

Margaux ANNE

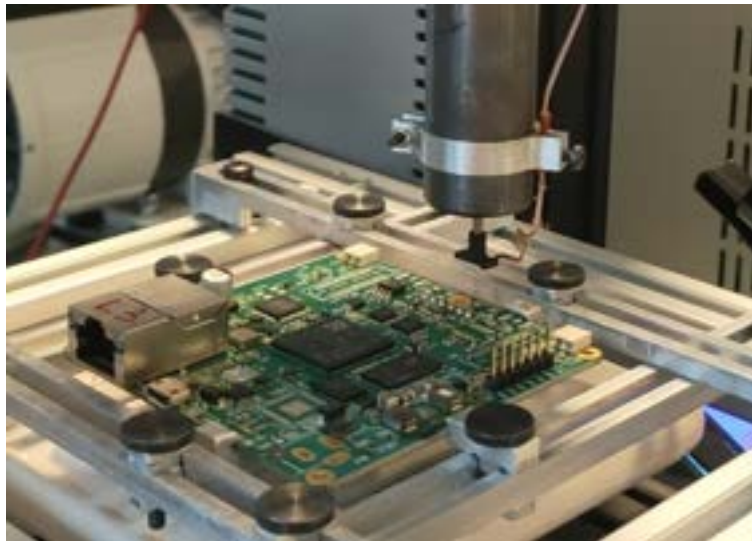
Année universitaire 2024–2025

Spécialité Mécatronique - Parcours P4

Master Imagerie, Robotique et Ingénierie pour le Vivant (IRIV)

Projet de fin d'étude MIQ5 - Mémoire de stage de Master 2

Développement d'un système automatisé de récupération de composants électroniques en vue de leur réemploi



Organisme d'accueil :

CEA Grenoble

Encadrant : Sébastien BRULAIS

Adresse : 17 Av. des Martyrs, 38000 Grenoble

Courriel : sebastien.brulais@cea.fr

Dates du stage : du 03/03/2025 au 21/03/2025 et du 07/04/2025 au 03/09/2025



Résumés

Résumé

Face au défi croissant posé par les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), un système automatisé a été développé pour récupérer des composants électroniques (EC) destinés à une réutilisation directe dans une logique de « seconde vie ». Ce projet répond à l'urgence d'agir contre l'augmentation des DEEE, qui représentent un risque majeur pour l'environnement et la santé. Avec l'accélération des avancées technologiques et la réduction de la durée de vie des appareils, la quantité mondiale de DEEE devrait atteindre 82 millions de tonnes d'ici 2030 [7]. Les méthodes classiques de gestion, comme la mise en décharge ou l'incinération, ne sont plus viables et engendrent des impacts environnementaux négatifs. Il devient donc essentiel de développer des solutions innovantes de recyclage et de réutilisation des ECs dans une logique d'économie circulaire [34]. Alors que certaines initiatives visent à extraire en masse des matériaux rares via des procédés chimiques (Ta, Ti, Ag, Au, ...) [3], l'approche proposée cherche à récupérer des ECs à forte valeur ajoutée pour une réutilisation directe.

Un état de l'art a permis d'identifier les ECs présentant un fort intérêt économique et environnemental, ainsi que les méthodes adaptées à leur récupération sécurisée. Sur cette base, un outil de type « pick and remove » a été conçu. Sa structure repose sur le châssis d'une imprimante 3D Ender3 modifiée. Le préchauffage est assuré par un chauffage infrarouge (jusqu'à 150 °C), tandis qu'un pistolet muni d'une buse à air chaud (jusqu'à 260 °C) et d'un système d'aspiration assure le dessoudage localisé et le retrait des composants. Un script Python pilote la tête de l'imprimante, sur laquelle le pistolet est fixé, afin d'automatiser la récupération sur de petites séries de cartes.

Les premiers essais ont confirmé la faisabilité et l'efficacité du système, tout en apportant une première évaluation de ses bénéfices potentiels, tant économiques qu'environnementaux.

Abstract

In response to the increasing challenge of electronic waste (e-waste), an automated system has been developed for disassembling electronic boards and recovering components for direct reuse in a "second life" approach. The motivation behind this project stems from the urgent need to address growing issue of electronic waste, which poses substantial environmental and health risks. With technological advancements and shorter device lifespans, global e-waste is projected to reach 82 million tons by 2030 [7]. Traditional waste management methods, such as landfilling and incineration, are no longer sustainable and harmful to the environment. Innovative solutions for recycling and reusing electronic components (ECs) are essential for promoting a circular economy and reducing the environmental impact of e-waste [34]. While some initiatives focus on mass recovering of ECs to recycle rare materials through chemical processes (Ta, Ti, Ag, Au,...) [3], the proposed approach aims to recover high-value ECs for direct reuse in second-life applications.

A literature review has firstly been performed to identify components with high economic and environmental relevance and associated methods for their safe recovery. Based on this review, a "pick and remove" tool tailored to the needs for automation and component preservation has been developed. The structural framework of this tool is based on a widely used Ender3 3D printer body. A dedicated PCB card holder was created to securely position the PCB during disassembly. Pre-heating is achieved with an IR heater (up to 150 °C), and a hot air nozzle has been integrated for final heating (up to 225°C), ensuring precise and localized desoldering. A Python script has been developed to control the 3D printer body and the hot air nozzle to automate the recovery of components from small series of PCBs.

Preliminary tests have demonstrated the system's feasibility and effectiveness in automatically recovering electronic components. These tests also enabled an evaluation of the potential economic and environmental benefits of this innovative approach.

Remerciement

Je tiens tout d'abord à remercier le CEA de Grenoble qui m'a accueillie en son sein pendant mes six mois de stage.

Plus particulièrement, je remercie mes tuteurs, Sébastien BRULAIS et Tristan CAROFF, pour leur expertise et leurs conseils tout au long de ce projet. Leur soutien et leur confiance m'ont permis d'effectuer un stage formateur qui m'a fait gagner en maturité et en expérience. Ce stage a été pour moi une expérience professionnelle très enrichissante à travers laquelle j'ai pu fournir un travail dont je suis contente.

Je remercie également l'ensemble des personnes du laboratoire LAIC pour leurs conseils, mais également pour leur bonne humeur et leurs discussions vivantes qui ont rendu mon stage épanouissant sur le plan humain. Et je remercie avec une attention particulière Vincent ELHORGA pour son aide lors de la fabrication de mes pièces.

Outre le laboratoire LAIC, je remercie les différents acteurs du groupe éco-innovation pour leurs conseils, leur gentillesse et leur personnalité vivante qui m'ont beaucoup apporté.

Je souhaite aussi remercier mon école, l'INSA de Strasbourg, ainsi que Télécom Physique Strasbourg qui m'ont permis d'effectuer ce stage dans le cadre de ma formation d'ingénieur en mécatronique. Je remercie tout particulièrement mon tuteur de stage Pierre RENAUD pour son suivi et ses remarques avisées.

Finalement, je remercie toutes les personnes qui m'ont épaulée et accompagnée pendant toutes mes années de formation, participant ainsi à la réussite de mon stage de fin d'études.

Table des matières

Résumés	1
Remerciement	2
Listes et index divers	5
Introduction	7
1 But du travail	8
1.1 Nature du travail	8
1.2 Insertion dans un contexte plus large	8
1.3 La dimension «recherche»	9
2 Contexte	9
2.1 Contexte de l'entreprise	9
2.1.1 Le CEA	9
2.1.2 Le centre CEA de Grenoble	10
2.2 Contexte du stage	11
2.2.1 LAIC	11
2.2.2 Groupe éco-innovation	11
2.2.3 Cadre du stage	12
3 Etat de l'art	12
3.1 Contexte : l'impact mondial des DEEE	12
3.1.1 Les DEEE : proportion	12
3.1.2 La gestion des DEEE dans les différentes régions du monde	13
3.1.3 L'évolution de la recherche scientifique sur les DEEEs	13
3.2 Le traitement actuel des DEEE	13
3.2.1 Récupération des ECs	14
3.3 Les méthodes de récupération des ECs	15
3.3.1 Contraintes et enjeux de la récupération	15
3.3.2 Tri et identification	16
3.3.3 Dessoudage	16
3.3.4 Désassemblage	19
3.3.5 Test et qualification	21
3.3.6 Conclusion sur les méthodes de récupération des ECs	21
3.4 Quels ECs cibler pour quels impacts ?	21
3.4.1 Impact économique et social	22
3.4.2 Impact environnemental	22
3.4.3 Impact des métaux critiques	23
3.4.4 Focus sur des ECs ciblés	24
3.5 Applications prometteuses	24
3.6 Conclusion État de l'art	25
4 Description des méthodes utilisées	25
4.1 Méthode organisationnelle	25
4.2 Cahier des charges / Analyse fonctionnelle simplifiée	26
4.3 Méthodes de conception	29
5 Description des réalisations	29
5.1 Conception et fabrication	29
5.1.1 Support de carte	29
5.1.2 Support plaque IR	31
5.1.3 Intégration du pistolet	31
5.2 Intégration des thermocouples	35
5.2.1 Thermocouple EC cible	35

5.3	Élément de dépose des ECs	36
5.4	Commande du système de récupération	37
5.4.1	Interface homme-machine	38
5.4.2	Commande de l'imprimante 3D	38
5.4.3	Commande du pistolet	39
6	Résultats obtenus	39
6.1	Sous éléments de la récupération	39
6.1.1	Identification	39
6.1.2	Dessoudage	40
6.1.3	Désassemblage	41
6.1.4	Dépose et test des ECs	42
6.2	Analyse globale du système de récupération d'ECs	42
	Conclusion	43
	Références	46
	Annexes	47

Listes et index divers

Glossaire

CAPEX Investissement initial. 17

CRMs Matières premières critiques. 14, 23

DEEE Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques. 7, 9, 12

EC Composants Electroniques. 7–9

G-code Consiste en une série de commande et de paramètre indiquant les déplacements que la machine doit effectuer. 38

IRIV Imagerie, Robotique, Ingénierie pour le Vivant. 7

OPEX Coût opérationnel. 17

PCB circuits imprimés. 13–16, 21, 23, 27

SMD dispositifs montés en surface. 19, 20

THD dispositifs traversant. 19, 20

WPCB déchets issus des cartes de circuits imprimés. 13, 14, 19, 22, 24, 43

Table des figures

1	Implantation du CEA	10
2	Organigramme DSYS	11
3	Comparaison entre l'évolution technologique (a) et scientifique (b) des procédés de valorisation des cartes électroniques en fin de vie.	13
4	Taux de défaillance expérimental qui peut être subdivisé en trois zones : mortalité infantile (1), échec aléatoire (2) et vieillissement (3)	15
5	Courbe de température brasage ECs	18
6	Impact température brasage ECs	19
7	Les deux types de dispositifs pour les ECs : (A) SMD et (B) THD	20
8	Diagramme de GANTT	26
9	Courbe de température dessoudage	27
10	Schéma fonctionnel	28
11	Imprimante Ender 3	29
12	Support carte	30
13	Pièce support carte	30
14	Support carte conçu et fabriqué	30
15	Support plaque IR	31
16	Support plaque IR fabriqué	31
17	Système de récupération non contraint en hauteur d'EC	32
18	Fonctionnement du désassemblage	32
19	Éléments de liaison entre le patin et le pistolet	33
20	Éléments d'intégration du pistolet	34
21	Intégration du pistolet	35
22	Répartition température	35
23	Pièces de maintien pour la bague	36
24	Bague pour intégration du thermocouple	36
25	Système de récupération d'EC	37
26	Plan synoptique	37

27	Flowchart de la commande	38
28	Comparaison de la distance pistolet–EC sur les trois configurations.	40
29	Comparaison de l’impact du flux utilisé sur la température mesuré	41
30	Dépose d’un EC	42
31	Axes de recherche LAIC	47
32	Flyer présentation CEA Tech	48
33	Etat de l’art	50
34	Assembly solder profile	73
35	Critère de réutilisation ECs	75
37	Ouverture station	77

Liste des tableaux

1	Comparaison des méthodes de dessoudage	17
2	Comparatif des méthodes de dessoudage pour une station automatisée	19
3	Résumé des techniques de désassemblage	20
4	Score EI pour différents produits électroniques	23
5	Valeurs EI-99 de matériaux utilisés en électronique	23
6	Comparatif des ECs selon leur composition, impact environnemental et économique	24
7	Cahier des charges fonctionnel	27

Introduction

De nos jours, la plupart des Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques (DEEE) ne sont pas traités convenablement, ce qui engendre une perte de métaux rares/précieux et un rejet de matière toxiques 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. En effet, lorsque l'on parle de recyclage, nous entendons un broyage de cartes électroniques dans l'optique d'une extraction de certains matériaux. Par suite, les Composants Électroniques (EC)s sont détruits afin de ne récupérer qu'une partie de leur composition. Pourtant, ces derniers n'auraient atteint que 5% de leur durée de vie [2]. Ainsi, la récupération des EC pourrait nous ouvrir une porte vers la revalorisation. La valeur ajoutée de ces derniers serait alors conservée et leur durée de vie augmentée.

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 récupération d'ECs en vue de leur réemploi.

Ainsi, afin de finalisé ma formation d'ingénieur en mécanique ainsi que mon master en Imagerie, Robotique, Ingénierie pour le Vivant (IRIV) j'ai eu la possibilité de réaliser ce stage dans le cadre de mon Projet de Fin d'Étude (PFE).

À travers ce stage, l'établissement d'un état de l'art a permis 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 a par ailleurs mis en évidence les problématiques associées, telles que l'endommagement des ECs et leur fiabilité.

Une fois cette première phase accomplie, un cahier des charges associé à une analyse fonctionnelle simplifiée ont été construits et un choix de solution pour le système a été fait. S'en est suivi une phase de conception et de fabrication des différentes briques fonctionnelle. Après une intégration des différents éléments du système, un ensemble de tests fonctionnels a pu être réalisé, et par la suite quelques améliorations ont encore pu être apportées au système.

1 But du travail

Les objectifs du travail étaient multiples, nous verrons dans cette section les différentes thématiques abordées ainsi que leurs objectifs. Étant donné qu'il s'agissait d'une nouvelle thématique pour le laboratoire, j'en ai assuré l'étude et l'exécution de manière autonome, depuis la phase initiale.

1.1 Nature du travail

Comme énoncé précédemment, l'objectif principal du stage est la réalisation d'un système automatisé de récupération d'ECs en vue de leur emploi. Dans un même temps, les limites et les points bloquants que peut représenter cette thématique ont été étudiés. Nous distinguons alors au sein de l'objectif principal plusieurs thématiques : la récupération, l'automatisation et le réemploi.

Au cours du stage, la nature du travail a pris plusieurs formes. Dans un premier temps, elle a consisté à la réalisation d'un état de l'art. L'objectif est alors de prendre pleinement connaissance du problème grandissant que représentent les DEEE. Par cette étude bibliographique, des articles faisant part de propositions de solutions pour le recyclage au sens large ont pu être étudiés. Des propositions visant à simplifier le recyclage, la réutilisation ou encore la récupération m'ont donné un nouveau regard sur nos méthodes de conception. En somme, cette étude bibliographique a permis de prendre connaissance de l'étendue des domaines d'action, mais aussi du manque d'études et de données sur le sujet du recyclage des ECs.

Suite à cet état de l'art, une analyse fonctionnelle simplifiée couplée à la formalisation d'un cahier des charges a permis d'identifier les fonctions et sous fonctions clés du système de récupération d'ECs ainsi que les points de vigilance/contraintes associés.

L'étude d'une solution a ensuite été menée en s'inspirant des idées partagées dans les articles du domaine de la récupération d'ECs. Une simplification du problème et du champ d'application ont également dû être faits afin d'aboutir à un prototype opérationnel pendant la durée du stage.

Une fois cette phase aboutie, la nature du travail a pris une nouvelle forme avec le choix de solutions pour les différentes briques fonctionnelle dégagé en amont. Des choix matériels ont alors été fait. L'intégration de ces derniers a également mener à la conception et la fabrication de différentes pièces. En ce qui concerne l'automatisation, un script python a été développée afin de réaliser la commande de l'ensemble du système de récupération des ECs.

Cette phase a mené à la réalisation d'une première version du système de récupération. Une phase de test et d'ajustement a alors débuté. De nombreuses solutions ont été étudiées et mises en place pour permettre les ajustements nécessaires au bon fonctionnement du prototype.

Une fois le système suffisamment abouti, des tests de répétabilité et d'endommagements des ECs ont été conduits.

En somme, la nature du travail a pris différentes formes au cours du stage dans l'optique de rechercher une solution en phase avec les possibilités du laboratoire ainsi que mes compétences et le temps alloué tout en satisfaisant l'objectif de la récupération automatisée et facilement implémentable.

1.2 Insertion dans un contexte plus large

Au sein du laboratoire, le sujet est nouveau, mais tend à prendre de l'ampleur. À l'échelle du service, de nombreuses personnes sont intriguées par le sujet et seraient intéressées par les possibilités offertes par la récupération et le réemploi d'ECs.

Le stage ayant pour objectif la fabrication et le prototypage d'un dispositif intégrant les contraintes de soutenabilité environnementale, il s'inscrit dans le groupe éco-innovation qui rassemble plusieurs sujets à l'échelle du centre de Grenoble. Cette ouverture à des domaines étendus a permis la mise en relation avec plusieurs acteurs. Ainsi, j'ai pu grâce à ce cercle rentrer en contact avec des chercheurs de l'INSA de Rennes ou encore un doctorant de 2ème année au CEA de Saclay. Une entrevue avec ces différents acteurs a permis le partage d'informations sur le sujet ainsi que la discussion de nos objectifs au sein des différents organismes afin d'identifier la possibilité de travailler ensemble et d'étendre davantage le sujet du recyclage et du réemploi

des ECs. Le partage des difficultés rencontrées a également permis de renforcer les observations que nous avons eues chacun de notre côté.

Dans une autre dynamique, la réalisation d'un abstract sur le sujet pour participer à une conférence a été soumis. L'objectif sera alors de partager mes avancées, les connaissances acquises, de sensibiliser ainsi que de créer un réseau avec d'autres personnes intéressées ou travaillant aussi sur le sujet.

1.3 La dimension «recherche»

Au sein du stage, la dimension recherche a pris plusieurs formes.

Dans un premier temps, l'établissement d'un état de l'art a permis de fournir une compréhension exhaustive des travaux antérieurs dans le domaine de la récupération des ECs, mais aussi au sens large du recyclage des DEEEs. Cette rédaction a ainsi permis de fournir des informations à différents acteurs dans ce domaine afin d'avoir du recul, de prendre conscience de l'ampleur du sujet et de la variété des thèmes pouvant être étudiés. L'identification des lacunes dans le monde de la recherche dans ce domaine a également permis de se rendre compte de l'importance d'étudier ce sujet qui, à juste titre, a éveillé notre intérêt au vu des chiffres alarmants que représentent les DEEEs, mais aussi au vu de la problématique liée aux matériaux critiques (matières premières qui sont les plus importantes sur le plan économique et qui présentent un risque élevé de pénurie d'approvisionnement).

Ainsi, l'un des objectifs du stage était de mettre le pied à l'étrier sur ce sujet de recherche encore peu étudié. L'état de l'art a permis d'établir une base afin de développer la recherche autour du sujet. En effet, l'objectif était de pouvoir identifier des axes de recherche pour la suite du projet ainsi que les points durs à anticiper. En somme, contribuer à l'aspect recherche du laboratoire en développant les possibilités autour de ce sujet de revalorisation de nos DEEEs. La construction d'une roadmap, pour le laboratoire LAIC, a ainsi commencé dans ce sens.

Par ailleurs, la mise en place d'un système automatisé de récupération d'ECs représente en soit un outil d'investigation pour la recherche. Le laboratoire souhaite par exemple développer la recherche autour de la thématique du test des ECs afin d'estimer leur état, leur valeur résiduelle et leur fiabilité. Par suite, l'accès à la station de récupération permettra de faciliter l'accès à des ECs de seconde main.

La mise en relation avec différentes personnes concernant mon sujet a également permis de prendre conscience du manquement de données sur cette thématique et de l'intérêt suscité. Dans cette optique, un des objectifs secondaire du stage serait de rendre le projet open source afin de donner accès à la récupération dans le but d'ouvrir de nouvelles portes dans ce domaine.

