainsi le besoin (ou non) d'autres moyens ou réactions afin de purifier les métaux obtenus. Cela peut impliquer des coûts supplémentaires

Tableau 5.13: Vecteur propre normalisé de la comparaison binaire des alternatives pour le degré de pureté des MP récupérés

Les alternatives	VPN-Degré de pureté des MP		
Thiosulfate	6%		
Thiourée	14%	λ_{Max}	4,08
Chlorure	49%	IC	0,03
Iodure	31%	RC	3%

- *Vitesse de lixiviation du réactif*

La vitesse de lixiviation implique la durée totale de la réaction et détermine ainsi la quantité des cartes traitées dans un échelon de temps défini. La durée de la réaction, le taux de récupération et la vitesse de lixiviation sont en relation étroite. En effet, autant la vitesse est élevée, autant les taux de récupération sont meilleurs dans une courte durée. Tandis que pour les faibles vitesses, les taux de récupération n'atteignent pas leur maximum avant une longue durée pouvant dépasser 10 heures. Le tableau 5.14 présente les VPN des alternatives selon la vitesse de lixiviations.

Tableau 5.14: Vecteur propre normalisé de la comparaison binaire des alternatives pour la vitesse de lixiviation du réactif

Les alternatives	La vitesse de lixiviation		
Thiosulfate	6%		
Thiourée	12%	λ_{Max}	4,14
Chlorure	50%	IC	0,05
Iodure	32%	RC	5%

- *Recyclabilité de l'agent de lixiviation*

Le tableau 5.15 illustre les VPN selon le recyclabilités du réactif pour réutilisation.

Tableau 5. 15: Vecteur propre normalisé de la comparaison binaire des alternatives pour la recyclabilité de l'agent de lixiviation

Les alternatives	VPN-Recyclabilité		
Thiosulfate	11%		
Thiourée	7%	λ_{Max}	4,08
Chlorure	56%	IC	0,03
Iodure	26%	RC	3%

5.3. Présentation des résultats finaux et le choix de l'alternative de lixiviation hydrométallurgique

Une fois que les priorités de tous les critères sont déterminées, on passe au calcul du résultat d'évaluation pour chaque critère. On obtient alors, comme démontre le tableau 5.16, trois vecteurs globaux (VPG) qui indiquent l'impact du critère sur chacune des alternatives. Ensuite, on calcule le vecteur de priorité globale final (VPGF) attaché à chacune des solutions alternatives identifiées.

Pour calculer les VPG de chaque critère, on multiplie le VPN des alternatives de chaque sous-critère par VPN^{-1} du sous-critère.

De la même façon pour le VPGF, on multiplie les VPG trouvés de chaque critère par le VPN^{-1} du critère.

Tableau 5.16: les vecteurs propres globaux des critères et le vecteur propre global final des alternatives

Les alternatives	VPG- Critère économique	VPG- Critère technique	VPG- Critère environnemental	VPGF
VPN-critère	0,252	0,589	0,159	—
Thiosulfate	29%	18%	29%	22,52%
Thiourée	11%	11%	7%	10,62%
Chlorure	47%	43%	17%	40,19%
Iodure	12%	27%	48%	26,67%

Le VPGF présente le poids décisif de chaque alternative. On peut constater que la meilleure solution alternative qui accomplit les trois critères est le chlorure, avec une valeur d'importance de 49%.

Le Calcul des VPG a donné des résultats fidèles à l'analyse des VPN mais d'une façon plus décisive. En effet, pour le critère économique le chlorure prend l'avance avec le coût du réactif à prix réduit malgré le coût du traitement dispendieux. Pour le critère environnemental, l'iode et le thiosulfate présentent les meilleures solutions pour accomplir les conditions des réglementations environnementales. Finalement, pour le critère technique, le chlorure a regroupé la plupart sous-critères à poids important ce qui explique son poids de 43%. En plus le poids considérable du critère technique, explique ainsi le résultat final des VPGF.

Le ratio global de cohérence est la moyenne de tous les RC. Ceci a donné une valeur de 9% inférieur à 10%, donc les résultats globaux sont bien en cohérence.

5.4. Interprétation des résultats

Le chlorure selon plusieurs essais en laboratoire possède de bons taux de récupération des MP avec des qualités satisfaisantes pour la pureté des métaux dans des durées raisonnables. En plus, la possibilité du recyclage de réactif pour réutilisation en circuit fermé permet à la fois de diminuer énormément le coût du réactif et résoudre des problèmes environnementaux. Tous ces facteurs ont joué dans l'intérêt de cette alternative pour être choisis comme solution de lixiviation. Cependant, il est indispensable de maîtriser le dispositif de réaction chimique dans le but de contrôler la corrosivité élevée du réactif.

L'iodure présente une solution remarquable du côté environnemental. Ce réactif est connu pour ces bonnes propriétés non toxiques et non corrosives, du côté technique aussi, il présente des taux de récupération intéressants. Cependant, la seule contrainte qui présente un obstacle inévitable réside au coût dispendieux du réactif.

Le thiosulfate présente un score intermédiaire sur tous les niveaux. Économiquement, il est disponible selon des prix abordables. Il ne présente pas de problèmes toxiques majeurs et sur le plan technique il est satisfaisant. Ce qui explique son utilisation dans plusieurs secteurs.

La méthode AHP aide à prendre une décision en évaluant nombreuses alternatives quand il n'y a pas de solution parfaite. La solution trouvée reste proportionnelle aux choix attribués par les chercheurs. De légères modifications dans les conditions d'application peuvent provoquer une autre bonne solution pour les circonstances attachées. Donc, elle permet de concilier les aspects économiques, technologiques et environnementaux pour trouver la solution convenable pour une situation prédéfinie.

CONCLUSION GÉNÉRAL

L'objectif de cette recherche est le recyclage des cartes électroniques et la récupération des métaux précieux contenus dans les déchets des équipements de télécommunication. Cette étude a porté sur le choix de réactif de lixiviation de ces métaux à l'aide d'une application de la méthode AHP.

La revue de la littérature a permis en premier lieu de connaître les composantes des cartes électroniques et de les classer selon leurs richesses en métaux précieux. En deuxième lieu, une comparaison des deux voies de recyclage des DEEE : l'hydrométallurgie et le Pyrométallurgie permettant de découvrir l'importance de chaque procédé et les faiblesses à améliorer. Enfin, un aperçu des différents processus d'application de la méthode hydro et une étude approfondie sur les alternatives de lixiviation des MP.

L'application de la méthode AHP dans ce travail avec les données collectées a prouvé que le chlorure présente la meilleure candidature pour la lixiviation des MP. Ce réactif est disponible selon des coûts accessibles et il assure de bons taux de lixiviation.

Cette étude prend, pour le choix d'alternative, trois types de critères permettant ainsi d'étaler tous les aléas autour de ce projet de recyclage.

- Le critère économique présente la grandeur d'investissement dans ce projet.
- Le critère environnemental vérifie la conformité de la technologie avec les réglementations environnementales
- Le critère technique vérifie l'efficacité du réactif face à l'objectif et la faisabilité de réaliser le projet à l'échelle industriel

Résultats et contribution

Ce mémoire à comme contribution une étude des alternatives de la lixiviation des métaux précieux selon trois critères globaux, il permet ainsi de dévoiler le rangement de ces réactifs sur l'échelle de comparaison, ainsi que leurs points faibles ce qui peut servir à les améliorer et les éliminer dans des prochains essais.

