



# L'upgradabilité, opportunité pour concevoir des systèmes durables

Olivier Pialot, Dominique Millet

► **To cite this version:**

Olivier Pialot, Dominique Millet. L'upgradabilité, opportunité pour concevoir des systèmes durables. Colloque AIP Primeca, Apr 2017, LA PLAGNE, France. <hal-01592150>

**HAL Id: hal-01592150**

**<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01592150>**

Submitted on 22 Sep 2017

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# L'upgradabilité, opportunité pour concevoir des systèmes durables.

Olivier Pialot

Supmeca QUARTZ-Seatech COSMER  
Université de Toulon  
CS 60584 - 83041 TOULON CEDEX 9 – France  
[olivier.pialot@supmeca.fr](mailto:olivier.pialot@supmeca.fr)

Dominique Millet

Supmeca QUARTZ-Seatech COSMER  
Université de Toulon  
CS 60584 - 83041 TOULON CEDEX 9 – France  
[dominique.millet@supmeca.fr](mailto:dominique.millet@supmeca.fr)

**Résumé**— *Le rythme accéléré du renouvellement des produits entraîne une surexploitation des matériaux et de l'énergie. Pour remédier à cela, le présent document considère des systèmes upgradables, produit évolutif auquel est intégré au cours du temps des améliorations fonctionnelles (upgrades). La quantité et le timing d'intégration de ces upgrades définissent différents « scénario d'upgrade ». Une expérimentation basée sur l'outil UpMoS et les données du passé d'un appareil électronique simule différentes hypothèses de conception, au regard d'une évaluation multicritères: impact sur l'environnement-coût pour l'entreprise-attractivité pour les consommateurs. Avec une intégration non systématique des nouvelles fonctionnalités et des astuces de conception des modules upgradés comme leur recyclage ou leur surdimensionnement pour espacer leur remplacement, les résultats montrent que l'upgradabilité est d'ores et déjà une opportunité pour développer des systèmes durables. Les gains environnementaux sont de l'ordre de 5 à 10 %. D'autres leviers de conception prometteurs pour obtenir des résultats beaucoup plus positifs sont présentés en discussion.*

**Mots-clés**— *upgradabilité; scénario d'upgrade; systèmes durables; PSS*

## I. CONTEXTE

Notre société est de plus en plus concernée par la dimension environnementale, le rythme accéléré du renouvellement des produits entraînant une accélération de l'exploitation des matériaux et de l'énergie. Aujourd'hui, avec une consommation annuelle de matières premières d'environ 60 milliards de tonnes [1], la population mondiale consomme environ 50 % de ressources naturelles de plus qu'il y a 30 ans [2]. Dans les pays de l'OCDE, le flux de déchets domestiques a augmenté de 40 % en volume entre 1980 et 1997 [3]. Ces modes actuels de consommation et de production de masse ne sont plus compatibles avec le développement durable. Il est nécessaire d'imaginer de nouveaux paradigmes de production et de consommation, comme le « post mass production » [4].

Ce papier considère un mode de production / consommation basé sur les « upgrades », enrichissements fonctionnels apportés au produit au cours du temps. Dans ce nouveau mode, le produit est projeté sur le moyen / long terme grâce à une modularité optimale et une dynamique d'intégration d'améliorations techniques, visuelles ou fonctionnelles. Ces upgrades permettent d'adapter le système

aux changements de besoin des consommateurs et de répondre aux phénomènes d'usure et d'obsolescence de certains modules. Si l'upgradabilité est prometteuse pour ajouter de la valeur pour le client et le producteur, elle représente aussi de nouvelles opportunités du point de vue environnemental [5] [6] [7]:

- Avoir, à tout moment, les technologies les plus efficaces en termes de consommation d'énergie.
- Prolonger la durée de vie du produit en tenant compte non seulement de la fiabilité des pièces mais aussi de l'obsolescence.
- Construire une stratégie d'éco-apprentissage pour l'utilisateur en modifiant le produit en fonction de son comportement.
- Optimiser le traitement de fin de vie des matériaux car les modules remplacés induisent une utilisation plus fréquente et mieux contrôlée des canaux de reconditionnement et / ou de recyclage.
- Générer davantage de services « associés au produit » ce qui représente une opportunité pour les entreprises industrielles de passer à des offres de services, sans cession de propriété et reconnues comme un moyen d'avoir un impact environnemental plus faible que les modèles commerciaux traditionnels [8].