L'évaluation de l'impact environnemental (via une ACV) de la récupération directe des ECs représente par ailleurs une thématique importante du sujet. Par ce stage, nous souhaitons avoir une première idée de l'impact de la récupération, dans l'optique de déceler des points d'attention liés au procédé et ainsi nous guider dans son optimisation.

2 Contexte

À présent que le but du travail a été introduit, nous allons pouvoir nous concentrer sur le contexte du stage. Ainsi, nous allons commencer par une présentation générale du CEA pour finalement contextualiser plus précisément le stage au sein du laboratoire dans lequel j'ai travaillé.

2.1 Contexte de l'entreprise

2.1.1 Le CEA

Le CEA, Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, est un organisme de recherche classé en établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC). Créé en 1945 sous la demande du général de Gaulle, le CEA naît avec comme vocation de devenir un organisme de recherche consacré à l'énergie atomique. Implanté sur neuf centres (figure 1) répartis dans toute la France, il développe de nombreux partenariats avec les autres organismes de recherche, les collectivités locales et les universités. Ainsi, le CEA dénombre plus de 22000 collaborateurs et plus de 700 partenaires industriels. 1er organisme de recherche

français déposant de brevets en Europe, le CEA comptabilise un budget annuel de 6,4 milliards d’euros en apportant des solutions concrètes dans quatre domaines principaux :

- les énergies bas-carbone (nucléaire et renouvelables)
- le numérique,
- les technologies pour la médecine du futur,
- la défense et la sécurité.

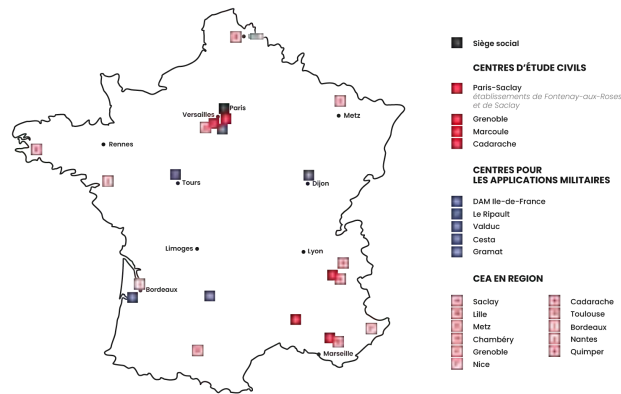


FIGURE 1 – Implantation du CEA

Pour mener à bien ses missions, le CEA s’appuie sur quatre directions dites opérationnelles :

- Direction des énergies
- Direction des applications militaires
- Direction de la recherche technologique
- Direction de la recherche fondamentale

Dans le cadre de mon stage, je travaille au sein de la direction de la recherche technologique, aussi appelée CEA TECH. Cette dernière se concentre sur la recherche technologique, c’est-à-dire la « production de technologies » et leur diffusion à l’industrie. CEA Tech dispose d’une offre très large de technologies génériques issues de ses trois instituts Leti, List et Liten tous trois implémentés sur le centre de Grenoble. On retrouve en annexe 32 un flyer de présentation de cette direction.

2.1.2 Le centre CEA de Grenoble

Nous arrivons ainsi à l’échelle du CEA de Grenoble comprenant le Leti, List, Liten déjà introduit ainsi que Irig se consacrant à la recherche fondamentale. Au cours de mon stage, j’ai évolué au sein du Leti.

Le Leti, pionnier dans les domaines des micros et nano-technologies, est un institut de recherche technologique. Avec 2 000 ingénieurs chercheurs et ses 11 000 m² de salles blanches, le Leti s’intéresse à l’énergie bas-carbone, au numérique, aux technologies pour la médecine du futur, la défense et la sécurité.

Le Leti est divisé en plusieurs départements, on retrouve entre autres le DSYS, Département SYStèmes, dans lequel se situe le service SSCE, Service SYStèmes de Capteurs électroniques pour l’Energie. C’est au sein de ce dernier que se trouve finalement mon laboratoire, le LAIC, Laboratoire Autonomie et Intégration des Capteurs. L’organigramme ci-dessous, regroupe ces différentes structures.

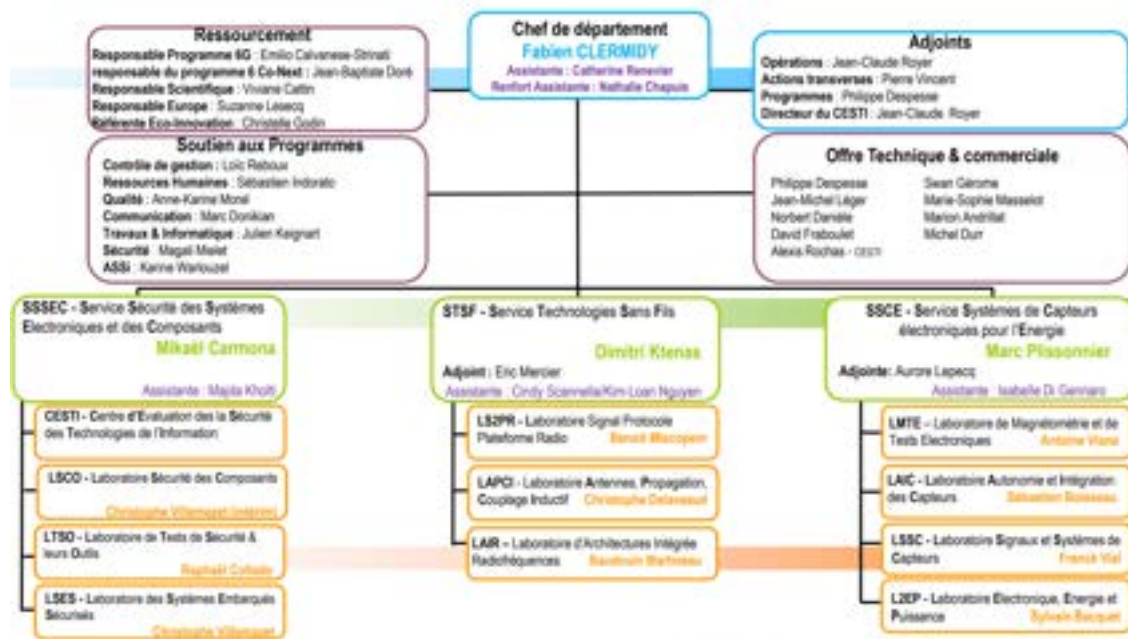


FIGURE 2 – Organigramme DSYS

Le LAIC se concentre sur plusieurs axes de recherche que l'on retrouve en annexe 31. Avec le début du stage, un nouvel axe est en train d'émerger : "reuse and sustainability". L'objectif est de développer au sein du laboratoire une nouvelle thématique autour de la récupération des ECs.

2.2 Contexte du stage

2.2.1 LAIC

Au sein du laboratoire LAIC mon supérieur hiérarchique est le chef du laboratoire, Sébastien BOISSEAU. Mes deux tuteurs, Sébastien BRULAIS et Tristan CAROFF sont tous deux ingénieurs chercheurs. Sébastien est spécialisé en électronique et Tristan est chef de projets. Tous deux ont commencé à voir du potentiel dans la récupération des ECs durant la crise covid. Durant cette période, l'approvisionnement de certains ECs était complexe. Délai à rallonge, rupture de stock, etc... En somme, l'accès aux ECs était devenu limitant, ce qui empêchait l'avancement de certains projets. La solution qu'ils ont trouvée à ce moment-là a été de récupérer les ECs dont ils avaient besoin parmi les cartes obsolètes qu'ils n'utilisaient plus, mais qui contenaient ce dont ils avaient besoin. Pour cela, ils se sont servis d'une station de récupération manuelle, Ersas [6]. Au-delà de l'aspect pratique de cette démarche, l'impact environnemental était réduit sans pour autant impacter le fonctionnement des prototypes fabriqués. Cette prise de conscience associée à la promotion du thème de l'éco-innovation au sein du Leti qui pousse au développement de démarches au tour de l'innovation responsable a permis de faire émerger l'idée et de proposer mon stage, "Développement d'un système automatisé de récupération d'EC en vue de leur réemploi". Ainsi, le sujet est tout nouveau au sein du laboratoire et tend à se développer, comme nous le verrons par la suite.

2.2.2 Groupe éco-innovation

Le groupe éco-innovation, interne au cea Grenoble, a pour objectif de trouver des solutions aux nombreux défis environnementaux auxquels l'industrie électronique est confrontée actuellement. L'institut propose une infrastructure complète et des méthodes qui couvrent :

- Le développement et la mise en œuvre d'analyses du cycle de vie (ACV), y compris la production de données ACV pertinentes pour mesurer les impacts environnementaux
- Les essais de validation de solutions éco-innovantes, dans un environnement R&D à l'état de l'art, de type production, avec des impacts mesurés, liés à la salle blanche, aux processus et aux équipements
- Le développement de technologies et de systèmes de bout en bout pour répondre à des critères environnementaux spécifiques pour des cas d'application identifiés.

Mon stage s’inscrivant dans cette dynamique, j’ai été en relation avec ce groupe tout au long de mon stage. L’échange a pris la forme de réunion mensuelle afin que chaque stagiaire, rattaché au groupe, présente ses avancées afin de discuter des possibles points bloquants. Dans mon cas, il m’a également permis de rentrer dans un cercle plus large et de rentrer en contact avec des personnes intéressées par le sujet en dehors de mon laboratoire. Au courant du mois de juillet, nous avons aussi eu l’occasion de présenter nos stages lors d’une journée des stages où toute personne du LETI était invitée. Ainsi, j’ai également eu la possibilité de sensibiliser les auditeurs à cette thématique et aux possibilités envisagées.

2.2.3 Cadre du stage

Avec mon appartenance au laboratoire et au groupe éco-innovation, j’ai pu respectivement évoluer dans un cadre plutôt technique orienté vers la recherche, mais aussi dans un cadre relationnel d’échange. Au sein du laboratoire, j’ai pu rentrer en contact avec des personnes ayant diverses compétences. Ainsi, leur expertise m’a accompagné au long du stage afin de discuter au besoin sur des choix de solutions que j’avais faits et me permettre de gagner en compétences. D’un point de vue organisationnel, nous avons convenu avec mes deux tuteurs d’un rendez-vous hebdomadaire qui me permettait d’exposer mes avancées, mes choix techniques ou encore mes objectifs à venir. Ces moments de discussion m’ont permis de structurer mon avancée et de mettre à jour un planning sur l’ensemble de la durée du stage.

3 Etat de l’art

Au cours du stage, une étude bibliographique a été menée dans l’optique de fournir un état de l’art complet sur le sujet de la récupération des ECs. À travers cette partie du rapport, nous allons retracer les éléments-phare de ce dernier. La version de l’état de l’art complet se retrouve en annexe 33. Dans cette version condensée, nous essaierons d’aller à l’essentiel afin de synthétiser les tenants et aboutissants de l’étude. 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 d’ECs.

Nous passerons ensuite aux méthodes de récupération existantes et aux étapes qu’elles demandent. Nous verrons qu’elles dépendent fortement du type d’ECs visés. C’est pour cela qu’une nouvelle partie sera dédiée à l’analyse des ECs 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 pourrions aborder les applications concrètes déjà mises en place dans le contexte de la récupération d’ECs. Ce qui nous mènera finalement à la conclusion de cet état de l’art avec les perspectives offertes par cette étude et les manques encore présents dans la recherche actuelle.

3.1 Contexte : l’impact mondial des DEEE

3.1.1 Les DEEE : proportion

Selon le quatrième Global E-waste Monitor (GEM) publié par l’ONU [7], la production mondiale de DEEE en 2022, a généré un volume atteignant les 62 millions de tonnes (Mt), soit une augmentation de 82% par rapport à 2010. Les projections indiquent une croissance de 32% supplémentaire d’ici 2030, pour atteindre environ 82 Mt. Parmi ces déchets, seuls 22,3% ont été correctement collectés et recyclés, ce qui correspond à une valeur estimée de 62 milliards de dollars de ressources récupérables non exploitées. Cette situation accroît également les risques de pollution pour les populations à l’échelle mondiale.

Parmi eux, on retrouve de nombreux ECs 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. Selon une étude [27], une grande partie d’entre eux n’ont atteint qu’approximativement 5 % de leur durée de vie prévue [27].

Ce domaine possède donc un important potentiel d’évolution. L’accès à certains métaux rares ou encore les crises (crises sanitaires, économiques ou de guerre) impactent directement notre capacité à nous procurer des ECs. 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.

3.1.2 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 d'ECs 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 [34] présente la place du recyclage de DEEE dans le monde. On apprend alors que 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 ECs 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 WPCB dans les pays en développement d'Asie et d'Afrique.

3.1.3 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 [22] recense de nombreux brevets classés en fonction du mode de recyclage des DEEE. On y retrouve également les graphiques de la figure 3 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 ECs, 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 3 – Comparaison entre l'évolution technologique (a) et scientifique (b) des procédés de valorisation des cartes électroniques en fin de vie.

3.2 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 WPCB 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 [2]. 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

rare (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 ECs, 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 Matières premières critiques (CRMs) et à la hausse exponentielle des DEEE [2].

3.2.1 Récupération des ECs

En 2022, selon UNITAR [7] seulement 22,3 % des DEEEs produits ont été correctement collectés et recyclés. Parmi ce petit quart de nos DEEE, uniquement une faible partie des matériaux les constituant sont récupérés. La plupart des méthodes de recyclage 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. Cette méthode pourrait permettre plusieurs choses :

- **Favoriser l'économie circulaire**

Un des grands objectifs de la récupération d'ECs est de pouvoir rallonger leur cycle de vie. L'article [25] 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 CRMs. 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 ECs, 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 d'ECs.

- **Réduction de la mortalité infantile des ECs**

Tout EC 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 EC.

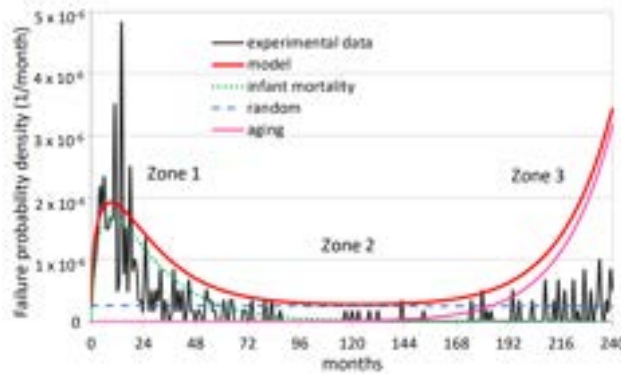


FIGURE 4 – Taux de défaillance expérimental qui peut être subdivisé en trois zones : mortalité infantile (1), échec aléatoire (2) et vieillissement (3)

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

3.3 Les méthodes de récupération des ECs

La récupération des ECs représente de nombreux challenges, nous pourrions les évoquer dans un premier temps avant d’aborder les différentes étapes que constitue la récupération des ECs.

3.3.1 Contraintes et enjeux de la récupération

Les principaux défis incluent :

- **La traçabilité des ECs :** Afin de pouvoir évaluer la durée de vie restante d’un EC, 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 ECs 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 ECs critiques (composés de matériaux dangereux ou rares) présents sur la carte. Ces informations pourraient alors être utilisées pour choisir quels ECs sont à récupérer en priorité.
- **Estimer la durée de vie avant récupération d’un EC :** Un point important dans la réutilisation d’ECs est de pouvoir tester l’EC 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 [19] dans le but d’étudier le fonctionnement d’un EC. Cette étude s’est basée sur la température de l’EC 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 EC a été mis au point. Ces informations pourraient permettre le ciblage des ECs intéressants à récupérer dans une optique de réutilisation.
- **La miniaturisation croissante :** L’évolution de l’électronique tend vers la conception et l’utilisation d’ECs 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 l’EC et le préhenseur entravent souvent le processus lors du relâchement, limitant ainsi les performances globales des systèmes conventionnels. L’article [24] 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 ECs 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 [19].
- **Permettre la récupération** : Finalement, la récupération rencontre également ses défis afin de récupérer sans endommager tout en ayant une cadence suffisante pour qu'elle soit rentable. Elle doit aussi être respectueuse de l'environnement. Un des gros objectifs de la récupération est de réduire l'impact environnemental des produits. Ainsi, elle ne doit pas être plus coûteuse environnementalement parlant que la fabrication. D'autre part, des questions se posent sur l'échelle à laquelle la récupération pourrait se faire pour que la remise sur le marché des ECs soit efficace. Une possibilité, à grande échelle, pourrait alors être que ce soit les fabricants des ECs ou des cartes électroniques qui s'en chargent. Dans cet esprit, ces derniers auraient directement la connaissance de ce qu'on subit les ECs pendant leur fonctionnement, ce qui faciliterait l'estimation de leur durée de vie et ainsi que la remise sur le marché des ECs, directement avec leur structure déjà fonctionnelle.
À une échelle plus réduite, des entreprises faisant du prototypage pourraient faire de la récupération à partir de leur prototype obsolète afin de les réutiliser dans de nouveaux projet, comme cela peut-être le cas dans le laboratoire LAIC.

3.3.2 Tri et identification

L'identification et le tri constituent une première étape essentielle dans la récupération d'ECs. L'identification permet de localiser les ECs, d'évaluer leur état, leur type, ou encore leur dangerosité [8]. Le tri lui permet de choisir quel EC 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 [8], s'appuient sur l'analyse de la forme, la couleur ou le marquage des ECs, 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 ECs, même à partir de peu d'exemples, grâce à l'apprentissage dit "few-shot" [23], [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].

Ces solutions présentent un gros intérêt lorsque nous n'avons aucune information sur les cartes récupérées. Dans notre cas d'étude, nous considérons avoir accès aux fichiers de fabrication, des cartes électroniques, qui contiennent la position des différents ECs. Ainsi, dans notre cas, nous n'aurons uniquement besoin de référencer la position du premier EC à récupérer ainsi que d'aligner le PCB sur les axes de la machine pour en déduire la position des autres. Un support de carte sera alors nécessaire pour garder cette dernière en position tout au long de la récupération et garantir la bonne récupération de l'ensemble des ECs. Cette solution est facilement implémentable au sein du laboratoire et nous permettra de gagner du temps pour se consacrer pleinement aux phases de dessoudage et de désassemblage.

3.3.3 Dessoudage

Suite à cette première étape, nous pouvons aborder le retrait à proprement parler des ECs de la carte. Cette phase combine généralement le dessoudage et le désassemblage. Ces deux étapes consistent d'une part à utiliser une source de chaleur pour faire fondre la brasure lors du dessoudage, et d'autre part à un système d'extraction des ECs 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 de l'EC empêchant sa revalorisation [28].

Le dessoudage des ECs a été largement étudié, avec d'une part des approches visant uniquement à séparer les ECs 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 dans le tableau 1. Ces dernières sont comparées selon leur Investissement initial (CAPEX) et Coût opérationnel (OPEX) ainsi que selon leurs avantages et inconvénients

Procédé	CAPEX	OPEX	Avantages	Inconvénients
Démantèlement manuel	+	++++	Facile à mettre en œuvre ; Démantèlement sélectif	Travail manuel difficile ; Besoin de main-d'œuvre ; Processus lent ; Polluant
Couteau de découpe de surface	++	+	Non polluant ; Taux de démantèlement élevé	Les WPCBs sont traitées une par une
Chauffage brut	++	+	Grande capacité	Émissions toxiques ; Dommages thermiques aux ECs
Radiateurs infrarouges	++	+	Taux de démantèlement élevé	Petits volumes ; Dommages thermiques aux ECs
Chauffage à air chaud	++	++	Taux de démantèlement élevé ; Peu d'entretien ; Non polluant	Faible précision de contrôle ; Faible efficacité énergétique
Bain de soudure chauffant	++	+++	Taux de démantèlement élevé	Difficile à automatiser ; Émissions de fumées toxiques ; Conditions de travail dangereuses
Chauffage par fluide chaud	++	++	Taux de démantèlement élevé ; Haute efficacité thermique	Génération de déchets fluides et fumées toxiques
Centrifugation chauffée	++	++	Taux de récupération élevé de la soudure	Haute température ; Dommages thermiques aux ECs
Dissolution de la soudure	+	++	Processus sélectif ; Séparation des éléments de soudure	Nécessite des traitements supplémentaires ; Produits chimiques dangereux utilisés
Traitement hydrothermal et supercritique	+++	++	Cible métaux ou résines ; Aucun produit toxique libéré ; Réactifs réutilisables	Ne peut pas cibler la soudure ; Nécessite d'autres traitements de démantèlement
Traitement de la résine époxy	++	++	Récupère circuits fonctionnels ; Produits chimiques recyclables	Besoin d'autres processus de démantèlement ; Produits chimiques dangereux utilisés
Démantèlement robotisé	+++	+	Démantèlement et tri combinés ; Faible besoin en main-d'œuvre	Faible rendement
Fragmentation par concasseur à impulsions électriques haute tension	++++	++	Grande capacité ; Non polluant	Faible efficacité énergétique ; Investissement initial coûteux

TABLE 1 – Comparaison des méthodes de dessoudage

Certaines de ces méthodes sont néfastes pour l'environnement, comme le "bain de soudure chauffant" ou la "dissolution de la soudure". D'autres peuvent endommager les ECs : par exemple, la méthode dite "couteau de découpe de surface", qui peut laisser les pattes des ECs 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 ECs fonctionnels.

