

# La modularité : un enjeu pour les produits électroniques

Comment promouvoir ce concept pour augmenter la durée de vie des produits ?

Carole Charbuillet  
Institut Arts et Métiers de Chambéry  
12M Bx, UMR 5298, Eq. IMC  
4 rue du Lac Majeur, BP 50295  
7Le Bourget du Lac – France  
carole.charbuillet@ensam.eu

Olivier Pialot  
Supmeca QUARTZ-Seatech COSMER  
Université de Toulon  
CS 60584 - 83041 TOULON CEDEX 9 – France  
olivier.pialot@supmeca.fr

**Résumé**—Dans un contexte où l'environnement devient un critère majeur pour l'industrie des produits électroniques type TIC, la modularité apparaît comme une solution intéressante pour réduire leurs impacts environnementaux. Ainsi elle peut potentiellement conduire à une réduction des impacts en allongeant leur durée d'usage ou en facilitant leur réparabilité. Mais les expériences modulaires ne sont pas toutes des succès. Il est donc important d'identifier les freins au développement d'une telle démarche. Avant de développer une méthodologie de modularité pour ce type de produits, il est donc essentiel de bien cerner la notion de modularité. Cet article propose une analyse du concept de modularité, et des objectifs visés par sa mise en place. Ensuite, à partir d'un benchmark de différents exemples de produits électroniques modulaires, les forces et faiblesses d'une telle démarche sont identifiées. Enfin pour pouvoir développer une méthodologie de modularité pérenne et efficace, un projet de recherche au sein du réseau EcoSD a été initié et est présenté.

**Mots-clés**—Modularité, produit électronique, environnement, durée de vie, éco-conception

## I. INTRODUCTION

La réduction des impacts environnementaux des produits est aujourd'hui un enjeu majeur pour de nombreux industriels que soit pour des raisons réglementaires, environnementales ou pour répondre à une demande des clients. Cet enjeu est d'autant plus fort pour l'industrie électronique. Ainsi des produits comme les TIC sont souvent perçus comme très consommateurs d'énergie et à courte durée de vie. La notion d'obsolescence programmée est régulièrement associée à ces produits et elle est reconnue par la loi sur la transition énergétique [1]. Les industriels sont donc à la recherche de solutions pour améliorer l'empreinte environnementale de leurs produits. La modularité apparaît alors comme une solution efficace notamment pour allonger la durée de vie des produits. De plus en plus de produits électroniques modulaires sont commercialisés (ex ordinateur, smartphones, tablette pour enfant...). La modularité est donc une approche de plus en plus utilisée dans le monde industriel, et ce pour différentes raisons en fonction du secteur. Cependant, le concept n'est pas récent puisqu'il est apparu dans les années 60 dans le secteur informatique [2] (modularité des PC). Il est apparu pour des raisons de compétitivité, en introduisant de la

flexibilité dans le processus de développement du produit. Depuis, de nombreux secteurs industriels se sont appropriés cette approche modulaire : automobile, secteur électronique, bâtiment... [3]. Cette évolution de la modularité répond à une obligation toujours croissante d'optimiser les ressources, de s'adapter aux évolutions du marché, de répondre à la demande des clients de plus en plus exigeants. Dans ce cadre, les problématiques environnementales (durée de vie, obsolescence programmée, recyclage) incitent certains industriels à s'intéresser de plus près à ce concept de modularité (ex : développement des téléphones modulaires : fairphone, puzzlephone [4]).

Cette étude vise à réaliser un état des lieux de la modularité dans les produits électroniques afin d'identifier les freins à leur développement. A partir d'une analyse bibliographique sur la modularité, les différents types de modularité et leurs objectifs sont présentés. Une fois le cadre posé, cet article aborde la problématique de la modularité dans l'électronique. A partir des caractéristiques définies dans la première partie, différents cas de modularité électronique sont étudiés afin de mettre en évidence les forces et faiblesses de ce concept et la difficulté de le déployer. Enfin, pour pouvoir déployer une méthodologie de modularité efficace et promouvoir son utilisation dans les produits électroniques, les travaux initiés dans le cadre du Projet Collaboratif du réseau EcoSD sont présentés.

## II. LA MODULARITE

La modularité est aujourd'hui un concept dont la définition ne fait pas consensus auprès des chercheurs du domaine. En effet, il n'existe pas une définition unique de la modularité [4]. Celle-ci dépend notamment du domaine d'application et des objectifs pour lesquels cette démarche a été initiée. La modularité est donc un concept qui peut présenter différentes définitions en fonction du produit et de l'objectif (réduction des coûts, optimisation technique, réduction des impacts environnementaux...).