Cet article se concentre sur l'opportunité offerte par l'upgradabilité de prolonger la durée de vie du produit. Compte tenu de l'intégration progressive des upgrades, le remplacement du produit est retardé. Les matériaux consommés par les achats trop fréquents de nouveaux produits conventionnels sont évités. Demain, s'il est considéré un prix des matériaux deux fois plus élevé, il est facile de comprendre l'intérêt de passer à des systèmes évolutifs. Aujourd'hui, avec les contraintes des marchés actuels, l'intérêt de systèmes upgradables n'est pas prouvé. Parce qu'aujourd'hui la valeur d'un produit n'est pas optimisée tout au long de sa vie, il est permis de penser que c'est d'ores-et-déjà une réelle opportunité. En effet, dans de précédents travaux, il est montré que plus de 50% des produits sont écartés alors qu'ils fonctionnent encore [5] sur des appareils électroniques comme

les aspirateurs et les machines à expresso. Cet article vise donc à confirmer le potentiel pour l'upgradabilité.

Après avoir présenté l'upgradabilité comme une opportunité pour l'éco-conception (section 1), il est décrit différentes notions de l'état de l'art et de travaux antérieurs permettant d'appréhender le « scénario d'upgrade » (section 2). Une expérimentation basée sur un outil de simulation et les réelles évolutions passées d'un aspirateur est proposée en section 3. Les résultats (section 4) permettent de conclure (section 5) sur le potentiel intéressant de l'upgradabilité pour concevoir un système durable. Enfin, la section 6 présente de nouveaux questionnements autour de l'upgradabilité.

## II. PROBLEMATIQUES DU SCENARIO D'UPGRADE

Dans la littérature, la durée de vie du produit dépend de la gestion des deux raisons clé pour lesquelles les utilisateurs rejettent les produits [9]: a) Physical Life Time (PLT) [durée de vie liée à la fiabilité] « la durée jusqu'à ce que le produit casse » et b) Value LifeTime (VLT) [durée de vie liée à l'obsolescence] « la durée jusqu'à ce que le produit ne soit écarté car sa performance, fonctionnalité ou apparence ne peuvent plus satisfaire les besoins des consommateurs, alors que le produit lui-même pourrait encore fonctionner » [9]. Le concept de « Utility Value » qui se caractérise par l'intégrale de la valeur dans le temps [10] est proche : il dépend à la fois des « causes physiques » (liées à la fiabilité et à l'usure) et des « causes de valeur » (liées à l'obsolescence). Face à un problème de fiabilité ou d'usure (PLT), il existe la maintenance. Face au phénomène de l'obsolescence (VLT), il y a les upgrades. L'intégration de ces enrichissements fonctionnels apportés au produit au cours du temps augmente l'attractivité d'un système pour le client et prolonge la durée de vie du produit.

Du point de vue opérationnel, une structure modulaire facilite l'intégration de ces upgrades au fil du temps. Cette intégration des upgrades peut être effectuée par un distributeur / détaillant, par un technicien à la maison, par l'utilisateur (de manière « plug-and-play »), avec des opérations de remanufacturing, etc. Ensuite, les problèmes de fiabilité pourraient être gérés avec les modules upgradés (quand les modules upgradés et les modules non fiables sont les mêmes) ou avec un contrat de maintenance spécifique.

Dans la littérature, l'upgradabilité est discutée par plusieurs auteurs, notamment sur les aspects techniques / technologiques. En effet, ils s'intéressent à la feuille de route technologique et à l'évolution des modules afin d'optimiser la structure modulaire [11] [12] [13]. A cet effet, Umeda distingue les upgrades fonctionnels et les upgrades paramétriques: l'upgrade fonctionnel, qui ajoute ou supprime des fonctions telles que l'ajout de la fonction de copie recto-verso à un photocopieur, et l'upgrade paramétrique qui modifie les performances d'un produit, telle que la vitesse d'impression [11].

Notre positionnement est d'envisager l'upgradabilité du point de vue de la fonctionnalité, qui évolue avec le temps. Cette définition fonctionnelle du produit qui évolue par le biais des modules remplacés apporte de nouveaux questionnements sur la quantité d'updates intégrés, leur type et le moment de leur intégration. En effet, une compagnie industrielle ne peut

pas effectuer n'importe quel upgrade n'importe quand. Une structuration de l'upgradabilité est nécessaire.