Les résultats de cette étude montrent le potentiel de la récupération de l'or par la méthode hydrométallurgie en appliquant une double lixiviation et la possibilité de trouver le réactif qui peut être appliqué à l'échelle industrielle.

Limites et contraintes

Malgré l'envergure de ce projet, plusieurs points restent peu étudiés ou présentés dans la littérature comme

- Une classification explicite des DEEE, permet de spécifier la quantité de MP dans un équipement donné pour choisir les bonnes caractéristiques du réactif;
- Il n'y a pas d'études claires pour la toxicité et les coûts de traitement des alternatives;
- La faisabilité technologique à l'échelle industrielle est un point important peu développé;
- L'attribution des poids dans l'application AHP présente quelques limites au niveau du jugement.

Pistes de recherches futures

Après avoir choisi la meilleure alternative, une étude de design expérimental et un cahier de charge peuvent être réalisés pour passer à l'application du projet pilote. Une étude des paramètres de la réaction du réactif choisi est ainsi obligatoire.

La combinaison entre la voie hydrométallurgie et Pyrométallurgie est une solution peu étudiée dans la littérature et peu appliquée dans les essais laboratoire, mais elle peut être une alternative potentielle.

Une étude de marché pour la revente des produits provenant de recyclage est nécessaire avant de passer à l'application du projet de valorisation des DET afin d'assurer la rentabilité de l'investissement.

REFÉRENCE

- ADEME. (2008). Etat de l'art des technologies de recyclage de certains DEEE : PAM, tubes cathodiques, cartes et composants électroniques. 138-141.
- Agrawal, A., Catalini, C., & Goldfarb, A. (2015). Crowdfunding: Geography, social networks, and the timing of investment decisions. *Journal of Economics & Management Strategy*, 24(2), 253-274.
- Akcil, A., Erust, C., Gahan, C. S., Ozgun, M., Sahin, M., & Tuncuk, A. (2015). Precious metal recovery from waste printed circuit boards using cyanide and non-cyanide lixivants—a review. *Waste Management*, 45, 258-271.
- Aladeojebi, T. K. (2013). Planned obsolescence. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4(6), 1504-1508.
- Alzate, A., López, M. E., & Serna, C. (2016). Recovery of gold from waste electrical and electronic equipment (WEEE) using ammonium persulfate. *Waste Management*, 57, 113-120.
- Baldé, C., Wang, F., Kuehr, R., & Huisman, J. (2014). The global e-waste monitor. *United Nations University, IAS-SCYCLE, Bonn*.
- Behnamfard, A., Salarirad, M. M., & Veglio, F. (2013). Process development for recovery of copper and precious metals from waste printed circuit boards with emphasize on palladium and gold leaching and precipitation. *Waste Management*, 33(11), 2354-2363.
- Birloaga, I., De Michelis, I., Ferella, F., Buzatu, M., & Vegliò, F. (2013). Study on the influence of various factors in the hydrometallurgical processing of waste printed circuit boards for copper and gold recovery. *Waste Management*, 33(4), 935-941.
- Boliden sustainability report METALS FOR LONG-TERM VALUE CREATION 2017
- Chancerel, P. (2009). Substance flow analysis of the recycling of small waste electrical and electronic equipment.
- Chancerel, P. (2010). *Substance flow analysis of the recycling of small waste electrical and electronic equipment*: Universitätsverlag der TU Berlin.
- Cucchiella, F., D'Adamo, I., Koh, S. L., & Rosa, P. (2015). Recycling of WEEEs: An economic assessment of present and future e-waste streams. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 263-272.
- Cui, J., & Zhang, L. (2008). Metallurgical recovery of metals from electronic waste: a review. *Journal of Hazardous Materials*, 158(2-3), 228-256.

- Custer, R. L., Scarcella, J. A., & Stewart, B. R. (1999). The Modified Delphi Technique-A Rotational Modification. *Journal of vocational and technical education*, 15(2), 50-58.
- Deveci, H., & Ball, T. (2010). A visual insight into the oxidation of sulfide minerals during bioleaching and chemical leaching of a complex ore. *Mineral Processing & Extractive Metallurgy Review*, 31(3), 176-190.
- Environnement Canada 2004-2005 Rapport ministériel sur le rendement Stéphane Dion
Ministre de l'Environnement p94
- EPSC.ca - RAPPORT ÉCOCONCEPTION RPEC - Recyclage des produits électroniques
Canada 2017 RAPPORT ÉCOCONCEPTION
- Feng, D., & Van Deventer, J. (2002a). Leaching behaviour of sulphides in ammoniacal thiosulphate systems. *Hydrometallurgy*, 63(2), 189-200.
- Feng, D., & Van Deventer, J. (2002b). The role of heavy metal ions in gold dissolution in the ammoniacal thiosulphate system. *Hydrometallurgy*, 64(3), 231-246.
- Fleischmann, B., Meyr, H., & Wagner, M. (2005). Advanced planning. In *Supply chain management and advanced planning* (pp. 81-106): Springer.
- Geyer, R., & Jackson, T. (2004). Supply loops and their constraints: the industrial ecology of recycling and reuse. *California Management Review*, 46(2), 55-73.
- Gmünder, S. (2007). Recycling—from waste to resource. Assessment of optimal manual dismantling depth of a desktop PC in China based on eco-efficiency calculations. *Swiss Federal Institute of Technology (ETH) and Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research (EMPA), Zurich/St. Gallen, Switzerland*.
- Golev, A., Schmeda-Lopez, D. R., Smart, S. K., Corder, G. D., & McFarland, E. W. (2016). Where next on e-waste in Australia? *Waste Management*, 58, 348-358.
- Guide Jr, V. D. R. (2000). Production planning and control for remanufacturing: industry practice and research needs. *Journal of operations Management*, 18(4), 467-483.
- Ha, V. H., Lee, J.-c., Jeong, J., Hai, H. T., & Jha, M. K. (2010). Thiosulfate leaching of gold from waste mobile phones. *Journal of Hazardous Materials*, 178(1-3), 1115-1119.
- Habashi, M., Bonte, E., Galland, J., & Bodu, J. (1993). Quantitative measurements of the degree of exfoliation on aluminium alloys. *Corrosion science*, 35(1-4), 169-183.
- Havlik, T., Orac, D., Berwanger, M., & Maul, A. (2014). The effect of mechanical-physical pretreatment on hydrometallurgical extraction of copper and tin in residue from printed circuit boards from used consumer equipment. *Minerals Engineering*, 65, 163-171.
- Holgerson, S., Steenari, B.-M., Björkman, M., & Cullbrand, K. (2018). Analysis of the metal content of small-size Waste Electric and Electronic Equipment (WEEE)

printed circuit boards—part 1: internet routers, mobile phones and smartphones. *Resources, Conservation and Recycling*, 133, 300-308.

Huang, D. W., Sherman, B. T., Zheng, X., Yang, J., Imamichi, T., Stephens, R., & Lempicki, R. A. (2009). Extracting biological meaning from large gene lists with DAVID. *Current protocols in bioinformatics*, 27(1), 13.11. 11-13.11. 13.

