

Rapport Bibliographique

Récupération de composants électroniques en vue de leur réemploi

Margaux ANNE

Spécialité Mécatronique - Parcours P4 - Master IRIV

Avril 2025



Contents

1	Introduction	3
2	Contexte : l'impact mondial des DEEE	3
2.1	Les DEEE : proportion	3
2.2	La gestion des DEEE dans les différentes régions du monde	4
2.3	L'évolution de la recherche scientifique sur les DEEEs	5
3	Le traitement actuel des DEEE	5
3.1	Recyclage orienté revalorisation	6
3.2	Récupération des composants	6
4	Focus sur les méthodes de récupération des ECs	7
4.1	Contraintes et enjeux de la récupération	8
4.2	Tri et identification	8
4.3	Dessoudage	8
4.3.1	Méthodes de dessoudage automatisables	10
4.3.2	Laser	10
4.3.3	Air chaud	10
4.3.4	Air chaud + tubes chauffants électriques	11
4.3.5	Chauffage infrarouge	11
4.3.6	Comparatif	12
4.4	Désassemblage	12
4.4.1	Système de désassemblage flexible	12
4.4.2	Système d'aspiration :	13
4.4.3	Pince à mâchoires parallèles	13
4.4.4	Les spécificités des micro-composants SMD	13
4.4.5	Système vibratoire	13
4.4.6	Comparatif des différentes méthodes de désassemblage	13
4.5	Test et qualification	14
4.5.1	Évaluation de la durée de vie	14
4.5.2	Test de bon fonctionnement	14
4.5.3	Vision et détection de défauts	15
4.6	Conclusion sur les méthodes de récupération des ECs	15
5	Quels composants cibler pour quels impacts ?	15
5.1	Impact économique et social	15
5.2	Impact environnemental	16
5.3	Impact des métaux critiques	17
5.4	Focus sur des composants ciblés	17
5.4.1	Les condensateurs	17
5.4.2	Etude global des ECs	18
6	De nouvelles perspectives pour les DEEE	18
6.1	Applications prometteuses	18
6.2	Vers une conception facilitant la récupération	18
6.2.1	Concevoir pour désassembler	18
6.2.2	Composants facilement démontables	19
6.3	Électronique verte et matériaux biodégradables	19
7	Conclusion	20

1 Introduction

Dans le cadre du développement de son activité R&D autour de l'éco-innovation et l'économie circulaire, le laboratoire LAIC du Département Systèmes du CEA-LETI à Grenoble propose un stage ayant comme objectif le développement d'un système automatisé de désassemblage et test de composants électroniques en vue de leur réemploi.

Aujourd'hui, beaucoup de déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) ne sont pas traités convenablement, ce qui engendre un rejet de leur matière toxique directement dans notre environnement. Outre les répercussions environnementales, ces rejets impactent également notre santé. Dans le meilleur des cas, les DEEE sont traités avec précaution vis-à-vis de leur dangerosité, mais cela se limite au recyclage sans exploitation du plein potentiel de ces déchets. À travers ce stage, l'objectif est d'étudier un système automatisé qui permettrait de récupérer les composants électroniques (EC) encore fonctionnels présents sur les cartes électroniques de ces objets numériques afin de leur donner une seconde vie et ainsi rallonger leur cycle de vie.

L'établissement d'un état de l'art permettra de définir les différentes thématiques liées à la récupération des ECs, notamment l'identification et le tri, le dessoudage, le désassemblage et les tests. Cette étude mettra par ailleurs en évidence les problématiques associées, telles que l'endommagement des composants ou leur fiabilité.

Le présent état de l'art s'organise autour de sept grandes parties. Nous commencerons par poser le contexte global pour mieux comprendre la place qu'occupent les DEEE dans le monde. Ensuite, nous nous intéresserons aux problématiques que posent ces déchets : comment ils sont traités aujourd'hui, quelles alternatives ont été testées, et où se situe notre travail là-dedans. Cette partie nous mènera naturellement aux contraintes que soulève la récupération de composants.

Nous passerons ensuite aux méthodes de récupération existantes, et aux étapes qu'elles demandent. Nous verrons qu'elles dépendent fortement du type de composants visés. C'est pour cela qu'une nouvelle partie sera dédiée à l'analyse des composants intéressants à récupérer. Nous discuterons alors des impacts de la récupération : économiques, sociétaux et environnementaux, de manière générale au niveau des DEEE, mais aussi de façon plus ciblée au niveau des ECs.

À partir de là, nous pourrons aborder les applications concrètes déjà mises en place dans le contexte de la récupération de composants. Cela nous permettra d'enchaîner naturellement sur les leviers possibles pour faciliter cette récupération, en explorant notamment de nouvelles approches de conception des cartes de circuits imprimés (PCB), comme l'intégration de matériaux biodégradables.

Enfin, nous conclurons cet état de l'art avec les perspectives offertes par cette étude et les manques encore présents dans la recherche actuelle.

2 Contexte : l'impact mondial des DEEE

2.1 Les DEEE : proportion

Les DEEE représentent environ 50 à 60 millions de tonnes (Mt), soit 8% des déchets mondiaux en 2004. Avec une croissance annuelle de 3 à 5%, les DEEEs devraient atteindre 75 Mt en 2030 ([3]). Parmi eux, on retrouve de nombreux composants rares, coûteux ou contenant des matières toxiques. La plupart sont encore fonctionnels et n'ont été utilisés qu'une partie de leur durée de vie. La plupart n'ont atteint qu'approximativement 5 % de leur durée de vie prévue ([28]). Aujourd'hui, seuls 30 % des déchets issus des cartes de circuits imprimés (WPCB) sont recyclés proprement, tandis que le reste finit dans des décharges ou mal recyclé ([15]). Ce domaine possède donc un important potentiel d'évolution. L'accès à certains métaux rares ou encore les crises (crises sanitaires, économiques ou guerre) impactent directement notre capacité à nous procurer des composants. Pouvoir les récupérer à partir de nos DEEE quotidiens pourrait donc représenter un atout économique, en plus d'un bénéfice environnemental, d'autant plus que l'urgence écologique pourrait, dans les années à venir, engendrer des restrictions qui rendraient cette démarche encore plus attractive.

2.2 La gestion des DEEE dans les différentes régions du monde

La surproduction de DEEE est devenue un problème urgent dans le monde entier. Ces derniers contiennent un grand nombre de composants qui peuvent avoir des effets nocifs sur l'environnement et les êtres humains. D'autre part, la manipulation sans précaution ainsi qu'un recyclage imprudent des DEEEs peuvent faire de ces derniers un problème de santé publique et environnemental à l'échelle mondiale. Ainsi, les pays à travers le monde se préoccupent de plus en plus de ce sujet, d'autant plus qu'en raison de leurs propriétés physiques, les DEEE sont parfaitement adaptés au recyclage et peuvent apporter des ressources rares lorsqu'ils sont recyclés.

L'article [37] introduit ces notions et présente l'investissement des régions du monde dans cette thématique. La figure 1 permet une bonne visualisation du nombre de publications qui ont été faites par chaque pays sur ce sujet de 1991 à juin 2022. L'analyse montre qu'un total de 74 pays/régions ont participé à l'étude de la récupération des WPCB, et que la Chine et l'Inde sont loin devant les autres pays du monde en termes de nombre de publications.

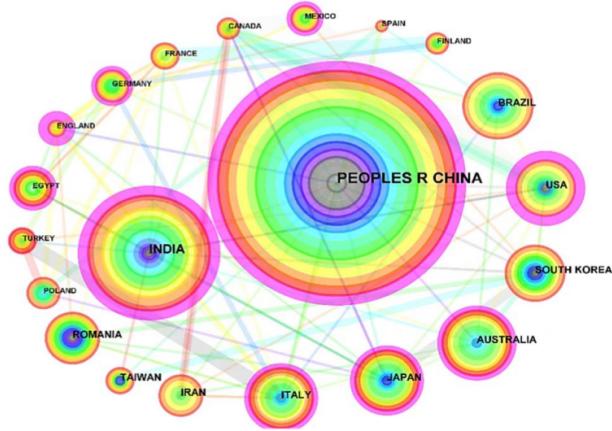


Figure 1: Analyse visuelle du réseau national d'études sur le traitement du recyclage des WPCB

La Chine, ayant reçu illégalement de grandes quantités de déchets électroniques des pays développés, a acquis de l'expérience en matière de recyclage. Le traitement des WPCBs a entraîné de graves impacts sur la santé et l'environnement, devenant un enjeu urgent qui l'a poussé à la mise en place de nombreuses lois et régulations afin de réduire la pollution générée lors du recyclage. Le recyclage des DEEE en Chine n'est pas convenablement réalisé, cette mauvaise gestion est dû à un manque de protection, à un recyclage manuel se concentrant sur la séparation des différents composants sans ménagement, à l'existence de zones de démantèlement, de mise en décharge et d'incinération en plein air provoquent énormément de pollution. En 2004, des échantillons d'eau de rivière de la ville de Guiyu ont révélé que la quantité de plomb relevée dans l'eau était 2 400 fois plus élevée que les recommandations de l'Organisation mondiale de la Santé pour l'eau potable et les échantillons de sédiments contenaient 212 fois plus de plomb que ce qui est considéré comme un déchet dangereux. Ainsi, la Chine est un exemple parmi d'autres révélant l'impact environnemental du mauvais traitement des DEEE et de l'urgence que cela représente ([37]).

En Inde, le recyclage des PCB est encore majoritairement entre les mains d'ateliers privés, qui emploient beaucoup d'enfants. Cela s'accompagne d'une pollution de plus en plus importante et de nombreux risques pour la santé liés au recyclage illégal des composants électroniques.

Si l'on s'intéresse à présent aux pays développés, les États-Unis, malgré un nombre limité de publications (4,19 % des articles), jouent un rôle central grâce à leurs normes industrielles comme le Responsible Recycling Certification.