A partir de workshops avec deux industriels, il a été proposé un planning des upgrades avec des cycles réguliers [14], pour faciliter la gestion par l'industriel et la compréhension et l'aspect pratique pour le consommateur. Dans l'optique de lisibilité et de structuration, il a aussi été proposée la notion de « lignes d'upgrade », une suite d'updates ayant pour objectif de satisfaire un ou plusieurs thèmes de création de valeur (Value Creation Themes – VaCT) bien précis [14], dont l'intégration est planifiée dans le temps. Se posent alors les questions du nombre de cycles et de leur durée.

Ensuite, si l'allongement de la durée de vie du produit dilue l'impact environnemental et les coûts de l'étape de fabrication au fil du temps, l'intégration de nouveaux modules / éléments pendant la durée de vie du produit augmente la consommation de matière. Le choix des upgrades intégrés au cours du temps doit tenir compte d'une évaluation multicritères englobant les critères suivants: acceptable pour l'environnement, viable économiquement pour l'entreprise et attrayante pour les consommateurs.

Cet ensemble de séquences d'updates programmées dans le temps et qui enrichissent la fonctionnalité du système, nommé « scénario d'upgrade » requiert des nouveaux dispositifs méthodologiques.

A partir de différents travaux du consortium du projet ANR IDCyclUM composé de 5 partenaires académiques et de 2 entreprises industrielles, il a été développé une méthode en 9 étapes pour aider une équipe de conception « étendue » (R&D, Marketing, Supply Chain, Service client, etc.) à concevoir ces systèmes évolutifs [15] ainsi que trois outils de simulation en Visual Basic. L'outil qui supporte la tâche critique de définition de scénario d'upgrade, nommé « Upgrade Module Scenario » (UpMoS), nécessitent les données d'entrée suivantes :

- un listing de modules avec notamment leur coût et leur impact environnemental,
- un listing d'updates potentiels issus de séances de créativité, analyse de tendance ou focus group sur les évolutions technologiques des modules actuels (approche « technology push ») et les nouvelles tendances d'usage et de fonctionnalités (approche « demand pull »),
- les thèmes de création de valeur (VaCT) actuels et futurs avec le pourcentage de leur importance aux yeux du consommateur,
- les formats potentiels du planning d'upgrade (NC : Nombre de Cycles – DC : Durée d'un Cycle) et les possibilités d'extension de la durée de vie du produit, calculés à partir des limites de fiabilité (PLT) et d'obsolescence (VLT) de chacun de ses modules (via un module de calcul non intégré à l'outil UpMoS) [16].

A partir de ces données d'entrée, l'outil s'utilise comme suit :

- Chacun des upgrades potentiels est caractérisé sur sa contribution à satisfaire les VaCT identifiés et sur des critères tels que les dates d'intégration au plus tôt et au plus tard, le surcoût, la faisabilité (etc.).
- A partir de la sélection d'un format (NC – DC), l'outil fait apparaître sur le planning les seules dates où les upgrades peuvent être intégrés.
- Pour chaque VaCT sélectionné, l'outil ne fait apparaître que les upgrades ayant une contribution significative.
- Une lignée d'upgrades est générée en faisant correspondre un ou plusieurs upgrade(s) avec chaque date d'intégration prévue dans le planning.
- Un scénario comprend un ensemble de lignes d'upgrades auxquelles peuvent s'ajouter un ou plusieurs upgrades singuliers. L'outil calcule les scores de chaque scénario sur les critères d'attractivité pour les clients et de viabilité environnementale et économique. Cet outil étant utilisé dans les phases amont de conception, les données sont collectées à partir du produit existant. Les scores environnementaux (en points Pt) sont évalués à l'aide de l'outil Simapro® (méthode Eco-Indicator 99). L'évaluation des coûts et impacts environnementaux d'un scénario est exprimée en pourcentage du produit courant. Sont pris en compte les potentiels coûts et impacts évités grâce aux opérations de recyclage. L'attractivité d'un upgrade est calculée en fonction de l'importance de sa contribution sur la satisfaction d'un ou plusieurs thèmes VaCT et de l'importance de ce VaCT aux yeux du client. Le score d'attractivité d'un scénario est l'agrégation des points d'attractivité de l'ensemble des upgrades intégrés.

Outre la proposition d'une approche de conception de systèmes upgradables en phases amont basée sur l'élaboration de scénario d'upgrade, le but de ce papier est de montrer que l'upgradabilité de produit est d'ores-et-déjà une opportunité pour développer des systèmes soutenables avec un gain environnemental.