### A. Le concept

Le concept de modularité peut se définir comme « la décomposition cohérente d'un produit en sous-systèmes, avec l'intégration d'éléments de niveau inférieur, dont les

interactions sont limitées. Les sous-systèmes sont appelés modules et interagissent entre eux par le biais d'interfaces» [5]. Correa et al. [3] l'ont défini de la manière suivante « concept qui permet de concevoir des structures basées sur la réduction des interdépendances entre les modules (démontabilité) tout en maximisant les interdépendances à l'intérieur de ces modules. » Le but est de pouvoir changer ou mélanger ces modules pour obtenir de nouvelles configurations sans pertes de fonctionnalités ou de performance du système. Selon [6], il existe trois niveaux au concept de modularité : un niveau produit, un niveau système et un niveau composant. Le degré de modularité se mesure en se basant sur le degré de connectivité entre les composants. La modularité d'un produit, selon [7], est « l'utilisation et l'agencement de technologies, d'éléments ou de composants accessibles de manière indépendante. ». Le PC est l'exemple le plus parlant de la modularité : modularité des composants, des périphériques, des OS et logiciels.

Toutes ces définitions mettent bien en évidence la difficulté de trouver un consensus. Cependant, elles ont plusieurs éléments en commun qui représentent le fondement de la modularité : niveau d'interaction faible, décomposition du produit pour de nouvelles configurations (fonction, marché...).

### B. Les types de modularité

L'analyse de la bibliographie a mis en évidence les types de modularité suivants :

- Le produit modulaire : Ensemble de modules simples et indépendants les uns des autres, qui peuvent être réutilisés et interchangeables afin d'augmenter la variété des produits [3].
- Le système modulaire : Système organisé en composants, où la structure, les fonctions et les relations entre composants sont construits de telle façon que le système soit reproductible et réalisable, et les composants remplaçables [8].
- L'architecture modulaire : Structure du produit basée sur les interactions entre la structure physique et fonctionnelle du produit. C'est également ce qui définit si la structure est modulaire ou intégrale et à quel degré [3].
- La production modulaire : Production permettant de réutiliser des technologies externalisées ou composants au travers d'autres produits et marques (ex. de l'industrie automobile) [9]
- L'innovation modulaire : Innovation permettant le changement des architectures et des interfaces des composants en amont du processus de conception mais également des systèmes de production en les découpant en sous-ensembles [3].

### Les travaux de recherche

Parmi les recherches académiques, le concept de modularité a été étudié selon différents objectifs [3,8]:

- La modularité du produit incluant la modularité du processus de développement
- La modularité de la production, fabrication et des procédés
- La modularité de l'organisation et de la Supply Chain

- La modularité d'un service, du développement d'un service, des services logistiques

Ces recherches mettent en évidence que la modularité concerne différents niveaux du cycle de vie d'un produit: de la batterie au changement d'un composant électronique, du procédé de fabrication au processus d'innovation (cf. Tableau 1).

Objectif de la recherche	Type de modularité	Exemple
La modularité du produit et du processus de développement	Produit modulaire et Architecture modulaire	[10] présente le rôle de la modularité dans la variabilité des produits vendus et son apport pour la mise en place d'une économie d'échelle pour les composants.
La modularité de la production, fabrication et des procédés	Production modulaire et Innovation modulaire	[11] définit quatre objectifs pour la modularité : optimiser la production, l'utilisation, allonger la durée de vie et faciliter l'accès aux données. Les 4 types sont souvent associés dans les nouveaux produits pour répondre à la fois aux besoins du client et du producteur.
La modularité d'un service, du développement d'un service, des services logistiques	Système modulaire et innovation modulaire	[12] présente des études de cas pour les constructeurs Volvo, Toyota et SAAB. Il identifie les étapes logistiques qui sont cruciales pour un procédé d'assemblage modulaire performant. La dispersion des activités et des ressources peut rendre inefficace un tel processus. [13] développe une plateforme de service modulaire incluant quatre dimensions : service, process, organisation et interface client.
La modularité de l'organisation et de la Supply Chain	Innovation modulaire	[14] met en évidence que la modularité entraîne un plus grand degré de collaboration client-fournisseur. Elle requiert également des pratiques d'approvisionnement collaboratives pour développer le co-développement et réduire les contraintes d'interface. [15] montre que les produits très hautement modulaires comme le mobilier, modifient fortement l'organisation de la Supply Chain et nécessitent un haut degré d'innovation.