Afin de dessouder les ECs nous nous intéresserons essentiellement aux méthodes de chauffe qui sont davantage respectueuses de l'environnement. 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 [34] au sujet de la température à appliquer sur les ECs 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 d'avoir un dessoudage efficace tout en étant homogène pour éviter des zones trop chaudes qui pourraient endommager les ECs ou des zones trop froides qui ne permettraient pas un dessoudage performant. Par ailleurs, certains ECs sont fixés à la fois par brasure et adhésif, ce qui nécessite une analyse précise des matériaux pour adapter le procédé de dessoudage, optimiser la récupération et limiter l'impact environnemental.

Précaution en température pour assurer le non-endommagement de ECs

Comme énoncé dans le paragraphe précédent, la température est un point critique du dessoudage des ECs. Cette problématique a un impact sur l'environnement, comme nous avons pu l'introduire en amont, mais également sur la facilité de retrait des ECs et surtout sur leur endommagement. Afin d'assurer un réemploi des ECs, une courbe de température doit être suivie. Cette dernière s'inspire largement des courbes de température suivies lors du brasage des ECs. L'objectif avec le dessoudage sera alors de suivre les mêmes caractéristiques dans le but d'assurer que les contraintes infligées aux ECs soient les mêmes et par suite qu'elles soient supportables par ces derniers. Ainsi, si l'on s'intéresse aux prérogatives données par des fabricants d'ECs, on peut trouver des courbes de température telles que celle figure 5 qui est conseillée par Vishay, fabricant de semi-conducteurs discrets et d'ECs passifs. Le document de recommandation détaillé se trouve en annexe 34.

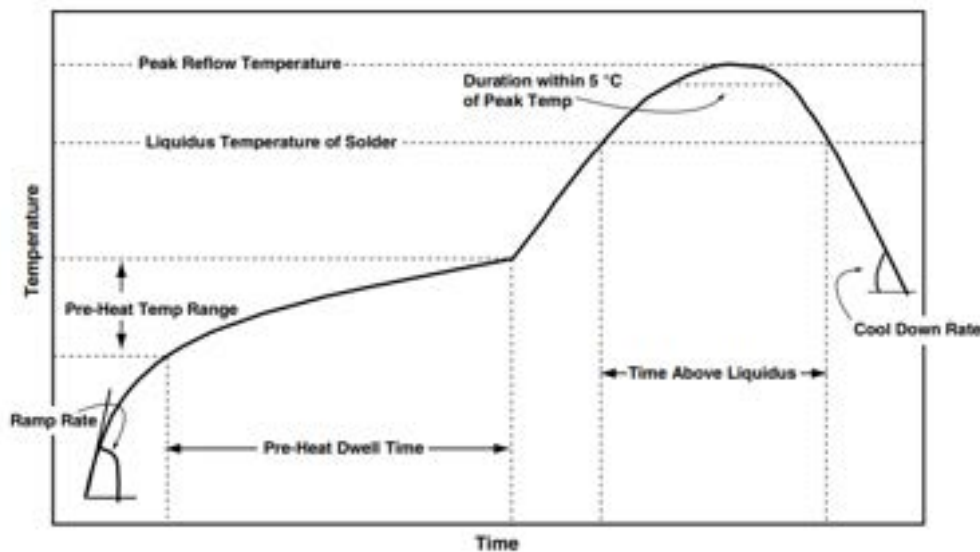


FIGURE 5 – Courbe de température brasage ECs

Nous pouvons alors remarquer que de nombreux paramètres sont définis. Le temps de chauffe, les pentes des courbes et les températures sont primordiales pour ne pas endommager les ECs et assurer un bon dessoudage.

L'article [30] présente une étude visant à rendre compte de l'impact du choix des paramètres de température et du temps de chauffe. Les paramètres expérimentaux sont visibles sur la figure 6. Les impacts étudiés concernent la qualité de la brasure lors du soudage des ECs. Ainsi, l'article ne fournit pas d'informations directes sur les effets de ces paramètres pour le dessoudage, mais il constitue une bonne indication des courbes suivies pour le soudage, ainsi que de l'influence des températures de plateau lors de cette étape.

Dans le cadre de notre étude, cet article apporte donc des éléments précis sur les caractéristiques envisageables pour la courbe de dessoudage à adopter. Combiné aux informations fournies par Vishay, il nous donne une première idée des paramètres à sélectionner.

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 ECs.

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 ECs sur les WPCB [34]. Le tableau 2 permet une bonne appréciation globale des enjeux pour chaque méthode.

Méthode	Coût	Performance thermique	Complexité	Réutilisabilité des ECs
Laser [10]	Élevé	Excellente	Élevé	Excellente
Air chaud [15]	Faible	Faible	Faible	Moyenne
Air chaud + tubes [29]	Moyen	Bonne	Moyenne	Bonne
Infrarouge (IR diffus) [32]	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 en termes d'intégration et de sécurité. 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. Vis-à-vis de la littérature, il nous est difficile de trancher sur une solution. Une étude plus poussée sera présentée sur ce choix dans la suite du rapport.

3.3.4 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. [34]. Certaines de ces méthodes sont compatibles avec une industrialisation et/ou permettent le retrait d'une variété d'ECs définis. 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 (THD), tandis qu'une force horizontale serait plus efficace lors de l'enlèvement des dispositifs montés en surface (SMD)s.

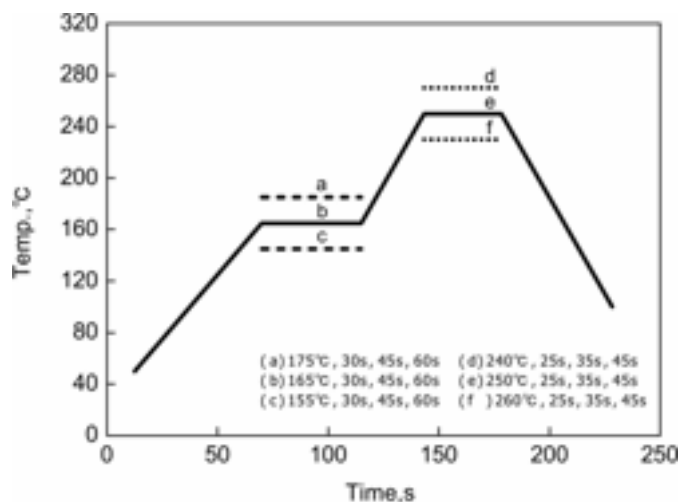


FIGURE 6 – Impact température brasage ECs

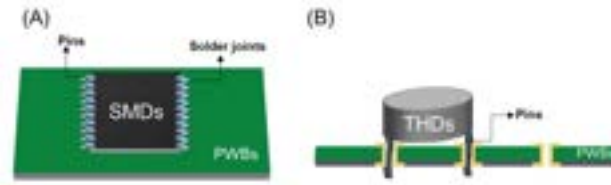


FIGURE 7 – Les deux types de dispositifs pour les ECs : (A) SMD et (B) THD

D'autre part, au sein même d'un type d'EC (THD vs SMD), le mécanisme utilisé peut grandement varier. Si nous nous intéressons aux SMDs, les plus petits ECs 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 de l'EC 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'accroît avec l'augmentation de l'angle de pliage des broches [31]. Ainsi, le bon désassemblage des ECs va dépendre des ECs 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 ECs ainsi que leur type dans certains cas.

Comparatif des différentes méthodes de désassemblage

Le tableau 3 ci-dessous permet de comparer les différentes méthodes de désassemblage trouvées dans la littérature.

Technique	Application	Avantages	Inconvénients
Désassemblage flexible [10] [11]	Multi-composants	Très flexible, automatisable	Systèmes complexes et coûteux
Aspiration [8]	Composants SMD	Simple, peu coûteux	Limité aux ECs légers
Mâchoires parallèles [8] [31]	Composants THD	Retrait précis, force modulable	Moins adapté aux petits ECs
Micro-préhenseur à vide [24]	Micro-SMD	Précis, adapté aux ECs fragiles	Système complexe et coûteux
Système vibratoire [29]	ECs variés	Rapide, automatisable	Inefficace pour certains ECs

TABLE 3 – Résumé des techniques de désassemblage

Les différentes solutions présentées sont plus ou moins complexes. Au vu du temps et des moyens que j'ai à ma disposition, j'ai dû rapidement faire le choix de simplifier le problème. Ainsi, j'ai choisi de me concentrer sur les ECs que l'on trouve en majorité sur les cartes électroniques de nos jours et qui représentent un intérêt pour la récupération. Cette limitation dans le panel d'ECs existant sur les cartes électroniques était nécessaire dans le cadre du stage, mais pourra par la suite être élargie. Ce choix m'a ainsi permis de cibler les ECs SMDs qui sont de plus en plus utilisés et qui seront en termes de répétabilité plus fiables à la récupération. J'ai également fait le choix d'évincer les micro-composants qui ne représentent pas un intérêt suffisant à la récupération, autant d'un point de vue environnemental qu'économique. Ainsi, 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. La technique micro-préhenseur à vide et la technique mâchoire parallèle sont par ailleurs écartées au vu du choix présenté en amont. Ainsi, il nous reste la méthode par vibration et par aspiration. La différence entre les deux, au vu des objectifs que nous avons, est la rapidité, la simplicité et la répétabilité. La rapidité ne fait pas partie de nos critères majeurs actuels, ainsi j'ai fait le choix de m'orienter vers la technique de désassemblage par aspiration qui est meilleure vis-à-vis des deux autres critères. Ce choix est propre au stage et aux restrictions qu'il incombe.

3.3.5 Test et qualification

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

Évaluation de la durée de vie résiduelle

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 EC 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 [19], 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 ECs 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 EC 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 [19] propose l’utilisation d’une caméra infrarouge, permettant d’avoir un visuel sur les températures que subissent les ECs 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 EC, son historique d’utilisation, son exposition à l’humidité ou encore les températures auxquelles il a été soumis. Ces données, s’il est possible de les collecter, permettrons ensuite d’évaluer sa fiabilité une fois l’EC récupéré.

Test de bon fonctionnement

Afin de détecter les défauts d’un EC, 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 de l’EC 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 (annexe 35) recense les critères de réutilisation des ECs ainsi que les options de recyclage disponibles. Ces vérifications permettent de s’assurer que l’EC 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 de l’EC.

3.3.6 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 ECs. L’article [33] présente notamment une structure de contrôle permettant de déterminer la meilleure stratégie de démantèlement du PCB. Dans la suite du rapport, nous présenterons les différentes solutions qui ont été retenues suite à cet état de l’art.

3.4 Quels ECs cibler pour quels impacts ?

L’un des objectifs de l’état de l’art était par ailleurs d’étudier l’impact des ECs en termes de fabrication, mais aussi de se renseigner sur l’intérêt de la récupération en fonction des ECs ciblés. Nous nous intéresserons donc aux ECs qui seraient les plus intéressants à récupérer d’un point de vue économique, environnemental et sociétal.

3.4.1 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 [2] 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 [29] présente un cas concret de récupération d'ECs. 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 de la récupération 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 EC ou d'un ensemble d'ECs 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 de l'EC. Des entreprises telles que *Retronix* [20] ou encore *Resale components*[21] ont par exemple réussi à trouver du profit dans ce système en ciblant leur récupération sur des ECs spécifiques à haute valeur ajoutée, par exemple des microprocesseurs, sur des jeux de WPCBs identiques. 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 paramètres à considérer, néanmoins nous essayons de cibler des ECs qui ont un certain coût d'achat, ce critère nous permet d'enlever les ECs qui ne seraient pas financièrement rentables à revaloriser.

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

3.4.2 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 pourrait nous permettre de reprendre le contrôle sur nos pollutions liées à la fin de vie de nos équipements électroniques. L'article [26] défend ainsi ce paradigme et propose un modèle permettant de calculer le score de l'impact environnemental (EI) d'un produit en identifiant les matériaux contenus par ce dernier et en quelle quantité.

Dans une structure de pondération par défaut, une pondération de 40% est attribuée à la santé humaine, 40% à la qualité des écosystèmes et 20% à la consommation de ressources. Le résultat final est exprimé sous la forme d'un score unique (indicateur) qui reflète l'impact environnemental global en agrégeant les trois catégories de dommages. 1 Pt représente un millièème de la charge environnementale annuelle d'un habitant européen moyen. Les scores Eco-Indicator utilisés dans ce système correspondent à l'impact lié à la phase de fabrication des matériaux.

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 5 ci-dessous les scores EI de certains matériaux. Il est alors possible de voir que l'or présente un score EI très élevé, signifiant un fort impact environnemental. Toutefois, son utilisation se limite à de très faibles quantités. Ainsi, les ECs 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 ECs, 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.

Matériau	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

3.4.3 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 ECs contenant des CRMs, tels que les condensateurs électrolytiques au tantale, représente un objectif conséquent.

3.4.4 Focus sur des ECs ciblés

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 ECs. Ainsi, le tableau 6 ci-dessous recense les informations connues sur les ECs les plus répandus afin d’avoir une idée générale de l’attractivité que peut représenter la récupération de différents ECs.

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, tantale (métal critique)	Extraction du tantale problématique (éthique/environnement), zones de conflit	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 ECs selon leur composition, impact environnemental et économique

Au vu des informations que j’ai pu trouver et que je recense dans le tableau 6, nous pouvons voir que les ECs intégrés sont les parfaits candidats pour la récupération. En effet, par leur intérêt économique, leur durée de vie, mais également leur impact environnemental, ils remplissent toutes les cases pour susciter notre intérêt à la récupération. Néanmoins, ils peuvent se révéler difficiles à tester. Dans le cadre du stage, la thématique de test est limitée et ne pourra permettre d’assurer le test de ce type d’EC. Cependant, le laboratoire souhaite également développer cette thématique dans le futur. Ainsi, j’ai fait le choix de récupérer ces ECs, même si, dans l’état, je ne pourrai les tester. L’objectif est de permettre leur récupération afin que le test de ces derniers puisse être étudié par la suite. Afin de tout de même avoir une certaine indication sur l’endommagement des ECs au cours de la récupération, j’ai également choisi de cibler les capacités électrolytiques ou encore au tantale qui représente un intérêt pour l’environnement. Dans certains cas, leur récupération peut également être intéressante économiquement parlant, mais du point de vue de leur durée de vie, les capacités électrolytiques ne sont pas forcément fiables du fait de l’évaporation des gaz les contenant. Néanmoins, le simple fait de la récupérer et d’avoir des informations sur la capacité restante de cette dernière est intéressant et permettra d’avoir plus d’informations sur le potentiel de récupération de ces ECs.

3.5 Applications prometteuses

À travers cet état de l’art, différentes applications ont pu être parcourues [11], [24], [28], [13], [33], [10], [8], [12].

Outre ces cas d’études, certaines entreprises se sont également spécialisées dans la récupération d’ECs spécifiques. *Retronix* favorise, par exemple, la réparation et la réutilisation de BGAs. Cette expertise permet à leurs clients de s’approvisionner en ECs sans être impactés par un facteur lié à une crise ou à une pénurie, etc.[20]

Reuse Component rachète des jeux de WPCB afin de récupérer et de revaloriser les ECs 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 ECs 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.

3.6 Conclusion État de l'art

La récupération d'ECs 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 [25] :

- 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 ECs 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 m'a permis d'obtenir une vision globale des problématiques liées aux DEEE. Par ailleurs, j'ai pu explorer les différentes initiatives déjà engagées en matière de systèmes automatisés pour la récupération des ECs. Nous pouvons cependant relever le peu d'informations détaillées pour les différents systèmes mis en place. Ce manque d'informations a rendu mon étude complexe et m'a demandé des tests supplémentaires afin d'avoir plus d'informations sur l'intégration des différentes solutions.

D'un point de vue organisationnel, j'ai fait le choix de recentrer mon travail sur les thématiques de dessoudage et de désassemblage, en ciblant un jeu de cartes électroniques spécifiques et un ensemble d'ECs bien définis. Suite à ce choix, j'ai pu identifier les ECs présentant un intérêt particulier pour la récupération.

En somme, les objectifs du stage s'orientent vers la mise en place d'un banc flexible automatisé de récupération d'ECs, dans une optique de revalorisation maximale de ces derniers. Cette démarche pourrait permettre au CEA de réutiliser des ECs récupérés sur des rebuts pour des prototypes. Elle marque aussi un pas vers le développement d'une dynamique autour de la récupération d'ECs. L'objectif pour le laboratoire sera ensuite d'affiner les protocoles de test afin de garantir la fiabilité des ECs récupérés. Ce projet s'inscrit pleinement dans le contexte du marché naissant de la revalorisation des déchets électroniques. D'autre part, l'un des objectifs sera également de rendre le projet open source. À ce jour, il n'existe pas de station de récupération automatisée facilement implémentable. Ainsi, rendre possible l'accès à un outil tel que celui-ci serait intéressant pour les personnes voulant se tourner vers cette dynamique.

4 Description des méthodes utilisées

À présent que l'état de l'art a été mené et que les objectifs du stage ont été décrits, nous allons nous intéresser aux différentes méthodes et choix que j'ai faits afin de mener à bien la conception du système automatisé de récupération d'ECs.

4.1 Méthode organisationnelle

Pour structurer mon stage, j'ai mis en place un diagramme de GANTT afin d'anticiper les temps d'attente, repérer les points durs et garder un fil conducteur. Tout au long du stage, j'ai contrôlé et ajusté ce diagramme pour suivre mon avancement, détecter d'éventuels retards et, si nécessaire, faire des choix de simplification pour gagner le temps manquant.

