

Mai
2021

INNOVATION FRUGALE

Définition, Caractérisation et Evaluation de l'Innovation Frugale

Les polices de caractère de cette page sont
disponibles sur IntraDEME dans
http://intrademe/jcms/rec_19613/la-charte-graphique-et-ses-declinaisons dans le zip : Ressources-charte
graphique

Rapport Technique

ADEME

Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Energie

En partenariat avec :



REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier Marc VAUTIER (ORANGE) et Samuli Mikko VAIJA (ORANGE) pour le soutien et l'aide précieuse qu'ils m'ont apporté tout au long de cette thèse professionnelle.

Je remercie également Carole CHARBUILLET (ENSAM Chambéry), ma tutrice universitaire de l'institut arts & Métiers ParisTech de Chambéry, pour son encadrement pédagogique.

Mes remerciements vont aussi à Isabelle DABADIE (Université Paris 2), Tatiana REYES (Université Technologique de Troyes) et Paul Vigneron (Université Paris 2), mes collaborateurs sur ce projet, qui ont grandement contribué à la réussite de ce dernier.

Enfin, je tiens à remercier l'ensemble des personnes d'Orange qui ont participé à la réalisation de ce travail en me partageant de précieuses informations.

CITATION DE CE RAPPORT

AUTEUR : Benjamin Métayer

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : XXXXXXXXXX

Étude réalisée par (noms des auteurs et co-financeurs éventuels) pour ce projet financé ou cofinancé par l'ADEME

Coordination technique - ADEME : NOM Prénom ingénieur

Direction/Service : XXXXX

Table des matières

Résumé	6
1. Contexte du projet	Erreur ! Signet non défini.
1. Introduction	9
1.1 Définitions	10
1.1.1 Frugalité	10
1.1.2 L'innovation frugale et l'innovation Jugaad	11
1.1.2.1 Quelques exemples d'innovations frugales	14
1.1.3 Le low-tech	15
1.1.3.1 Quelques exemples de systèmes low-tech (source : low-tech lab)	17
1.1.4 La sobriété	18
1.1.4.1 Exemple d'un projet de sobriété au sein d'Orange : le Projet ORYX	18
2 Caractérisation de l'innovation frugale	19
2.1 Création de catégories, agrégation des critères	20
2.2 Définition des nouveaux critères	21
3 Etude des critères	22
3.1 Fonctionnalités essentielles	22
3.1.1.1 Indicateurs pour le critère fonctionnalités essentielles	22
3.2 Ergonomie	22
3.2.1 Indicateurs pour le critère ergonomie	23
3.2.1.1 Choix des méthodes	23
3.3 Qualité	24
3.3.1 Indicateurs pour le critère qualité	26
3.3.1.1 Performance	26
3.3.1.2 Considération du critère à l'échelle du projet	27
3.3.1.3 Le Net Promoter Score (NPF)	28
3.3.1.4 AMDEC (analyse des Modes de Défaillance, de leurs effets et de leur criticité)	28
3.4 Modularité	29
3.4.1.1 Indicateurs pour le critère modularité	32
3.4.1.1.1 Evaluation des méthodes	33
3.4.1.1.2 Méthode d'évaluation la plus récente	37
3.4.1.2 Exemples de conceptions modulaires	40
3.5 Prix	41
3.6 Empreinte environnementale	42
3.7 Consommation d'énergie	43
3.8 Indicateurs non traités	44
4 Cas d'étude : la livebox 4	44
4.1 Présentation de la livebox 4	44
4.2 Fonctionnalités essentielles	44

4.2.1	Scénarios de modèles de boxs plus frugales	46
4.3	Ergonomie.....	48
4.4	Qualité.....	48
4.5	Modularité	50
4.6	Consommation d'énergie.....	53
4.6.1	Etude des modèles de box frugales.....	55
4.7	Prix	55
	Conclusion	56
	Références bibliographiques	71
	Index des tableaux et figures	72
	Sigles et acronymes	73

Résumé

Ce livrable constitue le rapport d'une thèse professionnelle du mastère spécialisé « Management du Changement et Innovation Durable (MCID) » de l'institut des Arts et Métiers ParisTech de Chambéry. Cette thèse professionnelle s'intègre à une collaboration entre l'Université de technologie de Troyes (UTT), l'université Paris 2 Panthéon-Assas et Orange dans le cadre d'un projet de l'association EcoSD (association loi de 1901 dont le but principal est de favoriser les échanges et collaborations entre universitaires (CentraleSupélec, UTT, Mines ParisTech, ENSAM...) et industriels (PSA, ERDF, Vinci, Orange...) autour de la thématique de l'éco-conception de systèmes pour un développement durable (EcoSD)).

Le livrable principal du PRC 19.1 est le « Guide méthodologique » joint et est principalement extrait de la présente thèse professionnelle, qui contient en plus comme cas d'application la Livebox 4 d'Orange.

L'objet de cette étude est de proposer une méthode d'intégration de **l'innovation frugale** dans un processus de conception. La notion d'innovation frugale (IF) a émergé à la fin des années 2000 avec l'auteur Prahalad qui a soulevé le rôle primordial des multinationales dans l'innovation face à l'évolution des industries confrontées aux défis sociétaux et environnementaux.

L'innovation frugale a également été popularisée par le livre de Navi Radjou : « L'innovation Jugaad, redevenons ingénieurs ». « Jugaad » est un terme utilisé dans l'hindi pour désigner un objet bricolé ou détourné de son usage pour résoudre un problème. Cette notion peut être décrite comme une **solution ingénieuse répondant à un besoin spécifique dans un milieu contraint**. Cousine du « système D » français ou encore des solutions de Mc Gyver¹, l'innovation Jugaad peut se résumer ainsi : « **faire mieux avec moins** » en se focalisant sur les **besoins essentielles** des utilisateurs et une meilleure gestion des ressources matérielles et financières. Cette étude propose également des définitions et clarifications de notions souvent confondues avec l'innovation frugale : la frugalité, la sobriété et le low-tech.

La notion d'innovation frugale, qui est toujours dans une phase émergente, ne possède toujours pas de fondements théoriques ni de définition précise. Dans le cadre du projet EcoSD, un premier travail d'état de l'art (thèse UTT) a été mené afin de déterminer les principaux critères caractérisant la notion d'innovation frugale à travers une revue de la littérature scientifique. Ce projet a pour objectif d'approfondir l'analyse de ces critères à la fois sur le plan technique (Orange) et Marketing (Université Paris 2 Panthéon-Assas). **Pour Orange, l'objectif principal est de déterminer des indicateurs permettant d'évaluer les critères techniques et de les appliquer à terme aux produits Orange. Pour la présente étude, le cas pratique est la livebox 4.** Pour l'université Paris II, il est question de répondre à la question suivante : quelle est la place occupée par l'innovation frugale chez Orange ?

1

¹ personnage principal d'une série télévisée américaine des années 80 dans laquelle il incarne un agent secret très doué pour bricoler des solutions ingénieuses avec les moyens dont il dispose

Sur le plan technique, les critères suivants ont été retenus :

- **La notion de fonctionnalités essentielles** : création d'un indicateur basé sur une analyse fonctionnelle d'un produit
- **La qualité** : création d'un indicateur basé sur la performance, création d'un indicateur basé sur la considération du critère sur l'ensemble des phases de projet du produit, présentation du « Net Promoter Score » et de l'AMDEC
- **L'ergonomie** : présentation des méthodes de l'AFNOR et création d'un indicateur basé sur la considération du critère sur l'ensemble des phases de projet du produit
- **La modularité** : revue de méthodes d'évaluation de la littérature scientifique basées sur le degré de couplage entre modules.
- **La consommation d'énergie** : développement d'indicateurs basés sur la notion de rendement énergétique et de services rendus
- **L'empreinte environnementale** : revue des principales méthodes d'évaluation
- **Le prix** : développement d'un indicateur basé sur le prix moyen du type de produit sur le marché
-

Pour chacun de ces critères, des indicateurs sont proposés (certains sont issus d'une revue des méthodes existantes d'autres sont développés dans cette étude).

Une partie de ces indicateurs est appliquée à la Livebox 4, certains n'ont pas pu l'être du fait d'un manque d'informations. Le but principal de l'étude est d'utiliser la livebox 4 comme un cas pratique pour y appliquer les indicateurs et non d'évaluer le niveau de frugalité réel du produit

Le principal axe de frugalité d'une box est la notion de fonctionnalités essentielles. En ôtant certaines fonctionnalités (accès aux services voix et TV) et se concentrant sur la fonction principale d'une box : permettre au client de se connecter aux services internet internet (la box serait dans ce cas constituée d'une unique interface LAN (ethernet ou wifi) et d'une interface WAN), il est possible de rendre le produit plus abordable tout en conservant un haut niveau de qualité.

Afin d'approfondir cette étude, certains critères pourraient être développés d'avantage (modularité notamment). Une hiérarchisation des critères pourrait être étudiée afin de prioriser les axes de conception et permettrait de développer un « score unique » du niveau de frugalité d'un produit.

De plus, les indicateurs développés proposent une évaluation du niveau de frugalité d'un produit, des méthodologies de conception pourraient également être apportées pour les différents critères afin de standardiser le développement d'un produit frugal.

Enfin, les indicateurs proposés peuvent servir de base de réflexion pour identifier les axes d'amélioration d'un produit.

1. Introduction

Contexte et objectifs de l'étude

Ce projet constitue le rapport d'une thèse professionnelle du mastère spécialisé « Management du Changement et Innovation Durable (MCID) » de l'institut des Arts & Métiers ParisTech de Chambéry. Cette thèse professionnelle s'intègre à une collaboration entre l'Université de technologie de Troyes (UTT), l'université Paris 2 Panthéon-Assas et Orange dans le cadre d'un projet de l'association EcoSD (association loi de 1901 dont le but principal est de favoriser les échanges et collaborations entre universitaires (CentraleSupélec, UTT, Mines ParisTech, ENSAM...) et industriels (PSA, ERDF, Vinci, Orange...) autour de la thématique de l'éco-conception de systèmes pour un développement durable (EcoSD)).

A partir d'une liste de critères caractérisant la notion **d'innovation frugale** issue d'un travail de revue de la littérature scientifique mené dans le cadre d'une thèse avec le laboratoire de L'UTT, ce projet à pour objectif d'approfondir l'analyse de ces critères à la fois sur le plan technique (Orange) et Marketing (Université Paris 2 Panthéon-Assas). **Pour Orange, l'objectif principal est de déterminer des indicateurs permettant d'évaluer les critères techniques et de les appliquer à terme aux produits Orange. Pour la présente étude, le cas pratique est la livebox 4.** Pour l'université Paris II, il est question de répondre à la question suivante : quelle est la place occupée par l'innovation frugale chez Orange ?

Ce projet s'articule suivant les axes suivants :

- Caractérisation de l'innovation frugale (travail sur les critères)
- Définition et proposition d'indicateurs pour l'évaluation des critères pertinents
- Application des indicateurs à travers un cas d'étude : la Livebox 4

Impacts du numérique sur l'environnement

Le numérique est un des secteurs dont l'impact environnemental est le plus grandissant ces dernières années. Ce secteur correspond, selon la commission européenne, à une fourchette de 5 % à 9 % de la consommation d'électricité mondiale et à plus de 2 % de toutes les émissions. D'après le shift project (theshiftproject.org), Think tank œuvrant pour la décarbonation de l'économie, la contribution du numérique aux émissions totales de gaz à effet de serre monte à 4 %. Ce secteur en pleine expansion pourrait, selon un rapport commandé par la mission d'information du sénat sur l'empreinte environnementale du numérique, contribuer à l'émission de 24 MtCO₂ à l'horizon 2040 en France (soit une augmentation de 60% par rapport à aujourd'hui). D'après un article du journal sustainability : [The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010-2015] considéré comme référence à l'époque, les impacts du numérique correspondraient à 805 TWh en termes de consommation d'énergie (3,6 % à l'échelle mondiale) et de 730 Mt CO₂ (1,4 %).

La consommation énergétique du numérique est répartie comme suit :

- 50 % pour les équipements
- 28 % pour la partie réseau
- 22 % pour les data centers
-

[\[Feuille de route sur l'environnement et le numérique par le conseil national du numérique, 2020\]](#)

En termes de gaz à effet de serre pour les TIC, les terminaux (partie des équipements majoritairement contributrice) représente 61 % des émissions au niveau national et 40 % à l'échelle mondiale (source : GREEN IT). Ces émissions sont principalement dues aux phases de fabrication et de distribution de ces terminaux. En effet, ces terminaux nécessitent une large variété de matériaux (métaux notamment). Selon l'ADEME, il faut en moyenne mobiliser de 50 à 350 fois le poids de matière sur tout le cycle de vie d'un appareil à forte composante électronique pour le fabriquer. Cette problématique va de pair avec le fort taux de renouvellement de ces appareils qui est de 2 ans en moyenne pour un smartphone et de 5 ans pour un ordinateur. De plus, les DEEE sont aujourd'hui peu recyclés du fait de la complexité et donc de la non rentabilité des procédés concernés. L'Organisation des Nations Unies utilise le terme

de « tsunami » pour désigner les déchets de cette filière qui devrait représenter 52 millions de tonnes en 2021.

A travers son projet « Engage 2025 », Orange s'empare de ces enjeux environnementaux en annonçant les objectifs suivants (au niveau groupe) :

- Réduction de 30 % des émissions de CO2 par rapport à 2015
- 50 % du mix énergétique issu d'énergies renouvelables (contre 18 % aujourd'hui)
- 100 % des produits Orange (en particulier les boxes) inscrits dans une démarche d'éco-conception.

• Ces objectifs à atteindre pour 2025 serviront de jalons pour un objectif plus ambitieux, celui du zéro carbone d'ici 2040.

A noter également que la consommation énergétique des réseaux est globalement stable depuis plusieurs années malgré un doublement du trafic tous les deux ans.

Un enjeu crucial permettant d'atteindre ces objectifs est celui de **la sobriété**. A l'échelle du groupe, la sobriété pourrait ainsi concilier performance environnementale et économique via une meilleure gestion des ressources. Cette sobriété s'articule au travers de quatre dimensions :

- La sobriété **structurelle** qui consiste à créer, dans l'organisation de l'espace ou des activités, les conditions d'une modération de la consommation de ressources globales (télétravail, communications à distance...)
- La sobriété **dimensionnelle** qui concerne le dimensionnement adapté des équipements par rapport à leurs conditions d'usage (diversification des offres...)
- La sobriété d'**usage** qui porte sur une juste utilisation des équipements en vue de réduire la consommation (mode veille...)
- La sobriété **conviviale** qui relève d'une logique de mutualisation des équipements et de leur utilisation (formules de mutualisation des livebox...)

• La sobriété permet aussi d'apporter une solution aux effets rebonds que l'efficacité énergétique peut générer. En effet, l'efficacité énergétique permet une réduction du coût de consommation et peut ainsi induire une augmentation de la consommation (il y a effet rebond lorsque le gain économique induit par l'efficacité énergétique génère une augmentation globale de la consommation d'énergie)

Cette approche duale entre efficacité énergétique et sobriété et donc nécessaire pour réduire sensiblement la consommation de ressources.

1.1 Définitions

Dans le contexte actuel d'épuisement des ressources, de destruction des écosystèmes et de dérèglement climatique, le modèle économique dominant basé sur une croissance infinie dans un monde fini est de plus en plus remis en question.

Cette remise en question est un terreau fertile pour de nombreux mouvements tentant de proposer des alternatives au modèle dominant. Que ce soit à travers les choix de consommation ou de modes de vie, des philosophies nouvelles émergent dans la société. C'est le cas de l'innovation frugale, la frugalité, la sobriété ou encore du low-tech. Ces mouvements remettent en question notre rapport à la consommation et proposent une modération délibérée de celle-ci dans une quête de durabilité. Cette section vise à clarifier les nuances entre ces notions souvent confondues

1.1.1 Frugalité

Selon le dictionnaire Larousse, la définition de « frugal(e) » est la suivante :

“Qui se nourrit de peu, qui vit de manière simple”

L'article de [Lastovicka \(1999\)](#) propose plusieurs définitions de la frugalité à travers l'étude de la littérature scientifique.

Par exemple, la frugalité américaine est définie comme le refus du plaisir à travers le luxe et la conservation des besoins primaires. En 1848, John Stuart Mill avance que la frugalité est une démarche de **privation volontaire du court terme pour le gain du long terme**. Selon DeYoung, la frugalité se définit comme une **gestion réfléchie des ressources** et une réduction du gaspillage. Cette bonne gestion serait d'après l'auteur source de satisfaction.

A travers une étude portant sur des personnes se considérant comme des consommateurs frugaux, l'article de Lastovicka met en évidence que ces consommateurs ont pour traits communs une remise en question perpétuel de leurs achats. Ces consommateurs s'opposent ainsi aux acheteurs dits compulsifs. Ces consommateurs, souvent créatifs en ce qui concerne le réemploi de leurs biens de consommation se revendiquent également plus indépendants que la moyenne. En rejetant la consommation de mode ou de tendance (cas du hand-spinner pour citer un exemple récent), les consommateurs frugaux semblent aussi peu influençables.

Cette étude met également en évidence des corrélations entre la frugalité, la conscience de la valeur et du prix mais réfute la corrélation entre éco-centrisme et frugalité.

La notion de frugalité est très ancienne, elle se retrouve dans beaucoup de religions : Jésus, dans la Bible, prônait souvent la frugalité et le rejet du matérialisme. Cette notion est également très présente dans les religions orientales telles que le bouddhisme ou le jaïnisme où la notion d'ascèse (privation voulue) est cruciale dans leur spiritualité. La frugalité trouve également des racines dans la Grèce (Epicure) et la Rome antique (Marc Aurèle, Aristote) à travers les mouvements des épicuriens, stoïciens et des cyniques qui prônaient la tempérance comme critère de vie vraie.

La frugalité peut alors être perçue comme une mode de vie s'opposant au matérialisme et au consumérisme qui, à travers une privation du court terme et une gestion judicieuse des ressources, vise une satisfaction à long terme.

1.1.2 L'innovation frugale et l'innovation Jugaad

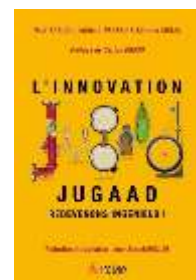
La notion d'innovation frugale (IF) a émergé à la fin des années 2000 avec l'auteur Prahalad qui a soulevé le rôle primordial des multinationales dans l'innovation face à l'évolution des industries confrontées aux défis sociétaux et environnementaux

Le terme « d'ingénierie frugale » a été exprimé pour la première fois par Carlos Ghosn en 2006 lorsque l'alliance Renault-Nissan ciblait les marchés émergents. Carlos Ghosn se disait alors très impressionné et inspiré par l'aptitude de certains indiens à trouver des solutions ingénieuses pour résoudre un problème ou répondre à un besoin avec des ressources limitées. C'est cette démarche qui fut à l'origine de la gamme Dacia chez Renault.

Le terme d'innovation frugale est directement inspiré de celui d'innovation « Jugaad ». « Jugaad » est un terme utilisé dans l'hindi, le bengali ou encore le pendjabi pour désigner un objet ingénieusement bricolé ou détourné de son usage pour résoudre un problème. Cette notion peut être décrite comme une solution ingénieuse répondant à un besoin spécifique dans un milieu contraint. Cousine du « système D » français ou encore des solutions bricolées par Mc Gyver, cette notion d'innovation Jugaad a été largement popularisée par Navi Radjou dans son best-seller « l'innovation Jugaad, redevenons ingénieux ! » (2013).

Dans son livre, Navi Radjou articule la « pensée Jugaad » autour de 6 principes :

- **Rechercher des opportunités dans l'adversité**
- A travers ce principe, il est question pour les entreprises de développer plus de résilience dans un environnement de plus en plus concurrentiel. Bon nombre d'entrepreneurs Jugaad développe des solutions ingénieuses en contournant des contraintes dans un environnement spécifique (contraintes en termes de ressources, contraintes financières, contraintes d'accessibilité...).
- *Par exemple, dans les années 80, Mr Tanti fut confronté à un problème d'accès à l'électricité (accès intermittent, prix fluctuant...) pour ses usines de textile dans l'état indien du Gujarat. Il se lança alors dans la solution de l'énergie éolienne qui lui permettait d'avoir accès à une source fiable d'électricité. Il changea ensuite de secteur d'activités pour devenir le 5^{ème} fournisseur de solutions éoliennes dans le monde.*



- **Faire plus avec moins**

- Ce principe qui va à l'encontre du « bigger is better » très ancré dans la culture occidentale est crucial dans l'esprit Jugaad. Il désigne le fait de trouver des solutions proposant plus de valeur aux consommateurs en répondant mieux à leurs véritables besoins tout en limitant la consommation de ressources matérielles et financières afin de proposer des produits plus abordables et accessibles.
- *L'histoire de Gustavo Grobocopatel, agriculture argentin, illustre bien ce principe. Confronté à des difficultés à se procurer de grands lopins de terre ainsi qu'à une pénurie de main d'œuvre qualifiée et un manque de capital pour investir dans de lourds matériels agricoles, ce fils d'agriculteur a développé un système de location de terres et de sous-traitance des étapes de l'activité agricole à un réseau spécialisé de prestataires de services. Ainsi, sa société « légère en capitale », grâce à sa flexibilité, est devenu en 2010, le deuxième producteur de céréales en Amérique latine*

- **Penser et agir avec flexibilité**

- « On ne peut pas transformer une situation avec le même état d'esprit que celui qui l'a créée » Albert Einstein.
- La flexibilité est également fondamentale dans l'esprit Jugaad. Ce principe vient également prendre à contre-pied la pensée dominante des grandes entreprises occidentales qui ne jurent bien souvent que par la prévision, la stabilité et les études de marché. Par exemple, la méthode « 6 sigma », largement implantée dans le monde industriel, permet certes d'atteindre un très haut niveau de qualité mais peut également constituer une camisole de force de la similitude qui peut grandement freiner l'innovation.
- Les entrepreneurs Jugaad osent prendre des risques et sortir de leur zone de confort quitte à échouer (mais rapidement et à moindre coût) en sortant des silos organisationnels. En un sens, les innovateurs Jugaad ne planifient pas mais improvisent en essayant plusieurs voies pour atteindre leur objectif.
- *Le docteur indien V.Mohan (l'Inde était à ce moment le second pays du monde le plus touché par le diabète après la Chine) est un expert en diabète de renommée mondiale qui a su faire preuve d'une grande flexibilité d'esprit en développant une clinique de télé-médecine mobile capable de se déplacer dans les villages (très touchés par le diabète). Avec des camionnettes équipées d'appareils technologiques de télé-médecine permettant la transmission des tests et de diagnostics par liaisons satellites, son entreprise a su proposer un service de soin accessible aux plus démunis et isolés. Sa flexibilité de pensée s'est également traduite par sa méthode de recrutement/formation : au lieu de faire appel à des infirmières et médecins trop qualifiés et donc trop chers, le docteur Mohan a recruté des jeunes de petites villes avec un diplôme d'études secondaires et les a formés spécifiquement à la tâche.*

- **Viser la simplicité**

- La simplicité est souvent le moyen de répondre le plus justement à un besoin dans un contexte où même les occidentaux commencent à boudier les produits trop technologiques et trop complexes. Il s'agit ici de faire « simple » mais pas « simpliste » en se concentrant sur l'essentiel afin de proposer des solutions plus abordables et accessibles.
- *L'histoire du docteur Sathya Jeganathan témoigne parfaitement de la pertinence de la simplicité. Cette Pédiatre d'Inde du sud était confrontée à une forte mortalité infantile dans son hôpital. Face au prix prohibitif des incubateurs occidentaux, elle décida de créer son propre incubateur, simple, peu coûteux et facile à utiliser avec une équipe d'infirmières et d'électriciens locaux. Avec une simple table de bois, un couvercle en plexiglas et quelques ampoules de 100W, son invention permet aisément de maintenir un bébé au chaud à température constante pour un prix de revient n'excédant pas 100 dollars (soit 200x moins cher que les incubateurs « high-tech » !). Son incubateur, après quelques modifications, fut par la suite largement déployé à travers tout le pays et permit de sauver de nombreuses vies.*
- *Alors pourquoi faire compliqué quand on peut faire simple ?*

- **Intégrer les marges et les exclus**

- Une des vocations de l'esprit Jugaad est d'intégrer les personnes jusqu'ici mises à la marge de la société. Pour ce principe, il est alors question de co-crée de la valeur avec les « exclus » afin d'aider chacun à gravir la pyramide de Maslow. En marketing, le terme de « **BoP** » pour « **Bottom of the pyramid** » est souvent utilisé pour désigner le segment de marché des moins fortunés.
- *En 2004, Rana KAPOOR a quitté son emploi au sein d'une société multinationale pour créer une banque « pour tous ». Avec près de 600 millions d'indiens qui n'avaient pas accès aux services bancaires et financiers, sa société « YES BANK », via l'utilisation d'outils financiers sophistiqués (titrisation des micro-crédits des institutions de microfinances) jusqu'alors réservés aux grandes entreprises, à développer des solutions innovantes destinées à soutenir et épauler des PME et ONG. Il a ainsi permis à un nombre conséquent d'entrepreneurs avant non considéré par le système de développer leur entreprise.*

- **Suivre son cœur**

- « Votre cœur sait ce que votre esprit ne sais pas »
- Dans un contexte où les consommateurs aspirent à des relations de plus en plus authentiques, les innovateurs Jugaad suivent leur intuition pour développer des solutions adaptées. La R&D classique qui privilégie bien souvent les brevets et les prouesses technologiques est de plus en plus déconnectée du consommateur. La logique pure n'est pas toujours suffisante pour créer de la valeur pour le consommateur.
- *Un jeune entrepreneur du nom de Kishore Biyani avait suivi les conseils de consultants qui suggéraient de suivre le modèle d'une chaîne de magasins standards pour développer son activité dans la ville de Mumbai, ce qui se solda par un échec. Il décida alors de suivre son intuition pour reconstituer l'impression de chaos des marchés indiens. Les produits étaient alors choisis par des directeurs régionaux qui avaient une appréciation intuitive des besoins locaux, « Big bazaar », le nom de sa chaîne, est aujourd'hui la plus grande chaîne d'hypermarchés en Inde.*
- *On peut également citer l'exemple de Steve Jobs, qui se fiait bien plus à sa propre intuition qu'aux études de marché et qui était bien connu pour n'en faire ... « qu'à sa tête ».*

En somme, le jugaad n'est ni un processus, ni un outil, ni une méthode scientifique... On ne peut pas maîtriser la créativité !

