PROJET DE RECHERCHE COLLABORATIVE

PRC 17.3

Projet 2nd Life

Etude d'opportunité (technico économique) pour la réutilisation de composants électroniques.

Rapport Final

le 01/02/2018

Table des matières

Introduction/Résumé 3
Evaluation des couts des composants électroniques des boxes 4
Analyse produit 4
Analyse environnementale & économique 5
Marché du composant électronique de seconde main 6
Les différentes technologies de récupération de composants électroniques 8
Vue d'ensemble des différents solutions de récupération 8
Etat de l'art sur les procédés d'extraction de composants électroniques 8
Extraction semi-automatique 8
Extraction mécanique 9
Expérimentation 9
Conclusion 10
La chaîne de désassemblage automatisée ProAUTOMATION 10
Conception pour la réutilisation 14
Vers la conception pour des usages en cascade 14
Proposition de la société Retronix 17
Utilisation d'interposeur, illustration avec les cartes graphiques VEGA 19
Utilisation d'interposeur, retour d'expérience de Retronix 21
Conclusion perspectives 23

Introduction/Résumé

L'évolution des technologies conduit aujourd'hui à une obsolescence rapide des appareils électriques et électroniques. On estime qu'un foyer conserve une box internet 5 ans. Durant ces 5 ans, la box est ramenée en magasin pour réparation en moyenne 1 fois. En fin de vie, les équipements électriques et électroniques sont transformés en Déchets d'Equipements Electriques Electroniques (DEEE) alors qu'une grande partie des éléments qui les composent sont fonctionnels et peuvent encore être utilisés : la plupart des composants des cartes électroniques ont une durée de vie supérieure au produit dans lesquels ils sont embarqués.

Même si via les différents processus de traitement de fin vie, les matériaux constitutifs des cartes et composants électroniques sont valorisés, la proposition de valeur du projet collaboratif Eco SD « 2nd Life » entre Orange, CentraleSupelec, les Arts & Métiers et l'Université Alpes Grenoble **est d'étudier la pertinence de la réutilisation de composants électroniques tant d'un point de vue technique, financier qu'environnemental.**

Le présent rapport est une synthèse des travaux menés par les différents partenaires du projet.

- ACV d'une boxe d'opérateur pour identifier les pistes d'éco conception mais surtout mener une petite étude de marché pour identifier les zones géographiques & économiques ou cette approche de la réutilisation pourrait avoir du sens (**Arts & Métiers**).
- Etude des différentes techniques de récupérations de composants électroniques (**CentraleSupélec**)
- Compte rendu d'échanges avec des industriels sur les technologies de récupération de composants et la conception de produits électroniques pour faciliter cette récupération en fin de vie (**Orange**)
- les premières réflexions sur la conception de produits électroniques pour faciliter la réutilisation de leurs composants. (**Université de Grenoble Alpes – Laboratoire GSCOP**)

Les travaux ainsi produits montrent l'intérêt et la faisabilité de la proposition et les échanges avec des acteurs économiques confirment l'existence d'un marché pour les composants de secondes mains.

Evaluation des couts des composants électroniques des boxes

Le travail réalisé pour cette partie a pour objectif d'investiguer les opportunités technico-économiques pour la réutilisation de composants de cartes électroniques en fin de vie. L'analyse a porté sur le marché des composants de seconde main en complément des techniques d'extractions des composants étudiées (non résumé ici mais présent dans le rapport Final[1] – Projet Livebox 3 Orange, en annexe.)

Ce travail est structuré avec une analyse détaillée du produit étudié à travers notamment une présentation du produit, un éventail des règlementations applicables à notre étude ainsi qu'une analyse fonctionnelle.

Une analyse environnementale du produit sous sa configuration actuelle évalue ses impacts environnementaux. Cette analyse permet de proposer des axes d'écoconception et finaliser l'analyse technico-économique pour certains composants.

Analyse produit

Le produit complet (Livebox 3) est décomposé et analysés ainsi que les composants à forte valeur ajoutée se trouvent sur la carte électronique sont présentés sur les photos (cf. Figure 1).

Figure 1 : Livebox 3 et ses accessoires

Le coût global de la box et de ses accessoires est évalué comme référence à 52 $.
Le fichier de nomenclature présenté dans le Tableau 1 alloue un prix unitaires des composants par fonction.

[1] **Rapport ENSAM 2018 « final-ProjetLivebox3 Orange » A.*Dubosc, J.Jacquart, O.Maubon, R.Viala***

ID	Fonction	Description	Coût engagé dans les composants participants à la fonction (en $)	Poids de la fonction (en % du total)
1	FP1	Permettre à l'utilisateur de gérer et d'accéder à la connexion internet du FAI sur des terminaux	19,36	11%
2	FP2	Permettre à l'utilisateur de téléphoner via le réseau internet	8,04	11%
3	FC1	Doit gérer et coordonner l'ensemble des fonctions (Module gestion)	12,02666667	10%
4	FC2	Doit assurer l'interface avec les terminaux (Carte Ethernet)	5,154666667	7%
5	FC3	Doit être résistant aux surtensions (foudre)	2,23	0%
6	FC4	Doit être alimenté par une source d'énergie	6,199266667	8%
7	FC5	Doit être connectable et compatible avec tous les modes de connexions Internet (Compatible ADSL, FTTH et VDSL2)	5,054666667	7%
8	FC6	Doit afficher le statut de fonctionnement et l'état de la connexion	3,025	7%
9	FC7	Doit permettre d'activer et de désactiver le réseau sans fil en un seul clic	0,025	7%
10	FC8	Doit permettre de détecter et synchroniser les terminaux téléphoniques HD (WPS)	0,025	5%
11	FC9	Doit offrir une capacité de mémoire de stockage	2,1	5%
12	FC10	Doit être facilement configurable par l'utilisateur	3,4	0%
13	FC11	Doit pouvoir être gérée et utilisée par l'utilisateur de manière intuitive	3,7	1%
14	FC12	Doit assurer une sécurité et un contrôle d'accès	12,02666667	2%
15	FC13	Doit respecter les normes en vigueur	3,5	2%
16	FC14	Doit pouvoir être entretenu par le support technique	17,2902	3%
17	FC15	Doit être esthétique et plaire à l'utilisateur	2	3%
18	FC16	Doit être résistant à un environnement intérieur	2,7	5%
19	FC17	Doit pouvoir être pilotée depuis une application mobile et permettre un paramétrage notamment	12,02666667	4%
20	FC18	Doit offrir une restriction d'accès pour le control parental	0	4%

Tableau 1 : répartition des couts par fonctions et composants

Nota : le calcul du prix de la carte électronique (PCBA – printed circuit board assembly) prend en compte le prix de du circuit imprimé (PCB – printed circuit board) ainsi que le prix des composants non considérés individuellement pour chaque module.

Analyse environnementale & économique

Une Analyse de Cycle de Vie a été mené sur la base de l'unité fonctionnelle suivante : Fournir l'accès au service internet ADSL2+ pendant 4h30 par jour pendant 5 ans à un foyer français de 4 personnes ; le reste de la durée journalière étant considérée en mode veille (19h30).

Le périmètre de l'étude est illustré sur la Figure 2. Pour le détail du périmètre et de l'inventaire et les hypothèses, se référer au rapport en annexe.

