



Le cycle de vie d'un système embarqué

Un livre blanc du Groupe de Travail Éco-conception d'Embedded France.

Dans un monde propulsé par l'évolution percutante de la technologie, l'impact environnemental des produits électroniques devient une préoccupation majeure. L'industrie des systèmes embarqués, qui joue un rôle crucial dans de nombreux secteurs, se trouve face à un enjeu à fort impact : faire preuve d'innovation tout en préservant notre environnement.

Le Groupe de Travail Éco-conception d'Embedded France a pour ambition de permettre aux acteurs de cette industrie de s'engager pleinement dans cette transition, et ce, qu'importe leur positionnement dans la chaîne de valeur. La création de ce groupe de travail, début 2023, est la suite logique d'une mobilisation d'Embedded France depuis plusieurs années sur ce sujet.

24 septembre 2024, Version 1.0

Abstract

Stimulé par les avancées technologiques fulgurantes, le monde dans lequel nous vivons nous amène à urgemment nous préoccuper de l'impact environnemental des produits électroniques. L'industrie des systèmes embarqués, qui occupe une place essentielle dans plusieurs domaines, est confrontée à un défi majeur qui est d'innover tout en préservant notre environnement.

Lorsque nous parlons d'impact environnemental, le premier domaine nous venant à l'esprit n'est pas le secteur de la technologie. Et pourtant, il est important de noter que la part du numérique dans les émissions de gaz à effet de serre est en constante croissance, et la tendance ne prévoit pas de s'inverser.

Le Groupe de Travail Éco-conception, formé de membres actifs et bénévoles de l'association des représentants français des logiciels et des systèmes embarqués "Embedded France", est un regroupement de professionnels actifs et reconnus du monde de l'embarqué. Ensemble, ils ont pour ambition de permettre aux acteurs de cette industrie de s'engager pleinement dans cette transition, et ce, qu'importe leur positionnement dans la chaîne de valeur.

Dans l'état actuel des choses, pour illustrer les enjeux du numérique responsable, des études et données s'appuyant sur un service numérique ou sur un équipement existent. Mais peu d'information est présente concernant un système embarqué dans sa globalité. Ce livre blanc consiste donc à définir ce qu'est le cycle de vie d'un système embarqué, en intégrant à la fois le hardware et le software, et à comprendre l'impact des différentes étapes de ce cycle.

Ce livre blanc inclut une présentation de la méthodologie de construction du cycle de vie d'un système embarqué, suivie des phases clés qui composent ce cycle de vie. Nous abordons donc la conception, le développement et l'implémentation. Nous examinons ensuite les étapes de production, les matières premières, puis la distribution, l'installation et l'utilisation. Enfin, nous étudions la fin de vie du produit. Pour l'ensemble de ces étapes, nous avons recueilli les principales bonnes pratiques en matière d'éco-conception. Pour finir, ce livre blanc met en lumière des axes d'améliorations et des actions à mener pour améliorer la prise en compte de l'éco-conception dans la vie des produits.

SOMMAIRE

Introduction – Motivations	5
A. COMPRENDRE LA DÉMARCHE ET LE CONTENU DE CE LIVRE BLANC	5
B. DÉFINIR LES CONCEPTS ÉTUDIÉS DANS CE LIVRE BLANC	8
C. POURQUOI EST-CE IMPORTANT ?	10
<i>I. Les étapes du cycle de vie d'un système embarqué</i>	13
A. PRÉSENTATION DE LA MÉTHODOLOGIE DE CONSTRUCTION DU CYCLE DE VIE COMBINANT HARDWARE ET SOFTWARE	13
1. Réflexion sur la méthodologie de construction du cycle de vie d'un système embarqué	13
2. Les étapes du cycle de vie d'un système embarqué	14
B. PROPOSITION DU CYCLE DE VIE D'UN SYSTÈME EMBARQUÉ	25
C. IMPLÉMENTATION ET CODAGE, CONCEPTION ET DÉVELOPPEMENT	26
1. Définition	26
2. Objectifs et sorties de cette étape	26
3. Bonnes pratiques existantes dans le cadre d'une démarche d'éco-conception	29
4. Manques identifiés dans le cadre d'une démarche d'éco-conception	31
D. MATIÈRES PREMIÈRES	32
1. Définition	32
2. Quelques constats	32
3. L'obtention des matières premières	33
4. Gestion des déchets	34
E. FABRICATION	35
1. Définition	35
2. Objectifs et flux de sortie de la fabrication	38
3. Bonnes pratiques existantes dans le cadre d'une démarche d'éco-conception	38
4. Manques identifiés pour l'éco-conception	39
F. INSTALLATION ET DÉPLOIEMENT	40
1. Définition	40
2. Objectifs et sorties de cette étape	40
3. Bonnes pratiques existantes dans le cadre d'une démarche d'éco-conception	42

4. Manques identifiés dans le cadre d'une démarche d'éco-conception	42
G. UTILISATION ET MAINTENANCE	44
1. Définition	44
2. Objectifs et sorties de cette étape	44
3. Bonnes pratiques existantes dans le cadre d'une démarche d'éco-conception	45
4. Manques identifiés dans le cadre d'une démarche d'éco-conception	49
H. VALORISATION ET FIN DE VIE	51
1. Quelques chiffres	51
2. Définition	51
3. État de l'art	52
4. Comment faire ? Bonnes pratiques ?	57
5. Manques identifiés dans le cadre d'une démarche d'éco-conception	58
Conclusion	59
Bibliothèque	62

Introduction – Motivations

Si votre lecture a débuté par le résumé, vous disposez maintenant d'une vue d'ensemble du document, présentant les principaux enjeux et objectifs. Cette nouvelle section développe ces éléments en contextualisant le sujet et en exposant les motivations sous-jacentes à cette publication. Elle justifie l'importance du sujet traité et introduit les problématiques auxquelles le livre blanc s'efforcera de répondre.

A. COMPRENDRE LA DÉMARCHE ET LE CONTENU DE CE LIVRE BLANC

Sans les citer, l'ensemble des auteurs de ce livre blanc sont des membres actifs et bénévoles du groupe de travail éco-conception de l'association Embedded France, ils sont tous des professionnels actifs et reconnus du monde des systèmes informatiques embarqués.

Embedded France est l'association des représentants français des logiciels et des systèmes embarqués.

Association de loi 1901, Embedded France se compose d'acteurs industriels, académiques et d'associations professionnelles représentatives de domaines intégrant des systèmes embarqués [1]. Le Groupe de travail éco-conception est actif depuis 2023. Il représente la suite logique d'une mobilisation au sein de l'association Embedded France depuis plusieurs années. Prenant appui sur une prise de conscience partagée par l'ensemble des membres, ce sujet était au cœur de l'édition 2022 des Assises de l'Embarqué, sous l'intitulé « Green Tech, Tech for Green, l'embarqué, levier de la transition écologique ».



Les membres portent une ambition haut niveau visant à contribuer à la réduction de l'impact de l'embarqué sur l'environnement. Un autre objectif de ce groupe de travail est de pouvoir permettre aux acteurs de s'engager pleinement dans cette transition quelle que soit leur industrie et leur positionnement dans la chaîne de valeur des systèmes embarqués [2].

La démarche suivie par le groupe pour l'écriture de ce livre blanc se veut avant tout élargie, pragmatique et propose une vision long-terme :

- **PRAGMATIQUE,**
car il ne s'agit pas d'inventer une nouvelle façon de concevoir et de fabriquer les systèmes embarqués (quoique) mais plutôt de s'interroger sur les meilleures pratiques et d'adapter les méthodologies existantes pour réduire significativement l'impact de l'embarqué sur l'environnement.
- **VISION LONG-TERME,**
car malgré une urgence, comprendre, modifier et faire perdurer des pratiques pour répondre au défi de la sobriété demande du temps.
- **ÉLARGIE,**
puisque ce travail ne s'adresse pas qu'aux équipes R&D, mais aussi à l'ensemble des parties prenantes d'un projet, par exemple équipes de sourcing, équipes de développement, support client, équipes marketing ou sponsors corporate.

À ce jour, pour illustrer les enjeux du numérique responsable, il existe des études et des données s'appuyant sur un service numérique (site web, application mobile) ou sur un équipement (ordinateur, télévision), mais peu ou rien en tant que tel présentant un système embarqué dans sa globalité. Ce livre blanc consiste donc à définir ce qu'est un cycle de vie pour un système embarqué et comprendre l'impact des différentes phases du cycle.

Après avoir donné des précisions sur les auteurs et leur démarche, il est important que le lecteur comprenne à qui cette publication s'adresse.

Le lecteur, professionnel ou non de l'embarqué, aura une accointance certaine avec ce domaine et les acteurs qui y participent. Notre objectif est qu'il puisse trouver dans cette publication les éléments suivants :

- **Clarifier l'impact environnemental** d'un système embarqué et comment réduire cet impact en comprenant le cycle de vie du système.
- Une compréhension des **effets systémiques positifs et négatifs**, en particulier des effets rebond.
- Identifier les **meilleures pratiques** pour améliorer la connaissance et la maîtrise de son produit embarqué dans le temps.
- Identifier des **gains économiques** : le livre blanc aide à identifier des moyens de réduire le gaspillage et d'améliorer l'efficacité.
- Disposer d'un **avantage concurrentiel** car les (futurs) consommateurs seront en demande de produits éco-conçus.

- Un moyen de **se conformer aux réglementations environnementales et sociétales** strictes en cours ou à venir et peut-être aussi à se mettre en conformité avec ses propres convictions.

C'est en tout cas la promesse que nous faisons et qui se traduit dans la ligne éditoriale adoptée.

Bien entendu, le lecteur retrouvera dans la suite de cette publication les différentes étapes du cycle de vie d'un système embarqué, en intégrant à la fois le hardware et le software. Il commence par une présentation méthodologique combinant ces deux aspects, suivie des phases clés telles que la conception, le développement et l'implémentation. Le document examine ensuite les étapes de production, du choix des matières premières, puis aborde la distribution, l'installation et l'utilisation (phases de la maintenance et mise à jour). Enfin, il traite de la fin de vie du produit. Pour chacun de ces items, nous mettons l'accent sur les bonnes pratiques et les lacunes en matière d'éco-conception. La conclusion présente les actions à mener pour améliorer ces processus.

B. DÉFINIR LES CONCEPTS ÉTUDIÉS DANS CE LIVRE BLANC

Le contenu de ce livre blanc vous semble maintenant clair ? Tâchons, dans les prochaines lignes, de donner des définitions des principaux concepts qui sont utilisés.

Difficile de définir un système embarqué de manière précise. Mais quelques définitions sont couramment utilisées. Un système embarqué **est une combinaison de matériels et logiciels permettant de remplir une ou plusieurs fonctions spécifiques avec des contraintes plus ou moins sévères** [3]. Certains le définissent par ses caractéristiques.

Généralement, un système embarqué :

- dispose de ressources limitées,
- doit être le moins cher possible,
- ne doit pas consommer d'énergie inutilement,
- exécute un logiciel dédié aux fonctionnalités spéciales,
- est soumis à de nombreuses contraintes dictées par l'environnement.

Citons également Pierre FICHEUX pour comprendre la spécificité de l'objet de notre étude : “un système embarqué est susceptible d'être utilisé dans un environnement matériel de faibles performances (si l'on compare au PC de bureau d'aujourd'hui). Si l'ajout de quelques Mo de mémoire sur un PC de bureau n'a pas une grosse influence sur le budget d'un utilisateur, le gain de quelques Mo sur un produit de grande consommation (téléphone, équipement automobile, organisateur personnel) a une énorme influence sur le coût final” [4].

Un autre concept majeur à définir est le cycle de vie. Notons cette fois un consensus sur la définition appliquée à un produit : le cycle de vie d'un produit est l'ensemble de toutes les phases qu'il traverse, de sa conception jusqu'à son extraction du marché et son recyclage.

Nous pensons également que le lecteur est en droit d'attendre une définition de ce que nous entendons par éco-conception.

La norme ISO 14006 définit l'éco-conception (ou écoconception) comme une « approche méthodique qui prend en considération les aspects environnementaux du processus de conception et développement dans le but de réduire les impacts environnementaux négatifs tout au long du cycle de vie d'un produit ».

De façon pragmatique, adopter une démarche d'éco-conception, c'est répondre aux besoins des utilisateurs, en améliorant son impact environnemental. Et certains ajoutent l'assertion : tout en restant économiquement viable.

La définition précédente nous amène à vouloir comprendre ce qu'est l'impact environnemental. L'ADEME, l'Agence gouvernementale de la transition écologique, définit l'impact environnemental comme **l'ensemble des modifications de l'environnement (négatives ou positives) engendrées par un produit, de sa conception à sa fin de vie (son cycle de vie, NDLR).**

Les principaux impacts environnementaux portent sur :

- le changement climatique (évalué via les émissions de gaz à effet de serre (GES)),
- les consommations de ressources (matières premières, énergie, espaces, etc.),
- les atteintes à la biodiversité (artificialisation des sols, impact sur la faune, la flore, etc.),
- les pollutions diverses (air, eau, sol, etc.) dont celles résultant de l'extraction des ressources, de la fabrication industrielle et du traitement des déchets.

Par ailleurs, les principes, concepts, techniques, bonnes pratiques, ..., cités dans ce livre blanc peuvent être adaptées en fonction des différentes situations applicatives et des différentes exigences auxquelles est soumise la large diversité de systèmes embarqués.

C. POURQUOI EST-CE IMPORTANT ?

Depuis 2019, le niveau de CO₂ dans l'atmosphère terrestre a atteint un niveau qui n'avait pas été atteint depuis 3 à 5 millions d'années. Une espèce sur huit, animale et végétale, risque de disparaître à brève échéance, le processus est d'ailleurs largement engagé. L'augmentation des températures s'accélère. Chaque année, des records de température à l'échelle mondiale sont atteints.

Adopté en 2015 par 195 signataires, l'accord de Paris a pour objectif de réduire les émissions de GES au plus vite pour atteindre le niveau net zéro dans la seconde moitié du XXI^e siècle : chacun possède sa propre feuille de route (= Contributions Déterminées au niveau National - CDN) pour y arriver.

Pourtant, presque rien n'a été fait depuis 2015, les émissions de GES ont continué à augmenter et la température mondiale également, et avec elle les catastrophes climatiques se sont accélérées et aggravées (tempêtes, inondations, sécheresses, etc). Par exemple, l'accord de Paris affirmait en 2015 : "Son objectif à long terme, en matière de température, est de maintenir l'augmentation de la température moyenne de la planète bien en dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels, et de préférence sans dépasser +1,5 °C." Or, en 2024, on est à +1,5 °C, et puisque que l'augmentation de température est la conséquence des émissions de CO₂ des années précédentes, la température va encore augmenter, et ce, de façon inévitable.

L'Union Européenne s'est ainsi donnée l'objectif ambitieux de devenir la première économie et société neutre pour le climat en 2050 : la première étape étant de réduire ses émissions d'ici à 2030 d'au moins 55% par rapport aux niveaux de 1990.

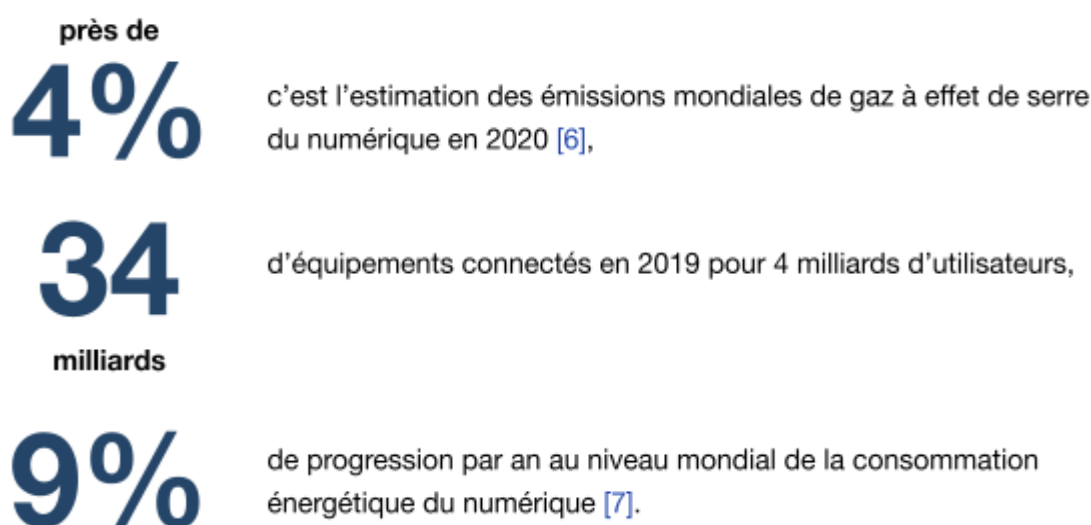


Figure 1 : les objectifs de développement durable adoptés par l'ONU [5]

L'ONU affiche dans ses objectifs de développement durable, la préservation de l'environnement et la lutte contre le changement climatique. Selon nos convictions, il est de la responsabilité de chaque acteur du secteur de l'embarqué de s'interroger sur sa capacité à réduire son impact environnemental. L'utilisateur a sa part de responsabilité, mais en amont les équipes de conception et de définition des produits en ont une également, en intégrant la dimension environnementale dans leur démarche. Quand un fabricant souhaite qu'un produit électronique soit produit de façon éco-responsable, cela implique des méthodes et des indicateurs adaptés. Cela exige parfois un changement radical de paradigme.

