



# Recommandations pour une conception électronique favorable à la réparation

## Réparabilité en vue de la soutenabilité

### Résumé

Quelles mesures concrètes peuvent être prises dès la conception d'une carte électronique pour rendre un appareil plus facilement réparable ? Ce document propose quelques recommandations en vue d'aider le concepteur à différentes étapes de conception, ainsi qu'un tableau permettant de mesurer cette réparabilité.

Simon Chabanne – G2ELAB

Projet VIVAE 2023

## TABLE DES MATIERES

Introduction .....	2
Pourquoi concevoir réparable .....	2
Choix de scénario, compatibilité et incompatibilité avec d'autres pratiques de l'économie dite circulaire .....	4
Antagonisme supposé entre réparabilité et performance .....	4
Pour qui ? .....	5
Fonctions du circuit et conception du schéma électrique .....	7
Conception simple, dissociation des fonctions secondaires et principales, modularité fonctionnelle .....	7
Limitation et identification des familles de composants sensibles .....	7
Analyser les différentes défaillances de composant et leurs effets sur le circuit .....	7
Ajout de méthode de diagnostic visuel .....	12
Simulations physiques .....	12
Choix des composants & Empreinte .....	12
Durée de vie .....	13
Standardisation .....	13
Disponibilité .....	13
Boîtier, taille et empreinte .....	13
Placement & Routage .....	13
Conception modulaire physique .....	13
Espacement et freins thermique .....	14
Présence de testpoints .....	14
Référence des composants, niveaux de tension et autres information .....	14
Accès à la documentation et identification du circuit .....	14
Assemblage mécanique .....	15
Outils .....	15
Fixations et connecteurs .....	15
Boîtier .....	16
Documentation .....	17
Modèle économique et économie circulaire .....	18
Tableau d'auto-notation évaluant la réparabilité en électronique de puissance .....	19
Travaux cités .....	20
Annexes .....	21

POURQUOI CONCEVOIR REPARABLE

L'objectif de ce document est de donner des pistes pour concevoir des circuits électroniques intégrant les enjeux de réparation. En effet, il apparait de plus en plus primordial de prendre en compte les limites planétaires, notamment en terme d'extractivisme (SystExt, 2021) et de consommation d'eau (Roussilhe, Eau et puces électroniques, l'avenir climatique et industriel de Taiwan, s.d.) (Roussilhe, Explication sur l'empreinte environnementale du numérique, s.d.) et d'énergie.

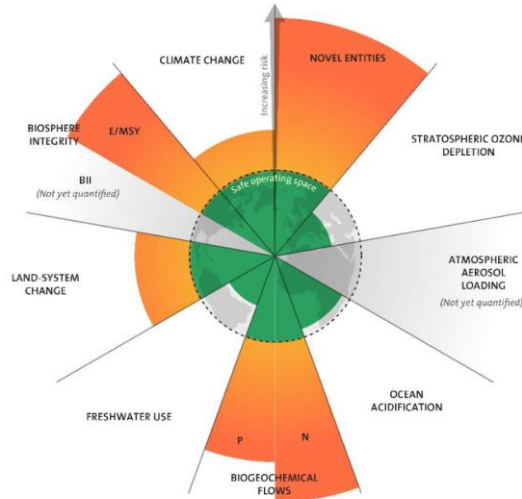


Figure 1 : Les limites planétaires et leur dépassement en 2022 - Stockholm Resilience Centre (Azote)

ÉVALUATION DE CRITICITÉ PAR LE WORLD MATERIALS FORUM

■ Risque très élevé  
■ Haute probabilité de risque accru  
■ Nécessité de veiller sur les risques  
■ Faible probabilité de risque accru  
■ Risque faible