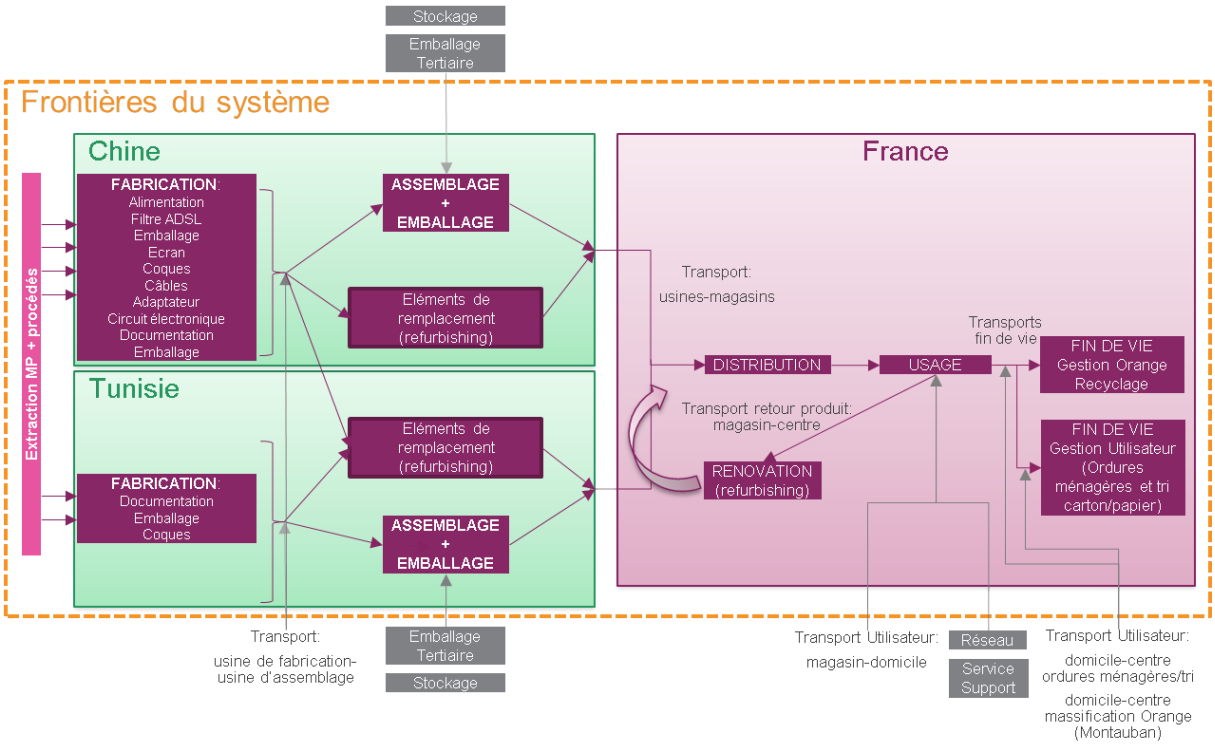

Figure 2 : frontières du système de l'analyse environnementale de la Livebox 3

Les conclusions sont que les impacts environnementaux générés par la Livebox 3 sont essentiellement liés à la fabrication de celle-ci et plus précisément, de sa carte électronique notamment pour des indicateurs comme l'épuisement des ressources (CML-ADP ou PEP-ecopassport-RMD). Le produit présente aussi un impact notable lors de sa phase d'usage pour des indicateurs comme PEP-ecopassport-Primary Energy Depletion. En ce qui concerne la fin de vie de la Livebox 3, l'étude de sensibilité a révélé l'intérêt de l'étape de remise à neuf.

Ainsi deux axes prioritaires d'amélioration environnementale peuvent être identifiés :

- sur la fabrication de la carte électronique, via par exemple la réduction de la surface du circuit imprimé (optimisation des zones faiblement peuplées sur la carte) ou une conception basée sur des composants utilisés dans l'industrie de la téléphonie mobile (circuits intégrés PoP – package-on-package ou combos mémoire Flash/SDRAM)

- sur la consommation d'énergie pendant la phase d'usage, via par exemple l'implémentation de différents niveaux de mode de veille que le client paramétrera selon ses besoins. Ceci permettra de faire basculer une partie des produits sur des modes de veille plus profonds qu'avec la configuration actuelle.

Des axes d'éco-conception sont proposés dans le rapport d'analyse comme une solution accessible d'arrêt de la box, des approches de récupération des composants électroniques de la carte mais aussi pour améliorer la fiabilité et faciliter la maintenance. Une partie spécifique éco-conception est disponible dans le rapport en annexe.

Marché du composant électronique de seconde main

Il s'agit d'identifier l'existence d'un marché pour la revente de ce type de composants et l'appétence d'un tel marché. Il y a peu d'informations à ce jour. Les informations récoltées dans ce travail l'ont été majoritairement par des entretiens auprès d'acteurs Européen, du secteur (brokers, récupérateurs et revendeurs d'éléments électroniques de seconde main) parmi les entreprises suivantes et universités suivantes : Retronix, Fairphone, Cordon Electronics, InfoNegoce, Bak2Group,

Eco-systèmes, ADEME, CentraleSupelec. Des experts du domaine comme le Pr. D. Froelich ont également été sollicités.

Le Tableau 1 présente les composants avec un marché potentiel mais qui n'a pas forcément retenu un fort intérêt des acteurs audités. Les raisons principales avancées à ce manque d'intérêt au rachat sont :

- Composants à faible valeur ajoutée technologique
- Coût de ces mêmes composants neufs très bas lors de commandes « en gros » en Chine.

Dissipateurs thermiques	Dissipateur CPU : grand format, aluminium
	Dissipateur contrôleur Ethernet : petit format, aluminium
Connecteurs	Connecteurs RJ45 : 2 doubles et 2 simples (ports WAN et VoIP)
	Connecteur RJ11 : 1 simple (port DSL)
	Port USB 2.0 : 2 (faces avant et arrière)
Mémoires	Mémoire vive : 2 circuits de 64 MB
	Mémoire flash NAND : 1 circuit de 128 MB
Contrôleur	DECT CAT-iq
Processeurs	CPU
	Gestion ligne xDSL

Tableau 2 : composants jugés pertinents pour la récupération

Les brokers sont surtout intéressés par des composants critiques (par exemple indisponibles sur le marché du neuf ou liés à des secteurs stratégiques tels que la défense) afin de répondre rapidement à des demandes lors de pénuries ou offrir la possibilité de fournir des composants rares.

Les interlocuteurs n'ont émis aucune crainte quant à la stabilité des prix du marché avec l'arrivée potentielle des volumes annoncés (80 000 composants de seconde main à l'année). A noter que les interlocuteurs étaient essentiellement des brokers de produits ou sous-ensembles et non de composants électroniques.

Des échanges complémentaires avec la société Forecast Electronic ont confirmé l'appétence d'acteurs du monde l'électronique en Asie du Sud Est pour les composants électroniques.

Forecast Electronic achète des composants, les stocke pour ensuite les revendre, ils ne sont donc pas en charge de la récupération des produits, extraction des composants, nettoyage…

Le marché du composant de seconde main est principalement en Asie, très peu d'acteurs en Europe et donc en France. En Asie le traitement est principalement manuel. En Europe pour que l'approche soit viable il faut une automatisation maximale des process.

La demande en composants (cms, traversants, composants actifs….) de secondes mains est très importante, même s'il n'a pas été possible d'avoir des noms d'acheteurs potentiels. Tous les secteurs de l'électroniques sont en situation de pénurie (B2C/B2B : Panasonic, Murata…), le plus gros marché serait celui de la mémoire & CPU… Pour information Forcast Electronics reçoit de 600 à 800 demandes de composants par semaine.

La demande est telle qu'il y a quelques années la date de fabrication du composant pouvait être un point de blocage pour sa revente… ce n'est plus le cas en ce moment !

Une des raisons de la pénurie est que les fabricants de composants incitent leurs clients à provisionner leurs achats, les fabriquants ne disposent donc pas de stocke. Aussi après quelques années lorsqu'un client souhaite racheter des composants « anciens », il doit donc passer par le marché de seconde main.