Le secteur de la tech (extension du numérique à l'ensemble des systèmes électriques / électroniques à forte dominante logicielle) n'est pas le domaine qui vient tout de suite à l'esprit lorsque l'on évoque impact environnemental et émissions de gaz à effet de serre. Pourtant, le numérique est plus émetteur que le secteur aérien et surtout connaît une augmentation notable depuis une quinzaine d'années. La part du numérique dans les émissions de GES est ainsi en croissance non linéaire (et la tendance n'est pas à l'inversion...).

Voici quelques chiffres issus des publications de NUMEUM et de l'ADEME pour illustrer ce propos :



Les effets des systèmes embarqués sur l'environnement sont nombreux. Ils résultent principalement de la consommation croissante d'énergie nécessaire à l'extraction des métaux rares pour la fabrication des équipements, ainsi que de l'utilisation de ces dispositifs (PC, objets connectés...), des réseaux Internet et télécoms, et du stockage des données. L'obsolescence programmée des appareils qui réduit volontairement leur durée de vie, est une source de préoccupation, tout comme la pollution liée à leur fabrication et recyclage. Le monde de l'embarqué a parfois échappé à l'urgence environnementale qui touche d'autres secteurs de l'économie, tels que l'énergie ou l'automobile, mais la situation n'est plus tenable.

Selon l'ADEME (2023), la moitié des Français se questionne systématiquement sur l'impact négatif des produits qu'ils achètent sur la santé et/ou l'environnement. Cette préoccupation joue

un rôle majeur dans l'évolution des habitudes de consommation. 78% des personnes interrogées déclarent agir en faveur d'une consommation durable. Toujours dans la même étude, pour 90% des Français, il faudrait adapter le modèle économique pour tenir compte des enjeux de santé et de respect de la planète. Ils demandent ainsi davantage de transparence sur les impacts sanitaires et environnementaux des produits et plus d'engagement de la part des entreprises, notamment à travers leurs choix de produits et la publicité.

Plus de 90 % des chefs d'entreprise considèrent, eux aussi, que la décarbonation est une priorité dans leur activité, à la fois pour attirer des talents ou conserver leur niveau d'activité [8].

Pour une entreprise, réfléchir au cycle de vie de son produit apparaît donc comme une démarche qui a du sens d'un point de vue purement économique.

Cédric O., Ministre du Gouvernement français, a déclaré lors du colloque « Environnement et numérique » du 8 octobre 2020 : “Oui, nous devons entrer dans une phase déterminée de maîtrise de l’empreinte environnementale du numérique”.

En juillet 2021, le Conseil d'État ordonne au Gouvernement de prendre toutes les mesures pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. L'objectif est de réduire d'ici à 2030 les émissions de 40% par rapport aux niveaux de 1990 pour respecter les engagements pris par la France dans le cadre de l'Accord de Paris, tels qu'ils ont été transcrits dans la loi par le Parlement.

En conclusion de cette section, le lecteur comprend qu'en s'intéressant au cycle de vie d'un produit, un acteur de la filière embarqué peut identifier les étapes clés où des améliorations peuvent être apportées pour réduire son impact environnemental. L'éco-conception permet d'optimiser l'utilisation des ressources, de minimiser les déchets et de prolonger la durée de vie des produits. Cela conduit non seulement à une attractivité accrue pour ce même produit, mais aussi à un impact sur la société et la planète en amélioration. Adopter cette approche est donc essentiel pour allier performance économique et durabilité écologique. La suite de cette publication va détailler les différentes étapes du cycle de vie d'un système embarqué en mettant l'accent sur les bonnes pratiques et les lacunes en matière d'éco-conception.

I. Les étapes du cycle de vie d'un système embarqué

A. PRÉSENTATION DE LA MÉTHODOLOGIE DE CONSTRUCTION DU CYCLE DE VIE COMBINANT HARDWARE ET SOFTWARE

1. Réflexion sur la méthodologie de construction du cycle de vie d'un système embarqué

Les premiers travaux de réflexion sur la conceptualisation du cycle de vie d'un système embarqué ont quelque peu démarré de manière biaisée : à notre connaissance, il n'existe aucun cycle de vie d'un système embarqué. Ce manque d'information nous a amenés à élargir le champ de notre réflexion et à puiser une source d'inspiration dans le cycle de vie d'un produit électronique et celui d'un service numérique, dont leur présence est certaine dans les recherches réalisées.

La construction du cycle de vie d'un système embarqué s'est donc formalisée en partant d'une base partagée du cycle de vie d'un produit électronique, souvent utilisé pour évoquer une télévision ou un smartphone, et celui d'un service numérique, à savoir un site web ou une application mobile. La compilation de ces deux cycles de vie nous permet alors d'orienter notre travail de réflexion sur la conception du cycle de vie d'un système embarqué.

Nous avons étudié, nommé et relié l'ensemble des étapes du cycle de vie d'un produit électronique et celui d'un service numérique dans tous leurs composants pour permettre ensuite d'établir un cadre générique des différentes étapes que contient le cycle de vie d'un système embarqué. L'importance de l'impact de chaque étape sur l'ensemble du cycle de vie a été appréciée, ainsi que l'impact indirect que les différentes étapes ont entre elles.

La conceptualisation du cadre générique a permis par la suite de formaliser une définition claire de chaque phase du cycle, de ses objectifs et de ses sorties, dans la double dimension équipements/composants et software.

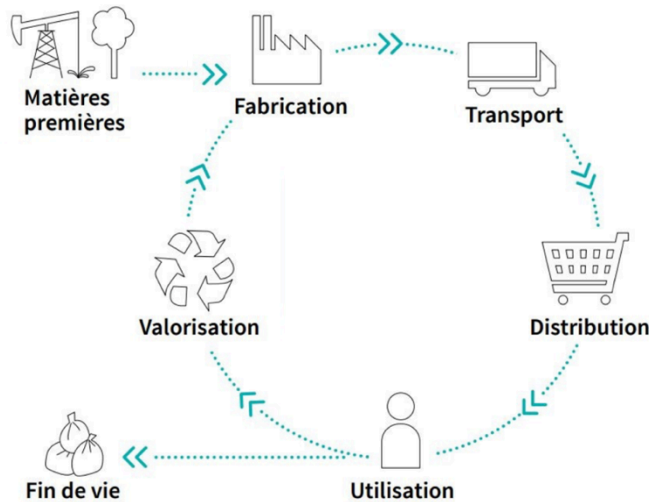
Le champ de réflexion sur la zone d'étude de chaque étape a régulièrement été évoqué, à savoir jusqu'où va le cadre de chaque phase du cycle ? Cela a été apprécié au cas par cas pour chaque étape avec le souci malgré tout de ne pas aller trop loin pour que la synthèse permette d'avoir une présentation homogène pour chaque étape. L'objectif est d'essayer de rester assez haut niveau tout en proposant des définitions précises et claires.

L'ensemble des étapes du cycle de vie d'un système embarqué ne seront pas abordés dans ce livre blanc. Bien que définies comme essentielles par l'ensemble des contributeurs, les étapes Transport et Distribution / Commercialisation ne seront pas développées. Aucune expertise sur le sujet n'a été identifiée au sein du Groupe de Travail. Toutefois, elles peuvent figurer sur les différents schémas.

2. Les étapes du cycle de vie d'un système embarqué

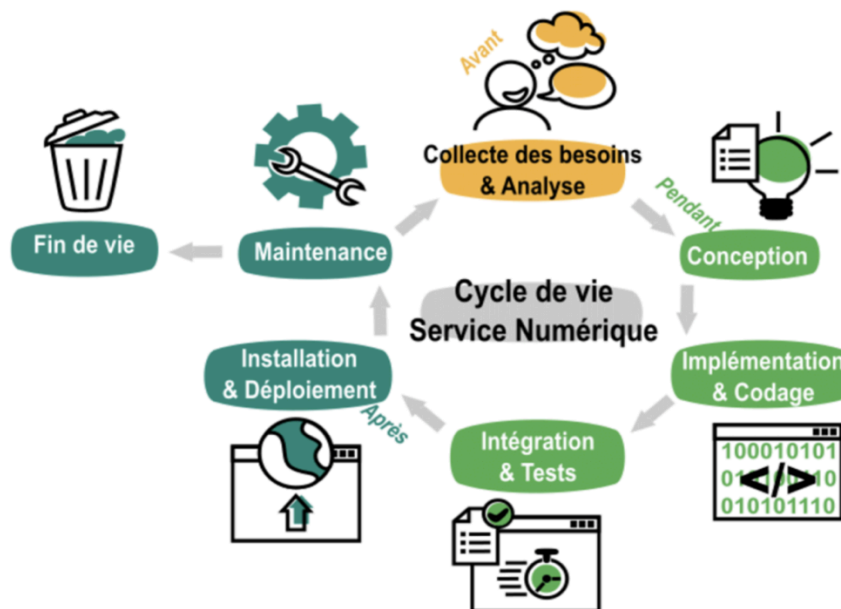
Comme contextualisée précédemment, la construction du cycle de vie d'un système embarqué s'est formalisée en partant de deux bases existantes, le cycle de vie d'un produit électronique et celui d'un service numérique, présentés visuellement ci-dessous.

→ Cycle de vie d'un produit électronique – Base de travail



Source : <https://label-nr.fr/les-bonnes-pratiques-du-numerique-responsable/>

→ Cycle de vie d'un service numérique – Base de travail



Source : Cycle de vie d'un service numérique, Marie Chevalier, 2021.

● **IMPLÉMENTATION ET CODAGE, CONCEPTION ET DÉVELOPPEMENT**

Absente du cycle de vie d'un produit électronique, il a été remonté par l'ensemble des contributeurs que l'étape Conception / Développement doit apparaître. Étant donné que la naissance d'un produit électronique se matérialise forcément par la production d'un cahier des charges, suivie par l'élaboration d'un dossier de définition et d'un dossier de fabrication, l'étape de Conception / Développement doit être considérée lorsqu'on étudie le cycle de vie d'un système embarqué. La mention « élaboration d'un cahier des charges » pourrait être préférée, mais au regard de l'éco-conception, c'est le terme « conception » qui est majoritairement employé.

L'emplacement de cette étape soulève quelques interrogations, notamment, parce qu'elle est partie centrale du cycle de vie d'un système embarqué et impactante sur les autres étapes qui l'entourent : transport, utilisation, maintenance. Faut-il pour autant la faire figurer au centre du schéma ? Il a été retenu que la faire figurer visuellement au centre rendrait la lecture du schéma plus difficile.

Sous l'angle du service numérique, la phase Conception / Développement comprend la définition du cahier des charges et des spécifications de la partie numérique du système embarqué, ainsi que le développement du code. Bien qu'il ait été remonté que la Commission Européenne ne prenne pas en compte la phase de conception des services numériques, il a été décidé de maintenir sa présence sur le schéma et d'en faire l'étape de départ.

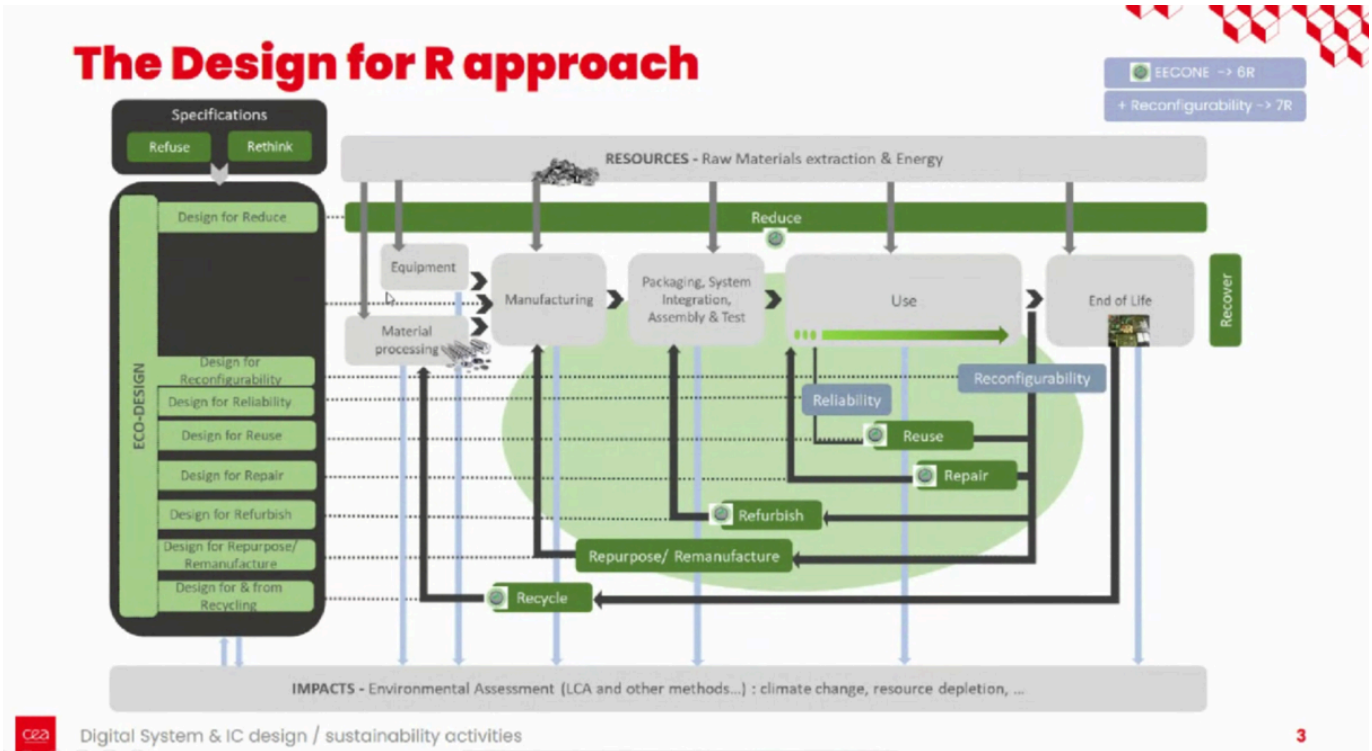
Il a été acquis qu'un découpage de cette phase en plusieurs étapes soit nécessaire pour ensuite interroger chaque étape sur les principes à appliquer si le sujet était abordé sous l'angle de l'éco-conception.

Néanmoins, il est important de parler des spécifications et de l'importance globale de cette phase en termes d'impact sur les autres phases du cycle de vie. Il a été remonté que le sujet de l'interfaçage entre chaque étape de cette même phase doit être travaillé.

A. Étape Spécification

Il est intéressant d'aborder la phase spécification sous l'approche du 9R Framework [9]. L'époque des 3R est maintenant révolue : l'économie circulaire intègre 9 dimensions clés, représentées par les 9R : Refuser (R0), Repenser (R1), Réduire (R2), Réutiliser (R3), Réparer (R4), Rénover (R5), Refabriquer (R6), Réutiliser (R7), Recycler (R8) et Récupérer (R9).

Les 9R sont le fondement d'un cadre économique circulaire qui analyse comment les matériaux peuvent être utilisés et réutilisés en fonction de leur plus grande valeur, de manière à minimiser les déchets et la dégradation environnementale. Les 9R peuvent être mis en œuvre à différentes étapes du cycle de vie d'un système embarqué afin de créer un flux de produits et de matières circulaires.



Source : Livre blanc "ECS Sustainability and Environnemental Footprint" - November 13, 2023 [10]

Il faut donc repenser le produit dès la phase de conception, c'est un des « R » les plus efficaces en termes d'impact, on peut repenser le business model par exemple. L'humanité a un intérêt à conserver le produit le plus longtemps possible, et donc à étendre sa durée de vie. La fin de vie doit être pensée dès le début. La réparabilité, le reconditionnement sont aussi possibles sur différentes fonctions.

L'une des techniques peut aussi être de réaliser des petites preuves de concept ou des maquettes de manière à tester très tôt l'usage des fonctionnalités, la qualité...

B. Étape Conception

Il est nécessaire de faire la mesure d'impact au plus tôt. Par exemple, un outil a été proposé par le CEA [11], acteur de la recherche scientifique et technologique, permettant de réaliser une Analyse de Cycle de Vie (ACV), permettant d'apporter des premières estimations. Il s'agit d'Appa LCA, Automatable, Portable and Parametric Life Cycle Assessment. Cela permet de fournir une première équation environnementale (modèle d'impact) pour que le designer soit autonome avec ce modèle d'impact. Cela permet également de faire des modifications au plus tôt dans la conception du produit.

La maquette permet de se poser les questions de réparabilité, réutilisabilité et recyclage. Le prototype quant à lui permet de valider les choix d'éco-conception fait lors du maquetage (réparabilité, réutilisabilité et recyclage) et de poser les questions de matériaux, de sourcing qui

sont essentielles elles-aussi pour l'éco-conception. Dans ce cadre, la différence est bien faite entre maquette et prototype de la façon suivante : Maquette > Prototype à l'image de la série > Prototype industrialisé.

Par exemple, 6tron [12], qui est un environnement de développement de solutions professionnelles dans le domaine de l'Internet des Objets Industriel (IIoT), développé par le CATIE [13], Centre Aquitain des Technologies de l'Information et Électroniques, sert à faire du maquettage. La maquette permet de représenter des éléments au niveau unitaire. Le prototype permet de valider la spécification et de préparer à l'industrialisation. Nous pensons que ce type de démarche par étapes et réflexivité est une clé de l'éco-conception.