Union internationale de communication
<https://www.ledevoir.com/societe/science/515339/rebus-electroniques>(consulté novembre 2018)

Université des nations unies https://www.rse-magazine.com/418-millions-de-tonnes-de-dechets-electroniques-en-2014_a1161.html(consulté novembre 2018)

Jadhav, U., & Hocheng, H. (2015). Hydrometallurgical recovery of metals from large printed circuit board pieces. *Scientific reports*, 5, 14574.

Jha, M. K., Lee, J.-c., Kumari, A., Choubey, P. K., Kumar, V., & Jeong, J. (2011). Pressure leaching of metals from waste printed circuit boards using sulfuric acid. *Jom*, 63(8), 29.

Jing-ying, L., Xiu-Li, X., & Wen-quan, L. (2012). Thiourea leaching gold and silver from the printed circuit boards of waste mobile phones. *Waste Management*, 32(6), 1209-1212.

Kamberović, Ž., Korać, M., & Ranitović, M. (2011). Hydrometallurgical process for extraction of metals from electronic waste, part II: Development of the processes for the recovery of copper from printed circuit boards (PCB). *Metallurgija*, 17(3), 139-149.

Kim, E.-y., Kim, M.-s., Lee, J.-c., Jeong, J., & Pandey, B. (2011). Leaching kinetics of copper from waste printed circuit boards by electro-generated chlorine in HCl solution. *Hydrometallurgy*, 107(3-4), 124-132.

Krikke, H. R. (1998). Recovery strategies and reverse logistic network design.

Ktari, B. (2018a). *Développement d'un modèle de prévision des quantités de déchets électroniques générés par le marché de télécommunication*. Université du Québec à Trois-Rivières,

Ktari, B. (2018b). *Développement d'un modèle de prévision des quantités de déchets électroniques générés par le marché de télécommunication*.

Lehoux, N., & Vallée, P. (2004). Analyse multicritères. *Ecole Polytechnique de Montréal: Montréal*.

Luyima, A., Shi, H., & Zhang, L. (2011). Leaching studies for metals recovery from waste printed wiring boards. *Jom*, 63(8), 38.

Mbarek ELBOUNJIMI, N. B. E. B. K. (2017). DÉVELOPPEMENT D'UNE CHAÎNE LOGISTIQUE INVERSE ÉCORESPONSABLE DE RÉCUPÉRATION ET DE

VALORISATION DES ÉQUIPEMENTS DE TÉLÉCOMMUNICATION EN
FIN DE VIE.

natureofinance <http://natureofinance.com/news/32-press-release/260-terranova-a-new-player-in-the-printed-circuit-board-recycling> (consulté octobre 2018)

Nnorom, I. C., & Osibanjo, O. (2010). Overview of prospects in adopting remanufacturing of end-of-life electronic products in the developing countries. *International Journal of Innovation, Management and Technology*, 1(3), 328.

Perez, R. (2016). PCB's and Why They Contain Gold.

planetoscope <https://www.planetoscope.com/sols/77-production-mondiale-de-pcb.html>(consulté novembre 2018)

Quinet, P., Proost, J., & Van Lierde, A. (2005). Recovery of precious metals from electronic scrap by hydrometallurgical processing routes. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 22(1), 17-22.

Recyc-Québec <https://recyclageinformatiquequebec.ca/recyclage-ordinateur-montreal/> (consulté novembre 2018)

Rocchetti, L., Vegliò, F., Kopacek, B., & Beolchini, F. (2013). Environmental impact assessment of hydrometallurgical processes for metal recovery from WEEE residues using a portable prototype plant. *Environmental science & technology*, 47(3), 1581-1588.

Saaty, T. L. (2013). Analytic hierarchy process. In *Encyclopedia of operations research and management science* (pp. 52-64): Springer.

Safarzadeh, M. S., Bafghi, M., Moradkhani, D., & Ilkhchi, M. O. (2007). A review on hydrometallurgical extraction and recovery of cadmium from various resources. *Minerals Engineering*, 20(3), 211-220.

Syed, S. (2006). A green technology for recovery of gold from non-metallic secondary sources. *Hydrometallurgy*, 82(1-2), 48-53.

Syed, S. (2012). Recovery of gold from secondary sources—a review. *Hydrometallurgy*, 115, 30-51.

Thierry, M., Salomon, M., Van Nunen, J., & Van Wassenhove, L. (1995). Strategic issues in product recovery management. *California Management Review*, 37(2), 114-136.

Thomas, C. (2016). Recyclage des cartes électroniques :

un aperçu de l'état de l'art. 57-62.

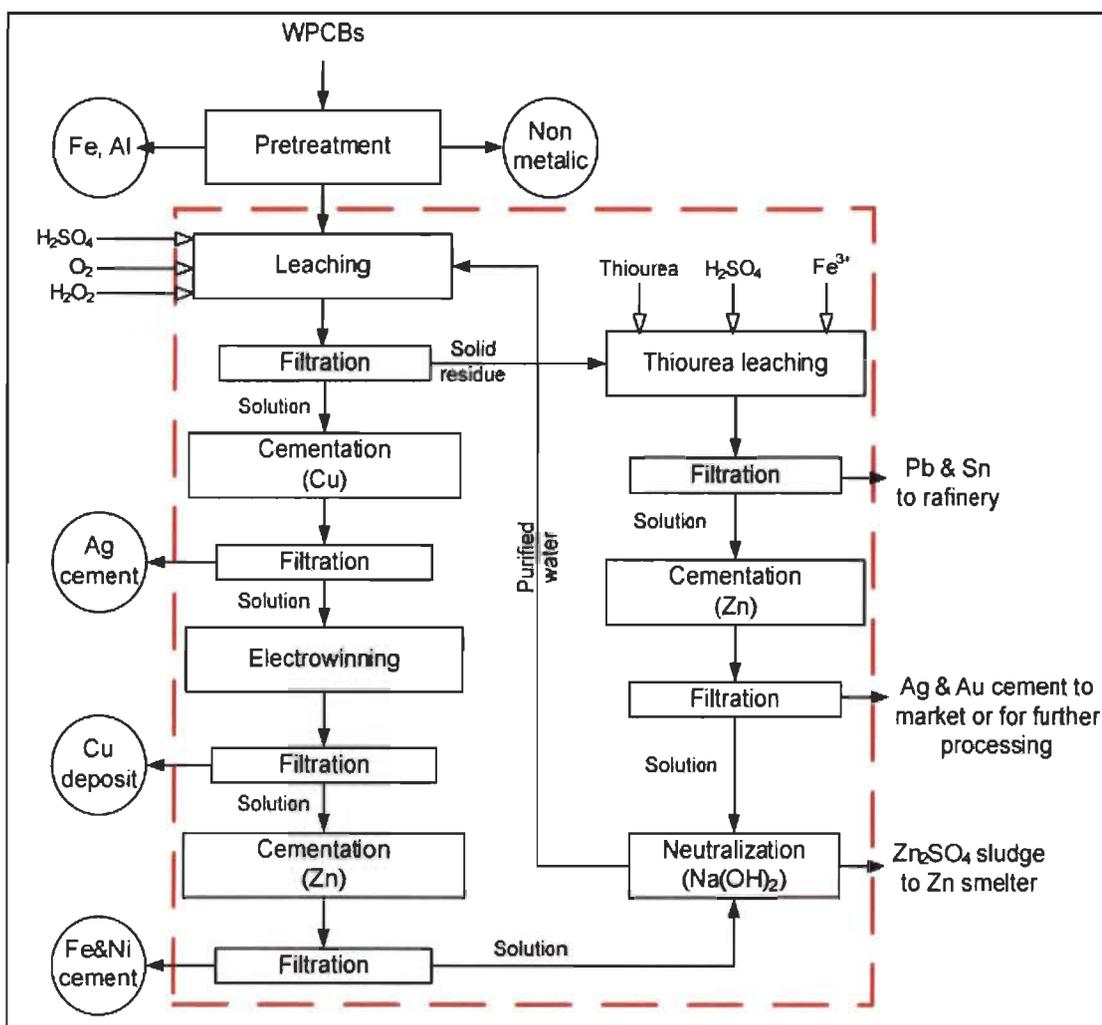
Tripathi, A., Kumar, M., Sau, D., Agrawal, A., Chakravarty, S., & Mankhand, T. (2012). Leaching of gold from the waste mobile phone printed circuit boards (PCBs) with