Les différentes technologies de récupération de composants électroniques

Cette seconde partie du rapport se focalise sur les différentes techniques de récupération des composants électroniques (CentraleSupelec) et présente une chaine de démontage de composants de la société ProAutomation localisé à Vienne en Autriche, qui est spécialisée dans la récupération de composants de téléphones mobiles.

Vue d'ensemble des différents solutions de récupération

Cette partie[2] s'intéresse au processus de séparation de composants électroniques des cartes sur lesquelles ils sont installés. Fort d'un état de l'art sur les techniques séparatives, les avantages et limites des procédés de séparation sont identifiés et discutés. Dans un second temps, une expérimentation de démantèlement a été menée sur une dizaine de box orange et 5 ordinateurs portables afin de :

- Valider les résultats issus de la littérature,
- Explorer la possibilité d'extraire les composants de manière spécifique et ciblée à l'aide d'une technologie de soudure de composants (ERSA)
- Explorer la possibilité d'extraire les composants à l'aide de four et de pistolet à air chaud

Même si ces travaux demeurent exploratoires, ils contribuent à créer de la connaissance sur les limites et « défauts » de conception en vue du démantèlement et de la réutilisation de composants électroniques.

Etat de l'art sur les procédés d'extraction de composants électroniques

D'ordinaire les procédés d'extraction des composants électroniques de cartes visent à dégrader les liaisons (joints de soudure) entre les composants et le circuit imprimé. Cette opération peut être réalisée par traitement mécanique (broyage ou application de forces sur le composant), chimique (dissolution des soudures) ou thermique (pistolet à air chaud, radiateur IR…). L'état de l'art fait état de différentes approches pour recycler tout ou partie des composants selon leur nature et l'objectif de valorisation. Pour autant, la grande majorité des études ne fait état que de procédés à l'échelle de pilote ou de démonstrateur industriel dont la vocation n'est pas la réutilisation des composants mais leur extraction et leur massification en vue de leur recyclage matière.

Extraction manuelle des composants

L'extraction manuelle, opération artisanale, est réalisée d'ordinaire à l'aide de petits outillages de type pinces, fer à souder ou pince pneumatique. L'extraction est ciblée sur des composants d'intérêt de haute valeur ajoutée ou facile d'extraction (extraction non destructive). Une expérimentation sur un Nedmod d'une masse totale de 1,5 kg, rapporte la possibilité d'extraire 85% de la masse des composants à des fins de réalisation.

Extraction semi-automatique

Ces procédés d'extraction font appel à l'utilisation de bain de liquide chaud (huile de silicone méthylphenyle ou liquide ionique hydrosoluble). L'usage de ces bains permet la dissolution des joints de soudure et facilite donc l'extraction des composants. Pour l'heure ces procédés ne semblent qu'à l'état de démonstrateurs mais sont tout de même prometteurs le temps de démantèlement étant

[2] Rapport mémoire Thématique M2 Recherche 2018, Centrale Supelec , LGI « De la possibilité de réutiliser les composants électroniques » JC.Tchemanak

drastiquement inférieur à une opération de dessoudage par convection d'air chaud. Si l'investissement initial semble prohibitif, les simulations semblent privilégier cette technique de séparation dès lors que l'on traite de très grandes quantités de cartes électroniques (en comparaison avec une séparation mécanique ou manuelle).

Ces procédés sont actuellement utilisés à des fins de tri de composants et d'allègement des cartes électroniques avant recyclage (massification des flux et allègement des masses transportées).

Extraction mécanique

Enfin un procédé combinant traitement thermique et traitement mécanique a été identifié. Le principe est d'introduire la carte et ses composants dans une enceinte chauffée et soumise à vibrations mécaniques. Une fois les joints de soudures fondues, les vibrations permettent la séparation des composantes et de la carte.

Le procédé n'est à notre connaissance qu'un pilote et dont la pertinence reste à confirmer. En effet bien que les composants soient facilement séparer, ils sont soumis à certains des chocs et contraintes vibratoires dans l'enceinte ce qui peut altérer leur intégrité.

Expérimentation

Une expérimentation de démantèlement a été menée sur une dizaine de box et 5 ordinateurs portables. L'objectif était de confronter la littérature à la réalité et d'envisager la possibilité d'extraire de manière non destructive les composants à l'aide de trois procédés : ERSA (technologie de montage de composants), un four et un fer à souder et des pinces.

Un protocole d'expérimentation a été dimensionné prenant en compte la nature des composants à extraire, la nature de alliages de soudure (et donc leur température de fusion), les programmes de chauffe de chacun des procédés et des indicateurs d'extraction. Notons que l'intégrité des composants n'a pas été testée lors de cette expérimentation.

Principaux résultats

1. L'extraction manuelle des composants est performante pour certains types de composants exclusion faite des BGA et des composants enchâssés. Dans le premier cas si la température de chauffe n'est pas uniforme, le risque d'arrachement des pattes du composant est important. Dans le second cas, l'extraction est plus longue, les pattes enchâssées étant souvent repliées sous la carte. L'extraction nécessite de tordre la patte à nouveau pour extraire le composant de la carte ce qui augmente le risque de dégradation du composant.
2. L'extraction manuelle reste cependant consommatrice de temps, l'opération étant menée composant par composant.
3. L'extraction à l'aide du four est intéressante mais nécessite une bonne connaissance de la carte. En effet si les composants sont soumis à une température trop élevée, ceux-ci se dégradent ce qui remet en cause leur intégrité. Afin de limiter ces risques il nous faut opérer par pallier de températures et séparer les composants en fonction des points de fusion des alliages de fixation. D'autre part, notons également qu'avant toute opération, la carte devra être débarrassée de tout contenu plastique (ex : port Ethernet).
4. L'usage d'ERSA pour l'extraction de composants est prometteur. La machine étant complétement paramétrable, une bonne connaissance de la carte et des composants facilité l'extraction. Cependant, la zone de chauffe est relativement petite ce qui contraint une extraction composant par composant. De plus, si le composant à extraire est chauffé à la bonne température, nous observons tout de même des brulures en périphérie. Autrement dit, l'opération dégrade fortement les autres composants à proximité et compromet leur intégrité. Ce constat soulève notamment les problématiques de peuplement de la cartes (zones d'implantation des composants) dès lors que nous envisageons que extraction future à l'aide de cette technologie.

Conclusion

L'état de l'art des technologies de séparation des composants fait état d'une thématique en émergence ou encore peu investiguée. Si différentes technologies sont référencées, elles sont encore peu matures (pilot scale) et destinées à une extraction composants-cartes en vue de la valorisation matière. Cette séparation permet d'une part de tri les composants et de les diriger vers les filières de recyclage adéquates et d'autre part d'alléger les cartes et ainsi optimiser les phases logistiques avant recyclage.

L'expérimentation a permis de caractériser certains principes d'assemblages défavorables aux stratégies d'extraction non destructive. Ainsi le zonage de la carte ou encore l'usage de composants traversant ne facilité pas un processus d'extraction garant de l'intégrité des composants.

La chaîne de désassemblage automatisée ProAUTOMATION

Lors de la conférence Care Innovation 2018 à Vienne (Autriche) une visite dans les locaux de la société ProAUTOMATION a été organisée. Cette entreprise, spécialisée en automatique et robotique, propose à des industriels des chaînes complètes :

- d'assemblage, par exemple pour des modules LED de phares automobile
- de test, par exemple pour de la qualité de composants électronique
- d'emballage, par exemple pour de la mise en sachet ou blister de médicaments
- de recyclage, par exemple pour le désassemblage de produits électroniques

Lors de la visite deux chaînes de désassemblage ont été présentés. La première, illustrée par la Figure 3, permet d'accélérer le démontage des téléphones portables en vue d'une récupération sélective des différents sous-ensembles (batteries, coques, cartes mères, etc.).