• MATIÈRES PREMIÈRES

L'enjeu de l'échelle à laquelle se positionner pour aborder l'étape Matières premières a été identifié pour ce travail. Il a été décidé que le choix de la granularité conditionnera l'information qui sera disponible et exploitable via les bases de données existantes.

Le prisme choisi est celui de la fabrication des semi-conducteurs (qualification des principales matières premières en se basant sur un exemple). De manière à ne pas entrer trop dans les détails sur cette étape de mise en place des définitions, deux aspects sont ressortis :

- un aspect réglementaire,
- un aspect sur la mesure d'impact.

Le travail a été ensuite divisé en actifs et passifs qui font appel à différents matériels et donc matériaux. Le réseau, quant à lui, doit être traité avec les data-centers comme un service informatique. L'ensemble réseaux et data-centers est essentiel au fonctionnement de nombreux systèmes embarqués : voitures, téléphones, objets connectés,... Étant vu comme l'utilisation d'autres appareils embarqués permettant la communication entre un appareil et un autre, le réseau n'a de ce fait pas été inclus dans les matières premières.

Il a été décidé de considérer les matières premières comme étant l'ensemble des matières d'un système embarqué constitué par le total d'une Bill Of Materials (BOM), ainsi que du Printed Circuit Board (PCB), de l'assemblage sur PCB, des pièces mécaniques, et de l'ensemble des entrées et sorties du système (câbles, cordon, fibre). Les entrants pour les processus et procédés (physico-chimiques...) de fabrication de ces constituants doivent également être considérés.

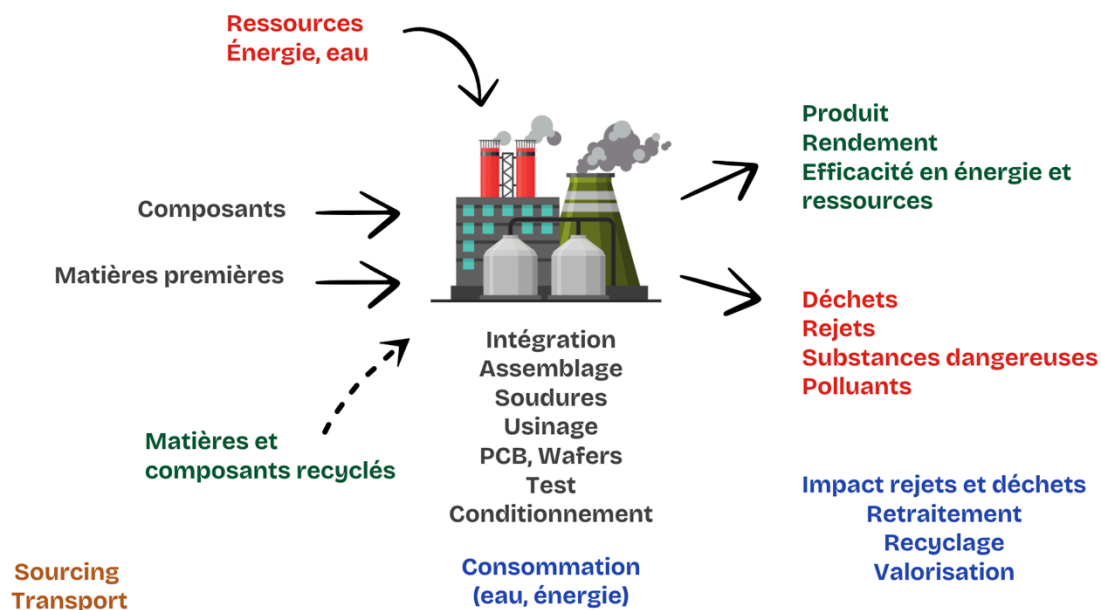
Tous les entrants sont désormais soumis à des réglementations ou directives (RoHS [14], REACH [15]). Par exemple, REACH est un règlement européen qui est piloté par l'Agence européenne des produits chimiques (ECHA) qui « cible » les substances et les matériaux via un processus d'évaluation, d'autorisation, de restriction ; tous les fabricants européens et importateurs de substances ont l'obligation de déclarer leurs substances chimiques auprès de l'ECHA et les produits se doivent d'être en conformité.



• FABRICATION

L'étape de fabrication définit la transformation, l'assemblage et l'intégration de matériaux bruts, de composants (ou sous-systèmes) pour obtenir un produit plus complexe.

Au regard des cycles de vie étudiés, et l'étape Développement ayant été associée à la phase Conception, il a été décidé que l'étape Fabrication prendrait en compte les dimensions Intégration et Test, sans pour autant les faire figurer comme tel dans le nommage de l'étape. Un cadre général a été établi pour visualiser ce que seraient les entrants et sortants qui permettent de caractériser cette étape de fabrication d'un système embarqué.



Plusieurs interrogations ont donc émergé :

A. Que prendre en compte en tant qu' « Entrants / Sortants » ?

Pour la fabrication, ce qui rentre, ce sont les matières premières, les composants, l'eau, l'énergie, dans l'usine ; ce qui sort représente ce qui est produit et ce qui va être vendu, plus les éventuels rejets/déchets.

B. Quelle mesure de l'impact environnemental de la carte électronique ?

Il existe des bases de données qui permettent de définir des critères sur les impacts environnementaux, sur la partie assemblage et fabrication, impact en fonction de la nature dont est produite l'électricité. Le principe est de partir de la nomenclature (BOM) de la carte pour ensuite rapprocher chaque nature des composants d'un référentiel. Sur cette partie, on voit bien le lien entre la conception et cette étape de fabrication : par exemple, avoir une méthodologie d'optimisation du logiciel embarqué peut permettre de

choisir un processeur qui aura un impact environnemental plus réduit (mais attention à prendre en compte les effets rebond).

Ces échanges ont fait naître une question sur la réparabilité, surtout concernant l'existence de référentiels. Étant donné qu'il y a des éléments réglementaires qui imposent un indice de réparabilité, la question du périmètre étudié et de l'emplacement du curseur est évoquée. Ce sujet est au cœur du projet EECONE [16], l'European Ecosystem for Green Electronic, qui consiste à disposer de métriques afin de répondre à l'objectif de réduire les déchets électroniques (circuits intégrés, cartes, systèmes).



- **TRANSPORT**

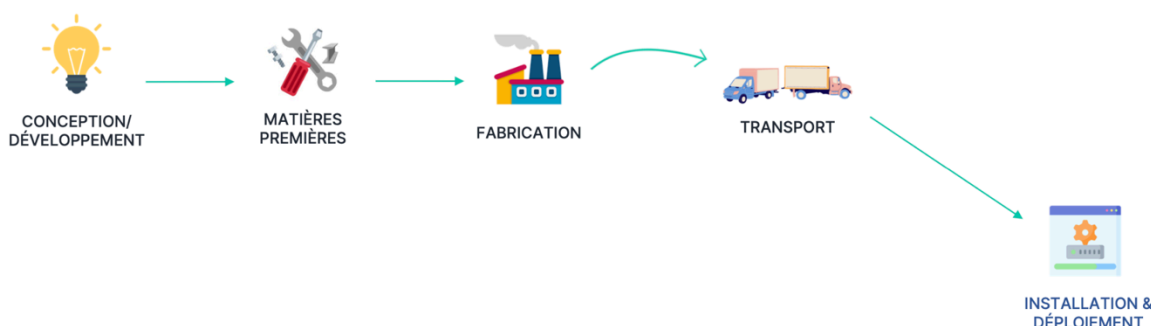
Les actions et initiatives visant à réduire l'impact du transport sont assez documentées. Par ailleurs, cette activité est connue et bien identifiée par les concepteurs. Ce livre blanc fait ne détaille pas ce sujet. Pour plus d'information, se reporter au site vie-public.fr [17].



• INSTALLATION / DÉPLOIEMENT

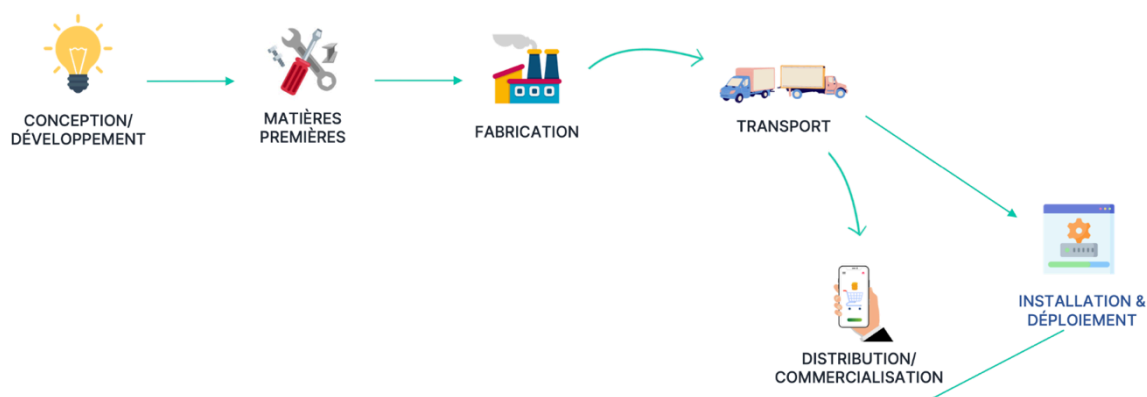
L'étape Installation / Déploiement réside dans la manipulation qui est exécutée une seule fois pour mettre en service le produit embarqué à son premier démarrage. Elle peut être automatisée, réalisée par le client en suivant des instructions, ou bien par le fournisseur lui-même. Il s'agit d'une étape transitoire. L'objectif même est la mise en service : placer, démarrer, connecter et tester. Cette phase comprend le matériel mis en service en B2B, à la fois dans une grosse industrie et chez le client.

Cette étape peut avoir un vrai impact dans les choix techniques, qui sont à anticiper. Les exigences d'installation peuvent être formulées dans les spécifications, mais encore une fois, cela peut dépendre de la taille des entreprises concernées par le sujet.



• DISTRIBUTION ET COMMERCIALISATION

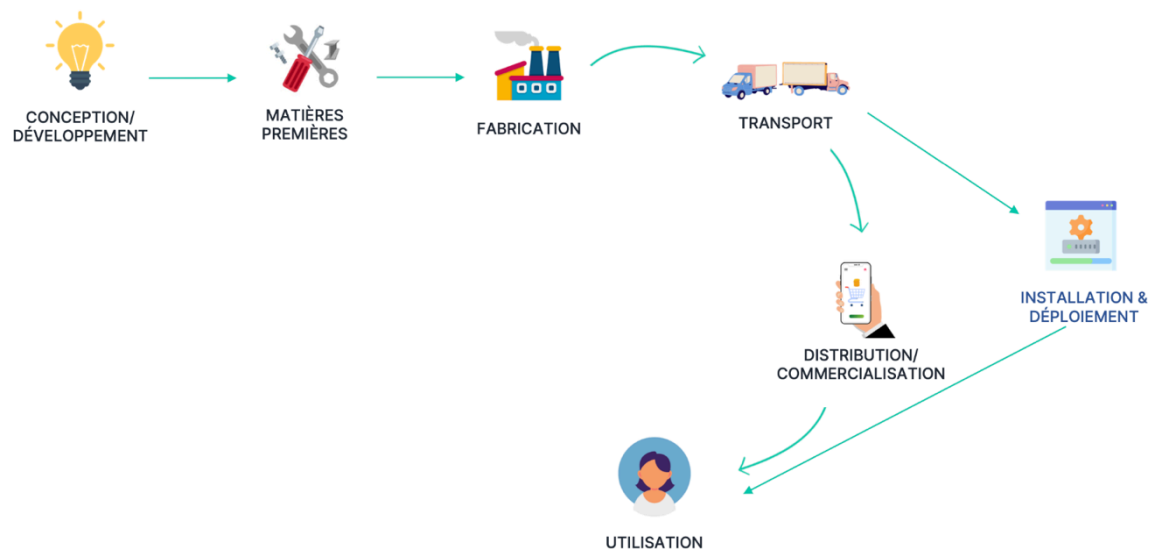
La distribution et la commercialisation font pour l'essentiel référence au secteur du retail. Comme pour l'activité de transport, de nombreuses initiatives sont mises en œuvre pour réduire l'impact de cette activité. Ce livre blanc fait l'impasse sur ce sujet.



• UTILISATION

Le contenu même de l'étape Utilisation a suscité des échanges du fait d'une logique de réemploi d'un même équipement, au sein d'une même entreprise ou d'une même famille, ou via la revente sans passer par la case « Valorisation », il convient alors de représenter cela sur le schéma.

En lien avec l'utilisation, très vite est apparu le sujet de la maintenance qui n'était pas représenté sur le schéma initial. Il a été convenu que cette notion devait figurer dans le cycle de vie d'un système embarqué, et de manière logique, être reliée à l'usage.



• MAINTENANCE

Une nouvelle étape rejoint le cycle de vie d'un système embarqué : Maintenance / Mise à jour. Absente du cycle de vie d'un produit électronique et nommée « Maintenance » dans le cycle de vie d'un service numérique, la décision d'ajouter l'étape Maintenance / Mise à jour sur le cycle de vie d'un système embarqué a été unanime.

En effet, elle symbolise un relais important à l'utilisation d'un produit électronique pour plusieurs raisons telles que :

- Certains systèmes embarqués sont lourds et ont une durée de vie longue, par exemple les avions, trains, véhicules, robots, drones,..., ce qui implique par nature un travail de maintenance projeté sur une longue période.
- Certains corps de métier et spécialités imposent de conserver en stock des produits et/ou pièces scientifiques sur plusieurs dizaines d'années, (par exemple dans l'avionique ou le nucléaire).
- L'obsolescence programmée a un réel impact sur les équipements.
- Le souhait de la réglementation est de favoriser l'allongement de la durée de vie des produits [18].

La phase Maintenance est associée à la phase Utilisation. Elle permet de garantir l'usage dans le temps. Le terme « réparabilité » a été également évoqué, mais il renvoie à la nécessité de penser cette réparabilité en amont pour qu'elle soit mise en œuvre dans la phase Utilisation / Maintenance.

Comme pour la partie matérielle et électronique, l'utilisation du système embarqué implique aussi, pour la partie logicielle, de devoir prendre en compte la Maintenance. On peut donc observer un parallèle dans ce sujet d'Utilisation / Mise à jour entre la partie hardware et la partie software.

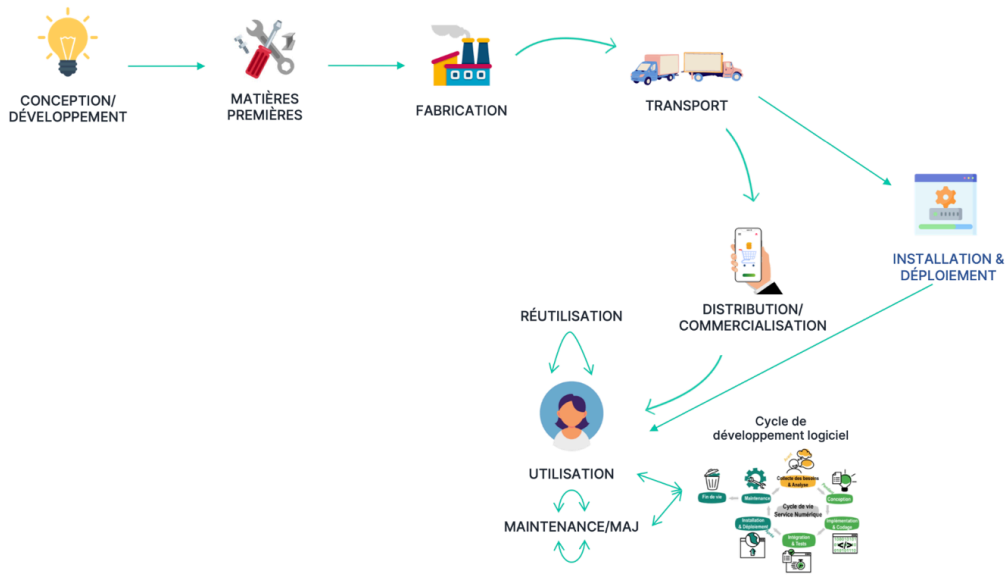
Néanmoins, pour la partie logicielle, la mise à jour, par exemple, l'ajout de nouvelles fonctionnalités, la correction de bugs ou encore l'évolution des standards de communication, telle que la publication d'une nouvelle norme **Bluetooth** qui accompagne l'abandon de la version la plus ancienne, rendant certains systèmes/objets/appareils obsolètes, avec obligation d'une mise à jour logicielle dans le meilleur des cas, ou obligation de remplacer le hardware dans le pire des cas, nécessite de reprendre une logique de cycle de développement logiciel, mais aussi matériel. En effet, l'utilisation génère du logiciel à développer (par exemple, les mises à jour régulières dans un véhicule). Nous pouvons alors noter que le schéma repart dans le cycle de Conception - Fabrication avec du développement, du codage, du test... Le cycle de vie du service numérique doit donc être repris pour faire apparaître une boucle au sein de la phase Utilisation.

Enfin, la notion d'Utilisation peut aussi être alimentée par les habitudes d'usage, par les retours clients, mais également dans la phase de Conception pour une nouvelle version du produit et ses évolutions, d'où l'ajout d'une dépendance qui relie les phases Utilisation et Conception.