Tableau 1. EXEMPLES DE RECHERCHE EN FONCTION DU TYPE DE MODULARITE ADAPTE DE [8]

### C. Les niveaux de modularité

Les définitions liées à la modularité et les travaux de recherche associés montrent que sa mise en place peut concerner à la fois le produit ou ses composants, et tous les acteurs de la Supply Chain en fonction de son objectif.

La modularité peut alors se définir selon deux niveaux :

- Le niveau d'application de la modularité dans l'entreprise : interne ou externe
- Le niveau de modification du produit : physique (action sur les composants et maintien des fonctions) ou fonctionnelle (action sur les fonctions du produit). Dans certains cas, il peut y avoir une modification conjointe des composants et des fonctions.

La modularité interne représente un avantage principalement pour le producteur. Par exemple, la modularité sur les sites d'assemblage des voitures permet de réduire les coûts de production et les coûts logistiques. La modularité externe

quant à elle présente un avantage principalement pour l'utilisateur. Par exemple, une poussette évolutive selon l'âge de l'enfant (nacelle, cosy et poussette canne, tout en 1) permet à l'utilisateur de faire durer son produit et ne pas multiplier les produits différents à faible durée d'usage. Dans certains cas, la modularité a à la fois des avantages en interne et externe : la modularité d'un véhicule permet au client de choisir celle qui correspond à son besoin et au constructeur de réduire ses coûts et améliorer sa productivité [3].

La modularité fonctionnelle est une amélioration ou l'ajout de nouvelles fonctions mais ne vient pas modifier la fonction principale du produit. Elle est également appelée upgradabilité. C'est l'augmentation de la durée d'usage du produit en l'enrichissant d'un point de vue fonctionnel par l'ajout de nouvelles fonctions ou la mise à jour de fonctions existantes [16].

#### D. Pourquoi faire de la modularité ?

L'élément qui va conditionner le type de modularité et ses caractéristiques c'est avant tout l'objectif recherché en utilisant un tel concept. Les objectifs de la modularité sont les suivants [2,3]:

- Faciliter la production de produits complexes en les divisant en modules (automobile, fabrication modulaire),
- Permettre de produire en parallèle des produits différents si les modules différenciant ses produits peuvent être produits en même temps,
- Être flexible sur de futurs changements et donc optimiser les coûts : modification d'un seul composant est moins coûteux que de modifier le produit complet (maintenance, réparabilité),
- Répondre à plusieurs marchés,
- Réduire les impacts environnementaux en allongeant la durée de vie du produit et en réduisant la consommation de ressources (non production d'un produit neuf).

Ces objectifs sont interdépendants de la phase de vie du produit concernée par la modularité [3,5]. Pour la phase de conception, les objectifs sont la réduction du temps de développement, la réduction des coûts et favoriser l'innovation (cas de l'automobile, le bâtiment et l'électronique). Pour la phase de fabrication, ils portent sur la réduction du nombre de composants à produire, la variabilité des coûts, la réduction de la variété des pièces, l'amélioration de l'ergonomie des processus de fabrication, l'optimisation des lignes de montage, la réduction des impacts des procédés de fabrication en optimisant les ressources utilisées et l'externalisation de la production de certains modules (cas de l'automobile et du bâtiment). Pour la phase d'usage, la modularité va permettre le choix de la configuration du produit souhaité par le client, l'upgrade de produits avec de nouvelles fonctions ou composants, la réparabilité et l'augmentation de la durée de vie (automobile, imprimante-photocopieur, smartphone (projet ARA, Phoneblocks)). Pour la phase de fin de vie, l'objectif est de favoriser la démontabilité du produit, l'obtention de composants d'occasion, le remanufacturing et le recyclage.

La modularité est finalement souvent associée à une volonté de réduire les impacts environnementaux du produit. A

chaque niveau de modularité présenté dans la partie précédente, les gains environnementaux vont être plus ou moins réels et conséquents. Selon [4], la modularité des composants conduirait au gain environnemental le plus faible et correspondrait au traditionnel Design for Recycling [4]. Une modularité mixte, c'est-à-dire un mélange de modularité des composants, fonctionnelle... permettrait le plus grand gain environnemental [4]. Ceci met en évidence la nécessité d'analyser d'un point de vue environnemental les bienfaits de la modularité.