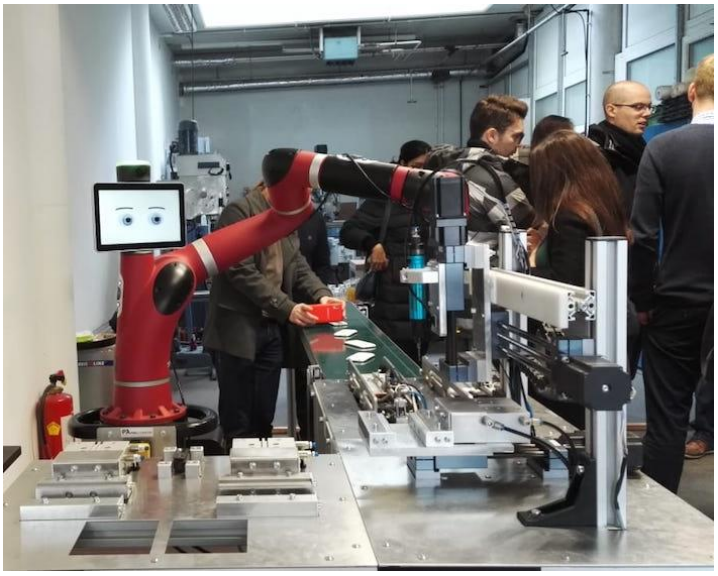

Figure 3 : chaîne de désassemblage simple de ProAUTOMATION

Cette chaîne est basée sur un robot, ou cobot, Sawyer de Rethink Robotics[3]. Grâce à une caméra la machine est capable de reconnaître les téléphones qui sont présentés sur le tapis de convoyage. En fonction des instructions qui ont été renseignées préalablement le robot est capable de saisir les différents types de téléphones et de les positionner correctement sur la plaque de chauffe. Celle-ci va porter la coque du téléphone aux environs de 80 – 110°C afin de faire fondre la colle. Il est à noter

[3] https://www.rethinkrobotics.com/sawyer/

que la température optimale a été déterminée au préalable via des tests. Elle est ensuite modifiée à la volée en fonction du téléphone identifié par le robot.

Une fois la colle ramollie le cobot déplace le téléphone dans un emplacement pourvu de mors. Ces derniers verrouillent le téléphone en place et permettent au robot de retirer les pièces de la coque à l'aide d'un mécanisme de ventouse à vide. Une visseuse est également prévue s'il est nécessaire de retirer des vis pour démonter les coques. Le robot est ensuite capable de prélever la batterie et de la placer dans un container de collecte adéquat. En fonction de la conception du téléphone le robot peut éventuellement prélever la carte mère, mais dans la plupart des cas cette opération nécessite une intervention humaine.

La seconde chaîne de désassemblage, plus coûteuse (plus de 100 k€ en fonction des options), est entièrement automatisée. Cette chaîne a été développée dans le cadre du projet européen ADIR[4]. Elle a pour but de récupérer des composants électroniques à forte valeur (ex. mémoire flash de téléphone portables) pour de la réutilisation ainsi que des composants contenant de fortes concentrations de matériaux critiques (ex. condensateurs tantale ou filtre à onde de surface[5]). Cet équipement est capable de traiter à la fois des petits produits comme les téléphones portables jusqu'à des cartes électroniques de serveurs lame de 19 pouces.

Pour les téléphones portables la première étape est de séparer la carte électronique de la coque. Cette opération est effectuée en 3 étapes. Tout d'abord un bras robotisé saisi un téléphone amené par le convoyeur et le dépose dans un emplacement muni de mors. Une fois ceux-ci en position et le téléphone verrouillé en place la coque est découpée à l'aide d'une fraise (cf. Figure 4, photo de gauche). Après évacuation des morceaux de coques le bras robotisé saisi la carte électronique et la place sur un convoyeur (cf. Figure 4, photo de droite).

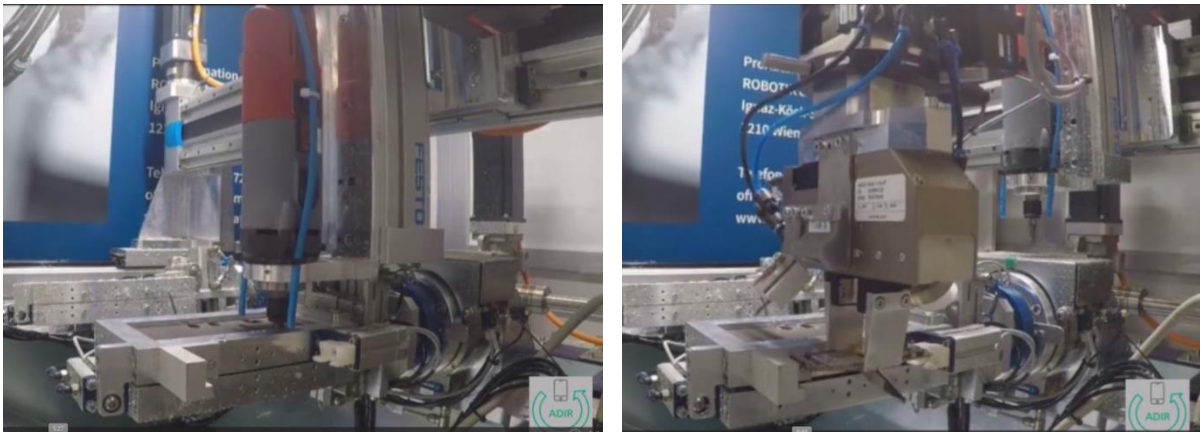

Figure 4 : découpe de la coque et prélèvement de la carte électronique sur un téléphone portable (source : vidéo présentation projet ADIR)

Les étapes suivantes sont identiques quel que soit le format des cartes électroniques. Celles-ci sont d'abord convoyées vers un système d'imagerie 2D et 3D qui va identifier la position des différents composants (cf. Figure 5). Un spectromètre laser va ensuite repérer les composants contenant des matériaux intéressants à prélever (cf. Figure 6).

[4] https://www.adir.eu/en/project-introduction.html

[5] ces derniers sont basés sur un matériau doté de propriété piézoélectriques, le tantalate de lithium

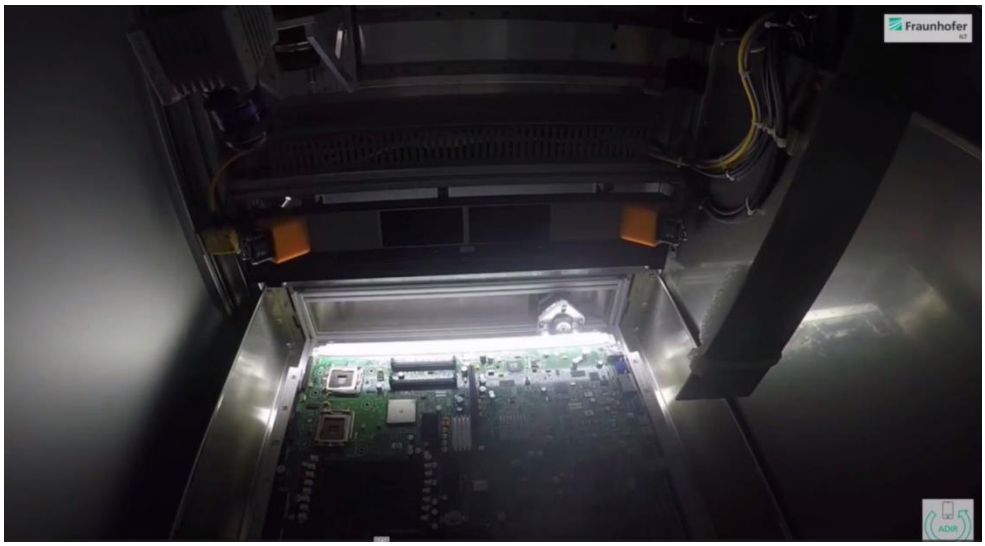

Figure 5 : imagerie 2D et 3D d'un carte serveur (source : vidéo présentation projet ADIR)