À plusieurs reprises, il a été évoqué le fait que chaque phase n'a pas le même impact dans le bilan global du système embarqué. Il a été précisé également que l'approche généraliste qui est la nôtre sera évidemment déformée sur le rôle de l'impact de certaines étapes du fait des particularités de l'équipement considéré (montre connectée versus centrale nucléaire).

Finalement, l'étape Maintenance est alors regroupée avec les aspects de réparation, remise en service et requalification.

L'allongement de la durée de vie des produits, par exemple via l'extension de la garantie, pourrait avoir des impacts systémiques majeurs. Les fabricants seraient contraints de créer des produits plus durables et réparables, favorisant ainsi la réparation locale, l'emploi, la réutilisation et le recyclage, tout en générant de nouveaux enjeux environnementaux liés à la logistique et au reconditionnement. En conséquence, cela entraînerait une réduction des achats, de la production, de l'extraction des ressources et de la pollution, avec des effets globalement positifs.



● **VALORISATION / RECONDITIONNEMENT - FIN DE VIE**

Pour symboliser la phase Valorisation d’autres termes ont été évoqués : « refurbishing », « recyclage » et « transformation de la matière ». Pour comprendre au mieux ses limites et ce qu’elle inclut, la phase Valorisation doit être davantage précisée. Il a été proposé de l’enrichir en ajoutant une étape liée au reconditionnement.

On retrouve une spécificité des systèmes embarqués sur l’étape « transformation de la matière » avec les composants sur étagères qui peuvent être réutilisés.

L’étape Valorisation / Reconditionnement est traitée conjointement avec l’étape Fin de vie.



B. PROPOSITION DU CYCLE DE VIE D'UN SYSTÈME EMBARQUÉ



C. IMPLÉMENTATION ET CODAGE, CONCEPTION ET DÉVELOPPEMENT

1. Définition

La première étape du cycle de vie d'un système embarqué est une phase regroupant les aspects implémentation, codage, conception et développement. En amont de cette phase, et pris en compte dans le cadre du cycle de vie présenté ici, on retrouve également l'étape de spécification du système.

Ces différentes étapes sont les phases du cycle de vie dans lesquelles nous avons le plus de leviers à activer en matière d'éco-conception [19]. En effet, les décisions de conception prises au plus tôt dans le cycle de vie du produit ont le plus d'impact en termes d'économie de matière, de maintenabilité, de recyclabilité... On peut rapprocher cela de l'impact financier de la détection d'une erreur ou d'un défaut au long du cycle de vie : plus tôt cette erreur, ou ce défaut, est détectée, moins son impact financier est grand. L'éco-conception entre en jeu dans ces phases en ajoutant un axe de réflexion qui est l'efficacité énergétique, en plus des axes de performance et de prix.

2. Objectifs et sorties de cette étape

SPÉCIFICATION

La phase de spécification permet de **décrire les exigences s'appliquant au produit / service** ainsi que les besoins fonctionnels des utilisateurs.



Source : CISEC Training - Thème « Systèmes embarqués critiques » - Présentation « Electronic equipment for Avionics, constraints and requirements for design & development »

Pour cette phase de spécification, les besoins utilisateurs, les orientations marketing, le contexte et les conditions d'usage sont des données d'entrée essentielles.

La spécification se traduit ensuite en moyens et solutions [20]. Finalement, une fonctionnalité répond à un besoin utilisateur et est développée avec une technologie particulière et des caractéristiques particulières. Cette phase peut prendre la forme d'une documentation incluant souvent un cahier des charges fonctionnel. Les normes, certifications, durée de vie sont indiquées dans ce cahier des charges.

Lorsque l'on aborde cette étape avec une approche d'éco-conception, il est important d'avoir en tête que les demandes des utilisateurs pour des fonctionnalités impactent beaucoup le contenu du produit (de son architecture initiale à sa fabrication, sa maintenance, etc.). Également, dans le domaine du logiciel, 70 % des fonctionnalités demandées ne sont pas ou peu utilisées [21] : il est donc primordial d'avoir un regard sur les fonctionnalités essentielles du produit (mais remarquons que certains systèmes embarqués sont livrés avec un logiciel permettant de spécialiser les fonctionnalités disponibles en fonction de la gamme du produit). Ainsi, durant toute la vie du produit embarqué, cela peut être approprié, dans une démarche d'éco-conception, de questionner systématiquement la pertinence de chaque fonctionnalité développée en ayant un regard sur leur utilisation (par exemple, sur l'aspect logiciel, en appliquant des analyses statiques ou dynamiques permettant d'avoir un regard sur les lignes de code générant ou non des instructions assembleur, ainsi que sur le code mort) ; des exigences de certification (aéronautique, par exemple) peuvent par ailleurs cibler ces problématiques.

Un autre axe important dans la phase de spécification dans le cadre d'une démarche d'éco-conception est d'être en mesure de quantifier précisément le besoin. Par exemple, dans certains cas de produits réalisant des traitements logiciels résilients aux erreurs (traitement d'images, traitement vidéo, machine learning...), la qualité de sortie peut être définie précisément de manière à ne pas développer une application sur-performante par rapport aux besoins (par exemple : réduction du nombre de bits pour représenter les données, approximate computing, compression...). Si cette quantification n'est pas possible, cela peut être intéressant de tester en fournissant une qualité moyenne par exemple. Précisons également que l'application du framework 9R ne concerne pas les systèmes embarqués à sûreté critique, ou du moins le domaine de la sûreté en général.

Il peut être intéressant d'aborder cette phase selon le 9R Framework, en se concentrant ici sur les premiers niveaux des R. En effet, l'un des points clés à analyser est la notion de besoin utilisateur. L'objectif est d'y répondre au juste besoin et pas au-delà. Cela peut impliquer de repenser les business models (Rethink) ou bien de refuser certaines fonctionnalités (Refuse). Un travail approfondi de spécifications sous l'angle de l'éco-conception peut y mener.

La phase de spécification doit être réalisée en ayant en tête une vue claire des usages du système, notamment en pensant à la possibilité d'une multiplicité d'utilisateurs avec des besoins et attentes différents (utilisateurs pour tests, intégrateurs, utilisateurs

pour la maintenance). Dans ce cadre, certaines fonctionnalités vont devoir être implémentées pour un usage bien particulier (par exemple, faciliter la maintenance).

Pour finir, dès cette étape de spécification, il peut y avoir une réflexion sur l'usage de produits de seconde main, avec la réutilisation (Reuse) (dans le cadre de l'électronique, il peut s'agir de composants, par exemple). Il existe, entre autres, une perspective de réintégration de pièces destinées au rebut à de nouveaux produits dans le domaine de l'automobile. Il s'agit uniquement de composants internes lors des étapes de fabrication/re-fabrication notamment pour des problèmes de traçabilité.

Finalement, les critères majeurs de décision sont aussi définis dans ce cahier des charges : est-ce un critère de coût ou bien un critère environnemental ? Généralement, l'aspect environnemental n'est pas décorrélé de l'aspect économique et il faut calculer un compromis souhaité entre plusieurs critères.

CONCEPTION

L'étape de conception (découpée en développement, implémentation et codage) consiste à **transformer la documentation établie dans l'étape de spécification, en système embarqué** (comportant l'aspect matériel et logiciel).

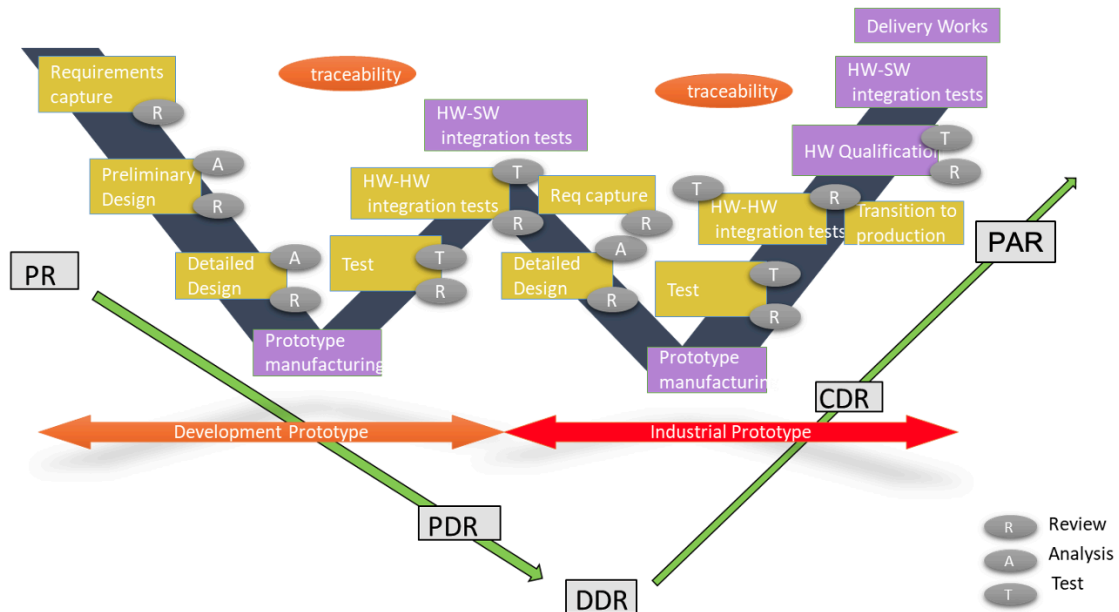
Cette phase de conception / développement est détaillée sur le schéma ci-après correspondant généralement, par expérience, à un cycle en W, plus typique qu'un cycle unique en V.

En effet, la spécification est généralement convertie en :

- un premier prototype permettant de la valider du point de vue fonctionnel, de valider des solutions techniques et les réponses aux contraintes d'environnement (thermiques, Compatibilité Electro-Magnétique...) en identifiant potentiellement les marges et la robustesse de ce premier prototype et en initiant l'industrialisation.
- un deuxième cycle de processus permet d'apporter les modifications et/ou évolutions nécessaires et de finaliser l'industrialisation, conduisant à un prototype industriel représentatif du produit final (dossiers de définition et de fabrication) et qui peut faire l'objet d'une qualification.

En fonction d'où nous sommes dans le cycle en W, la sortie peut être un prototype fonctionnel ou bien le prototype industriel représentatif du produit final, notamment vis-à-vis des procédés de fabrication.

Typical development life cycle : W process example



Source : CISEC Training - Thème « Systèmes embarqués critiques » - Présentation « Electronic equipment for Avionics, constraints and requirements for design & development »

3. Bonnes pratiques existantes dans le cadre d'une démarche d'éco-conception

Lorsque l'on souhaite aborder cette étape du cycle de vie d'un système embarqué sous un angle d'éco-conception, la différence majeure est d'inclure une vraie réflexion sur le "juste besoin", qu'il s'agisse des ressources, des fonctionnalités, mais également de la qualité à la sortie du système conçu.

Pour cela, cette étape va devoir analyser les éléments du logiciel et du matériel conjointement : en effet, la conception d'un logiciel va conditionner le choix du matériel ou inversement, le choix d'une plateforme processeur peut conditionner les performances d'un logiciel. En ayant dès le départ une réflexion sur l'architecture logicielle / matérielle, une répartition des fonctions efficaces (performance, etc.) peut être envisagée et permettre notamment la sélection du processeur le plus adapté au besoin.

Pour cela, il est essentiel d'adopter une conception frugale au plus tôt en ayant, par exemple, une réflexion sur le langage de programmation adopté, sur l'optimisation du code logiciel permettant de futures mises à jour du logiciel tout en utilisant le même matériel, ou le respect de marges hardware permettant de futures évolutions matérielles dans le cadre, par exemple, de la gestion de l'obsolescence de composants électronique tout en utilisant le même logiciel (impliquant une durabilité du produit plus grande).

Pour un système embarqué donné, il convient de commencer par quantifier les impacts environnementaux résultant de chaque phase de son cycle de vie, afin de concentrer les actions d'abord sur les phases qui ont l'impact le plus sévère. Les bonnes pratiques (non exhaustives) incluent :

- Étude des fonctionnalités essentielles au produit
- Questionnement en continu des fonctionnalités et de leur utilisation, pertinence au sein du produit
- Analyse statique sur la partie logicielle
- Analyse dynamique sur la partie logicielle
- Étude de code mort (pour éviter de faire grandir la base de code et donc la dette technique)
- Quantification des besoins (qualité par exemple)
- Réflexion sur les matières premières / composants souhaités
- Réutilisation de briques déjà conçues (cette bonne pratique existe en logiciel et en matériel, néanmoins on rencontre un bémol en électronique avec l'obsolescence des composants électroniques : la pérennité de la solution est un réel paramètre à prendre en compte dès les choix techniques et technologiques initiaux)
- Prise en compte de la durée de vie souhaitée ; pérennité et évolution souhaitée, c'est-à-dire, par exemple, ne pas sélectionner des composants en fin de vie ou inversement en 'preliminary' mais en s'appuyant sur les roadmaps des fabricants pour optimiser la vision moyen terme et conduire des analyses régulières de pérennité pour anticiper les décisions à prendre
- Réflexion sur la fin de vie souhaitée et la réparabilité
- Concevoir les produits avec des marges pour permettre de futures évolutions et pouvoir conserver un matériel plus longtemps (exemple : taille de matrice FPGA, timing d'accès mémoires, etc.)
- Systématiser la phase d'optimisation dès la phase de conception de manière à se donner "du mou" pour de futures évolutions / mises à jour
- Poursuivre la réflexion sur l'utilité / utilisation des fonctionnalités demandées / qualité
- Profiling pendant la phase de conception, qui consiste à récolter des données depuis diverses sources de données existantes et collecter les statistiques et informations remontées de ces données
- Réflexion sur les modes de sommeil, en privilégiant, à chaque fois que c'est possible, un bouton marche/arrêt.

4. Manques identifiés dans le cadre d'une démarche d'éco-conception

L'un des axes de réflexion sur lequel nous avons pu identifier un manque dans l'existant sur l'éco-conception est l'impact des différents cycles de développement (en V, en W...).

- Existe-t-il des méthodologies de développement avec un impact sur l'environnement plus ou moins fort ?
- Certaines permettent-elles de réduire au maximum le surdimensionnement ou le gâchis de ressources ?
- Quel est l'impact du langage de programmation sur la sobriété du système en train d'être conçu ? Par exemple, la plupart des langages offrent des constructions pour étendre un système, c'est-à-dire pour lui ajouter des fonctionnalités ou des composants, pour le déployer à plus grande échelle mais jamais de constructions pour réduire un système, c'est-à-dire pour lui retirer des fonctionnalités ou des composants.
- Comment analyser et mesurer les effets systémiques négatifs afin de les éviter ?

D. MATIÈRES PREMIÈRES

Cette étape primordiale est nécessaire pour créer tout ce qui nous entoure. Elle est relativement méconnue des concepteurs et du grand public. Nous visons donc ici à ouvrir les consciences sur une réalité complexe, mais sans mettre en lumière de bonnes pratiques générales. D'abord parce que pour l'essentiel, le choix des matières premières ne relève pas du concepteur (sauf choix du boîtier du système embarqué). En effet, pour fabriquer des PCB ou des composants, il n'y a pas d'alternative aux minerais actuellement exploités, le choix de la chimie des batteries dépend plus de l'usage et des avancées technologiques à venir que de bonnes pratiques. Pour toutes ces raisons, nous nous contentons dans ce chapitre d'évoquer des constats et de mettre en lumière le processus de création des métaux.

1. Définition

Une matière première est une matière à l'état brut (matière extraite de la nature : notion de ressource naturelle [22]) ayant subi une première transformation sur le lieu d'exploitation pour la rendre propre à l'échange international, utilisée dans la transformation de matériels finis ou comme source d'énergie.

2. Quelques constats

L'industrie des systèmes embarqués, comme l'ensemble du secteur électronique, dépend de l'extraction de nombreuses ressources naturelles. Les appareils électroniques intègrent une variété de matériaux, dont certains posent un problème en raison de leur rareté et des défis liés à leur extraction. Parmi ces matériaux, on compte des métaux tels que le cuivre, l'or, l'argent, le lithium ou le cobalt pour les plus connus, mais également de nombreuses « terres rares » (même si présentes un peu partout sur la planète, rares, car dispersées et sans réel filon) tel que le néodyme, le dysprosium ou encore le terbium. À titre d'exemple, un smartphone classique peut contenir jusqu'à 60 éléments différents, dont certains en quantités infimes. Pour mieux se rendre compte de la quantité de matières extraites du sol, on applique généralement un facteur de 500 par rapport au poids total de l'objet. Par exemple, pour un ordinateur de 2 kg, on extrait des sols environ 1000 kg, soit une tonne de matière.

Cette modélisation du cycle de vie laisse penser qu'un système embarqué sort d'une usine alimentée par quelques matières premières. Mais en réalité, matières premières / fabrication / transport est un processus itératif et parallélisé...

La fabrication du produit système embarqué fait appel à des PCB, des composants actifs et passifs, des polymères, des câbles, des boîtiers métalliques et/ou plastiques, etc. La fabrication de systèmes embarqués est donc complexe. Elle nécessite de nombreuses matières premières comme des métaux, mais aussi des hydrocarbures pour fabriquer les polymères, du silicium (très abondant sur terre) et beaucoup d'énergie (l'extraction des minerais et des hydrocarbures utilise presque exclusivement de l'énergie fossile, tandis que la fabrication en elle-même utilise

souvent de l'énergie électrique, dont l'impact environnemental dépend du mix énergétique du pays).