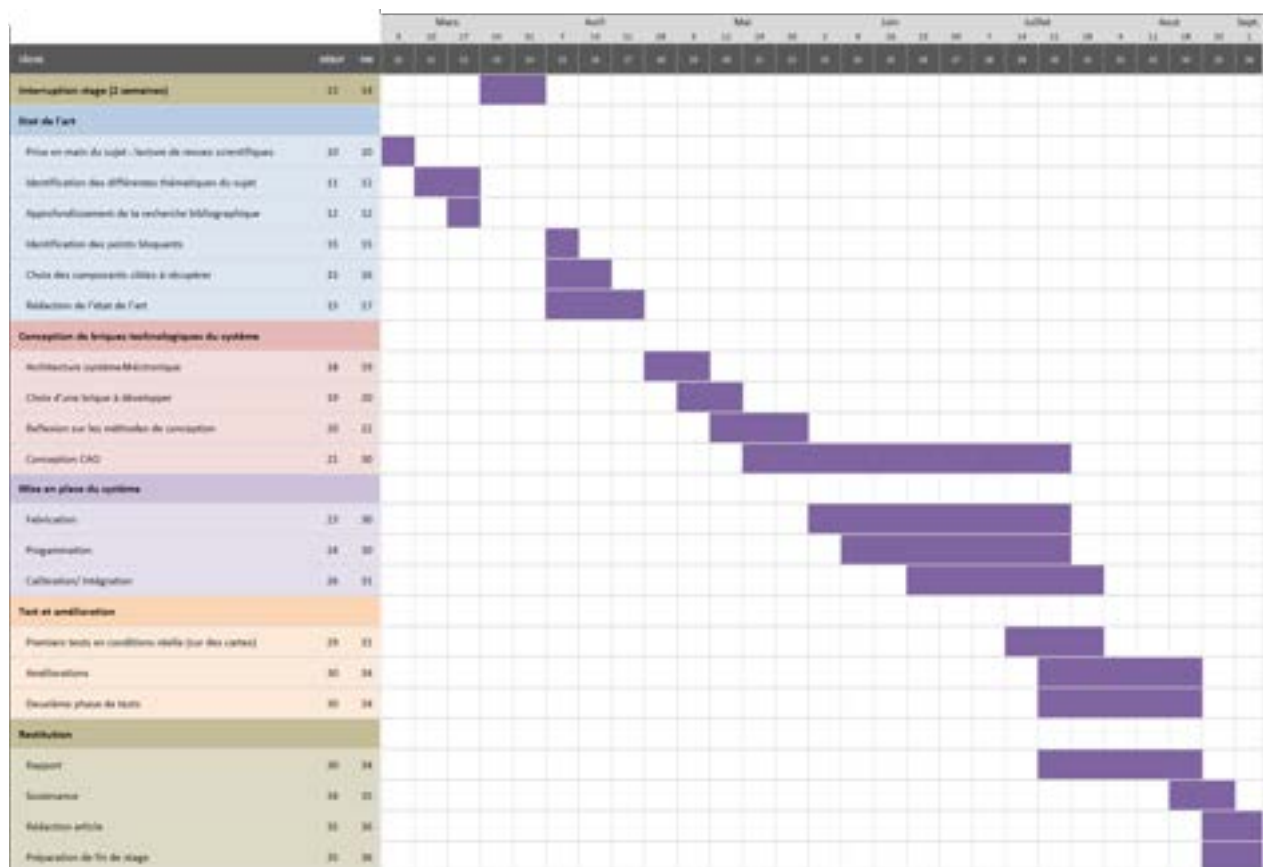


FIGURE 8 – Diagramme de GANTT

D'autre part, des points de stage hebdomadaires avec mes tuteurs m'ont permis de régulièrement restructurer mes idées et partager mes avancées avec ces derniers. Cet exercice m'a grandement aidé d'un point de vue organisationnel, mais aussi dans mes réflexions et mes objectifs. En effet, cela m'a permis de prendre du recul de manière régulière et de savoir où j'en étais avec des objectifs clairs.

4.2 Cahier des charges / Analyse fonctionnelle simplifiée

Suite à l'état de l'art et aux choix que celui-ci a amené, j'ai pu construire un cahier des charges que l'on peut retrouver ci-dessous table 7. L'objectif ici était de clarifier les fonctions clés que doit remplir la station de récupération.

Fonction	Critère	Importance
Dessoudage permettant le réemploi	Fonte de l'étain en suivant les caractéristiques de température utilisé pour le brasage des ECs	3
Désassemblage	Désolidarisation de l'EC de la carte : la tête de préhension se positionne au-dessus de l'EC , puis procède à son extraction du PCB maintenu en place par un support .	3
Récupération de l'EC	Dépose de l'EC dans une zone définie	1
Test de l'EC	Test performant de bonne conformité des ECs	2
Non endommagement de l'EC à récupérer	Température à ne pas dépasser, courbe de température	3
Non endommagement des ECs alentours	Seuil de température à ne pas dépasser autour de l'EC cible (éviter chauffe à répétition)	2

Fonction	Critère	Importance
Récupération automatisée de plusieurs ECs	Mobilité de la tête de désassemblage en 3D : atteindre différentes positions + connaissance des positions des ECs cibles	2
Impact environnemental	Impact de récupération < fabrication. Éviter dégagement gazeux, $T^\circ < 280^\circ\text{C}$ [34], gestion des gaz	3
Traiter des PCB variées	taille et forme varié	3
Structure résistante aux T°	La structure doit résister à des températures pouvant aller jusqu'à 300°C	3

TABLE 7 – Cahier des charges fonctionnel

Cette formalisation du besoin m'a ensuite permis d'analyser les fonctions à satisfaire et de faire des choix afin d'avoir des objectifs réalisables et pertinents.

Nous pouvons alors recenser plusieurs fonctions que je vais à présent présenter, accompagnées des solutions fonctionnelles associées.

- Désassemblage : la solution retenue avec l'état de l'art est l'aspiration. La force d'aspiration doit être suffisante pour avoir un retrait de l'EC. Cette dernière est liée à l'aspiration générée par la station mais également par le diamètre de la ventouse. Afin d'y parvenir, il est nécessaire d'avoir en plus de l'aspiration un effet de succion combiné à un effort dans le sens du retrait. Pour y parvenir, il est possible d'utiliser un pad flexible pouvant être assimilé à une ventouse lorsqu'elle est combinée à une aspiration. En complément, il faut également appliquer une force de retrait verticale, vers le haut. Par ce choix de solution, je me dirige alors vers un retrait en série identifiable comme un pick & place inversé.
- Combiné à cette fonctionnalité, il est aussi nécessaire de connaître les ECs ciblés. Au vu du temps à ma disposition, mais aussi du champ de technicité du laboratoire, je n'ai pas fait le choix de m'orienter vers de la vision. La solution choisie est de se servir des fichiers de fabrication, qui donnent des informations sur la position des ECs par rapport à un point de la carte. Avec ces informations, il est alors possible de référencer le premier EC à récupérer par rapport à la référence de notre système et d'en déduire la position des autres ECs à condition que les axes de la machine soient alignés avec ceux du PCB.
- Automatisation : L'objectif de la station de récupération est de pouvoir récupérer plusieurs ECs sans intervention de l'utilisateur entre le premier EC récupéré et le dernier. Le choix que j'ai fait pour le désassemblage conditionne ainsi grandement l'automatisation du fait que l'on s'oriente vers un retrait en série. Ainsi, mon système doit être capable de se déplacer en x et y pour permettre la récupération et la dépose de différents ECs, et également en z pour, entre autres, assurer la force de retrait nécessaire au désassemblage des ECs ainsi que l'évitement des autres ECs lors du déplacement de la tête. La solution que j'ai choisie a alors été d'utiliser la structure d'une imprimante 3D obsolète.
- Dessoudage : suivi de la courbe de température utilisée pour le brasage des ECs.

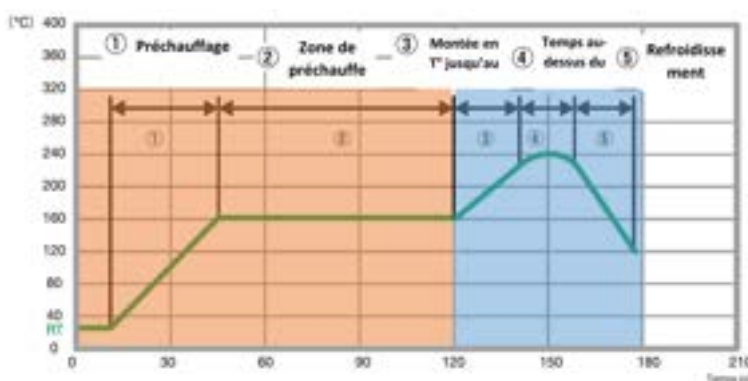


FIGURE 9 – Courbe de température dessoudage

On peut alors dénombrer deux zones clés, le préchauffage avec son plateau (en orange sur la courbe) ainsi que le chauffage avec lequel l'on atteint la température de fusion du brasage (en bleu sur la courbe). D'après la littérature, la température de préchauffe varie entre 150°C et 200°C tandis que la température de chauffage varie entre 250°C et 260°C (34). Ainsi afin d'homogénéiser la préchauffe et de paralléliser légèrement la récupération,

Les différentes fonctionnalités clé ainsi que les solutions associées sont résumées ci-dessous (figure 10).

Figure 10 illustre le processus automatisé de récupération des ECs, centré sur le **Système automatisé de récupération d'ECs**. Ce système est composé de plusieurs modules fonctionnels :

- Dessoudage: régulation en température** : Gère le processus de soudure, soutenu par un **Système de chauffe précis et localisé (A)** (fer à souder) et un **Système de préchauffe (B)** (plaque IR). Une courbe de température **Caractéristique T° ECs** est présentée, montrant les phases de chauffage, maintien à température, refroidissement et fin de chauffe.
- Automatisé** : Intègre une **Structure contrôlée en déplacement** (imprimante 3D) et une **Interface** (Python).
- Désassemblage** : Gère l'extraction et le lavage de l'EC, le contrôle précis de sa position, la mise en position du PCB et l'utilisation d'un support référencé de PCB.

En utilisant une approche basée sur des fonctions à remplir, j'ai pu avancer de manière méthodique afin de trouver des solutions avec ce que j'avais à disposition dans le laboratoire et également avec ce que je pouvais trouver sur le marché.

- 28

4.3 Méthodes de conception

Une fois les choix fonctionnels faits, j'ai pu commencer la conception de mes différentes briques fonctionnelles ainsi que les éléments permettant leur intégration. Pour chaque élément, la méthode utilisée a été, dans un premier temps, d'identifier les fonctions et les contraintes que doivent avoir mon élément. Dans un second temps, j'ai procédé en me renseignant sur les possibilités existantes afin de remplir les différentes fonctions identifiées en amont. Pour cette deuxième étape, j'ai réalisé des recherches dans la littérature, mais également auprès de collègues du laboratoire pour confronter mes idées et les améliorer. Dans un troisième temps, j'ai regroupé mes idées sur papier en dessinant dans le but d'avoir une meilleure visualisation de la solution envisagée et d'anticiper les problématiques qui pourraient apparaître. Une fois convaincue par la solution, un quatrième temps était consacré à la conception sous SolidWorks. Dans cette étape, j'ai pris garde à réaliser les assemblages dans leur entièreté afin d'anticiper les problèmes liés au montage des vis ou des interférences que je n'avais pas envisagées en amont. Une fois le modèle validé en termes de fonction, je me suis préoccupée dans un second temps des contraintes de fabrication. J'ai par exemple réalisé des pièces par fraiseuse à commande numérique, ce qui m'a emmené vers une conception restreinte par les possibilités offertes par la fraiseuse. Le choix du plan de positionnement de la pièce était alors primordial. Un travail sur les angles intérieurs fonctionnels qui nécessitent d'être vifs a dû être réalisé en incorporant une contre-dépouille par exemple.

5 Description des réalisations

Afin de réaliser mon système de récupération, j'ai dû concevoir et fabriquer des éléments fonctionnels et des éléments d'intégration. J'ai également dû mettre en place une interface Python permettant de faire l'interface homme-machine et le contrôle des différents éléments. L'intégration des différents thermocouples permettant de mesurer la température en différents endroits ou encore la commande de la station d'air chaud et d'aspiration a nécessité différentes réalisations que nous allons à présent détailler.

5.1 Conception et fabrication

5.1.1 Support de carte

La première réalisation que j'ai pu faire après mon état de l'art a été le support de carte. L'objectif principal de ce dernier est de maintenir en position une carte électronique quelles que soient sa forme et sa taille (dans une certaine plage). En d'autres termes, pouvoir prendre en charge des cartes qui ne soient pas uniquement rectangulaires.

En termes de contraintes, nous recensons principalement les contraintes liées à la taille et à la température. La contrainte de taille est directement liée à la taille de l'imprimante 3D. Cette dernière possède un plateau sur lequel je voudrais venir fixer le support de carte. Ce plateau se déplace selon l'axe y et induit une contrainte de taille due à la structure de l'imprimante l'environnant. Ainsi, le support de carte doit être inférieur à 250mm x 250mm en largeur et en profondeur (voir figure 11). Au niveau de la hauteur, nous n'avons pas de contrainte forte, ainsi ce n'est pas notre préoccupation phare.

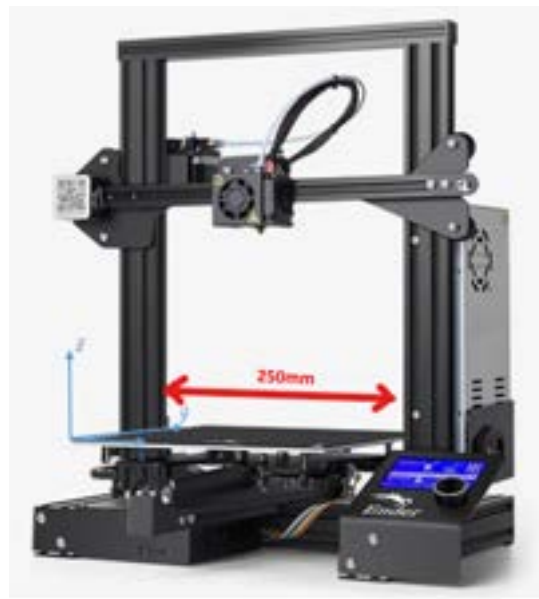


FIGURE 11 – Imprimante Ender 3

En termes de température, la structure doit pouvoir résister à des températures pouvant atteindre les 300°C. Cette contrainte a ainsi eu un effet direct sur le choix du matériau et par suite sur la conception et la fabrication. La structure ne sera pas soumise à d'autres contraintes que la température, ainsi, je me suis orienté vers de l'aluminium.

• Conception

Le système est constitué de quatre profilés assurant la translation de quatre bras. Sur ces quatre bras sont positionnés des supports visant à maintenir la carte par compression entre ces supports et la carte en venant serrer les bras sur lesquels ils sont positionnés. L'image 12 illustre le système.



FIGURE 12 – Support carte

• Intégration du pistolet à air chaud et à aspiration

L'intégration du système est assez simple. En effet, quatre trous se situant dans les quatre coins de la plaque mobile existante nous permettent de venir fixer le système à cette dernière.

• Fabrication

Étant donné que le matériau que j'ai sélectionné est l'aluminium, il est nécessaire d'usiner les différents éléments. On dénombre alors les quatre barres ainsi que les petits supports. Les profilés ont eux été récupérés d'un ancien projet. Pour l'usinage, je me suis orienté vers une fabrication alliant une fraiseuse à commande numérique et une fraiseuse conventionnelle pour les trous ne pouvant être réalisés par la première méthode au vu de la surface d'usinage choisie. Ainsi, une réflexion sur la surface d'usinage a dû être faite. L'identification des surfaces utiles m'a alors permis de faire ce choix. Nous pouvons retrouver ces dernières en bleu sur l'image 13. La surface d'usinage pour cette pièce est celle sur laquelle repose la pièce sur l'image 13.

D'autre part, le choix de la fraise au vu de l'épaisseur de la pièce devait être d'au moins 2mm du fait de la longueur utile de coupe de la fraise. Cette caractéristique a un impact direct sur les congés intérieurs usinables. En effet, ces derniers doivent avoir un rayon supérieur ou égal à celui de la fraise. Cette contrainte est problématique lorsque l'on souhaite avoir des coins à 90° ce qui était mon cas. Afin de pallier cela, j'ai rajouté des contre-dépouilles dans ces zones critiques. Le support de carte fabriqué est alors visible figure 14.

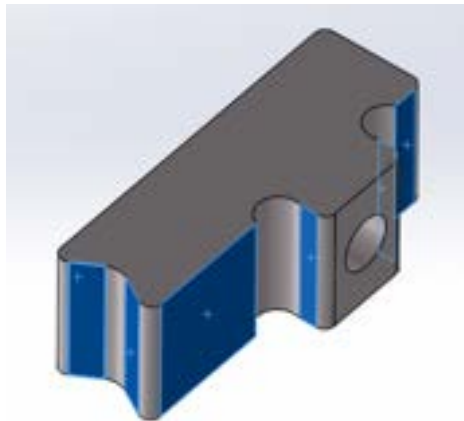


FIGURE 13 – Pièce support carte



FIGURE 14 – Support carte conçu et fabriqué

5.1.2 Support plaque IR

Afin d'assurer l'intégration de la plaque IR sur l'imprimante, j'ai réalisé un support permettant de fixer l'ensemble sur la plaque mobile de l'imprimante. À nouveau, j'ai réutilisé des trous de vis déjà existants pour fixer le système.

• Conception

Le support devant simplement servir d'interface de fixation, sa conception s'est révélée assez basique. Le gros de la réflexion n'a pas été fait au regard des contraintes fonctionnelles, mais au regard de la fabrication. L'objectif était principalement de trouver une conception permettant de faciliter au mieux la fabrication. J'ai donc fini par choisir une solution composée de deux plaques liées par des entretoises. Cette solution est visible sur la figure 15. La pièce en accordéon observable dans l'assemblage était fournie avec la plaque IR lors de l'achat.



FIGURE 15 – Support plaque IR

• Fabrication

Grâce aux choix de conception que j'ai pu faire, la fabrication s'est limitée à la découpe de deux plaques en aluminium que j'ai pu faire à l'aide d'une scie à métaux et d'une fraiseuse conventionnelle pour effectuer les différents trous. Le système intégré sur l'imprimante 3D est visible sur l'image 16

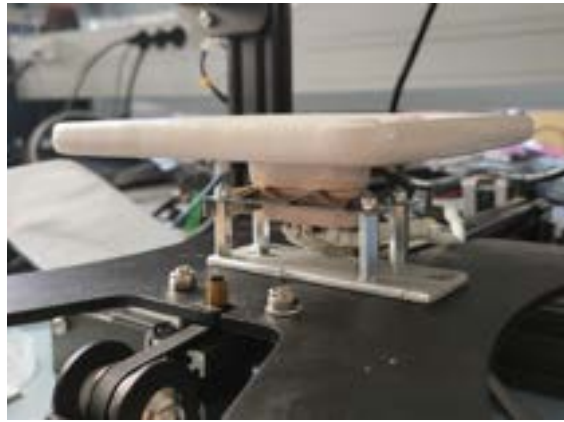


FIGURE 16 – Support plaque IR fabriqué

5.1.3 Intégration du pistolet

Le dernier élément à intégrer parmi les différentes briques fonctionnelles est le pistolet. L'intégration de ce dernier s'est révélée la plus complexe de par les fonctionnalités que je recherche.

Le pistolet doit être fixé sur le support qui était à l'origine utilisé pour fixer la tête d'impression. Ce support est lui-même commandable en position selon l'axe \bar{x} et \bar{y} . En plus de cela, je souhaite pouvoir récupérer des ECs variés. Et qui dit EC varié, dit également hauteur variée. En effet, une capacité électrolytique sera bien plus haute qu'un composant intégré. Pour pallier cette contrainte, ma solution, illustré sur la figure 17, est de permettre une translation du pistolet selon l'axe \bar{z} . L'objectif étant que lorsque le pistolet n'est pas en contact avec un EC (position repos), il repose sur une butée. Puis, lorsque le pistolet rentre en contact avec un EC, grâce à une translation selon \bar{z} du support de tête d'impression, le pistolet viendra reposer sur ce dernier alors que le support continuera lui sa descente vers une hauteur correspondant au supposé contact du pistolet avec la carte électronique. Ceci est rendu possible par une liaison glissière entre le support et le pistolet. Grâce à un capteur de fin de course, qui détecte lorsque le pistolet ne repose plus sur la butée, je serai en capacité de déduire la hauteur à laquelle le pistolet est rentré en contact avec l'EC. Cela nous permettra d'y revenir par la suite et de soulager la carte du poids influé par la masse du pistolet.

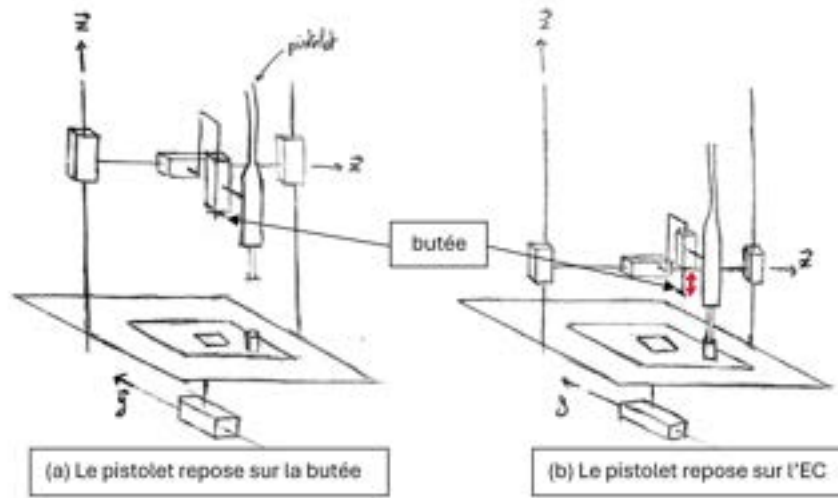


FIGURE 17 – Système de récupération non contraint en hauteur d'EC

D'autre part, le pistolet est équipé d'un système de ressort permettant le désassemblage de l'EC cible une fois celui-ci dessoudé. Ce phénomène est rendu possible lorsque la force d'aspiration \vec{F}_A est supérieure à la force du ressort. Concrètement, l'aspiration est mise en route, générant \vec{F}_A ; le pistolet remonte alors, contraignant le ressort, qui développe une force \vec{F}_R telle que $\vec{F}_R < \vec{F}_A$. Cette relation décrit le fait que la buse du pistolet reste accrochée à l'EC malgré le fait que le pistolet remonte en générant une force contraire à \vec{F}_A en permettant le chargement du ressort afin d'avoir une force d'extraction globale inférieure à \vec{F}_A . Au début du dessoudage, la force liée à la brasure \vec{F}_B est supérieure à \vec{F}_R . Lorsque la brasure passe à l'état liquide, la relation devient $\vec{F}_A > \vec{F}_R > \vec{F}_B$, ce qui permet le désassemblage de l'EC. La figure 18 illustre ce concept.