Il est important de ne pas confondre l'innovation frugale avec les autres types d'innovations suivantes :

- **« Reverse innovation » ou « Innovation inverse »** : Ce terme, parfois rencontré sous l'appellation « BoP innovation » désigne une innovation qui ciblait originellement un segment de population de pays émergent(s) et qui trouve également les succès dans les pays « développés ».
- *L'entreprise Huawei, par exemple, ciblait la population peu et moyennement aisée de Chine avec un smartphone low-cost et a rencontré un franc succès dans le monde entier grâce à son très bon rapport qualité/prix.*
- **« Cost innovation » ou « Innovation de coût »** : Ce type d'innovation désigne un progrès technologique (procédé, matériau, design...) qui amène une réduction du coût de production d'un produit sans en altérer sa valeur finale. L'innovation de coût peut être résumée ainsi :

- **« Same for less »**

Selon [Weyrauch & Herstatt, 2016](#), l'innovation frugale « répond à ce dont nous avons besoin et non ce qui serait bien d'avoir »

On peut alors résumer l'innovation frugale comme **quelque chose de centré sur le besoin du consommateur qui minimise la consommation de ressources matérielles et immatérielles**. L'innovation frugale vise à **faire aussi bien, voire mieux, avec moins** en ôtant le superflu mais sans faire de concession sur la qualité



Figure 1: représentation schématique du principe de l'innovation frugale

1.1.2.1 Quelques exemples d'innovations frugales

- **La lampe à gravité**

Ce système, constitué d'une ampoule à LED, d'une dynamo et d'un sac lesté permet aux personnes non connectées au réseau d'électricité d'accéder à une alternative plus sécuritaire que la bougie et aux lampes à pétroles. De plus, ce système permet d'obtenir de la lumière gratuitement (pas de consommables ni carburant) pour un prix d'investissement non prohibitif de l'ordre de 80 €.

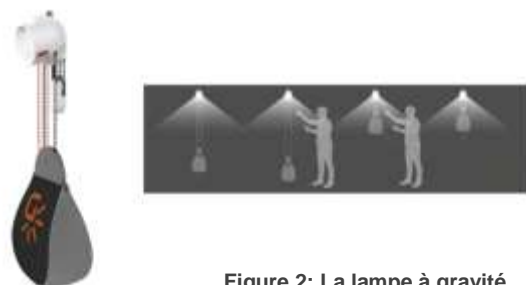


Figure 2: La lampe à gravité

- **Le microscope en bambou**

Ce microscope en bambou, allié à un système optique simple, a été développé afin d'améliorer les conditions d'éducation des enfants défavorisés en Inde. Grâce à son prix très abordable de 4 €, ce microscope s'est rapidement répandu dans les écoles indiennes puis à travers de nombreux pays.



Figure 3: Le microscope en bambou

- **La Tata Nano**

Bien que n'ayant pas rencontré un franc succès, la Tata nano est un très bon exemple d'innovation frugale. Développée en Inde par l'entreprise Tata motors, elle fut à son lancement la voiture neuve la moins chère du monde (prix de lancement de 1560 €). Son créateur a eu l'idée de développer ce modèle en constatant le nombre important de familles qui se déplaçaient à plusieurs sur une moto. Il a voulu ainsi proposer un moyen de transport sécurisé pour les familles peu aisées. Son très faible coût est due au fait que la Tata Nano répond au simple besoin



Figure 4: La Tata Nano

de se déplacer sur de longue distance de manière sécurisée. Ainsi, ce modèle de très petite taille n'est pas équipé d'options ou accessoires superflues tels que le chauffage, la radio ou encore la direction assistée.

- **Le Tata swach**

Toujours chez le groupe Tata mais dans une autre filiale : Tata Chemicals, le Tata Swach est un purificateur d'eau qui a été développé pour venir en aide aux sinistrés du tsunami de Sumatra de 2004. C'est le premier purificateur d'eau développé à échelle industrielle à un prix dit « low-cost » (15€). Ne nécessitant pas d'alimentation électrique, le système de purification repose sur un système de captation chimique des polluants avec du riz, du charbon actif et des nano particules d'argent. A la fois abordable, mobile et facile d'utilisation, ce produit fut d'une aide très précieuse pendant cette catastrophe.



Figure 5: Le Tata swach

- **Le Nokia 1200**

Bien qu'il ne s'agisse pas ici d'une innovation produite à proprement parlé mais plutôt d'un positionnement stratégique, le Nokia 1200 est un bon représentant de la frugalité. Dans l'univers concurrentielle des smart phones où la course à l'armement technologique est la règle d'or, Nokia a décidé de lancé sur le marché en 2007 un téléphone aux fonctionnalités basiques : le Nokia 1200. Téléphone abordable, très robuste et proposant une autonomie pouvant aller jusqu'à 390 h en veille, ce modèle n'a pas uniquement trouvé le succès dans les pays émergents mais a également su séduire une partie de la population occidentale en quête de simplicité et de réelle utilité. Ce téléphone est aujourd'hui le modèle le plus vendu de l'histoire.



Figure 6: Le Nokia 1200

1.1.3 Le low-tech

Notion largement popularisée par Philippe Bihouix avec son ouvrage « l'âge des low-tech », le concept de « low-tech » n'est pas encore clairement défini aujourd'hui. Philippe Bihouix articule la notion de « low-tech » autour de « **principes visant à effectivement diminuer notre prélèvement de ressources** ». Philippe Bihouix lui-même évoque la difficulté de définir clairement cette notion qu'il considère avant tout comme un « pied-de-nez » au high tech



Figure 7: Philippe Bihouix

Un autre acteur francophone précurseur dans le domaine est le low-tech lab (<https://lowtechlab.org/>). Le low-tech lab est un programme de recherche et de documentation collaboratif qui vise à diffuser et promouvoir gratuitement des solutions « low-tech » du monde entier. Le low-tech lab est notamment connu pour son projet « Nomade des mers », projet porté par Corentin de Chatelperron, jeune ingénieur qui partit en 2016 pour une expédition de 3 ans sur un bateau laboratoire à la conquête des innovations low-tech à travers le monde entier. Ce projet est ainsi à l'origine de 30 innovations low-tech documentées sur le site du low-tech lab.



Figure 8: Corentin de Chatelperron à bord du nomade des mers

Bien souvent, une solution « low-tech » sera dite faiblement « technologisée », d'où son nom qui s'oppose à la « high-tech ». Cependant, la notion de « technologie », qui peut se traduire par « l'étude des outils et des techniques », ne permet pas d'identifier clairement ce concept.

Pour désigner quelque chose de « low-tech », les termes suivants sont parfois également utilisés :

- « **Technologie basse** » ou « **technologie douce** »
- « **slow tech** »
- « **lower tech** »
- « **Better tech** »

L'économiste Ernst Friedrich Schumacher parle également de « **technologies appropriées** » qui se veulent moins coûteuses et plus simples à entretenir.

L'écologiste André Gorz quant à lui évoque le terme de « **techniques autonomes** » maîtrisables localement par les utilisateurs (en opposition avec des techniques dites hétéronomes souvent complexes et nécessitant de l'expertise pour être gérées).

Enfin, Ivan Illich, penseur de l'écologie politique désigne les low-tech à travers le terme de « **produits conviviaux** ».

Cette notion, à l'instar de l'innovation frugale, se veut :

- ✓ **Utile** car répondant à un besoin de base.
- ✓ **Accessible** et **facile d'appropriation** (simple) car ne nécessitant pas de compétences techniques pointues pour son utilisation.
- ✓ **Durable** car à la fois **robuste** et faisant appel à une **bonne gestion des ressources** (ressources locales, réemploi, recyclage, réparation, faible consommation d'énergie de préférence renouvelable)

Une solution dite low-tech peut se distinguer aujourd'hui d'une innovation frugale par son caractère plus artisanale car il s'agit bien souvent de solutions que l'on peut construire soi-même (dans l'esprit du Do it yourself (DIY)). La philosophie du low-tech est également très liée avec celle de « l'open-source », du partage de savoir alors que l'innovation frugale s'insère sur un positionnement stratégique d'une entreprise qui souhaitent atteindre un marché, un segment de clientèle (bien souvent le BoP*). De plus le low-tech propose une vision systémique à travers la remise en cause des modèles économiques, organisationnels, sociaux et culturels dominants.

BoP : « Base of the Pyramide », se référant à la pyramide de Maslow, ce terme désigne le groupe socio-économique de la population le plus pauvre qui cherche à satisfaire ses besoins physiologiques de base.



Figure 9: La pyramide de Maslow

La notion de low-tech est donc relative, un objet ne peut pas réellement être low-tech dans l'absolu mais plutôt plus low-tech qu'un autre (de même utilité). Le terme de lower-tech semble alors être plus approprié car elle permet notamment d'inclure en éventail de solutions hybrides entre le « low » et le « high » tech.

Qu'il s'agisse d'innovation frugale ou de low-tech, cette philosophie peut se résumer synthétiquement ainsi :

« **Faire mieux avec moins** »

1.1.3.1 *Quelque exemples de systèmes low-tech (source : low-tech lab)*

- **Parabole solaire pliable**

Ce système portable fabriquable à partir de cartons, d'une matière réfléchissante et de quelques éléments rigides de structure permet d'obtenir une puissance de l'ordre de 900 W par m². Ce système permet ainsi, par exemple, de porter à ébullition en volume de 2L d'eau en 6min avec une surface de 2m².



Figure 10: Parabole solaire pliable

- **Frigo du désert (version légère)**

Ce système se compose d'un bidon étanche au sable, de tissu à maille fine, de quelques planches de bois, d'un petit tuyau plastique avec robinet, d'une bouteille de 5 ou 6 litres et de sable. Le bidon est isolé thermiquement de l'ambiance extérieure grâce à une couche de sable contenue par le tissu. Un système d'irrigation du sable au goutte-à-goutte permet ensuite de mettre en œuvre la réaction thermodynamique qui permet de prélever les calories du contenu du bidon pour évaporer l'eau et ainsi maintenir un niveau de fraîcheur à l'intérieur du bidon.



Figure 11: Frigo du désert

- **Le mixeur à pédale**

Ce mixeur à pédale permet de mixer des aliments sans avoir recours à de l'électricité mais tout simplement en exploitant la puissance musculaire des jambes. Pour cet objet low-tech, une simple chaîne de transmission du couple du pédalier vers les lames du mixeur est assurée par un tube en PVC enrobé d'une chambre à air.



Figure 12: mixeur low-tech

1.1.4 La sobriété

La sobriété, notion très proche de la frugalité, est désignée par le dictionnaire Larousse comme « le comportement d'une personne, d'un animal qui se comporte avec retenue, qui ne contient pas d'ornements superflus. »

D'un point de vue étymologique, le mot latin « sobrietas » se rapporte à une forme de tempérance, de modération qui n'est ni austérité, ni excès.

Pierre Rabhi définit la notion de « sobriété heureuse » comme "Une sorte d'antidote à la société de surabondance sans joie ». Ainsi vivre sobrement, sans superflu matériel et en faisant la part belle à l'entraide et la solidarité serait vivre mieux.



Figure 13: Pierre Rabhi

Elle est définie par F. Bordage comme une utilisation raisonnable et uniquement lorsque c'est nécessaire. "Sans se priver, il s'agit de prendre pleinement conscience des impacts associés à chacun de nos usages quotidiens".

L'association Negawatt, association proposant un plan de transition énergétique de sortie des énergies fossiles à l'horizon 2050 en s'appuyant sur la sobriété et l'efficacité énergétique, définit la sobriété comme « la recherche de modération dans la production et la consommation de produits, de matières ou d'énergie ».

L'association expose également la notion de sobriété comme un moyen de « réduire les gaspillages par des comportements rationnels ».

En 2016, Villalba, propose une définition différente de la notion en expliquant que c'est un "processus social et politique de coordination, de négociation qui vise à instituer un partage équitable des efforts de réduction de consommation".

La sobriété peut alors être considérée comme un choix, une philosophie qui se rapporte à un usage et une consommation plus juste, modérée des choses. Dans notre étude, la sobriété se différencie alors de l'innovation frugale et du low-tech car elle se rapporte à la l'usage, à la consommation et non directement à un produit.

Par exemple, faire délibérément le choix d'acquérir un Nokia 1200 (produit frugal), au lieu d'un smartphone peut être considéré comme une démarche de sobriété (numérique).

Faire le choix de moins chauffer son habitation à une température plus basse l'hiver est un exemple de sobriété énergétique.

A noter qu'il est important de bien distinguer la sobriété de l'efficacité. L'efficacité se rapporte à une réduction de la consommation (par unité de service) pour un même résultat final là où la sobriété se rattache plus à la quantité de ce résultat final consommé. **L'efficacité sera ainsi souvent améliorer par les avancées technologiques alors que la sobriété relève plus du comportement.**

L'implémentation d'un mode veille sur un équipement électronique relève de la sobriété, la profondeur de ce mode veille est du domaine de l'efficacité.

1.1.4.1 Exemple d'un projet de sobriété au sein d'Orange : le Projet ORYX

Ce projet de sobriété appliqué aux réseaux d'accès mobile en Afrique avait pour objectif de remplacer les groupes électrogènes diesel habituellement utilisés par des panneaux photovoltaïques. Dans un premier temps, le coût d'investissement (CAPEX) de cette solution était trop élevé compte tenu de l'importante consommation des installations. L'approche a donc été de réduire autant que possible la

consommation d'énergie des équipements télécom et d'optimiser la chaîne d'alimentation en énergie ainsi que les solutions de ventilation. La réduction des coûts d'investissement fut également possible grâce à un dimensionnement au plus juste de la surface de panneaux et du nombre de batteries. Cette démarche de sobriété a également été accompagnée d'une discussion avec les clients locaux autour de leurs besoins et des risques de coupure. Des systèmes de mode veille ont été déployés afin de réduire ces risques de coupure.

Cette démarche de sobriété qui consiste en une offre adaptée et flexible a ainsi permis d'économiser, sur l'année 2016, 13000 litres de fuel et d'éviter l'émission de 35t de CO2 par antenne.

En résumé, Les notions définies dans cette partie peuvent être synthétisées ainsi :

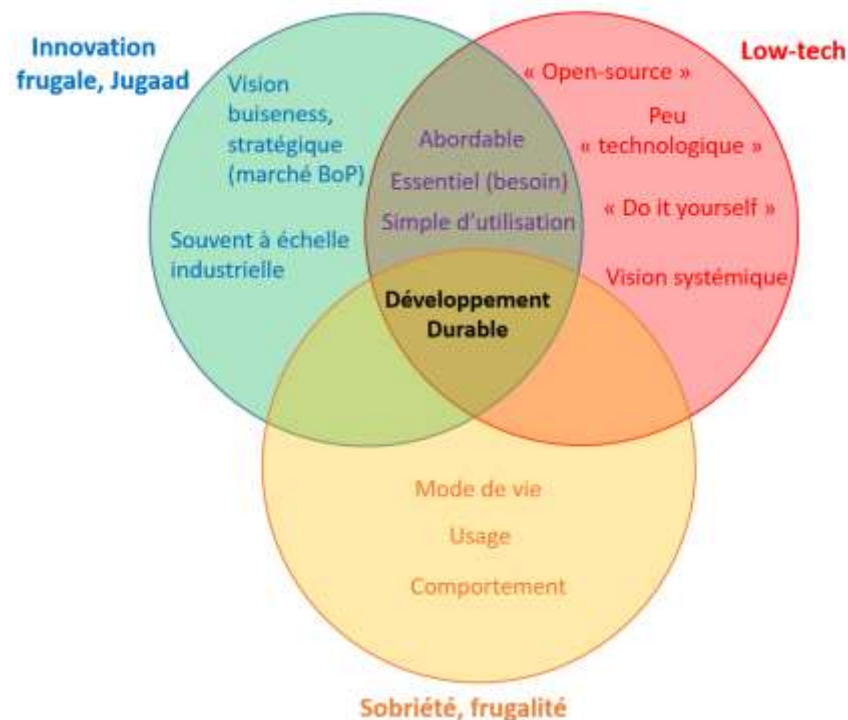


Figure 14: Synthèse des définitions d'innovation frugale, frugalité low-tech et sobriété

Note : Les notions de sobriété et de frugalité sont très proches et sont donc ramenées dans la même catégorie dans ce schéma pour en simplifier la lecture. La nuance entre ces deux notions réside dans le fait que la sobriété se rattache plus à une démarche éthique, philosophique alors que la frugalité est plus souvent motivée par un objectif économique.

2 Caractérisation de l'innovation frugale

Cette section a pour but de caractériser la notion d'innovation frugale à travers une liste de critères (KPI) qui constitueront la base de l'étude.

Un des documents à l'origine de l'étude est la liste des critères de frugalité développée dans le cadre du projet EcoSD [Annexe 1 : Listes des Critères de Luis-Miguel LOPEZ SANTIAGO]. Ces critères sont issus d'un travail de recherche des adjectifs les plus couramment utilisés dans la littérature scientifique pour désigner une innovation frugale.



En plus de ces critères, une recherche bibliographique supplémentaire a été apportée à l'étude afin de déterminer les critères les plus importants de l'innovation frugale. [Sergej von Janda, S. K. (2019)]

Dans cet article, les auteurs ont procédé à une revue de la littérature scientifique afin de déterminer les caractéristiques clés de la frugalité d'un produit.

Pour cet étude, les mots clés suivants ont été utilisés : « frugal », « frugality », « frugal innovation », « frugal products » and « product frugality ». La base d'étude fut ainsi constituée de 133 articles. Cette analyse de la littérature fut également complétée par une série d'interviews avec 10 experts afin de déterminer les caractéristiques définissant le mieux la notion d'innovation ou de produit frugal. Dans un second temps 60 interviews avec des personnes du « BoP » ont également été menées afin de déterminer des caractéristique sous l'angle de vue du consommateur. Les interviews avec les consommateurs étaient principalement constituées de présentations de produits, les consommateurs devaient ensuite décrire ce qu'ils appréciaient ou non dans ces produits avec leurs propres mots. Les données des deux types d'interviews ont ensuite été traitées et analysées avec diverses facteurs et méthodologies. D'après cette étude, les caractéristiques les plus représentatifs d'une innovation frugale sont les suivants :

- 1) Prix abordable
- 2) Durable (au sens écologique du terme)
- 3) Simple d'utilisation
- 5) Qualité acceptable

•

Un second article, propose une étude similaire afin de caractériser l'innovation frugale. [\[Weyrauch, T., & Herstatt, C. \(2016\)\]](#)

Cette étude est articulée autour de 4 étapes :

- Etude de la littérature scientifique à travers deux bases de données (62 articles traités)
- Entretiens avec 45 professionnels du domaine qui furent interrogés sur les critères qui définissaient le mieux la notion d'innovation frugale (ces professionnels ont été sélectionnés suite à leur participation au forum sur l'innovation frugale « The symposium frugal innovation and the internationalisation of R&D », Hamburg university of Technology's centre of frugal innovation en octobre 2014)
- Création de catégories afin de réduire le nombre de critères et de supprimer les redondances et trop fortes similitudes
- Déduction des critères les plus pertinents via un traitement et une analyse des données.

•

Pour cette étude, les résultats furent les suivants :

- 1) Prix abordable
- 2) Fonctionnalités essentielles
- 3) Qualité acceptable

Il est possible de constater que ces deux études n'aboutissent pas exactement aux mêmes résultats. Ces différences peuvent s'expliquer par la subjectivité inhérente au caractère abstrait des critères utilisées. On peut cependant noter la présence de deux critères communs parmi les principaux critères déduits des deux études : un prix abordable (premier critère pour les deux études) et une qualité acceptable.

Cette étude porte sur les critères de frugalité « techniques », c'est-à-dire ceux pouvant entrer en considération lors de la phase de conception d'un produit. Les autres critères (marketing, stratégie, communication) font l'objet de l'étude du projet de l'Université Paris II, l'objectif du projet EcoSD étant de traiter la notion d'innovation frugale à l'échelle globale d'une entreprise.

Une des étapes du projet est donc de traiter cette liste de critères afin d'en déterminer les plus pertinents dans le cadre de cette étude.

2.1 Création de catégories, agrégation des critères

Dans un premier temps, les termes similaires ont été rassemblés sous une même catégorie (et traduits en français) :

- Quality, Performance → **Qualité**



- Functionality, essentials, de-featuring → **Fonctionnalités essentielles**
- User-friendly, simplicity, usability, user-centered, ergonomics, easy, safety → **Ergonomie**
- Modular, architectural → **Modularité**
- Flexible, upgradeability → **Adaptabilité**
- Portability, size, small, lightweight → **Portabilité**
- Feasibility → **Faisabilité**
- Robust, reliability, durability, maintainability, reparability → **Efficacité matière (Circularity score*)**
- Certains des critères relatifs aux impacts sociaux et environnementaux ont également été inclus dans les critères techniques :
- Energy-efficient → **Consommation d'énergie**
- Sustainability, local-resources, ecological, resource efficiency → **Empreinte environnementale**
- Low-cost, cheap, affordability, price → **Coût**

A noter que les catégories “Efficacité matière”, “empreinte environnementale” et « consommation d'énergie » possèdent des leviers communs. Le critère « consommation d'énergie » est également lié aux critères « coût » à travers le coût d'utilisation du produit et « empreinte environnementale ». Il est cependant traité séparément de part sa pertinence dans l'étude d'un produit électronique.

Circularity score* : le circularity score ou indice de circularité est un indicateur interne d'orange en cours de normalisation à l'ITU (Agence de normalisation internationale des télécommunications) proposant une mesure du degré d'intégration du produit dans une logique d'économie circulaire. Les critères de frugalité déjà comptabilisés dans cette méthode ont donc été directement intégrés dans cette catégorie.

Cette méthode consiste en une notation sous forme de score allant de 0 (pire score) à 100 (meilleur score) de 19 critères repartis en 3 catégories. [\[Annexe 2 : Description de la méthode du circularity score\]](#)

Le circularity score permet de considérer, en partie, les critères suivants : qualité, empreinte environnementale.