3. L'obtention des matières premières

Les matières premières minérales [23] (l'ensemble des métaux) s'obtiennent d'abord par l'exploitation d'une mine (l'extraction).

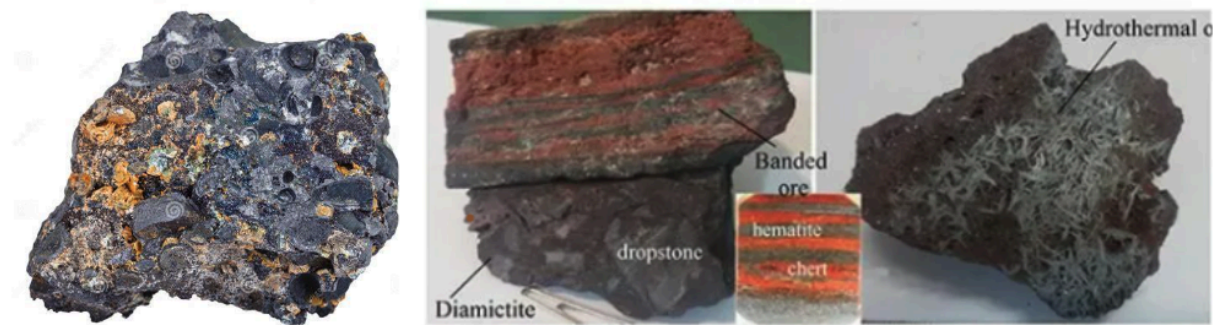


Mine de fer de Carajas, Brésil [24]

La roche extraite de cette mine (souvent à ciel ouvert) présente une teneur en minerai très variable. Cette teneur pouvant être de 30 % dans le cas d'une mine de fer à 1 % pour du plomb, voire 0.05 % pour du Lithium et encore bien moins pour des substances comme l'Indium (utilisé dans les écrans), le Gallium, où on parle en grammes par tonne de roche extraite.

La teneur en minerai de l'ensemble des mines et des nouveaux gisements identifiés ne cesse de baisser. Par exemple, la teneur en cuivre du minerai extrait en Australie était de 26% en 1840 contre moins de 1% en 2010 [25]. L'extraction de minerai a un impact environnemental énorme : excavation, pollution, utilisation de combustible fossile pour les engins, ... Par exemple, la mine de cuivre de Bingham Canyon dans l'Utah est un véritable canyon de 4 km de large et de 1.210 m de profondeur.

Pour la suite, nous prendrons l'exemple du fer pour illustrer le chemin depuis le sous-sol jusqu'à l'usine de fabrication.



Minerai de fer [26]

Le minerai peut contenir diverses impuretés comme, par exemple, pour le fer : la silice, l'alumine, le phosphore, le soufre et des oligo-éléments.

Ce minerai de fer [26] extrait doit encore être traité pour éliminer ces impuretés et augmenter sa teneur en fer. Ce processus, connu sous le nom d'enrichissement, implique le concassage, le criblage, le lavage et la séparation magnétique ou la flottation pour séparer le minerai de fer des autres minéraux et impuretés. Les procédés d'enrichissement peuvent varier en fonction des caractéristiques du minerai et de la qualité de concentré de minerai de fer souhaitée.

Cette matière concentrée est ensuite transportée vers une usine de traitement qui par pelletisation ou frittage permet de créer des boulettes de minerai de fer ou un fritté, qui sont utilisés dans les hauts fourneaux pour produire du fer et de l'acier. Ce fer et cet acier seront ensuite utilisés pour fabriquer des pièces du système embarqué.

Du sous-sol au composant, l'impact environnemental de l'exploitation minière est très important localement, au niveau de la mine, mais aussi du fait de l'ensemble des traitements (dont chimiques) nécessaires à enrichir ce minerai.

4. Gestion des déchets

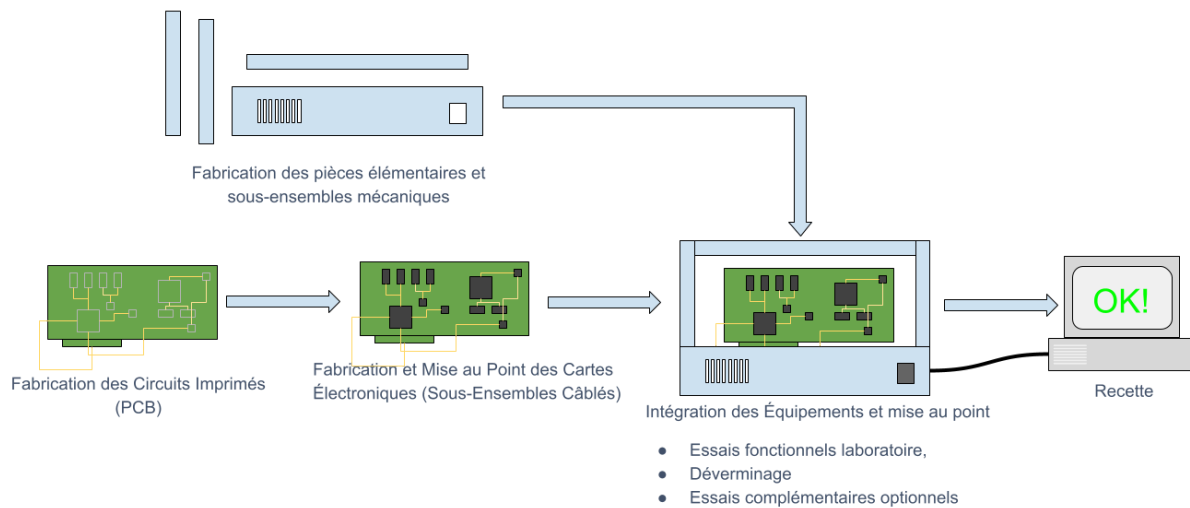
L'extraction et le traitement du minerai de fer peuvent générer des déchets, tels que des morts-terrains (les roches « inutiles » lors de la phase d'extraction, des résidus et des stériles). De bonnes pratiques de gestion des déchets, y compris le stockage, le traitement et l'élimination, sont importantes pour atténuer les impacts environnementaux potentiels.

Au-delà de ces quelques constats et descriptions, le groupe de travail réuni au travers d'Embedded France, ne comporte pas de spécialistes sur la question. Cette thématique ne sera pas développée au sein de ce livre blanc.

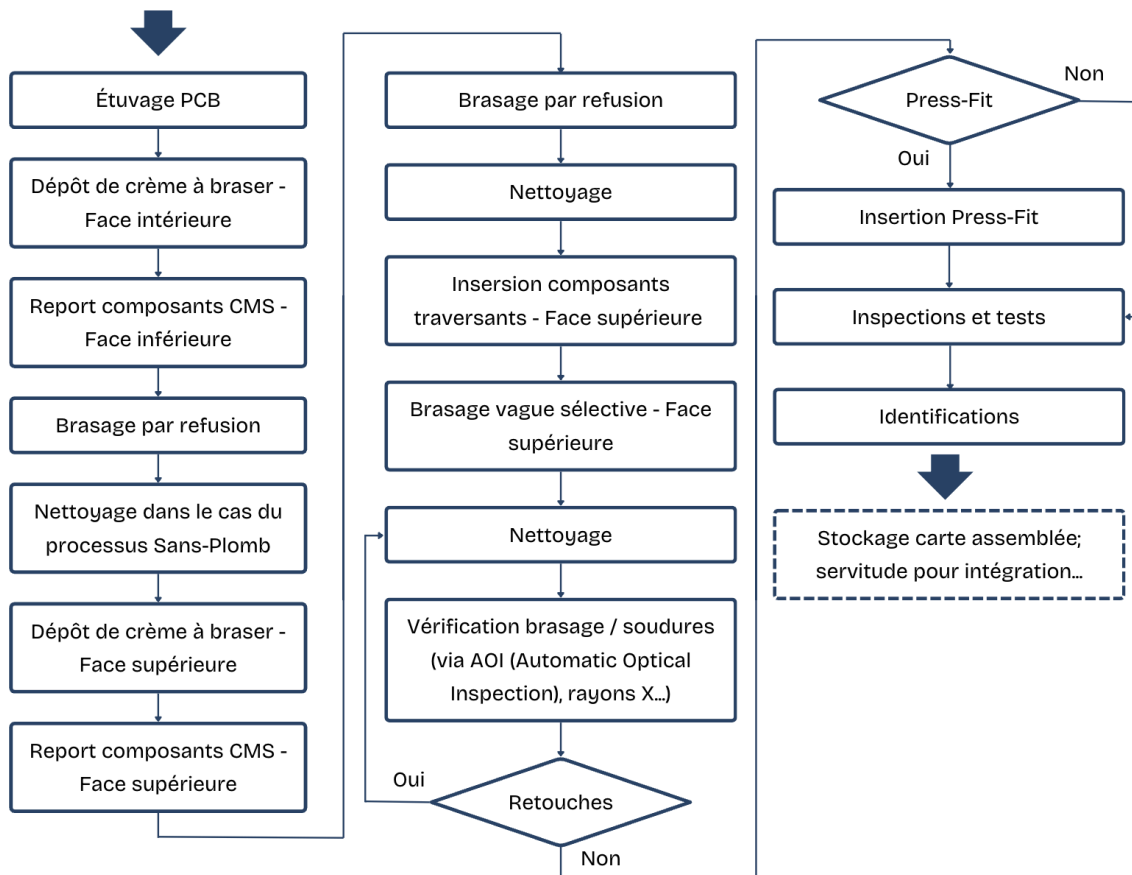
E. FABRICATION

1. Définition

Dans le contexte des équipements électroniques, la fabrication englobe toutes les opérations de transformation, d'assemblage et d'intégration de matériaux et de composants, en vue de produire un produit final complexe. Cette étape est souvent le principal générateur d'impacts environnementaux, notamment à cause des processus énergivores et des matériaux rares qu'elle mobilise. Bien que les systèmes embarqués, notamment portables et autonomes, consomment peu d'énergie durant leur utilisation, leur fabrication exige une importante quantité d'énergie, ainsi que des procédés complexes qui intègrent des substances chimiques et des gaz rares, difficiles à retraiter ou à éliminer.



Synoptique du process de fabrication d'un système électronique



Exemple de processus typique d'un assemblage de carte « Double refusion + Vague sélective traversant, avec ou sans Press-Fit »

Les activités principales de la fabrication incluent :

1. Fabrication des pièces élémentaires et des sous-ensembles mécaniques

Ces pièces forment souvent le châssis de l'équipement et nécessitent des traitements de surface pour résister à la corrosion, tels que des revêtements chimiques ou électrochimiques, ainsi que des finitions comme la peinture. Les matériaux utilisés respectent les réglementations européennes (RoHS et REACH) à moins d'exemption spécifique.

2. Fabrication des circuits imprimés (PCBs)

Les circuits imprimés, ou PCBs, constituent le support physique et électrique des composants électroniques. Leur production mobilise des procédés chimiques, thermiques et mécaniques (gravure, métallisation, perçage) pour interconnecter les couches conductrices, requérant l'utilisation de produits chimiques, et exige une stricte conformité avec les normes environnementales.

3. Assemblage des cartes électroniques

Sur les PCBs, on monte divers composants actifs et passifs pour constituer les cartes électroniques, cœur de l'équipement final. Cette étape inclut des opérations de soudure et des vérifications d'assemblage automatisées pour assurer une qualité constante.

4. Intégration des sous-ensembles et essais

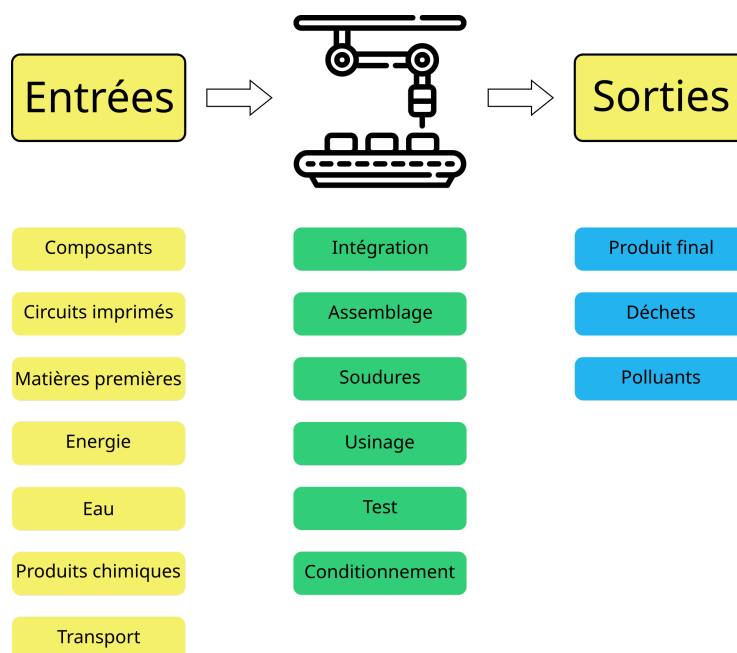
Cette étape regroupe tous les sous-ensembles, mécaniques et électroniques, afin de créer le produit final. L'équipement est soumis à des essais fonctionnels et de vérification des marges fonctionnelles pour vérifier sa robustesse et garantir qu'il résistera aux phases ultérieures. Chaque produit est identifié par un numéro de produit unique (P/N) et un numéro de série (S/N) pour une traçabilité complète.

5. Déverminage

Pour détecter des défauts latents, les produits subissent des cycles de variation rapide de température (VRT) et des cycles d'allumage/extinction (ON/OFF). Ce processus, nécessaire pour assurer la fiabilité, s'applique jusqu'à 100% des équipements selon la stratégie de test. Un suivi automatisé analyse leur comportement fonctionnel. Les équipements conformes passent au contrôle final ; les autres sont réparés et testés de nouveau.

6. Contrôle de conformité final (recette)

Cette phase vérifie la conformité de l'équipement aux spécifications et inclut un test fonctionnel final. La documentation technique (spécifications, Dossier de Définition, déclaration de conformité UE, manuel d'utilisation) est contrôlée et consignée pour attester la conformité du produit aux normes européennes.



Principaux flux de la phase de fabrication

2. Objectifs et flux de sortie de la fabrication

La figure Principaux flux de la phase de fabrication, ci-dessus, met en perspective les flux entrants et les objectifs finaux du processus de fabrication. En amont, les composants électroniques et circuits imprimés (PCBs) constituent les éléments de base du produit. Leur assemblage en cartes électroniques constitue le cœur de l'équipement final, conçu selon les exigences du Dossier de Définition.

Les objectifs principaux de cette étape incluent une intégration mécanique et électronique fiable des sous-ensembles dans une structure cohérente, rigoureusement testée. Les procédures suivies garantissent la durabilité, la sécurité, et la conformité de l'équipement avec les normes réglementaires.

En termes de sortie, le produit final répond aux spécifications et aux critères de qualité, confirmé par une série d'essais fonctionnels, thermiques et de déverminage. Le produit est également marqué pour assurer une traçabilité complète et accompagné d'une documentation exhaustive.

3. Bonnes pratiques existantes dans le cadre d'une démarche d'éco-conception

Dans la fabrication des systèmes embarqués, une démarche d'éco-conception tient compte des consommations de matériaux et d'énergie de chaque étape, de l'usinage mécanique à l'assemblage final, pour optimiser l'efficacité et réduire l'empreinte environnementale. Une part significative de ces optimisations rejoint l'intérêt économique de la filière industrielle, en effet, en réduisant la consommation de matériaux et de ressources, le coût de fabrication est souvent réduit.

Cependant, au-delà de l'assemblage électronique, il faut également gérer les emballages, nécessaires pour assurer un transport sûr et qui, bien qu'indispensables, peuvent aussi contribuer aux déchets et aux émissions. Par exemple, les sous-ensembles et les composants sont protégés par des emballages plastiques, générant des déchets non négligeables.

La fabrication des PCBs utilise des procédés chimiques pour la gravure des pistes conductrices et le dépôt d'étain exigeant une gestion stricte des rejets pour éviter la contamination environnementale.

Les phases d'intégration et de test incluent des procédés de déverminage avec variations thermiques, et bien que ces essais augmentent la consommation d'énergie, ils réduisent le taux de rejets. En éco-conception, il est important d'adopter une traçabilité des matériaux et de veiller à ce que les matériaux temporairement utilisés, tels que les flux de brasage, soient gérés selon des protocoles encadrés par la réglementation.

Des outils de contrôle qualité, comme l'inspection optique (AOI) et les rayons X, permettent aussi d'optimiser les ressources, en s'assurant que seuls les produits conformes avancent dans le processus. Cette optimisation contribue à réduire la consommation de matières et d'énergie.

4. Manques identifiés pour l'éco-conception

Il existe une grande variété d'entreprises dans le domaine de la fabrication de produits électroniques (intégration de sous-systèmes ou fabrication complète de PCBs) qui engendrent des impacts variables sur l'environnement. Une entreprise qui assemble des sous-systèmes voit son impact concentré sur les procédés d'assemblage et les consommables, tandis qu'une entreprise qui produit ses propres PCBs gère des procédés chimiques et thermiques. Pour atteindre une démarche d'éco-conception efficace, une évaluation complète doit inclure toutes les étapes et externalités des modules, composants, et produits chimiques. La sélection d'entreprises de sous-traitance plus vertueuses peut avoir un impact majeur sur l'impact environnemental global du produit fini.