### III. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Pour montrer concrètement le potentiel de gain environnemental de l'upgradabilité, il a été imaginé une expérimentation s'appuyant sur l'utilisation de l'outil de simulation UpMoS et sur les données d'un aspirateur balai sans fil développé par une marque renommée d'électroménager. Plutôt que d'imaginer toutes les évolutions qui pourraient être intégrées à l'appareil actuel, démarche qui introduirait trop d'incertitudes et peu de validation possible à court terme, il a été privilégié une réinterprétation des données du passé. Cela permet d'avoir une visibilité exacte des évolutions fonctionnelles dans le temps et des évaluations précises des coûts et impacts environnementaux.

Un listing des évolutions techniques opérées entre les différentes générations de cet aspirateur a d'abord été réalisé, chaque développement significatif est vu comme un upgrade qui aurait pu être intégré à la première génération de cet appareil. Bien que cet aspirateur n'ait pas été conçu pour être modulaire et évolutif, il n'est pas difficile de distinguer différents modules.

La Figure 1 montre les changements techniques passés de l'aspirateur en distinguant les différentes générations de l'appareil, chaque nouveauté apparaissant soulignée.

Module concerné	Composant concerné	Génération 1	Génération 2	Génération 2bis
1. Module Batterie + Chargeur + Poignée - Manche-Commande	Batterie	NiMh 18V	<u>NiMh 24v</u>	<u>Li-Ion 25v</u>
	Carte électronique	Carte Gen 1	<u>Carte Gen 2</u>	<u>Carte Gen 3</u>
	Chargeur	Chargeur 1	Chargeur 1	<u>Chargeur 2</u>
	Voyant batterie	indicateur de charge	indicateur de charge	<u>jauge d'autonomie dans le manche</u>
	Commande	2 vitesses	3 vitesses	<u>3 vitesses</u>
2. Mod. Tête d'aspi. & Kit brosse	Brosse	brosse 1	<u>brosse 2</u>	brosse 2
	Moteur brosse	10 W	<u>30 W</u>	30 W
	éclairage	sans led	sans led	<u>avec led</u>
	Tête d'aspi Flux d'air	Tête Aspi Gen 1	<u>Tête Aspi Gen 2</u>	Tête Aspi Gen 2
	Roues	cylindrique	<u>boule</u>	boule
3. Mod. Moteur Aspi	Moteur	80 W	<u>100 W</u>	100 W
4. Mod. Filtration	Système cyclonique	Air Force Cyclone	<u>Cyclone Extrême</u>	Cyclone Extrême
5. Mod. Coque	Coque	coque 1	<u>coque 2</u>	<u>coque 3</u>

Fin 2009      Fin 2012      Fin 2013

Figure 1. CHANGEMENTS TECHNIQUES DU PASSE SUR L'ASPIRATEUR

Si la durée de vie estimée d'un aspirateur balai est de 4 ans, il est possible d'étendre la durée de vie de l'appareil jusqu'à 8 ans, en considérant les limites de fiabilité (PLT) et d'obsolescence (VLT) de chaque module, et une meilleure conception (PLT+ / VLT+) [17]. Les formats de planning d'upgrades « éligibles » sont (NC = 2 ; DC = 3), (NC = 3 ; DC = 2) et (NC = 4 ; DC = 2).

Le principe de cette expérimentation est de réaliser différents scénarios à partir de ces données en considérant l'intégration de plus ou moins d'upgrades sur la plateforme de première génération de l'appareil. Les quatre cas présentés en Figure 2 ont été considérés.

N° du Cas	Format (NC;DC)	Mode d'intégration des upgrades
Cas 1 (de base)	NC = 4; DC = 2	avec intégration de l'ensemble des upgrades et la règle : un module usagé est remplacé par un nouveau.
Cas 2	NC = 2; DC = 3	avec upgrades choisis et anticipation de l'upgradabilité en conception
Cas 3	NC = 3; DC = 2	
Cas 4	NC = 4; DC = 2	

Figure 2. PRESENTATION DES CAS.

Le premier cas, le cas de base / référence, considère sur un format (NC = 4 ; DC = 2) l'intégration de l'ensemble des évolutions techniques connues sur la plateforme de première génération de l'aspirateur, en suivant la règle : un module usagé est remplacé par un nouveau.