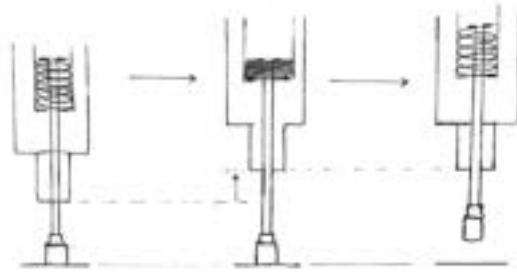


FIGURE 18 – Fonctionnement du désassemblage

La solution pour assurer le désassemblage est alors présentée en étapes :

- Positionner le pistolet au-dessus de l'EC à récupérer.
- Translater selon $-\vec{Z}$ pour atteindre la hauteur correspondant au contact du pistolet avec la carte électronique dans le cas où il n'y a pas d'EC s'interposant (= hauteur min d'un EC).
- Retrouver la hauteur h de l'EC cible à l'aide du capteur de fin de course (étant donné que la surface supérieure de l'EC aura une position selon z supérieure à celle de la carte, le déplacement du pistolet dans sa glissière aura déclenché l'activation du capteur de fin de course).
- Commencer le cycle de chauffe de dessoudage avec la mise en route de l'aspiration.
- Déplacement selon \vec{Z} en $h + \delta$. δ étant la translation supplémentaire pour charger le ressort.
- Désassemblage par relâchement du ressort une fois la brasure fondue.

• Conception

Notre objectif en termes de conception est d'assurer une liaison glissière selon \vec{z} entre le pistolet à air chaud et le support (anciennement de la tête d'impression de l'imprimante 3D). S'ajoute à cela l'intégration du capteur de fin de course.

Afin d'assurer la liaison glissière, la solution technologique retenue est l'utilisation d'un guidage linéaire composé d'un rail prismatique et d'un patin. Le rail est alors en liaison encastrement avec le support de tête d'impression, tout comme le patin avec le pistolet. En somme, deux éléments sont nécessaires dans le but d'assurer ces liaisons.

Éléments de liaison entre le support de la tête d'impression et le rail : Afin d'assurer cette liaison, la pièce doit d'une part se fixer sur le support et d'autre part sur le rail. En utilisant les trous déjà présents sur le support et le rail, j'ai pu concevoir la pièce voulue tout en essayant de limiter les efforts générés dans la pièce.

Éléments de liaison entre le patin et le pistolet : Le patin présente une surface plane avec quatre trous de fixation taraudés que j'ai mis à profit pour fixer l'élément de liaison au patin. La difficulté pour cette liaison se trouve avec le pistolet. Ce dernier est un cylindre non régulier, ce qui complique la conception. On recense également une gorge. Ainsi, la pièce conçue intègre un collet en demi-sphère permettant d'y caler la gorge du pistolet. Avec cette solution, nous avons à ce stade une liaison rotule. Afin de supprimer ces degrés de liberté tout en permettant d'ajuster l'inclinaison du pistolet par rapport au rail et en s'adaptant à la non cylindricité du pistolet, j'ai opté pour une pièce en deux parties avec quatre serrages distincts. De plus, l'intégration de trois vis positionnées à 120° le plus éloignées possible de la liaison rotule me permet d'ajuster finement l'inclinaison afin de s'assurer que le pistolet soit bien parallèle au rail et par suite limiter les efforts. La solution est visualisable image 19.

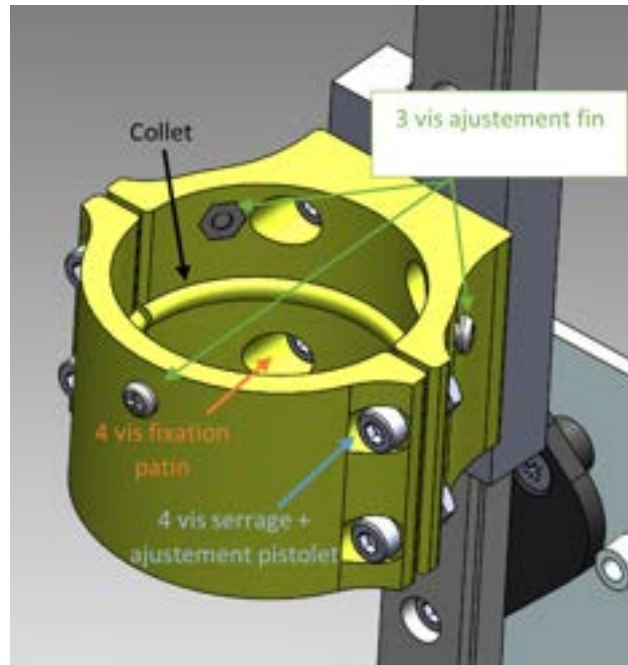


FIGURE 19 – Éléments de liaison entre le patin et le pistolet

Élément de fixation du capteur de fin de course : Le capteur de fin de course doit donner des informations sur la position du pistolet par rapport à la butée. En somme, le problème revient donc à déduire la position du patin. La pièce venant intégrer le capteur peut alors être positionnée sur le rail avec pour objectif de détecter les mouvements du patin. Afin que le capteur ne soit pas en continu soumis au poids du pistolet, celui-ci est positionné tangent au mouvement du patin. Ainsi, un ajustement précis est nécessaire afin que le patin soit suffisamment proche du capteur pour le déclencher sans pour autant être trop proche et bloquer son mouvement. Ainsi, l'ajustement de la position est rendu possible par des trous oblongs.

Les différents éléments de la conception du support sont illustrés sur l'image 20 ci-dessous.

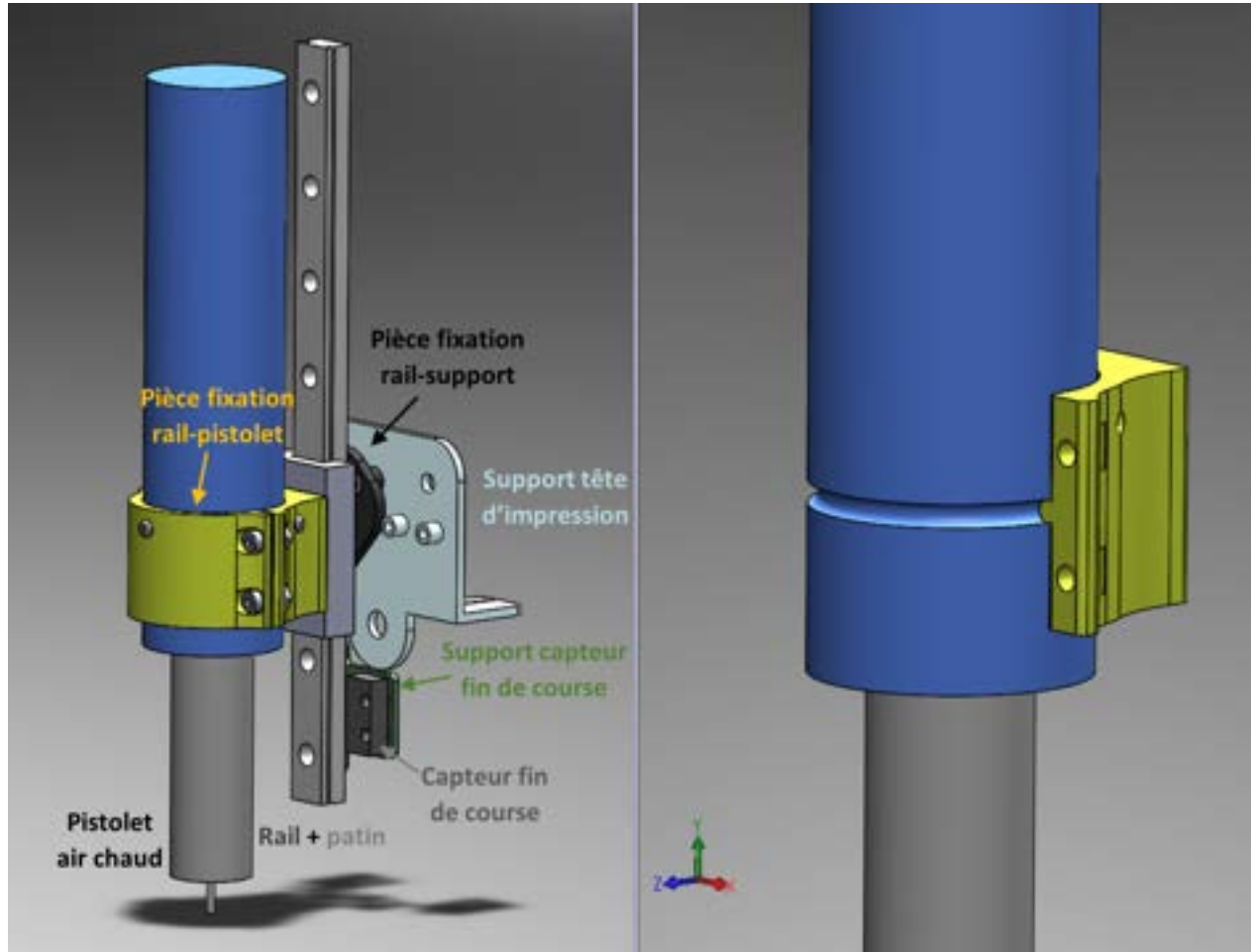


FIGURE 20 – Éléments d'intégration du pistolet

• Fabrication

Éléments de liaison entre le support de la tête d'impression et le rail : pour la fabrication, la pièce ne sera pas exposée à des températures critiques, ainsi j'ai pu m'orienter sur l'impression 3D. Le choix du type de filament a lui été induit par les efforts qui seront appliqués sur la pièce. Afin d'éviter des déformations, j'ai utilisé du PLA renforcé en fibres de carbone.

Éléments de liaison entre le patin et le pistolet : Cet élément est lui davantage exposé à la température. Néanmoins, cette dernière nous permet tout de même d'utiliser l'impression 3D, mais cette fois en utilisant du filament ASA. Ce dernier a une résistance thermique allant jusqu'à 93°C contre 50°C pour le PLA. La pièce sera exposée à une température qui ne devrait pas dépasser les 90°C mais s'en approchant, ainsi, il correspond à notre besoin dans notre cas d'étude.

Élément de fixation du capteur de fin de course Ce dernier élément n'est pas soumis à des efforts importants mais à des température équivalent à la pièce précédente. Ainsi, je me suis à nouveau tourné vers l'impression 3D en utilisant de l'ASA comme filament.

Le système fabriqué et intégré sur l'imprimante 3D est présenté sur l'image 21 ci-dessous.



FIGURE 21 – Intégration du pistolet

5.2 Intégration des thermocouples

5.2.1 Thermocouple EC cible

Afin de suivre les caractéristiques de température définies en amont, il nous est nécessaire de mesurer la température de l'EC dans le but de réguler la consigne en fonction de la courbe cible et du retour du thermocouple. La mesure de température doit alors être suffisamment précise pour réguler convenablement la consigne du pistolet à air chaud. Un positionnement trop éloigné de la zone de chauffe pourrait déclencher une surchauffe du pistolet qui essaierait de chauffer toujours plus afin de coller à la courbe sans y parvenir puisque le thermocouple serait mal placé. Ainsi, il est nécessaire d'avoir une mesure précise et localisée dans un certain secteur autour de l'EC. Pour jauger les variations de température autour de l'EC cible, j'ai pu utiliser une caméra IR qui m'a permis de définir une zone dans laquelle la mesure restait acceptable. La zone est entourée en noir sur l'image 22 ci-dessous. On y retrouve au centre la buse aspirante du pistolet dont la taille correspond à celle du plus petit EC récupérable. L'objectif était également d'observer la répartition de la température soumise à l'air chaud.

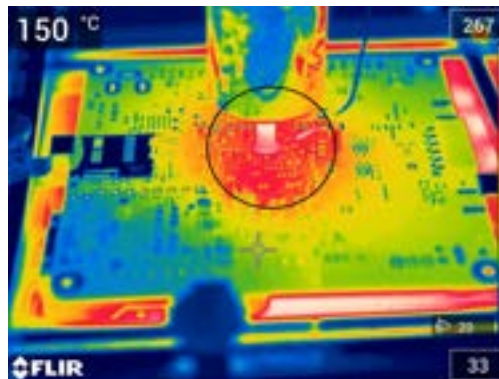


FIGURE 22 – Répartition température

Le thermocouple est fixé sur le pistolet, au plus proche de son extrémité, afin de contrôler au mieux la position de ce dernier. Le matériau sélectionné pour la réalisation de l'élément de fixation du thermocouple est l'aluminium car ce dernier sera exposé à de fortes températures. La pièce, en forme de bague, a été réalisée comme les précédentes, par fraisage. Le serrage de la bague est rendu possible par une légère déformation de l'aluminium. Ainsi, la bague doit être au préalable suffisamment bien ajustée ainsi que suffisamment fine pour permettre la déformation. Étant donné que cette pièce est fragile, j'ai fabriqué des pièces de maintien (cf figure 23) afin de ne pas déformer cette dernière lors de la réalisation de certains trous. L'image 24 ci-dessous, illustre l'élément d'intégration du thermocouple.

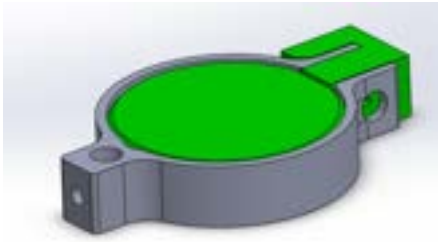


FIGURE 23 – Pièces de maintien pour la bague



FIGURE 24 – Bague pour intégration du thermocouple

5.3 Élément de dépose des ECs

Jusqu'à présent, les différentes réalisations concernaient l'identification, le dessoudage et le désassemblage des ECs. À présent, nous allons aborder la dernière fonction assurée par le système de récupération, qui est la dépose des ECs extraits. Dû à l'utilisation du flux et à la légèreté des ECs cibles, un simple arrêt de l'aspiration du pistolet ne permet pas une dépose des ECs. Il m'a ainsi été nécessaire de concevoir un élément pouvant permettre cette fonction. La solution que j'ai choisie est de concevoir une pièce en forme de peigne. L'écartement entre deux branches de ce dernier correspond au diamètre de la buse. L'EC étant plus grand, il est décollé de cette dernière et retombe dans un réceptacle. Comme ces éléments sont exposés à la chaleur, j'ai décidé d'utiliser de l'aluminium. Pour la fabrication, j'ai utilisé une découpe jet d'eau ainsi qu'une plieuse. La conception s'est alors orientée vers de la tôlerie. Afin de limiter le pliage, le système est décomposé en deux parties : le peigne et le réceptacle que l'on retrouve sur l'image 25 ci-dessous, ainsi que tous les éléments évoqués précédemment.



FIGURE 25 – Système de récupération d'EC

5.4 Commande du système de récupération

Intéressons-nous à présent à la commande du système de récupération. L'interface Python y joue le rôle de chef d'orchestre afin de diriger l'entièreté de la manœuvre de récupération. L'interface a le rôle de pont d'interactions entre l'utilisateur et la commande, mais également de métronome pour exécuter les bonnes actions au bon moment. Le plus gros du programme se concentre alors sur la commande de l'imprimante 3D. L'objectif est de déplacer le pistolet aux différents endroits clés de la récupération. L'autre élément à contrôler est la station Hakko qui elle-même régule l'alimentation de la chauffe et de l'aspiration du pistolet.

Le script Python est associé à un fichier de configuration afin de définir les différentes variables de base qui pourront être modulées par l'utilisateur au besoin.

Le schéma synoptique ci-dessous (figure 26) illustre les différentes interactions du script python.

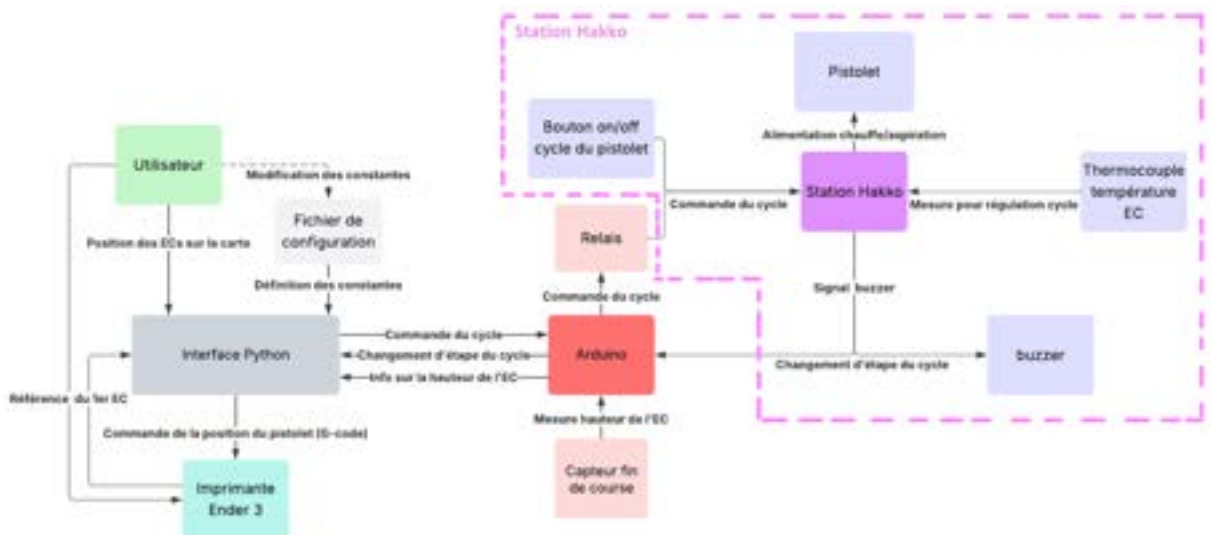


FIGURE 26 – Plan synoptique

5.4.1 Interface homme-machine

Le script Python joue le rôle d'interface avec l'utilisateur, il lui donne des informations pour le tenir informé des opérations en cours. Il permet par ailleurs de dialoguer avec l'utilisateur afin de récupérer certaines informations qu'il possède. En effet, comme décrit en amont, l'identification des ECs à récupérer est rendue possible grâce aux fichiers de fabrication de la carte qui contiennent la position des ECs présents par rapport à un coin de cette dernière. Ainsi, il nous est nécessaire de récupérer ces informations de position. Pour y parvenir, l'interface demande à l'utilisateur d'ouvrir le fichier Excel qu'il aurait préalablement rempli avec la position des ECs qu'il a ciblées pour la récupération. Un mode d'emploi de l'utilisation de la station de récupération est visualisable en annexe 6.2.

Grâce à l'interface homme-machine (IHM), nous pouvons récupérer le fichier Excel contenant la position des ECs cibles. Afin de faire le lien entre la référence de la carte et celle de l'imprimante, deux possibilités ont été envisagées. La première consiste à simplement référencer le support de carte par rapport au zéro de l'imprimante. Néanmoins, en termes de répétabilité, j'ai pu observer des variations de positionnement avec cette technique. Ainsi, au vu de la taille des ECs, cette incertitude n'était pas tolérable, ce qui m'a emmené vers la deuxième méthode. Cette dernière consiste à référencer la position du premier EC par rapport à l'imprimante et d'en déduire la position des autres ECs dans le repère de l'imprimante. Pour y parvenir, il est demandé à l'utilisateur de se déplacer directement avec la commande de l'imprimante 3D et de se positionner au-dessus du premier EC à récupérer. Une fois l'utilisateur satisfait, il valide la position et le script reprend son rythme en entamant la récupération de l'EC en question. Pour cette méthode, il est indispensable de combiner à la fois l'IHM Python avec le pilotage directe de l'imprimante 3D.