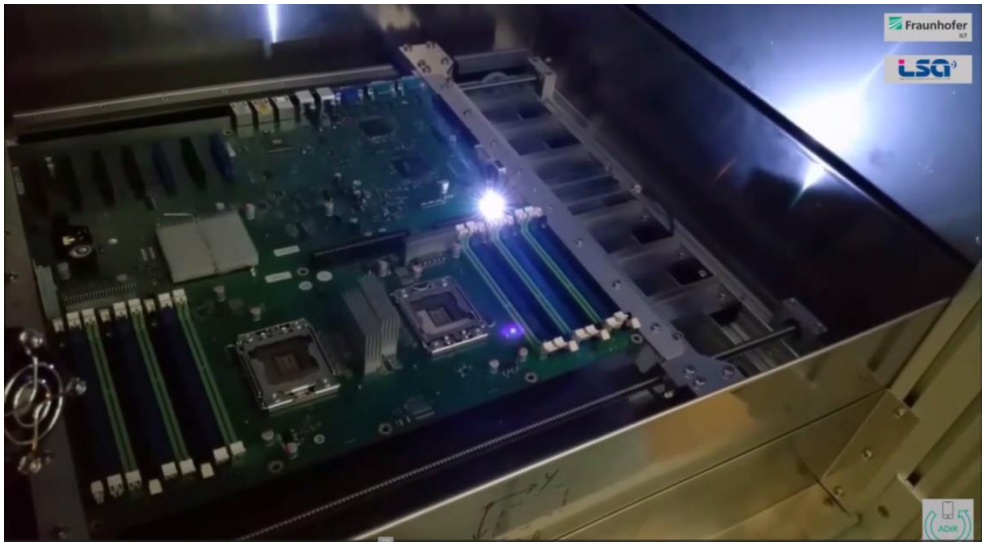

Figure 6 : spectrométrie laser des composants d'une carte serveur (source : vidéo présentation projet ADIR)

Les composants prélevés pour un recyclage sélectif sont récupérés uniquement pour leur contenu en matière, il n'est pas requis qu'ils soient fonctionnels. Cette subtilité permet l'usage d'une méthode de démontage plus agressive mais plus rapide : le dessoudage laser. La Figure 7 permet de l'énergie qui se dégage au moment du dessoudage. Il va de soi que le composant n'est plus en état de marche après cette opération.

Figure 7 : dessoudage laser d'un composant sur une carte serveur (source : vidéo présentation projet ADIR)

Dans le cas des composants à récupérer pour réutilisation la carte électronique est tout simplement découpée autour du composant.

Conception pour la réutilisation

Indépendamment des différentes technologies de récupération des composants électroniques, la solution la plus simple serait que les produits électroniques soient conçus de manière à ce que les composants ou ensembles de composants puissent se faire pour ainsi dire de manière native. Cette dernière partie du rapport présente l'approche mise en œuvre par la société Retronix et présente les travaux menés sur ce sujet par le laboratoire GSCOP de l'Université Grenoble Alpes.

Vers la conception pour des usages en cascade

Le laboratoire G-SCOP a été sollicité dans ce projet afin de proposer une réflexion sur la conception des cartes électroniques pour favoriser plusieurs cycles d'usages que ce soit dans leur intégralité ou seulement de certaines de leurs sous parties. L'objectif initial était de proposer un cadre de développement de produits modulaires, dans lesquelles les composants/modules considérés comme obsolètes après leur premier cycle usage seraient remplacés par des composants plus performants et éventuellement réutilisés dans d'autres applications.

Ce travail avait pour objectif d'utiliser le cadre d'une thèse[6] sur l'étude de la conception des batteries pour la réutilisation et de l'étendre aux problématiques spécifiques des produits électroniques. Il est rapidement apparu que l'une des hypothèses de base du travail proposée dans la thèse n'était pas directement applicable aux produits électroniques en question. En effet, aucune connaissance claire n'était disponible au sujet des seconds usages potentiels des cartes électroniques considérées, ce qui rendait impossible l'application des propositions de la thèse concernant les méthodologies de conception.

Ainsi, pour contribuer à faire avancer la réflexion sur les possibilités d'usages en cascade de cartes et/ou de produits électroniques, nous sommes malgré tout repartis des propositions de la thèse pour décrire les offres de produits reproposés pour tenter d'identifier des seconds usages potentiels pour des produits ou une famille de produits donnés. Le travail de Master[7] (en annexe) propose donc de s'appuyer sur les caractéristiques des offres de produits repurposés établies durant la thèse et présentées dans le Tableau 3 pour construire une grille d'entretien (voir annexes) en interrogeant de façon systématique lesdites caractéristiques pour le cas spécifique de la Livebox.

Cette grille d'entretien a ensuite été utilisée pour réaliser une interview téléphonique d'un expert chez Orange qui a duré 1h30 environ. Ce qui permet de conclure sur l'applicabilité de la proposition.

De plus, quelques conclusions relativement spécifiques au cas d'étude de la Livebox présentées dans le Tableau 3 démontent que le déploiement de la démarche proposée permet d'obtenir des pistes de réflexions plus circonstanciées.

---

[6] https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01988566

[7] Rapport Master 2 Mécanique Université Grenoble Alpes « Conception pour le repurposing : aide à l'identification d'usages en cascades potentiels » H.Abouzeid

Tableau 3 : - Principales caractéristiques d'une offre de produit repurposé (synthèse)[8]

Produit	Processus de (re)fabrication	Modèle d'affaire
Architecture Produit	**Chaine Logistique Inverse**	**Aspects légaux**
Architecture globale	*stockage*	Législation
modularité	*Acquisition*	Propriété intellectuelle
fiabilité	*Démontage*	Standardisation
Durée d'usage	*Transport*	
Architectures sous-jacentes		**Stratégie**
mécanique	**Processus de Repurposing**	Critères de retour
électrique	*Flexibilité*	Image
thermique	Contrôlable / Inspection	*environnementale*
	Désassemblage	*sociale*
Caractéristiques	Nettoyage	Niveau de repurposing
Choix technologiques	Réassemblage	Possession
Aspects sécurité	Repurposing	
normes / règlementations	Stockage	**Marché**
évolutions possibles	Tests	Applications
Caractéristiques dimensionnelles		Prix
volume / dimensions physiques	**Remise sur le Marché**	Volumes suffisants
Critères de performance	*Vente*	
Contraintes d'usage	*Transport*	**Partenariats**
Suivi à l'usage	*Installation*	

[8] https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01988566

Tableau 4 : Pistes de réflexion pour concevoir une offre de produits repurposés à partir d'une Livebox

Penser au fait que la future live box peut constituer le second usage pour des composants d'autres produits (Home-Live, …)
Établir des partenariats avec les acteurs amonts et aval de la chaine de valeur (Sagemcom et éco-organismes)
Chercher en priorité parmi les autres offres internes de l'entreprise
Chercher des produits de mêmes caractéristiques dimensionnelles
Chercher des produits qui partagent les mêmes fonctionnalités et le même niveau d'intégration fonctionnelle (voir les mêmes composants)
Chercher des produits qui ont des volumes de marché similaires
Penser à des modes d'assemblages réversibles pour les composants qui ont de la valeur.
Penser aux produits qui pourraient être vendus sous forme de PSS (même si ils sont vendus aujourd'hui comme des produits classiques).

Proposition de la société Retronix

Le cœur de métier de Retronix est tourné vers la réparation des cartes, le rebillage de composants de types BGA (CPU, mémoire principalement) et la récupération de composants de type mémoire/ processeur/ connecteurs spéciaux (HDMI, coaxial par ex.). Retronix ne travaille pas sur la récupération de composants passifs, du fait de la valeur très faible de ces composants.