L'Union européenne a mis en place des directives (DEEE, RoHS, PEF...) établissant des standards élevés en matière de recyclage, avec une responsabilité partagée entre consommateurs, fabricants et gouvernements.

Le Japon et la Corée du Sud ont aussi adopté des lois imposant la responsabilité des producteurs et des mesures strictes contre le recyclage illégal.

En clair, dans les pays en développement, le recyclage reste majoritairement informel, avec des procédés manuels, peu sûrs et polluants. Le manque de normes techniques, d'automatisation, et de tri efficace empêche la réutilisation optimale des composants précieux. Par contraste, les pays développés utilisent des technologies

avancées de tri et de démontage, mais ces techniques restent encore peu accessibles aux pays en voie de développement, en raison de leur coût élevé et de leur complexité. Ce dernier point limite fortement des pays comme la Chine ou l'Inde, qui disposent de peu d'entreprises qualifiées et automatisées. À cela s'ajoute un cadre réglementaire souvent incomplet ou inadapté. En bref, il devient urgent de développer des technologies de démontage durables pour les WPCBs dans les pays en développement d'Asie et d'Afrique ([37]).

2.3 L'évolution de la recherche scientifique sur les DEEEs

Comme nous avons pu le voir, la croissance inquiétante des DEEEs et leur mauvaise gestion de fin de vie entraîne une urgence mondiale qui est par ailleurs visible si l'on s'intéresse à l'évolution des articles et brevets scientifiques relatant cette thématique. L'article [23] recense de nombreux brevets classés en fonction du mode de recyclage des DEEE. On y retrouve également les graphiques de la figure 2 qui permettent de visualiser l'évolution de la quantité de brevets/articles publiés dans le domaine. Nous pouvons alors voir que la recherche est en plein essor depuis les années 2000 de manière globale. En revanche, si l'on se concentre uniquement sur la séparation et au retrait des composants électroniques, la tendance est moins favorable: les publications scientifiques dans ce domaine sont moins nombreuses et n'augmentent pas aussi nettement, ce qui laisse penser que ce champ reste encore peu exploré et mérite des recherches approfondies dans une optique de valorisation complète et durable.

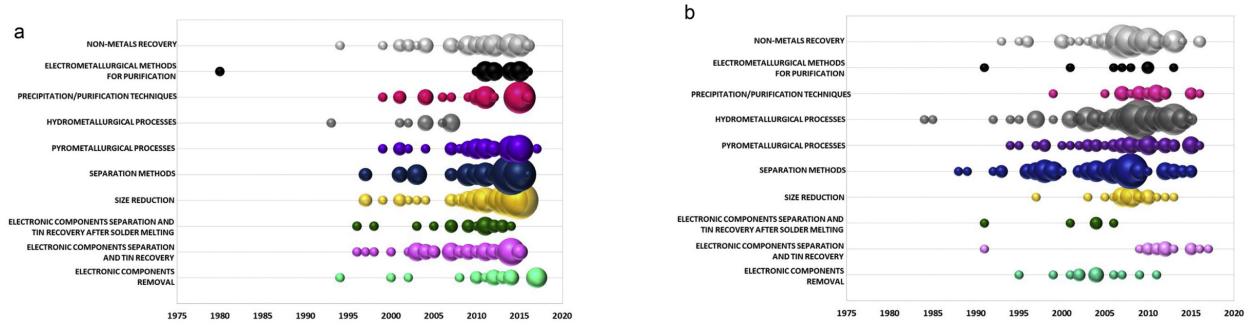


Figure 2: Comparaison entre l'évolution technologique (a) et scientifique (b) des procédés de valorisation des cartes électroniques en fin de vie.

3 Le traitement actuel des DEEE

Le démantèlement illégal des DEEE, notamment exportés vers des pays en développement, est souvent réalisé sans précaution, provoquant une grave pollution et des risques sanitaires majeurs, comme à Agbogbloshie. Environ 60% de nos DEEE échappent ainsi au traitement réglementé.([9])

À l'inverse, dans les centres de recyclage officiels, les déchets sont manipulés de manière plus sûre pour limiter la pollution, mais la priorité reste l'élimination plutôt que la revalorisation. Les WPCBs y sont généralement broyés sans tri préalable, rendant difficile la récupération des métaux rares pourtant stratégiques ([18]).

Approximativement 70% des WPCB sont composés d'une pièce électronique comprenant un PCB, avec plusieurs ECs montés sur la carte ([3]). Le PCB est principalement composé de cuivre et de résine époxy renforcée de fibres de verre. Les ECs eux, peuvent être des résistances, des transistors, des microcontrôleurs, etc. ([5]), qui contiennent surtout des métaux de base (Cu, Fe et Al), des métaux nobles (Au et Ag), des métaux rares (Se, Ge et Te) ainsi que des métaux toxiques (Pb, Cd, Hg et As). Ces métaux présentent un intérêt plus ou moins important selon leur rareté, leur complexité d'extraction ou encore leur composition. Leur traitement représente également un défi environnemental majeur en raison de la présence de substances toxiques ([18]).

Ainsi, un bon recyclage des WPCB nécessite le désassemblage des composants électroniques, afin qu'ils puissent être recyclés séparément de la carte nue. Ce principe de base est à la source de plusieurs démarches actuelles visant à traiter la fin de vie des DEEE.

En clair, la gestion des DEEE constitue un véritable défi à l'échelle mondiale. Le modèle actuel de production et de consommation, basé sur le schéma « extraire-fabriquer-jeter », n'est pas durable. Une réorientation vers une électronique circulaire et responsable devient indispensable, notamment face à la rareté

croissante des métaux rares critiques (CRM) et à la hausse exponentielle des déchets électroniques (e-waste) et des DEEE ([3]).

3.1 Recyclage orienté revalorisation

De plus en plus de recherches se concentrent sur le recyclage des DEEE, dans le but de proposer des solutions à la fois moins polluantes et plus valorisantes, tout en optimisant les méthodes de traitement. Les différentes méthodes de recyclage orienté revalorisation sont listées dans le tableau 1.

Méthode	Principe	Avantages	Inconvénients
Recyclage mécanique	Broyage et séparation physique des PCBs (tamis, aimants, flottation)	Simple, économique, rapide	Faible récupération des métaux précieux et des plastiques
Pyrométallurgie	Fusion à haute température pour séparer les métaux	Haute récupération des métaux, applicable à tout type de DEEE	Très énergivore, pollution importante, difficile pour certains métaux et plastiques
Hydrométallurgie	Lixiviation chimique suivie de l'extraction par précipitation ou électrolyse	Très sélective, efficace pour les métaux précieux, moins polluante que la pyrométallurgie	Coût élevé, émission de gaz de chlore dangereux
Biométallurgie	Utilisation de micro-organismes pour récupérer des métaux (Cu, Ni, Zn, Ag, Au)	Écologique, peu énergivore et peu coûteux	Lent, des fuites peuvent contaminer l'eau souterraine

Table 1: Méthodes de recyclage des PCB : comparatif des techniques ([7]), [11]

Le recyclage mécanique peut être considéré comme la meilleure alternative écologique parmi celles présentées dans le tableau 1, tout en étant plus facile à mettre en œuvre.

Détaillons davantage cette technique. Le recyclage physique comprend plusieurs étapes, illustrées à la figure 3 : le prétraitement, le concassage, la séparation, puis le raffinage ou la réutilisation.

Lors de la phase de broyage, des gaz toxiques peuvent être émis. Pour limiter leur impact, un système de refroidissement doit être mis en place, réduisant ainsi les risques pour l'environnement et la santé.

Dans l'article de [19], cette méthode est présentée. Elle consiste à broyer l'ensemble du PCB sans séparation préalable. Une fois une finesse acceptable atteinte, les poudres obtenues sont triées en fonction de leur densité et de leur taille, permettant ainsi de séparer les métaux ferreux des non-ferreux. Une fois cette séparation faite, l'extraction des métaux rares reste néanmoins compliquée.

3.2 Récupération des composants

Les méthodes de recyclage orientées vers la revalorisation présentées en amont posent un gros problème en termes de pollution et de capacité à revaloriser tous les matériaux. Ainsi, plusieurs articles proposent des solutions pour recycler les PCB de manière plus respectueuse et valorisante. L'approche susceptible de nous permettre d'atteindre les meilleurs objectifs en termes de revalorisation est alors la récupération en vue de la réutilisation. On retrouve par exemple, dans l'article [18], un procédé permettant de séparer les ECs des PCBs, ce qui facilite la revalorisation des métaux présents en faible quantité dans les composants.

La récupération pourrait alors nous permettre plusieurs choses :

- **Favoriser l'économie circulaire**

Un des grands objectifs de la récupération de composants est de pouvoir rallonger leur cycle de vie.

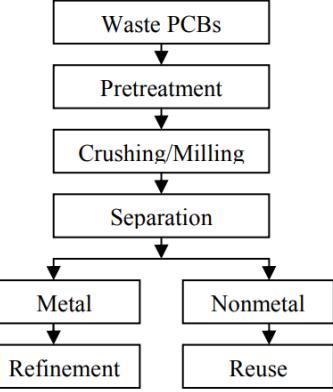


Figure 3: Processus de recyclage physique des PCBs

L'article [26] recense différents travaux afin de mettre en lumière les diverses études menées sur le sujet, ainsi que les impacts environnementaux potentiels associés. Des méthodes et outils permettant de quantifier et d'analyser ces incidences tout au long du cycle de vie sont ainsi abordés, dans le but de réaliser des analyses de cycle de vie (LCA).

- **Préserver des ressources critiques**

Certains matériaux rares sont présents dans les ECs ainsi pouvoir réutiliser ces derniers nous permettrait de réduire notre utilisation de CRM. La récupération est alors la meilleure alternative pour préserver les ressources critiques étant donné que le recyclage ne permettra pas une revalorisation à 100% ([14]).