2.2 Définition des nouveaux critères

Cette section expose les définitions des nouveaux critères établis (les définitions sont approfondies dans la suite du rapport) :

- **Fonctionnalités essentielles** : le produit doit répondre uniquement aux besoins principaux/essentiels de l'utilisateur (pas de fonctionnalités superflues)
- **Qualité** : le produit doit répondre à des niveaux d'exigences pour les fonctionnalités qu'il propose et présenter un bon niveau de qualité global
- **Ergonomie** : le fonctionnement du produit doit être facilement compris par tout le monde et doit pouvoir être utilisé avec un maximum de confort et de sécurité.
- **Modularité** : Le produit doit être composé d'un maximum modules (sous-ensembles du système) indépendants
- **Efficacité matière** (Circularity score)
- **Consommation d'énergie** : la consommation énergétique du produit doit être minimisée
- **Impacts environnementaux** : les impacts environnementaux du produit doivent être minimisés sur l'ensemble du cycle de vie du produit.
- **Coût** : le produit doit être abordable (prix d'acquisition et d'utilisation) relativement à des produits similaires.

Note : les critères Portabilité, Faisabilité et Adaptabilité ne sont pas traités dans cette étude (voir Section « 3.7. Indicateurs non traités » pour plus de détails).

3 Etude des critères

Dans cette partie, la définition des critères est approfondie. Des indicateurs ou indices de mesures sont également proposés. **Cette section vise à traiter les critères d'un point de vue général afin que les indicateurs puissent être appliqués à n'importe quel produit.**

3.1 Fonctionnalités essentielles

L'aspect fonctionnalités essentielles est crucial dans l'innovation frugale. Dans bien des cas, c'est en centrant le produit sur les besoins réelles du consommateur qu'il est possible de développer un produit à la fois abordable et de qualité.

Une des méthodes permettant de mettre en évidence les fonctionnalités essentielles du produit est **l'analyse fonctionnelle**.

L'analyse fonctionnelle permet, dans un premier temps, de déterminer :

- Les **fonctions** que le produit doit proposer
- Les **contraintes** que le produit doit intégrer

Dans un second temps, une hiérarchisation des fonctions et des contraintes permet de déterminer les fonctions et contraintes principales du produit.

Le principe de l'analyse fonctionnelle et la hiérarchisation des fonctions sont décrits en [Annexe 3 : principe de l'analyse fonctionnelle et hiérarchisation des fonctions](#)

3.1.1.1 Indicateurs pour le critère fonctionnalités essentielles

A partir de la hiérarchisation des fonctions, il est possible de déterminer les fonctions principales du produit. Avec ces fonctions principales, il est alors possible de déterminer la proportion de fonctions principales du produit de la manière suivante :

$$FP(\%) = \frac{\text{nombre de fonctions principales}}{\text{nombre de fonctions totales}}$$

Avec : *FP* : Proportion de Fonctions principales

FP s'exprime donc en % et plus le score est proche de 100 % plus le produit peut être considéré comme frugal au sens de ce critère.

L'enjeu de ce système de notation réside dans la détermination des fonctions principales et la comptabilisation du nombre total de fonctions.

Pour déterminer les fonctions principales, une limite basse de poids fonctionnel peut être utilisée. On considère alors une fonction comme principale si son **poids fonctionnel est > X %**.

A noter que l'analyse fonctionnelle d'un produit ne fait pas nécessairement apparaître l'ensemble des fonctionnalités réelles d'un produit. Il est donc possible qu'un produit propose plus ou moins de fonctionnalités que le nombre de fonctionnalités déterminées lors de l'analyse fonctionnelle (si une coque de protection d'un smartphone fait aussi décapsuleur, il est tout à fait possible que la fonction « décapsuleur » n'apparaisse pas lors de l'analyse fonctionnelle d'une coque de smartphone)

3.2 Ergonomie

Une innovation frugale se veut aisément appropriable par un maximum de personnes (notamment des personnes peu éduquées), elle ne doit pas être exclusivement destinée à des personnes disposant de prérequis (une élite). L'ergonomie qui, pour un système, est la discipline qui vise à maximiser le confort, la sécurité et l'efficacité pour le plus grand nombre s'insère dans cette logique.

3.2.1 Indicateurs pour le critère ergonomie

Les principales méthodes d'évaluation de l'ergonomie sont présentées dans la norme de l'AFNOR [ISO 209241-210_2010](#).

Ces méthodes se divisent en deux catégories :

- Les méthodes impliquant la participation directe des utilisateurs
- Les méthodes impliquant la participation indirecte des utilisateurs

L'ensemble de ces méthodes (6 méthodes avec participation directe des utilisateurs, 3 méthodes avec participation indirecte) sont développées en [Annexe 4 : méthodes d'évaluation de l'ergonomie de l'AFNOR ISO 209241-210_2010](#) (description, ressources nécessaires, avantages, inconvénients)

3.2.1.1 Choix des méthodes

Premièrement, chacune des méthodes est plus ou moins appropriée en fonction du **stade du projet** du produit évalué.

	Observation des utilisateurs	Mesurages performance	Analyse incidents critiques	Questionnaires	Interviews	Penser tout haut	Méthodes basées sur des documents	Méthodes basées sur des modèles	Evaluation par expertise
Acquisition – Approvisionnement	++	+	+	+	+		++		+
Développement – Analyse des exigences	++	+	+	++	++	++	+	+	+
Développement – Conception architecturale	+	++		+	+	++	++	+	+
Développement – Test de qualification	+	++	+	++	++	+	+	+	+
Maintenance – Fonctionnement	+	+	++	+	+				+

Figure 15: Choix des méthodes - phases du projet

Deuxièmement, le choix de la méthode peut être motivé par les **contraintes principales** du projet.

	Observation des utilisateurs	Mesurages performance	Analyse incidents critiques	Questionnaires	Interviews	Penser tout haut	Méthodes basées sur des documents	Méthodes basées sur des modèles	Evaluation par expertise
Echelle de temps très limitée		-	-	-		-	+	-	++
Contrôle du coût/prix		-	-		-	-	++	-	+
Niveau de qualité produit exigeante	++	++	+	++	++	+	+	+	+
Besoin d'un diagnostic précoce	+			+	++				+
Spécifications très évolutives	+	+	+	+	+	+			

Figure 16: choix des méthodes - contraintes du projet

Une autre approche pour évaluer un critère est de déterminer les efforts ou moyens alloués au projet de conception d'un produit sur ce critère. Autrement dit, il est question de mesurer le niveau de considération de ce critère dans le projet plutôt que de tenter de directement mesurer le critère. Un moyen d'évaluer cette considération pour le critère est de compter le nombre de phases du projet dans lesquelles le critère est considéré.

Ce système de notation se présente ainsi :

- **0** : l'ergonomie n'est considérée dans aucune phase du projet
- **1** : l'ergonomie est considérée dans 1 phase du projet
- **2** : l'ergonomie est considérée dans 2 phases du projet
- **3** : l'ergonomie est considérée dans 3 phases du projet
- **4** : l'ergonomie est considérée dans 4 phases du projet
- **5** : l'ergonomie est considérée dans 5 phases du projet

Une variante possible de cet indicateur est d'attribuer des coefficients de pondération aux phases du projet. En effet, en fonction du projet, il est possible que la considération de l'ergonomie soit plus pertinente pour certaines phases.

Cette proposition d'indicateur se formule ainsi :

- **Phase 1** : Acquisition – Approvisionnement : Si ergonomie considérée : **A1**
- **Phase 2** : Développement – Analyse des exigences : Si ergonomie considérée : **A2**
- **Phase 3** : Développement – Conception architecturale : Si ergonomie considérée : **A3**
- **Phase 4** : Développement – Test de qualification : Si ergonomie considérée : **A4**
- **Phase 5** : Maintenance – fonctionnement : Si ergonomie considérée : **A5**

Ax : coefficient de pondération de la phase de projet x (les coefficients peuvent, par exemple, être compris en 0 et 10)

$$\text{Considération de l'ergonomie} = \frac{\text{Somme des score des phases considérées}}{\text{Somme des scores totale}}$$

Ce système de notation va de **0%** (ergonomie non considérée dans le projet) à **100 %** (ergonomie intégralement considérée dans le projet)

Exemple :

- **Phase 1** : Acquisition – Approvisionnement : Si ergonomie considérée : **5**
- **Phase 2** : Développement – Analyse des exigences : Si ergonomie considérée : **5**
- **Phase 3** : Développement – Conception architecturale : Si ergonomie considérée : **10**
- **Phase 4** : Développement – Test de qualification : Si ergonomie considérée : **2**
- **Phase 5** : Maintenance – fonctionnement : **10**

Supposons que l'ergonomie du produit soit considérée dans les phases 1 et 3, alors :

$$\text{Considération de l'ergonomie} = \frac{5 + 10}{5 + 5 + 10 + 2 + 10} = 47 \%$$

3.3 Qualité

La qualité est un des critères essentiels pour une innovation frugale. Un produit abordable mais de basse qualité sera souvent un produit dit « low-cost ». De plus, un produit de faible qualité sera généralement peu durable. A travers la notion de qualité, il est alors question de ne pas seulement répondre à un besoin mais de bien y répondre.

Selon l'Organisation Internationales de Normalisation (ISO) la qualité est « **l'aptitude d'un ensemble de caractéristiques intrinsèques à satisfaire des exigences** ». Plus précisément, la notion de qualité est défini ainsi par la norme ISO 8402 : « **l'ensemble des propriétés et caractéristiques d'un produit ou service qui lui confèrent l'aptitude à satisfaire des besoins exprimés ou implicites** ». Bien que

définie de la sorte, la notion de qualité reste relative voir subjective. En effet, La qualité d'une cigarette ne sera pas exprimée de la même manière par un fumeur, un médecin ou le marchand de tabac...

Sur le plan historique, la période d'entre deux guerres voit émerger les premiers contrôles statistiques (méthodes statistiques d'échantillonnage par lots, utilisation de tables) dont certains sont encore utilisés aujourd'hui. La qualité prend son réel essor dans les années 80 avec l'avènement de marchés de plus en plus concurrentiels dans lesquels la quantité seule ne permet plus d'assurer la pérennité d'une entreprise. On parle alors de « **qualité totale** » lorsque celle-ci est maîtrisée sur l'ensemble d'un processus et s'insère dans un mode de management (prévention, mesure, amélioration continue, maîtrise des processus). La qualité totale s'appuie sur :

Quatre concepts fondamentaux :

- Une définition : la conformité aux besoins
- Une norme : le zéro défaut (CROSBY, 1986)
- Une méthode : la prévention
- La mesure : la non-conformité se mesure

Trois principes de gestion

- L'engagement du management
- L'adhésion de tout le personnel
- L'amélioration rationnelle de la qualité

A partir de 1987, les normes internationales ISO 9000 (9001, 9002, 9003) mettent en place un système d'assurance de la qualité via un système de certification des entreprises.

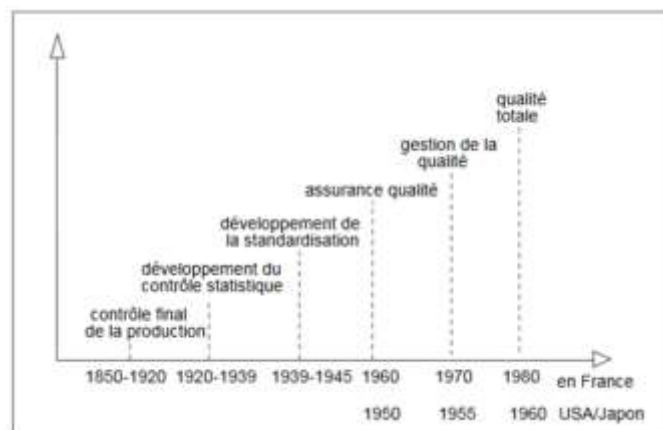


Figure 17: histoire de la qualité au niveau industriel

La qualité peut également être perçue à travers la satisfaction du client. En ce sens, la qualité existe lorsque les exigences de l'utilisateur sont satisfaites. La qualité peut alors être exprimée ainsi :

$$Q = \frac{P}{A}$$

Avec Q : qualité ; P : performance ou résultats ; A : attentes du client

Si $Q=1$ alors les attentes du client sont totalement satisfaites.

La qualité n'est donc pas la performance optimale mais le respect de la performance spécifiée (respect du cahier des charges ou conformité aux normes par exemple).

La qualité est intrinsèque au produit, elle n'est pas quelque chose de supplémentaire. Il faut donc la considérer et la mettre en place sur toute la phase de création du produit, sur l'ensemble du processus. L'amélioration continue, alimentée par la capitalisation de l'expérience, est une des clés d'un bon déploiement de la qualité au sein d'une entreprise.

3.3.1 Indicateurs pour le critère qualité

3.3.1.1 Performance

Un premier axe de qualité considéré dans cette étude est la notion de performance. **Un système est considéré ici comme performant s'il répond efficacement aux niveaux d'exigence des fonctionnalités qu'il propose.**

Ainsi, à partir des fonctions déterminées lors de l'analyse fonctionnelle, il est possible de fixer des exigences de performance pour chacune des fonctions.

Cette proposition d'évaluation se présente ainsi :

Fonction	Critère	Exigence
Fonction 1	Critère 1	> X
...
Fonction N	Critère N	< Y

Figure 18: Fonction / Critère / Exigence

Note : il est possible de déterminer plusieurs critères pour une même fonction.

Exemple :

Si le système étudié est une voiture, une des fonctions principales est de permettre à l'utilisateur de se déplacer. La performance de la fonction « se déplacer » peut, par exemple, être quantifiée à travers la vitesse de déplacement.

Fonction	Critère	Exigence
Se déplacer	vitesse	> 130 km/h

Figure 19: Exemple de critère et d'exigence pour une voiture

- **Intégration du poids fonctionnel des fonctions**

Un système doit être considéré comme globalement plus performant s'il atteint les niveaux d'exigences pour les fonctions les plus importantes. L'intégration du poids fonctionnel dans l'indicateur permet donc de tenir compte de ce paramètre.

Fonction	Poids fonctionnel	Critère	Exigence
Fonction 1	X1 %	Critère 1	> X
...
Fonction N	XN %	Critère N	< Y

Figure 20: Intégration du poids fonctionnel

Si plusieurs critères existent pour une même fonction, il est possible d'intégrer des sous-poids fonctionnels pour ces critères. La même méthode de hiérarchisation que pour les fonctions peut être utilisée pour hiérarchiser ses critères.

Fonction	Poids fonctionnel	Critère	Sous-poids fonctionnel	Exigence
Fonction 1	X1 %	Critère 1.1	X1.1 %	> X1
	
		Critère 1.M	X1.M %	>XM
...
Fonction N	XN %	Critère N.1	XN.1 %	< Y1
	
		Critère N.Z	XN.Z %	> YZ

Figure 21: Intégration des sous-poids fonctionnels

Ainsi, l'indicateur de performance est obtenu en sommant le produit des sous-poids fonctionnels des critères validant leur exigence avec le poids fonctionnel de leur fonction respective. Cet indicateur va de **0%** pour un système ne remplissant aucun des niveaux d'exigence à **100 %** pour un système les remplissant tous.

Il est possible d'approfondir ce système de notation en ne considérant pas une évaluation « binaire » de l'exigence (atteinte ou non atteinte) mais en tenant compte du « niveau d'atteinte » de ce critère car le niveau de performance d'un produit n'est pas le même si, pour un critère, il atteint 10% ou 90% du niveau d'exigence. On vient donc ajouter un niveau d'atteinte de l'exigence en pourcentage pour chaque critère (majorer à 100% si le niveau d'exigence est atteint)

Fonction	Poids fonctionnel	Critère	Sous-poids fonctionnel	Exigence	Niveau
Fonction 1	X1 %	Critère 1.1	X1.1 %	> X1	100 %
	
		Critère 1.M	X1.M %	>XM	60 %
...
Fonction N	XN %	Critère N.1	XN.1 %	< Y1	50 %
	
		Critère N.Z	XN.Z %	> YZ	100 %

Figure 22: Intégration du niveau d'atteinte de l'exigence

Ainsi, l'indicateur de performance correspond à la somme des produits du poids fonctionnel, du sous-poids fonctionnel et du niveau et va également de **0** à **100 %**

~~Note : Le système de hiérarchisation en poids fonctionnels peut aboutir à des valeurs à 0% dans le cas où une fonction ou un critère serait considéré comme moins important que tous les autres. Si cette fonction ou ce critère doit être considéré, il faut alors ajuster la notation en le considérant au moins « un peu plus important » qu'une autre fonction/critère.~~

3.3.1.2 Considération du critère à l'échelle du projet

Ici, un indicateur similaire à celui de l'ergonomie est proposé :

- **0** : la qualité n'est considérée dans aucune phase du projet
- **1** : la qualité est considérée dans 1 phase du projet
- **2** : la qualité est considérée dans 2 phases du projet
- **3** : la qualité est considérée dans 3 phases du projet
- **4** : la qualité est considérée dans 4 phases du projet
- **5** : la qualité est considérée dans 5 phases du projet

Version de l'indicateur avec pondération des phases :

- **Phase 1** : Acquisition – Approvisionnement : Si qualité considérée : **A1**
- **Phase 2** : Développement – Analyse des exigences : Si qualité considérée : **A2**
- **Phase 3** : Développement – Conception architecturale : Si qualité considérée : **A3**
- **Phase 4** : Développement – Test de qualification : Si qualité considérée : **A4**
- **Phase 5** : Maintenance – fonctionnement : Si qualité considérée : **A5**

$$\text{Considération de la qualité} = \frac{\text{Somme des score des phases considérées}}{\text{Somme des scores totale}}$$

Ce système de notation va de **0%** (qualité non considérée dans le projet) à **100 %** (qualité intégralement considérée dans le projet)

3.3.1.3 Le Net Promoter Score (NPF)

Le Net Promoter score est un indice de satisfaction du client basé sur la question suivante :

« **Recommanderiez-vous notre produit à quelqu'un ?** »

La personne questionnée doit ensuite évaluer la probabilité qu'elle recommande le produit sur une échelle allant généralement de 1 à 10.

Les évaluateurs donnant une note allant de 0 à 6 sont appelés : « **détracteurs** »

Les évaluateurs donnant une note allant de 7 à 9 sont appelés : « **passifs** »

Les évaluateurs donnant une note allant de 9 à 10 sont appelés : « **promoteurs** »

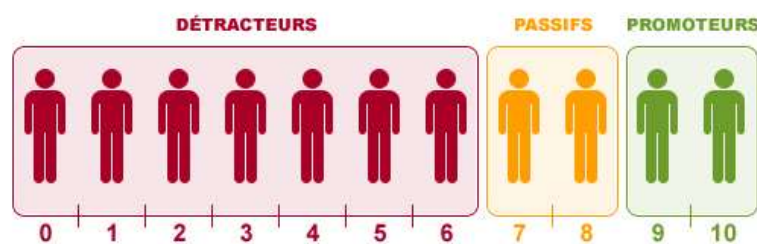


Figure 23: catégories du NPF

Le NET Promoter Score est ensuite calculé de la manière suivante :

Net Promoter Score = % Promoteurs - % Détracteurs

Cet indicateur propose donc une évaluation de la qualité à travers la satisfaction du client, on peut ainsi parler de **qualité perçue**.

Note : Pour appliquer cet indicateur il est important d'interroger un panel le plus représentatif possible.

3.3.1.4 AMDEC (analyse des Modes de Défaillance, de leurs effets et de leur criticité)

Cette méthode est un outil d'analyse prévisionnelle de la fiabilité permettant de recenser les modes de défaillances potentiels (causes et effets) et ainsi de prévoir, d'anticiper des actions correctives.

On peut distinguer trois types d'AMDEC :

- **L'AMDEC produit** : assure la fiabilité d'un produit en améliorant sa conception
- **L'AMDEC processus** : assure la fiabilité d'un produit en améliorant les opérations de production de celui-ci
- **L'AMDEC moyen de production** : assure la disponibilité et la sécurité d'un moyen de production en améliorant sa maintenance



Cette méthode ne représente pas directement un indicateur de mesure du niveau de qualité d'un produit mais constitue plutôt une démarche à mettre en œuvre afin d'assurer la qualité finale d'un produit au moment de sa conception et de sa production. Cependant, de la même manière que pour la considération du critère à travers les phases du projet, la présence d'une démarche d'AMDEC ou non lors de la conception d'un produit peut être perçue comme un indicateur de considération du critère.

Les 4 étapes de mise en place de la méthode (préparation, décomposition fonctionnelle, analyse, mise en place et suivi des plans d'actions) sont décrites dans [l'Annexe 5 : étapes de mise en place d'une AMDEC](#)

3.4 Modularité

La modularité est une notion qui revient régulièrement dans la littérature scientifique relative à l'innovation frugale. La modularité permet notamment une meilleure gestion des ressources car elle favorise la recyclabilité, la réparabilité, la maintenance et l'évolutivité (upgradability) d'un produit. De plus, la modularité peut également servir l'aspect fonctionnalité essentielle si le produit est conçu de manière à ce que le consommateur puisse adapter le choix de ses modules à son usage propre.

Dans un premier temps, une revue de la littérature scientifique a été réalisée afin de proposer une définition claire de la notion de modularité.

La définition la plus récurrente d'un produit dit « modulaire » est la suivante :

Un produit est dit « modulaire » lorsqu'il est constitué de modules. Ainsi, l'enjeu de la définition est de clarifier la notion de « module ».

Un module peut être considéré comme un sous-ensemble d'un système, une structure physique possédant une fonctionnalité définie.

Ces modules :

- Interagissent de façon minimale (sont peu couplés) avec le reste du système (Ces interactions peuvent être un échange d'énergie, d'information, de matériel ou encore une contrainte d'agencement spatial ([Pimmler et Epinger, 1994](#))).
- Sont démontables, séparables, accessibles
- Sont interchangeables, combinables
- Sont distincts les uns des autres et un maximum indépendants
- Ont une fonction clairement définie qui est réalisée au sein du module
- Présentent des interfaces clairement définies (standardisées)

• Un produit modulaire est issu d'une « conception orienté fonction ».

Dans la littérature scientifique, un produit non modulaire est dit « integral ». Ce terme sera traduit par « **intégrale** » dans ce rapport.

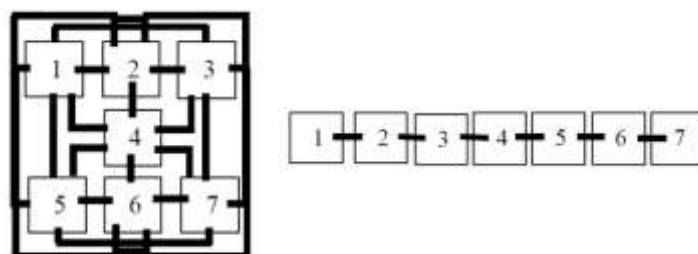


Figure 24: Système parfaitement intégrale (à gauche) et système parfaitement modulaire (à droite)

Bien souvent, les systèmes comportent des modularités de type « bus ». Une modularité est dite de type bus lorsqu'un module est fortement connecté aux autres modules qui sont eux-mêmes peu ou pas connectés entre eux.



Figure 25: modularité de type bus

Ainsi, la modularité facilite :

- ✓ L'évolutivité (l'upgradability)
- ✓ La recyclabilité
- ✓ La réparabilité
- ✓ La maintenance
- ✓ La flexibilité de la production

•

La modularité architecturale permet souvent de faciliter la **modularité d'usage** qui consiste à faciliter la diversification de l'usage de l'utilisateur. La modularité architecturale ou « hardware » doit aussi être distinguée de la **modularité logicielle ou « software »** qui vise à proposer une flexibilité dans l'usage de logiciels et qui relève donc plus de la programmation que de l'architecture du produit.

La modularité peut également permettre la réduction des coûts de développement sur du long terme car de nouvelles générations peuvent être créées en remplaçant ou en ajoutant de nouveaux modules. Les temps d'assemblage réduits peuvent également représenter une source d'économie non négligeable sur des volumes de production importants. La modularité peut aussi contribuer à une standardisation des modules si suffisamment d'acteurs développent des produits comportant des modules identiques et ainsi contribuer à une réduction du prix de revient sous l'effet de l'économie d'échelle.