#### E. Les bénéfices de la modularité

Les principaux bénéfices recensés dans la littérature sont ([9, 16, 17]):

- L'atteinte d'une économie d'échelle : chaque module sera produit en grande quantité pour répondre à différentes versions d'un même produit,
- Faciliter la possibilité de faire des changements dans les produits : changement d'un module indépendamment du reste du produit,
- Accroître la variété du nombre de produits proposés : plusieurs combinaisons de modules possibles,
- La réduction du temps de réponse à la demande client : optimisation des organisations logistiques,
- Faciliter la maintenance, la réparabilité, l'upgradabilité...

Cependant, à côté de ces bénéfices évidents et non négligeables, une modularité mal maîtrisée peut s'accompagner de coûts potentiels liés à une redondance dans les architectures proposées, une capacité excessive en nombre de modules disponibles, et une trop grande similarité dans les produits considérés modulaires.

### III. L'ELECTRONIQUE ET LA MODULARITE

L'électronique est un secteur dans lequel la modularité a pris de l'ampleur ces dernières années notamment dans la téléphonie mobile [4]. Dans ce cadre, la modularité est liée principalement à :

- la variabilité et l'évolution des fonctions pour augmenter la durée de vie des produits : passage de la modularité à l'upgradabilité,
- La démontabilité des composants pour faciliter la réparation et le traitement en fin de vie.

#### A. Les freins à la modularité

Les freins à la modularité fonctionnelle ou upgradabilité dans les produits électroniques à destination des ménages peuvent être classés en trois grands facteurs [18] (cf. Tableau 2):

- La demande client : la modularité permet au client de remplacer des éléments par des plus performants, mais cette fonctionnalité est peu utilisée et ce pour différentes raisons.
- Les verrous technologiques
- Le facteur concurrentiel

#### B. Les facteurs de déploiement

Pialot et al. [19] montrent que sur un appareil de type aspirateur sur batterie, des gains environnementaux peuvent être atteints grâce à l'upgradabilité sous certaines conditions, à

savoir une anticipation du traitement de fin de vie des modules remplacés ou une évolutivité accrue de leur fonctionnalité, un contrôle de la quantité d'upgrades effectuée au cours de la vie du produit, notamment en ajustant les évolutions spécifiquement aux fonctionnalités valorisées par le client. Le basculement vers une offre de service, sans cession de propriété, favorise la gestion rationnelle des modules au cours du temps. Considérer l'upgradabilité implique de concevoir un système au périmètre plus large qu'un produit conventionnel, englobant les phases du cycle de vie mais aussi les différentes dimensions du business model, que ce soit une relation client directe et continue pour ajuster les upgrades au besoin du client, un service support dédié au changement des modules qui sont upgradés, ou encore de nouveaux modes de contractualisation qui incluent la vente d'upgrades au cours du temps [19].

Facteur	Barrière
Demande client	Lien émotionnel : avoir le produit dernier cri ; le produit upgradé est associé une image de dépassé
	Changement régulier du produit : cycle d'usage plus court que le cycle de vie réel du produit
	Effort de remplacement considéré comme trop important
	Intérêts de l'upgrade non perçus
Verrous technologiques	Avoir les dernières fonctionnalités
	Incertitude dans l'évolution de la modularité
	Perte de performance liée à l'architecture modulaire
Facteur concurrentiel	Evolution technologique : valeur ajoutée de la modularité peut décroître lorsque le taux d'évolution technologique augmente
	Saturation des performances
	Concurrence avec ses propres produits
	Concurrence avec les fournisseurs
	Concurrence avec d'autres fabricants
	Concurrence avec les marchés secondaires

Tableau 2. BARRIERES AU DEVELOPPEMENT DE L'UPGRADABILITE DANS LES PRODUITS ELECTRONIQUES ADAPTE DE (17)

### C. Etudes de cas de l'industrie électronique

Une revue de systèmes électroniques modulaires a été réalisée. Un extrait de ces analyses est présenté dans le Tableau 3. Les critères d'analyse utilisés sont les suivants :

- Définition du concept (Concept) ;
- Objectif de la modularité (Obj. Modularité) ;
- Type de la modularité (Typ. Modularité) ;
- Gain environnemental (Gain Envt.) ;
- Freins à la modularité (Freins, verrous, limites) ;
- Statut du projet/système (Statut) ;