Retronix a débuté ses activités suite à une problématique rencontrée chez Motorola : 20 % des circuits intégrés étaient perdus du fait de pattes pliées. Retronix a développé un système qui permet de les redresser (« lead straightening ») pour permettre leur réutilisation. La Figure 8 présente l'opération en cours pour un composant de type QFN (entouré en rouge). Celui-ci est déposé par un automate entre deux mors qui vont resserrer progressivement les pattes.

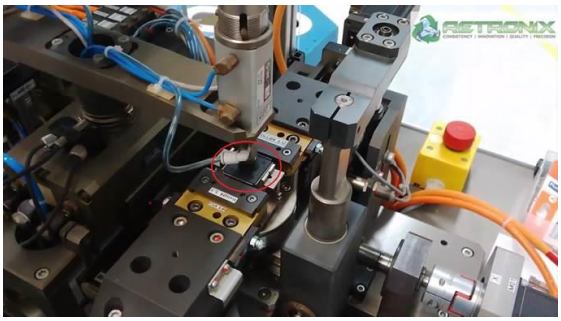

Figure 8 : machine permettant de redresser les pattes des circuits intégrés (source : Retronix)

Au niveau du secteur de la micro-électronique la récente augmentation du prix[9] des produits neuf est liée à deux facteurs :

- la consommation intérieure en Chine, avec une nouvelle classe moyenne qui s'équipe comme les occidentaux en produits électroniques)

- la multiplication des aides électroniques et de la connectivité dans les voitures (demande multipliée par 10)

Du fait de l'évolution rapide des technologies une obsolescence des composants apparaît rapidement. Les fabricants renouvellent leur gamme et il n'est plus possible pour les industriels de trouver des composants d'ancienne génération pour effectuer des réparations. Les solutions de sourcing sont alors le marché gris (problème de garantie de qualité) ou la récupération des composants sur les produits en panne. La NASA passait ainsi par des plateformes comme eBay pour acquérir des processeurs Intel 8086 en nombre.

La problématique majeure de la récupération des composants électroniques est le choc thermique. Pour assembler le composant (ou le récupérer avec des moyens traditionnels de refusion) il faut chauffer la crème à braser autour de 220 °C (alliage RoHS compliant de type Etain-Argent-Cuivre dit SAC).La Figure 9 présente un profil de refusion classique avec l'étape de montée en température avant fusion de l'alliage et son refroidissement.

[9] A titre d'exemple un kit 2x8 GB de DDR4 est passé d'environ 65 $ en janvier 2016 à près de 180 $ en janvier 2018 (source : gamernexus.net)

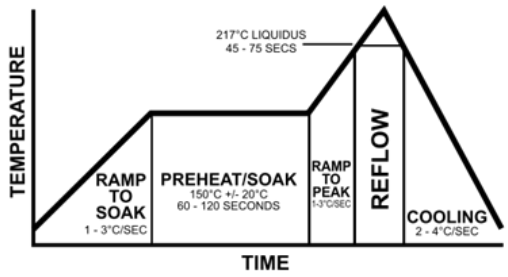

Figure 9 : profil de refusion classique

Suite à l'application de la directive RoHS (Restriction of hazardous substances – directive 2011/65/UE) l'utilisation de crème à braser de type Etain/Plomb n'est plus possible. Le Plomb a été remplacé par de l'Argent et du Cuivre, ce qui a fait augmenter le point de fusion (de ~180 °C à ~ 220 °C), rend l'alliage cassant et peut poser des problèmes de vieillissement (apparition de « whiskers », qui peuvent provoquer des court-circuits, cf. Figure 10).

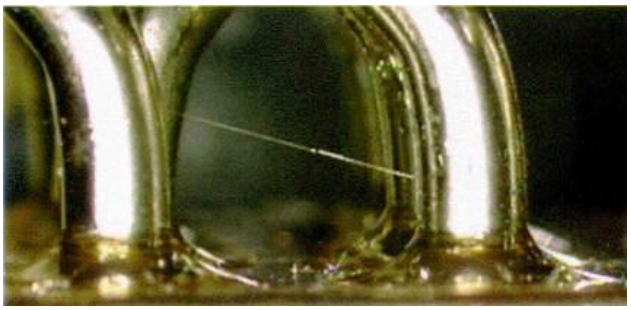

Figure 10 : exemple de « whisker » formé entre deux points de connexion

Pour des questions de fiabilité les fabricants préconisent un maximum de 3 cycles de refusion par composant. Les composants ayant potentiellement été retravaillés lors de leur pose initiale ceci limite fortement leur réutilisation en cas de démontage/remontage par refusion classique.

Le savoir-faire de Retronix se base sur zéro choc thermique pour le désassemblage et le rebillage du composant. Un maximum de 80°C est appliqué au niveau de composant lors du désassemblage la source de chaleur étant positionnée sur la face opposée de la carte électronique (voir Figure 11).

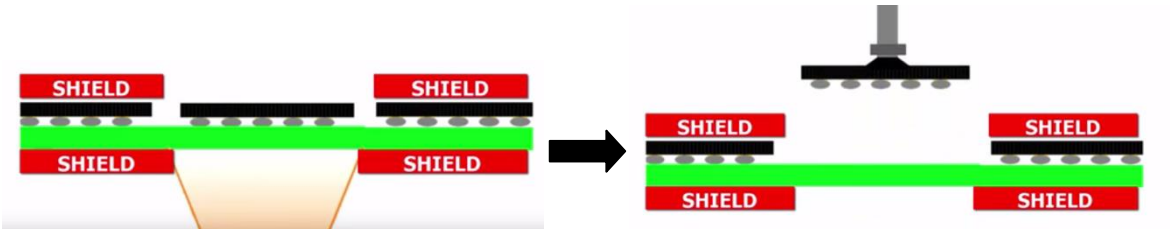

Figure 11 : procédure de chauffage de composant par face arrière (source : Retronix)

Lors de l'opération de récupération du composant une partie des billes reste sur la carte électronique et une autre se déforme, ce qui rend obligatoire une opération de rebillage du composant. Pour cela les billes de connexion endommagées sont d'abord retirées avec une lame à air chaud (cf. Figure 12, photo de gauche). Une nouvelle série de billes est ensuite réimplantée à l'aide d'un laser (cf. Figure 12, photo de droite). L'utilisation de cette machine permet d'envoyer une impulsion d'énergie localisée au niveau de chaque bille, suffisamment élevée pour implanter la bille mais trop faible pour provoquer une chauffe du composant.

NB : si la technique de refusion classique avec un four est utilisée pour la réimplantation des billes cela provoque inévitablement un échauffement préjudiciable de la puce du composant.

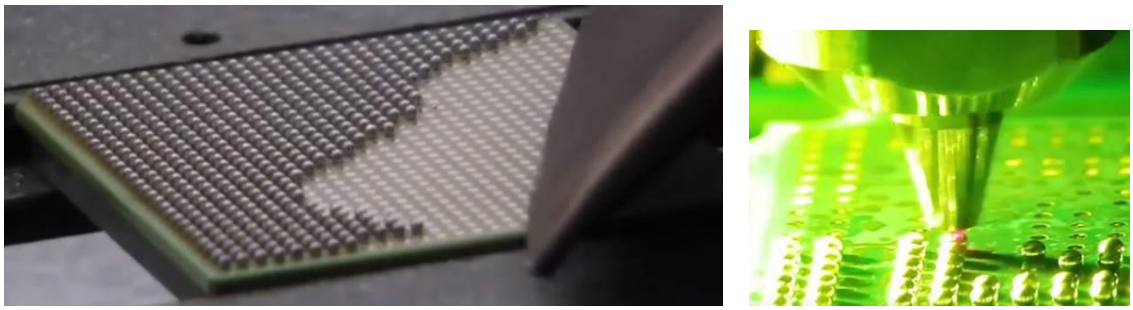

Figure 12 : procédure de retrait des billes par lame d'air chaud (photo de gauche) et rebillage laser (photo de droite)

Pour une intégration réussie Retronix préconise de réfléchir à l'automatisation du désassemblage dès la conception de la carte (ex. placement des composants pour faciliter la réparation).