- ammonium thiosulphate. *International Journal of Metallurgical Engineering*, 1(2), 17-21.
- Tuncuk, A., Stazi, V., Akcil, A., Yazici, E. Y., & Deveci, H. (2012). Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: hydrometallurgy in recycling. *Minerals Engineering*, 25(1), 28-37.
- Wang, C., Zhao, W., Wang, J., Chen, L., & Luo, C.-j. (2016). An innovative approach to predict technology evolution for the desoldering of printed circuit boards: A perspective from China and America. *Waste Management & Research*, 34(6), 491-501.
- Xiu, F.-R., Qi, Y., & Zhang, F.-S. (2015). Leaching of Au, Ag, and Pd from waste printed circuit boards of mobile phone by iodide lixiviant after supercritical water pre-treatment. *Waste Management*, 41, 134-141.
- Xu, Q., Chen, D., Chen, L., & Huang, M. (2010). Gold leaching from waste printed circuit board by iodine process. *Nonferrous Metals*, 62(3), 88-90.
- Yamane, L. H., de Moraes, V. T., Espinosa, D. C. R., & Tenório, J. A. S. (2011). Recycling of WEEE: characterization of spent printed circuit boards from mobile phones and computers. *Waste Management*, 31(12), 2553-2558.
- Yang, X., Moats, M. S., Miller, J. D., Wang, X., Shi, X., & Xu, H. (2011). Thiourea-thiocyanate leaching system for gold. *Hydrometallurgy*, 106(1-2), 58-63.
- Yazıcı, E., Deveci, H., & Alp, I. (2009). Treatment of cyanide effluents by oxidation and adsorption in batch and column studies. *Journal of Hazardous Materials*, 166(2-3), 1362-1366.
- Yusuff, R. M., Yee, K. P., & Hashmi, M. (2001). A preliminary study on the potential use of the analytical hierarchical process (AHP) to predict advanced manufacturing technology (AMT) implementation. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 17(5), 421-427.
- Zagouras, N., Van Den Neucker, A., Nowe, S., Roland, J., Ansiau, C.-A., & Gossuin, A. (2017). Les métaux des télécommunications.
- Ziout, A., Azab, A., & Atwan, M. (2014). A holistic approach for decision on selection of end-of-life products recovery options. *Journal of cleaner production*, 65, 497-516.