Système	Critères
---------	----------

<p>Concept : Smartphone modulaire avec des briques « standard » qui se « pluggent » et vendues par différents fournisseurs avec une fonctionnalité au top- Projet Phoneblocks devenu Projet ARA (Google)</p>	<p>Obj. Modularité : améliorer la fonctionnalité du système dans le temps et augmenter la durée de vie du produit            Typ. Modularité : fonctionnelle et externe (par le client)            Gain envt. : rationalisation de l'usage de matériaux grâce à l'extension de la durée de vie (relative à l'upgradabilité)            Freins, verrous, limites: complexité de définir des standards de gabarit, d'interface de communications entre les modules, de broches de connexion, difficile d'affirmer l'intérêt du consommateur, l'existence de fournisseurs des modules et de viser des fonctionnalités « au top »...            Statut : arrêt du projet.</p>
<p>Concept : Smartphone modulaire avec des briques assemblées avec des vis - Projet Fairphone 2</p>	<p>Obj. Modularité : améliorer la fonctionnalité du système dans le temps et sa réparabilité pour augmenter la durée de vie du produit, et démontabilité en fin de vie            Typ. Modularité : fonctionnelle et externe (par le client)            Gain envt. : rationalisation de l'usage de matériaux grâce à l'extension de la durée de vie (réparabilité et upgradabilité) et valorisation en fin de vie (plus aisée)            Freins, verrous, limites: technicité de l'architecture modulaire, difficile d'affirmer l'intérêt du consommateur, intérêt des fournisseurs des modules ...            Statut : en vente</p>
<p>Concept: Ordinateur portable modulaire - Laptop D4R de Iameco</p>	<p>Obj. Modularité : améliorer la fonctionnalité du système dans le temps pour augmenter la durée de vie du produit, et démontabilité pour recyclage et réutilisation en fin de vie            Typ. Modularité : fonctionnelle et physique, et interne (par l'assembleur)            Gain envt. : rationalisation de l'usage de matériaux grâce à l'extension de la durée de vie (upgradabilité) et valorisation en fin de vie            Freins, verrous, limites: technicité de certains composants- incompatibilité des performances (composants ou logiciels)            Statut : en vente</p>
<p>Concept: Ordinateur modulaire - PC all-in-one de Microsoft &amp; Revo build de Acer</p>	<p>Obj. Modularité : améliorer la fonctionnalité du système dans le temps pour augmenter la durée de vie du produit            Typ. Modularité : fonctionnelle, et externe (par le client)            Gain envt. : rationalisation de l'usage de matériaux grâce à l'extension de la durée de vie (upgradabilité)            Freins, verrous, limites: technicité de l'architecture modulaire - difficile d'affirmer l'intérêt du consommateur, intérêt des fournisseurs des modules            Statut : Microsoft : projet en cours de développement ; arrêt du projet Acer faute de fournisseurs de modules.</p>
<p>Concept : Box multi-fonctions (Internet-TV- Téléphone ...) - Box Orange, Free, SFR, Bouygues</p>	<p>Obj. Modularité : adapter la fonctionnalité du système dans le temps pour augmenter la durée de vie du produit            Typ. Modularité : fonctionnelle, et externe (par le client)            Gain envt. : rationalisation de l'usage de matériaux grâce à l'extension de la durée de vie (refurbishing et location)            Freins, verrous, limites: usage réel du consommateur vis-à-vis des possibilités- répétitivité de certaines fonctions- image du produit            Statut : en vente/en service</p>
<p>Concept : Tablette hybride modulaire et évolutive pour les enfants - Infinity</p>	<p>Obj. Modularité : adapter la fonctionnalité du système dans le temps pour augmenter la durée de vie du produit (Hardware : batterie, appareil photo, processeur, écran, et Software : système d'exploitation)            Typ. Modularité : fonctionnelle paramétrique, et externe (par le client)            Gain envt. : rationalisation de l'usage de matériaux grâce à l'extension de la durée de vie (upgradabilité)            Freins, verrous, limites: évolutivité réelle vis-à-vis des possibilités des utilisateurs en fonction de leur âge - adéquation avec les nouvelles générations de module            Statut : en vente</p>
<p>Concept : Module de mise à niveau du téléviseur - Samsung</p>	<p>Obj. Modularité : améliorer la fonctionnalité du système dans le temps pour augmenter la durée de vie du produit (Hard : commande vocale et vitesse traitement et soft : nouvel OS SmartTV)</p>