- **Améliorer la résilience face aux crises**

Les équipements électroniques contiennent des matériaux rares tels que l'or, l'argent, le platine ou des éléments qui ne peuvent être trouvés que dans des pays politiquement instables [4]. Ainsi, notre production d'appareils électroniques peut être directement impactée par une crise ou une guerre. Pouvoir récupérer des composants, directement de nos DEEE, afin de les réutiliser sans avoir à en fabriquer de nouveaux, pourrait nous permettre de pallier cette dépendance.

- **Résoudre les problèmes d'approvisionnement :**

La récupération et la réutilisation pourraient également permettre de résoudre les problèmes d'obsolescence, de longs délais de livraison, de déchets électroniques et de pénuries de composants.

- **Réduction de la mortalité infantile**

Tout composant est associé à une courbe de probabilité de mortalité. On remarque alors que ces derniers font face à une hausse de leur probabilité de défaillance en début de vie, ce qui correspond à la mortalité infantile. Nous pouvons retrouver sur la figure 4 cette zone critique qui arrive au début de vie d'un composant.

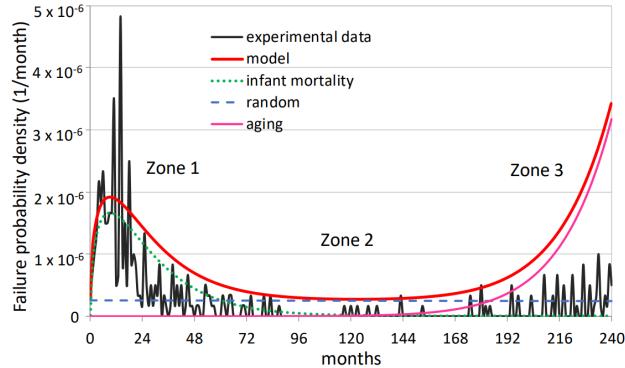


Figure 4: Taux de défaillance expérimental qui peut être subdivisé en trois zones : mortalité infantile (1), échec aléatoire (2) et vieillissement (3)

Cette zone nous intéresse vis-à-vis de la récupération de composants. En effet, le fait que le composant récupéré ait déjà survécu à la mortalité infantile augmente la fiabilité du composant utilisé par rapport à un composant neuf. En somme, si la récupération et la réutilisation d'un composant se déroulent bien, il pourrait ainsi devenir intéressant d'utiliser des composants de seconde vie [4].

4 Focus sur les méthodes de récupération des ECs

La récupération des ECs représente de nombreux challenges, nous pourrons les évoquer dans un premier temps avant d'aborder les différentes étapes qui constituent la récupération des ECs.

4.1 Contraintes et enjeux de la récupération

Les principaux défis incluent :

- **La traçabilité des composants :** Afin de pouvoir évaluer la durée de vie restante d'un composant, un simple test de bon fonctionnement n'est pas suffisant. Des informations sur ses conditions d'utilisation sont nécessaires pour estimer son état et pour pouvoir assurer une certaine fiabilité. Ainsi, la traçabilité des composants est primordiale si nous souhaitons étendre le marché de la récupération et de la réutilisation des ECs présents sur nos DEEE. L'article [1] présente une base de données et une application web permettant de retracer la vie d'ECs depuis leur fabrication jusqu'à leur recyclage. Ceci offre alors la possibilité de faire de meilleurs choix quant à la récupération et à la réutilisation des ECs. D'autres parts, la base de donnée donne également des informations sur le PCB en lui-même et permet de donner des informations sur les composants critiques (composés de matériaux dangereux ou rares) présents sur la carte. Ces informations pourraient alors être utilisées pour choisir quels composants sont à récupérer en priorité.
- **Estimer la durée de vie avant récupération du composant :** Un point important dans la réutilisation d'ECs est de pouvoir tester le composant afin d'estimer sa fiabilité. Les principales causes de vieillissement d'un EC viennent des températures auxquelles il a été exposé, des stress mécaniques ou chimiques qu'il a subis ou encore de son exposition à des vibrations, à la corrosion ou à l'humidité. Ainsi, des tests poussés ont pu être réalisés ([20]) dans le but d'étudier le fonctionnement d'un composant. Cette étude s'est basée sur la température du composant au cours de son utilisation à l'aide d'une caméra infrarouge. Grâce aux données récupérées, un algorithme de prédiction de la durée de vie restante d'un composant a été mis au point. Ces informations pourraient permettre le ciblage des composants intéressants à récupérer dans une optique de réutilisation.
- **La miniaturisation croissante :** L'évolution de l'électronique tend vers la conception et l'utilisation de composants de plus en plus petits. En termes de réutilisation, cette miniaturisation croissante a des répercussions. La manipulation de micro-composants exige une grande précision, une grande fiabilité et un rendement élevé. À cette échelle, les forces d'adhésion entre le composant et le préhenseur entraînent souvent le processus lors du relâchement, limitant ainsi les performances globales des systèmes conventionnels. L'article [25] introduit un système fonctionnel permettant la récupération et un relâchement sans problème de micro-composants dans l'objectif de leur réutilisation.
- **Manque de traçabilité, de normalisation et de structuration des chaînes de revalorisation**
L'absence de déclarations de qualité pour les composants récupérés, ou pour ceux dont la durée de vie est prolongée, freine leur réintégration. À cela s'ajoute le manque de normalisation dans la conception des systèmes pour faciliter leur désassemblage, ainsi qu'une structuration encore immature des infrastructures techniques et logistiques capables de prendre en charge la revalorisation de ces dispositifs ([20]).

4.2 Tri et identification

L'identification et le tri constituent une première étape essentielle dans la récupération de composants. L'identification permet de localiser les ECs, d'évaluer leur état, leur type, ou encore leur dangerosité ([6]). Le tri lui permet de choisir quel composant démanteler, dans quel ordre et avec quel outil.

Afin de mettre en place cette première étape, différentes approches sont utilisées. Les systèmes de vision par ordinateur, comme ceux décrits dans [11] et [6], s'appuient sur l'analyse de la forme, la couleur ou le marquage des composants, en les comparant à une base de données, afin d'identifier les éléments réutilisables ou sensibles. D'autres méthodes, plus avancées, s'appuient sur des réseaux de neurones comme les modèles YOLO. Ces derniers permettent de reconnaître automatiquement les composants, même à partir de peu d'exemples, grâce à l'apprentissage dit "few-shot" ([24], [16]). Enfin, une solution alternative consisterait à intégrer dès la conception de la carte un identifiant unique, donnant accès à toutes les informations utiles au démontage ou à la valorisation du PCB, comme le propose l'approche Passeport-PCB décrite dans [1].

4.3 Dessoudage

Suite à cette première étape, nous pouvons aborder le retrait à proprement parler des ECs de la carte. Cette phase combine généralement un dessoudage et un désassemblage. Ces deux étapes consisteraient d'une part à utiliser une source de chaleur pour faire fondre la brasure lors du dessoudage, et d'autre part à associer

cette opération à un système de récupération pour assurer le désassemblage ([17]). Nous nous intéresserons dans un premier temps aux méthodes de dessoudage indépendamment de celles de désassemblage.

Cette étape est critique dans le processus de récupération, car elle a un impact direct sur la qualité des ECs récupérés. La température doit être rigoureusement contrôlée afin d'éviter toute détérioration des ECs. De plus, la présence d'humidité doit être surveillée pour éviter le phénomène dit de "pop-corn" qui se produit lorsque l'eau piégée dans le matériau d'encapsulation se transforme en vapeur sous l'effet de la chaleur. Cette réaction provoque alors une déformation ou un soulèvement de la surface du composant empêchant sa revalorisation ([30]).

Le dessoudage des ECs a été largement étudié, avec d'une part des approches visant uniquement à séparer les composants de la carte, sans se soucier de leur état après récupération, et d'autre part des recherches orientées vers des méthodes plus douces pour préserver l'intégrité des ECs. L'article de [15] présente un éventail complet de ces techniques, illustré en figure 5.

Process	CAPEX	OPEX	Advantages	Drawbacks
Manual dismantling	+	++++	Easy to implement Selective disassembling	Hard manual work Requires manpower Slow process Polluting
Surface cutting knife	++	+	Non-polluting High disassembly rate	WPCBs are treated one by one
Crude heating	++	+	Large capacity	Toxic emissions Heat damage ECs
Infrared radiators	++	+	High disassembly rate	Small volumes Heat damage ECs
Hot air heating	++	++	High disassembly rate Little maintenance Non-polluting	Low accuracy control Low energy efficiency
Solder bath heating	++	+++	High disassembly rate	Difficult to automate Toxic fumes emissions Dangerous working conditions
Hot fluid heating	++	++	High disassembly rate High thermal efficiency High solder recovery rate	Generating toxic waste fluids and fumes
Heated centrifugation	++	++	High solder recovery rate Solder elements separation	High temperature Heat damage ECs
Solder dissolution	+	++	Selective process	Requires further treatments Hazardous chemicals used
Hydrothermal and supercritical fluids treatment	+++	++	Target metals or resin No toxic product released Reusable reagents	Cannot target solder Requires further dismantling treatments Need further dismantling process Hazardous chemicals used
Epoxy resin treatment	++	++	Recover functional circuits Chemicals can be recycled	
Robotic Dismantling	+++	+	Combined dismantling and sorting Low manpower	Low throughput
Fragmentation by high voltage electric pulse crusher	+++	++++	High capacity Non-polluting	Low energy efficiency Expensive initial investment

Figure 5: Méthodes de dessoudage

Certaines de ces méthodes sont néfastes pour l'environnement, comme le "solder bath heating" ou la "solder dissolution". D'autres peuvent endommager les composants : par exemple, la méthode dite "surface cutting knife", qui utilise une lame de coupe en surface, peut laisser les pattes des composants sur la carte, les rendant ainsi inutilisables.