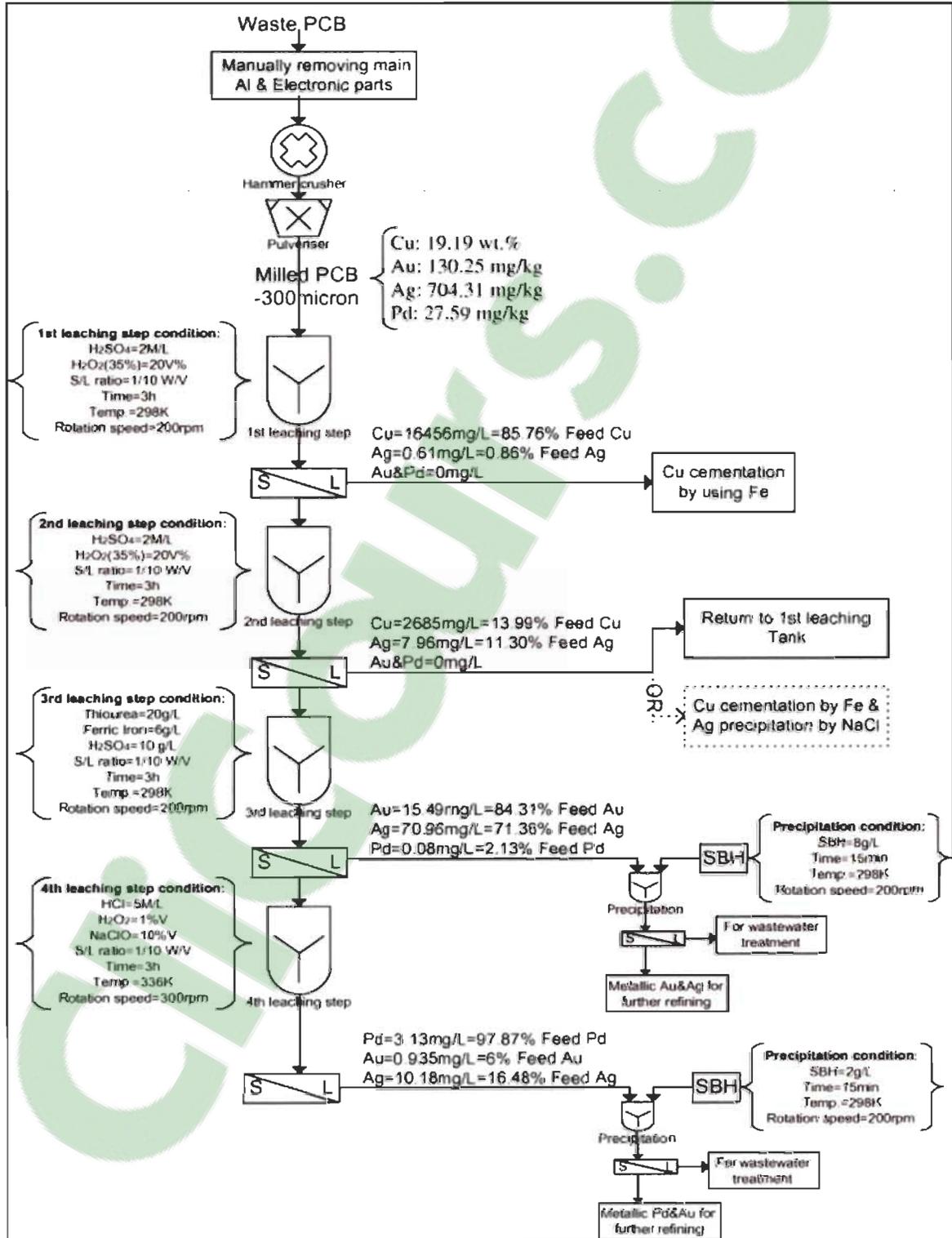
LES ANNEXES

ANNEXE 1 : PROTOCOLES D'HYDROMÉTALLURGIQUES

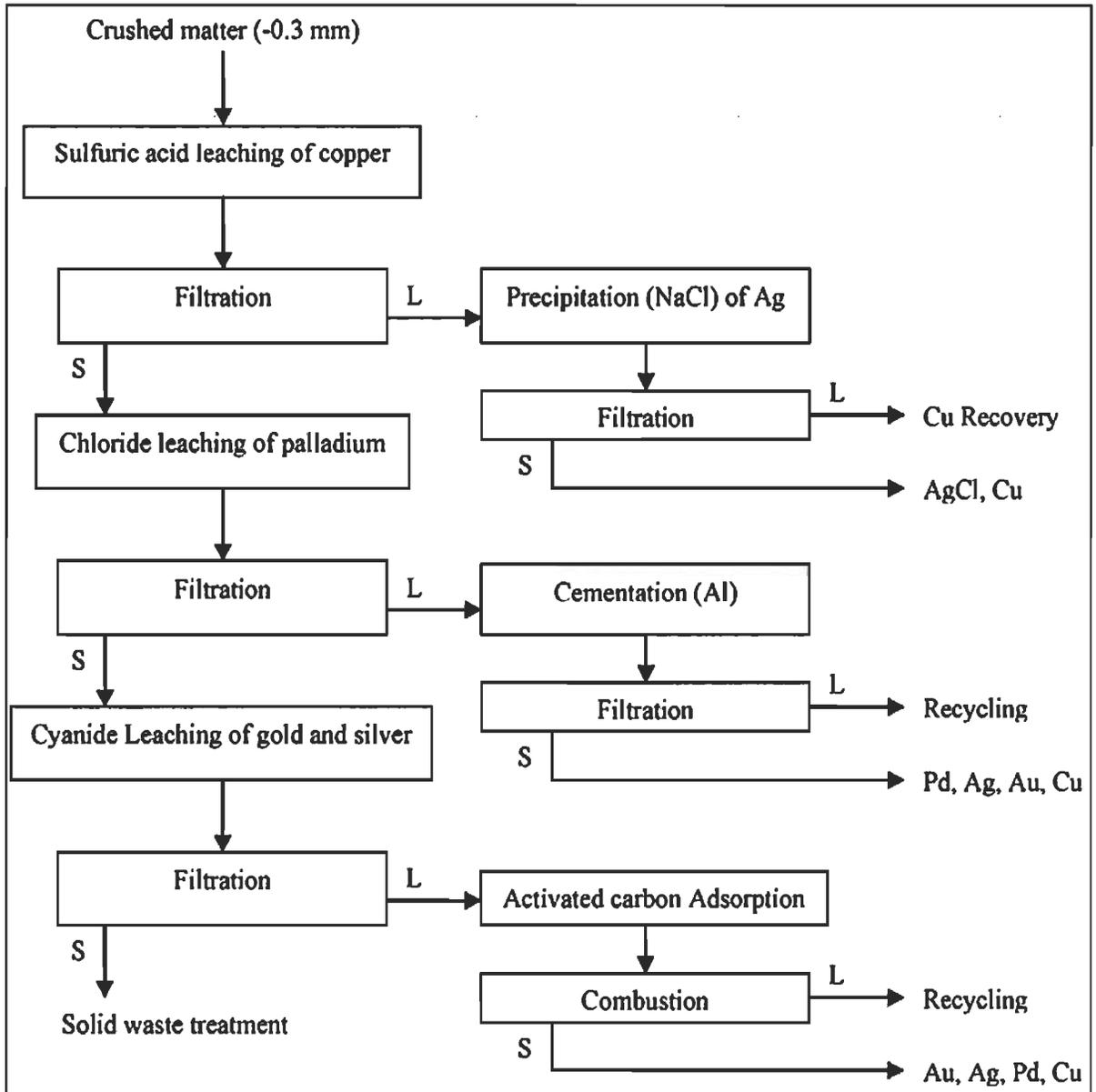
1. *Protocole hydrométallurgique développé par Kamberovic et al. (2011)*