L'utilisation de socket pour les composants à changer (ex. CPU) induit une augmentation du prix, nécessite de la place sur la carte et l'installation/désinstallation du composant nécessite une opération manuelle.

Pour les fonctionnalités à forte valeur, à remplacer pour une éventuelle mise à jour ou les plus exposées à des pannes Retronix préconise l'usage d'un interposeur

Utilisation d'interposeur, illustration avec les cartes graphiques VEGA

La plupart des cartes graphiques actuelles reposent sur l'utilisation de mémoire vive de type GDDR (Graphics Double Data Rate) en version 5 ou 6. Avec ces architectures la mémoire vive est intégrée sous forme de circuits intégrés à matrice de billes (ou BGA – ball grid array). La Figure 13 permet de visualiser l'empreinte de ces composants sur une carte graphique. Dans le cas de la RTX 2080Ti un total de 11 circuits intégrés, encadrés en orange dans la Figure 13, sont nécessaires. Ils se présentent sous la forme d'un boîtier FPGA (Fine-Pitch Ball Grid Array) de 14 x 12 mm doté de 180 billes de connexion et sont installés au plus près du autour du processeur graphique (GPU, entouré en violet).

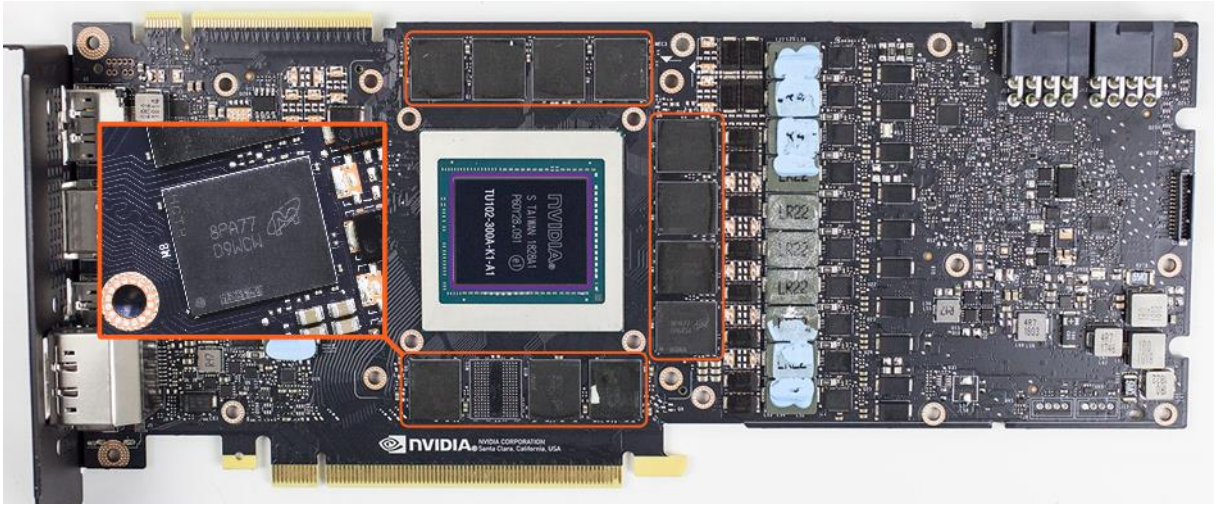

Figure 13 : carte électronique de la carte graphique NVIDIA RTX 2080Ti (source : Techpowerup)

Dans le cas de l'architecture VEGA le choix d'AMD s'est porté sur l'utilisation de mémoire de type HBM2 (seconde version de High Bandwidth Memory). La mémoire vive n'est plus ajoutée sur la carte électronique de la carte graphique sous forme de circuits intégrés distincts, mais directement intégrée au plus près du GPU. L'assemblage GPU/HBM est effectué sur une carte dédiée en silicium appelée interposeur. La Figure 14 permet de visualiser la différence entre les deux architectures.

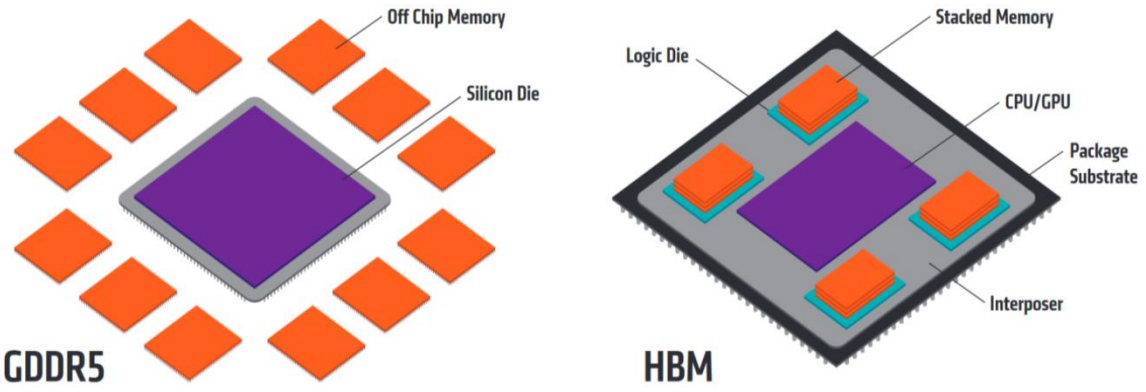

Figure 14 : comparaison architecture (GDDR5 / GDDR6) et architecture HBM (source : AMD)

Cette intégration a plusieurs avantages, notamment dans le cadre de cartes graphiques dédiées aux applications mobiles. Les puces de mémoire HBM étant empilées (jusqu'à 8 par pile pour la HBM2) les vitesses de transferts sont plus rapides qu'avec la GDDR5 (respectivement plus 100 GB/s pour une pile contre un maximum de 28 GB/s par puce – source AMD). La tension nécessaire au fonctionnement des puces HBM est inférieure à celle nécessaire aux composants GDDR5 (respectivement 1,3 contre 1,5 V). De ce fait l'architecture HBM est capable de fournir 3,5 fois plus de bande-passante par watt, permettant ainsi une meilleure efficacité énergétique.

De plus, les connexions entre puces HBM étant réalisées via la méthode TSV (Through-Silicon Via) il n'est pas nécessaire de recourir à un câblage par fil (wire bonding) pour chaque composant. Enfin, au contraire des composants GDDR les puces de mémoire HBM sont dépourvus de boîtier. Au global cette combinaison puces empilées/dépourvues de boîtier permet de réduire jusqu'à 75 % l'empreinte du circuit graphique. La Figure 15 détaille l'assemblage des différents éléments (puces mémoire et GPU) sur l'interposer.