Evolution Kit	<p><u>Typ. Modularité</u> : fonctionnelle, et externe (par le client)</p> <p><u>Gain envt.</u> : rationalisation de l'usage de matériaux grâce à l'extension de la durée de vie (upgradabilité)</p> <p><u>Freins, verrous, limites</u>: récurrence de la mise à niveau, surcoût, réel usage du consommateur</p> <p><u>Statut</u> : en vente</p>
Concept : Machine à affranchir le courrier modulaire pour le remanufacturing – Neopost	<p><u>Obj. Modularité</u> : améliorer la démontabilité pour la fin de vie (remanufacturing)</p> <p><u>Typ. Modularité</u> : physique (et fonctionnelle si mise à niveau) et interne (en usine)</p> <p><u>Gain envt.</u> : rationalisation de l'usage de matériaux grâce au remanufacturing (location)</p> <p><u>Freins, verrous, limites</u>: technicité de l'architecture modulaire, spécificité de la norme postale qui impose le retour et démantèlement en usine des machines, état des machines récupérées ...</p> <p><u>Statut</u> : en vente</p>
Concept : Modules et Actionneurs qui s'assemblent en mode Lego – Nascent	<p><u>Obj. Modularité</u> : partant du constat de modules récurrents dans les produits électroniques, proposition d'un set restreint de modules qui s'assemblent en mode Lego permettant de couvrir tout un champ de fonctionnalités et de s'adapter aux besoins des clients</p> <p><u>Typ. Modularité</u> : fonctionnelle « satellisée » et externe (par le client)</p> <p><u>Gain envt.</u> : rationalisation de l'usage de matériaux en évitant la redondance de parties électroniques pour des besoins ponctuels</p> <p><u>Freins, verrous, limites</u>: usage complexe et mystérieux du point de vue du consommateur, besoin d'une coque imprimée en 3D ou problème d'image du produit</p> <p><u>Statut</u> : en vente</p>
Concept : Module électronique standard programmable et configurable suivant les besoins – Arduino	<p><u>Obj. Modularité</u> : Module électronique standard « cœur » auquel s'assemble des composants électroniques pour répondre à un besoin et couvrir tout un champ de fonctionnalités, le tout pouvant être réutilisé sur une autre application.</p> <p><u>Typ. Modularité</u> : physique et externe (par le client)</p> <p><u>Gain envt.</u> : rationalisation de l'usage de matériaux par une durée de vie longue, la réutilisation étant rendue possible par l'aspect « standard »</p> <p><u>Freins, verrous, limites</u>: niveau de connaissance du client pour programmer- image du produit</p> <p><u>Statut</u> : en vente</p>
Concept : Modules de multiprise électrique qui s'assemblent en mode Lego pour s'adapter aux usages – Youmo de Good Gadgets	<p><u>Obj. Modularité</u> : proposition d'un set restreint de modules qui s'assemblent en mode Lego permettant de couvrir un champ de fonctionnalités autour de la multiprise électrique (son, intelligence pour moindre consommation...), s'adapter aux changements de besoin des clients et aux normes dans le monde</p> <p><u>Typ. Modularité</u> : fonctionnelle « satellisée » et externe (par le client)</p> <p><u>Gain envt.</u> : rationalisation de l'usage de matériaux en faisant évoluer sa multiprise selon les évolutions de besoin.</p> <p><u>Freins, verrous, limites</u>: pas de système de location donc achat de modules qui peuvent devenir inutile selon les changements de besoin, fiabilité technique du raccordement « Snap » entre les modules</p> <p><u>Statut</u> : en cours de financement crowdfunding</p>

Tableau 3. EXTRAIT DE LA REVUE DE PRODUITS ELECTRONIQUES MODULAIRES.

#### D. Les enseignements

L'ensemble des exemples étudiés permettent de mettre en évidence les enseignements suivants :

- Les adaptations du système dans le temps servent à contrer le phénomène d'obsolescence très rapide en électronique et à couvrir les besoins de l'utilisateur qui évoluent. Les problèmes d'usure n'apparaissent pas comme prédominants en électronique.