Numéro atomique		Symbole		Nom		Poids atomique		
1	1	H	Hydrogène	1.008				
2	2	He	Hélium	4.0026				
3	3	Li	Lithium	6.941				
4	4	Be	Béryllium	9.0122				
5	5	B	Bore	10.811				
6	6	C	Carbone	12.011				
7	7	N	Azote	14.007				
8	8	O	Oxygène	15.999				
9	9	F	Fluor	18.998				
10	10	Ne	Neon	20.180				
11	11	Na	Sodium	22.990				
12	12	Mg	Magnésium	24.305				
13	13	Al	Aluminium	26.982				
14	14	Si	Silicium	28.086				
15	15	P	Phosphore	30.974				
16	16	S	Soufre	32.06				
17	17	Cl	Chlore	35.45				
18	18	Ar	Argent	39.948				
19	19	K	Potassium	39.098				
20	20	Ca	Calcium	40.078				
21	21	Sc	Scandium	44.956				
22	22	Ti	Titane	47.88				
23	23	V	Vanadium	50.942				
24	24	Cr	Chrome	51.996				
25	25	Mn	Manganèse	54.938				
26	26	Fe	Fer	55.845				
27	27	Co	Cobalt	58.933				
28	28	Ni	Nickel	58.693				
29	29	Cu	Cuivre	63.546				
30	30	Zn	Zinc	65.38				
31	31	Ga	Gallium	69.723				
32	32	Ge	Germanium	72.63				
33	33	As	Arsenic	74.922				
34	34	Se	Sélénium	78.96				
35	35	Br	Brome	79.904				
36	36	Kr	Krypton	83.80				
37	37	Rb	Rubidium	85.468				
38	38	Sr	Strontium	87.62				
39	39	Y	Yttrium	88.906				
40	40	Zr	Zirconium	91.224				
41	41	Nb	Niobium	92.906				
42	42	Mo	Molibdène	95.94				
43	43	Tc	Technetium	98				
44	44	Ru	Ruthénium	101.07				
45	45	Rh	Rhodium	102.91				
46	46	Pd	Palladium	106.36				
47	47	Ag	Argent	107.87				
48	48	Cd	Cadmium	112.41				
49	49	In	Indium	114.82				
50	50	Sn	Étain	118.71				
51	51	Sb	Antimoine	121.76				
52	52	Te	Tellure	127.6				
53	53	I	Iode	126.905				
54	54	Xe	Xénon	131.29				
55	55	Cs	Césium	132.905				
56	56	Ba	Baryum	137.33				
57-71	57-71	Lanthanides						
72	72	Hf	Hafnium	178.49				
73	73	Ta	Tantale	180.948				
74	74	W	Tungstène	183.84				
75	75	Re	Réhenium	186.207				
76	76	Os	Osmium	190.23				
77	77	Ir	Iridium	192.22				
78	78	Pt	Platine	195.084				
79	79	Au	Or	196.967				
80	80	Hg	Mercure	200.59				
81	81	Tl	Thallium	204.38				
82	82	Pb	Plomb	207.2				
83	83	Bi	Bismuth	208.98				
84	84	Po	Polonium	209				
85	85	At	Astato	209				
86	86	Rn	Radon	222				
87	87	Fr	Francium	223				
88	88	Ra	Radium	226				
89-103	89-103	Actinides						
104	104	Rf	Rutherfordium	261				
105	105	Db	Dubnium	262				
106	106	Sg	Seaborgium	263				
107	107	Bh	Berkelium	264				
108	108	Hs	Hassium	265				
109	109	Mt	Moscovium	266				
110	110	Ds	Darmstadtium	267				
111	111	Rg	Roentgenium	268				
112	112	Cn	Copernicium	269				
113	113	Uut	Ununtrium	270				
114	114	Fl	Flerovium	271				
115	115	Uup	Ununpentium	272				
116	116	Lv	Livermorium	273				
117	117	Uus	Ununseptium	274				
118	118	Uuo	Ununoctium	276				
119	119	Uue	Ununennium	277				
120	120	Uuq	Unquadium	278				
121	121	Uub	Unbium	279				
122	122	Uuo	Unocosmium	280				
123	123	Uuq	Ununquadium	281				
124	124	Uuq	Ununquadium	282				
125	125	Uub	Unbium	283				
126	126	Uuo	Ununoctium	284				
127	127	Uuq	Ununquadium	285				
128	128	Uuo	Ununoctium	286				
129	129	Uuq	Ununquadium	287				
130	130	Uuo	Ununoctium	288				
131	131	Uuq	Ununquadium	289				
132	132	Uuo	Ununoctium	290				
133	133	Uuq	Ununquadium	291				
134	134	Uuo	Ununoctium	292				
135	135	Uuq	Ununquadium	293				
136	136	Uuo	Ununoctium	294				
137	137	Uuq	Ununquadium	295				
138	138	Uuo	Ununoctium	296				
139	139	Uuq	Ununquadium	297				
140	140	Uuo	Ununoctium	298				
141	141	Uuq	Ununquadium	299				
142	142	Uuo	Ununoctium	300				
143	143	Uuq	Ununquadium	301				
144	144	Uuo	Ununoctium	302				
145	145	Uuq	Ununquadium	303				
146	146	Uuo	Ununoctium	304				
147	147	Uuq	Ununquadium	305				
148	148	Uuo	Ununoctium	306				
149	149	Uuq	Ununquadium	307				
150	150	Uuo	Ununoctium	308				
151	151	Uuq	Ununquadium	309				
152	152	Uuo	Ununoctium	310				
153	153	Uuq	Ununquadium	311				
154	154	Uuo	Ununoctium	312				
155	155	Uuq	Ununquadium	313				
156	156	Uuo	Ununoctium	314				
157	157	Uuq	Ununquadium	315				
158	158	Uuo	Ununoctium	316				
159	159	Uuq	Ununquadium	317				
160	160	Uuo	Ununoctium	318				
161	161	Uuq	Ununquadium	319				
162	162	Uuo	Ununoctium	320				
163	163	Uuq	Ununquadium	321				
164	164	Uuo	Ununoctium	322				
165	165	Uuq	Ununquadium	323				
166	166	Uuo	Ununoctium	324				
167	167	Uuq	Ununquadium	325				
168	168	Uuo	Ununoctium	326				
169	169	Uuq	Ununquadium	327				
170	170	Uuo	Ununoctium	328				
171	171	Uuq	Ununquadium	329				
172	172	Uuo	Ununoctium	330				