2. Procédé hydrométallurgique développé par Behnamfard et al. (2013)

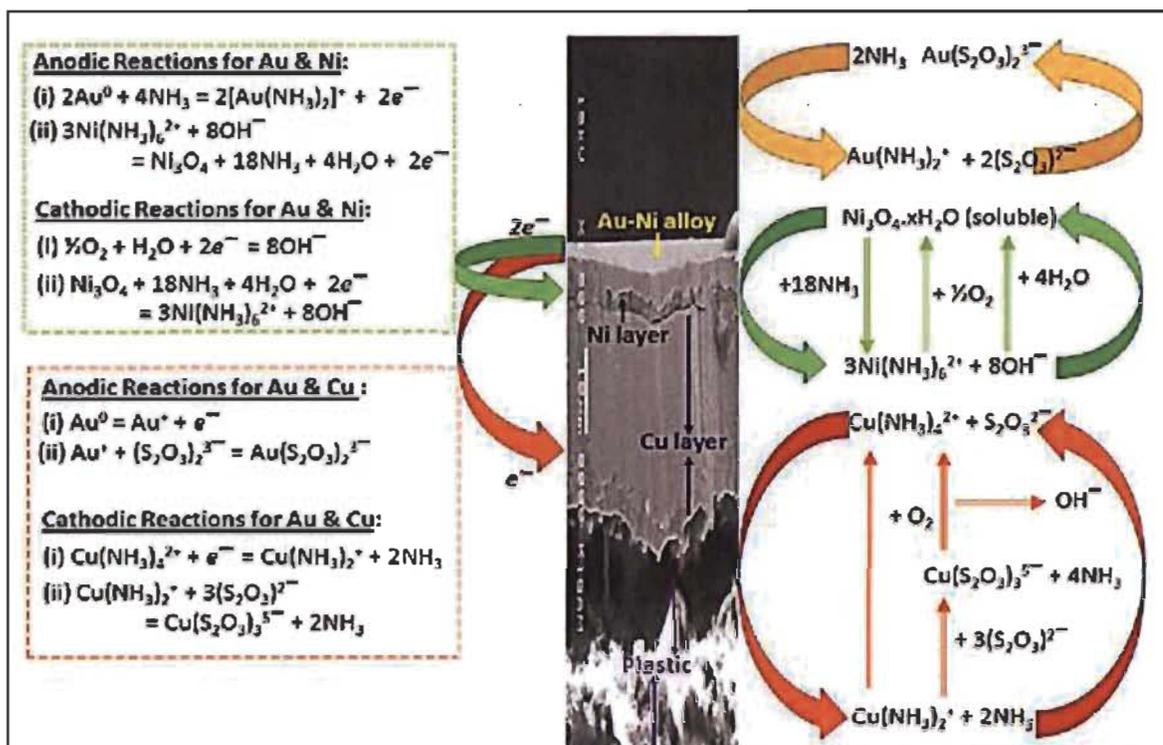


3. Procédé hydrométallurgique de recyclage des PCB de téléphone cellulaire (Quinet et al. (2005))

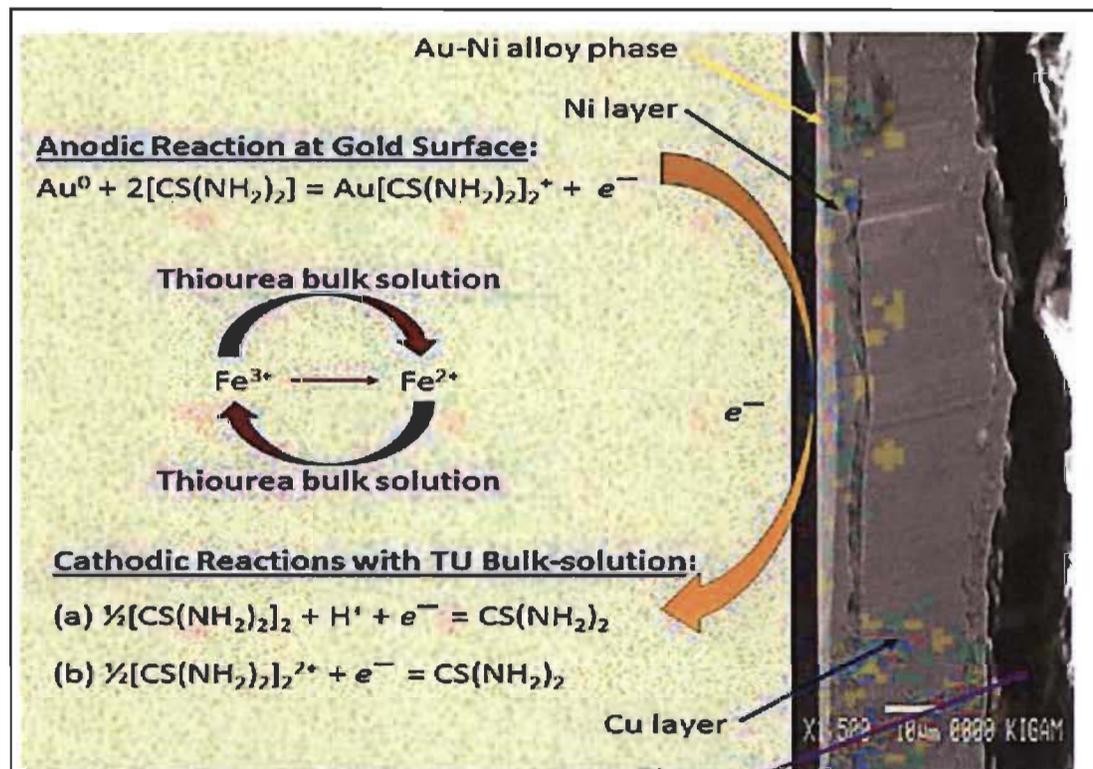


ANNEXE 2 : LA LIXIVIATION

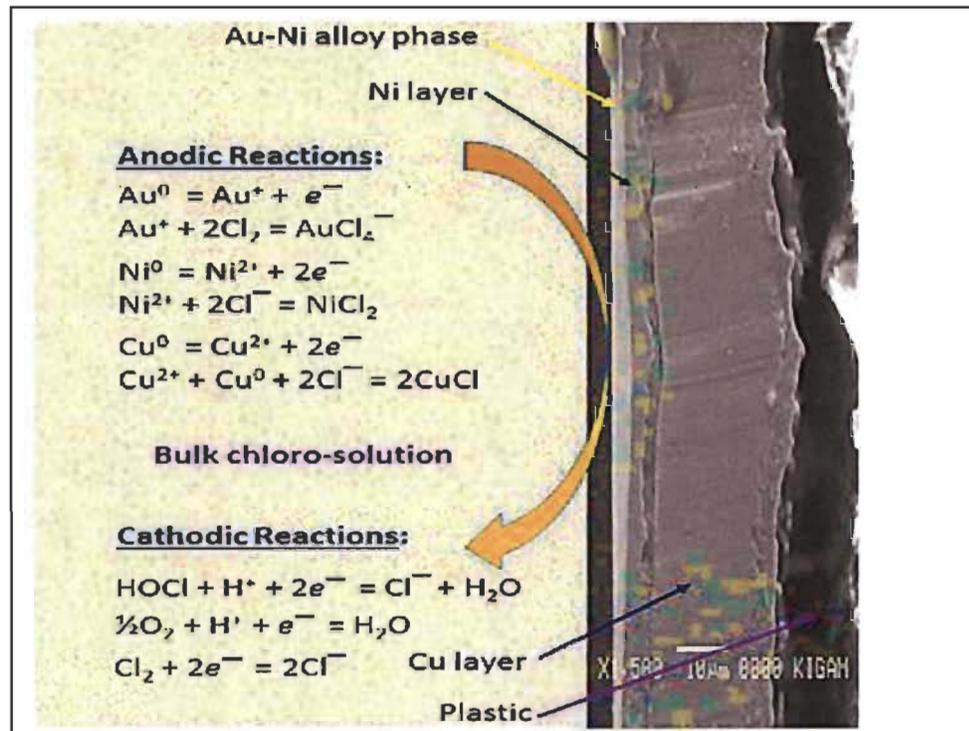
I. Mécanisme électrochimique de la lixiviation par le thiosulfate



2. Mécanisme électrochimique de la lixiviation par la thiourée



3. Mécanisme électrochimique de la lixiviation par les chlorures



ANNEXE 3 : L'APPLICATION DU AHP

1. Comparaison Critères

Tableau de comparaison : A	Critère économique	Critère technique	Critère environnemental
Critère économique	1	1/3	2
Critère technique	3	1	3
Critère environnemental	1/2	1/3	1
Somme	4,5	1,7	6,0

Tableau normalisé	Critère économique	Critère technique	Critère environnemental	Somme	VPN
Critère économique	0,22	0,20	0,33	0,76	25 %
Critère technique	0,67	0,60	0,50	1,77	59%
Critère environnemental	0,11	0,20	0,17	0,48	16%
Somme	1,00	1,00	1,00	3,00	100%

A * VPN	Critère économique	Critère technique	Critère environnemental	Somme	Somme /VPN
Critère économique	0,25	0,20	0,32	0,77	3,04
Critère technique	0,76	0,59	0,48	1,82	3,09
Critère environnemental	0,13	0,20	0,16	0,48	3,02
RC	4,65%	IC	0,03	λ_{Μαξ}	3,05

2. Comparaison sous-critère

- **Sous Critères Économiques**

Tableau de comparaison : A	Coût de lixiviation	Coût de traitement
Coût de lixiviation	1	5
Coût de traitement	1/5	1
Somme	1,200	6,000

Tableau Normalisé	Coût de lixiviation	Coût de traitement	Somme	VPN
Coût de lixiviation	0,83	0,83	1,67	83%
Coût de traitement	0,17	0,17	0,33	17%
Somme	1,000	1,000	2,00	100%

- **Sous Critères Environnementaux**

Tableau de comparaison : A	Toxicité	Corrosivité
Toxicité	1	7
Corrosivité	1/7	1
Somme	1,143	8,000

Tableau normalisé	Coût de lixiviation	Coût de traitement	Somme	VPN
Coût de lixiviation	0,88	0,88	1,75	88%
Coût de traitement	0,13	0,13	0,25	13%
Somme	1,000	1,000	2,00	100%