5.4.2 Commande de l'imprimante 3D

Le flowchart ci-contre (figure 27) illustre les descriptions à suivre.

La commande de l'imprimante 3D se fait via le port série par envoi de commande G-code. On retrouve alors plusieurs commandes type, comme la mise à zéro des axes de l'imprimante (G28).

Dans mon script Python, l'envoi de commande fait appel à une fonction qui transmet l'information à l'imprimante, puis attend que cette dernière ait fini son déplacement. De cette manière, l'envoi de commandes et leur réalisation sont synchrones. Sans cette précaution, l'imprimante stocke les commandes envoyées et les dépile au fur et à mesure au rythme des commandes transmises.

D'autre part, afin d'éviter que le pistolet rentre en contact avec un élément se trouvant sur son passage, une distance de sécurité est définie en hauteur (et éditable dans le fichier de configuration). Ainsi, avant tout mouvement, une commande demande à l'imprimante de s'y déplacer.

Le script Python est divisé en plusieurs parties, nous retrouvons l'initialisation où les différentes variables du fichier de configuration sont par exemple extraites. Dans cette première étape, l'imprimante est également initialisée, par exemple avec la commande G28 qui doit être faite à chaque début de programme afin de bien définir le zéro de cette dernière.

La suite du script représente alors le corps du programme, ce dernier est exécuté en boucle pour chaque EC à récupérer. À chaque itération, la position de l'EC cible est mise à jour ainsi que la position de dépose. Ainsi, chaque EC récupéré est déposé en une position incrémentale définie qui est par la suite référencée dans le même fichier Excel qui contenait la position des ECs à récupérer. Le corps de ce programme est alors majoritairement composé de commandes G-code pour l'imprimante.

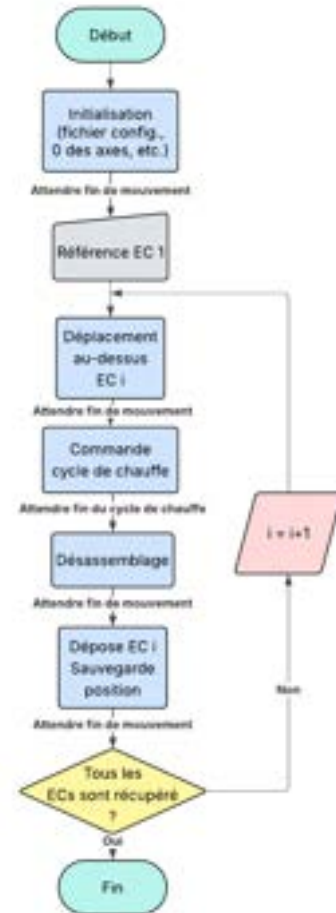


FIGURE 27 – Flowchart de la commande

5.4.3 Commande du pistolet

La commande du pistolet, du point de vue de l'interface Python, est simple : il suffit de lancer le cycle de chauffe une fois que le pistolet est en position pour le dessoudage. La station Hakko intègre en interne une programmation du cycle de chauffe. Une fois ce dernier réglé, il suffit de le lancer, avec l'interface Python, au bon moment. Il est également intéressant pour l'interface d'avoir un retour de la station Hakko afin de savoir à quel stade du cycle de chauffe ce dernier se situe.

Afin de commander l'amorçage du cycle et d'avoir un retour sur son statut, il a fallu ouvrir la station, nous permettant ainsi d'avoir accès aux différentes cartes électroniques y figurant. On peut retrouver en annexes 37 une image de la station ouverte ainsi que des modifications apportées à cette dernière.

La commande du cycle de chauffe se fait manuellement par pression d'un interrupteur à bouton poussoir. En somme, l'interrupteur au repos est ouvert et lorsque l'on appuie dessus, l'interrupteur se ferme et déclenche le cycle de chauffe. Par une seconde pression du bouton, le cycle s'arrête. Ainsi, afin de contrôler l'allumage du cycle électriquement parlant, il a fallu créer un interrupteur commandé. Pour ce faire, deux fils, ont été soudés en parallèle des deux bornes de l'interrupteur de la station. À l'aide d'un multimètre, il a été possible de vérifier la tension aux bornes de l'interrupteur lorsque celui-ci était fermé. Cette analyse a alors permis le dimensionnement d'un interrupteur utilisant un relais commandable en 5 V. L'objectif ici sera d'envoyer une consigne au relais afin de contrôler son activation. Pour avoir une solution facilement et rapidement implémentable, la liaison entre l'interface Python et la consigne du relais a été faite à l'aide d'une carte Arduino. Cette dernière est contrôlable par le port série depuis le code Python en utilisant la librairie *pyFirmata*. Ainsi, la broche de commande du relais est reliée à une sortie numérique de l'Arduino qui elle-même est contrôlée par le script Python. L'activation du relais permet alors de faire office d'interrupteur afin de connecter au besoin les deux fils du bouton poussoir préalablement soudé sur le relais.

Finalement, pour obtenir un retour sur l'étape du cycle de chauffe actuel de la station Hakko, je me suis servi du buzzer intégré. En effet, celui-ci s'active à chaque changement d'étape. Ainsi, savoir quand le buzzer est activé revient finalement à atteindre notre objectif. Par suite, deux fils ont été soudés en parallèle des bornes du buzzer. L'étude du signal électrique envoyé au buzzer afin de le commander m'a permis de voir que la commande est à l'état haut au repos. Une activation de ce dernier est alors faite par une consigne sous forme de signal pseudo-carrée variant à une certaine fréquence entre l'état haut (5V) et l'état bas (0V). Ainsi, une détection d'un front descendant m'a permis de savoir quand est-ce que ce dernier est activé.

L'un des fils soudé en parallèle des bornes du buzzer est relié à la masse de l'Arduino, quant à l'autre à une entrée GPIO numérique. L'objectif est alors d'espionner le signal transmis et de le transmettre à l'interface Python via le port série. En comptant le nombre d'activations du buzzer, il m'est alors possible de déduire l'étape actuelle du cycle de chauffe de la station et par suite de commander l'imprimante en conséquence pour assurer la bonne récupération des ECs.

6 Résultats obtenus

Au fur et à mesure du développement de la station de récupération, des tests de bons fonctionnements des sous-ensembles fonctionnels ont pu être testés et améliorés. L'intégration de nouveaux éléments a parfois été nécessaire afin de réaliser la fonction prévue par un élément. Dans cette partie, nous allons faire le point sur les éléments phares de la récupération pour finalement conclure sur les résultats globaux de la station de récupération.

6.1 Sous éléments de la récupération

6.1.1 Identification

L'identification dans notre cas est semi-automatique. L'intervention de l'utilisateur est nécessaire afin d'initialiser le système. En effet, ce dernier doit référencer la position du premier composant. Une fois cette démarche effectuée, la position des ECs par rapport à la référence du système de récupération est déduite. Et ce, en se servant de la position des ECs sur la carte, après l'avoir extraite des fichiers de fabrication et fait le tri afin de cibler les ECs intéressants à la récupération. Dans la pratique, les résultats de cette phase d'identification sont concluants. Le support de carte, la récupération du fichier contenant la position des ECs par rapport à la carte, tout comme le script Python permettant le positionnement du pistolet au-dessus de l'EC cible, assurent une bonne identification des ECs à récupérer. À l'origine, l'objectif était de référencer le support de carte par rapport à la référence du système sans avoir la nécessité de référencer le premier composant. Néanmoins, après plusieurs itérations, j'ai pu remarquer que la phase de référencement du premier composant peut introduire une erreur de positionnement par la suite. En effet, un défaut apparaît lorsque l'on se déplace avec un pas de 0.1mm avec l'interface de l'imprimante. Cette dernière a tendance à sauter des pas, ce qui introduit une erreur sur la position de l'imprimante. Ainsi, il est nécessaire de limiter le déplacement à un pas de 1 mm. Dans cette configuration, les résultats sont satisfaisants.

6.1.2 Dessoudage

La principal problématique autour du dessoudage concerne les éléments liés à la température.

Hauteur du pistolet :

En faisant varier la distance entre l'air chaud pulsé par le pistolet et l'EC cible, la zone exposée par des températures élevées varie. Ainsi plus le pistolet est proche de l'EC plus la zone est réduite et inversement. Nous pouvons retrouver ci-dessous (image 28) les températures relevées à l'aide d'une caméra IR dans les trois configurations.

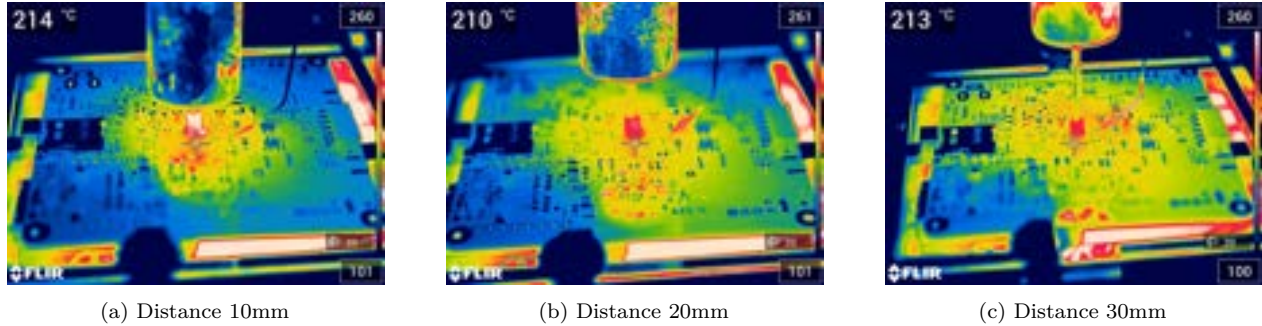


FIGURE 28 – Comparaison de la distance pistolet-EC sur les trois configurations.

La zone exposée varie considérablement et il m'a fallu choisir quelle configuration retenir selon mon objectif principal de non-endommagement tout en considérant la vitesse du désassemblage. En effet, il faut trouver le compromis permettant d'exposer le moins possible les ECs à de hautes températures. Deux stratégies existent alors. L'une consiste à réduire au maximum la zone de chauffe pour limiter l'exposition lors du cycle de chauffe. L'autre solution est d'élargir la zone de chauffe pour qu'un cycle de chauffe permette la récupération des EC environnantes sans réitérer le cycle de chauffe. Dans la pratique, cette deuxième solution s'est avérée complexe. En effet, l'imprimante 3D ne permet pas un déplacement suffisamment rapide, pour assurer le désassemblage des ECs exposés dans le même cycle de chauffe. Pourtant, cette technique serait la solution la moins traumatisante. Ainsi, le compromis trouvé a été de limiter un maximum la zone de chauffe et de se servir de la chaleur toujours présente pour récupérer les composants environnants sans refaire le cycle dans son entièreté.

En somme, les résultats pourraient être améliorés afin de réduire l'exposition des ECs à la température avec, par exemple, l'utilisation d'un robot parallèle delta. Ce type de robots a une grande vitesse de manipulation, ce qui permettrait la récupération de l'ensemble des ECs cibles dans les 30 s max imposées par la courbe de dessoudage. L'exposition des ECs à un seul cycle permettrait alors l'entièreté du désassemblage. Dans cette configuration, le pistolet à air chaud pourrait être remplacé par un système de chauffe s'assimilant à celui d'un four afin que la répartition des températures sur la carte soit homogène.

Néanmoins, cette solution s'éloigne de notre objectif de rendre la récupération des ECs accessible. En effet, les moyens ne sont pas les mêmes et ne seraient envisageables que dans l'industrie. Ainsi, si nous revenons à mon système de récupération, une optimisation a été faite. L'objectif est de réduire l'exposition des ECs aux fortes chaleurs tout en se servant de l'exposition inévitable des ECs environnants pour réduire les prochains cycles de chauffe et limiter les contraintes de température.

Fusion de la brasure :

Afin d'assurer la fusion et la brasure, cette dernière doit être exposée à une certaine température que nous avons identifiée en amont. Néanmoins, on peut remarquer que la liquéfaction de l'étain ne se produit pas toujours. Ceci est alors explicable par le fait que la brasure ait subi une oxydation à sa surface, cette dernière empêche alors le dessoudage selon la courbe de température cible. Afin de palier à cela, l'utilisation de flux s'est révélée nécessaire pour éliminer l'oxyde en surface et permet une bonne répétabilité du dessoudage.

Mesure de la température de l'EC cible :

Afin de réguler en température le pistolet assurant la chauffe de l'EC cible, l'utilisation d'un thermocouple est requise. En effet, la station du pistolet récupère la température mesurée avec ce dernier dans le but de réguler la chauffe en conséquence pour suivre la courbe de température choisie en consigne. Comme évoqué en amont, le thermocouple doit être suffisamment proche de l'EC cible afin de rendre compte fidèlement de la température en cette position. Un support pour le thermocouple a été conçu pour augmenter la répétabilité de la mesure et par suite celle du dessoudage. Pour des ECs ayant une hauteur trop importante, la mesure reste imprécise et nécessite une amélioration pour le futur. Une solution avec l'utilisation d'un ressort afin d'avoir plus de flexibilité sur cette composante pourrait être envisagée, mais n'a pas pu être mise en place dans le temps du stage. Néanmoins, la solution mise en place est suffisante pour les ECs choisis.

Après plusieurs itérations de tests, j'ai pu observer que le positionnement du thermocouple est acceptable pour les différents composants de mon cycle de récupération. Néanmoins, dans certains cas, la mesure de la température s'est révélée erronée. J'ai alors relié cette inexactitude à l'utilisation du flux. En effet, à partir d'une certaine température, celui-ci fausse la mesure. Sur la figure 29a, on peut voir que la courbe de température de l'EC suit bien la référence, puis, à un certain palier, a du mal à s'y maintenir. Une augmentation de la température de consigne devient alors visible et croît dangereusement. En déplaçant le thermocouple en dehors d'une zone exposée au flux, la température mesurée de l'EC s'est révélée bien plus élevée, avec un écart de près de 50 °C entre les deux mesures. Ainsi, le flux utilisé est devenu problématique dans notre récupération. Celui-ci étant indispensable, j'ai alors testé un autre flux, plus liquide cette fois. Le problème a disparu (cf. figure 29b), permettant une mesure de température fiable et un dessoudage répétable. Ce second flux a tendance à s'évaporer à haute température, contrairement au flux plus visqueux qui, lui, reste présent.

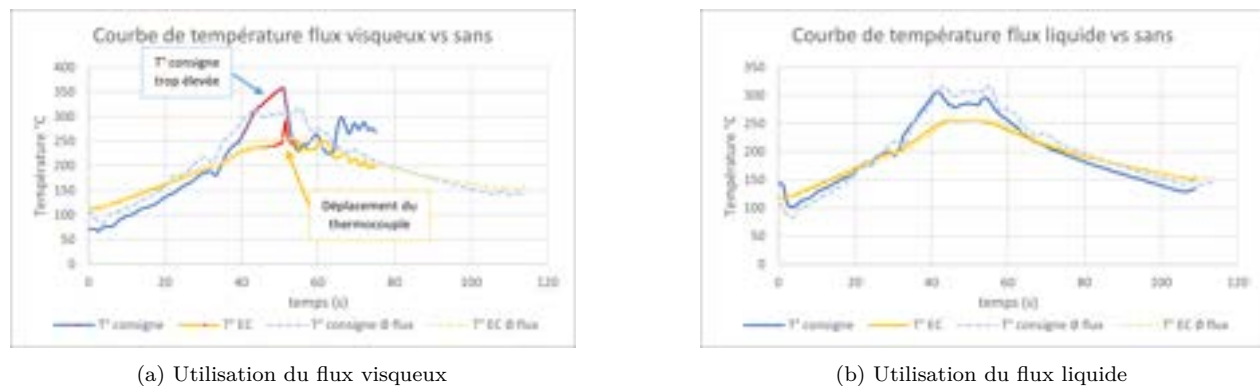


FIGURE 29 – Comparaison de l'impact du flux utilisé sur la température mesurée

Suivi de la courbe de température :

Enfin, si l'on se concentre sur le suivi de la courbe de température, on peut constater qu'avec les réglages par défaut de la station à air chaud, il n'est pas possible de coller parfaitement à la courbe de température de consigne. Ceci pourrait entraîner une surchauffe du pistolet, puisqu'il va chercher à chauffer davantage pour se rapprocher de la consigne. En modifiant certains paramètres, comme la quantité d'air pulsé, j'ai pu améliorer les caractéristiques et me rapprocher de la courbe attendue. Néanmoins, cette augmentation du flux d'air a un impact direct sur la taille de la zone soumise à de fortes températures qui s'en retrouve étendue. Il a donc été nécessaire de trouver un compromis afin d'obtenir une régulation correcte sans provoquer de surchauffe du pistolet tout en limitant la zone de chauffe.

Problème de reproductibilité :

Finalement, au vu du dessoudage, les différentes thématiques évoquées ci-dessus sont satisfaisantes. Néanmoins, une erreur de reproductibilité est observable selon les ECs cibles. En effet, j'ai pu remarquer que les BGAs de grande taille pouvaient engendrer certaines difficultés lors du dessoudage. Dans certains cas, la courbe de température ne permet pas le dessoudage de cet élément. Un travail sur cette dernière a donc été mené en jouant sur le temps d'exposition de l'EC à une température supérieure à 250 °C, ainsi que sur la valeur maximale de température, qui peut varier entre 250 °C et 260 °C. Un couple de paramètres (20s à 260°C) a ainsi pu être identifié, même s'il arrive encore que le problème se reproduise. Dans ce cas, la récupération de l'EC est abandonnée et laissée à l'appréciation de l'utilisateur. Ainsi, des améliorations sont encore nécessaires pour assurer une récupération à 100% des circuits intégrés, mais n'ont pas pu être faites dans le temps du stage. Néanmoins, je me rapproche fortement de cet objectif, ce qui est déjà très satisfaisant et prometteur pour la suite.

6.1.3 Désassemblage

Les tests de désassemblage que j'ai effectués m'ont permis d'identifier plusieurs problématiques qui m'ont emmenée vers l'amélioration d'éléments que j'avais déjà conçus ou encore à la conception de nouveaux éléments. Parmi eux, on retrouve les éléments permettant la liaison glissière entre l'imprimante et le pistolet ou encore le système lié au capteur de fin de course.

Liaison glissière entre l'imprimante et le pistolet

Afin d'assurer la liaison glissière, différentes solutions ont été conçues, fabriquées et testées. Avec la version définitive, j'ai réussi à atteindre les objectifs principaux qui étaient de permettre la liaison glissière en limitant les efforts et d'assurer un alignement du pistolet parallèle à la liaison pour limiter le bras de levier tout en limitant les efforts dans la glissière lorsque le pistolet repose sur un composant. Ainsi, le système lié à l'intégration directe du pistolet sur l'imprimante s'est révélé opérationnel après de multiples itérations.

Système lié au capteur de fin de course

Comme expliqué en amont, le capteur de fin de course permet le désassemblage "automatique" d'un ECs. En effet, grâce à ce dernier, il nous est possible de savoir la hauteur de l'EC cible afin d'ensuite pouvoir déplacer le pistolet à la hauteur permettant le chargement de son ressort qui, une fois le dessoudage effectué, permettra le retrait de l'EC par relâchement de ce dernier. Cette solution a pu être testée et s'est révélée opérationnelle. Néanmoins, dans le même temps, des problématiques liées au dessoudage que nous avons déjà évoquées sont apparues. En effet, les problèmes liés au positionnement du thermocouple ou encore à la présence de flux, on engendrait une surchauffe du pistolet. Un endommagement de ce dernier a ainsi pu être relevé. Ce dernier se caractérise par un défaut au niveau du système de réglage de la sortie de la buse du pistolet et par suite du fonctionnement du ressort. En somme, il est toujours possible de sortir plus ou moins la buse, mais le pistolet est capricieux et le système de ressort n'est plus opérationnel. Ceci est dû à un endommagement de l'élément chauffant du pistolet. Ce dernier assure toujours sa fonction première qui est de chauffer, et au vu du temps restant pour le stage, ce changement est compromis. Néanmoins, le désassemblage reste opérationnel. Il pourrait simplement être amélioré grâce à cette réparation, afin que le pistolet ne repose plus de tout son poids sur l'EC lors du dessoudage de ce dernier, et ainsi limiter les contraintes subies par l'EC.