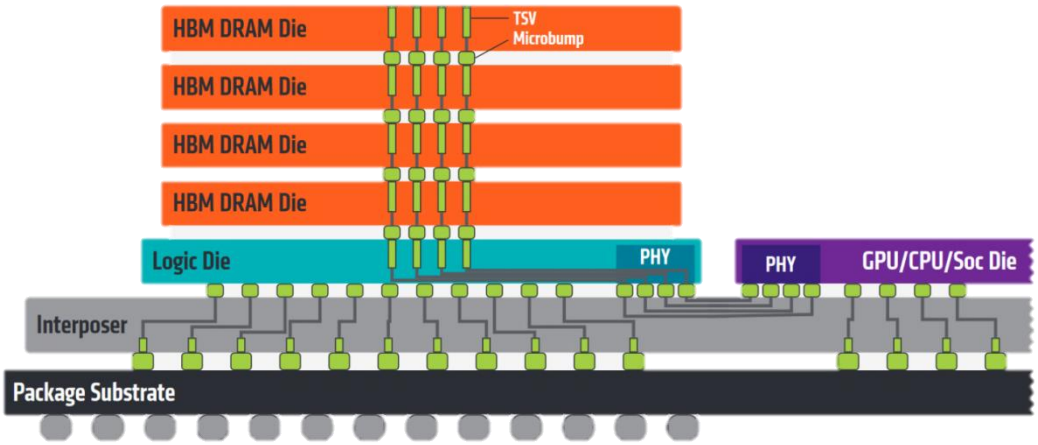

Figure 15 : architecture HBM, vue en coupe (source : AMD)

La partie gauche de la Figure 16 permet de visualiser l'empreinte réelle des différents éléments sur un produit réel (AMD VEGA 64). Les deux piles d'HBM2 de 4 Gigaoctet sont encadrées en orange, le GPU étant mis en évidence en violet.

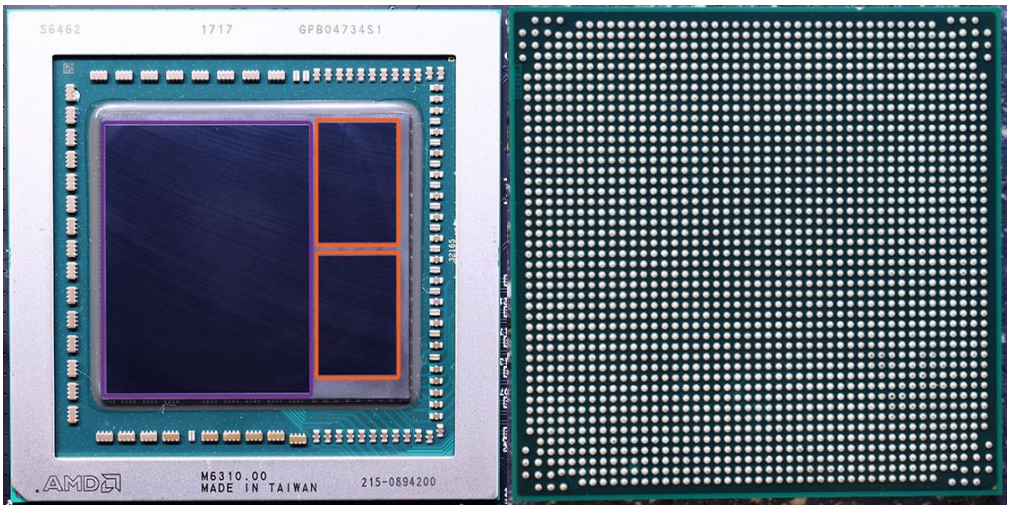

Figure 16 : détail du circuit graphique VEGA 64 d'AMD (source : Techpowerup)

En termes de récupération de composants pour utilisation en tant que pièce de rechange ou pour intégration sur une nouvelle carte électronique le recours à l'interposeur offre l'avantage de pouvoir retirer l'ensemble des composants à haute valeur (GPU et piles de mémoire HBM2) en une seule opération. Avec une architecture classique « GPU + GDDR5/6 » il est nécessaire de dessouder le GPU et chacun des circuits intégré mémoire pour obtenir le même résultat. Dans le cas de l'architecture HBM la chaleur est apportée au niveau des billes de connexion de l'interposeur (rangée inférieure de billes vertes dans la Figure 15), ce qui évite d'exposer directement les composants. Au contraire avec une architecture classique les puces, surtout mémoire, sont directement exposées au flux de chaleur.

Utilisation d'interposeur, retour d'expérience de Retronix

La version de l'interposeur présentée par Retronix est plus simple que celle d'AMD. En lieu et place d'un carte en silicium il s'agit d'un circuit imprimé des plus commun en termes de matériaux (résine époxy, fibre de verre et pistes en cuivre par ex.) et doté d'un faible nombre de couches de cuivre.

Cet interposeur permet ainsi d'obtenir les avantages suivants :

- ✓ gain espace par rapport aux mêmes composants montés sur des sockets
- ✓ pas d'élément mécanique (pin) potentiellement fragile et nécessitant une finition à l'or comme dans un socket zéro choc thermique au désassemblage/rebillage. Nombre de réparation possibles est ainsi augmenté
- ✓ maintenance simplifiée (processus automatisable pour le désassemblage)
- ✓ possibilité de peupler partiellement un interposeur pour une évolution future
- ✓ possibilité d'utiliser l'interposeur pour refaire un routage. Ceci permet ainsi d'utiliser un nouveau composant (initialement non compatible pin à pin) sur une ancienne carte, sans avoir à refaire le design de celle-ci
- ✓ réduction du coût global de la carte électronique en cas de contraintes fortes sur un composant. Par exemple, si un composant a de fortes contraintes thermiques il est possible d'utiliser une qualité plus élevée de matériaux pour l'interposer et une qualité normale sur le reste du circuit imprimé.

Certains composants de type COB (chip-on-board), utilisés notamment pour les contrôleurs d'afficheurs LCD ou AMOLED (cf. Figure 17), sont très compliqués à récupérer du fait de leur forme : packaging très long et fin, sans boîtier époxy et assemblé avec plusieurs centaines de billes sur la structure de l'afficheur (1466 pour le composant de la photo ci-dessous).

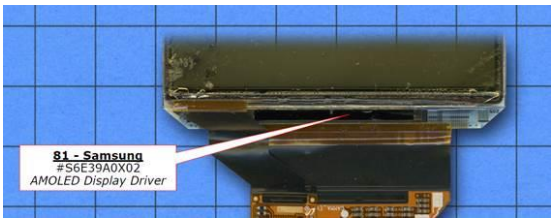

Figure 17 : exemple de composant de type COB (source : TechInsights)

Pour ces composants sensibles le recours à un interposeur présente un intérêt indéniable.

Concernant le marché du composant de seconde main il est énorme à l'échelle mondiale, mais difficile d'estimer exactement la demande. Les composants les plus intéressants pourraient être la mémoire et les CPU, du fait de leur valeur intrinsèque ; ainsi que la connectique de type HDMI/coaxiale du fait de sa longue durée de vie. A noter qu'il n'est intéressant de récupérer un composant que si la valeur résiduelle est d'au moins 50 % par rapport à la valeur du neuf.

Conclusion perspectives

Ce travail d'investigation mené dans le cadre d'un projet collaboratif de l'association Eco SD avec Orange, CentraleSupélec, les Arts & Metiers et l'Université de Grenoble (laboratoire GSCOP) a montré la pertinence de la réutilisation de composants électroniques type CPU & RAM, c'est-à-dire les composants à valeur ajouté d'un produit électronique. Même si le marché européen ne semble pas être actif dans ce domaine, l'Europe est probablement une zone où il serait pertinent de mener des études et expérimentations sur sujet pour ensuite voir l'appétence de l'Asie du Sud Est pour ces composants.

Il serait donc pertinent de poursuivre les travaux et tester en grandeur réelle les différentes technologies de récupération.

Par ailleurs pour faciliter le processus de récupération une nouvelle piste à considérer serait d'étudier la manière de concevoir les produits électroniques pour que cette récupération se fasse de la manière la plus simple. Ainsi la solution d'Interposeur développée par Redtronix semble prometteuse, car elle consiste à souder les composants (ou ensemble de composants) sur une carte fille qui elle-même est soudée sur la carte mère. Ainsi lors de la phase de récupération des composants il suffit de dessouder l'Interposeur, de le re-biller puis de le souder sur la nouvelle carte mère, ainsi les performances des composants ne sont nullement altérées suite aux différentes chauffes.