Parmi les techniques listées, nous détaillerons celles qui semblent les plus en phase avec notre objectif : réduire l'impact environnemental des DEEE en maximisant la récupération et la revalorisation des composants fonctionnels.

Afin de dessouder les ECs nous nous intéresserons essentiellement aux méthodes de chauffe. Ainsi, pour dessouder les ECs d'une carte, il nous sera nécessaire d'atteindre une température au moins supérieure à la température de fusion de la brasure. Dans le but d'augmenter les performances de dessoudage, il est possible de jouer sur la méthode de chauffe ou encore sur la température de consigne. Le type de brasure utilisé a également un impact sur le résultat de notre dessoudage. L'étude [37] au sujet de la température à appliquer sur les composants a montré qu'au-delà de 250°C, une hausse de température n'améliore plus significativement la vitesse de fusion de la brasure. En revanche, des gaz toxiques peuvent apparaître dès 280°C. Ainsi, une

température trop élevée peut être néfaste en termes de pollution et risque par ailleurs d'endommager les ECs. Notre méthode de chauffe devra donc permettre une montée en température performante afin de permettre un dessoudage efficace tout en étant homogène pour éviter des pics de température qui pourraient endommager les ECs ou des zones trop froides qui ne permettraient pas un dessoudage performant. Par ailleurs, certains composants sont fixés à la fois par brasure et adhésif, ce qui nécessite une analyse précise des matériaux afin d'adapter le procédé de dessoudage, d'optimiser la récupération et de limiter l'impact environnemental.

4.3.1 Méthodes de dessoudage automatisables

Pour envisager une implémentation simple et efficace d'une station de dessoudage automatisée, il est essentiel d'analyser les différentes technologies disponibles selon leur performance thermique, leur accessibilité technique et leur impact sur la réutilisabilité des composants. Nous détaillerons ici les avantages et inconvénient identifié par plusieurs recherche ayant mis en application ces dernières.

4.3.2 Laser

Le dessoudage par laser offre une grande précision et une efficacité thermique notable [10].

Avantages :

- Très bon contrôle de la température
- Transfert thermique direct et localisé (temps de traitement très court)
- N'échauffe pas le corps des composants (faisceau laser focalisé sur les broches), préservant leur intégrité
- Convient à des formes et positions variées

Inconvénients :

- Mise en œuvre complexe et coûteuse
- Besoin de personnel qualifié pour l'ajustement des paramètres
- Technologie énergivore et dangereuse

Remarque : Idéal pour des stations hautement automatisées avec des objectifs de précision et de faible dégradation des composants, mais peu adapté à un prototype simple et économique. D'autre part, très peu d'articles détaillent cette application, ce qui rend l'appréciation de ce qui peut être fait difficile.

4.3.3 Air chaud

Le chauffage à air chaud reste une méthode simple, économique et répandue ([15]).

Avantages :

- Peu coûteux et facile à mettre en place
- Ne nécessite pas d'équipement complexe

Inconvénients :

- Chauffage lent et peu efficace pour les grandes surfaces
- Contrôle thermique limité (risques de surchauffe locale ou de sous-chauffe)

Remarque : Peut constituer une bonne base pour un prototype simple, mais nécessite des améliorations pour une homogénéité thermique optimale. L'article [13] présente par exemple une solution de chauffe permettant de contrôler l'homogénéité de la température dans le four.

4.3.4 Air chaud + tubes chauffants électriques

Cette méthode hybride améliore les performances du chauffage à air seul, tout en restant techniquement accessible. L'article [31] présente cette solution industrialisable qui permet le dessoudage des composants avec un chauffage à air chaud combiné à des tubes chauffants électriques. Cette solution est présentée en figure 6, où l'on retrouve un cylindre constitué de tuyaux chauffants dans un sas chauffé par air chaud. Le PCB est alors disposé dans ce cylindre afin d'effectuer son dessoudage. Une fois cette première étape accomplie, le PCB sort du cylindre tout en restant dans le sas chauffé à air chaud, afin d'être désassemblé tout en étant maintenu à une température suffisante dans le sas.

Avantages :

- Chauffage plus stable et homogène
- Adapté à un usage industriel
- Peut être combiné avec un système de filtration des gaz pour un meilleur respect de l'environnement et de la santé

Inconvénients :

- Système plus encombrant que l'air chaud seul
- Implémentation légèrement plus complexe (intégration des tubes + gestion des flux d'air et des fumées)

Remarque : Très bonne option pour une station automatisée à faible coût mais respectueuse de l'environnement.

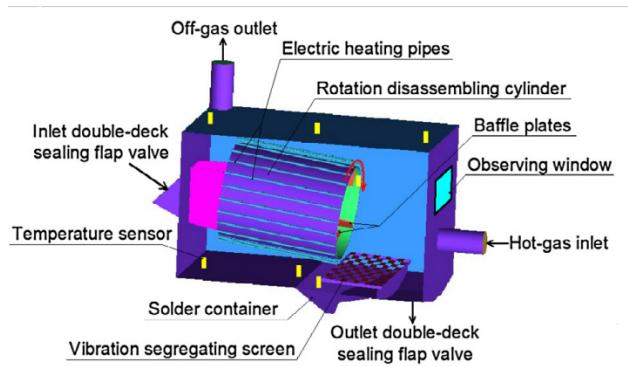


Figure 6: Structures (a) de la machine de désassemblage automatique ; (b) dispositif de purification des effluents gazeux

4.3.5 Chauffage infrarouge

Le chauffage par rayonnement infrarouge est une autre solution de dessoudage thermique sans contact [34].

Avantages :

- Chauffage rapide et sans contact
- Faible taux de détérioration des composants
- Peu d'entretien

Inconvénients :

- Chauffage souvent inégal (surtout en IR diffus)
- Nécessite l'utilisation de faisceaux IR focalisés pour de meilleurs résultats (laser)
- Peu adapté aux traitements de grands volumes [15]

Remarque : Technologie intermédiaire entre l'air chaud et le laser, elle peut convenir à des applications ciblées, mais reste difficile à intégrer dans une ligne continue à grand débit. À nouveau, très peu d'informations précises sont données concernant ce type d'application dans la littérature. Un test réalisé par nos soins devra être effectué en amont si nous choisissons cette solution de dessoudage.

4.3.6 Comparatif

Nous pouvons constater que les différentes méthodes ont des avantages et des inconvénients différents, et que le choix de la méthode de dessoudage appropriée en fonction des différents types de cartes est l'étape cruciale de la réutilisation des EC sur les WPCB ([37]). Le tableau 2 permet une bonne appréciation globale des enjeux pour chaque méthode.

Méthode	Coût	Performance thermique	Complexité	Réutilisabilité des ECs
Laser	Élevé	Excellent	Élevé	Excellent
Air chaud	Faible	Faible	Faible	Moyenne
Air chaud + tubes	Moyen	Bonne	Moyenne	Bonne
Infrarouge (IR diffus)	Moyen	Moyenne	Moyenne	Moyenne

Table 2: Comparatif des méthodes de dessoudage pour une station automatisée

Dans notre cas d'étude, la méthode laser est écartée en raison de la complexité qu'elle implique pour l'intégration. Les trois autres méthodes restent donc à envisager. La méthode à air chaud pourrait cependant s'avérer la plus intéressante si l'on parvient à obtenir un système de chauffe suffisamment homogène. Une étude plus poussée, appuyée par des tests, sera menée dans la suite du stage pour permettre de trancher entre ces trois options.

4.4 Désassemblage

Afin de procéder à la récupération des ECs, le dessoudage doit être combiné à un désassemblage. Plusieurs méthodes sont alors envisageables, le démantèlement mécanique (préhension, aspiration sous vide, vibration et impact), le démantèlement par jet de gaz et l'utilisation de la gravité, de la force centrifuge ou de cisaillement, etc. ([37]). Certaines de ces méthodes sont compatible avec une industrialisation et/ou permettent le retrait d'une variété de composants défini. Par rapport à ce dernier point, l'utilisation d'une force verticale serait par exemple plus efficace que l'utilisation d'une force horizontale lors de l'enlèvement des dispositifs traversant (THDs), tandis qu'une force horizontale serait plus efficace lors de l'enlèvement des dispositifs montés en surface (SMDs).

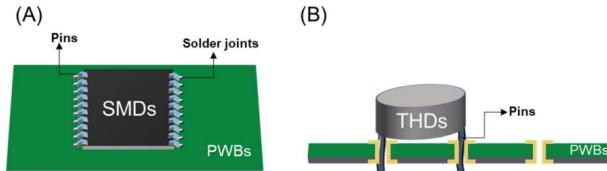


Figure 7: Les deux types de dispositifs pour les ECs : (A) SMD et (B) THD

D'autre part, au sein même d'un type de composant (THD vs SMD), le mécanisme utilisé peut grandement varier. Si nous nous intéressons aux SMDs, les plus petits composants ne demanderont pas les mêmes spécificités que les plus gros. Ainsi, la solution choisie peut en être fortement affectée. Similairement pour les THDs, si les broches du composant ne sont pas pliées, ce dernier peut être démonté avec une faible force ou accélération, et même se détacher de lui-même sans force extérieure, mais dans le cas de broches THD pliées, la force d'extraction nécessaire est plus importante et s'accentue avec l'augmentation de l'angle de pliage des broches ([33]). Ainsi, le bon désassemblage des composants va dépendre des composants présents sur la carte, de la méthode retenue et également de la méthode de dessoudage employée. Grâce à cet état de l'art, nous présenterons différentes méthodes de désassemblage qui ont pu être mises en place. Ces différents systèmes se basent sur le principe d'un pick and place inversé. Ainsi, ils seront associés à un système de vision ou autre permettant la localisation des composants ainsi que leur type dans certains cas.