6.1.4 Dépose et test des ECs

Une fois les ECs désassemblés de la carte, il est encore nécessaire de les déposer à un endroit défini. Le script Python tout comme le peigne nécessaire au décollement des ECs de la buse sont fonctionnels. L'image 30 ci-contre illustre la dépose d'un EC lors d'un test de récupération.

Pour le test de bon fonctionnement ECs, les résultats sont assez sommaires. Je n'ai pas réussi à dégager du temps pour cette thématique qui nécessite une étude à part entière. Néanmoins, j'ai pu mesurer la valeur des capacités électrolytiques récupérées. Ces mesures se sont révélées bonnes, ce qui ne donne pas de contre-indication sur l'endommagement des ECs par le système. Néanmoins, nous ne sommes pas en mesure de le valider intégralement au vu du peu de test réalisés. Il faudrait également étudier le bon fonctionnement des composants une fois ressoudés sur de nouvelles cartes. Une étude sur l'endommagement des composants en fonction du nombre de cycles de chauffe subis pourrait être très intéressante.

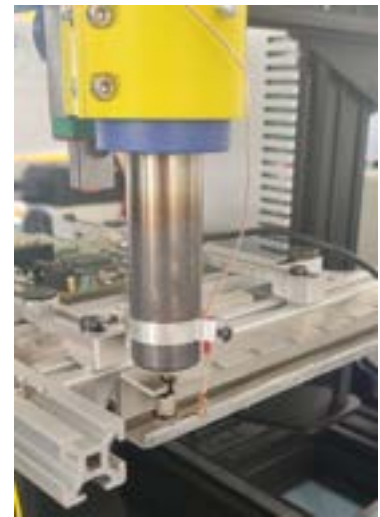


FIGURE 30 – Dépose d'un EC

6.2 Analyse globale du système de récupération d'ECs

De manière globale, le système, lors de son utilisation, a donné des résultats satisfaisants. Une fois tous les éléments évoqués ci-dessus testés et validés d'un point de vue fonctionnel, j'ai mené des tests de récupération d'ECs. L'objectif de ces tests est de rendre compte de la répétabilité et de la fiabilité du système.

Le premier test, réalisé en conditions réelles d'utilisation, a permis de retirer 6 ECs sur les 16 attendus. Après ajustement de la température de chauffe et de la taille de la buse utilisée, le test a alors permis une récupération de 15/16 ECs. L'EC qui n'a pas pu être récupéré est un BGA de taille importante. Lors des tests de dessoudage, j'avais déjà constaté que la récupération de cet EC était problématique. En effet, il demande de monter davantage en température que les autres ECs afin d'être dessoudé et d'utiliser une buse de plus grande taille pour être désassemblé. Ainsi, il requiert un traitement particulier qui ne peut pas, à ce jour, être satisfait par le système de récupération conçu étant donné qu'il sort du cadre restreint par le stage.

En termes de rendement, un composant prend environ 2 minutes pour être récupéré. L'énergie consommée pour sa récupération, compte tenu de la puissance utilisée par les différents éléments du système, est de $1.38 \cdot 10^{-1}$ MJ, ce qui correspond à un impact CO_2 de $2.56 \cdot 10^{-3} \text{ KgCO}_2\text{eq}$ au vu de l'impact CO_2 de l'énergie en France. À titre indicatif, la fabrication d'un IC peut varier entre $9.67 \cdot 10^{-1}$ et $6.06 \cdot 10^1 \text{ KgCO}_2\text{eq}$. Ainsi, si l'on se focalise uniquement sur la puissance consommée, la récupération d'un IC ne représente pas de contre-indication d'un point de vue environnemental.

Néanmoins, cette analyse reste primaire et nécessite d'être approfondie par la mise en place d'une ACV complète, par exemple. Ce résultat peut donc simplement être pris comme une indication, sachant que le rendement peut encore être largement amélioré et que seul l'impact lors de l'utilisation a été considéré.

D'un point de vue global, le système nécessite encore certains ajustements afin d'augmenter sa robustesse, néanmoins les résultats sont concluants et prometteurs. L'objectif du stage de concevoir et de créer un système automatisé de récupération de composants électroniques en vue de leur réemploi est atteint.

Conclusion

Nous en arrivons à présent à la conclusion du travail mené lors de ces six mois de stage. Durant cette période, j'ai eu l'occasion de m'imprégner des problématiques liées aux DEEEs. J'ai pu prendre conscience de leur impact, de ce qui est actuellement mis en place pour les traiter, mais également des possibilités étudiées pour diminuer leurs effets sur l'environnement et notre santé. À travers cette étude, j'ai gagné en compétences dans un domaine dans lequel j'avais déjà évolué auparavant, sans pour autant en comprendre tous les tenants et aboutissants. Ce sujet reste encore très peu exploré dans le monde de la recherche. De nombreuses zones d'ombre, comme la composition des ECs en termes de matériaux, freinent certaines études. Ainsi, certaines bases restent à poser avant de pouvoir avancer sur des sujets précis. Par exemple, si l'on souhaite développer des méthodes de recyclage ciblées sur les matériaux présents dans les ECs, il faut d'abord disposer d'une étude complète de leur composition. En somme, très peu de données sont disponibles à ce jour. Une prise de responsabilité des fabricants d'ECs ou de cartes électroniques afin de contribuer à la recherche de solutions économiquement et environnementalement viables, permettrait de faciliter l'expansion des travaux dans ce domaine.

Dans le cadre précis de mon stage, l'étude de l'état de l'art m'a permis de prendre connaissance des différentes possibilités déjà étudiées. J'ai ainsi pu faire des choix fonctionnels et me fixer un objectif clair : concevoir un système de récupération automatisé d'ECs en vue de leur réemploi, facilement implémentable au sein d'universités, FabLabs et centres de recherche.

La construction d'un cahier des charges a ainsi été menée, associée à une analyse fonctionnelle simplifiée. Des solutions fonctionnelles ont ensuite été choisies, principalement liées au dessoudage et désassemblage non destructif des ECs : un élément de préchauffe (plaque IR), un élément de chauffe localisé (pistolet à air chaud), et un système d'aspiration couplé à une ventouse pour le désassemblage. Enfin, la partie automatisation a été assurée par la remasterisation d'une imprimante 3D Ender3 et la mise en place d'un script Python servant d'interface homme-machine et orchestrant les différents éléments du système de récupération.

L'intégration de ces solutions a conduit à la conception et à la fabrication des différents éléments constituant le système. La construction du script Python a également été réalisée. Les différents éléments ont été testés et améliorés pour aboutir à une version finale du système.

Dans un dernier temps, des tests de bon fonctionnement ont été réalisés afin d'apporter les derniers ajustements. Par rapport au cahier des charges, tous les éléments ont été satisfaits. Il reste néanmoins nécessaire de développer la thématique du test des composants afin de s'assurer qu'ils ne sont pas endommagés lors de la récupération. Une étude approfondie de l'impact environnemental de la méthode reste également à mener afin de confirmer son intérêt.

Les perspectives à la suite du stage sont variées. On retrouve notamment la participation à une conférence pour présenter mes travaux et élargir le réseau que j'ai commencé à développer au cours de mon stage. Un des objectifs pour la station de récupération est aussi de la rendre open source, ce qui nécessitera un travail dédié. Le développement de la thématique des tests des ECs, en s'appuyant sur le système conçu, est également prévu pour le laboratoire. Des projets européens sur cette thématique, ainsi que des collaborations avec des entreprises de fabrication d'ECs, ont déjà été amorcés. En somme, ce stage a permis au laboratoire de mettre un pied dans le domaine de la récupération des composants électroniques. L'objectif de la récupération a aussi été clarifié : nous avons constaté que la seule récupération des ECs ne pouvait suffire au recyclage complet des WPCB. Elle doit être combinée à un recyclage spécifique des composants. L'enjeu est donc de développer un système permettant d'identifier les composants présents sur une carte, de trier ceux qui présentent un réel intérêt, puis de les récupérer en douceur avant de les tester et de les remettre sur le marché. La phase suivante consistera à récupérer efficacement les ECs restants sans se préoccuper de leur endommagement, afin de séparer les composants de la carte et de recycler leurs matériaux distinctement pour une revalorisation complète.

Ce stage a ainsi mené à la réalisation d'un système de récupération d'ECs et constitue une porte d'entrée, pour le laboratoire, vers le monde du recyclage et de la réutilisation des composants électroniques.

Références

- [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)* (juin 2017), p. 41-46. DOI : 10.1109/WISES.2017.7986930. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/7986930> (visité le 20/03/2025).
- [2] Moupali CHAKRABORTY, Jeff KETTLE et 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), p. 4-23. ISSN : 2768-167X. DOI : 10.1109/JFLEX.2022.3159258. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/9733886/> (visité le 05/03/2025).
- [3] Nicolas M. CHARPENTIER, Dong XIA et Jean-Christophe P. GABRIEL. « Printed circuit board recycling : a focus on a novel, efficient and sustainable process for spent critical metals recovery ». fr. In : *Comptes Rendus. Chimie* 27.S4 (2024), p. 1-11. ISSN : 1878-1543. DOI : 10.5802/crchim.291. URL : <https://comptes-rendus.academie-sciences.fr/chimie/articles/en/10.5802/crchim.291/> (visité le 20/03/2025).
- [4] Massimo CONTI et Simone ORCIONI. « Modeling of Failure Probability for Reliability and Component Reuse of Electric and Electronic Equipment ». en. In : *Energies* 13.11 (juin 2020), p. 2843. ISSN : 1996-1073. DOI : 10.3390/en13112843. URL : <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/11/2843> (visité le 05/03/2025).
- [5] Biswajit DEBNATH, Priyanka ROYCHOWDHURY et Rayan KUNDU. « Electronic Components (EC) Reuse and Recycling – A New Approach towards WEEE Management ». en. In : *Procedia Environmental Sciences* 35 (2016), p. 656-668. ISSN : 18780296. DOI : 10.1016/j.proenv.2016.07.060. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1878029616301499> (visité le 05/03/2025).
- [6] ERSÄ SOLDERING SOLUTIONS. *Ersa Rework System – HR 600/2 – product video (English)*. Oct. 2015. URL : <https://www.youtube.com/watch?v=j5z43sStadg> (visité le 12/03/2025).
- [7] EWASTEMONITOR. *The Global E-waste Monitor 2024*. en-US. Mars 2024. URL : <https://ewastemonitor.info/the-global-e-waste-monitor-2024/> (visité le 27/07/2025).
- [8] K. FELDMANN et H. SCHELLER. « Disassembly of electronic products ». In : *Proceedings of 1994 IEEE International Symposium on Electronics and The Environment* (mai 1994), p. 81-86. DOI : 10.1109/ISEE.1994.337291. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/337291> (visité le 20/03/2025).
- [9] JF CARON. *France5Le monde en face Déchets électroniques, le grand détournement 19 023 2019*. Avr. 2019. URL : <https://www.youtube.com/watch?v=uZI99xZDVkg> (visité le 07/04/2025).
- [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)* (mai 2002). ISSN : 1095-2020, p. 290-294. DOI : 10.1109/ISEE.2002.1003282. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/1003282> (visité le 18/03/2025).
- [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), p. 1-8. DOI : 10.1109/EGG.2016.7829842. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/7829842/> (visité le 05/03/2025).
- [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), p. 1-5. DOI : 10.23919/EMPC44848.2019.8951884. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/8951884> (visité le 20/03/2025).
- [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*. (mai 2005). ISSN : 2378-7260, p. 116-120. DOI : 10.1109/ISEE.2005.1437004. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/1437004> (visité le 12/03/2025).
- [14] Marco MARCONI et al. « A Collaborative End of Life platform to Favour the Reuse of Electronic Components ». en. In : *Procedia CIRP* 61 (2017), p. 166-171. ISSN : 22128271. DOI : 10.1016/j.procir.2016.11.169. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827116313294> (visité le 05/03/2025).

- [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> (visité le 05/03/2025).
- [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, p. 115-119. DOI : 10.1109/RTSI61910.2024.10761364. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/10761364> (visité le 12/03/2025).
- [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* (août 2018), V004T05A006. DOI : 10.1115/DETC2018-85302. URL : <https://asmedigitalcollection.asme.org/IDETC-CIE/proceedings/IDETC-CIE2018/51791/Quebec%20City,%20Quebec,%20Canada/275051> (visité le 12/03/2025).
- [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), p. 11-15. ISSN : 03017516. DOI : 10.1016/j.minpro.2015.09.013. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301751615300302> (visité le 05/03/2025).
- [19] Boubakr RAHMANI et al. « Design for Reuse : residual value monitoring of power electronics' components ». en. In : *Procedia CIRP* 109 (2022), p. 140-145. ISSN : 22128271. DOI : 10.1016/j.procir.2022.05.227. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827122006758> (visité le 05/03/2025).
- [20] *Récupération de composants électroniques - Retronix Europe*. fr-FR. URL : <https://retronixeurope.com/recuperation-composants/> (visité le 11/03/2025).
- [21] *Resale components*. fr-FR. URL : <https://resalecomponents.com/> (visité le 24/04/2025).
- [22] Laura ROCCHETTI, Alessia AMATO et Francesca BEOLCHINI. « Printed circuit board recycling : A patent review ». en. In : *Journal of Cleaner Production* 178 (mars 2018), p. 814-832. ISSN : 09596526. DOI : 10.1016/j.jclepro.2018.01.076. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652618300842> (visité le 14/04/2025).
- [23] Allana ROCHA, Bruno FERNANDES et 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, p. 1-6. DOI : 10.1109/LA-CCI58595.2023.10409312. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/10409312> (visité le 11/03/2025).
- [24] S. RUGGERI et al. « Micro-robotic Handling Solutions for PCB (re-)Manufacturing ». en. In : *Procedia Manufacturing* 11 (2017), p. 441-448. ISSN : 23519789. DOI : 10.1016/j.promfg.2017.07.132. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2351978917303360> (visité le 05/03/2025).
- [25] Florentin SALOMEZ et al. « State of the Art of Research towards Sustainable Power Electronics ». en. In : *Sustainability* 16.5 (mars 2024), p. 2221. ISSN : 2071-1050. DOI : 10.3390/su16052221. URL : <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/5/2221> (visité le 05/03/2025).
- [26] 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*. (mai 2005). ISSN : 2378-7260, p. 221-225. DOI : 10.1109/ISEE.2005.1437029. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/1437029> (visité le 12/03/2025).
- [27] Lucy SMITH et al. « Life cycle assessment and environmental profile evaluations of high volumetric efficiency capacitors ». en. In : *Applied Energy* 220 (juin 2018), p. 496-513. ISSN : 03062619. DOI : 10.1016/j.apenergy.2018.03.067. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261918304057> (visité le 23/04/2025).
- [28] I. STOBBE et al. « Quality challenges of reused components ». In : *Proceedings of 2004 International IEEE Conference on the Asian Green Electronics (AGEC)*. Jan. 2004, p. 218-225. DOI : 10.1109/AGEC.2004.1290906. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/1290906> (visité le 20/03/2025).

- [29] Jianbo WANG, Jie GUO et Zhenming XU. « An environmentally friendly technology of disassembling electronic components from waste printed circuit boards ». en. In : *Waste Management* 53 (juill. 2016), p. 218-224. ISSN : 0956053X. DOI : 10.1016/j.wasman.2016.03.036. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X16301209> (visité le 14/04/2025).
- [30] Xin WANG et al. « Effect of reflow profile parameters on shear performance of Sn3.0Ag0.5Cu/Cu solder joint ». In : *2014 10th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS)*. Août 2014, p. 691-693. DOI : 10.1109/ICRMS.2014.7107286. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/7107286> (visité le 06/05/2025).
- [31] Jiping YANG et al. « Removal force models for component disassembly from waste printed circuit board ». en. In : *Resources, Conservation and Recycling* 53.8 (juin 2009), p. 448-454. ISSN : 09213449. DOI : 10.1016/j.resconrec.2009.03.007. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344909000512> (visité le 14/04/2025).
- [32] S. YOKOYAMA, Y. IKUTA et M. IJI. « Recycling system for printed wiring boards with mounted parts ». In : *Proceedings First International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing* (fév. 1999), p. 814-817. DOI : 10.1109/ECODIM.1999.747721. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/747721> (visité le 18/03/2025).
- [33] H. ZEBEDIN, K. DAICHENDT et 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 (juin 2001), 1742-1746 vol.3. DOI : 10.1109/ISIE.2001.931972. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/931972> (visité le 12/03/2025).
- [34] 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), p. 196-214. ISSN : 2754-7000. DOI : 10.1039/D2VA00266C. URL : <https://xlink.rsc.org/?DOI=D2VA00266C> (visité le 05/03/2025).

Annexes

Capteurs, Intégration de Capteurs, Autonomie des Capteurs



FIGURE 31 – Axes de recherche LAIC

ACCÉLÉRATEUR D'INNOVATION AU SERVICE DE L'INDUSTRIE

CEA TECH, LE PÔLE RECHERCHE TECHNOLOGIQUE DU CEA



650 millions d'euros
de budget annuel

600 dépôts de brevets
prioritaires par an



4500 chercheurs

Nos partenaires industriels



80 % des entreprises
du CAC 40

500 PME et ETI



145 partenaires
internationaux

LES INSTITUTS CEA TECH

Leti : Laboratoire de recherche spécialisé
dans les **micro et nano technologies** et leur
intégration dans les systèmes

List : Laboratoire de recherche spécialisé
dans les **systèmes numériques intelligents**

Liten : Laboratoire de recherche spécialisé
dans les **nouvelles technologies de l'énergie**
et les **nanomatériaux**

L'activité de CEA Tech :

La recherche technologique, c'est-à-dire la « production de technologies » et leur diffusion à l'industrie.

L'offre proposée par CEA Tech :

CEA Tech apporte des réponses aux besoins d'innovation des entreprises. CEA Tech dispose d'une offre très large de technologies génériques issues de ses trois instituts Leti, List et Liten mais aussi des autres directions opérationnelles du CEA.

Les secteurs d'activité auxquels s'adresse l'offre CEA Tech :

L'ensemble du tissu industriel, que ce soit l'habitat, les transports, l'environnement, le spatial, la sécurité, l'agroalimentaire, la santé, l'aéronautique, les loisirs, etc.

Avec quel type d'entreprise CEA Tech peut collaborer ?

Toutes les entreprises, quelle que soit leur taille et leur secteur d'activité, du plus traditionnel à la haute technologie.



QUELQUES EXEMPLES DE PLATES-FORMES TECHNOLOGIQUES CEA TECH



LES PLATES-FORMES CEA TECH

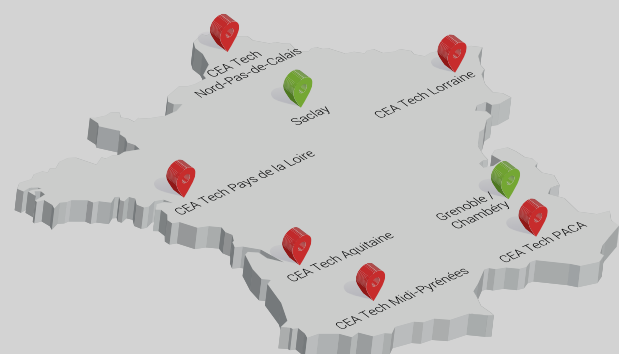
Plus de 25 plates-formes technologiques CEA Tech

120 millions d'euros investis en moyenne par an

300 collaborations industrielles

Une garantie de confidentialité pour vos données et projets

CEA TECH EN FRANCE



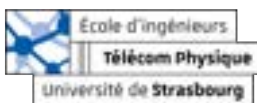
Rapport Bibliographique

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 pourrions 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 concluons 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.