Figure 2 : Tableau de Mendeleïev révisé par le BRGM et les consultants de CRU et de McKinsey (BRGM, consultants de CRU et de McKinsey, 2022)

En électronique, l'enjeu est donc de réduire la production du secteur numérique, consommant énormément d'eau, de matières rares ou critiques, et d'énergie, tout en rejetant tout au long de son processus de production (de l'extraction minière au PCB) de nombreux produits chimiques et gaz à effet de serre.

Une des pistes pour limiter la production de nouveaux produits est de créer une circularité dans l'industrie de l'électronique : à la place d'un processus linéaire, du minerai à la poubelle, on va chercher à revaloriser un maximum les produits inutilisés ou endommagés : réusage, réparation, reconditionnement, récupération, recyclage...

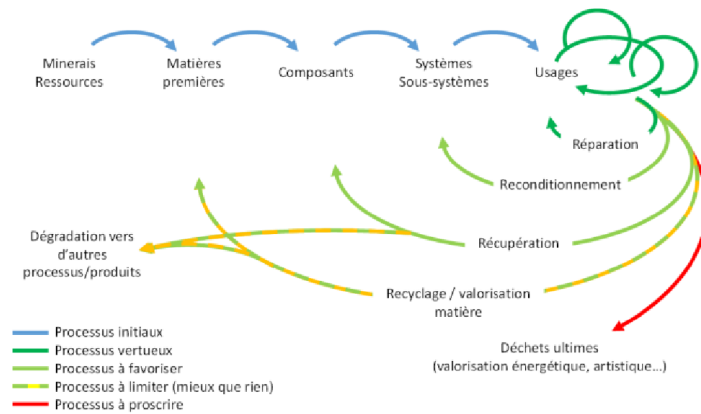


Figure 3 : Préférences de boucles d'économie circulaire (ANR Vivae, s.d.)