- D'un point de vue environnemental, l'allongement de la durée d'usage effective et donc de la durée de vie est souvent citée. Mais la dynamique de couvrir des besoins toujours plus larges des clients interroge. L'usage réel est différent de l'usage conçu. Dans certains cas, le set de fonctionnalités semble correspondre à un positionnement d'alignement ou de différenciation vis-à-vis des concurrents sur le marché, cette surenchère « fonctionnelle » aboutissant à des modules ou fonctionnalités non usités ou avec une intensité d'usage très faible.
- Les logiques de modularité relatives à la gestion des déchets en fin de vie est assez rare, les modules électroniques étant jugés peu ou pas recyclables. La notion de standard semble une voie possible.
- Les upgrades les plus « indolores », qui permettent d'ajouter de nouvelles fonctionnalités, de manière récurrente, sans ajout de matière, se trouvent au niveau logiciel. Même si dans certains cas, il peut être observée une certaine obsolescence amenée via la couche logicielle qui rend l'appareil lent ou inopérant.
- Au niveau architecture, il existe des systèmes avec un socle central auquel sont associés des modules pour le faire évoluer et des systèmes sans « colonne vertébrale », en mode « Lego », où la fonctionnalité née d'un assemblage spécifique des différentes briques proposées. La première architecture contraint l'évolutivité du système dans une seule direction. La deuxième nécessite un niveau de connaissance experte pour programmer, agglomérer, voire packager avec une coque imprimée en 3D un système qui soit utilisable. Au niveau de l'intelligence, on note des systèmes avec une intelligence centralisée dans un module et d'autres avec l'intelligence déportée, répartie, distribuée au travers de différents modules. Il est difficile de conclure sur les intérêts de chacune d'elles. Il semble difficile de tout anticiper dans une architecture centralisée, et il semble difficile et coûteux de définir un standard pour chaque module dans un assemblage Lego. Enfin, les liaisons entre modules et les systèmes de fixation sont aussi cruciaux que complexes à concevoir, notamment lorsque c'est le client qui se charge de changer les modules.
- Au niveau de l'acceptation client, la question de l'image d'un produit modulaire revient de manière récurrente. Au niveau du style, elle semble bien prégnante pour un produit « identitaire » comme le smartphone. La fiabilité d'un système remanufacturé ou refurbished interroge, même lorsque le système est en service sous une forme locative. Les questions liées à la pérennité du système ou de l'entreprise, la fiabilité des fournisseurs sont récurrentes. Elles amènent à s'interroger sur le business model à associer à un système modulaire.

Pour répondre à ces freins identifiés, un Projet de Recherche Collaborative (PRC) sur la mise en place d'une méthodologie de modularité a été monté au sein du Réseau EcoSD.

#### IV. LE PROJET DE RECHERCHE COLLABORATIVE DU RESEAU ECOSD SUR LA MODULARITE

Le réseau national EcoSD (Eco-conception de Systèmes Durables) initie, finance et organise des projets de recherche collaboratifs auxquels prennent part plusieurs universitaires, industriels et partenaires dans une dynamique de recherche articulée autour de groupes de travail afin de créer et diffuser les connaissances dans le domaine de l'écoconception en France, et au-delà de faire reconnaître l'expertise française à l'international.

##### Le PRC modularité (2016-2017)

L'objectif du PRC sur la modularité est de développer une méthodologie pour promouvoir la modularité dans les produits TIC en mettant en place des solutions pour répondre aux freins présentés précédemment. La réflexion porte sur un système de conception modulaire de manière à augmenter leur durée de vie en faisant évoluer leurs fonctionnalités au cours du temps pour maintenir une performance technique et d'usage élevée.

- Le premier axe de recherche se situe au niveau d'une méthode de conception intégrant la modularité au plus tôt, et plus spécifiquement des réflexions techniques sur la modularité dans les produits électroniques de type TIC (distribution de l'intelligence dans un système, type de liaison entre les modules, type de modularité, intérêt de composant standard ...).
- Le deuxième axe de recherche est de s'assurer du gain environnemental de la modularité en considérant plusieurs cas d'usage (celui prévu en conception et d'autres comme usage intensif, usage partagé ...) et de déterminer les limites et dérives potentielles ne permettant pas de gain.
- Le troisième axe de recherche est de fournir des éléments de réflexion sur la mise en œuvre d'un nouveau Business Model (BM) exploitant à plein la modularité des produits. Il devra aussi proposer des étapes de migration du modèle linéaire actuel vers un modèle cible qui devra répondre aux besoins des clients et des fournisseurs. Faire participer et accepter la modularité à tous les niveaux de l'entreprise, aux partenaires et aux clients est un enjeu crucial pour la diffusion de la modularité et suppose notamment l'intégration de la composante Marketing.