4.4.1 Système de désassemblage flexible

Dans l'article [10], un système de désassemblage dit "flexible" est présenté. Par flexible, on entend la capacité à désassembler différents types de composants, sans se limiter à une seule catégorie ou taille. Cette

flexibilité est rendue possible grâce à l'utilisation d'un bras de robot industriel anthropomorphe, équipé d'outils de désassemblage spécifiques et interchangeables selon le composant à récupérer. Ainsi, pour chaque carte, une analyse est effectuée afin d'identifier les composants intéressants à récupérer. Ces composants sont ensuite regroupés en familles, ce qui permet de désassembler séquentiellement ceux nécessitant un préhenseur similaire.

Dans l'article [11] du même auteur, les composants sont dé-soudés par une technique laser dans le but d'être ensuite désassemblés par un robot industriel pouvant être équipé de pinces robotisées spéciale, permettant de retirer une grande variété de composants électroniques du circuit imprimé traité. Ce système est utilisé avec succès dans l'industrie depuis 2003.

4.4.2 Système d'aspiration :

Intéressons-nous à présent au système de désassemblage par aspiration. Dans l'article [6], un système de dessoudage à air chaud a été retenu, couplé à un dispositif de désassemblage par aspiration, le tout appliqué au retrait de composants SMD. Ce type de composant est dessoudé facilement et ne nécessite pas beaucoup de force pour être désassemblé. Ainsi, l'utilisation de l'aspiration est une solution simple et tout à fait adéquate à la situation.

4.4.3 Pince à mâchoires parallèles

Dans le même article que précédemment ([6]), l'utilisation d'une pince à mâchoires parallèles est présentée afin de retirer les composants THD. Cette fois, la méthode de chauffe associée est l'infrarouge. Pour les THDs, la difficulté va se trouver au retrait où la force appliquée va devoir être suffisante pour permettre le désassemblage ([33]). Ainsi, l'utilisation d'une pince à mâchoire parallèles va nous permettre de moduler la force en fonction du THDs et de l'inclinaison des pattes de ce dernier.

4.4.4 Les spécificités des micro-composants SMD

Comme nous avons pu le voir, le type d'EC a une directe incidence sur la méthode à employer pour le désassembler. Si nous nous intéressons au cas des composants SMD, la méthode employée ne fait pas intervenir les mêmes défis. Dans l'article [25], un système micro-préhenseur à vide intégrant un système de libération innovant est proposé afin de désassembler les plus petits SMD. Les micro-préhenseurs à vide sont couramment utilisés en électronique, principalement en raison de leur simplicité de fonctionnement, de leur fiabilité et de leur capacité à manipuler des composants fragiles. La spécificité de ce préhenseur à vide provient également du fait qu'il est équipé d'un système de libération permettant de faire tomber le composant une fois désassemblé. En effet, le simple effet d'arrêter l'aspiration ne permet pas la chute d'un composant de cette taille, qui est trop léger pour que l'effet de la gravité lui permette de tomber. D'autre part, en raison de la petitesse des composants à désassembler, des capteurs et un système de vision précis et performant sont nécessaires.

4.4.5 Système vibratoire

Lors de la présentation des méthodes de dessoudage, nous avons introduit une méthode reposant sur le chauffage à air chaud et à tubes chauffants électriques. Cette méthode, mise en œuvre dans l'article [31], est combinée à un système à "tamis vibrant de séparation" permettant le désassemblage des composants. Après dessoudage des composants, le PCB se retrouve positionné sur ce système vibratoire permettant la chute de la majorité des composants, seuls les petits composants traversants (S-PTH), tels que les résistances, les inductances, les diodes et les transistors, ne peuvent pas être démontés bien que toutes les brasures aient été retirées du circuit imprimé.

4.4.6 Comparatif des différentes méthodes de désassemblage

Le tableau ci-dessous permet de comparer les différentes méthodes évoquées précédemment. Au vu du temps dont nous disposons pour mettre en place une solution, nous écartons rapidement la technique de désassemblage flexible. En effet, pour le moment, nous allons nous concentrer sur un seul type de préhenseur pour le désassemblage. De même, nous ne souhaitons pas nous lancer dans la récupération de composants intégrés, qui entraînerait une complexité importante sans réel intérêt, notamment compte tenu de l'utilisation

de cartes principalement de puissance au sein du laboratoire. Ainsi, en fonction des composants ciblés pour la récupération, nous opterons pour une méthode à pince, à buse d'aspiration ou à vibration.

Technique	Application	Avantages	Inconvénients
Désassemblage flexible	Multi-composants	Très flexible, automatisable	Systèmes complexes et coûteux
Aspiration	Composants SMD	Simple, peu coûteux	Limité aux composants légers
Mâchoires parallèles	Composants THD	Retrait précis, force modulable	Moins adapté aux petits ECs
Micro-préhenseur à vide	Micro-SMD	Précis, adapté aux composants fragiles	Système complexe et coûteux
Système vibratoire	ECs variés	Rapide, automatisable	Inefficace pour certains ECs

Table 3: Résumé des techniques de désassemblage

4.5 Test et qualification

Finalement, la dernière phase dans notre processus de récupération d'ECs et celle de test de bon fonctionnement. Cette dernière thématique permet de vérifier que les composants n'ont pas été endommagés.

4.5.1 Évaluation de la durée de vie

Au sein d'un système, lorsque le produit arrive en fin de vie, les sous-systèmes ont des valeurs résiduelles différentes. La valeur résiduelle pour un composant électronique correspond à la valeur restante de ce dernier après un certain temps d'utilisation dans certaines conditions. Ainsi, afin de revaloriser chaque sous-système, il est primordial d'arriver à estimer cette valeur résiduelle. L'article [20], propose une étude permettant de l'estimer. Pour ce faire il introduit deux variables : Le taux de réutilisation R_{rate} , indiquant le nombre de fois où les composants peuvent être réutilisés successivement, ainsi que l'empreinte environnementale et le coût des processus de réutilisation qui lui-même regroupe trois autres critères, le nombre d'outils de démontage utilisés, le temps passé et l'énergie consommée en plus de l'estimation de l'empreinte environnementale. La valeur résiduelle peut alors être calculée lors de la phase de diagnostic, juste après la « dernière » utilisation.

Les principaux indicateurs permettant d'estimer la valeur résiduelle d'un composant sont les conditions d'utilisation de ce dernier, correspondant à la connaissance des contaminations, humidité, vibrations, température auxquelles il aurait pu être exposé. Afin d'avoir accès à ces informations, l'article [20] propose l'utilisation d'une caméra infrarouge, permettant d'avoir un visuel sur les températures que subissent les composants d'une carte.

Cette notion de traçabilité est également abordée dans l'article [1]. Celui-ci propose un système de traçabilité donnant accès à une base de données cloud regroupant des informations telles que la durée de vie moyenne d'un composant, son historique d'utilisation, son exposition à l'humidité ou encore les températures auxquelles il a été soumis. Ces données permettent ensuite d'évaluer sa fiabilité une fois le composant récupéré.

4.5.2 Test de bon fonctionnement

Afin de détecter les défauts d'un composant, les auteurs de l'article [12] ont appliqué des contraintes thermiques sur une puce préalablement extraite d'une carte électronique, puis réintégrée sur une nouvelle. L'objectif de cette démarche était d'analyser les caractéristiques du composant avant et après sollicitation. L'analyse menée comprenait notamment l'utilisation de rayons X, la mesure des composés intermétalliques, ainsi que la réalisation de tests fonctionnels sur les nouveaux dispositifs. Les résultats de l'étude ont ainsi démontré que les procédés de récupération, de reconditionnement et de réintégration permettent une remise sur le marché des ECs.

L'article [5] présente une méthode de test plus simplifiée, se concentrant uniquement sur des tests basiques de bon fonctionnement à un instant donné. Une table recense les critères de réutilisation des composants ainsi que les options de recyclage disponibles. Ces vérifications permettent de s'assurer que le composant est encore fonctionnel, mais elles restent peu robustes, car elles ne fournissent aucune information sur la fiabilité à long terme ni sur la valeur résiduelle du composant.

4.5.3 Vision et détection de défauts

Afin de vérifier si le composant n'a pas subi de déformation physique suite à son extraction de la carte, un système optique automatique (AOI) peut être utilisé comme présenté dans l'article [29]. Un logiciel de traitement d'images analyse tous les paramètres géométriques pertinents en trois dimensions pour évaluer la qualité des composants. L'établissement d'un modèle et de tolérances permet alors de juger de l'état du composant extrait.

4.6 Conclusion sur les méthodes de récupération des ECs

Nos quatre thématiques offrent chacune de nombreuses méthodes, plus ou moins adaptées à notre cas d'étude. Une vision globale de ces dernières permet de prendre conscience de l'étendue des recherches existantes et de la nécessité d'approfondir celles-ci afin d'aboutir à un système à la fois fiable et flexible. D'autres thématiques pourraient également apparaître dans un système complet, telles que des étapes de tri ou de remise en état des composants. L'article [35] présente notamment une structure de contrôle permettant de déterminer la meilleure stratégie de démantèlement du PCB.

Dans notre cas, la thématique de l'identification se limitera à une identification manuelle des composants, permettant de renseigner manuellement la position des composants que nous aurons choisis de récupérer. Cette partie ne sera donc pas automatisée. D'autre part, la phase de test, qui peut s'avérer complexe, sera restreinte à un test plus ou moins poussé des composants sans entrer dans une analyse trop approfondie. Concernant le dessoudage, trois solutions sont envisagées : le chauffage à air chaud simple, le chauffage hybride et le chauffage par IR. Des tests physiques devront être réalisés afin de déterminer la solution la plus adaptée. Enfin, pour le désassemblage, une solution sera sélectionnée après le choix des composants à extraire. En effet, notre objectif à terme serait de disposer d'un système modulable selon le composant ciblé, mais dans le cadre de notre étude actuelle, nous nous limiterons à un système capable d'extraire uniquement certains types de composants sans viser une séparation de l'entièreté des composants.