Plus on repart de loin dans le processus industriel, plus on doit consommer d'énergies, de produits chimiques et de ressources pour produire l'objet. L'enjeu est alors d'emprunter la boucle le plus petit possible : prioriser un réusage des objets fonctionnels, puis une réparation.

Concevoir réparable, c'est limiter l'obsolescence des produits, en pensant dès la conception à ce qui pourra faciliter un usage le plus long possible des appareils électroniques.

#### CHOIX DE SCENARIO, COMPATIBILITE ET INCOMPATIBILITE AVEC D'AUTRES PRATIQUES DE L'ECONOMIE DITE CIRCULAIRE

Choisir de concevoir réparable implique des choix techniques qui peuvent être différents de ceux nécessaires à faire pour d'autres scenario. Les auteurs de l'article *Multiple generation life-cycles for product sustainability: the way forward* (T.F. Go, 2015), dont nous recommandons vivement la lecture, détaillent plusieurs stratégies pour un design vers plusieurs cycles de vie :

- design for environment (*annexe 1*)
- design for remanufacture
  - design for upgrade
  - design for assembly
  - design for disassembly
  - design for modularity
  - design for maintainability
  - design for reliability

Ces stratégies impliquent différents choix techniques : le recyclage peut par exemple souhaiter un minimum de matériaux sur les télévisions, et donc des fixations clips en plastique, pour ensuite broyer la télévision et récupérer les matières premières les plus homogènes possibles, là où la réparation a besoin d'un design facilitant le démontage, et donc de fixations facilement démontables et solides, comme des vis.

Ce document a pour but de détailler des recommandations spécifiques à la réparabilité.

#### ANTAGONISME SUPPOSE ENTRE REPARABILITE ET PERFORMANCE

Il est courant en électronique de présupposer que la réparabilité serait antagoniste avec la performance. Il serait tentant de simplement répondre que si c'est le cas, alors peut-être qu'il faut réfléchir à si la performance en électronique n'est pas antagoniste avec la soutenabilité et le respect des limites planétaires, et que le choix n'est pas si difficile à faire qu'il n'y paraît.

Mais au-delà de cette réflexion, il semble bien que cet antagonisme soit grandement une idée préconçue. En effet, si la miniaturisation et la complexification de l'électronique rend de plus en plus difficile la réparation, les principales

demandes des réparateurs concernent souvent des enjeux de transmissions d'informations et de diagnostic. L'absence de transparence entretenue autour des schémas électroniques, l'impossibilité d'identifier les composants et bien souvent l'absence de possibilité d'effectuer un diagnostic de ces derniers sont aujourd'hui parmi les principaux freins à la réparation.

Le concepteur peut donc assez aisément lever de nombreuses barrières grâce à des mesures simples et n'impactant la plupart du temps pas la performance, que nous nous proposons de détailler ci-dessous.

## POUR QUI ?

La première chose à prendre en compte est de réfléchir à qui va réparer ce produit. Cela permettra de cibler ce qui est possible pour le réparateur en termes de budget, de compétences, de matériel, de temps et de motivation.

On distingue les catégories suivantes :

- Particuliers
  - Non formés
  - Formés
- Associatifs (repair café, atelier d'autoréparation ou de co-réparation, FabLab ...)
- Professionnels
  - Professionnels non-agrérés
  - Professionnels agrés
- Fabricants & distributeurs

Le concepteur peut donc réfléchir dès la conception aux questions suivantes :

- Qui va utiliser l'objet conçu ?
- Qui sont les acteurs qui essayeront de le réparer ?
- De quels niveaux d'information disposeront-ils sur le produit ? Est-ce suffisant ?
- De quel matériel disposent-ils ?
- Quel niveau de compétence ont-ils ?
- Ont-ils accès aux pièces détachées ou composant de rechange ?