Ce critère peut donc contribuer positivement aux critères de frugalité « écologique », « économie circulaire » en favorisant la recyclabilité, la réparabilité et « fonctionnalités essentielles » en permettant une offre de modules adaptée au besoin.

[J.K. Gershenson, G. P. \(2003\); J.K. Gershenson, G. P. \(2004\); Pimmler, U., & D.Eppinger. \(1995\); Whitney. \(2003\); B.Jeffrey, K. N. \(2001\); Z. Siddique, D. \(1999\)](#)

• **La modularité pour une box**

Pour une box, la modularité se décline en 4 types :

- Modularité sur le circuit imprimé
- Modularité via des modules internes
- Modularité via des modules externes connectables
- Modularité via des équipements externes indépendants

▪ **Modularité sur le circuit imprimé :**

Ce type de modularité décrit des emplacements optionnels placés sur le circuit intégré.



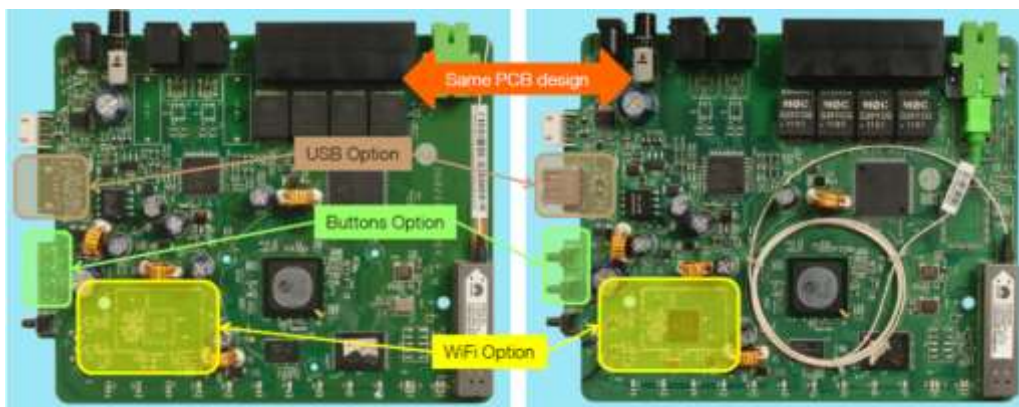


Figure 26: modularité sur le circuit imprimé

Ce type de modularité est notamment utile dans le cas d'une production d'une gamme de produit basés sur le même design. Dans ce cas, cette modularité peut générer une économie d'échelle.

- **Modularité via des modules internes**

Dans ce cas, des modules internes (petits circuits intégrés par exemple) sont implémentés sur la carte mère.

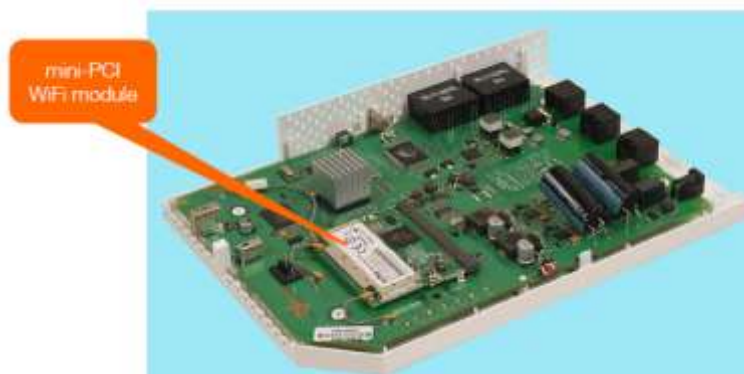


Figure 27: Exemple de module interne

Ce type de modularité permet de palier à des incompatibilités entre un bloc fonctionnel et le circuit intégré principal, d'utiliser un module temporairement lorsqu'une technologie est amenée à évoluer rapidement ou de faciliter le développement en utilisant le module comme référence lors de la conception d'une nouvelle architecture de carte mère.

- **Modularité via des modules externes connectables**

Dans ce cas, la conception de la box (carte mère et coque extérieure) est prévue pour pouvoir intégrer un module extérieur via une interface dédiée (clé USB par exemple).



Figure 28: module externe connectable

- **Modularité via des équipements externes indépendants**

Ce type de modularité se différencie de la précédente du fait que l'élément extérieur connectable est plus indépendant, possède sa propre fonctionnalité. Il s'agit, par exemple, du cas du femtocell. Le femtocell est un boîtier connectable à la box qui permet d'améliorer la réception et l'émission de données pour les GSM. Dans ce cas, la modularité de la box réside dans sa compatibilité avec l'équipement (fonctionnement et interface).

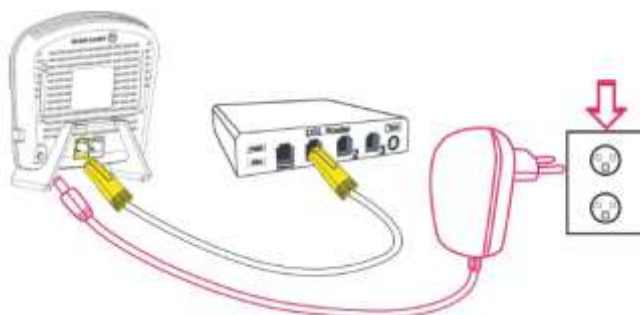


Figure 29: module externe indépendant : le femtocell

3.4.1.1 Indicateurs pour le critère modularité

Cette section expose différentes méthodes d'évaluation présentées dans la littérature scientifique (1998-2007). Les méthodes présentées proposent une évaluation de la modularité basée sur le degré de couplage des modules (intra ou/et inter-modules).

Chacune de ces méthodes est basée sur l'utilisation d'une matrice dite DSM (Design matrix). Une matrice DSM est un outil permettant de représenter les interactions entre les différents modules d'un système. Une matrice DSM est composée d'un nombre de lignes et de colonnes équivalent au nombre de modules du système. Si le module 1 est connecté au module 2, alors l'emplacement correspondant à l'intersection de la ligne 1 (module) et la colonne 2 (module) prend la valeur de 1 (la matrice est donc symétrique). S'il n'y a pas d'interaction entre deux modules, la valeur est de 0. On peut également remplacer les « 1 » par des points et les « 0 » par des vides afin d'obtenir une représentation plus visuelle (cas des exemples ci-dessous).

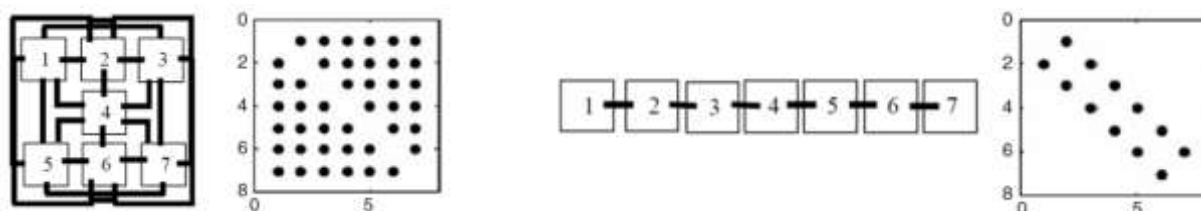


Figure 30: DSM pour un système intégrale (à gauche) et un système très modulaire (chaîne) (à droite)

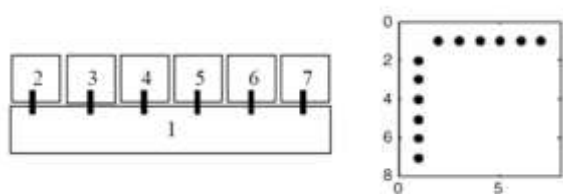


Figure 31: DSM pour un système de type bus

Note : la diagonale d'une DSM est toujours composée de 0 (ou de vide) car un module n'est jamais connecté à lui-même (il s'agit d'une connexion intra et non inter-modulaire dans ce cas).

• Méthodes évaluées

Les étapes de calcul de chaque méthode sont décrites dans [l'Annexe 6 : méthodes de calcul \[1998-2007\] – modularité](#)

Les méthodes évaluées sont les suivantes :

[Guo et Gershenson \(2003\)](#) : méthode basée sur le **ratio entre le nombre de connections intra-modulaires (au sein d'un même module) et le nombre de connections inter-modulaires (entre différents modules)** (« $M_{H\&K}$ »)

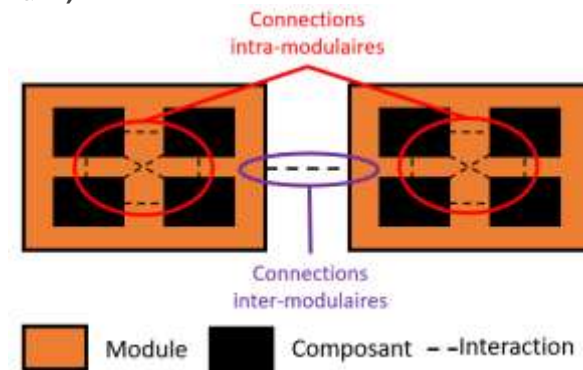


Figure 32: connections inter et intra-modulaires

[Allen and Carlson-Skalak \(1998\)](#) : méthode basée sur le **ratio entre le nombre d'interactions entre modules et le nombre de modules** (« **Interactions** »)

[Newcomb et al. \(1998\)](#) : méthode basée sur le **ratio entre le nombre d'interactions adjacentes à la diagonale de la DSM et le nombre total d'interactions** (« **cluster indépendance (CI)** »).

[Guo and Gershenson \(2003\)](#) : méthode basée sur le **ratio entre le nombre d'interactions inter-modulaires et le nombre d'interactions dans la DSM (inter-modulaires donc)** (« **MS** »)

[Whitney et al. \(1999\)](#) méthode basée sur le **ratio entre le nombre d'interactions dans la DSM (inter-modulaires) et le nombre de composants du système** (« **WI** »)

[Guo and Gershenson \(2004\)](#) : méthode basée sur **une relation entre le nombre d'interactions intra et inter-modulaires et le nombre de modules total** (« $M_{G\&G}$ »)

[Yu et al. \(2007\)](#) : méthode basée sur le **niveau d'informations nécessaires à la description de la matrice** (« **The Minimum Description Length (MDL)** »)

[Holtta-Otto et De Weck \(2007\)](#) : méthode basée sur l'**évaluation du degré de couplage interne d'un système** (« **SMI (Singular value modularity index)** »)

[Mattson and Magleby \(2001\)](#) : Méthode simple calculé à partir du ratio entre le nombre de modules et le nombres de fonctions du système

3.4.1.1.1 Evaluation des méthodes

[En 2012, Hölta-Otto & Suh](#) ont réalisé un recensement et une évaluation des méthodes d'évaluation de la modularité d'un produit ou système. Les méthodes précédemment présentées sont incluses dans leur étude.

Ces méthodes utilisent exclusivement des matrices binaires. Il est possible d'utiliser des matrices non binaires visant à qualifier plus précisément la nature des interactions ([Holtta and Otto 2005](#), [Clarkson et al \(2004\)](#), [Sharman et Yassine 2007](#) par exemple). Ces matrices sont cependant complexes à utiliser et ajoute un niveau d'interprétation supplémentaire.

Dans une première phase, la fiabilité des méthodes est évaluée à travers d'un ensemble de facteurs variables :

- La taille de la DSM composants (nombre de colonnes ou de lignes)
- Nombre de modules (taille de la DSM modules)
- Type de modularité
- Présence d'un bus
- Connectivité intra-modules

Ainsi, une méthode idéale est dépendante du type de modularité et indépendante des autres facteurs.

Ces facteurs sont utilisés selon les variations suivantes :

Facteur	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
Taille DSM composants	petite	grande	X
Nombre de modules	peu	beaucoup	X
Type de modularité	modulaire	intermédiaire	intégral
Bus	pas de bus	petit bus	bus
Connectivité intra-modules	peu dense	dense	X

Figure 33: Variation des facteurs

Remarque : l'article ne précise pas les valeurs représentées par les différents niveaux.

Ces facteurs sont combinés avec une méthode statistique dite « fractional factorial D-Optimal design ». Cette méthode statistique permet de générer 24 matrices distinctes qui serviront de données d'entrées pour l'évaluation des méthodes.

Facteur	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
Taille DSM composants	petite	grande	X
Nombre de modules	peu	beaucoup	X
Type de modularité	modulaire	intermédiaire	intégral
Bus	pas de bus	petit bus	bus
Connectivité intra-modules	peu dense	dense	X

Figure 34: Exemple de combinaison

Chaque méthode est ensuite testée avec ces 24 matrices puis les résultats sont comparés avec des résultats supposés connus pour les matrices triviales suivantes :

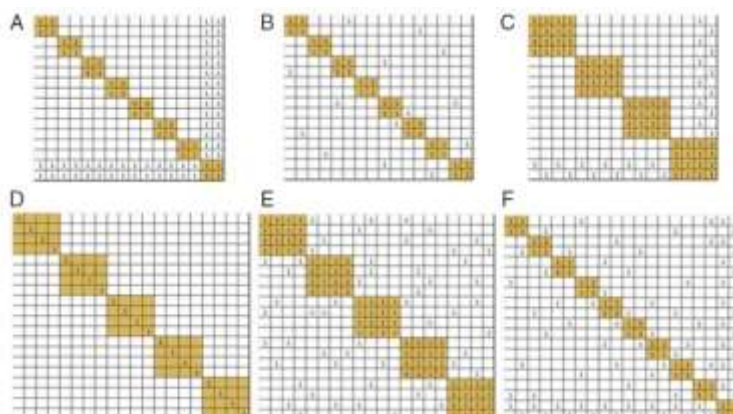


Figure 35: Matrices triviales de référence

	Taille DSM	Nb modules	type modularité	Bus	interactions intra-modules
A	Petite	Beaucoup	Modulaire	Bus	Dense
B	Petite	Beaucoup	Intermédiaire	Pas de bus	Dense
C	Petite	Peu	Modulaire	Petit bus	Dense
D	Grande	Peu	Modulaire	Pas de bus	Peu dense
E	Grande	Peu	Intégral	Pas de bus	Dense
F	Grande	Beaucoup	Intégral	Petit bus	Dense

Figure 36: Représentation des matrices triviales selon les facteurs

- **Résultats**
- **Analyse factorielle**

L'analyse factorielle est réalisée via l'utilisation de valeur-p. La valeur-p d'un résultat mesure la probabilité d'obtenir un résultat de probabilité égale ou inférieur à ce résultat et permet ainsi d'évaluer la fiabilité de ce résultat.

Dans cette étude, une méthode est considérée comme dépendante d'un facteur **si sa valeur-p pour ce facteur est < 0,05**.

Factor	Metric							
	CI	Inter- actions	$M_{H\&K}$	WI	M_S	$M_{G\&G}$	MDL	SMI
DSM size	0.09	<0.0001	0.75	<0.0001	0.19	0.60	0.02	0.55
Number of modules	<0.0001	<0.0001	0.04	0.17	<0.0001	0.06	0.42	0.54
Modular-integral	0.001	0.50	0.10	0.002	0.004	0.02	<0.0001	0.88
Bus	0.002	0.01	0.06	0.92	0.007	0.0499	0.0006	0.18
Intramodule connectivity	<0.0001	0.22	0.005	0.08	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.12
DSM density	0.007	0.43	0.57	<0.0001	0.01	0.70	0.49	0.07

Note: p -Values for each factor, bold if significant ($\alpha = 0.05$).

Figure 37: résultats valeur-p avec bus

Note : le facteur « DSM density » est ajouté dans cette phase de l'étude. Il est également souhaitable que la méthode ne soit dépendante de ce facteur.

Les valeurs-p des méthodes ont également été évaluées sans tenir compte du facteur « bus » afin de tenir compte du fait que certaines méthodes n'ont pas été développées en y tenant compte.

Factor	Metric							
	CI	Inter- actions	$M_{H\&K}$	WI	M_S	$M_{G\&G}$	MDL	SMI
DSM size	0.92	<0.0001	0.91	0.14	0.67	0.53	0.52	0.04
Number of modules	0.57	<0.0001	0.63	0.93	0.006	0.04	0.006	0.43
Modular-integral	0.048	0.99	0.25	0.40	<0.0001	0.41	0.0002	0.53
Intramodule connectivity	0.002	0.30	0.051	0.97	<0.0001	0.0001	<0.0001	0.008
DSM density	0.11	0.83	0.24	0.002	0.0001	0.50	0.0009	0.02

Note: p -Values for each factor, bold if significant ($\alpha = 0.05$).

Figure 38: résultats valeur-p sans bus

Ainsi, un résultat idéal satisfaisant pour une méthode serait :

Facteur	p-value
Taille DSM composants	$p > 0,05$
Nombre de modules	$p > 0,05$
Type de modularité	$p < 0,05$
Bus	$p > 0,05$
Connectivité intra-modules	$p > 0,05$
Densité DSM	$p > 0,05$

Figure 39: p-value souhaitées pour une méthode

Les résultats de l'étude peuvent ainsi être représentés de la manière suivante :

Facteur	CI	Interactions	M H&K	WI	MS	M G&G	MDL	SMI
Taille DSM composants								
Nombre de modules								
Type de modularité								
Bus								
Connectivité intra-modules								
Densité DSM								

Figure 40: Résultat analyse factorielle avec facteur bus

Facteur	CI	Interactions	M H&K	WI	MS	M G&G	MDL	SMI
Taille DSM composants								
Nombre de modules								
Type de modularité								
Connectivité intra-modules								
Densité DSM								

Figure 41: Résultat analyse factorielle sans facteur bus

■ : dépendant du paramètre type de modularité ou indépendant des autres paramètres
■ : indépendant du paramètre type de modularité ou dépendant des autres paramètres
 Cette représentation est un premier niveau d'analyse, idéalement il faudrait également tenir compte du **degré de dépendance** des méthodes aux différents facteurs.

- **Interprétation :**

Avec le facteur bus, 4 méthodes tiennent compte du type de modularité : CI, WI, MS et MDL.
 Sans le facteur bus, 3 méthodes en tiennent compte : CI, MS et MDL.
 On peut déjà considérer les méthodes non dépendantes du type de modularité comme insatisfaisante.
 Pour celles qui en tiennent compte, il est important de considérer qu'elles sont également dépendantes d'autres facteurs et ne sont donc pas pleinement satisfaisantes.

- **Etude de la corrélation des résultats**

Dans cette phase d'étude, **seules les méthodes dépendantes du type de modularité sont étudiées**.
 L'étude de corrélation consiste en l'analyse de la similitude des résultats d'une méthode à une autre en évaluant une même matrice. Les résultats pour les 24 matrices précédemment générées sont ainsi comparés :

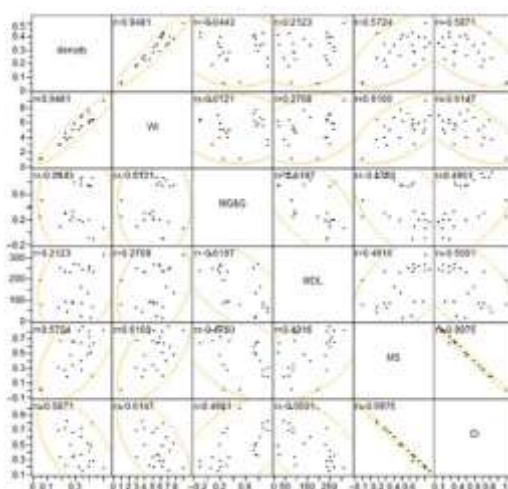


Figure 42: corrélation entre les méthodes

On remarque que les résultats des différentes méthodes étudiées sont globalement peu corrélés (une corrélation parfaite correspond à $r = 1$, plus le nuage de points est dispersé, moins la corrélation des

résultats est bonne). A noter que les méthodes MS et CI présentent une excellente corrélation de leurs résultats.

CONCLUSION

A ce stade (2012), aucune méthode d'évaluation de la modularité à travers le degré de couplage ne semble pleinement satisfaisante. La méthode MDL semble être la plus suffisante sur le plan de la considération d'un bus dans la structure du système. Les méthodes MS, CI et M G&G présentent des résultats corrects pour des systèmes sans bus. Cependant, la plupart des systèmes intègrent des structures de type bus, leur pertinence est donc limitée. De plus, la notion de bus reste encore à être définie clairement.

Il est important de considérer que seules des méthodes basées sur des DSM symétriques et binaires sont étudiées et comparées dans cet article, il n'est pas exclu que des méthodes d'évaluation basées sur des DSM plus complexes existent dans la littérature avant la parution de cet article et présentent des résultats satisfaisants. La méthode suivante, issu d'un article paru ultérieurement présente une méthode d'évaluation basée sur des DSM non binaires.

3.4.1.1.2 Méthode d'évaluation la plus récente

La méthode d'évaluation de la modularité la plus récente est la plus complète présente à ce jour dans la littérature est celle de [\(Jung, 2017\)](#). Cette nouvelle méthode tien compte notamment :

- De la **force des connections** intra et inter-modules
- De la **densité des connections** intra et inter-modules
- (Plus la force et la densité de connection entre deux modules est importante, plus la dépendance entre ces deux modules est élevée)
- De la proximité des interactions avec la diagonale de la DSM
- De la densité des connections entre les bus et les autres composants.

•
Les DSM utilisées dans cette méthode représente les connections entre les composants. Les modules sont délimités par des carrés noirs.

Par exemple, les DSMs suivantes mettent en évidence deux systèmes avec 3 modules identiques dont la force de connection avec les autres composants est identique mais la densité de connections est différente.

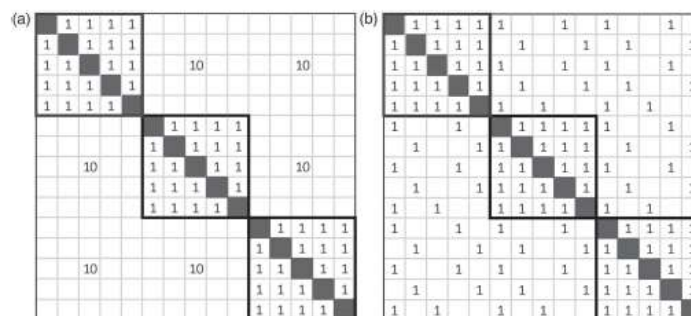


Figure 43: intensité et nombre de connections

De plus, cette méthode peut servir d'outil d'aide à la conception d'un produit modulaire à travers l'optimisation de la DSM et donc de l'agencement des modules.

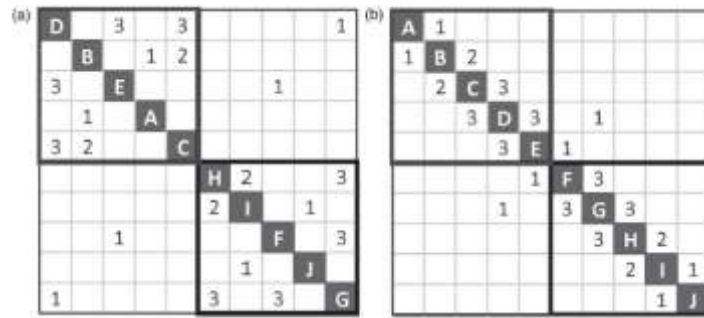


Figure 44: exemple de réorganisation d'une DSM

Dans l'exemple ci-dessus, un réagencement d'une matrice DSM est proposé. Ce réagencement ne modifie pas la force de connection entre les modules mais permet d'intervenir sur la proximité des interactions.

Une étude de [Asikoglu \(2012\)](#) a permis de mettre en évidence que 85% des interactions sont réalisés entre deux modules de proximité directe à travers une analyse 21 produits électroniques.