5 Quels composants cibler pour quels impacts ?

Afin de choisir une solution de désassemblage, il est nécessaire d'étudier quels composants seraient les plus intéressants à récupérer d'un point de vue économique, environnemental et sociétal.

5.1 Impact économique et social

Intéressons nous ici à la réutilisation des ECs dans leurs globalités. La récupération des ECs de nos DEEE pourrait avoir un impact économique et sociétal. En effet, l'article [5] présente une nouvelle industrie qui pourrait apparaître en Chine sous le nom de "Electronics Component Testing Industry". Cette apparition pourrait permettre une augmentation de l'emploi, les acheteurs auraient par ailleurs des prix sur leurs objets électroniques défectueux qui pourraient alors être rachetés par cette industrie. Cela pourrait donc créer un impact positif sur la situation économique des citoyens d'un pays puisque le montant total de l'argent qu'ils dépenseront pour des gadgets électroniques diminuera du fait que leurs produits auront toujours de la valeur pour être revendus à leur fin de vie. D'un point de vue de la santé, les risques seront aussi réduits du fait d'une meilleure gestion des déchets.

En Europe, l'article [3] montrent que selon des études, jusqu'à 50% des utilisateurs préféreraient utiliser des produits remis à neuf et que l'exploitation de ce potentiel grâce à de nouveaux modèles commerciaux pourrait générer de nouveaux emplois et renforcer l'économie (européenne) de 115 à 325 milliards d'euros supplémentaires.

L'article [31] présente un cas concret de récupération de composants électroniques. Une étude a été menée afin d'évaluer le coût de cette opération à l'aide du système proposé. En supposant que 16 tonnes de WPCB soient traitées par cette méthode, avec une puissance électrique de l'équipement de 50 kW, et en prenant en compte les coûts d'amortissement ainsi que la consommation d'énergie, le coût total a été estimé à environ 4,61 \$ par tonne de WPCB. De plus, ce procédé génère très peu de substances toxiques et n'a pratiquement aucun impact négatif sur la santé des travailleurs ni sur l'environnement. En somme, cette application a donné des résultats satisfaisants du point de vue environnemental, mais aussi économique, ce qui est encourageant pour la suite.

Si l'on se recentre à présent à l'échelle d'un composant ou d'un ensemble de composants présents sur une carte, l'estimation du coût va dépendre du nombre d'outils de désassemblage utilisés, du temps et de

l'énergie consommés. Ce coût doit alors être amorti par la remise sur le marché du composant. Des entreprises telles que *Retronix* ([21]) ou encore *Resale components*[22] ont par exemple réussi à trouver du profit dans ce système en ciblant leur récupération sur des composants spécifiques et en ayant un certain nombre de WPCB identique à démanteler. En clair, à l'échelle du stage, il nous est difficile de faire un choix vis-à-vis du coût de récupération étant donné la quantité de paramètre à considérer, néanmoins nous essayons de cibler des composants qui ont un certain coût d'achat, ce critère nous permet d'enlever les ECs qui ne serait pas pécuniairement rentable à revaloriser.

L'article [4] fait part d'une étude afin de quantifier le taux de défaillance d'un composant neuf et de seconde vie ainsi que le prix que pourraient avoir différents composants. Cette étude pourra être une bonne base pour la suite du projet.

5.2 Impact environnemental

En l'absence d'alternatives viables et d'options de recyclage, les DEEE mis au rebut risquent de finir dans des décharges. Ceci est un vrai problème environnemental étant donné que les substances dangereuses contenues dans les produits électroniques contaminent, entre autres, les eaux souterraines. Ainsi limiter cette fin de vie au maximum en démocratisant la récupération des ECs et le recyclage propre pourra nous permettre de reprendre le contrôle sur nos pollution lié à la fin de vie de nos équipements électroniques. L'article [27] défend ainsi ce paradigme et propose un modèle permettant de calculer le score de l'impact environnemental (EI) d'un produit et ce en identifiant les matériaux et leur quantité contenue par ce dernier. Le tableau 4 reprend les scores trouvés et permet de se rendre compte des différences d'EI que peuvent avoir les DEEE.

Product Name	Weight (oz)	Disassembly Time (mins)	Wt. of Hazardous Materials(oz)	EI Score(mpts)
Desktop	479.01	5:55	0.79	17247.93
Server	681.37	5:10	3.0688	41814.11
Flat Panel	208.87	11:25	0.2589	5249.54
Printer	221.08	14:00	0.1706	3290.49

Table 4: Score EI pour différents produits électroniques

Nous pouvons également retrouver dans le tableau ci-dessous les scores EI de certains matériaux. Il est alors possible de voir que l'or présente un score EI très élevé. Toutefois, son utilisation se limite à de très faibles quantités. Ainsi, les composants contenant de l'or ont un score élevé qui fluctue grandement en fonction de leur teneur d'or. Bien que cet élément soit crucial pour notre objectif de récupération, cela ne minimise pas l'importance d'autres composants, comme les condensateurs, qui sont souvent constitués de tantale et/ou d'aluminium en plus grande concentration. Ce facteur compense alors le score EI de ces deux matériaux qui sont bien inférieurs à l'or.

Matériaux	Utilisation typique	EI-99 (Pt/kg)
Aluminium (primaire)	Boîtiers, dissipateurs de chaleur	3,17
Tantale	Condensateurs	45
Cuivre	Fils, pistes de circuits imprimés	0,458
Or	Connecteurs, circuits intégrés	1290
Argent	Soudures, conducteurs haute performance	74
Étain	Soudure sans plomb	1,22
Plastique ABS	Boîtiers, connecteurs	0,09 - 0,15
Silicium	Puces électroniques, semi-conducteurs	0,21 - 0,35
Nickel	Alliages, batteries	2,73
Lithium	Batteries (Li-ion)	5,92
Cobalt	Batteries, alliages	11,76
Verre (fibre/verre simple)	Écrans, substrats PCB	~0,09

Table 5: Valeurs EI-99 de matériaux utilisés en électronique

5.3 Impact des métaux critiques

Si nous nous intéressons à présent aux CRMs nous pouvons comprendre que leur recyclage est très important. Nous retrouvons ainsi les différents enjeux qu'ils représentent ([11]):

- Atteindre les objectifs globaux de l'économie circulaire
- Réduire la charge toxique sur les sites d'extraction, de transformation et de fabrication, ainsi qu'autour de ces sites
- Minimiser la dégradation des sols, des habitats naturels et des conditions de vie, tant pour les êtres humains que pour les espèces animales et végétales en danger
- Réaliser des économies pour la fabrication (en tenant compte de la hausse des prix de la plupart des minéraux et des métaux)
- Réduire la dépendance à un approvisionnement permanent de ressources essentielles provenant de pays politiquement instables
- Soutenir les initiatives, résolutions et actions légales des Nations unies, de l'Union européenne, de l'OCDE et des gouvernements nationaux pour la préservation des ressources nationales et de l'énergie, tout en améliorant la protection de l'environnement

Ainsi, la récupération des composants contenant des CRM, tels que les condensateurs électrolytiques au tantale, représente un objectif conséquent.

5.4 Focus sur des composants ciblés

5.4.1 Les condensateurs

Présents sur n'importe quelle carte électronique, les condensateurs représentent un réel intérêt de récupération. Nous en trouvons de plusieurs types, comme les condensateurs céramiques multicouche (MLCC), les condensateurs électrolytiques au tantale (TECs) ou encore les condensateurs électrolytiques en aluminium (AECs).

Une analyse de cycle de vie complète (cradle-to-grave) menée en Chine ([36]), couvrant l'extraction des matières premières, la production, le transport, l'usage et la fin de vie, nous permet d'avoir une appréciation de l'impact des AECs et le potentiel que représente leur récupération.

- **Utilisation fréquente et fonctions multiples** : Les AECs sont largement utilisés dans les circuits électroniques pour le filtrage, le stockage d'énergie, le découplage et le lissage des signaux. Leur présence massive dans de nombreux dispositifs électroniques en fait une cible privilégiée pour la récupération.
- **Empreinte environnementale importante sur l'ensemble de leur cycle de vie** : Les principaux contributeurs identifiés selon la méthode ReCiPe2016 (introduite dans l'article [36]) sont la déplétion des ressources fossiles, le changement climatique et la formation d'ozone photochimique.

- La consommation totale d'énergie pour produire 100 000 AECs atteint 798 545 kWh, dont :
 - * 48,44 % pour la fabrication des feuilles d'anode,
 - * 26,58 % liés au courant d'ondulation,
 - * 23,67 % liés au courant de fuite.
- La production nécessite également 5130 kg de lingots d'aluminium, utilisés pour les feuilles d'anode et de cathode, ce qui représente :
 - * 12,6 % de la consommation de ressources fossiles,
 - * 14,3 % des émissions de gaz à effet de serre,
 - * 16,7 % de la formation de smog photochimique pour les AECs.

D'autre part, il est notable que la durée de vie d'un AEC est d'environ 10 ans.

Ce dernier point, qui pourrait être limitant dans une certaine mesure, n'existe pas pour les MLCCs et les TECs ce qui les rend attractifs à la récupération vis-à-vis de leur longévité intéressante. S'ajoute à cela que les TECs sont composés de tantale, ce qui accentue leur intérêt étant donné que c'est un CRM ([28]).

5.4.2 Etude global des ECs

La littérature sur l'impact de la récupération d'EC est très limitée. Des études sur les condensateurs ont pu être faites, mais ce n'est pas le cas pour la plupart des composants. Ainsi, le tableau ci-dessous recense les informations connues sur les composants les plus répandus afin d'avoir une idée générale de l'attractivité que peut représenter la récupération de différents composants.