Si notre but est de rendre le produit réparable uniquement par des réparateurs professionnels, nous aurons par la suite beaucoup moins de contraintes en termes de niveau de compétence et de limitations induits par le matériel, mais il faudra néanmoins toujours s'assurer d'avoir une documentation complète et disponible, et de rendre accessibles les outils et pièces détachées spécifiques à notre produit.

Tableau 1 : synthèse technique du travail d'enquête sur les spécificités des différents types de réparateurs

	<b>PARTICULIER</b>	<b>ASSOCIATIF (REPAIR CAFE...)</b>	<b>MAINTENANCE INTERNE (ACADEMIQUE OU INDUSTRIE)</b>	<b>REPARATEUR INDEPENDANT</b>	<b>REPARATEUR AGREE, SAV</b>
<b>PUBLIC</b>	Particulier	Particulier	Entreprise/laboratoire	Particuliers et professionnels	Particuliers et professionnels
<b>TYPE D'OBJETS</b>	Variable, petite électronique et électroménager	Variable, petite électronique et électroménager	Légère spécialisation, machines industrielles	Spécifique	Spécifique
<b>BUDGET</b>	Faible	Relativement faible	Important	Relativement important	Important
<b>MATERIEL</b>	Incomplet	Correct mais non spécialisé	De correct à bon, légèrement spécialisé	Complet et spécialisé	Très complet et spécialisé
<b>NIVEAU DE COMPETENCE</b>	Faible	Correct	Plutôt important	Très important	Très important
<b>NIVEAU D'ACCES ACTUEL A L'INFORMATION</b>	Faible	Faible	Moyen	Plutôt moyen	Important
<b>OUTILS D'INFORMATION SOUHAITABLE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Information sur le caractère réparable</li> <li>- Information de sécurité</li> <li>- Guide de diagnostic (fonctionnement et tension) et de réparation basique,</li> <li>- Information sur les services de réparation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Référencement des composants, schéma électronique, service manual, guide de diagnostic (tension, puissance consommées et valeurs des composants), listes des composants faillibles à tester</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Référencement des composants</li> <li>- Schéma électronique</li> <li>- Service manual</li> <li>- Guides de diagnostic (tension, puissances consommées, intensités, signaux et formes d'ondes)</li> <li>- Listes des composants faillibles à tester</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Référencements des composants</li> <li>- Schéma électronique et doc détaillées</li> <li>- Service manual détaillées</li> <li>- Guides de diagnostic (tension, puissances consommées, intensités, signaux et formes d'ondes)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Données complètes de conception (schéma, valeurs de références, diagnostics prévus etc.)</li> </ul>
<b>CONCEPTION AIDANTE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Démontabilité avec outils courants</li> <li>- Points de tests de tension simples &amp; indicateurs visuels &amp; codes d'erreurs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Démontabilité avec outils non-proprétaires</li> <li>- Points de tests de tension par modules fonctionnels &amp; composants faillibles</li> <li>- Codes d'erreurs</li> <li>- Composants faillibles facile d'accès et de démontage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Démontabilité avec outils non-proprétaires</li> <li>- Points de tests de tension &amp; signaux par modules fonctionnels &amp; composants faillibles &amp; points stratégiques</li> <li>- Codes d'erreurs</li> <li>- Composants faillibles facile d'accès et de démontage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Démontabilité avec des outils commercialisés</li> <li>- Points de tests de tension &amp; signaux par modules fonctionnels &amp; composants faillibles &amp; points stratégiques</li> <li>- Codes d'erreurs</li> <li>- Composants faillibles faciles d'accès et de démontage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Démontabilité possible</li> <li>- Diagnostic possible</li> </ul>
<b>DETAILS DES MODELES POSSIBLE ET FINANCEMENT</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Autoformation, formation en ligne, aide de proche</li> <li>- Récup, achats d'occasion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Repair café, participation plus ou moins grande de l'utilisateur, ateliers de formations, stocks de composants</li> <li>- Subventions, prix libres, services rémunérés aux professionnels</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maintenance en usine, maintenance &amp; réparation en laboratoire, en bureau de développement</li> <li>- Financement par l'entreprise/la structure, politique RSE, aide de l'état</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réparateurs généralistes ou spécialisés, à domicile ou en boutique, gros atelier ou indépendant</li> <li>- Aide à l'installation, prime de réparation</li> <li>- Aide à la formation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- SAV interne, contrat entre le fabricant et des sous-traitant, B2B ou B2C</li> <li>- Aide de l'état, trésorerie interne, contrat fabricant-sous-traitant</li> </ul>