De la même manière, la fabrication de composants semi-conducteurs, souvent responsable jusqu'à 80% de l'empreinte carbone d'un produit, mobilise des procédés hautement énergivores, incluant la photolithographie, le dépôt de couches atomiques et la gravure. Les gravures de plus en plus fines et l'empilement de couches de silicium intensifient l'impact environnemental par le rejet de gaz fluorés et solvants difficiles à traiter. L'approvisionnement de semi-conducteurs chez des fournisseurs moins polluants représente un potentiel important pour réduire les émissions (en particulier carbone) des systèmes électroniques.

F. INSTALLATION ET DÉPLOIEMENT

L'installation et le déploiement est la phase de la **mise en service initiale d'un produit embarqué, allant de sa réception à son premier démarrage**. Une fois les phases de conception et de fabrication abouties, cette étape permet de préparer le produit pour son utilisation, que ce soit par un client ou un opérateur technique. Généralement les systèmes embarqués, intégrant du hardware et potentiellement du software, sont gérés en configuration. Des standards matériels et logiciels sont livrés, mis en service et installés permettant ainsi une gestion maîtrisée de leurs utilisations/exploitations, de leurs évolutions (mises à jour de logiciel par exemple) et de leurs maintenances, et d'assurer la garantie.

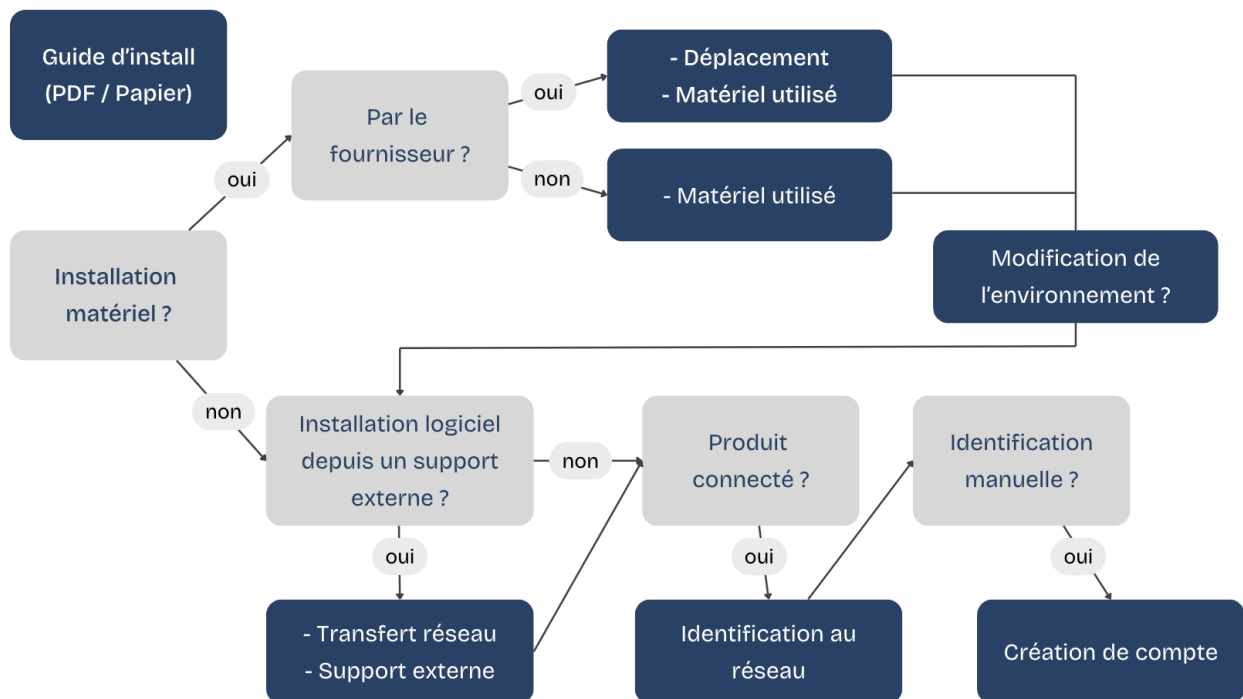
Si elle assure la mise en service du produit, l'installation soulève des questions d'éco-conception, notamment liées à la consommation énergétique des appareils et à la nécessité de connexions réseau. Dans une démarche de développement durable, il est essentiel d'analyser les impacts écologiques de cette étape et de les minimiser en s'appuyant sur des bonnes pratiques. Ces efforts s'inscrivent dans une perspective plus large de réduction des impacts environnementaux, poursuivie tout au long des phases d'utilisation, de maintenance et jusqu'à la fin de vie des produits.

1. Définition

L'installation et le déploiement d'un produit embarqué représente l'étape cruciale de sa mise en service initiale. Cette phase, qui s'étend de la réception du produit jusqu'à son premier démarrage, joue un rôle déterminant dans l'expérience utilisateur et l'efficacité opérationnelle. Elle peut se dérouler de différentes manières : de façon automatisée, en suivant les instructions du fournisseur, ou sous la supervision directe d'un technicien.

2. Objectifs et sorties de cette étape

Voici l'organigramme du processus d'installation :



Légende :

Impact à calculer

L'impact écologique de cette étape du cycle de vie se sous divise en plusieurs parties :

- Consommation du ou des appareils durant leurs initialisations
 - Appareils embarqués
 - Serveurs hébergés
 - Appareils externes (de calibration par exemple)
- Consommation du service réseau auquel il est potentiellement connecté pendant son initialisation
 - Identification réseau
 - Téléchargement de logiciels et/ou d'informations
 - Création de compte
- Contenu numérique associé
 - Guide d'installation, de mise en service (format papier ou format numérique : support physique ou transfert réseau)
 - Logiciel d'installation (directement sur le produit ou l'ordinateur du client, exemple pilote/driver) : support physique ou transfert réseau

- Transport du potentiel opérateur/technicien effectuant l'installation
- Modification de l'environnement : des adaptations de l'environnement sont parfois nécessaires pour installer le produit embarqué.

À la fin de cette étape, le produit embarqué est opérationnel dans son état initial et interconnecté si nécessaire. L'utilisateur (humain ou machine) peut exploiter le produit embarqué pour les fonctions pour lesquelles il a été créé.

3. Bonnes pratiques existantes dans le cadre d'une démarche d'éco-conception

La réduction des transferts d'informations peut permettre de réduire la consommation réseau et/ou l'utilisation de support de stockage lors de l'installation. Par exemple, charger la dernière version du logiciel dans le produit pour éviter des transferts de données inutiles liés à une mise à jour lors de son installation.

Il est possible de réduire la consommation liée au déplacement technicien de plusieurs manières :

- Automatiser au maximum le processus d'installation permet d'éviter l'intervention humaine, donc les possibles coûts de transport, déplacement d'un technicien pour effectuer ces manipulations. Cependant, cela induit un coût supplémentaire dans l'étape de conception qui peut être rentable ou non en fonction du nombre d'installations.
- Simplifier et décrire le processus pour qu'il soit effectué par le client.
- Mutualiser le transport du produit avec le transport du technicien d'installation (si un technicien est nécessaire).
- Mutualiser les modifications de l'environnement avec d'autres travaux potentiels pour diviser l'impact écologique et économique lié aux travaux d'urbanisme.

4. Manques identifiés dans le cadre d'une démarche d'éco-conception

Les entreprises ne fournissent pas toujours les documents techniques ainsi que les logiciels des produits. Lorsque des bugs sont rencontrés pendant l'installation, ces documents peuvent permettre à l'utilisateur de mieux comprendre et déboguer. L'utilisateur peut aussi faire appel à un expert interne ou externe à l'entreprise. Cela évite tout surcoût éventuel de déplacement d'un technicien et pérennisent le matériel dans les cas où le fournisseur n'effectue plus le support.

L'installation et le déploiement des produits embarqués, bien que limités dans le temps, peuvent générer des impacts écologiques significatifs. Les bonnes pratiques d'éco-conception, comme la réduction des transferts d'informations, l'automatisation des processus et la mutualisation des déplacements, contribuent à réduire l'empreinte environnementale de cette phase. De plus, il est essentiel d'améliorer la pérennité des produits en facilitant l'accès aux informations techniques

pour les utilisateurs, afin qu'ils puissent assurer une maintenance locale et prolonger la durée de vie des systèmes sans nécessiter d'interventions externes.

Cependant, pour maximiser la durabilité et la résilience des produits, une approche plus globale est nécessaire. Cela implique de poursuivre les efforts d'éco-conception dans les phases de maintenance et de valorisation en fin de vie, où les choix faits en amont pour l'installation influencent la durabilité.

G. UTILISATION ET MAINTENANCE

1. Définition

La phase d'utilisation d'un équipement, telle que décrite par l'ADEME (Agence de la Transition Écologique), correspond à **la période durant laquelle l'équipement est en fonction après sa fabrication et avant sa fin de vie**. Pour un système embarqué, objet de ce livre blanc, cette phase commence dès sa mise à disposition à l'utilisateur (phase de distribution/commercialisation) et se prolonge tout au long de sa durée de vie. Elle inclut les efforts de maintien à niveau, tels que les mises à jour logicielles, la réparation et la maintenance, jusqu'à ce que l'utilisateur cesse d'utiliser son produit et s'en sépare pour le mettre au rebut ou le revaloriser.

2. Objectifs et sorties de cette étape

Un système embarqué, tel que défini précédemment, est **une combinaison de matériel et de logiciels permettant de remplir une ou plusieurs fonctions**. Ces fonctions fournissent des services au bénéfice d'utilisateurs, humains ou non, qui interagissent avec le système.

Lors de son fonctionnement, le système embarqué consomme des ressources, à la fois directement et indirectement.

La principale ressource directement consommée pendant l'utilisation est l'**énergie électrique**, qui alimente le système tout au long de sa vie. Cette consommation constitue la principale source d'impact durant la phase d'utilisation. Il peut s'y ajouter de l'**énergie thermique** lorsqu'il faut assurer un refroidissement de l'équipement embarqué pour dissiper les calories qu'il produit, par exemple, refroidissement par eau d'un ordinateur portable qui nécessite des équipements complémentaires et alourdit le véhicule d'autant avec les impacts associés. Afin de maintenir la phase d'utilisation active, d'autres ressources et matières vont être consommées par les opérations de maintenance, de réparation et de mise à niveau matériel et logiciel du système.

Indirectement, un système peut entraîner l'utilisation de **ressources externes**. Un objet connecté, en plus de consommer directement de l'énergie électrique, généralement stockée dans une batterie, entraîne également la consommation de ressources réseau et de serveurs situés dans des centres de données. Son utilisation génère donc des impacts environnementaux indirects. Par exemple, si un système embarqué sert à optimiser l'usage de ressources non numériques (exemple : l'eau et l'électricité), alors il faudra balancer les économies réalisées grâce au système avec les coûts environnementaux du système. Autrement dit, il est crucial de faire une analyse systémique globale pour éviter les effets rebond.

En sortie de la phase d'utilisation, nous avons une combinaison de matériel électronique et de logiciels cessant de fonctionner. Ses composants matériels partent au rebut ou au recyclage, ce qui fait l'objet de la section suivante de ce livre blanc.

De nos jours, l'électronique et le numérique représentent le seul secteur industriel pour lequel l'empreinte carbone augmente chaque année de manière significative [27]. L'argument selon lequel cette empreinte supplémentaire est en fait au service de la décarbonation d'autres secteurs industriels (la digitalisation permettant nombre d'optimisations) est fallacieuse, dans la mesure où l'essentiel de la croissance vient du streaming de contenu vidéo (séries, nouvelles, etc.) qui n'ont pas d'externalité positive par ailleurs.

Les estimations d'empreinte carbone seraient de 50% à 80% pour le cycle de vie des équipements hors utilisation (fabrication, acheminement, démantèlement), et 20% à 50% pour leur utilisation. Mais cette répartition pourrait bien changer.

Alors que les études attribuaient jusqu'à présent la majorité des impacts aux terminaux des utilisateurs, en grande partie à cause du poids de la phase de fabrication, l'impact des réseaux et des centres de données, dont la phase d'utilisation est la plus émettrice, devrait rapidement être réévalué à la hausse.

En effet, toutes les études s'accordent sur le manque d'informations concernant les équipements des réseaux et des centres de données, ce qui constitue un facteur limitant. Par exemple, l'étude de l'ADEME de 2022 sur l'impact du numérique en France n'a pas pu intégrer l'impact importé, alors même que 50% de notre consommation numérique provient de l'étranger. The Guardian révèle quant à lui que l'impact des centres de données pourrait être jusqu'à 600% supérieur aux estimations des géants du cloud, une fois les crédits énergétiques retirés. Le secteur des réseaux n'est pas en reste, avec des données qui voyagent désormais dans l'espace.

Il est conclu qu'à l'état actuel des connaissances, l'impact des réseaux et des centres de données est largement sous-estimé. Il en va de même pour les services numériques et les équipements terminaux, qui dépendent de ces infrastructures pour fonctionner et puisent dans leurs ressources lors de leur utilisation.

La suite donne les pistes de bonnes pratiques visant à réduire l'empreinte environnementale des systèmes embarqués lors de leur usage ainsi que les limites au regard des connaissances actuelles.

3. Bonnes pratiques existantes dans le cadre d'une démarche d'éco-conception

Pour les phases d'utilisation des équipements électroniques, les bonnes pratiques et évolutions nécessaires sont à rechercher pour réduire leur consommation énergétique, accroître leur durée de vie et éviter le déport d'impact sur d'autres systèmes.

Réduction de la consommation énergétique

Pour réduire la consommation d'un équipement électronique, toutes les couches qui le composent sont à analyser. Il convient d'identifier pour chacune les solutions qui permettent de réduire la consommation. Un certain nombre de pistes sont bien identifiées aujourd'hui :

→ **Simplification du système**, s'agissant en général de se débarrasser des stratifications historiques menant in fine à des systèmes complexes et inefficaces en performance, donc en énergie :

- disposer de systèmes d'exploitation et de logiciels plus légers et plus performants réduit les contraintes mises sur l'électronique qui doit les faire fonctionner (besoin en puissance de calcul, en mémoire, en flux de données...). On réduit ainsi l'empreinte matérielle et la demande en énergie pour l'utilisation comme pour la fabrication. Par ailleurs, certaines tâches peuvent être automatisées (réseau, traitement de signal, IA), s'affranchissant de la nécessité d'un système d'exploitation et de logiciel sur des tâches qui ne le nécessitent pas ;
- disposer d'architectures de processeurs simplifiées et optimisées, dimensionnées au juste nécessaire ;
- trouver le juste équilibre entre développer une couche logicielle sur mesure, optimisée mais exigeante en termes de ressources pour sa conception et sa maintenance, et utiliser des bibliothèques standards, plus rapides à intégrer et faciles à maintenir, mais souvent moins performantes sur le plan de l'efficacité.

Par ailleurs, certaines tâches peuvent s'autonomiser (réseau, traitement de signal, IA), s'affranchissant de la nécessité d'un système d'exploitation et de logiciel. Les pistes bien identifiées aujourd'hui sont :

- Programmation directement dans les composants électroniques (FPGA ou ASIC) des fonctions automatisables : en se passant de logiciel et de système d'exploitation, la réduction de consommation peut être très significative, d'un voire deux ordres de grandeur, selon les cas d'usage ;
 - Commutateurs et interfaces réseau
 - Traitement capteur haute intensité de premier niveau (vidéo, LIDAR, radar)
 - Réseaux de neurones pour des moteurs d'IA
- Nouveaux systèmes d'exploitation permettant de diviser par 20 la complexité des OS historiques (Microsoft ou Unix/Linux), système d'exploitation de type Hyperpanel;
- Recours à des processeurs de complexité réduite tels que le Risc V ;

→ **Optimisation thermique** : Une mauvaise gestion thermique peut entraîner une surchauffe, nécessitant des systèmes de refroidissement actifs ou passifs, ou une dissipation d'énergie supplémentaire. Utiliser de préférence et si possible des dissipateurs passifs ou des matériaux thermiquement conducteurs pour réduire la consommation d'énergie liée au refroidissement.

→ **Gestion et pilotage de modes de veille** : Il s'agit de désactiver ou de ralentir tout ou partie du système qui n'est pas nécessaire à un moment donné de manière automatique et dynamique en fonction de l'utilisation récurrente des équipements. Cette approche peut nécessiter toutefois des travaux de démonstration complémentaires dans le cas de secteurs industriels faisant l'objet de critères sévères de sécurité ou de certification.

→ **Optimisation de l'alimentation** : le choix de l'alimentation joue un rôle crucial dans la réduction de la consommation électrique d'un système embarqué. Une mauvaise gestion de l'alimentation peut entraîner des pertes importantes (réduction de l'efficacité énergétique / rendement d'un convertisseur par exemple). L'optimisation de l'alimentation dans un système embarqué implique de minimiser les pertes au niveau des régulateurs de tension, des composants passifs comme les inducteurs, de choisir des convertisseurs à découpage efficaces, et d'utiliser des technologies adaptées à la gestion des batteries par exemple. Ces ajustements permettent de limiter les gaspillages énergétiques et d'améliorer l'efficacité globale du système.

→ **Utilisation d'énergies renouvelables** : Pour certains systèmes embarqués qui nécessitent des sources d'énergie externes (par exemple des capteurs IoT), il est possible d'utiliser des panneaux solaires, des générateurs thermiques ou des micro-générateurs à base de vibrations pour alimenter ces dispositifs de manière durable.