Composant	Métaux précieux/ rares	Impact environnemental	Impact économique
Circuits intégrés (IC)	Or, cuivre, terres rares	Fabrication complexe, forte consommation d'énergie, production de déchets toxiques	Récupération rentable, nécessite tests fonctionnels. Remise à neuf pertinente en cas de crise d'approvisionnement
Capacités (condensateurs)	Aluminium, tantalum (métal critique)	Extraction du tantalum problématique (éthique/environnement), zones de conflit comme le Congo	Valeur dépendant du matériau. Très prisé en cas de pénurie (ex. crise COVID)
Inductances	Cuivre (en grande quantité), parfois ferrite	Production énergivore (fusion, traitement thermique)	Le cuivre a un prix de base élevé, récupération intéressante
Transistors	Silicium, germanium, parfois arsenic/gallium	Processus de fabrication high-tech, énergivore, production de déchets toxiques	Certains modèles (puissance/spécifiques) ont une forte valeur de revente
Résistances	Cuivre, étain, carbone, parfois matériaux fins exotiques	Faible impact individuel, mais significatif à grande échelle (production de masse)	Faible valeur unitaire, mais récupération possible en grande quantité

Table 6: Comparatif des composants électroniques selon leur composition, impact environnemental et économique

6 De nouvelles perspectives pour les DEEE

6.1 Applications prometteuses

À travers cet état de l'art, différentes applications ont pu être parcourues ([11], [25], [30], [13], [35], [10], [6], [12]).

Outre ces cas d'études, certaines entreprises se sont également spécialisées dans la récupération de composants spécifiques. *Retronix* favorise, par exemple, la réparation et la réutilisation de BGAs. Cette expertise permet à leur client de s'approvisionner en composants sans être impacté par un facteur lié à une crise ou à une pénurie, etc.([21])

Reuse Component rachète des jeux de WPCB afin de récupérer et revaloriser les composants présents sur les cartes. Ils offrent ainsi aux industriels la possibilité de gérer leurs DEEE de manière écoresponsable tout en créant un marché de revalorisation des composants de seconde vie. Leur démarche de récupération implique de s'adapter à chaque carte. Ainsi, un nombre minimal de cartes identiques est nécessaire afin de rentabiliser la démarche.

6.2 Vers une conception facilitant la récupération

6.2.1 Concevoir pour désassembler

De nos jours, nos appareils électroniques sont conçus pour être assemblés facilement sans égard pour le désassemblage. Or, si nous souhaitons nous orienter vers des objets électroniques plus durables, la conception doit être repensée. L'article [8] propose, par exemple, de diviser les systèmes électroniques en circuits plus

petits et de taille uniforme, nommés supports. Ces derniers seront ensuite empilés verticalement et assemblés à l'aide d'une nouvelle forme de connecteur démontable.

Cette façon de concevoir permettrait d'augmenter les possibilités de routage tout en séparant les différentes fonctions de la carte sur les différents niveaux. Cette technologie permettrait d'assembler et désassembler les supports simplement tout en permettant une meilleure réutilisation de ces derniers. En somme, le système décrit offrirait des avantages significatifs en termes de coûts de fabrication grâce à sa facilité d'assemblage, sa compacité et sa robustesse tout en facilitant la maintenance du produit et sa fin de vie.

6.2.2 Composants facilement démontables

Le désassemblage des composants des cartes est donc contraint par notre manière de concevoir les cartes. Le désassemblage actif (DA) pourrait nous permettre de rendre cette étape plus accessible, et cela, en incorporant des fixations et des éléments innovants pouvant réagir à un stimulus extérieur pour provoquer l'auto-démontage d'un produit. Après avoir réalisé différents tests, l'article [2] a pu démontrer que la méthode AD permet de réduire considérablement le temps de désassemblage et pourrait donc permettre de réduire considérablement le coût de ce processus et par suite rendre plus abordable la récupération des composants électronique.

Néanmoins, le DA représente certains challenges, comme l'expose cet article, [32]. Le coût de conception, par exemple, risque d'être augmenté dû à la faible quantité de documentation sur le sujet d'autant plus que l'investissement donné par le fabricant afin de simplifier le désassemblage ne lui sera pas redistribué étant donné que ce seront les plateformes de traitement des DEEE qui en bénéficieront. Une motivation pour le fabricant serait que l'utilisation de DA lui donne accès à davantage de possibilités de conception.

6.3 Électronique verte et matériaux biodégradables

Comme le présente l'article [3], réparer et réutiliser les DEEE est la meilleure méthode pour encourager l'électronique circulaire. Néanmoins, beaucoup de produits, comme les téléphones, sont rarement recyclés et plutôt entreposés. D'autre part, la miniaturisation des composants tend à rendre leur récupération et leur réutilisation plus complexes. Afin de pallier ces challenges, une solution pourrait être de rendre nos objets électroniques biodérivés et biodégradables pour permettre de réduire à zéro les WPCBs. Des progrès dans ce domaine pourraient également donner de nouvelles opportunités dans les domaines de l'agriculture et du médical. Dans l'article [3] plusieurs solutions sont abordées pour chaque partie d'un PCB, ce qui inclut substrats, conducteurs, diélectriques et semi-conducteurs. La fabrication de PCB biodégradable implique de nouvelles méthodes de fabrication. L'utilisation des technologies électroniques de fabrication additive ou d'impression est présentée comme des méthodes prometteuses. Plusieurs dispositifs biodégradables sont énoncés.

7 Conclusion

La récupération de composants électroniques est une démarche prometteuse pour réduire les impacts environnementaux des DEEE. Malgré certaines contraintes techniques, les perspectives sont nombreuses.

Néanmoins, l'analyse de la littérature met en évidence plusieurs points clés ([26]) :

- L'absence d'acteurs clairement identifiés dans les filières de démontage, ainsi que le manque d'études traitant de la réparabilité, du remanufacturage et du reconditionnement
- La difficulté de mettre en œuvre la réutilisation, principalement à cause des incertitudes liées à la fiabilité des composants et à la complexité du processus de démontage
- L'importance d'intégrer les principes de circularité dans les exigences d'éco-conception, ainsi que la nécessité de réaliser une analyse de cycle de vie (ACV) complète du produit
- Le besoin global de repenser le modèle économique actuel

Ainsi, dans les années à venir, une mobilisation plus importante autour de la gestion des DEEE, devenue un enjeu croissant, sera essentielle afin de combler les manquements actuels.

À l'échelle du stage, cet état de l'art nous a permis d'obtenir une vision globale des problématiques liées aux DEEE. Par ailleurs, nous avons pu explorer les différentes initiatives déjà engagées en matière de systèmes automatisés pour la récupération de ECs. Nous pouvons cependant relever le peu d'informations détaillées pour les différents systèmes mis en place. Ce manque d'informations a rendu notre étude complexe et nous demandera des tests supplémentaires afin d'avoir plus d'informations sur l'intégration des différentes solutions.

D'un point de vue organisationnel, nous avons fait le choix de recentrer notre travail sur les thématiques de dessoudage et de désassemblage, en ciblant un jeu de cartes électroniques spécifique et un ensemble de composants bien définis. Suite à ce choix nous avons pu identifier les composants présentant un intérêt particulier pour la récupération.

Les perspectives pour la suite du stage sont donc les suivantes : identifier des cartes électroniques pertinentes afin de cibler les composants à fort potentiel de récupération, puis sélectionner la méthode de dessoudage et de désassemblage la plus adaptée. Un protocole de test de bon fonctionnement des ECs pourra ensuite être envisagé, selon le temps restant.

En somme, les objectifs du stage s'orientent vers la mise en place d'un banc flexible de récupération et de test des ECs, dans une optique de revalorisation maximale. Cette démarche pourrait permettre au CEA de réutiliser des composants récupérés sur des rebuts pour des prototypes. Elle marque aussi un pas vers le développement d'une dynamique autour de la récupération d'EC. L'objectif pour le laboratoire sera ensuite d'affiner les protocoles de test afin de garantir la fiabilité des composants récupérés. Ce projet s'inscrit pleinement dans le contexte du marché naissant de la revalorisation des déchets électroniques.