A noter que les auteurs ne proposent pas de méthode d'évaluation de la force des interactions. Du fait qu'il n'existe pas encore de standardisation des forces de connection, **un système de notation adapté à chaque système doit être effectué en amont de l'application de la méthode.**

La méthode d'évaluation du niveau de modularité (MI pour « Modularity Index») s'exprime ainsi :

$$MI = w_1 MI_1 + w_2 MI_2 + w_3 MI_3,$$

$$\text{where } MI_1 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n_m-1} \sum_{j=i+1}^{n_m} ((BS_{ij}/WS_i) + (BS_{ij}/WS_j) + (BC_{ij}/WC_i) + (BC_{ij}/WC_j))}{2n_m(n_m - 1)}$$

$$MI_2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_m} WC_i + n_c}{\sum_{i=1}^{n_m} (q_i - p_i + 1)^2},$$

$$MI_3 = \frac{\sum_{i=1}^{n_c-1} \sum_{j=i+1}^{n_c} ((1 - (j-i)/(n_c - 1))(R_{ij} + R_{ji})/R_{max})}{\sum_{i=1}^{n_c-1} \sum_{j=i+1}^{n_c} (R_{ij} + R_{ji})/R_{max}},$$

$$w_1 + w_2 + w_3 = 1, \quad 0 \leq w_i \leq 1.$$

Avec :

n_m : nombre de modules

n_c : nombre de composants

p_i : indice du premier composant du $i^{ème}$ module

q_i : indice du dernier composant du $i^{ème}$ module

w_i : facteur de pondération pour MI_i

WS_i : somme des valeurs de force d'interaction dans le module i

WC_i : nombre de connection au sein du module i

BS_{ij} : somme des valeurs de force d'interaction entre les modules i et j

BC_{ij} : nombre de connections entre les modules i et j

R_{ij} : valeur pour la $i^{ème}$ ligne et $j^{ème}$ colonne de la DSM

R_{max} : valeur de force d'interaction maximum de la DSM

Cet indice de modularité est une somme de trois facteurs pondérés : MI_1 , MI_2 et MI_3 . Cette méthode présente ainsi également le bénéfice de pouvoir modifier la valeur des facteurs de pondération et ainsi de gagner en flexibilité sur la mesure. A noter que cette méthode présente également l'intérêt d'être indépendante de la taille de la DSM (contrairement à certaines des méthodes vues précédemment)

La valeur de MI est comprise entre 0 (pire score) et 1 (meilleur score). Les valeurs MI_x sont également comprises entre 0 et 1.

MI_1 mesure le niveau d'indépendance de chaque module. BS_{ij}/WS_i représente le rapport entre la force des connections intra-modules pour le module i et la force des connections inter-modules entre le module i et le module j . BC_{ij}/WC_i est un rapport similaire mais qui tient compte du nombre de connections et non de la force de ces connections. MI_1 permet donc d'évaluer le niveau de dépendance d'un module en comparant le nombre et la force des connections intra-modulaires au nombre et la force des connections inter-modulaires. MI_1 est généralement compris entre 0 et 1 mais peut éventuellement avoir une valeur négative si le degré de connection intra-modulaire est inférieur au degré de connection inter-modulaire.

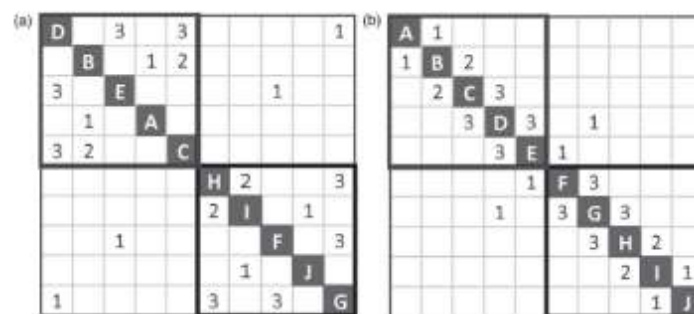


MI2 évalue le degré d'interactions entre les composants au sein d'un module. Cet indice est donc un indice d'évaluation de modularité intra-modulaire. MI1 et MI2 ne sont pas tout à fait indépendants mais MI2 permet de palier à une valorisation de MI1 à travers la création de modules de taille importantes qui minimiserait les connexions inter-modulaires sans pour autant densifier les connexions intra-modulaires. La combinaison de MI1 et MI2 vise ainsi à trouver un compromis entre connexion intra et inter-modulaires.

MI3 est le facteur qui tient compte de la proximité des interactions avec la diagonale de la DSM (plus les interactions sont proches de la diagonale, plus MI3 est proche de 1). Ce facteur propose ainsi une évaluation de l'agencement spatial du système en permettant de mieux visualiser les relations entre les différents composants et modules. Ce facteur constitue donc plus une aide à la conception modulaire qu'un indice de modularité. **Il est alors recommandé de prendre un facteur w_3 égal à 0 si une seule une évaluation du niveau de modularité d'un système est souhaitée.**

- **Exemple d'application**

En reprenant l'exemple suivant



Nous avons :

nm	2
nc	10
w1	0,5
w2	0,5
WS1	9
WS2	9
WC1	4
WC2	4
BS12	2
BC12	2
Rmax	3

(Avec ici : $w_1=w_2=0.5$, $w_3=0$)

Nous obtenons ainsi :

$$MI1 = 1 - \frac{\left(\frac{2}{9} + \frac{2}{9} + \frac{2}{4} + \frac{2}{4}\right)}{2.2(2-1)} = 0.64 ; \quad MI2 = \frac{(4+10) + (4+10)}{(5-1+1)^2 + (10-6+1)^2} = 0.56$$

$$MI = 0.5 \cdot 0.64 + 0.5 \cdot 0.56 = \mathbf{0.6}$$

3.4.1.1.2.1 Evaluation pour des architectures de type bus

Un indice de modularité modifié est proposé pour des architectures comprenant des modularités de type bus.

$$\begin{aligned} MI'_2 &= \frac{\sum_{i=1}^{n_m} WC_i + \sum_{i=1}^{n_m-1} BC_{i,n_m} + n_c}{\sum_{i=1}^{n_m} (q_i - p_i + 1)^2 + 2q_{n_m-1}(q_{n_m} - p_{n_m} + 1)}, \\ MI'_3 &= \frac{\sum_{i=1}^{n_c-n'_c-1} \sum_{j=i+1}^{n_c-n'_c} ((1 - (j - i)/(n_c - n'_c - 1))(R_{ij} + R_{ji})/R_{\max})}{\sum_{i=1}^{n_c-n'_c-1} \sum_{j=i+1}^{n_c-n'_c} (R_{ij} + R_{ji})/R_{\max}}, \end{aligned}$$


Avec : n_c : nombre de composants dans le « module bus »

A noter que l'article ne propose pas de définition précise d'un bus, cette appréciation peut se faire de manière visuelle à travers l'analyse de la DSM.

[illegible]

En reprenant les facteurs de l'étude précédente, on constate que **le nouvel indicateur MI permet de satisfaire l'intégralité des facteurs**. En effet, cette méthode a été construite en tenant compte des faiblesses des méthodes précédentes et est ainsi basée sur une évaluation indépendantes de ces facteurs à travers la seule considération des connections intra et inter-modulaires pour chacun des modules.

Incontournable sur la scène actuelle de la modularité, le fairphone est un smartphone dont la conception a été pensée de façon modulaire dans une logique de réparation. En effet, la plupart des composants sont très facilement accessibles car ce smartphone est très facilement démontable. De plus, chaque bloc de composants peut être commandé individuellement et remplacé via le site de l'entreprise.

Innovation Frugale – Rapport Technique - CONFIDENTIEL | PAGE 40 

- **Les maisons container**

Ce type de maison aujourd'hui développées par diverses entreprises à travers le monde propose une conception modulaire de l'habitat à travers un agencement de conteneurs (souvent des conteneurs maritimes en fin de vie remis en état). Dans ce type d'architecture, les conteneurs sont donc les modules de l'architecture.



Figure 47: Maisons container

- **L'aspirateur Rowenta Air Force**

Ce modèle d'aspirateur est entièrement composé de modules facilement démontables et accessibles.



Figure 48: Rowenta Air Force

3.5 Prix

Le prix reflète la notion d'abordabilité intrinsèque à la notion d'innovation frugale. Une innovation frugale se veut inclusive et doit donc être accessible aux personnes les plus modestes (Bottom of the Pyramid). Le prix est un indicateur facilement quantifiable. Cependant, considéré la notion de prix d'un produit dans l'absolu n'a peu de sens. Afin qu'un produit soit considéré comme abordable, il faut donc le comparer à des produits similaires (même unité fonctionnelle).

L'indicateur suivant est alors proposé :

$$\text{Abordabilité} = \frac{\text{Prix du produit}}{\text{Prix moyen du marché pour ce type de produit}}$$

Ainsi, si cet indicateur est >1 alors le produit est considéré comme non frugale et **plus l'indicateur est proche de 0 plus le produit est considéré frugal** pour le critère du prix.

Note : il est ici question du prix d'acquisition du produit pour le consommateur. Ce prix inclut donc l'ensemble de la chaîne de valeur du produit

3.6 Empreinte environnementale

L'empreinte environnementale s'insère dans la logique de durabilité/soutenabilité de l'innovation frugale. Ce critère permet notamment de quantifier l'efficacité du produit en termes de gestion des ressources.

Concernant cet indicateur, l'unique méthode actuelle permettant de considérer globalement l'impact environnemental d'un produit est **l'analyse de cycle de vie**. En effet cette méthode permet de considérer les impacts environnementaux d'un produit sur l'ensemble de son cycle de vie et sur de nombreuses catégories d'impact. La contrepartie de l'exhaustivité de cette méthode est qu'elle nécessite beaucoup d'informations et donc bien souvent beaucoup de temps pour être appliquée. Il est cependant possible de simplifier la méthode en se consacrant uniquement à l'étude de certaines phases de vie et/ou de certaines catégories d'impact (à déterminer au cas par cas donc).

Si une ACV standard n'est pas réalisable, il existe des méthodes qualitatives plus simples et plus rapides à mettre en place. En voici quelques exemples :

- **ESQCV (Evaluation Simplifiée et Qualitative du Cycle de Vie)**

Cette méthode permet de donner une appréciation qualitative de l'impact d'un produit/service pour chacune de ses phases de vie et pour chaque catégorie d'impact mise à l'étude.

	Extraction des matières premières	Production	Distribution	Utilisation	Fin de vie
Pollutions et déchets: quantité, toxicité	?	□	**	0	*
Epuisement des ressources naturelles: quantités utilisées, origine renouvelable ou non, ressources abondante ou rare	□	□	*	□ + ** ? 0	déductible favorable très favorable absence de données sans objet ?
Bruits, odeurs, atteinte à l'esthétique	□	?	*	**	?

Figure 49: ESQCV

Note : les catégories d'impact présentées ici sont un exemple, il est évidemment possible de sélectionner celles de son choix.

- **Matrice MET (Matériaux, Energie, Toxicité)**

Cette méthode a pour objectif de déterminer les flux de matières (quantité et nature), les flux d'énergie (nature et quantité) et la toxicité des rejets (quantité et toxicité) sur chaque phase de vie du produit.

Étapes du cycle de vie	Catégories d'impacts		
	Matières (Input et Output)	Energies (Input et Outputs)	Toxicité rejets (Output)
Extraction de matières premières	Nature et quantité		
Production et autres opérations			
Distribution du produit			
Utilisation du produit			
Fin de vie du produit			

Figure 50: Matrice MET

- **Grille ADEME**

Cette méthode permet de mettre en évidence les **axes d'amélioration** d'un produit/service en termes d'impact environnemental pour des catégories données (appelées « rubriques écologiques ») et pour chaque phase de vie de ce produit/service.

Rubriques écologiques	N°	Sous-rubriques	Extrait MF	Prod matériaux	Fab produit	Utilisation	Élimination	Transport et entrepos
Énergie	1	Remover	X			X		
	2	Non remove						
MF	3	Remover						
	4	Non remove						
	5	Remover						
Émissions / impacts	6	Acidif						X
	7	Eutroph						
	8	El sans						
	9	Couche ozone						
Déchets	14	C I						
	15	C II						
Durabilité	23	Durée vie techno						
	24							

Figure 51: Grille ADEME

Il existe encore de nombreuses autres méthodes et outils proposant une évaluation environnementale simplifiée (en fonction du type de produit, de la catégorie d'impact...) et il n'est donc pas possible d'en faire une liste exhaustive ici.

Dans le cadre de ce projet, aucun indicateur spécifique n'est donc proposé pour ce critère qui est déjà maîtrisé en interne. La méthode du **circularity score** permet notamment de considérer un large éventail des enjeux environnementaux d'un équipement électronique.

3.7 Consommation d'énergie

La consommation d'énergie permet à la fois d'agir sur le critère « prix » et le critère « empreinte environnementale ». Cependant, du fait de sa pertinence pour un produit électronique, ce critère est traité indépendamment dans cette étude.

Il est bien évidemment possible de quantifier la consommation d'énergie d'un produit car il suffit de la mesurer directement. Cependant cette mesure demeure absolue est donc peu représentative. Un autre indicateur quantitatif est le rendement énergétique d'un système.

Le rendement énergétique d'un système se formule ainsi :

$$\text{Rendement énergétique} = \frac{\text{Énergie utile fournie par le système}}{\text{Énergie consommée par le système}}$$

Note : Il faut comparer ces deux énergies sur le même laps de temps, il s'agit donc en réalité d'un rapport de puissance. Cependant la notion de « puissance consommée » n'est pas correcte, on pourrait parler dans ce cas de puissance à l'entrée du système et de puissance à la sortie du système.

Dans le cas d'un radiateur électrique par exemple, le rendement énergétique est de 1 car l'intégralité de l'énergie consommée (l'électricité) est convertie en chaleur (« énergie utile ») via les pertes joules.

Si l'on prend l'exemple d'une voiture, le rendement énergétique peut se traduire par le rapport entre l'énergie cinétique générée (l'utilité d'une voiture étant de se déplacer) et l'énergie potentielle contenue dans la quantité de carburant consommée sur le déplacement considéré. Dans ce cas, le rendement énergétique est inférieur à 1 car il y a des pertes sur toute la chaîne de transmission de puissance (échappement de gaz chauds, dissipation thermique dans les pièces mécaniques, frottements au sol, frottements de l'air...)

Le rendement énergétique est donc fonction des déperditions énergétiques du système.

Cependant, on ne peut considérer cet indicateur comme un indicateur généralement applicable à tout produit dans notre étude. En effet comparer le rendement énergétique d'un radiateur avec une voiture aurait peu de sens, on peut seulement comparer deux produits fournissant le même travail, la même utilité.

Dans les cas de la box, d'autres indicateurs sont proposés dans la section « cas d'étude »

Note : La notion de rendement est souvent confondue avec celle d'efficacité. L'efficacité énergétique est une valeur théorique mesurée par le rapport entre la puissance utile d'un système et la puissance théorique maximale de ce système.

3.8 Indicateurs non traités

Adaptabilité : Ce critère désigne la capacité d'un produit à s'adapter à des utilisations et des environnements divers. Ce critère est donc très ouvert est difficile à évaluer globalement. Un moyen de le mesurer serait de faire une série de tests sur un produit en faisant varier des paramètres environnementaux (température, humidité, poussière...) et en le soumettant à des utilisations diversifiées (protocoles à établir avec des ergonomes).

De plus, la partie robustesse du circularity score permet d'évaluer en partie ce critère.

A noter également que ce critère peut être contradictoire avec celui de fonctionnalités essentielles dans le sens où un produit proposant une multitude de fonctions peut être considéré comme adaptable.

Faisabilité : Il est ici question de faisabilité technique, de reproductibilité des processus de fabrication d'un produit. Ce critère s'insère dans une vision plus macroscopique de l'innovation frugale dans le sens où celle-ci doit pouvoir facilement être déployée dans différents lieux (pays par exemple) et ainsi intégrer une logique de production plus localisée (emploi local, ressources locales). Il est également question d'éviter qu'une entreprise possède un trop gros monopole de l'innovation frugale en question à travers une technologie, des processus de pointe uniquement maîtrisés en interne.

Il est donc difficile de quantifier la faisabilité de manière globale, une expertise sur la production ou les processus est requise pour approfondir ce critère.

Portabilité : La notion de portabilité est mentionnée dans un article traitant de l'innovation frugale. Ce critère s'insère à la fois dans la logique d'adaptabilité (le produit peut être utilisé dans diverses endroits) et dans une logique d'économie des ressources dans le sens où une version portable d'un produit peut facilement être déplacée et donc prêtée. En quelque sorte, la portabilité peut contribuer à une meilleure mutualisation des ressources.

Développer un indicateur de portabilité aurait cependant peu de sens car soit un produit est portable, soit il ne l'est pas. Le degré de facilité à déplacer le produit (taille, poids, préhension) pourrait certes être étudié mais ce critère a été considérée comme trop spécifique pour être approfondi dans cette étude.

4 Cas d'étude : la livebox 4

4.1 Présentation de la livebox 4

La livebox 4 est sortie début 2016 et possède les caractéristiques suivantes :

- 4x4 antennes wifi
- Connectivité internet : ADSL2, VDSL2, FTTH
- Connectivité réseau local (LAN) : 4 ports Ethernet
- Connectivité téléphonie : 1 port FXS
- Connectivité USB 2 ports USB 3.0



Figure 52:

Livebox 4

4.2 Fonctionnalités essentielles

Avec deux membres de l'équipe Orange (Mikko Samuli VAIJA, expert ACV et économie circulaire et tuteur de ce projet et Marcel VILLANUEVA, doctorant travaillant sur le sujet de l'évaluation des impacts environnementaux des technologies de l'information), nous avons réalisé une analyse fonctionnelle d'une box et sommes arrivés au résultat suivant (cf [Annexe 7 : Analyse fonctionnelle d'une box](#) pour le diagramme pieuvre complet)

Pour la suite de l'étude, seules les fonctions du produit (représentées par un encadré dans le schéma) nous intéressent.

Les fonctions déterminées sont les suivantes :

- **F1** : La box permet à l'utilisateur d'accéder aux fichiers multimédia du serveur NAS
- **F2** : La box permet à l'utilisateur d'accéder aux services voix (téléphone)
- **F3** : La box permet aux autres terminaux d'accéder au réseau internet (se différencie de F5 dans le sens où la connection se fait automatiquement voire est toujours maintenue. C'est le cas pour des systèmes de sécurité qui sont en permanence connectés pour pouvoir transmettre des informations à un terminal du propriétaire en cas de besoin par exemple ou encore de tout ce qui est du domaine de la **domotique**)
- **F4** : La box permet à l'utilisateur d'accéder aux services TV et VOD d'Orange
- **F5** : La box permet à l'utilisateur de se connecter à des services sur internet

NAS* (Network Attached Storage) : unité de stockage de données en local

• Hiérarchisation des fonctions

	F1	F2	F3	F4	F5	Total	Poids fonctionnel
F1		0	0	0	0	0	0 %
F2	2		0	0	0	2	8%
F3	3	3		3	0	9	38%
F4	1	1	0		0	2	8%
F5	3	3	2	3		11	46%

Figure 53: hiérarchisation des fonctions de la box

- 0 : ligne moins importante que la colonne
- 1 : ligne un peu plus importante que la colonne
- 2 : ligne moyennement plus importante que la colonne
- 3 : ligne beaucoup plus importante que la colonne

Une fois cette notation effectuée, il faut additionner le score de chacune des fonctions et le diviser par le score total (somme du score de chaque fonction) pour obtenir le poids fonctionnel de chaque fonction. Dans notre étude, nous obtenons ainsi le résultat suivant :

F5 : La box permet à l'utilisateur de se connecter à des services sur internet : **46%**
F3 : La box permet aux autres terminaux d'accéder au réseau internet : **38%**
F2 : La box permet à l'utilisateur d'accéder aux services voix (téléphone): **8%**
F4 : La box permet à l'utilisateur d'accéder aux services TV et VOD d'Orange: **8%**
F1 : La box permet à l'utilisateur d'accéder aux fichiers multimédia du serveur NAS : **0%**

Dans le cas de la box, deux **fonctions principales** apparaissent clairement : **F5 et F3**.

Afin d'appliquer le système de notation à la livebox 4, la première étape est de lister l'ensemble de ses fonctions réelles (le nombre de fonctions déterminées lors de l'analyse fonctionnelle ne correspond pas nécessairement au nombre de fonctions totales du produit).

La livebox 4 propose l'ensemble des fonctionnalités déterminées dans l'analyse fonctionnelle ainsi que deux fonctionnalités supplémentaires :

- Emplacement disque dur
- Fonctionnalité Bluetooth

Note : l'accès internet via la fibre et via l'xDSL sont différenciés en deux fonctions distinctes.

Avec un total de 8 fonctions pour 2 fonctions principales, nous obtenons :

$$FE(livebox) = \frac{\text{Nombre de fonctions principales}}{\text{Nombre de fonctions total}} \cdot 100 = \frac{2}{8} = 25 \%$$

Au regard de cet indicateur, on peut donc considérer que seulement un quart des fonctions de la livebox 4 sont essentielles !

Note : il s'agit d'une proposition de hiérarchisation des fonctions, d'autres propositions sont envisageables. L'objectif premier est d'appliquer les indicateurs développés plutôt que d'évaluer le degré de frugalité réelle de la livebox 4.

4.2.1 Scénarios de modèles de boxs plus frugales

Dans cette section, des modèles de boxs plus frugales sont proposées à partir de la déclinaison des blocs fonctionnels de la livebox 4

- **Box sans les fonctions disques durs et Bluetooth : Box frugale 1**

Le premier modèle revient à une livebox ne proposant que les fonctionnalités déterminées lors de l'analyse fonctionnelle. Ces fonctions n'ayant pas été mentionnées lors de l'exercice, on peut les considérer comme secondaires.

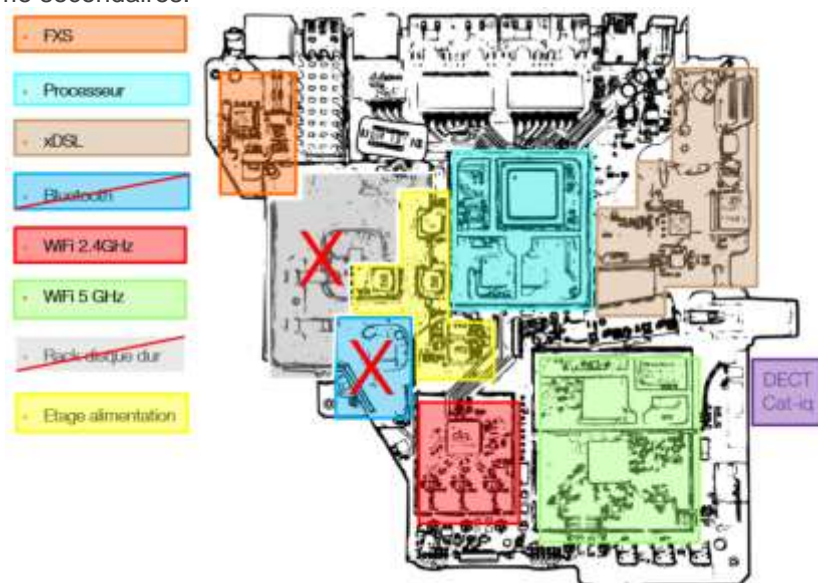


Figure 54: représentation des blocs fonctionnels de la box frugale 1

$$FE(box\ 1) = \frac{\text{Nombre de fonctions principales}}{\text{Nombre de fonctions total}} \cdot 100 = \frac{2}{6} = 33\%$$

- **Box 1 sans fonctions secondaires : box frugale 2**

Dans ce deuxième cas, les fonctions moyennement importantes (Téléphone et TV) et peu importante (NAS) déterminées lors de l'analyse fonctionnelle sont également ôtées. **Cette boîte permet donc uniquement un accès internet fibre ou xDSL.**

Cette opération résulte dans la suppression des blocs fonctionnels DECT et FXS pour la fonction téléphone. La suppression de la fonction TV ne supprime pas de blocs fonctionnels car est opérée à travers des blocs fonctionnels servant également à d'autres fonctionnalités.