#### V. CONCLUSIONS

La modularité apparaît comme une démarche adaptée pour répondre aux enjeux environnementaux des produits électroniques, notamment en terme d'allongement de la durée de vie. Cependant, il est essentiel de bien appréhender les tenants et aboutissants d'une telle démarche pour ne pas développer un produit pour lequel le concept de modularité ou d'upgradabilité ne sera pas exploité par l'utilisateur et sera dans ce cas contre-productif d'un point de vue environnemental mais également économique. Pour promouvoir le déploiement d'une telle démarche et pallier aux freins inhérents aux produits électroniques, il faut développer une méthodologie impliquant toutes les phases d'un cycle de vie, un changement de business model et une évaluation environnementale.

#### VI. REFERENCES

- [1] CNC. "Rapport du groupe de travail du CNC relatif à la durabilité des produits". CNC, 2015.
- [2] CY. BALDWIN, KB. CLARK, "Modularity in the design of complex engineering systems". Working Paper, 2004.
- [3] L. CORREA, F. KUBOTA, P. MIGUEL. "Towards a contribution to modularity concepts and principal domains", Product Management and Development, Vol. 10 n°2, 2012, pp. 119-130.
- [4] K. SCHISCHKE, M. PROSKE, N.F. NISSEN, K.D. LANG. "Modular Products: Smartphone Design from a Circular Economy perspective". Proceedings EGG2016, 2016, Berlin.
- [5] F. CATEL, J.C. MONATERI. "Strategic perspectives on modularity." DRUID Tenth Anniversary Summer Conference 2005: Dynamics of Industry and Innovation-Organizations, Networks and Systems, Copenhagen Business School-Denmark, Juin 2005, p. 32.
- [6] M. SOSA, S. EPPINGER, C. ROWLES. "A network approach to define component modularity." Working Paper Series, INSEAD, p. 34. 2006
- [7] A. GOUDIN, G. BONNIN. "Marketing pour ingénieurs." DUNOD, 2010. 315p.
- [8] A. BASK, M. RAJAHONKA, M. TINNALA. "The concept of modularity: diffusion from manufacturing to service production." Journal of Manufacturing Technology Management, Vol. 21 Iss3, 2010, pp. 355-375.
- [9] T. CHRISTENSEN. "Modularised eco-innovation in the auto industry." Journal of cleaner production, Vol. (19), 2011, pp. 212-220.
- [10] A. KUMAR. "Mass customization: metrics and modularity." International Journal of flexible manufacturing systems, Vol. 16, 2004, pp. 287-311.
- [11] E. ARNHEIET, H. HAREN. "A typology to unleash the potential of modularity." Journal of Manufacturing Technology Management, Vol. 16, 2005, pp. 699-711.
- [12] P. FREDRIKSSON. "Operations and logistics issues in modular assembly: processes: cases from the automotive sector". Journal of Manufacturing Technology Management, Vol. 17, 2006, pp. 168-186.
- [13] S. PEKKARINEN, P. ULKUNIEMI. "Modularity in developing business services by platform approach." The International Journal of Logistics Management, Vol. 19, 2008, pp. 84-103.
- [14] M. HOWARD, B. SQUIRE. "Modularization and the impact on supply relationships." International Journal of Operations and Production Management, Vol. 27 (11), 2007, pp. 1192-1212.
- [15] M. CARIDI, M. PERO. "Linking product modularity and innovativeness to supply chain management in the Italian furniture Industry." International Journal of Production Economics, Vol. 136, 2012, pp. 207-217.
- [16] N.A. AZIZ, D.A. WAHAB. "Modelling and optimisation of upgradability in the design of multiple life cycle products: a critical review." Journal of Cleaner Production, Vol. 112, 2016, pp. 282-290.

- [17] CC. HUANG. “Overview of modular product development.”, Proc. Natl. Sci. Counc. RROC (A), Vol. 24 (3), 2000, pp. 149-165.
- [18] V.V. AGRAWAL, A. ATASU, S. ULKU. “Modular Upgradability in Consumer Electronics.” Yale University, 2015.
- [19] O. PIALOT, D. MILLET, J. BISIAUX, “Upgradable PSS”: Clarifying a new concept of sustainable consumption/production based on upgradability”, Journal of Cleaner Production, Volume 141, 10,2017, pp. 538–550