● **PROLONGATION DE LA DURÉE DE VIE DU SYSTÈME**

Le Maintien en Conditions Opérationnelles (MCO) a pour but d'assurer à l'utilisateur la continuité opérationnelle des produits sur la durée de vie de leur exploitation. Le MCO est essentiel dans une approche écoresponsable des systèmes et des équipements électroniques embarqués. Il permet par un ensemble d'actions de garantir qu'un système ou un équipement électronique reste fonctionnel et disponible, sûr et performant tout au long de son cycle de vie. Il inclut :

1. **La maintenance préventive** constituée d'interventions planifiées pour anticiper les potentielles défaillances ou pannes et maintenir les performances optimales du système ou de l'équipement.
2. **La maintenance corrective** durant laquelle des réparations sont effectuées après l'apparition de défaillances ou pannes pour restaurer le fonctionnement normal.
3. **La surveillance continue** qui permet un suivi en temps réel des performances et des états de fonctionnement pour détecter les anomalies avant qu'elles ne deviennent critiques.
4. **Les mises à jour** et éventuellement la modernisation qui permettent d'intégrer des améliorations pour prolonger la durée de vie et améliorer les fonctionnalités du système.

Cette approche conduite par les systémiers et les équipementiers nécessite une prise en compte très tôt, dans la phase d'architecture et de conception du produit, de dispositions permettant le test, la réparabilité, l'évolution (marges de conception par exemple permettant la gestion de l'obsolescence des composants électroniques par équivalence, etc.). Elle apporte en outre à l'utilisateur des avantages en termes de fiabilité, potentiellement de sécurité, et de disponibilité en permettant d'anticiper et d'éviter des interruptions de service ou des défaillances qui peuvent s'avérer catastrophiques, entraîner des coûts importants ainsi que des pertes de revenus et des impacts négatifs sur l'image et la réputation du fabricant ; elle contribue significativement à la réduction des coûts de possession en optimisant les cycles de maintenance. Elle est appliquée actuellement dans le cadre de systèmes embarqués qui sont généralement complexes, de durée de vie élevée, éventuellement critiques ; suivant les caractéristiques d'un système embarqué considéré, cette approche peut être adoptée en tout ou partie, voire adaptée, pour répondre aux besoins et aux exigences du système en question dans son cycle de vie.

- **MESURES D'ATTÉNUATION**

D'autres mesures peuvent être prises pour atténuer l'impact environnemental d'un système embarqué. Les mesures suivantes ont été identifiées :

Éviter le transfert d'impact vers d'autres systèmes

Un système embarqué est conçu pour offrir un service. Pour minimiser son impact environnemental, il est important d'adopter une approche systémique, en prenant en compte non seulement les composants logiciels et matériels, mais aussi l'ensemble du service rendu. Par exemple, un objet connecté optimisé pour une faible consommation énergétique pourrait être conçu sans capacité de traitement local. Cependant, pour remplir sa fonction de collecte de données, il devra se connecter à un réseau Internet ou autre, et envoyer des données brutes à un serveur, souvent hébergé dans le cloud. Ainsi, l'impact environnemental à l'usage ne concerne pas seulement l'objet électronique, mais également les ressources réseau et les infrastructures cloud mobilisées pour fournir le service.

Dans certains cas, il peut être plus avantageux d'un point de vue environnemental d'intégrer la capacité de traitement des données directement dans l'objet lui-même. Cela permet de réduire la nécessité de transférer des données massives via les réseaux et d'économiser les ressources du cloud, contribuant ainsi à une réduction globale des impacts environnementaux du service.

Récupération de chaleur

Une solution émergente pour atténuer certains de ces impacts est la récupération de chaleur. La récupération de chaleur est pratiquée aujourd'hui par les grands data centers (contribution au chauffage urbain ou apport de chaleur dans des process industriels voisins), et de façon plus émergente par des ordinateurs directement placés dans des habitations (qarnot computing).

Cette solution est intéressante, mais le rendement de récupération de chaleur est faible. C'est un bon complément, l'idéal étant néanmoins de ne pas avoir à consommer l'électricité qui provoque cette dissipation thermique.

Autres sources d'énergie potentielle

Les ondes électromagnétiques et radioélectriques, les actions mécaniques, peuvent également être utilisées comme source d'énergie pour de petits appareils ayant une très faible consommation énergétique. Dans le cas de récupération d'énergie d'origine électromagnétique et radiofréquences, un dispositif spécifique récupère les ondes présentes dans l'environnement pour les convertir en électricité ; ces ondes peuvent provenir de systèmes de communication tels WIFI, Bluetooth, etc. ainsi que de l'ensemble des matériels électriques. Dans le cas de récupération d'énergie par action mécanique, un dispositif piézoélectrique est généralement utilisé pour convertir une force mécanique en électricité.

4. Manques identifiés dans le cadre d'une démarche d'éco-conception

L'un des obstacles principaux dans la démarche d'éco-conception est que les équipements électroniques intègrent des standards historiques sur le matériel, le logiciel, les architectures et les process, et qu'ils sont souvent l'objet de développement incrémentaux. Or pour gagner de manière significative sur les consommations, il est nécessaire d'introduire des ruptures, tant sur les technologies que sur les architectures.

Il est crucial aussi d'adopter une approche plus globale, dépassant la seule réduction de la consommation énergétique. Une démarche d'éco-conception doit également viser la réduction de la pollution et la préservation de la biodiversité. Il faut tenir compte des effets systémiques négatifs, en particulier l'effet rebond. Celui-ci désigne le phénomène par lequel une amélioration de l'efficacité énergétique par exemple, entraîne paradoxalement, une augmentation de la consommation globale en raison de l'essor de nouveaux usages ou de l'accroissement des usages existants. Ce phénomène, bien décrit par l'équation de Kaya [28], montre que les gains d'efficacité doivent être accompagnés de changements structurels et comportementaux pour réellement réduire l'impact global.

C'est en réalité de nouvelles filières et de nouveaux écosystèmes qu'il faudra constituer, dotés de moyens de mesurer concrètement les impacts des systèmes embarqués et aussi des grandes infrastructures de réseaux et de clouds dans lesquels ils opèrent. On a vu récemment le niveau d'insincérité des grands acteurs technologiques sur cette question qui devient brûlante, avec la mise en service en continu de fermes de serveurs toujours plus importantes à l'heure de la massification de l'IA. Un travail académique approfondi semble indispensable sur cette question.

Pour lancer ces nouvelles solutions frugales, une première étape pourrait être de mettre en place une plateforme expérimentale de maquettage intégrant les technologies candidates en vue de démontrer les capacités obtenues sur différents cas d'usage. Une fois les bons équilibres

identifiés, une stratégie de standardisation des architectures obtenues permettrait de générer une masse critique de marché et de déclencher les investissements nécessaires pour la mise en œuvre des solutions.

H. VALORISATION ET FIN DE VIE [29]

1. Quelques chiffres

49,8 % des Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques (DEEE) sont traités en France, seulement.

Sur une mégatonne de DEEE traités chaque année,

75,4 % sont recyclés	1,8 % sont réutilisés	11,8 % sont incinérés	11 % sont enfouis
--------------------------------	---------------------------------	---------------------------------	-----------------------------

Ces chiffres montrent une gestion incomplète des DEEE, ce qui souligne l'importance d'améliorer les pratiques actuelles. Il est également montré que le recyclage des métaux a une efficacité très faible. Évidemment, la gestion de la fin de vie des produits ne se limite pas au recyclage.

2. Définition

Cette dernière étape du cycle nommée « fin de vie » consiste à **redonner une valeur à un produit qui n'est plus utilisé.**

Cette étape se réfère à la phase finale du cycle de vie (ACV) du système embarqué (SE), où l'objectif est de **traiter le produit de manière à minimiser son impact environnemental et à maximiser la récupération des matériaux et la création de valeur.**

L'entrée dans cette dernière phase du cycle se fait dès lors que l'utilisateur se sépare de son produit et comprend trois grandes options : la **réutilisation**, le **recyclage** et l'**élimination**, chacune jouant un rôle crucial dans la réduction de l'impact environnemental.

● LA RÉUTILISATION

Idéalement, plutôt que de recycler ou éliminer, il semble assez naturel de privilégier la réutilisation ou la possibilité pour un produit d'entamer un nouveau cycle.

La phase de réutilisation se subdivise en trois sous-étapes :

1. Le réemploi

Utilisation directe des produits usagés pour le même usage, prolongeant ainsi leur durée de vie sans nécessiter de modifications majeures.

2. Le reconditionnement

Processus de remise en état des produits pour les rendre aptes à une nouvelle utilisation, souvent impliquant des réparations ou des améliorations mineures.

3. La récupération des composants

Extraction et réutilisation des composants fonctionnels des produits pour d'autres applications, réduisant ainsi la demande de nouvelles matières premières.

● LE RECYCLAGE

Bien que le recyclage soit une préoccupation majeure depuis une dizaine d'années, la mention de « recyclabilité » n'est apparue en France que le 29 avril 2022 avec le décret 2022-748, issu de la loi AGECE (Anti-Gaspillage pour une Économie Circulaire). Cette mention est désormais obligatoire pour certaines catégories de produits DEEE, en particulier ceux destinés au grand public (BTC). Elle permet au consommateur de distinguer les produits sous 2 étiquettes : Majoritairement recyclable et partiellement recyclable. La notion de recyclabilité permet d'évaluer non seulement la possibilité de recycler un produit, mais aussi l'efficacité de ce recyclage.

Par exemple et de manière contre-intuitive : il est à noter que les matériaux biosourcés, tels que le bois et le verre, sont très mal recyclés dans la filière. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, une box internet en bois n'est donc pas une bonne idée en matière de recyclabilité. Il est préférable de privilégier des plastiques recyclables ou recyclés. Ceci souligne, une fois de plus, l'absolue nécessité de conduire une étude systémique du cycle de vie.

● L'ÉLIMINATION

Le produit et ses composants ne sont pas réutilisables ou plus exactement le coût (et l'énergie) nécessaire à sa transformation en matière première n'est pas soutenable. Le produit est alors soit incinéré et donc valorisé énergétiquement, soit dans le pire des cas : enfoui.

3. État de l'art

Le cas de l'élimination (incinération ou enfouissement) n'est pas traité ici. C'est la solution ultime, dans le cas où aucune des autres solutions ne peut être utilisée.

Nous nous concentrerons donc sur les options de réutilisation et recyclage. Évidemment, l'idéal est d'intégrer ces exigences en amont, dès la phase de conception.

• LA RÉUTILISATION PAR LE RECONDITIONNEMENT

Le reconditionnement des systèmes embarqués est un processus complexe qui consiste à **remettre en état des systèmes électroniques qui ont été utilisés ou endommagés**. Il s'agit d'une alternative écologique et économique à l'achat de nouveaux systèmes, et peut s'appliquer à une large gamme d'appareils, tels que les smartphones, les tablettes, les ordinateurs portables, les équipements grands publics, les équipements médicaux et industriels, etc.

Le processus de reconditionnement varie en fonction du type de système embarqué, mais il comprend généralement les étapes suivantes :

Diagnostic

- Inspection visuelle pour identifier les dommages physiques.
- Tests de diagnostic pour évaluer le fonctionnement du système.
- Identification des composants défectueux.

Nettoyage

- Nettoyage du système pour éliminer la poussière, la saleté et la corrosion.
- Remplacement des filtres, des ventilateurs et toutes pièces d'usure.

Réparation

- Remplacement des composants défectueux.
- Réparation des circuits imprimés.
- Calibration des capteurs et des actionneurs.

Tests

- Tests de performance pour s'assurer que le système fonctionne correctement.
- Tests de compatibilité pour s'assurer que le système fonctionne avec les logiciels et les périphériques existants.

Remise à neuf

- Nettoyage et emballage du système.
- Installation d'un nouveau système d'exploitation et des logiciels nécessaires.
- Inclusion d'une garantie.

Le reconditionnement des systèmes embarqués offre de nombreux avantages, notamment :

<p>Réduction des déchets électroniques</p> <p>En donnant une seconde vie aux appareils électroniques, le reconditionnement permet de réduire la quantité de déchets électroniques qui finissent dans les décharges.</p>	<p>Protection de l'environnement</p> <p>La fabrication de nouveaux systèmes électroniques consomme beaucoup d'énergie et de ressources naturelles.</p> <p>Le reconditionnement permet de réduire l'impact environnemental de l'industrie électronique.</p>	<p>Économies financières</p> <p>Les systèmes reconditionnés sont généralement beaucoup moins chers que les nouveaux systèmes.</p>
--	---	--

Cependant, il est important de noter que le reconditionnement des systèmes embarqués n'est pas toujours possible économiquement, même si cela est souhaitable environnementalement. En effet, le coût de la réparation est très souvent supérieur à celui d'un nouvel appareil, ou certains systèmes peuvent être trop endommagés pour être réparés. C'est seulement la prise en compte des externalités de la fabrication (donc tous les impacts environnementaux) de la fabrication qui pourrait rendre compétitive économiquement le reconditionnement ou la réparation. Il faudrait donc une volonté politique pour que les externalités soient prises en compte dans le coût de fabrication.

En conclusion, le reconditionnement des systèmes embarqués est une solution évidemment intéressante pour réduire les déchets électroniques, protéger l'environnement et faire des économies, mais nécessite d'intégrer ces exigences de reconditionnement dès la phase de conception du produit en pensant à son diagnostic, son nettoyage, son démontage, sa mise à jour, au remplacement de composant défectueux ou obsolète... En particulier, le démontage doit être prévu dès la phase de conception, et requiert, par exemple, que les assemblages soient réalisés avec des vis classiques plutôt qu'avec des vis baroques et des fixations plastiques qui se détruisent au démontage.



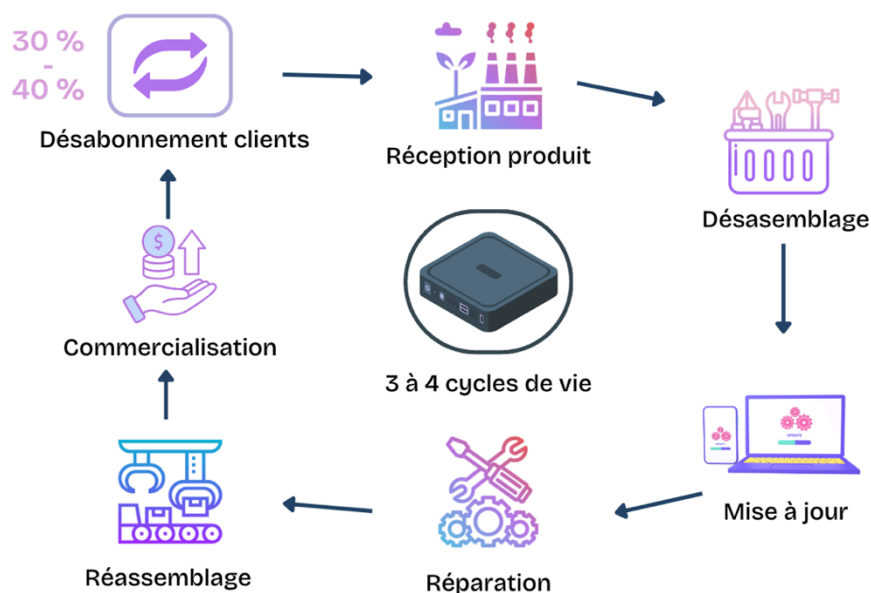
Cas Bouygues Telecom

EXEMPLE

Bouygues Telecom a adopté un modèle économique de service basé sur un système d'abonnement pour ses box, offrant plusieurs gammes adaptées aux différents besoins des clients. La conception même de ce modèle permet à l'entreprise de rester flexible et de répondre aux exigences du marché tout en intégrant des pratiques d'économie circulaire.

Pour maximiser l'utilisation et la durée de vie des produits, et ainsi augmenter le gain économique associé, Bouygues Telecom gère un stock important de box en rotation permanente. Lorsqu'un client se désabonne, la box est retournée à un centre spécialisé où elle est rénovée avant d'être réinjectée dans le stock pour une nouvelle distribution. Environ 30 à 40 % des box sont constamment en rotation, ce qui permet une gestion efficace du cycle de vie des produits.

Le processus de traitement des box retournées chez Bouygues Telecom est bien structuré et comprend plusieurs étapes. Tout d'abord, les box retournés sont reçues avec une connaissance préalable de la cause du retour. Ensuite, le produit est entièrement désassemblé et ses composants électroniques sont testés. Une mise à jour logicielle et un rétrofit sont effectués, suivis de la réparation des pannes identifiées. Enfin, le produit est remonté et testé avant d'être réinjecté dans le stock.



Les résultats obtenus montrent une optimisation significative des coûts. En rénovant et en réutilisant les produits plutôt qu'en les remplaçant par des neufs, l'entreprise a démontré la rentabilité économique de cette approche. Le développement d'un processus en série à Cherbourg, capable de traiter entre 70 000 et 100 000 produits par mois, illustre l'efficacité et la capacité de l'entreprise à gérer un volume élevé de retour. La flexibilité et l'adaptation sont également des points forts de cette stratégie, grâce à la capacité de remettre des pièces neuves ou de rénover certaines parties des produits. La transversalité entre les gammes de produits a été cruciale pour maintenir la fluidité du processus.

Cette expérience a mis en lumière plusieurs leçons importantes. Le choix des matériaux dès la phase de spécification s'est avéré crucial pour faciliter la rénovation et le recyclage des produits. L'économie circulaire ne se limite pas à la recyclabilité, mais inclut aussi des stratégies de prolongation de la durée de vie des produits, de maintenance et de reconditionnement.