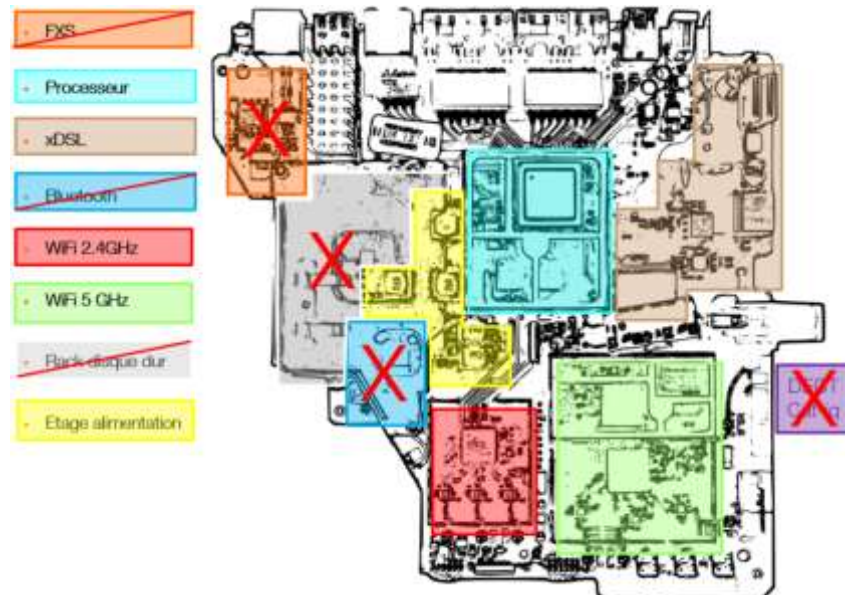


Figure 55: représentation des blocs fonctionnels de la box frugale 2

$$FE(box\ 2) = \frac{\text{Nombre de fonctions principales}}{\text{Nombre de fonctions total}} \cdot 100 = \frac{2}{3} = 66\%$$

- **Box avec uniquement fibre et wifi : Box 3**

Cette boîte est équivalente à la box 2 mais est uniquement compatible avec la fibre. Le bloc fonctionnel xDSL est donc ôté.

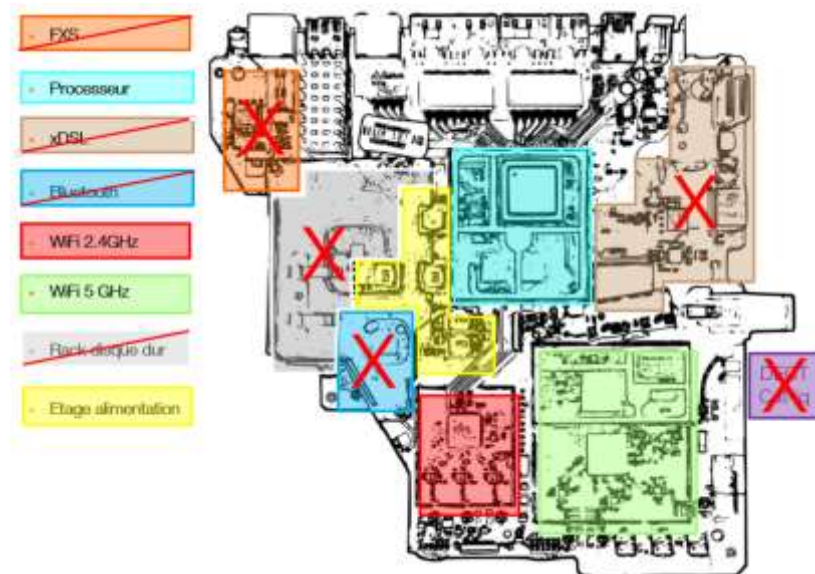


Figure 56: représentation des blocs fonctionnels de la box 3

$$FE(box\ 3) = \frac{\text{Nombre de fonctions principales}}{\text{Nombre de fonctions total}} \cdot 100 = \frac{2}{2} = 100\%$$

4.3 Ergonomie

Suite à un entretien avec une ergonome et un designer d'Orange, des éléments de réponse ont été apportés pour l'indicateur de considération de l'ergonomie.

Chez Orange, l'ergonomie est globalement bien considérée sur l'ensemble du projet. Le point le plus important est, selon le designer, la première phase du projet (phase d'Acquisition – approvisionnement selon les phases projet de l'AFNOR) car il faut que l'ergonomie soit exprimée dès l'expression des besoins clients si l'on souhaite concevoir un produit réellement ergonomique. Cependant, cette phase est actuellement entièrement gérée par le service marketing. L'expression des besoins est ensuite communiquée aux designers et ergonomes puis un dialogue s'installe lors de la phase d'Analyse des exigences (seconde phase la plus importante car elle permet de rectifier les éventuelles erreurs d'ergonomie exprimées lors de la première phase). La phase de conception est également une des phases clés pour considérer l'ergonomie qui est une notion intrinsèque du produit en lui-même. La phase de test de qualification est quant à elle la phase la moins pertinente pour l'ergonomie, cette phase est plutôt pertinente pour la question de la qualité (elle permet cependant de vérifier que les exigences ergonomiques sont appliquées (pression des boutons de la télécommande par exemple)). La dernière phase (maintenance – fonctionnement) est également peu pertinente dans le sens où elle constitue « le moment de vérité » pour l'ergonomie qui peut être qualitativement évaluée à travers la satisfaction client. L'analyse de cette dernière phase peut cependant être utile afin d'améliorer le produit ou les produits suivants (d'où un coefficient non nul).

La pondération suivante est alors proposée :



Figure 57: Pertinence des phases projet pour l'ergonomie chez Orange

Chez Orange, on peut considérer que l'ergonomie est considérée sur toute les phases exceptée celle de l'acquisition – approvisionnement qui est uniquement gérée par le service marketing (bien qu'il soit possible que le service marketing exprime des souhaits en terme d'ergonomie lors de cette phase). La considération du critère ergonomie est donc :

$$\text{Considération de l'ergonomie} = \frac{1 + 2 + 7 + 8}{1 + 2 + 7 + 8 + 10} = 64 \%$$

Un des axes d'amélioration (gain de temps notamment) dans notre cas serait donc d'intégrer dès le commencement du projet une personne compétente en ergonomie qui permettrait de considérer la notion dès les premières expressions des besoins marketing.

4.4 Qualité

Niveau de performance

Une étude de la performance a été menée avec deux experts d'Orange. Pour chacune des fonctions définies lors de l'analyse fonctionnelle, des critères ont été déterminés.

Critères de performance pour une box :

F5 : La boxe permet à l'utilisateur de se connecter à des services sur internet (46%)

➤ Accès WAN xDSL / accès WAN fibre / accès mobile / accès LAN ethernet / accès LAN wifi

F3 : La boxe permet aux autres terminaux d'accéder au réseau internet : (38%)

- Bluetooth (BLE) / NFC / ZIGBEE / Z WAVE / DECT ULE
- F2** : La box permet à l'utilisateur d'accéder aux services voix (téléphone):: **(8%)**
 - DECT_iq / FXS
- F4** : La box permet à l'utilisateur d'accéder aux service TV et VOD d'Orange **(8%)**
 - nombre de flux IPTV
- F1** : La box permet à l'utilisateur d'accéder aux fichiers multimédia du serveur NAS: **(0%)**
 - Capacité de stockage

Des sous-poids fonctionnels ont été calculés à partir d'un indicateur d'éco-efficacité. Cet indicateur a été développé en interne chez Orange 2016 par OLS (S.VAIJA, D.WUILMOT & J.PAIRIS) et propose une distribution de poids fonctionnel de certaines fonctions.

La méthode pour le calcul des sous-poids fonctionnels et les seuils d'exigences sont décrits dans [l'Annexe 8 : indicateur d'éco-efficacité](#)

Résultat :

Au regard des critères, des sous-poids fonctionnels et des seuils d'exigence (performance maximum présente sur le marché), l'indicateur de performance indique **un score de 50 % pour la Livebox 4**.

Net Promoter Score

De part son aspect confidentiel, je n'ai pas pu me procurer le net promoter score pour la livebox 4

Considération de la qualité

Deux personnes chargées de la conception produit m'ont assuré que la notion de qualité est cruciale chez Orange et qu'elle est considérée sur l'ensemble des phases du projet (exceptée l'expression des besoins clients ou Acquisition – approvisionnement qui considère la notion de qualité mais qui n'implique aucun expert du sujet).

La phase la plus importante pour la qualité est la phase de test de qualification qui permet de mettre en place et de vérifier les exigences en termes de qualité. Les phases d'analyse des exigences et de conception architecturale sont également cruciales car la qualité est aussi une notion intrinsèque au produit. La phase d'acquisition est aussi importante car elle pose les premières exigences de qualité globale du produit. Enfin la phase de fonctionnement et de maintenance est la moins pertinente mais ne demeure pas inutile à considérer du fait qu'elle peut servir de base de capitalisation de l'expérience pour améliorer le produit ou les futurs produits et que la maintenance s'intègre à la qualité du service lié au produit.

La pondération suivante est alors proposée :



Figure 58: Pertinence des phases projet pour la qualité

Ainsi, nous pouvons estimer la considération pour la qualité d'un produit chez Orange :

$$\text{Considération de la qualité} = \frac{4 + 8 + 8 + 10}{4 + 6 + 8 + 8 + 10} = 83 \%$$

Comme l'ergonomie, un des axes d'amélioration serait d'intégrer un expert de la qualité dès la phase d'expression des besoins client.

4.5 Modularité

Afin d'analyser le niveau de modularité de la livebox 4, la première étape est de déterminer les modules du système. Cependant, la livebox 4 n'a pas été conçue dans une logique de modularité, nous analyserons donc ses blocs fonctionnels que l'on assimile à des modules.

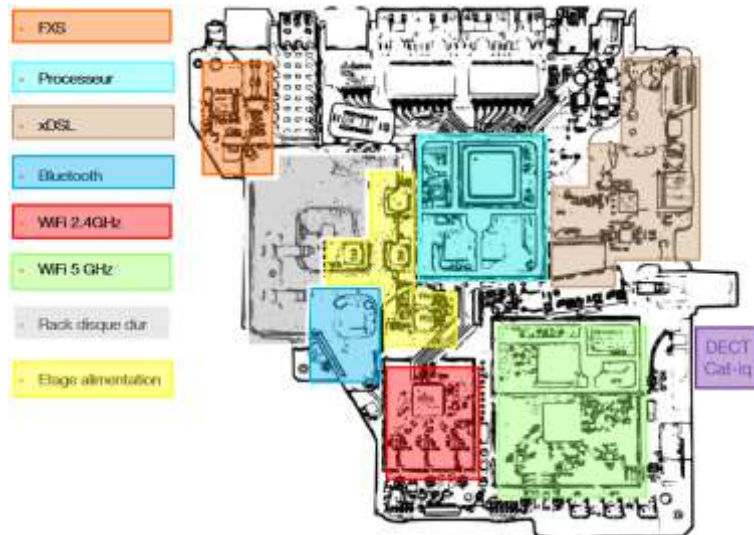


Figure 59: blocs fonctionnels livebox 4 - vue de face de la carte mère

Note : le module DECT est placé sur le côté car situé sur le dos de la carte mère

Les modules considérés sont les suivants :

- Bloc FXS (réseau de téléphonie)
- Bloc Power management (alimentation électrique)
- Processeur (organe de pilotage des données entre les autres composants)
- Bloc xDSL (interface réseau WAN xDSL – réseau LAN)
- Bloc Bluetooth
- Bloc wifi 2.4 GHz
- Bloc wifi 5GHz
- Bloc DECT (téléphonie sans fil)
- Rack disque dur
- Carte mère

Nous avons donc un total de 10 blocs fonctionnels/modules.

Une fois les blocs fonctionnels identifiés, il faut déterminer les interactions entre ces différents blocs fonctionnels/modules

Note : Le bloc « connectiques » n'est pas considéré comme un bloc fonctionnel à part entière dans cette étude.

• Interactions inter-modules

Le processeur interagit avec tous les blocs fonctionnels (c'est son rôle). Les interactions sont principalement de nature « information » car il s'agit de flux de données.

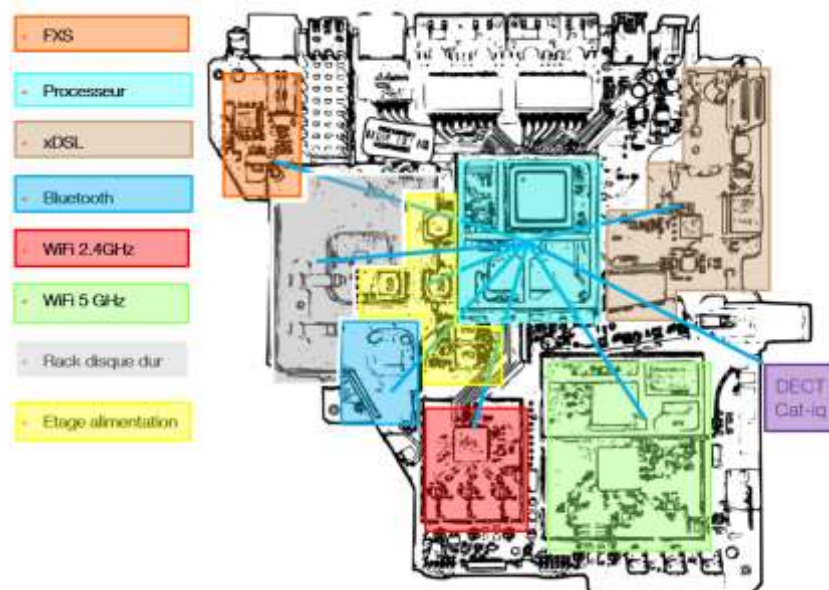


Figure 60: Interactions du processeur

Le bloc « power management » est également connecté avec tous les blocs fonctionnels qui nécessitent tous une alimentation en électricité. Dans ce cas, les interactions sont de nature « énergie ».

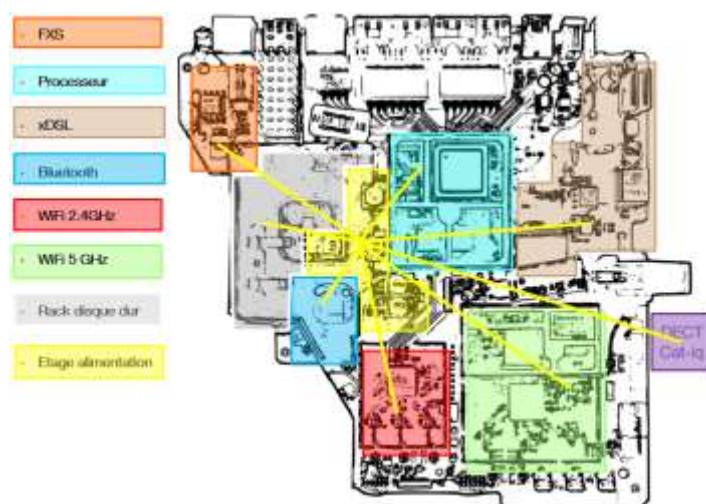


Figure 61: Interactions du bloc "Power management"

Enfin, la carte mère est reliée car par des interactions spatiales avec l'ensemble des autres blocs fonctionnels.

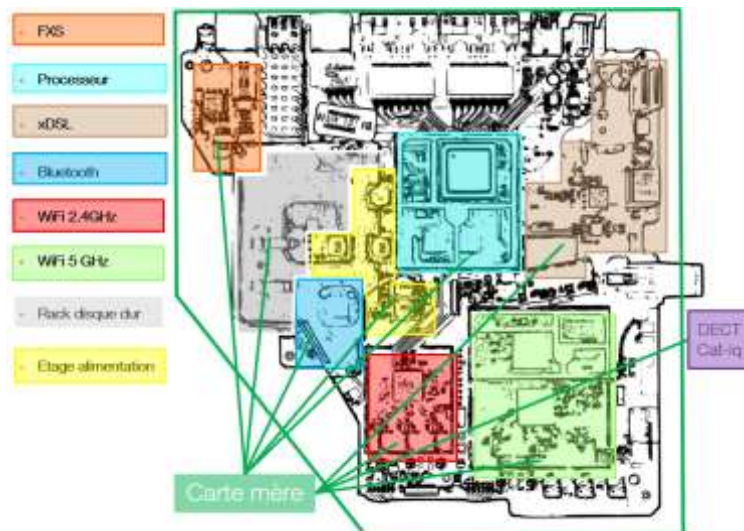


Figure 62: Interactions de la carte mère

Il est possible qu'il existe d'autres interactions entre les blocs fonctionnels (interactions entre le bloc FXS et le bloc DECT possible dans certains cas par exemple) mais pour l'étude seules les interactions précédemment exposées sont considérées.

Maintenant que les blocs fonctionnels et leurs interactions sont identifiés, une représentation de la livebox 4 sous forme de DSM binaire est possible :

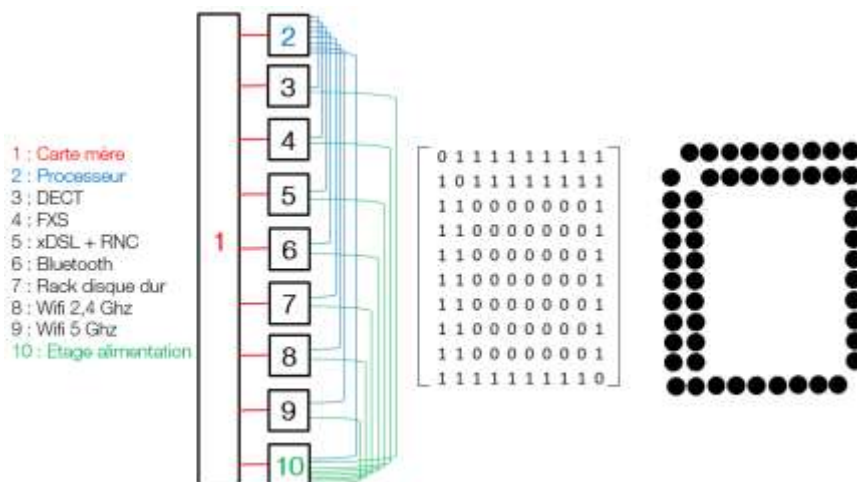


Figure 63: DSM binaire de la Livebox 4

La livebox 4 présente une modularité de type triple bus (carte mère, processeur et étage alimentation)

A ce stade de l'étude, il n'est pas possible d'appliquer les méthodes d'évaluation présentées dans la partie d'évaluation des critères car il est nécessaire de connaître les interactions intra-modulaires (les connexions entre les composants des blocs fonctionnels) ainsi que la force des connections.

Il est cependant possible d'utiliser l'indicateur simple de [Mattson](#) basé sur le ratio entre le nombre de modules et le nombre de fonctions

$$\text{Modularity metric (livebox 4)} = \frac{N \text{ modules}}{N \text{ fonctions}} = \frac{10}{8} = \mathbf{1,25} (> 1)$$

Au regard de cet indicateur, la livebox 4 peut être considérée comme peu modulaire.

- **Modularity metric pour les box frugales**

$$\text{Modularity metric (box 1)} = \frac{N \text{ modules}}{N \text{ fonctions}} = \frac{9}{6} = 1,5 (> 1)$$

$$\text{Modularity metric (box 2)} = \frac{N \text{ modules}}{N \text{ fonctions}} = \frac{7}{3} = 2,33 (> 1)$$

$$\text{Modularity metric (box 3)} = \frac{N \text{ modules}}{N \text{ fonctions}} = \frac{6}{2} = 3 (> 1)$$

On constate que l'indicateur de modularité augmente (et donc se dégrade) avec le degré de frugalité des boxs. Cela s'explique par le fait que les fonctions les moins importantes sont souvent du type [1 module pour 1 fonction] et sont donc satisfaisante en termes de modularité au regard de cet indicateur. En d'autres termes, les modules essentiels qui ne possèdent pas de fonction directe pour l'utilisateur comme l'étage alimentation ou le processeur occupe une place de plus en plus impactante dans le ratio global. Cependant, il faut rappeler que cet indicateur constitue une évaluation très sommaire de la modularité, il ne remet donc pas en question la pertinence des modèles de boxs frugales.

- **Méthode la plus récente**

Cette méthode est théoriquement applicable à la livebox. Cependant, il est nécessaire de recenser l'ensemble des composants des modules ainsi que leurs interactions et leur force afin de l'appliquer. Un système de cotation des forces des interactions doit donc également être mis en place (les interactions seront de nature « énergie » pour l'électricité et « information » pour les flux de données). A noter que cette méthode est tout à fait applicable en considérant toutes les interactions de force égale à 1.

En résumé, il faut pouvoir représenter la livebox de la manière suivante pour pouvoir appliquer cet indicateur :

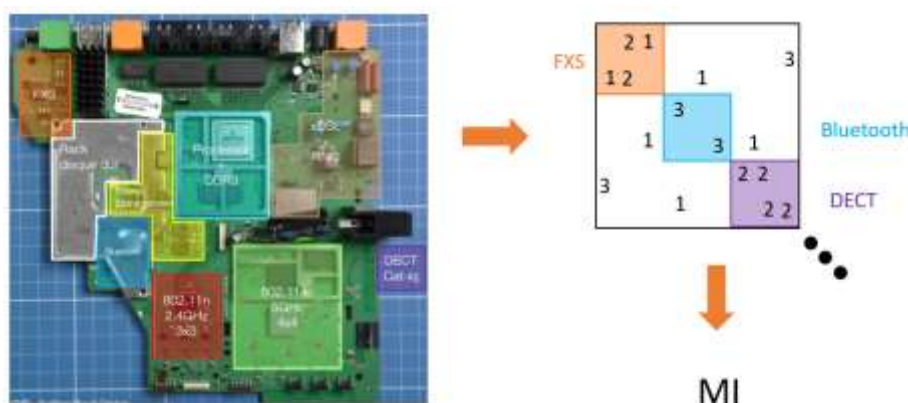


Figure 64: exemple de représentation partielle de la livebox sous forme de DSM composants non binaire

4.6 Consommation d'énergie

Pour le cas d'une livebox, il est difficile de déterminer le rendement énergétique car l'énergie utile est difficile à quantifier directement. Le rendement d'une box est cependant mesurable de deux façons :

- En sommant la puissance dissipée par chaque composant

$$\text{Puissance dissipée (box)} = \sum \text{Puissance dissipée de chaque composant}$$

$$\text{Puissance dissipée (composant)} = \text{Puissance nominale (composant)} * (1 - \text{Rendement (composant)})$$

Le rendement de la box s'obtient ensuite ainsi :

$$\text{Rendement (box)} = \frac{\text{Puissance nominale (boxe)} - \text{Puissance dissipée (boxe)}}{\text{Puissance nominale (boxe)}}$$

Cette méthode nécessite donc de connaître la puissance et le rendement de chaque composant (ou blocs fonctionnels le cas échéant).

- De manière expérimentale de la façon suivante :

Mesurer le rendement énergétique d'un système revient à mesurer les pertes énergétiques de ce système. Dans le cas d'un système constitué de composants électriques comme notre box, les pertes énergétiques sont très majoritairement des pertes joules et donc une dissipation thermique (une très faible partie de l'énergie est également transportée par les ondes électromagnétiques émises par la box). En mettant en place un système permettant de mesurer la dissipation thermique de la boxe sur un temps donné il est donc théoriquement possible de déterminer le rendement de la boxe.

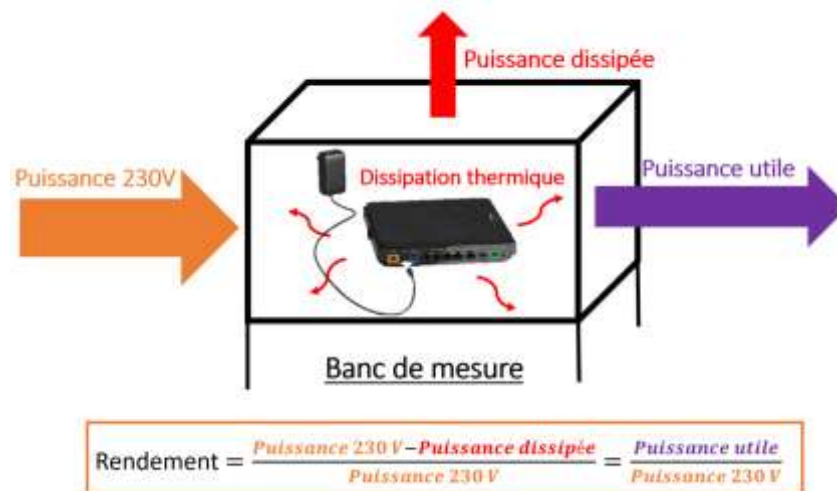


Figure 65: dispositif expérimental de mesure du rendement énergétique

Une autre manière de percevoir la performance énergétique d'un système est de considérer la puissance nécessaire pour un service rendu :

$$\text{Performance énergétique} = \frac{\text{Services rendus}}{\text{Puissance}}$$

Ainsi, dans le cas où deux boxs fourniraient les mêmes services (mêmes unités fonctionnelles) si l'une d'elle consomme moins d'énergie que l'autre alors elle peut être considérée comme plus performante sur le plan énergétique.