Pour les Cas 2, 3 et 4, il a été considéré une intégration non-systématique de l'ensemble des développements techniques connus (ce n'est pas nécessaire d'inclure tous les développements de batterie pour s'assurer une fonctionnalité

maximale de l'aspirateur) et les hypothèses suivantes relatives à l'anticipation de l'upgradabilité de l'aspirateur en conception :

- La Batterie NiMh pourrait être upgradée de 18 V à 24 V par l'ajout d'un module de 6 V avec sa carte électronique associée et l'intégration d'un bouton « 3 vitesses » aurait pu être anticipée dans la conception initiale.
- Le moteur pourrait être surdimensionné dans la conception initiale avec une puissance augmentée à 95W (pour être compatible avec l'intégration des upgrades au cours du temps).
- Les pièces « Module cyclonique » et « Coque » composées de plastique homogène pourraient être totalement recyclées et remises en forme pour obtenir la dernière génération de composants.

#### IV. EXPERIMENTATIONS ET RESULTATS

Les résultats de l'expérimentation dont les chiffres sont présentés en Figure 3 sont les suivants :

- Pour le Cas 1 (cas de base), avec l'intégration de tous les développements connus et sans conception dédiée à l'upgradabilité, il est observé un très fort accroissement de l'attractivité (un aspirateur toujours « au top »). Mais en même temps, l'augmentation des coûts et des impacts environnementaux est trop importante. En effet, dans ce scénario, les résultats des coûts et impacts devraient être proches de 200% car la durée de vie est doublée (Facteur X = 2).
- Le scenario du Cas 2 avec le format (NC = 2; DC = 3) induit seulement une séquence d'intégration d'upgrades

avec l'ajout d'un module batterie NiMh 6 V, le bouton « 3 vitesses » et le remplacement par une nouvelle génération de tête d'aspiration, de module cyclonique et de coque. Il est observé une amélioration significative de l'attractivité (+ 177 pts), un gain environnemental de 11 % et gain économique de 4 %.

- Le scenario du Cas 3 avec le format (NC = 3; DC = 2) offre 2 séquences d'intégration d'upgrades. L'idée est de répartir de manière homogène les upgrades. Les modules batterie et système cyclonique seraient upgradés à la première séquence et la tête d'aspiration à la seconde. Finalement, à chaque séquence, une nouvelle coque rendrait l'appareil désirable. Il est observé une amélioration plus importante de l'attractivité (+ 261 Pts), un gain environnemental de 7 % et un petit surcoût de 3 %.
- Le scénario du Cas 4 avec le format (NC = 4 ; DC = 2) permet d'avoir 3 séquences d'intégration d'upgrade. La première séquence comprendrait la nouvelle tête d'aspiration et le nouveau module cyclonique. Lors de la deuxième séquence d'upgrade seraient intégrés une toute nouvelle batterie Li-ion avec son chargeur, la jauge d'autonomie, la commande « 3 vitesses », un système de LED sur la tête d'aspiration et un nouveau moteur de 130 W. Enfin, à chaque séquence, la coque serait renouvelée. La remise à niveau de milieu de vie (seconde séquence) est plus profonde mais permet à l'appareil d'avoir une durée de vie doublée. Il est observé une amélioration très importante de l'attractivité (+ 292 Pts), un gain environnemental de 9 % et un léger surcoût de 5 %.

Module concerné	Upgrade concerné	CAS 1 (de base)				CAS 2		CAS 3			CAS 4			
		Séq. 1.0	1.1 up	1.2 up	1.3 up	Séq. 1.0	1.1 up	Séq. 1.0	1.1 up	1.2 up	Séq. 1.0	1.1 up	1.2 up	1.3 up
1. Module Batterie + Chargeur + Poignée -Manche- Commande	Battery NiMh 24v + Carte Gen. 2		1				1		1					
	jauge d'autonomie dans le manche			1						1			1	
	Batterie Li-Ion 25v + Carte Gen. 3 + 3 vitesses + chargeur 2			1									1	
2. Mod. Tête d'aspi. & Kit brosse	LED sur la tête d'aspi.			1						1			1	
	Tête Aspi. Gen. 2 (brosse 2, moteur brosse 30 W, n°le aéraulique)	2 ans	1			3 ans	1	2 ans	1		2 ans	1		
3. Mod. Moteur Aspi	Moteur 95W		1			1		1			1			
	Moteur 130W			1									1	
4. Mod. Filtration	Module Cyclonique Gen.2		1				1		1			1		
	coque 2		1				1		1			1		
5. Mod. Coque	coque 3			1						1			1	
	coque 4				1									1
SurValue due aux upgrades / Séquence		0	180	138	15	17	160	17	104	140	17	121	138	15
Valeur cumulée (avec V0=100)		100	280	419	434	117	277	117	221	361	117	239	377	392
Surcoût dû aux upgrades / Séquence		0	88	67	4	4	42	4	21	29	4	33	66	2
Coût cumulé (avec C0=100)		100	188	255	259	104	146	104	125	153	104	137	203	205
SurImpact dû aux upgrades / Séquence		0	129	80	1	2	37	2	30	11	2	8	80	1
EI cumulé (avec EI0=100)		100	229	309	310	102	139	102	132	143	102	110	190	191
		8 ans / Facteur X=2				6 ans / Facteur X=1,5		6 ans / Facteur X=1,5			8 ans / Facteur X=2			