## CADRE LEGALE DANS LE CAS DE L'AUTOREPARATION

Selon l'article L441-5 du code de la consommation (*Livre IV : CONFORMITÉ ET SÉCURITÉ DES PRODUITS ET SERVICES*) : *S'il a conçu son appareil en prévoyant les cas d'autoréparation et s'il a donné les consignes de sécurité adéquates pour qu'un utilisateur puisse réaliser une autoréparation, le fabricant ne peut être tenu responsable d'un dommage survenu lors d'une autoréparation dans la mesure où ce dommage est lié à une maladresse de l'utilisateur ou au non-respect par ce dernier des consignes de réparation du produit.*

## FONCTIONS DU CIRCUIT ET CONCEPTION DU SCHEMA ELECTRIQUE

Les recommandations concernant la robustesse du circuit peuvent être envisagées dès le début de la conception : l'objectif est que le circuit fonctionne le plus longtemps possible et soit le moins sensible possible aux défaillances, pour qu'une réparation soit possible.

La construction du schéma électronique peut aussi permettre d'intégrer des enjeux de diagnostic.

## CONCEPTION SIMPLE, DISSOCIATION DES FONCTIONS SECONDAIRES ET PRINCIPALES, MODULARITE FONCTIONNELLE

On souhaite éviter que la défaillance d'une partie du circuit empêche tout fonctionnement de l'appareil, voire pire, l'endommagement. Pour cela on va dissocier un maximum les différentes fonctionnalités du circuit. Cette dissociation peut se faire en séparant un maximum les circuits ne réalisant pas les mêmes fonctions, et en utilisant des composants de sécurités pour chacun d'entre eux (fusibles, limiteurs de courant, circuits de suppression des surtensions...)

Par exemple, une défaillance sur un écran de contrôle ne devrait pas empêcher un convertisseur de fonctionner.

## LIMITATION ET IDENTIFICATION DES FAMILLES DE COMPOSANTS SENSIBLES

Certains composants sont connus pour être plus souvent sources de défaillance d'après la littérature. (Shaoyong Yang, 2011) (Johannes Flack, 2018) (Huai Wang, 2014). Dans l'ordre on classerait les catégories de composant comme ceci :

1. Les semi-conducteurs « modules »
2. Les condensateurs électrolytiques
3. Les semi-conducteurs discrets (diodes, transistors, thyristors, ...)
4. Les condensateurs films
5. Environ ex-aequo :
  - Les condensateurs céramiques
  - Les semi-conducteurs drivers (driver gate)
  - Les composants électromécaniques (relais, contacts, ...)
  - Les systèmes de protection (surtension, fusibles, ...)
  - Les systèmes de refroidissement
  - Les systèmes d'alimentation secondaires
  - Les connecteurs
6. Les capteurs (voltage, courant, T°...) et les systèmes de contrôles hardware (µC, FPGA, ...)
7. Les composants magnétiques (inductances, transfo, ...)
8. Les composants mécaniques

Minimiser la quantité des composants les plus faillibles dans son circuit est un grand pas vers un allongement de la durée de vie des circuits.