References

- [1] Simone Capecci et al. "Cloud-based system for waste electrical and electronic equipment". In: *2017 13th Workshop on Intelligent Solutions in Embedded Systems (WISES)* (June 2017), pp. 41–46. DOI: 10.1109/WISES.2017.7986930. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7986930> (visited on 03/20/2025).
- [2] John Carrell et al. "Disassembly efficiency improvements with active disassembly technologies". In: *Proceedings of the 2011 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology* (May 2011). ISSN: 2378-7260, pp. 1–1. DOI: 10.1109/ISSST.2011.5936880. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5936880> (visited on 03/20/2025).
- [3] Moupali Chakraborty, Jeff Kettle, and Ravinder Dahiya. "Electronic Waste Reduction Through Devices and Printed Circuit Boards Designed for Circularity". en. In: *IEEE Journal on Flexible Electronics* 1.1 (Jan. 2022), pp. 4–23. ISSN: 2768-167X. DOI: 10.1109/JFLEX.2022.3159258. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9733886/> (visited on 03/05/2025).
- [4] Massimo Conti and Simone Orcioni. "Modeling of Failure Probability for Reliability and Component Reuse of Electric and Electronic Equipment". en. In: *Energies* 13.11 (June 2020), p. 2843. ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en13112843. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/11/2843> (visited on 03/05/2025).
- [5] Biswajit Debnath, Priyankar Roychowdhury, and Rayan Kundu. "Electronic Components (EC) Reuse and Recycling – A New Approach towards WEEE Management". en. In: *Procedia Environmental Sciences* 35 (2016), pp. 656–668. ISSN: 18780296. DOI: 10.1016/j.proenv.2016.07.060. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1878029616301499> (visited on 03/05/2025).
- [6] K. Feldmann and H. Scheller. "Disassembly of electronic products". In: *Proceedings of 1994 IEEE International Symposium on Electronics and The Environment* (May 1994), pp. 81–86. DOI: 10.1109/ISEE.1994.337291. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/337291> (visited on 03/20/2025).
- [7] Monika Gupta et al. "Metal Recovery from E-Waste by Recycling Techniques: A Review". In: *2022 8th International Conference on Smart Structures and Systems (ICSSS)*. Apr. 2022, pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICSSS54381.2022.9782219. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9782219> (visited on 03/12/2025).
- [8] D.M. Holburn et al. "A novel architecture to facilitate disassembly and reuse of electronic components and sub-assemblies". In: *International Conference on Clean Electronics Products and Technology, 1995. (CONCEPT)* (Oct. 1995). ISSN: 0537-9989, pp. 214–217. DOI: 10.1049/cp:19951187. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/492018/?arnumber=492018> (visited on 03/12/2025).
- [9] jf caron. *France5Le monde en face Déchets électroniques, le grand détournement 19 023 2019*. Apr. 2019. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=uZI99xZDVkg> (visited on 04/07/2025).
- [10] R. Knoth et al. "Automated disassembly of electr(on)ic equipment". In: *Conference Record 2002 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment (Cat. No.02CH37273)* (May 2002). ISSN: 1095-2020, pp. 290–294. DOI: 10.1109/ISEE.2002.1003282. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1003282> (visited on 03/18/2025).
- [11] Bernd Kopacek. "Intelligent disassembly of components from printed circuit boards to enable re-use and more efficient recovery of critical metals". en. In: *2016 Electronics Goes Green 2016+ (EGG)* (Sept. 2016), pp. 1–8. DOI: 10.1109/EGG.2016.7829842. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7829842/> (visited on 03/05/2025).
- [12] Marek Koscielski et al. "Recovery of valuable BGA components from used electronic mobile devices and their application in new electronic products". In: *2019 22nd European Microelectronics and Packaging Conference & Exhibition (EMPC)* (Sept. 2019), pp. 1–5. DOI: 10.23919/EMPC44848.2019.8951884. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8951884> (visited on 03/20/2025).
- [13] Wa Layiding et al. "Disassembling approaches and quality assurance of electronic components mounted on PCBs". In: *Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, 2005.* (May 2005). ISSN: 2378-7260, pp. 116–120. DOI: 10.1109/ISEE.2005.1437004. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1437004> (visited on 03/12/2025).

- [14] Marco Marconi et al. “A Collaborative End of Life platform to Favour the Reuse of Electronic Components”. en. In: *Procedia CIRP* 61 (2017), pp. 166–171. ISSN: 22128271. DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.169. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827116313294> (visited on 03/05/2025).
- [15] Ange A. Maurice et al. “Dismantling of Printed Circuit Boards Enabling Electronic Components Sorting and Their Subsequent Treatment Open Improved Elemental Sustainability Opportunities”. en. In: *Sustainability* 13.18 (Sept. 2021), p. 10357. ISSN: 2071-1050. DOI: 10.3390/su131810357. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/18/10357> (visited on 03/05/2025).
- [16] Muhammad Mohsin et al. “Deep Learning-Powered Computer Vision System for Selective Disassembly of Waste Printed Circuit Boards”. In: *2024 IEEE 8th Forum on Research and Technologies for Society and Industry Innovation (RTSI)* (Sept. 2024). ISSN: 2687-6817, pp. 115–119. DOI: 10.1109/RTSI61910.2024.10761364. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10761364> (visited on 03/12/2025).
- [17] Giacomo Palmieri et al. “Automated Disassembly of Electronic Components: Feasibility and Technical Implementation”. en. In: *Volume 4: 23rd Design for Manufacturing and the Life Cycle Conference; 12th International Conference on Micro- and Nanosystems* (Aug. 2018), V004T05A006. DOI: 10.1115/DETC2018-85302. URL: <https://asmedigitalcollection.asme.org/IDETC-CIE/proceedings/IDETC-CIE2018/51791/Quebec%20City,%20Quebec,%20Canada/275051> (visited on 03/12/2025).
- [18] Seungsoo Park et al. “Apparatus for electronic component disassembly from printed circuit board assembly in e-wastes”. en. In: *International Journal of Mineral Processing* 144 (Nov. 2015), pp. 11–15. ISSN: 03017516. DOI: 10.1016/j.minpro.2015.09.013. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301751615300302> (visited on 03/05/2025).
- [19] Mou Peng et al. “A physical process for recycling and reusing waste printed circuit boards”. In: *IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, 2004. Conference Record. 2004* (May 2004). ISSN: 1095-2020, pp. 237–242. DOI: 10.1109/ISEE.2004.1299722. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1299722> (visited on 03/18/2025).
- [20] Boubakr Rahmani et al. “Design for Reuse: residual value monitoring of power electronics’ components”. en. In: *Procedia CIRP* 109 (2022), pp. 140–145. ISSN: 22128271. DOI: 10.1016/j.procir.2022.05.227. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827122006758> (visited on 03/05/2025).
- [21] *Récupération de composants électroniques - Retronix Europe*. fr-FR. URL: <https://retronixeurope.com/recuperation-composants/> (visited on 03/11/2025).
- [22] *Resale components*. fr-FR. URL: <https://resalecomponents.com/> (visited on 04/24/2025).
- [23] Laura Rocchetti, Alessia Amato, and Francesca Beolchini. “Printed circuit board recycling: A patent review”. en. In: *Journal of Cleaner Production* 178 (Mar. 2018), pp. 814–832. ISSN: 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.01.076. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652618300842> (visited on 04/14/2025).
- [24] Allana Rocha, Bruno Fernandes, and Leandro Honorato. “Evaluation of Deep Learning Model for Detecting Electronic Components in Few-Shot Learning Scenarios”. In: *2023 IEEE Latin American Conference on Computational Intelligence (LA-CCI)* (Oct. 2023). ISSN: 2769-7622, pp. 1–6. DOI: 10.1109/LA-CCI58595.2023.10409312. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10409312> (visited on 03/11/2025).
- [25] S. Ruggeri et al. “Micro-robotic Handling Solutions for PCB (re-)Manufacturing”. en. In: *Procedia Manufacturing* 11 (2017), pp. 441–448. ISSN: 23519789. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.132. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2351978917303360> (visited on 03/05/2025).
- [26] Florentin Salomez et al. “State of the Art of Research towards Sustainable Power Electronics”. en. In: *Sustainability* 16.5 (Mar. 2024), p. 2221. ISSN: 2071-1050. DOI: 10.3390/su16052221. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/5/2221> (visited on 03/05/2025).
- [27] Puneet Shrivastava et al. “Evaluating obsolete electronic products for disassembly, material recovery and environmental impact through a decision support system”. In: *Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, 2005.* (May 2005). ISSN: 2378-7260, pp. 221–225. DOI: 10.1109/ISEE.2005.1437029. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1437029> (visited on 03/12/2025).

- [28] Lucy Smith et al. “Life cycle assessment and environmental profile evaluations of high volumetric efficiency capacitors”. en. In: *Applied Energy* 220 (June 2018), pp. 496–513. ISSN: 03062619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.03.067. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261918304057> (visited on 04/23/2025).
- [29] I. Stobbe et al. “Quality assured disassembly of electronic components for reuse”. In: *Conference Record 2002 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment (Cat. No.02CH37273)* (May 2002). ISSN: 1095-2020, pp. 299–305. DOI: 10.1109/ISEE.2002.1003284. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1003284> (visited on 03/11/2025).
- [30] I. Stobbe et al. “Quality challenges of reused components”. In: *Proceedings of 2004 International IEEE Conference on the Asian Green Electronics (AGEC)*. Jan. 2004, pp. 218–225. DOI: 10.1109/AGEC.2004.1290906. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1290906> (visited on 03/20/2025).
- [31] Jianbo Wang, Jie Guo, and Zhenming Xu. “An environmentally friendly technology of disassembling electronic components from waste printed circuit boards”. en. In: *Waste Management* 53 (July 2016), pp. 218–224. ISSN: 0956053X. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.03.036. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X16301209> (visited on 04/14/2025).
- [32] B. Willems, W. Dewulf, and J. Duflou. “Design for active disassembly (DfAD): an outline for future research”. In: *Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, 2005.* (May 2005). ISSN: 2378-7260, pp. 129–134. DOI: 10.1109/ISEE.2005.1437007. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1437007> (visited on 03/21/2025).
- [33] Jiping Yang et al. “Removal force models for component disassembly from waste printed circuit board”. en. In: *Resources, Conservation and Recycling* 53.8 (June 2009), pp. 448–454. ISSN: 09213449. DOI: 10.1016/j.resconrec.2009.03.007. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344909000512> (visited on 04/14/2025).
- [34] S. Yokoyama, Y. Ikuta, and M. Iji. “Recycling system for printed wiring boards with mounted parts”. In: *Proceedings First International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing* (Feb. 1999), pp. 814–817. DOI: 10.1109/ECODIM.1999.747721. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/747721> (visited on 03/18/2025).
- [35] H. Zebedin, K. Daichendt, and P. Kopacek. “A new strategy for a flexible semi-automatic disassembling cell of printed circuit boards”. In: *ISIE 2001. 2001 IEEE International Symposium on Industrial Electronics Proceedings (Cat. No.01TH8570)* 3 (June 2001), 1742–1746 vol.3. DOI: 10.1109/ISIE.2001.931972. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/931972> (visited on 03/12/2025).
- [36] Cheng Zhang et al. “A cradle-to-grave life cycle assessment of high-voltage aluminum electrolytic capacitors in China”. en. In: *Journal of Cleaner Production* 370 (Oct. 2022), p. 133244. ISSN: 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.133244. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652622028311> (visited on 04/23/2025).
- [37] Wenting Zhao et al. “The reuse of electronic components from waste printed circuit boards: a critical review”. en. In: *Environmental Science: Advances* 2.2 (2023), pp. 196–214. ISSN: 2754-7000. DOI: 10.1039/D2VA00266C. URL: <https://xlink.rsc.org/?DOI=D2VA00266C> (visited on 03/05/2025).