Figure 3. RESULTATS DES CAS DE L'EXPERIMENTATION.

La Figure 3 montre des résultats positifs grâce à l'upgradabilité. Les scénarios des Cas 2, 3 et 4 suivent la même tendance. Pour ces scénarios considérant les 3 hypothèses de conception énoncées pour l'upgradabilité de l'aspirateur, il est noté une amélioration significative de l'attractivité, de légers gains environnementaux (de 7% à 11%) et des coûts très proches de ceux d'un produit conventionnel à durée de vie égale (prise en compte du Facteur X). surcoût (excepté pour le scénario (NC=2 ; DC=3). Le scénario du Cas 2 semble être le plus satisfaisant parce que les contraintes sont minimisées (une seule séquence d'upgrades, extension de la durée de vie de 2 ans), et les upgrades importants peuvent être intégrés. Dans le scénario du Cas 4, les 3 séquences d'upgrades semblent impliquer davantage d'upgrades intégrés et un upgrade "batterie" qui intervient tardivement (après 4 ans, comme la durée de vie d'un produit conventionnel).

## V. CONCLUSIONS ET LIMITES

Les résultats obtenus avec les hypothèses de conception anticipant l'upgradabilité montrent la possibilité de gains environnementaux proche de 10%. Toutefois, la conception de systèmes upgradables peut mobiliser de nombreux autres leviers pour obtenir des résultats bien meilleurs. En effet, au-delà du « plug » d'un module batterie, du recyclage des coques et du module cyclonique et du surdimensionnement du moteur à 95 W, il est possible de :

- Optimiser la fin de vie avec le recyclage de la batterie ou du moteur, le remanufacturing de la tête d'aspiration etc...
- Optimiser les possibilités d'évolutivité/adaptabilité des modules pour éviter leur remplacement.
- Optimiser le niveau de l'offre en définissant les upgrades nécessaires pour juste éviter la décision prématurée du client de remplacer son produit. En fait, la satisfaction client ne signifie pas d'avoir systématiquement un produit avec l'ensemble des évolutions ou un système toujours « au top ».
- Personnaliser l'offre en ciblant les upgrades aux seuls Thèmes de création de valeur VaCT (performance, design, autonomie ...) valorisés par le client.
- Développer une offre de services : les idées de services qui peuvent être associées à un système upgradable, notamment ceux basés sur du software et l'exploitation de données provenant de capteurs apportés au produit (objets connectés), ouvrent la possibilité de vendre de toutes nouvelles lignées de fonctionnalités et un bouquet de services. Ces upgrades nécessitent très peu de changements technologiques et de matériau : ils sont dématérialisés et donc intéressants du point de vue de la dimension environnementale. En outre, la valeur ajoutée de ces upgrades peut être facilement répétée (nouvelle fonctionnalité directement ajoutée dans une appli).

Au-delà de ces optimisations de la conception d'une offre upgradable, pourrait être mis en place un carnet de santé « green » de l'appareil qui engage à la fois le fabricant et le client vers un objectif environnemental commun à respecter.

Face à tous les changements et nouveautés des concurrents et aux évolutions des besoins des clients, le produit est

actuellement conçu comme étant trop statique. Nous clamons la nécessité d'une nouvelle sorte de produits « évolutifs » capables d'être graduellement adaptés aux besoins du client qui évoluent via l'intégration d'upgrades. Le tout en améliorant significativement la performance environnementale sur tous les cycles de vie. Ce papier montre l'intérêt de considérer l'upgradabilité pour concevoir des produits plus soutenables.