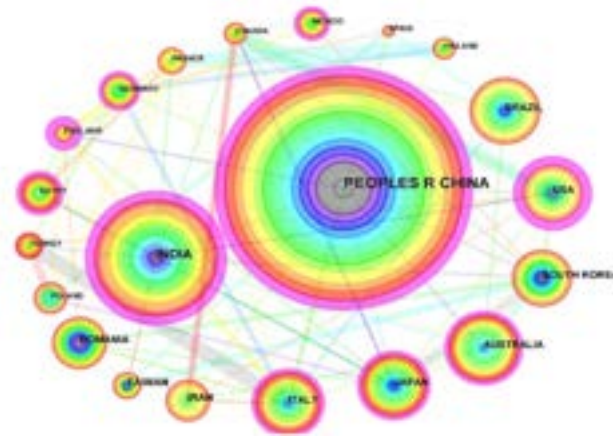


Figure 1: Analyse visuelle du réseau national d'études sur le traitement du recyclage des WPCB

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 réglementations 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 provoquant 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 rare reste néanmoins compliqué.

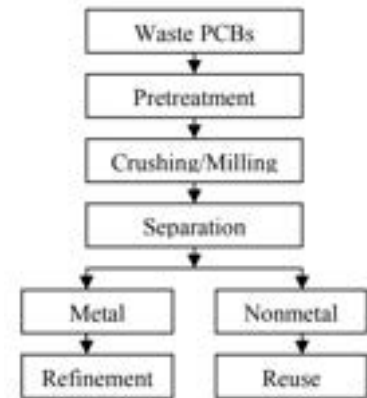


Figure 3: Processus de recyclage physique des PCBs

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.

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.

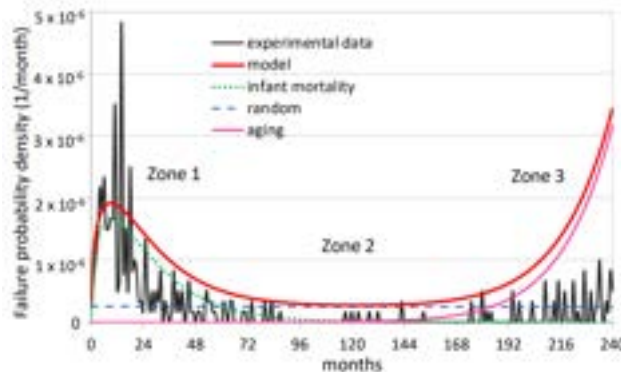


Figure 4: Taux de défaillance expérimental qui peut être subdivisé en trois zones : mortalité infantile (1), échec aléatoire (2) et vieillissement (3)

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 pourrions les évoquer dans un premier temps avant d'aborder les différentes étapes que constitue 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 entravent 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 Small volumes
Infrared radiators	++	+	High disassembly rate	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 High solder recovery rate Solder elements separation	Generating toxic waste fluids and fumes
Heated centrifugation	++	++		High temperature Heat damage ECs
Solder dissolution	+	++	Selective process	Requires further treatments Hazardous chemicals used Cannot target solder
Hydrothermal and supercritical fluids treatment	+++	++	Target metals or resin No toxic product released Reusable reagents	Requires further dismantling treatments
Epoxy resin treatment	++	++	Recover functional circuits Chemicals can be recycled	Need further dismantling process Hazardous chemicals used
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.

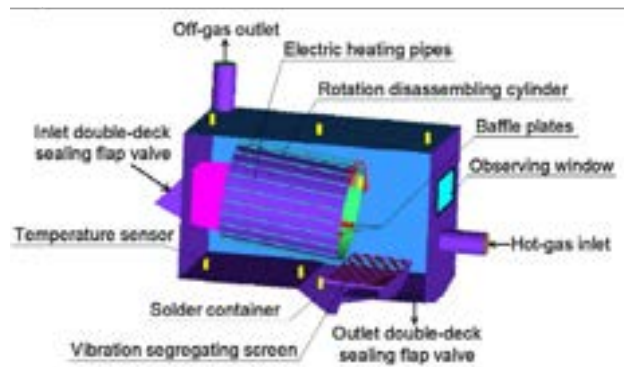


Figure 6: Structures (a) de la machine de désassemblage automatique ; (b) dispositif de purification des effluents gazeux

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	Excellente	Élevé	Excellente
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 compatibles 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).

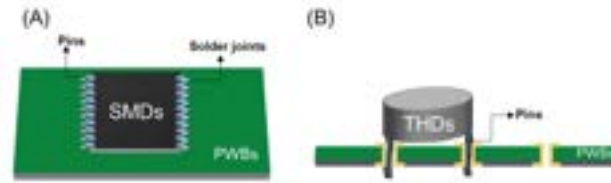


Figure 7: Les deux types de dispositifs pour les ECs : (A) SMD et (B) THD

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'accroît 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-PTHC), 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 pourrai 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.

Matériau	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, tantale (métal critique)	Extraction du tantale 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, Priyanka 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).



Soldering and Cleaning Instructions for Inductors

GENERAL

Vishay offers a wide product selection of inductors and transformers in a variety of packages. This document provides instructions on mounting for the different types of packages, specifically on the different methods of soldering.

If the device is to be mounted near heat-generating components, consideration must be given to the resultant increase in ambient temperature.

SOLDERING INSTRUCTIONS

Protection against overheating is essential when a device is being soldered. Therefore, the connection wires or PCB traces should be left as long as possible. The maximum permissible soldering temperature is governed by the maximum permissible heat that may be applied to the package.

The maximum soldering iron (or solder bath) temperatures are given in the individual Datasheets. During soldering, no forces must be transmitted from the pins to the case (e.g., by spreading the pins).

SOLDERING METHODS

There are several methods for soldering devices onto the substrate. The following list is not complete.

(a) Soldering in the Vapor Phase

Soldering in saturated vapor is also known as condensation soldering. This soldering process is used as a batch system (dual vapor system) or as a continuous single vapor system. Both systems may also include a pre-heating of the assemblies to prevent high temperature shock and other undesired effects.

(b) Infrared Soldering

By using infrared (IR) reflow soldering, the heating is contact-free and the energy for heating the assembly is derived from direct infrared radiation and from convection.

The heating rate in an IR furnace depends on the absorption coefficients of the material surfaces and on the ratio of component's mass to an As-irradiated surface.

The temperature of parts in an IR furnace, with a mixture of radiation and convection, cannot be determined in advance. Temperature measurement may be performed by measuring the temperature of a certain component while it is being transported through the furnace.

The temperatures of small components, soldered together with larger ones, may rise up to 280 °C.

Influencing parameters on the internal temperature of the component are as follows:

- Time and power
- Mass of the component
- Size of the component
- Size of the printed circuit board
- Absorption coefficient of the surfaces
- Packing density
- Wavelength spectrum of the radiation source
- Ratio of radiated and convected energy

As a general rule of thumb, maximum temperature should be reached within 360 s and time above solder liquids temperature should be reached in less than 180 s.

Temperature/time profiles of the entire process and the influencing parameters are given. The IR reflow profile is shown in Figure 1.

(c) Wave Soldering

In wave soldering one or more continuously replenished waves of molten solder are generated, while the substrates to be soldered are moved in one direction across the crest of the wave. Maximum soldering temperature should not exceed 260 °C for 20 s.

(d) Iron Soldering

This process cannot be carried out in a controlled situation. It should therefore not be used in applications where reliability is important. There is no SMD classification for this process.

(e) Laser Soldering

This is an excess heating soldering method. The energy absorbed may heat the device to a much higher temperature than desired. There is no SMD classification for this process at the moment.

(f) Resistance Soldering

This is a soldering method which uses temperature controlled tools (thermodes) for making solder joints. There is no SMD classification for this process at the moment.

TYPICAL REFLOW SOLDERING PROFILE

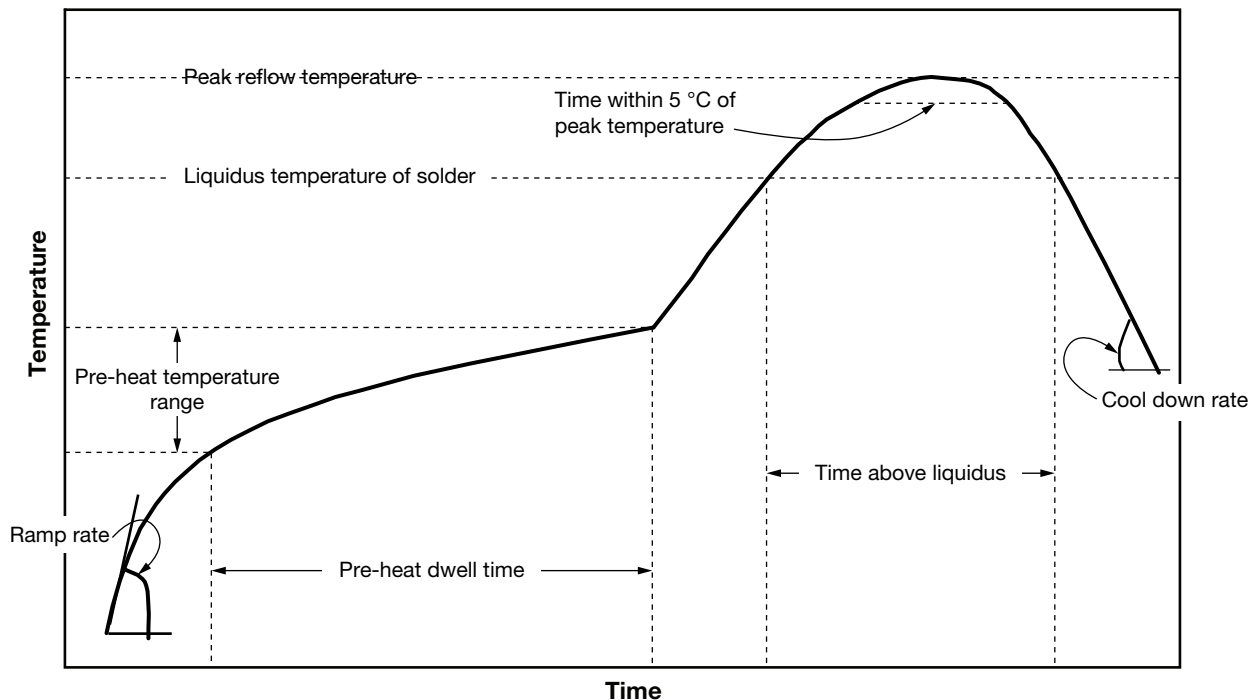


Fig. 1 - Infrared reflow soldering (SMD package)

LEAD (Pb)-FREE SOLDER (SnAgCu) REFLOW PROFILE ATTRIBUTES	
PROFILE ATTRIBUTE	PROFILE ATTRIBUTE
Peak reflow temperature	255 (± 5) °C
Time within 5 °C of peak temperature	30 s max.
Liquidus temperature of solder	~ 217 °C
Cool down rate	6 °C/s max.
Time above liquidus	60 s to 150 s
Preheat temperature range	150 °C to 200 °C
Preheat dwell time	60 s to 120 s
Ramp rate	3 °C/s max.

CLEANING INSTRUCTIONS

A no clean solder system is recommended for Vishay inductors. Certain cleaning solutions, such as non-linear alcohols, acid-based or solvent-based agents can degrade the part strength and should be avoided. If cleaning must be performed, an isopropyl alcohol is recommended. Water-based chemicals such as VIGON® N 600 and N 680 may also be used.

It is recommended that any residual cleaning chemicals be thoroughly rinsed with de-ionized water and immediately followed by a thorough warm air dry cycle to avoid oxidation. Electronic components should be tested for compatibility with any cleaning solution before production assembly.

Group of Components [3]	Examples of components in each group	Material Composition	Criteria to be satisfied for Reusability	Recycling Options	References
Passive Components	Resistors, Capacitors, Inductors, Thermistors etc.	Carbon, Graphene, Metals (Steel, Tantalum), metal oxides, dielectrics, ceramics.	Test result of resistance, capacitance, inductance within tolerance value	Plasma arc/torch treatment, Pyrolysis.	Bidini et al. 2015, Cui & Foerberg 2003, Kingzett 2010, Kumar et al. 2014, Spiczok et al. 2014, Terakado et al. 2013, Vanukuru 2015, Yang et al. 2015
Analog Components	Diode, BJT, FET	Semiconductor, amorphous silicon, polycrystalline silicon, silicon carbide (SiC), gallium arsenide (GaAs), Indium gallium arsenide (InGaAs), gallium phosphide (GaP), gallium arsenide phosphide (GaAsP), Gold, Metals, graphene, molybdenite, gallium nitride etc.	Multimeter Testing	Plasma arc/torch treatment, Pyrolysis	www.madehow.com, www.ee.sc.edu, fourier.eng.hmc.edu, en.wikipedia.org, Hall and Williams 2007, Rajarao et al. 2014, Tippayawong & Khongkrapan 2009.
Analog, Digital and Mixed Signal ICs	LogicICs, Mux, Demux, Encoder, Decoder, Clock&TimerICs, A DC, DAC, NE 555 etc.	Plastic, Copper, dielectric, Silicon, other metals.	Functioning of pins, Proper Voltage Level, Proper Timing of output signal, Acceptable SNR	Pyrolysis, Gasification, Plasma treatment.	smithsonianchips.si.edu, madehow.com Grause et al. 2010, Kingzett 2010, Kantarelis et al. 2011, Schwierz 2010.
Connectors	I/O Connectors, IC & Component Sockets, Terminals, Memory Connectors etc.	Metals such as copper, gold, nickel etc.	Isolation & Continuity Test	Pyrometallurgical or hydrometallurgical extraction.	icconnectors.com, Tuncuk et al. 2012, Terakado et al. 2013.
Microprocessors	AMD Turion, Intel i7, HP Capricorn	Aluminum, Copper, Aluminum silicon carbide.	Structural Testing, Functional Testing without fault models and using specific fault models	Pyrometallurgical or hydrometallurgical extraction.	dejazzet.com, Slideshare .net, Tuncuk et al. 2012, Rajarao et al. 2014.
Microcontrollers	Atmel AT89 series, PIC 18 series etc.	Semiconductor, metal and plastic.	Generating Test Signals and Testing MCU outputs (cdn.teledynelecroy.com)	Gasification, Plasma treatment.	Instructables.com, Grause et al. 2010, Tippayawong & Khongkrapan 2009.
Circuit Protection Components	Thermal Cutoffs, Fuses etc.	Light metals	Proper functioning of protection mechanism as per requirement	Leaching, metallurgical methods.	cem.com, Hall and Williams 2007, Tuncuk et al. 2012
Power Management Circuits	Batteries, Power Cords, Power Inverters etc.	Li-ion, Nickel etc.	Acceptable Power Output	Leaching, metallurgical methods.	Chan et al. 2008, Kantarelis et al. 2011, Saidan et al. 2012, Tuncuk et al. 2012
Memory Components	RAM, ROM, Hard-drive	Aluminum, Platinum, Steel, Nickel, Gold, Plastics.	Read, Write, Speed, Capacity	Leaching, bioleaching, gasification, pyrometallurgical methods.	Bryan et al. 2015, Redwine 1991, Natarajan and Ting 2014, Grause et al. 2010

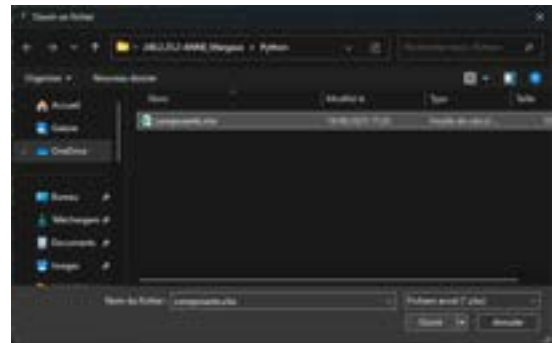
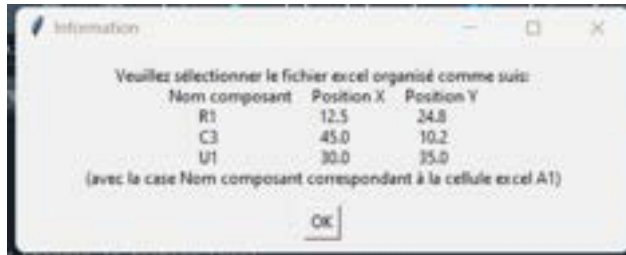
FIGURE 35 – Critère de réutilisation ECs

Mode d'emploi – Station de récupération de composants électroniques (EC)

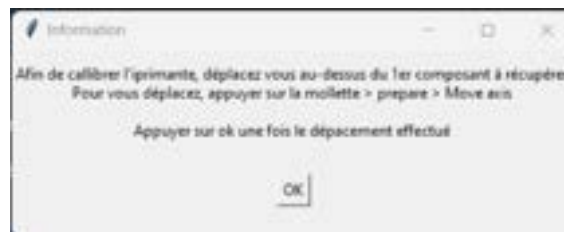
La station permet de récupérer des composants CMS d'une taille supérieure à **6.5 mm × 6.5 mm**. Attention : pour des composants d'environ **15 mm de côté ou plus**, la récupération peut devenir moins fiable. Trois tailles de buses sont disponibles : choisissez celle qui correspond le mieux à la taille minimale des ECs à récupérer.

Étapes d'utilisation

1. **Préparation de la carte** Placez votre carte sur le support prévu à cet effet. - Le coin de référence de la carte doit être positionné en bas à gauche du support. - Vérifiez que la carte est correctement fixée et que ses bords sont bien alignés avec ceux du support.
2. **Mise sous tension** Allumez : - le générateur de puissance afin d'alimenter la plaque IR, - l'imprimante 3D, - la station Hakko. Laissez chauffer pendant environ **15 minutes** afin que la carte atteigne la température de préchauffe.
3. **Lancement du programme** Lancez le programme de récupération. - Un fichier Excel vous sera demandé : il doit contenir les positions des ECs, référencées par rapport au coin inférieur gauche de la carte. - Le format attendu du fichier est indiqué dans la fenêtre pop-up ci-dessous :



4. **Initialisation** Le logiciel vous demandera de positionner la tête de l'imprimante au-dessus du premier EC à récupérer afin de définir le point de référence. Pour cela, déplacez manuellement la tête (où est fixé le pistolet) à l'aide de la manette de l'imprimante.



5. **Récupération automatique** Une fois l'initialisation effectuée, la récupération démarre. - L'écran de l'imprimante affiche en temps réel l'avancée du processus. - À la fin, la position des composants récupérés est automatiquement enregistrée dans le fichier Excel fourni en entrée.



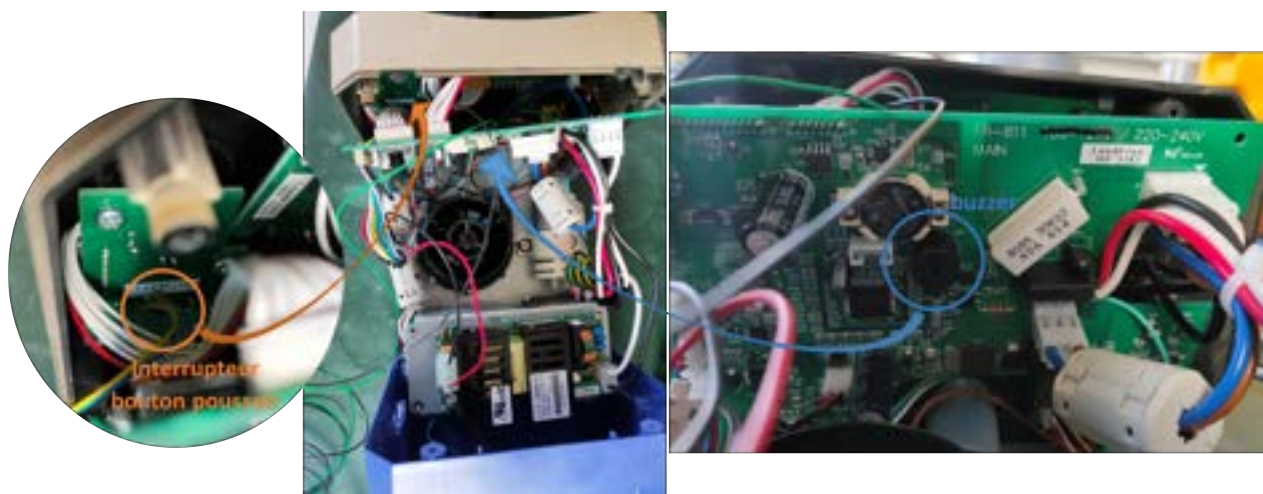


FIGURE 37 – Ouverture station