## ANALYSER LES DIFFERENTES DEFAILLANCES DE COMPOSANT ET LEURS EFFETS SUR LE CIRCUIT

Malgré un travail de minimisation des composants susceptibles d'être défaillant, il est généralement impossible de faire sans. On va donc chercher à ne pas mettre la poussière sous le tapis, mais au contraire clairement identifier et

visibiliser quels sont les composants les plus à même de causer la défaillance du circuit, en fonction de ses conditions d'utilisation.

Une **liste des 5 composants et connecteurs** les plus à même d'être défaillant peut-être établit (cf. liste fournie dans le paragraphe précédent).

On va ensuite effectuer les étapes suivantes.

## ANALYSE DES DEFAILLANCE POSSIBLE DE COMPOSANTS ET CONNECTEURS

L'objectif ici n'est pas de comprendre avec exactitude comment une défaillance occure (usure, surchauffe, ...) mais plutôt de définir les différents résultats d'une défaillance.

La plupart du temps, les composants peuvent avoir un changement de valeurs par rapport à leur référence, soit sur leur caractéristique principale, soit sur les caractéristique secondaire (résistance interne par exemple).

Ils peuvent en général à terme passer en court-circuit. Ce court-circuit peut également aboutir à la troisième possibilité : un circuit ouvert.

Pour les semi-conducteurs plus complexe il est essentiel d'analyser plus précisément le fonctionnement du module pour comprendre les différentes pannes probables.

Quelques défaillances probables sur des composants courants :

	(Résistance)	Condensateur	(Inductance)	Fusible	Diode	Transistors
<b>Changement des valeurs de référence</b>		V	V		fuite	V
<b>Court-circuit</b>	V	V	V		V	Base-collecteur, Base émetteur, Collecteur émetteur
<b>Circuit ouvert</b>	V	V	V	V	V	Base-collecteur, Base émetteur, Collecteur émetteur

Des erreurs courantes peuvent être ajouté à ces pannes : mise en court-circuit du circuit par l'utilisateur, erreurs de commande, erreurs de connexion.

On peut faire le tri en enlevant les pannes peu probables en fonction de notre circuit et des conditions dans lequel il est utilisé.

## PREVISIONS DES CONSEQUENCES SUR LE CIRCUIT ET CORROBORATION PAR SIMULATION

On peut ensuite prévoir les conséquences de cette panne sur le circuit : est-ce que ce court-circuit ou ce circuit ouvert reporte des puissances importantes sur d'autres composants ? Est-ce que cela influence la commande d'un autre composant ? Quel rôle le composant ne remplit plus ?

On peut corroborer ces prévisions grâce à des simulations sur des logiciels numériques d'électronique. Ces simulations peuvent être fastidieuses. Il est essentiel avant de les faire de :

- Etre sûr de l'exactitude de son circuit initial
- Sauvegarder des valeurs de référence

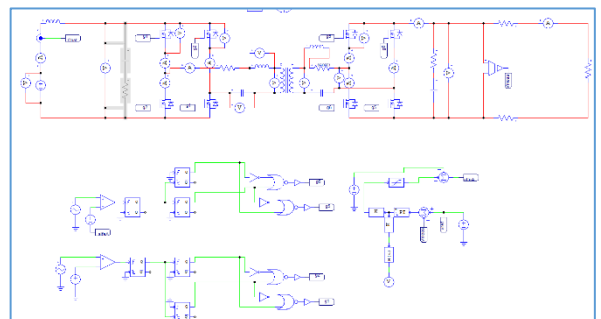


Figure 4 : Exemple d'un schéma électronique



- Sauvegarder de manière organisée les valeurs relevées : signaux d'entrée, de sortie, autour du composant défaillant, autour des composants essentiels du circuit, autour d'un point de mesure caractéristique du circuit ?  
Nous avons par exemple choisi de mesurer les intensités et tensions d'entrée et sortie, les intensités dans les MOSFETs, et la tension en sortie du transformateur
- Définir quelle information est intéressante : la valeur maximale pour savoir si une défaillance est possible ? La valeur et la forme du signal pour permettre un diagnostic ?
- Avoir assez de points de mesure pour pouvoir vérifier des valeurs supplémentaires
- Définir une durée de simulation suffisante pour que les signaux se stabilisent.