Une amélioration de ces travaux pourrait porter sur le calcul de l'attractivité. L'attractivité calculée est l'agrégation de la valeur ajoutée des modules upgradés intégrés au produit initial, mais ne reflète pas complètement la satisfaction client au cours du temps. Cette évaluation pourrait être affinée mais c'est complexe. Au-delà des travaux de Kano [18] ou Godenis [19] sur la satisfaction client, ce n'est pas un produit conventionnel qui est vendu.

Une autre limite de ce papier est de considérer les impacts environnementaux avec un score unique (Pt avec eco-indicator 99) pour l'expérimentation, ce qui ne permet pas de considérer les différentes catégories d'impact. L'intention était d'utiliser l'outil de simulation développé pour une équipe de conception en phase amont sans expert environnemental, mais il serait intéressant de préciser les résultats obtenus en réalisant une Analyse de Cycle de Vie complète.

## VI. PERSPECTIVES

En perspectives de ce papier, et à partir d'autres résultats du projet IDCyclUM, il peut être affirmé que considérer l'upgradabilité sous-tend 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 [20] à mettre en place.

L'offre d'un système upgradable incluant le produit évolutif, puis les lignées d'upgrades hardware ou software et des upgrades et/ou services additionnels intégrés tout au long de la vie du produit, forme une proposition de valeur « composite et dynamique » tout à fait inédite.

Le mode de contractualisation doit être reconsidéré car il inclut désormais plusieurs possibilités de se rémunérer dues à l'intégration d'upgrades au cours du temps. Le possible ajout de services associés au système upgradable peut également changer le type de valeur délivrée, qui devient davantage dématérialisée. Toute une palette de modes de contractualisation apparaît si l'on considère que les éléments constitutifs de l'offre sont vendus en propre ou loué/proposé sous contrat, tel qu'illustré par la Figure 4. Il est à noter que les multiples opportunités de se rémunérer doivent compenser le surcoût éventuel de ce nouveau système évolutif et le fait que sa durée de vie est augmentée.

Produit évolutif	+ Lignées d'upgrade	+ Upgrade additionnel	+ Service additionnel
VENTE	+ VENTE	+ VENTE	+ VENTE
VENTE	+ LOCATION	+ VENTE	+ VENTE
VENTE	+ LOCATION	+ LOCATION	+ LOCATION
LOCATION	+ LOCATION	+ LOCATION	+ LOCATION

Figure 4. MODES DE CONTRACTUALISATION D'UNE OFFRE UPGRADABLE.

Au niveau organisationnel et des activités clés de l'entreprise, il doit être mis en place un service support à l'upgradabilité qui se charge d'intégrer les modules upgradés au fil du temps et un service de traitement de fin de vie des modules remplacés. Cela nécessite d'intégrer de nouvelles compétences ou partenaires. Suivant le mode de distribution, via Internet, via un distributeur tiers ou un réseau de magasins en propre, les changements organisationnels prennent des formes différentes. Il est à noter que le client pourrait aussi être mis à contribution en changeant lui-même le module usagé par un neuf reçu par voie postale par exemple. Si l'entreprise intègre des services additionnels et a fortiori si elle bascule sur une offre de services, d'autres changements organisationnels sont à prévoir.

Parce que le profil de clients de ces nouveaux systèmes est difficile à appréhender, que la perception de l'attractivité de ces offres « composites et dynamiques » est forcément différente, ou que le produit dure plus longtemps et intègre des upgrades au cours du temps sensés correspondre aux nouveaux besoins des clients, il semble requis une relation entreprise-consommateur très étroite. Avec une plateforme d'échanges direct et en continue entre le fabricant et le client, le fabricant pourrait collecter et prioriser les insatisfactions client, identifier les changements dans les besoins client, mieux comprendre les critères d'achat et attentes client et suggérer des innovations potentielles. En plus de s'exprimer sur les sujets ci-dessus, le client pourrait lui accéder à des guides d'utilisateur, des astuces ou configurer des options pour de futurs upgrades, accéder à des ateliers « questions et réponses » avec d'autres consommateurs, des magasins d'échange ou de prêts de certains upgrades, des concours pour la conception de futurs upgrades, etc. Pour la conception, cette plateforme d'échanges pourrait fournir des idées d'upgrades mais aussi des données d'appréciation de telle ou telle évolution qui pourraient être intégrées à l'outil de conception UpMoS. Contrairement à un produit conventionnel où il n'y a pratiquement aucune interaction entre le client et le producteur une fois que le produit a été débarrassé, un système évolutif se caractériserait par des interactions fréquentes.