- **Sous Critères Techniques**

Tableau de comparaison : A	Faisabilité technologique	Taux de lixiviation	Vitesse de lixiviation	Recyclabilité	Degré de pureté
Faisabilité technologique	1	1	4	4	2
Taux de lixiviation	1	1	3	3	2
Vitesse de lixiviation	1/4	1/3	1	1/3	1/3
Recyclabilité	1/4	1/3	3	1	1/3
Degré de pureté	1/2	1/2	3	3	1
Somme	3,000	3,167	14,000	11,333	5,667

Tableau normalisé	Faisabilité technologique	Taux de lixiviation	Vitesse de lixiviation	Recyclabilité	Degré de pureté	Somme	VPN
Faisabilité technologique	0,333	0,316	0,286	0,353	0,353	1,641	33%
Taux de lixiviation	0,333	0,316	0,214	0,265	0,353	1,481	30%
Vitesse de lixiviation	0,083	0,105	0,071	0,029	0,059	0,348	7%
Recyclabilité	0,083	0,105	0,214	0,088	0,059	0,550	11%
Degré de pureté	0,167	0,158	0,214	0,265	0,176	0,980	20%
Somme	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	5,00	100%

A * VPN	Faisabilité technologique	Taux de lixiviation	Vitesse de lixiviation	Recyclabilité	Degré de pureté	Somme	SOM/VPN
Faisabilité technologique	0,328	0,296	0,279	0,440	0,392	1,735	5,287
Taux de lixiviation	0,328	0,296	0,209	0,330	0,392	1,555	5,251
Vitesse de lixiviation	0,082	0,099	0,070	0,037	0,065	0,352	5,060
Recyclabilité	0,082	0,099	0,209	0,110	0,065	0,565	5,137
Degré de pureté	0,164	0,148	0,209	0,330	0,196	1,047	5,342
RC	4,81%		IC	0,054		λ_{Max}	5,215

3. Comparaison des Alternatives

- **Économique**

- **Coût réactif de lixiviation**

Tableau de comparaison : A	Thiosulfate	Thiourée	Chloride	Iodide
Thiosulfate	1	4	1/2	8
Thiourée	1/4	1	1/5	5
Chloride	2	5	1	9
Iodide	1/8	1/5	1/9	1
Somme	3,375	10,200	1,811	23,000

Tableau normalisé	Thiosulfate	Thiourée	Chloride	Iodide	Somme	VPN
Thiosulfate	0,30	0,39	0,28	0,35	1,312	33%
Thiourée	0,07	0,10	0,11	0,22	0,500	12%
Chloride	0,59	0,49	0,55	0,39	2,026	51%
Iodide	0,04	0,02	0,06	0,04	0,161	4%
Somme	1,00	1,00	1,00	1,00	4,000	100%

A * VPN	Thiosulfate	Thiourée	Chlorure	Iodide	Somme	Som/VPN
Thiosulfate	0,328	0,500	0,253	0,323	1,404	4,28009264
Thiourée	0,082	0,125	0,101	0,202	0,510	4,08180742
Chlorure	0,656	0,625	0,507	0,363	2,151	4,24622484
Iodide	0,041	0,025	0,056	0,040	0,163	4,02941808
RC	5%	IC	0,05		λ_{Max}	4,16

➤ Coût de traitement environnemental

Tableau de comparaison : A	Thiosulfate	Thiourée	Chlorure	Iodide
Thiosulfate	1	3	1/4	1/5
Thiourée	1/3	1	1/6	1/7
Chlorure	4	6	1	1/3
Iodide	5	7	3	1
Somme	10,333	17,000	4,417	1,676

Tableau normalisé	Thiosulfate	Thiourée	Chlorure	Iodide	Somme	VPN
Thiosulfate	0,10	0,18	0,06	0,12	0,449	11%
Thiourée	0,03	0,06	0,04	0,09	0,214	5%
Chlorure	0,39	0,35	0,23	0,20	1,165	29%
Iodide	0,48	0,41	0,68	0,60	2,171	54%
Somme	1,00	1,00	1,00	1,00	4,000	1,000

A * VPN	Thiosulfate	Thiourée	Chlorure	Iodide	Somme	Somme./VPN
Thiosulfate	0,112	0,161	0,073	0,109	0,454	4,04510013
Thiourée	0,037	0,054	0,049	0,078	0,217	4,05614627
Chlorure	0,449	0,321	0,291	0,181	1,243	4,2650002
Iodide	0,561	0,375	0,874	0,543	2,353	4,3341886
RC	6%	IC	0,06		λ_{Max}	4,18

- **Technique**

- **Faisabilité technologique à grande échelle**

Tableau de comparaison : A	Thiosulfate	Thiourée	Chlorure	Iodide
Thiosulfate	1	3	1/2	7
Thiourée	1/3	1	1/3	5
Chlorure	2	3	1	7
Iodide	1/7	1/5	1/7	1
Somme	3,476	7,200	1,976	20,000

Tableau normalisé	Thiosulfate	Thiourée	Chlorure	Iodide	Somme	VPN
Thiosulfate	0,29	0,42	0,25	0,35	1,307	33%
Thiourée	0,10	0,14	0,17	0,25	0,653	16%
Chlorure	0,58	0,42	0,51	0,35	1,848	46%
Iodide	0,04	0,03	0,07	0,05	0,191	5%
Somme	1,00	1,00	1,00	1,00	4,000	1,000

A * VPN	Thiosulfate	Thiourée	Chlorure	Iodide	Somme	Som/VPN
Thiosulfate	0,327	0,490	0,231	0,335	1,382	4,22983023
Thiourée	0,109	0,163	0,154	0,239	0,665	4,07230275
Chlorure	0,654	0,490	0,462	0,335	1,940	4,19972692
Iodide	0,047	0,033	0,066	0,048	0,193	4,04169927
RC	5%	IC	0,05		λ_{Max}	4,14

➤ Taux de lixivité DU RÉACTIF

Tableau de comparaison : A	Thiosulfate	Thiourée	Chlorure	Iodide
Thiosulfate	1	4	1/3	1/4
Thiourée	1/4	1	1/5	1/6
Chlorure	3	5	1	1/2
Iodide	4	6	2	1
Somme	8,250	16,000	3,533	1,917

Tableau normalisé	Thiosulfate	Thiourée	Chlorure	Iodide	Somme	VPN
Thiosulfate	0,12	0,25	0,09	0,13	0,596	15%
Thiourée	0,03	0,06	0,06	0,09	0,236	6%
Chlorure	0,36	0,31	0,28	0,26	1,220	31%
Iodide	0,48	0,38	0,57	0,52	1,948	49%
Somme	1,00	1,00	1,00	1,00	4,000	100%

A * VPN	Thiosulfate	Thiourée	Chlorure	Iodide	Somme	Som/VPN
Thiosulfate	0,149	0,236	0,102	0,122	0,609	4,08569823
Thiourée	0,037	0,059	0,061	0,081	0,238	4,0360286
Chlorure	0,447	0,295	0,305	0,243	1,291	4,23238421
Iodide	0,596	0,355	0,610	0,487	2,047	4,20501869
RC	5%	IC	0,05		λ_{Max}	4,14