Cet indicateur est cependant uniquement applicable pour comparer deux systèmes proposant des services équivalents (comparer des services différents aurait peu de sens).

Cet indicateur peut donc être pertinent dans le cas d'un projet de conception d'un produit où les performances/services sont connus et fixés (BoR, Cahier des Charges...).

Exemple :

Un projet de conception d'un produit à pour objectif de fournir un service à un niveau de performance « y ». Le premier produit proposé atteint exactement le niveau de performance « y » et le seconde le dépasse. On peut alors considérer que les deux produits ont un service rendu équivalent car les études ont montré que le consommateur ne dépassera jamais le niveau de performance « y », ils ont donc la même « utilité ». Le fait que le second produit propose un niveau de performance supérieur peut être lié à un surdimensionnement du système qui, bien souvent, impliquera une consommation énergétique supérieur, le second produit est alors moins performant énergétiquement que le second au regard de cet indicateur.

Aussi, si les deux produit proposent le niveau de performance « y » mais que l'un des deux le fait avec une puissance inférieure, alors il est également énergétiquement plus performant.

Un autre moyen d'évaluer la performance énergétique d'un système est de déterminer la puissance par service rendu en intégrant l'unité du service en question. Dans le cas de la fonctionnalité wifi par exemple, on peut alors obtenir un indicateur en Bit/W.s. Ainsi, la performance énergétique de deux

produits peut être comparée pour chaque service ou fonction. A noter qu'il est nécessaire que les deux produits comparés sont évalués dans les mêmes conditions.

Cette dernière méthode n'est pas toujours facile à mettre en place car certaines fonctions sont difficiles à quantifier en termes de performance mais elle présente l'avantage de pouvoir déterminer une performance énergétique pour chaque fonction et ainsi de mettre en évidence les points d'amélioration potentiels.

4.6.1 Etude des modèles de box frugales.

A partir des puissances des blocs fonctionnels de la box, il est possible d'évaluer le gain (négatif) de puissance pour les modèles de boxes frugales.

Les puissances en mode veille et en mode nominal sont évaluées pour les modèles de boxes frugales en venant soustraire la puissance des blocs fonctionnels

	Mode veille (%)	Nominal (%)
xDSL	36,8	21,2
FXS	1,71	4,42
DECT	4,27	4,42
FXS + DECT	5,98	8,85
Bluetooth	0,85	0,88
Boxe complète	100	100

	Mode veille (%)	Nominal (%)
Box 1 :	99	99
Box 2 :	93	90
Box 3 :	56	69

Figure 66: Evaluation des puissances des modèles de boxes frugales

Cette simulation permet ainsi d'obtenir les résultats suivants :

Box 1 : -1 % de puissance nécessaire pour le mode veille, - 1 % pour le mode nominal

Box 2 : -7 % de puissance nécessaire pour le mode veille, - 10 % pour le mode nominal

Box 3 : -44 % de puissance nécessaire pour le mode veille, - 31 % pour le mode nominal

A noter qu'il est fort probable que certains composants requièrent une puissance moindre une fois certains blocs fonctionnels ôtés (CPU et étage alimentation par exemple). La réduction de puissance des modèles de boxes frugales est donc probablement encore plus importante en réalité.

4.7 Prix

L'indicateur « abordabilité » ne peut être directement appliquée à une box car ce produit est inclus dans une offre de service.

De la même manière que pour la consommation énergétique, le gain en prix des modèles de boxes frugales est évalué en ôtant le prix des blocs fonctionnels concernés.

	Coûts (% prix total)
xDSL	5%
FXS	4%
DECT	4%
FXS + DECT	8%
Disque dur	3%
Bluetooth	2%
Box 1 :	95%
Box 2 :	87%
Box 3 :	82%

Figure 67: Simulation du prix des modèles de boxs frugales

A noter que dans ce cas-ci également le gain réel est probablement supérieur du fait de la potentielle réduction de la puissance du CPU qui représente 17 % du prix de revient de la boxe et de l'étage alimentation (6%). Le gain spatial que représente la suppression de blocs fonctionnels peut également générer un abaissement du coût (réduction de la taille de la carte mère et de la quantité de matière pour le casing notamment).

De plus, il faut également considérer l'économie d'électricité (coût d'utilisation donc) générée par la réduction de la puissance des boxs frugales.

Conclusion

Afin d'approfondir cette étude, certains critères pourraient être développés d'avantage (modularité notamment en cartographiant les interactions entre les composants). Le critère d'adaptabilité, qui n'est pas traité dans ce projet, pourrait également faire l'objet d'une étude approfondie.

Une hiérarchisation des critères pourrait être étudiée afin de prioriser les axes de conception et éventuellement de développer un « score unique » du niveau de frugalité d'un produit. Aussi, une étude de synergies des critères pourraient apporter un approfondissement. En effet, certains critères possèdent des leviers communs (énergie, prix et empreinte environnemental par exemple) mais d'autres sont susceptibles de se desservir (modularité et empreinte environnementale en cas de mauvaise gestion des stocks)

Les indicateurs développés proposent une évaluation du niveau de frugalité d'un produit, des méthodologies de conception pourraient également être apportées pour les différents critères afin de standardiser le développement d'un produit frugal.

Enfin, cette réflexion se porte uniquement sur l'aspect technique de l'innovation frugale. Une réflexion marketing sur l'offre (conversion du modèle économique vers une offre de boxs frugales uniquement, développement d'une gamme de box frugale, développement de la modularité) est à considérer afin de déployer un produit frugal au sein de l'entreprise.

Annexes

Annexe 1 : Listes des Critères de Luis-Miguel LOPEZ SANTIAGO :

Note : le document n'est pas traduit en français afin de rester au plus proche de la sémantique d'origine.

- Critères orientés marketing :

No.	Criteria	Discipline for study	Description
M1	Social	Marketing Design Business	Social impact, especially alleviating poverty, drives the interest in the BoP domain. Appropriately designed products have the potential to create significant impact, contributing towards social and human development of disadvantaged societies.
M2	Needs	Marketing Design	The structures and processes required to develop and deliver innovative technologies (goods and services) has to incorporate the needs and interests of the poor. BOP consumers are motivated not just by survival and physiological needs but seek to fulfill higher order needs either to build social capital, for cultural reasons or as a means to compensate for deficiencies in other areas of their lives.
M3	Availability	Marketing	Customers are able to acquire and use product, distribution channel.
M4	Acceptability	Marketing Design	Innovation must be compatible with social norms and existing local values
M5	Awareness	Marketing	Users should be aware of the innovation.
M6	Culture	Marketing Design	Consider the implications of introducing or improving a new product or process into a specific cultural context. Design processes and methods suitable for a given context or culture
M7	Aspirational	Marketing Design	Innovation must empower local people and uplift their living standards
M8	Desirability	Marketing Design	Definition of requirements that determine what a user desires to satisfy its needs. Technological requirements through design in order to transform promising ideas into concrete and adequate solutions
M9	Context	Marketing Design	Socio-cultural context plays an important role in development and diffusion of innovations. Exploring the local context for improving end-user knowledge is crucial in order to deliver product value that is relevant to local needs and essential. Contextual aspects must be considered in undertaking design research in resource-poor societies and in developing and testing methods
M10	Affinity	Marketing Design	Users will be proud to own and take care of the product. The connection users have with a product, primarily on an emotional level.
M11	Price	Marketing	Consumers are price conscious and are willing to pay more for acceptable quality if they see its relevance and as a way of improving productivity and overall quality of life. In emerging markets, a product's price is the most considered buying point.

- Critères orientés conception produit / design

No.	Criteria	Discipline for study	Description
T1	Quality	Engineering Technical	Innovation has to be low cost-high performance solutions.
T2	Functionality	Engineering Technical	Typically, users neglect products which fail to provide their functional expectations.
T3	User-friendly		Users of frugal products have no prior, first-hand experience of using similar products therefore; products need to be easy-to-use and fault resistant.
T4	Robust		Products that can withstand harsh operating conditions and misuse. Capacity to operate in a degraded environment
T5	Simplicity	Engineering Technical	The level of difficulty user faces in using the innovation.
T6	Reliability		A robust product with a long expected life cycle, which does not need to be serviced very often.
T7	Adaptability		Product must be flexible to adapt to user practices and in different contexts. Leveraging existing products, inputs and services.
T8	Essentials		Eliminating unnecessary features. Provide the essential functions people need
T9	Usability		Products must be very easy to understand and use and adapted to such local constraint. Embed usability into the core design, showing how products work and how to use them.
T10	Performance		Performance has a very broad meaning, covering the performance of all functionalities and engineering characteristics, such as speed, power, durability, and accuracy.
T11	Modular		Giving users the option to combine products in the manner they want, and sourcing different modules from different suppliers. Modular design enables cost reduction and the use of standard interfaces, also the outsourcing of final assembly to the customer.
T12	Durability		When wear rates are higher, products must be designed and manufactured with a higher level of durability and robustness.
T13	Flexible		Product can be used for several purposes.
T14	Maintainability		Product can be serviced locally. Product use standardized parts and easy to disassemble systems.
T15	User-centered		It refers to the adaptation of a product to local needs and includes aspects such as robustness, reliability, portability, etc. Require little to no prior knowledge or training to utilize
T16	De-featuring		Feature rationalization, or "ditching the junk DNA" that tends to accumulate in products over time. Avoid implementing features that do little to enhance the actual product.
T17	Portability		Making a stationary product portable.
T18	Feasibility	Engineering Technical	Innovation must be technology feasible and preferably should be able to be built locally.
T19	Reparability	Engineering Technical	When failures occur, products can be repaired or returned.
T20	Ergonomics		Product must efficiently transfer human energy into mechanical energy and be used for long periods of time without injury
T21	Safety		Build a product that meets global safety standards for avoid injury.
T22	Size		The cost of a product can be reduced simply by reducing its size until it fits into the "affordability zone"
T23	Architectural		Incorporating modularity
T24	Easy		Easy to use and maintain for everyone, even for uneducated people.
T25	Lightweight		Portable for varying transportation option.
T26	Small		It is often used to champion small, appropriate technologies that are believed to empower people more, in contrast with phrases such as "bigger is better".
T27	Upgradeability		The product should have the ability to increase its performance capacity as the entrepreneur's business and capital grow. Can you size the product appropriately for your business and then easily grow it later?

- Critères orientés stratégie et management



No.	Criteria	Discipline for study	Description
B1	Affordability	Marketing Business Model	Innovation must be affordable by even the poorest consumers
B2	Low-cost		Product contribute to a great value with an extremely low cost. New functionality and lower cost product
B3	Value		BoP enterprises need to understand the value proposition they are creating for their customers, producers, and other partners. The business model adapts to the context because it responds and adapts to external triggers, such as customer demands and customer values. Value arises from the interaction between user and product within a particular socio-cultural setting.
B4	Scale-up		Achieve a high economic sustainability despite small profit margins. Products are designed to be mass manufactured. Growth beyond serving local markets
B5	Accessibility	Business Model	Distribution patterns for products and services must take into account where the poor live
B6	Cheap		The product offered is cheaper and of better quality than the available alternatives.
B7	Scalability		Product must be scalable and the business model must be repeatable to reach massive population
B8	Viability		Considers the potential of a project from a financial perspective, defines a reliable financial model.

• Critères sociaux et environnementaux

No.	Criteria	Discipline for study	Description
S1	Sustainability		Sustainability and the economic goals appear to spring naturally from the desire of the innovator to improve the daily life of their community. Solutions designed to minimize the impact on the environment combined with the scarcity of material and financial resources leads to the development of more energy/material efficient products. Achieving better standards of living at both lower costs and minimal impact on the environment demand
S2	Local-resources		Sourcing without importing equipment or materials. Procuring local inputs and raw materials at low costs. The distance from the extraction of the resources and their transformation to their integration in the product quantifies the local value.
S3	Ecological		Powered by renewable resources. Natural resources are consumed at a rate below the natural reproduction, or at a rate below the development of substitutes
S4	Energy-Efficient		Frugality in resource consumption might also lead to a product, whose realization is a net saver of energy. Low energy consumption in use.
S5	Resource-efficiency		Due to the scarcity, the use resources efficiently to keep costs down and for environmental reasons
S6	Inclusive		Innovations have a tremendous through enhanced productivity, sustainability, poverty reduction and promoting entrepreneurship behind.

[Annexe 2 : Description de la méthode du Circularity Score](#)

Durabilité du produit	Capacité à être recyclé, réparé, réutilisé, mis à niveau (niveau équipement)	Capacité à être recyclé, réparé, réutilisé, mis à niveau (niveau process)
<ul style="list-style-type: none"> Gestion software et données Résistance aux rayures Service de maintenance Robustesse 	<ul style="list-style-type: none"> Connecteurs Méthodes de diagnostique Compatibilité matériaux pour le recyclage Facilité à être déssassemblé Plastique recyclé/biosourcé Identification des matériaux Substances dangereuses Matériaux critiques Recyclage de l'emballage 	<ul style="list-style-type: none"> Qualité du service Disponibilité des pièces détachées Durée de la disponibilité des pièces détachées Information pour le déssassemblage Programme de récupération et de recyclage Disonibilité de léthode d'évaluation environnementale

Figure 68: Catégories et critères du circularity score

La notation des critères est obtenue en combinant deux sous notation :

- **R (Relevance)** qui mesure la pertinence du critère. Un critère peut prendre la valeur de 1 (très peu pertinent), 2 (peu pertinent), 3 (pertinent) ou à 4 (très pertinent).
- **MI (Margin of Improvement)** qui mesure la marge de progression pour ce critère. Le critère peut prendre la valeur 1, 2, 3 ou 4 suivant la même logique que R.

Ces deux sous-notations sont ensuite utilisées en entrée de la matrice suivante afin de définir le score pour le critère considéré :

		R			
		1	2	3	4
MI	1	55	75	90	100
	2	50	60	70	80
	3	40	35	30	15
	4	25	20	10	0

Figure 69: matrice de notation du circularity score

Dans cet exemple, un critère ayant obtenu la notation de 4 pour R et de 2 pour MI obtient ainsi un circularity score de 80.

Le circularity score de chaque catégorie est ensuite obtenu en faisant la moyenne des scores des critères de la catégorie.

Equipment: Gateway Gen Z	
Circularity Score	Circular Design Guidelines Group (CDGG)
74	Product Durability
62	Ability to Recycle, Repair, Reuse, upgrade - equipment level
63	Ability to Recycle, Repair, Reuse, upgrade - manufacturer level

Figure 70: Exemple de notation par catégorie

Annexe 3 : principe de l'analyse fonctionnelle et hiérarchisation des fonctions

- Principe de l'analyse fonctionnelle
-

La première étape consiste à placer les **milieux extérieurs** avec lesquels le produit est susceptible d'interagir

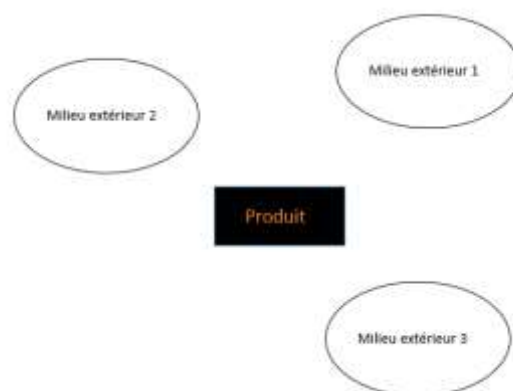


Figure 71 : Produit et milieux extérieurs

Ces milieux extérieurs peuvent être de natures diverses : des objets, des personnes, des ambiances (température, humidité)...

A partir des milieux extérieurs, il est alors possible de déterminer les fonctions du produit. **Une fonction relie nécessairement deux milieux extérieurs en passant par le produit** et se formule de la manière suivante :

« Le produit **PERMET** au **MILIEU EXTERIEUR X** de **VERBE D'ACTION** avec le **MILIEUX EXTERIEUR Y** »

Une fonction répond à la question « à quoi cela sert »

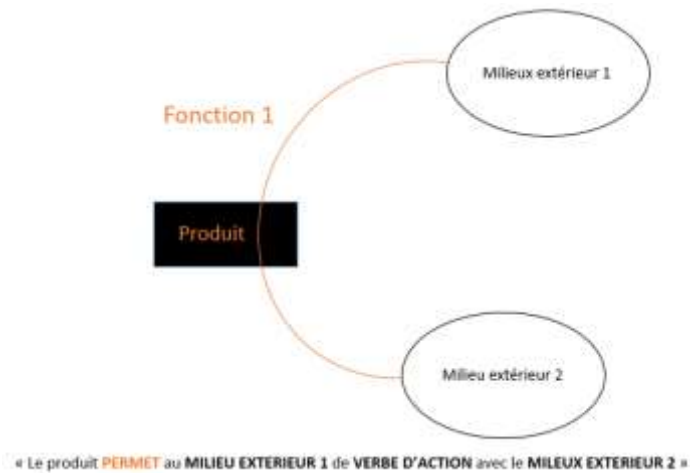


Figure 72: Fonction d'une analyse fonctionnelle

Une **contrainte** quant à elle, relie le produit avec un seul milieu extérieur et se formule ainsi :
 « Le produit **DOIT** VERBE D'ACTION avec le MILEUX EXTERIEUR z »

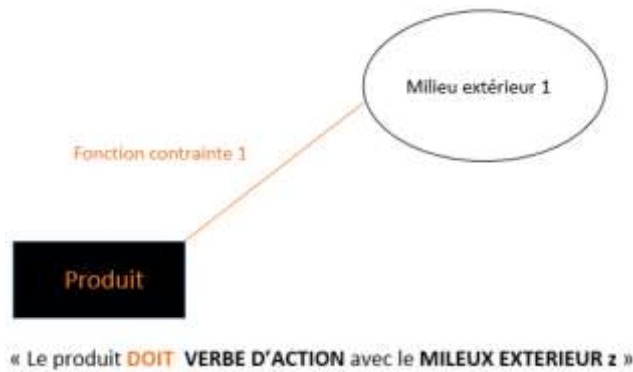


Figure 73: Contrainte d'une analyse fonctionnelle

Exemple (partiel) pour une box :

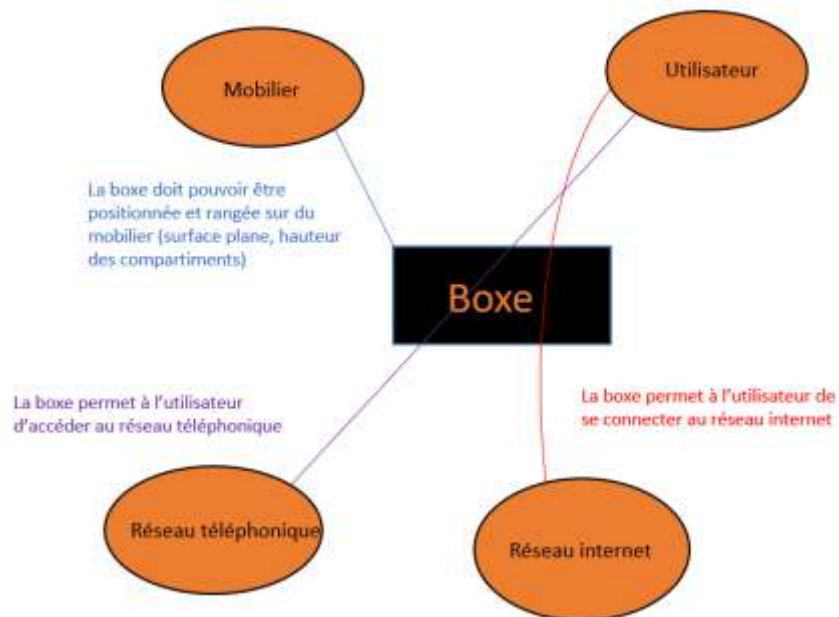


Figure 74: exemple partiel d'une analyse fonctionnelle pour une box

- Hiérarchisation des fonctions
-

Une fois les fonctions et contraintes déterminées, il est possible de les hiérarchiser afin de mettre en évidence les fonctions et contraintes principales.

Le principe de la hiérarchisation des fonctions et de les comparer une à une puis d'attribuer un système de notation en fonction de l'importance relative des fonctions comparées suivant le système de notation suivant :

- 0 : ligne moins importante que la colonne
- 1 : ligne un peu plus importante que la colonne
- 2 : ligne moyennement plus importante que la colonne
- 3 : ligne beaucoup plus importante que la colonne

•
Exemple de hiérarchisation de fonctions :

	F1	F2	F3	F4	F5	Total	Poids fonctionnel
F1		0	0	0	0	0	0 %
F2	2		0	0	0	2	8 %
F3	3	3		3	0	9	38 %
F4	1	1	0		0	2	8 %
F5	3	3	2	3		11	46 %

Figure 75: exemple de hiérarchisation de fonctions

Dans ce cas par exemple, la fonction F2 est moyennement plus importante que la fonction F1 mais moins importante que les autres fonctions.

[Annexe 4 : méthodes d'évaluation de l'ergonomie de l'AFNOR ISO 209241-210_2010](#)

- **Méthodes impliquant la participation directe des utilisateurs**

•
Observation des utilisateurs

Cette méthode consiste en la collecte précise et systématique d'informations sur le comportement et les performances des utilisateurs dans le contexte de tâches spécifiques. Une grande part de l'observation est basée sur la prise de notes détaillées du comportement des utilisateurs.

- **Ressources nécessaires :**
 - Panel d'utilisateurs représentatif
 - Grilles, protocoles.
 - Personne(s) experte(s) pour l'analyse des données (ergonome)
 - Produit(s) à tester

Avantages :

- Méthode pouvant être pratiquée dans des situations réelles
- Activité réelle révélée

Inconvénients :

- Analyse des données pouvant prendre du temps
- Pas d'accès direct aux processus mentaux (observation et interprétation uniquement)
- Expertise requise pour l'analyse des données

•
Mesurages relatifs aux performances/tâches

Cette méthode consiste en la mesure de performances quantifiables d'utilisateurs en situation de manipulation du produit

Exemples de performances mesurées : temps passé pour accomplir une tâche, temps passé à la localisation et à l'interprétation des informations dans le manuel utilisateur, nombre de fonctionnalités utilisées pendant la période de test.

▪ **Ressources nécessaires :**

- Panel d'utilisateurs représentatif
- Grilles, protocoles.
- Produit(s) à tester

Avantages :

- Collecte de données quantifiables
- Résultats faciles à comparer

Inconvénients :

- Ne détermine pas nécessairement la cause des problèmes

•

Analyses des incidents risques

Cet indicateur consiste en une collecte systématique d'**événements remarquables**. Les incidents sont décrits sous forme de brefs rapports. Les données relatives aux incidents peuvent être collectées à partir d'interviews des utilisateurs ou d'analyse objective des incidents.

Remarque : les incidents peuvent également être de nature positive.

▪ **Ressources nécessaires :**

- Panel d'utilisateurs représentatifs
- Produit(s) à tester
- Personnes experte pour les interviews et/ou le rapport des incidents

Avantages :

- Collecte les causes des problèmes, des défaillances
- Activité réelle décrite

Inconvénients :

- Peut nécessiter beaucoup de temps
- L'insuffisance des événements survenus peut limiter la validité de l'analyse
- Expertise requise pour l'analyse des données

•

Questionnaires :

Les questionnaires prennent la forme de checklists ou échelles de notation. Les questions peuvent être ouvertes ou fermées mais **l'utilisation de questions fermées est recommandée**. Des contrôles de cohérence sont nécessaires pour les questionnaires (différents formats de questions faisant référence au même élément)

▪ **Ressources nécessaires :**

- Panel d'utilisateurs représentatif
- Questionnaire réalisé par une personne experte.

Avantages :

- Dévoile des préférences subjectives
- Relativement facile et rapide à organiser
- Ne nécessite pas nécessairement une version du produit testé

Inconvénients :

- Articles du questionnaire sujets aux biais

•

Interviews :

Les interviews sont proches des questionnaires mais sont plus flexibles et requiert une procédure en face-à-face. Les questions peuvent également être plus ou moins ouvertes.