Le Projet IDCyclUM a été financé par l'ANR - Agence Nationale de la Recherche (Ref 11-ECOT-001-IDCyclUM-01).

## VII. REFERENCES

- [1] SERI Research center, « Amis de la Terre » Europe, Report : Overconsumption? Our use of the world's natural resources, 2009, p. 3.
- [2] Commissariat général au Développement durable, « Le point sur le recyclage et le réemploi, une économie de ressources naturelles », 2010, p. 1.
- [3] Report from the Commission to the Council and the European Parliament on implementation of the community waste legislation for the period 2001-2003, COM(2006) 406 final, Brussels, 2006.
- [4] Umeda, Y., Nonomura, A. et Tomiyama, T., Study on life-cycle design for the post mass production paradigm. Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, 2000, 14(2):149-161.
- [5] Mont O., Clarifying the Concept of Product-Service System. Journal of Cleaner Production, 2002.
- [6] Masato Inoue, Shuho Yamada, Tetsuo Yamada, Stefan Bracke, "An Upgradable Product Design Method for Improving Performance, CO2 Savings, and Production Cost Reduction: Vacuum Cleaner Case Study", International Journal of Supply Chain Management, Vol 3, No 4 (2014)
- [7] Olivier Pialot, Dominique Millet, Justine Bisiaux, "Upgradable PSS: Clarifying a New Concept of Sustainable consumption/Production based on Upgradability", Journal of Cleaner Production, 2016, (accepted with modifications).
- [8] Umeda Y., Daimon T. and Kondoh S., Life cycle option selection based on the difference of value and physical lifetimes for life cycle design, ICED, Paris, 2007.
- [9] Kondoh S., Mishima N., Masui K. and Matsumoto M., Total performance design of product life cycle considering future uncertainties, International Journal of Design Engineering, 2009.
- [10] Umeda Y., Kondoh S., Shimomura Y., Tomiyama T., Development of design methodology for upgradable products based on function-behavior-state modelling, Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing 2005, 19, 161-182. Printed in the USA.
- [11] Tetsu Murakami, Masato Inoue, Yoon-Eui Nahm, Haruo Ishikawa, "An Upgrade Design Method for Environmental Issues Based on the Concept of Set-Based Design", Proceedings of EcoDesign 2011: 7th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, pp 501-506,
- [12] Masato Inoue, Shuho Yamada, Tetsuo Yamada, Stefan Bracke, "A Design Method for Product Upgradability with Different Customer Demands", Volume 442 of the series IFIP pp 91-100, 11th IFIP WG 5.1 International Conference, PLM 2014, Yokohama, Japan, July 7-9, 2014,
- [13] Pialot O., Millet D., Bisiaux J., "Upgradable PSS": Clarifying a new concept of sustainable consumption/production based on upgradability, Journal of Cleaner Production, Vol. 141, January 2017, P. 538-550.
- [14] Pialot O., Millet D., Cor E., Bisiaux J., A method helping to define eco-innovative systems based on upgradability, 7th Industrial Product-Service Systems Conference, CIRP, April 2015.
- [15] Pialot O., Millet D., Tchertchian N., How to explore scenarios of multiple upgrade cycles for sustainable product innovation: the "Upgrade Cycle Explorer" tool, Journal of Cleaner Production , 2012, Vol. 22.
- [16] Pialot O., Millet D., Why the Upgradability is a Present-day Opportunity for Designing Sustainable Systems?, The 23rd CIRP Conference on Life Cycle Engineering, Volume 48, 2016, Pages 96-101
- [17] Kano N., Seraku N., Takahashi F. et Tsuji S., Attractive quality and must-be quality, Hinshitsu. The Journal of the Japanese Society for Quality Control, April 1984, pp. 39-48,.
- [18] Goderis, J.-P., "Barrier marketing: from customer satisfaction to customer loyalty". CEMS Business Review. 2 (4), 1998, 285-294.
- [19] A. Osterwalder, Yves Pigneur, Alan Smith, and 470 practitioners from 45 countries, Business Model Generation, Wiley published, 2010.