➤ Degré de pureté des métaux RÉCUPÉRÉS

Tableau de comparaison : A	Thiosulfate	Thiourée	Chlorure	Iodide
Thiosulfate	1	1/3	1/6	1/5
Thiourée	3	1	1/4	1/3
Chlorure	6	4	1	2
Iodide	5	3	1/2	1
Somme	15,000	8,333	1,917	3,533

Tableau normalisé	Thiosulfate	Thiourée	Chlorure	Iodide	Somme	VPN
Thiosulfate	0,07	0,04	0,09	0,06	0,250	6%
Thiourée	0,20	0,12	0,13	0,09	0,545	14%
Chlorure	0,40	0,48	0,52	0,57	1,968	49%
Iodide	0,33	0,36	0,26	0,28	1,237	31%
Somme	1,00	1,00	1,00	1,00	4,000	1,000

A * VPN	Thiosulfate	Thiourée	Chlorure	Iodide	Somme	Som/VPN
Thiosulfate	0,063	0,045	0,082	0,062	0,252	4,02524807
Thiourée	0,188	0,136	0,123	0,103	0,550	4,03801416
Chlorure	0,375	0,545	0,492	0,619	2,031	4,12784596
Iodide	0,313	0,409	0,246	0,309	1,277	4,12744777
RC	3%	IC	0,03		λ_{Max}	4,08

➤ Vitesse de lixiviation Du RÉACTIF

Tableau de comparaison : A	Thiosulfate	Thiourée	Chlorure	Iodide
Thiosulfate	1	1/3	1/6	1/5
Thiourée	3	1	1/5	1/4
Chlorure	6	5	1	2
Iodide	5	4	1/2	1
Somme	15,000	10,333	1,867	3,450

Tableau normalisé	Thiosulfate	Thiourée	Chlorure	Iodide	Somme	VPN
Thiosulfate	0,07	0,03	0,09	0,06	0,246	6%
Thiourée	0,20	0,10	0,11	0,07	0,476	12%
Chlorure	0,40	0,48	0,54	0,58	1,999	50%
Iodide	0,33	0,39	0,27	0,29	1,278	32%
Somme	1,00	1,00	1,00	1,00	4,000	1,000

A * VPN	Thiosulfate	Thiourée	Chlorure	Iodide	Somme	Som/VPN
Thiosulfate	0,062	0,040	0,083	0,064	0,248	4,03693857
Thiourée	0,185	0,119	0,100	0,080	0,484	4,06044866
Chlorure	0,369	0,595	0,500	0,639	2,104	4,2087692
Iodide	0,308	0,476	0,250	0,320	1,354	4,2360076
RC	5%	IC	0,05		λ_{Max}	4,14

➤ **Recyclabilité d'agent de lixiviation**

Tableau de comparaison : A	Thiosulfate	Thiourée	Chlorure	Iodide
Thiosulfate	1	2	1/5	1/3
Thiourée	1/2	1	1/6	1/4
Chlorure	5	6	1	3
Iodide	3	4	1/3	1
Somme	9,500	13,000	1,700	4,583

Tableau normalisé	Thiosulfate	Thiourée	Chlorure	Iodide	Somme	VPN
Thiosulfate	0,11	0,15	0,12	0,07	0,449	11%
Thiourée	0,05	0,08	0,10	0,05	0,282	7%
Chlorure	0,53	0,46	0,59	0,65	2,231	56%
Iodide	0,32	0,31	0,20	0,22	1,038	26%
Somme	1,00	1,00	1,00	1,00	4,000	1,000

A * VPN	Thiosulfate	Thiourée	Chlorure	Iodide	Somme	Som/VPN
Thiosulfate	0,112	0,141	0,112	0,086	0,451	4,01750616
Thiourée	0,056	0,071	0,093	0,065	0,285	4,0337842
Chlorure	0,562	0,423	0,558	0,778	2,321	4,16209522
Iodide	0,337	0,282	0,186	0,259	1,065	4,10342372
RC	3%	IC	0,03		λ_{Max}	4,08

- Environnemental

- Risque de Toxicité

Tableau de comparaison	Thiosulfate	Thiourée	Chlorure	Iodide
Thiosulfate	1	5	2	1/2
Thiourée	1/5	1	1/5	1/6
Chlorure	1/2	5	1	1/3
Iodide	2	6	3	1
Somme	3,700	17,000	6,200	2,000

Tableau normalisé	Thiosulfate	Thiourée	Chlorure	Iodide	Somme	VPN
Thiosulfate	0,27	0,29	0,32	0,25	1,137	28%
Thiourée	0,05	0,06	0,03	0,08	0,228	6%
Chlorure	0,14	0,29	0,16	0,17	0,757	19%
Iodide	0,54	0,35	0,48	0,50	1,877	47%
Somme	1,00	1,00	1,00	1,00	4,000	1,000

A * VPN	Thiosulfate	Thiourée	Chlorure	Iodide	Somme	Som/VPN
Thiosulfate	0,284	0,286	0,379	0,235	1,183	4,16230449
Thiourée	0,057	0,057	0,038	0,078	0,230	4,02766606
Chlorure	0,142	0,286	0,189	0,156	0,773	4,08582047
Iodide	0,568	0,343	0,568	0,469	1,948	4,15144851
RC	4%	IC	0,04		λ_{Max}	4,11

➤ Corrosivité

Tableau de comparaison	Thiosulfate	Thiourée	Chlorure	Iodide
Thiosulfate	1	3	5	1/2
Thiourée	1/3	1	4	1/5
Chlorure	1/5	1/4	1	1/7
Iodide	2	5	7	1
Somme	3,533	9,250	17,000	1,843

Tableau normalisé	Thiosulfate	Thiourée	Chlorure	Iodide	Somme	VPN
Thiosulfate	0,28	0,32	0,29	0,27	1,173	29%
Thiourée	0,09	0,11	0,24	0,11	0,546	14%
Chlorure	0,06	0,03	0,06	0,08	0,220	5%
Iodide	0,57	0,54	0,41	0,54	2,061	52%
Somme	1,00	1,00	1,00	1,00	4,000	1,000

A * VPN	Thiosulfate	Thiourée	Chlorure	Iodide	Somme	Som/VPN
Thiosulfate	0,293	0,410	0,275	0,258	1,235	4,21387565
Thiourée	0,098	0,137	0,220	0,103	0,557	4,08093055
Chlorure	0,059	0,034	0,055	0,074	0,221	4,02558201
Iodide	0,586	0,683	0,385	0,515	2,169	4,21047393
RC	4%	IC	0,04		λ_{Max}	4,13

4. VPG-ECONOMIQUE

VPN alternatives * VPN critères	Critères économiques		Vecteur priorité globale
	0,252		
	Coût de lixiviation	Coût de traitement	
	0,833	0,167	
Alternatives			
Thiosulfate	0,328	0,112	29%
Thiourée	0,125	0,054	11%
Chloride	0,507	0,291	47%
Iodide	0,040	0,543	12%
Somme	1,000	1,000	1,000

5.VPG- ENVIRONNEMENTAL

VPN alternatives * VPN critères	Critères environnementaux		Vecteur priorité globale
	0,159		
	Toxicité	Corrosivité	
	0,875	0,125	
Alternatives			
Thiosulfate	0,284	0,293	29%
Thiourée	0,057	0,137	7%
Chloride	0,189	0,055	17%
Iodide	0,469	0,515	48%
Somme	1,000	1,000	1,000