▪ **Ressources nécessaires :**

- Panel d'utilisateurs représentatifs
- Personne(s) experte(s) pour la réalisation de l'interview et l'analyse des données

Avantages :



- Recueille un aperçu rapide de l'opinion des utilisateurs
- Flexibilité (les réponses des utilisateurs peuvent être stimulées)

Inconvénients :

- Analyse pouvant prendre du temps
- Méthode sujette à des biais dans les questions et les réponses
- Expertise requise pour l'exercice

Penser tout haut

Penser tout haut implique que les utilisateurs verbalisent continuellement leurs idées, leurs attentes, leurs doutes... tout au long de leur activité lors de l'utilisation du produit. Il est important de rappeler la consigne (penser à voix haute) au cours de l'exercice aux utilisateurs. Les verbalisations peuvent à la fois réalisées e cours d'action ou de manière rétrospective (une fois la tâche terminée)

▪ **Ressources nécessaires :**

- Panel d'utilisateurs représentatifs
- Personne(s) experte(s) pour l'analyse des données (ergonome)
- Produit(s) à tester

Avantages :

- Rapide à mettre en place
- Permet d'appréhender les processus mentaux des utilisateurs

Inconvénients :

- Peut gêner certains utilisateurs
- Analyse pouvant prendre du temps
- Ne permet pas de recueillir des données de performance de tâches pendant la méthode (utilisation non naturelle)

- **Méthodes impliquant la participation indirecte des utilisateurs**

Méthodes basées sur des documents

Dans cette méthode, un spécialiste en utilisabilité utilise des documents existants pour compléter son propre jugement. L'expert doit avoir suffisamment d'expérience pour utiliser ces documents de manière appropriée. Les documents en question peuvent provenir de diverses sources (littérature scientifique, normes...) et être de différentes natures (grilles d'évaluation, cheminements cognitifs...)

▪ **Ressources nécessaires :**

- Expert (pour certains documents)
- Document(s)
- Produit(s) à tester ou informations sur le produit permettant l'utilisation du document utilisé

Avantages :

- Expertise pas toujours requise

Inconvénients :

- Ne couvre pas tous les aspects de l'interaction de l'utilisateur avec le système

Méthodes basées sur des modèles

Ces modèles sont principalement de deux types :

- Méthodes de spécification et de conception de l'interface utilisateur (modélisation de l'utilisateur et des données)
- Méthodes formelles basées sur des modèles d'utilisateurs et de tâches (modèles de prédiction des performances de l'utilisateur)

▪ **Ressources nécessaires :**

- Modèles
- Expert(s) pour créer et interpréter les modèles

Avantages :



- Modèles largement disponibles
- Permet de prévoir les performances
- Applicable avec une représentation modélisée du produit à tester et donc méthode applicable plus en amont d'un projet de conception de produit

Inconvénients :

- Peut prendre du temps
- Ouvert aux biais
- Expertise requise pour créer et interpréter les modèles

Evaluation par expertise

Cette méthode est basée sur la connaissance de l'expert en utilisabilité. L'expert identifie les problèmes les plus fréquemment observés en référence à un modèle d'interface homme-système optimal qu'il doit déterminer.

▪ Ressources nécessaires :

- Expert

Avantages :

- Rapide à mettre en place
- Adapté aux premiers stades d'un projet
- Permet l'identification des problèmes récurrents

Inconvénients :

- Niveau d'expertise requis élevé

Risque de passer outre des problèmes importants

[Annexe 5 : étapes de mise en place d'une AMDEC](#)

1. La préparation

Cette étape permet de définir le périmètre et les objectifs de l'analyse ainsi que les participants (typologie, nombre, niveau de compétence...) et leur niveau de contribution (participation aux réflexions, suivi des plans de gestion...). Cette phase de préparation constitue également la mise en place des outils nécessaires à l'analyse (grille AMDEC standard généralement)

2. La décomposition fonctionnelle

Cette étape permet d'identifier clairement les éléments à étudier et les fonctions/phases à étudier afin d'identifier les risques de dysfonctionnement de chaque fonction.

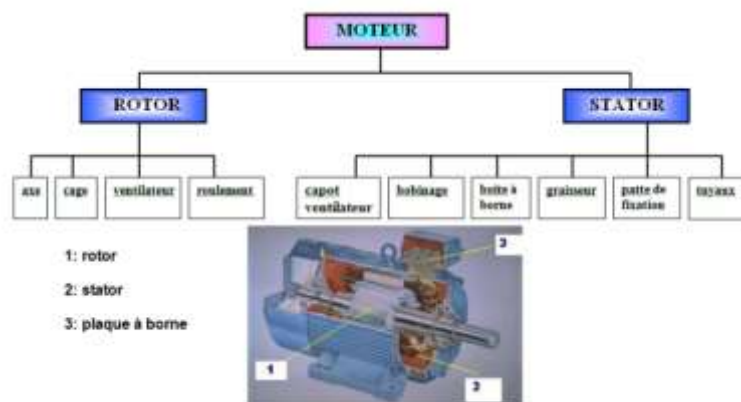


Figure 76: Exemple de découpage fonctionnel d'un ensemble moteur

3. L'analyse

A partir de chaque fonction du produit ou du moyen de production ou la phase du processus identifiée et pour chaque défaillance possible, le groupe de travail doit noter sa criticité selon des critères à définir via une cotation préalablement établie.

Exemple de critères (pour une AMDEC Moyen de production) :

1. Gravité des effets de la défaillance (G)

Niveau	Valeur	Définition
Mineure	1	La défaillance arrête le composant mais pas l'installation qui continue à fonctionner en mode dégradé
Moyenne	2	La défaillance arrête l'équipement mais pas la production qui continue à fonctionner en mode dégradé
Majeure	3	La défaillance arrête la production et nécessite une intervention de maintenance
Importante	4	La défaillance arrête la production impliquant des problèmes graves pour les hommes ou l'installation

3. La capacité de détection de la défaillance (D)

Niveau	Valeur	Définition
Evident	1	Détection certaine
Possible	2	Délectable par l'opérateur
Improbable	3	Difficilement détectables
Impossible	4	Indétectable

La combinaison (multiplication) de ces critères permet ensuite d'obtenir un **niveau de criticité C** qui déterminera le niveau des actions à entreprendre

Valeur	Définition
$1 < C < 8$	Négligeable : on les laisse de côté
$8 < C < 14$	Moyenne : on se pose les questions de les laisser ou conserver
$14 < C < 27$	Élevée : il faut trouver des actions à mettre en œuvre et regarder l'importance de mettre en stock les composants ou organes
$27 < C < 64$	Interdit : il faut trouver des actions à mettre en œuvre et mettre obligatoirement en stock les composants ou organes

4. Mise en place et suivi des plans d'actions

Suite à l'analyse, le groupe de travail dispose d'un plan d'actions priorisées en fonction de la criticité de chaque mode de défaillance. Le déroulement du plan d'action doit être ensuite intégré au processus organisationnel de l'entreprise.

Annexe 6 : méthodes de calcul [1998-2007] – modularité

- **Guo et Gershenson (2003)**

$$M_{H\&K} = \frac{\text{\#within_module_connections}}{\text{\#between_module_connections}} = \frac{\sum_{k=1}^M \left(\sum_{i=n_k}^{m_k} \sum_{j=n_k}^{m_k} R_{ij} \right)}{\sum_{k=1}^M \left(\sum_{i=n_k}^{m_k} \left(\sum_{j=1}^{n_{k-1}} R_{ij} + \sum_{j=m_{k+1}}^N R_{ij} \right) \right)}$$

Avec :

n_k : indice du premier composant pour le $k^{\text{ème}}$ module

m_k : indice du dernier composant pour le $k^{\text{ème}}$ module

M : nombre total de modules

N : nombre total de composants

R_{ij} : valeur de la $i^{\text{ème}}$ ligne et $j^{\text{ème}}$ colonne de la matrice

- **Allen and Carlson-Skalak (1998)**

En utilisant le même système de notation que l'équation précédente, cette méthode se formule ainsi :

$$\text{Interactions} = \frac{\# \text{inter module interactions}}{\# \text{modules}} = \frac{\sum_{k=1}^M \left(\sum_{i=n_k}^{m_k} \left(\sum_{j=1}^{n_k-1} R_{ij} + \sum_{j=m_k+1}^N R_{ij} \right) \right)}{M}$$

Avec :

n_k : indice du premier composant pour le $k^{\text{ème}}$ module

m_k : indice du dernier composant pour le $k^{\text{ème}}$ module

M : nombre total de modules

N : nombre total de composants

R_{ij} : valeur de la $i^{\text{ème}}$ ligne et $j^{\text{ème}}$ colonne de la matrice

La valeur minimum est 0, cela correspond au cas où le système est composé d'un unique module. Pour des systèmes non triviaux, la valeur minimum est de 1 dans le cas où chaque module nécessite seulement une interaction avec un autre module

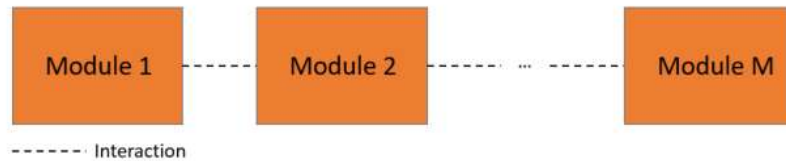


Figure 77: Configuration pour Interactions = 1

Ainsi, plus le nombre d'interactions entre les modules augmentent (pour un nombre de modules donné), plus le ratio augmente est moins bonne est la modularité.

- Newcomb et al. (1998)

$$\begin{aligned} CI &= \frac{\# \text{on_block_diagonal_connections}}{\# \text{total_connections}} \\ &= \frac{\sum_{k=1}^M \left(\sum_{i=n_k}^{m_k} \sum_{j=n_k}^{m_k} R_{ij} \right)}{\sum_{k=1}^M \left(\sum_{i=n_k}^{m_k} \sum_{j=n_k}^{m_k} R_{ij} + \left(\sum_{i=n_k}^{m_k} \left(\sum_{j=1}^{n_k-1} R_{ij} + \sum_{j=m_k+1}^N R_{ij} \right) \right) \right)} \end{aligned}$$

Avec :

n_k : indice du premier composant pour le $k^{\text{ème}}$ module

m_k : indice du dernier composant pour le $k^{\text{ème}}$ module

M : nombre total de modules

N : nombre total de composants

R_{ij} : valeur de la $i^{\text{ème}}$ ligne et $j^{\text{ème}}$ colonne de la matrice

Ainsi, $0 < C < 1$ et plus le ratio est proche de 1 meilleur est le niveau d'indépendance des modules du système. Une valeur de 0 correspond au cas où le système comporte un seul module.

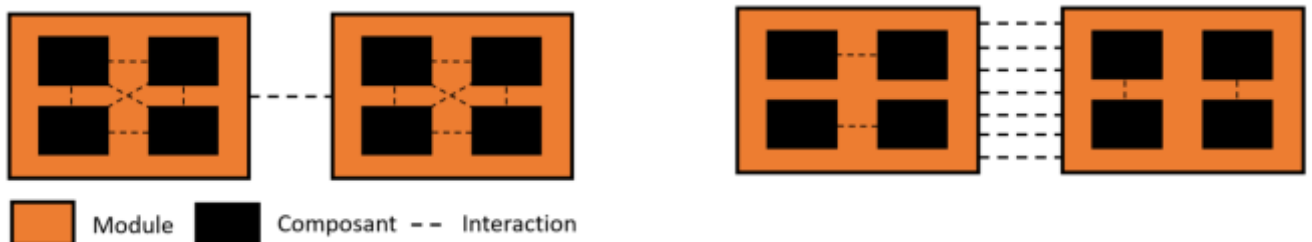


Figure 78: Configuration avec CI proche de 1 (à gauche) et proche de 0 (à droite)

- Guo and Gershenson (2003)

$$M_S = \frac{\text{\#interactions between the modules}}{\text{\#interactions_in_a_DSM}}$$

$$= \frac{\sum_{k=1}^M \left(\sum_{i=n_k}^{m_k} \left(\sum_{j=1}^{n_k-1} R_{ij} + \sum_{j=m_k+1}^N R_{ij} \right) \right)}{\sum_{k=1}^M \left(\sum_{i=n_k}^{m_k} \sum_{j=n_k}^{m_k} R_{ij} + \left(\sum_{i=n_k}^{m_k} \left(\sum_{j=1}^{n_k-1} R_{ij} + \sum_{j=m_k+1}^N R_{ij} \right) \right) \right)}$$

Avec :

n_k : indice du premier composant pour le $k^{\text{ème}}$ module

m_k : indice du dernier composant pour le $k^{\text{ème}}$ module

M : nombre total de modules

N : nombre total de composants

R_{ij} : valeur de la $i^{\text{ème}}$ ligne et $j^{\text{ème}}$ colonne de la matrice

Cette évaluation est également comprise entre 0 et 1.

- **Whitney et al. (1999)**

$$WI = \frac{\text{\#interactions_in_a_DSM}}{\text{\#elements_in_a_DSM}}$$

$$= \frac{\sum_{k=1}^M \left(\sum_{i=n_k}^{m_k} \sum_{j=n_k}^{m_k} R_{ij} + \left(\sum_{i=n_k}^{m_k} \left(\sum_{j=1}^{n_k-1} R_{ij} + \sum_{j=m_k+1}^N R_{ij} \right) \right) \right)}{N}$$

Avec :

n_k : indice du premier composant pour le $k^{\text{ème}}$ module

m_k : indice du dernier composant pour le $k^{\text{ème}}$ module

M : nombre total de modules

N : nombre total de composants

R_{ij} : valeur de la $i^{\text{ème}}$ ligne et $j^{\text{ème}}$ colonne de la matrice

- **Guo and Gershenson (2004)**

$$M_{G\&G} = \frac{\sum_{k=1}^M \left(\sum_{i=n_k}^{m_k} \sum_{j=n_k}^{m_k} R_{ij} / (m_k - n_k + 1)^2 \right) - \sum_{k=1}^M \left(\sum_{i=n_k}^{m_k} \left(\sum_{j=1}^{n_k-1} R_{ij} + \sum_{j=m_k+1}^N R_{ij} \right) \right)}{(m_k - n_k + 1)(N - m_k + n_k - 1)}$$

La particularité de cette méthode est d'être normalisé, c'est-à-dire de ne pas être dépendante de la taille de la matrice. Cet indicateur prend également des valeurs comprises entre 0 et 1

- **Yu et al. (2007)**

$$MDL = \frac{1}{3} \left(n_c \log n_n + \log n_n \sum_{i=1}^{n_c} cl_i \right) + \frac{1}{3} S_1 + \frac{1}{3} S_2$$

Avec :

n_c : nombre de modules

n_n : nombre de lignes ou colonnes de la DSM

cl_i : taille du module i

S_1 : nombre de cellules vides présentes dans un module ou un bus

S_2 : nombre de cellules de valeur 1 présentes entre les modules et les bus.

Ainsi, S_1 et S_2 mesurent l'information additionnelle nécessaire pour décrire la DSM en plus de l'information du nombre et de la taille.

(Cf article pour plus de détail).



Pour cet indicateur, plus la valeur de MDL est faible plus le système est considéré comme modulaire.

- **Holttä-Otto et De Weck (2007)**

Cette méthode propose une évaluation allant de 0 (système non modulaire, complètement « intégrale ») à 1 (système parfaitement modulaire)

$$SMI = \frac{1}{N} \arg \min_{\alpha} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\sigma_i}{\sigma_1} - e^{-|i-1|/\alpha} \right|$$

Avec :

σ_i : valeur singulière (issue d'une décomposition en valeurs singulières de la DSM)

α : facteur de décroissance exponentielle (cf article pour plus de détail)

- **Mattson and Magleby (2001)**

$$\text{Modularity metric} = \frac{N_{\text{modules}}}{N_{\text{functions}}}$$

Ainsi, plus cet indicateur est proche de 0 plus les fonctionnalités sont concentrés dans des modules distincts et meilleur est le niveau de modularité. Aussi si le nombre de modules est supérieur au nombre de fonctions (i.e. Modularity metric > 1) alors on peut considérer le système comme peu modulaire (et inversement).

[Annexe 7 : analyse fonctionnelle d'une box](#)
[Non fournie car confidentielle](#)

Références bibliographiques

- B.Jeffrey, K. N. (2001). Modular product architecture .
- F. Guo, G. (2003). Comparison of modular measurement methods based on consistency analysis and sensivity analysis . *ASME 2003 Design Engineering Technical Conferences* . Chicago .
- Hölttä-Otto, D. W. (2007). Degree od modularity in engineering systems and products with tecnical and business constraints . *Concurrent engineering: Research and application*, 113-126.
- Hölttä-Otto, K. (2012). Comparative analysis of coupling modularity metrics. *Journal of Engineering Design* .
- J.K. Gershenson, G. P. (2003). Product modularity: definitions and benefits. *Journal of Engineering Design*, 295-313.
- J.K. Gershenson, G. P. (2004). Product modularity: measures and design methods . *Journal of engineering design* , 33-51.
- Jung, W. (2017). New modularity indices for modularity assesment and clustering of product architecture . *Journal of engineering Design* , 1-22.
- LASTOVICKA, J. (1999). Lifestyle of the tight and frugal: theory and measurement . *Journal of consumer research* .
- mattson, M. (2001). The influence of product modularity during concept selection of consumer products . *ASME design engineering technical conferences* . Pittsburgh.
- Newcomb. (1998). Implication of modularity on product design for the life cycle. *Journal of Mechanicals Design*, 483-490.
- Pimmler, U., & D.Eppinger. (1995). Integration analysis of product decompositions . *ASME Design Theory and Methodology Conference*. Minneapolis : Massachussets Institure of Technology .
- Sergej von Janda, S. K. (2019). What frugal products are and why they matter: A cross-national multi-method study . *Journal of Cleaner Production* .
- Weyrauch, T., & Herstatt, C. (2016). What is frugal innovation ? three defining criteria . *Journal of frugal innovation* .
- Whitney, D. E. (2003). *Physical limits to modularity*. Massachusetts Institute of technology. Engineering systems division.
- Witney. (1999). Introducing knowledge-based engineering into an interconnected product development process. *ASME 1999 international design engineering technical conference* . Las Vegas .
- Yu. (2007). An information theoretic method for developing modular architectures using genetic algorithms . *Research in Engineering Design* , 91-109.
- Z. Siddique, D. (1999). Product platform design : a graph grammar approach . *1999 ASME Design Engineering Technical Conferences* . Las Vegas.



Index des figures

Figure 1: représentation schématique du principe de l'innovation frugale	14
Figure 2: La lampe à gravité	14
Figure 3: Le microscope en bambou	14
Figure 4: La Tata Nano	14
Figure 5: Le Tata swatch	15
Figure 6: Le Nokia 1200	15
Figure 7: Philippe Bihouix	15
Figure 8: Corentin de Chatelperron à bord du nomade des mers	16
Figure 9: La pyramide de Maslow	17
Figure 10: Parabole solaire pliable	17
Figure 11: Frigo du désert	17
Figure 12: mixeur low-tech	18
Figure 13: Pierre Rabhi	18
Figure 14: Synthèse des définitions d'innovation frugale, frugalité low-tech et sobriété	19
Figure 15: Choix des méthodes - phases du projet	23
Figure 16: choix des méthodes - contraintes du projet	23
Figure 17: histoire de la qualité au niveau industriel	25
Figure 18: Fonction / Critère / Exigence	26
Figure 19: Exemple de critère et d'exigence pour une voiture	26
Figure 20: Intégration du poids fonctionnel	26
Figure 21: Intégration des sous-poids fonctionnels	27
Figure 22: Intégration du niveau d'atteinte de l'exigence	27
Figure 23: catégories du NPF	28
Figure 24: Système parfaitement intégrale (à gauche) et système parfaitement modulaire (à droite)	29
Figure 25: modularité de type bus	30
Figure 26: modularité sur le circuit imprimé	31
Figure 27: Exemple de module interne	31
Figure 28: module externe connectable	31
Figure 29: module externe indépendant : le femtocell	32
Figure 30: DSM pour un système intégrale (à gauche) et un système très modulaire (chaîne) (à droite)	32
Figure 31: DSM pour un système de type bus	32
Figure 32: connections inter et intra-modulaires	33
Figure 33: Variation des facteurs	34
Figure 34: Exemple de combinaison	34
Figure 35: Matrices triviales de référence	34
Figure 36: Représentation des matrices triviales selon les facteurs	34
Figure 37: résultats valeur-p avec bus	35
Figure 38: résultats valeur-p sans bus	35
Figure 39: p-value souhaitées pour une méthode	35
Figure 40: Résultat analyse factorielle avec facteur bus	36
Figure 41: Résultat analyse factorielle sans facteur bus	36
Figure 42: corrélation entre les méthodes	36
Figure 43: intensité et nombre de connections	37
Figure 44: exemple de réorganisation d'une DSM	38
Figure 45: comparaison des méthodes d'évaluation avec MI	40
Figure 46: fairphone en vue éclatée	40
Figure 47: Maisons container	41
Figure 48: Rowenta Air Force	41
Figure 49: ESQCV	42
Figure 50: Matrice MET	42
Figure 51: Grille ADEME	43
Figure 52: Livebox 4	44

Figure 53: hiérarchisation des fonctions de la box	45
Figure 54: représentation des blocs fonctionnels de la box frugale 1	46
Figure 55: représentation des blocs fonctionnels de la box frugale 2	47
Figure 56: représentation des blocs fonctionnels de la box 3	47
Figure 57: Pertinence des phases projet pour l'ergonomie chez Orange	48
Figure 58: Pertinence des phases projet pour la qualité	49
Figure 59: blocs fonctionnels livebox 4 - vue de face de la carte mère	50
Figure 60: Interactions du processeur	51
Figure 61: Interactions du bloc "Power management"	51
Figure 62: Interactions de la carte mère	52
Figure 63: DSM binaire de la Livebox 4	52
Figure 64: exemple de représentation partielle de la livebox sous forme de DSM composants non binaire	53
Figure 65: dispositif expérimental de mesure du rendement énergétique	54
Figure 66: Evaluation des puissances des modèles de boxs frugales	55
Figure 67: Simulation du prix des modèles de boxs frugales	56
Figure 68: Catégories et critères du circularity score	60
Figure 69: matrice de notation du circularity score	60
Figure 70: Exemple de notation par catégorie	61
Figure 71 : Produit et milieux extérieurs	61
Figure 72: Fonction d'une analyse fonctionnelle	62
Figure 73: Contrainte d'une analyse fonctionnelle	62
Figure 74: exemple partiel d'une analyse fonctionnelle pour une box	62
Figure 75: exemple de hiérarchisation de fonctions	63
Figure 76: Exemple de découpage fonctionnel d'un ensemble moteur	66
Figure 77: Configuration pour Interactions = 1	68
Figure 78: Configuration avec CI proche de 1 (à gauche) et proche de 0 (à droite)	68

Sigles et acronymes

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
AFPIA	Association pour la Formation Professionnelle dans les Industries de l'Ameublement



TITRE DE L'OUVRAGE XERUM SEQUO EXCES SUNTUR MAIONSEQUI OLLAUT

Résumé Remporenis denis sequi occullabo. Ut doles digendem intis restiaepedi ommolupta porio estiore excest, nullor alibus essitinte alisquo corestrum nonsedi comnisi.

Magnia quam, quae ped modipsus volores erspedit volendae voluptament hitatem hil magnimi, si re possimil magnat el ipis dolum rem et quasperum volupid isquati dolo maio et verro ex et expelis delitas enia voluptaque latur? Maximil itiaepa nonsequi.

Alis qui debis ipsandaecae min eari rem rempore scillendae nissunt eos non reicimint eati tem ea nostio cus ab ide ea quiaspelent utatem harci aute siminctum cupta ant laboritibus eum et audaectis ernam fuga. Itatet utatibus coressunt, te lacearuntius sit quatincium lab is dolles non conetur magnam aliquas.

Magnia quam, quae ped modipsus volores erspedit volendae voluptament hitatem hil magnimi, si re possimil magnat el ipis dolum rem et quasperum volupid isquati dolo maio et verro ex et expelis delitas enia voluptaque latur? Maximil itiaepa nonsequi.

Essentiel à retenir ou exergue ou discours

marketing Abore doluptis isto
te mil isse vendion sector?
Ibusae vit quuntio rerunt.

*Itias ma nateceatate
perroratur, cus, te occatur?
Cessit qui nulparc hiliqui
quodignis aut ante porerorion
nit etusant utemolu pidelitibus.
Soloress imusanimin pro idero
volectus molorpo.*



www.ademe.fr