Ce cas concret démontre que l'intégration de l'économie circulaire dans les systèmes embarqués peut être une stratégie gagnante, non seulement pour la diminution des coûts, mais aussi pour l'innovation en matière de durabilité. Le modèle d'abonnement et la conception des box engendrent nécessairement une forme de circularité dans la chaîne de processus. Au-delà de tout aspect environnemental, les stratégies d'économie circulaire permettent une robustesse et une flexibilité économique fortes. Les box sont un exemple concret de la manière dont les entreprises peuvent adopter des pratiques plus durables tout en restant compétitives.

● LE RECYCLAGE

Le recyclage d'un système embarqué est complexe, car nécessite souvent de nombreuses opérations fines et difficiles à automatiser, comme :

- L'ouverture du boîtier mécanique dont les pièces peuvent être vissées, emboîtées ou collées (cas du smartphone par exemple où les trois cas d'assemblage coexistent).
- La séparation des composants de type piles ou batteries des cartes électroniques.
- L'extraction des composants comportant des données sensibles (disques durs, mémoires Flash, EPROM...).
- La récupération des fils, câbles et nappes (cuivre).
- La mise à nu du circuit imprimé (PCB) qui est ensuite broyé pour séparer les particules de métal (cuivre et or essentiellement) et la fibre de verre de la résine époxy.

Le recyclage des PCB et notamment la séparation de la fibre de verre et de la résine d'époxy à l'échelle industrielle n'est, à date, pas encore éprouvé.

4. Bonnes pratiques existantes dans le cadre d'une démarche d'éco-conception

Comment faire ? En prenant en compte la fin de vie ! Autrement dit, en intégrant des exigences concernant la réutilisation (et notamment, le reconditionnement), le recyclage, et l'élimination dès la phase de conception des SE, il est alors possible de réduire considérablement leur impact environnemental et de faciliter leur traitement en fin de vie.

Voici quelques principes à prendre en compte :

Durabilité

- Concevoir des SE avec des matériaux durables et résistants à l'usure.
- Utiliser des composants modulaires et faciles à remplacer.
- Privilégier la conception pour la démontabilité et l'assemblage.
- S'appuyer sur des standards techniques.

Réparabilité

- Faciliter l'accès aux composants critiques pour la réparation.
- Fournir des informations (manuels, schémas...) et des outils pour la maintenance et la réparation.

Recyclabilité

- Utiliser des matériaux facilement recyclables.
- Marquer clairement les composants et matériaux pour faciliter le tri.
- Concevoir des SE pour un démontage facile.

Reconditionnement

- Standardiser les interfaces et les connecteurs pour faciliter la compatibilité entre les modèles.
- Concevoir des SE avec des composants facilement remplaçables et interchangeables.
- Fournir des informations et des ressources pour le reconditionnement.

En intégrant ces principes dès la phase de conception, les fabricants de SE peuvent :

- Réduire l'utilisation de ressources naturelles et d'énergie.
- Prolonger la durée de vie des SE.
- Faciliter le recyclage et le reconditionnement des SE.

- Diminuer la quantité de déchets électroniques.

En outre, la prise en compte de la fin de vie et du reconditionnement dès la phase de conception, peut également avoir des avantages économiques pour les fabricants, tels que :

- Réduction des coûts de production.
- Augmentation de la valeur résiduelle des SE.
- Amélioration de l'image de marque.

L'éco-conception des SE est un enjeu majeur pour l'industrie électronique et pour la protection de l'environnement. En intégrant les principes de la fin de vie et du reconditionnement dès la phase de conception, les fabricants peuvent contribuer à une économie plus circulaire et durable.

En conclusion, la prise en compte de la fin de vie et du reconditionnement dès la phase de conception des SE est un enjeu crucial pour l'environnement et pour l'économie.

5. Manques identifiés dans le cadre d'une démarche d'éco-conception

Dans le triptyque lié à la fin de vie : réutilisation, recyclage, élimination, la tendance est aujourd'hui d'éliminer d'abord et de recycler ensuite. La réutilisation n'existe qu'à la marge pour certaines typologies de produits. L'idéal serait l'inverse : d'éviter au maximum l'élimination et de favoriser la réutilisation des produits et lorsque impossible, seulement, de recycler.

Le reconditionnement n'est pas prévu lors de la conception d'un produit et est même très rarement mentionné dans les cahiers des charges clients. Pourtant, on assiste parmi les acheteurs et utilisateurs à un mouvement en faveur du reconditionnement, par exemple avec l'émergence des repair-cafés.

Il nous semble que le premier manque dans cette démarche est une bonne information des utilisateurs / citoyens, des industriels et de toute la chaîne de sous-traitants sur la difficulté du recyclage qui est très partielle, très coûteuse et globalement très complexe. Un partage de bonnes pratiques de réutilisation économiquement intéressante (cas des Set Top Box télécom, des smartphones) avec des business models réinventés permettraient sûrement à l'écosystème du SE de réfléchir autrement.

Conclusion

La crise environnementale est là et on en constate tous les jours les ravages : augmentation de la température, accélération et aggravation des catastrophes climatiques (canicules, sécheresses, inondations), baisse des rendements agricoles, épuisement des ressources minières et d'hydrocarbures, effondrement de la biodiversité, pollution généralisée des sols, de l'eau (nappes phréatiques, cours d'eau, océans) et de l'atmosphère. Ce terrible constat fait l'objet d'un consensus scientifique, étayé par les rapports du GIEC. Il est impératif d'agir aujourd'hui et, à défaut, d'aller vers une décroissance dont les pays riches ne veulent pas, il est impératif d'adopter une démarche d'éco-conception pour tous les produits de notre société industrielle.

En s'appuyant sur une description détaillée du cycle de vie des systèmes embarqués, ce livre blanc a révélé la complexité et l'importance cruciale d'adopter une démarche d'éco-conception à chaque étape du cycle de vie.

Nous avons présenté les bases d'une méthodologie couvrant à la fois le matériel et le logiciel, tout en intégrant les contraintes spécifiques des systèmes embarqués, offrant ainsi une vue globale. Cette approche est la clé pour répondre aux enjeux environnementaux mais aussi économiques que nous avons abordés en introduction et détaillés tout au long de ce livre blanc.

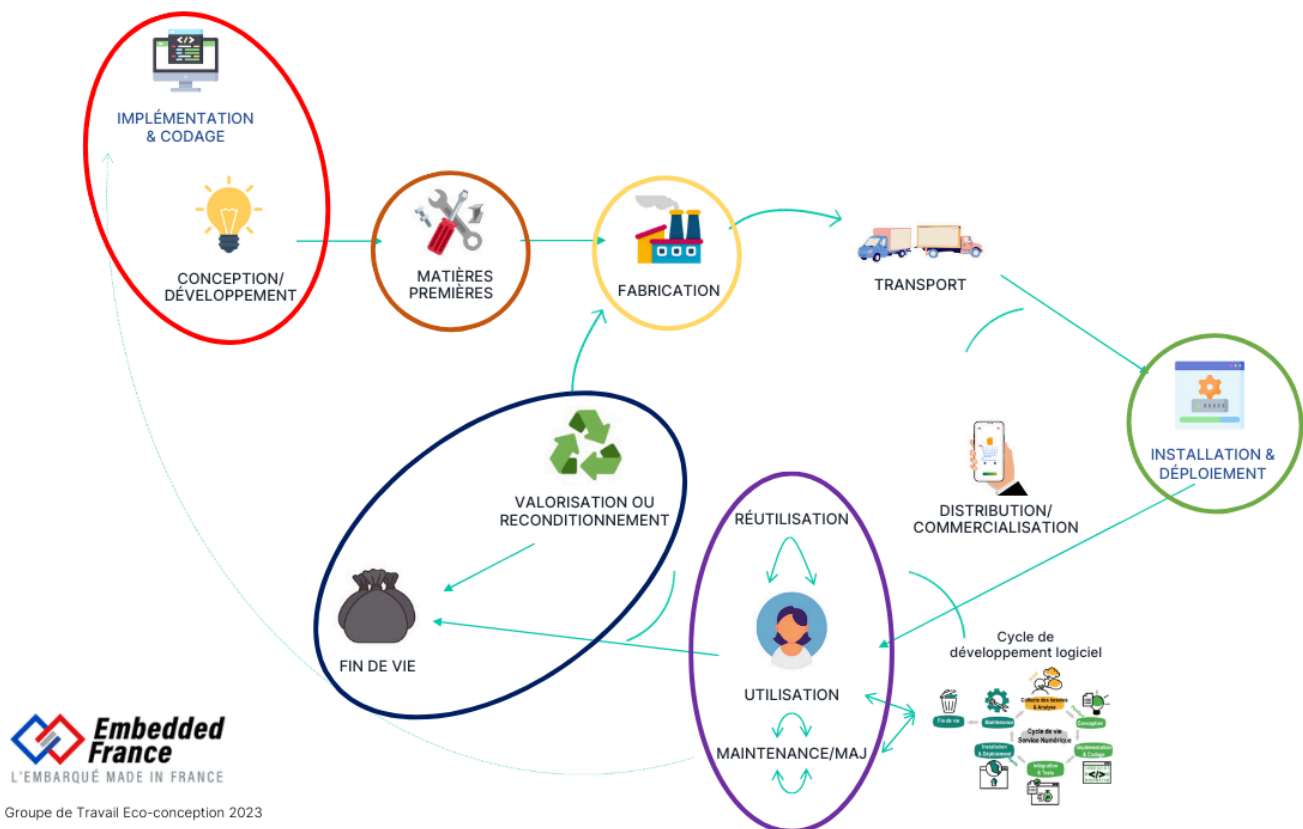
La première étape du cycle de vie, dédiée à la conception et au développement, doit être entièrement repensée pour une **vraie** démarche d'éco-conception. Nous avons souligné la nécessité d'anticiper en amont les choix d'architecture influençant le reste du cycle de vie. Le concepteur-fabricant doit porter une attention particulière à la sélection des matériaux et des composants, et aux choix techniques de façon à faciliter la maintenance et la réparabilité, et ainsi à augmenter la durée de vie du système embarqué. La complexité de cette étape vient du fait qu'un système embarqué est un assemblage d'actionneurs et de moteurs, de composants électroniques multiples (capteurs, antennes, micro-processeurs, écrans, ...), de logiciels qui le pilotent et qui réalisent ses fonctionnalités, le tout encapsulé dans un packaging. C'est à ce niveau que les décisions prises peuvent avoir les plus grands impacts sur l'économie des ressources et la durabilité du produit. Il en va de même des logiciels qui équipent le système embarqué : ils doivent être conçus pour être remplaçables facilement, pour être interopérables, et surtout pour éviter les problèmes d'obsolescence croisée logiciel/matériel. Par exemple, une mise à jour de sécurité sur un protocole de communication externe à un système embarqué considéré doit seulement entraîner la mise à jour correspondante du module de communication qui utilise ce protocole, et sûrement pas le remplacement d'un composant électronique.

Les étapes suivantes du cycle de vie, concernant la production, fabrication et transport, doivent également être optimisées pour réduire l'empreinte environnementale. Les matières premières, en particulier les composants électroniques et les métaux, représentent un point critique. Il s'agit d'optimiser des processus industriels tout en répondant aux exigences techniques strictes inhérentes au secteur des systèmes embarqués (normes, certifications, ...). La production et la logistique doivent être pensées de manière à minimiser les kilomètres parcourus. Tout suremballage doit être évité.

Les étapes d'installation et de déploiement doivent également être revues dans l'optique de l'éco-conception. L'intégration des systèmes embarqués, en particulier dans des environnements complexes comme les grandes infrastructures industrielles, nécessite une approche flexible en prenant en compte la durabilité. La phase de maintenance joue alors un rôle central. Ce livre blanc souligne la nécessité d'une maintenance et de mises à jour régulières, tant au niveau logiciel que matériel, pour prolonger la durée de vie et éviter l'obsolescence, qu'elle soit programmée ou subie. Comme le souligne cette publication, ces étapes du cycle de vie sont étroitement dépendantes de la première étape, conception et développement.

En fin de vie, le système doit être valorisé au maximum, que ce soit par le reconditionnement ou le recyclage. L'objectif que chacun des acteurs doit se fixer est de maximiser la récupération des composants et minimiser les déchets. La réutilisation est mise en avant comme une alternative efficace pour éviter l'élimination prématurée des systèmes.

Afin de résumer l'exercice de ce livre blanc, nous proposons au lecteur de reprendre le cycle de vie d'un système embarqué et d'y insérer des exemples de questions à se poser avant d'entamer une démarche d'éco-conception.



Implémentation et codage, conception, développement

- Est-ce que tout ce que je veux faire est utile dans mon système ?
- Est-ce que je ne prévois pas trop ?
- Ai-je pris en compte chaque étape du cycle de vie et ses impacts ?

Matières premières

- Puis-je sourcer un fournisseur plus responsable ?
- Puis-je sourcer un fournisseur plus proche ?

Fabrication

- Puis-je réduire la marge d'erreur et donc les rebuts ?
- Puis-je réduire les déchets (par exemple, les emballages) ?
- Puis-je utiliser une énergie plus verte pour la production ?
- Puis-je réduire le transport vers et depuis le site de fabrication ?

Installation et déploiement

- Puis-je automatiser l'installation ?
- Puis-je réduire les travaux liés au déploiement ?

Réutilisation, utilisation, maintenance et mise à jour

- Puis-je réduire la consommation énergétique ?
- Puis-je mettre en place du Maintien en Condition Opérationnelle (MCO) ?
- Puis-je atténuer l'impact de mon système ?

Valorisation et fin de vie

- Ai-je prévu le reconditionnement de mon système ?
- Puis-je faire recycler ou réparer mon système ?

Finalement, ce livre blanc invite à une transition vers une économie circulaire dans le domaine des systèmes embarqués. L'intégration de bonnes pratiques d'éco-conception dès les phases initiales permet non seulement de répondre aux impératifs réglementaires, mais aussi de créer des avantages économiques pour les entreprises tout en minimisant leur empreinte environnementale. L'adoption d'une telle démarche, basée sur l'optimisation des ressources et une réflexion systémique, est la clé pour un fabricant, afin d'assurer la durabilité et la compétitivité de ses systèmes embarqués dans les décennies à venir.

Bibliographie

- [1] : Plus d'information sur <https://www.embedded-france.org/mission/>
- [2] : Plus d'information sur <https://www.embedded-france.org/groupe-de-travail-éco-conception/>
- [3] : Patrice Kadionik, 2004
- [4] : Pierre Ficheux, 2003
- [5] : <https://www.undp.org/fr>
- [6] : ADEME
- [7] : [Lean ICT Materials] Forecast Model. Produit par The Shift Project / 2018
- [8] : PAC Horizons 2022 - Palais Brongniart, Paris
- [9] : <https://www.cea.fr/>
- [10] : <https://6tron.io/>
- [11] : <https://www.catie.fr/>
- [12] : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/ALL/?uri=CELEX:32002L0095>
- [13] : <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/reglementation-reach>
- [14] : <https://www.eecone.com/eecone/home/>
- [15] : <https://www.smart-systems-integration.org/news/white-paper-green-ecs-final-version-available>
- [16] : Bordage, Frédéric. éco-conception web: les 115 bonnes pratiques: doper son site et réduire son empreinte écologique. Editions Eyrolles, 2022.
- [17] :
<https://www.vie-publique.fr/en-bref/280140-transport-de-marchandises-comment-reduire-limpact-environnemental>
- [18] : <https://www.ecologie.gouv.fr/loi-anti-gaspillage-economie-circulaire>
- [19] : <https://www.appvizer.fr/magazine/operations/gestion-de-projet/specifications-techniques>
- [20] : J. Kirchherr, D. Reike, and M. Hekkert, 'Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions', Resources, Conservation and Recycling, vol. 127, pp. 221–232, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.09.005.
- [21] : Bordage, Frédéric. éco-conception web: les 115 bonnes pratiques: doper son site et réduire son empreinte écologique. Editions Eyrolles, 2022.
- [22] : https://fr.wikipedia.org/wiki/Ressource_naturelle
- [23] : https://fr.wikipedia.org/wiki/Mati%C3%A8re_premi%C3%A8re
- [24] : <https://www.miningfrontier.com/projects/carajas-iron-ore-mine-brazil/>
- [25] : https://fr.wikipedia.org/wiki/Extraction_du_cuivre
- [26] : <https://fr.geologyscience.com/min%C3%A9raux-de-minerai/minerai-de-fer/>
- [27] : <https://www.iea.org/energy-system/buildings/data-centres-and-data-transmission-networks>,
<https://www.iris-france.org/188600-les-nouvelles-technologies-ia-data-centers-sont-elles-compatibles-avec-les-objectifs-de-durabilite-environnementale/>,
<https://www.theguardian.com/technology/2024/sep/15/data-center-gas-emissions-tech>
- [28] : https://fr.wikipedia.org/wiki/Identit%C3%A9_de_Kaya
- [29] :
<https://www.atf-gaia.fr/fr/actualites/atf-gaia-paprec-d3e-service-3r3e-rachat-reemploi-et-recyclage-dequipements-electriques>, <https://www.certidev.com/>, <https://www.ecologic-france.com/>,
<https://www.fairphone.com/>, <https://www.dell.com/>, <https://www.hp.com/us-en/home.html>,
<https://www.ncabgroup.com/fr/blog/recyclage-des-circuits-imprimees/>