Catégorie	Numéro	Nom de la défaillance	Vin	Forme d'onde Vin	Vout	Forme d'onde Vout	Iin	Iout	Vtransf Out	Forme d'onde VtransfOut	I <sub>max</sub> MOSFE T1	I <sub>max</sub> MOSFE T2	I <sub>max</sub> MOSFE T3	I <sub>max</sub> MOSFE T4	I <sub>max</sub> MOSFE T5	I <sub>max</sub> MOSFE T6	I <sub>max</sub> MOSFE T7	I <sub>max</sub> MOSFE T8	Défaillances prévues
Normal	1	Fonctionnement normal	20		20		1,5	1,5	[-20;20]		2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	Aucune
	2	Mosfet d'entrée 1 en circuit ouvert	20		20		1,5	1,5	[-15;20]		0	8	8	8	8	8	8	8	Usures, chauffe, défaillance long terme des mosfets

Figure 5 : Exemple de valeurs enregistrées dans une simulation

### TRIE DES INFORMATIONS DANS UN TABLEAU

Cette étape est à réaliser en parallèle des simulations.

Une fois toutes les données collectées, on peut mettre en avant les simulations causant des défaillances en série, clarifier où elles auront lieu, ou noter les zones de flous dans les simulations. Cela implique de se reporter aux maximum rating des composants.

Catégorie	Numéro	Nom de la défaillance	Vin	Forme d'onde Vin	Vout	Forme d'onde Vout	Iin	Iout	Vtransf Out	Forme d'onde VtransfOut	MOSFETs								Détails	
											I <sub>max</sub> T1	I <sub>max</sub> T2	I <sub>max</sub> T3	I <sub>max</sub> T4	I <sub>max</sub> T5	I <sub>max</sub> T6	I <sub>max</sub> T7	I <sub>max</sub> T8		
1 Mosfet défaillant	1	Mosfet d'entrée 1 en circuit ouvert	20		20		1,5	1,5	[-20;20]		0	8	8	8	8	8	8	8	Aucune défaillance supplémentaire mais plus de torsion et de courant en sortie	
	2	2 mosfets d'entrée en opposition (même commande) en circuit ouvert	20		0		0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	Défaillance totale des MOSFETs par court-circuit, court-circuitage de la source, usure sans défaillance	
	3	2 mosfets d'entrée en opposition (même commande) en court-circuit	2		3		120	120	[-5;5]		2	2	2	2	2	2	2	2	2	Défaillance des MOSFETs par court-circuitage de la source, usure sans défaillance
	4	2 mosfets d'entrée en opposition (même commande) en court-circuit	3		0		130	0	[-4;6]		450	450	450	450	5	5	5	5	5	Défaillance des MOSFETs par court-circuitage de la source, usure sans défaillance
2 Mosfets défaillants	1	2 mosfets de sortie en série (commande opposée) en circuit ouvert	20		20		15	0	[0;4]		0	0	0	0	0	0	0	0	0	Défaillance avec la source, usure sans défaillance
	2	2 mosfets de sortie en opposition (même commande) en circuit ouvert	15,8		13,8		13,8	23	[-20;20]		2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	Aucune sans défaillance	
	3	2 mosfets de sortie en série (commande opposée) en court-circuit	20		13,8		13,8	23			2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	Aucune sans défaillance
	4	2 mosfets de sortie en opposition (même commande) en court-circuit	20		20		20	20			2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	Aucune sans défaillance
3 Mosfets défaillants	1	4 mosfets d'entrée en circuit ouvert	20		20		13,8	13,8			2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	Défaillance avec la source, usure sans défaillance
	2	4 mosfets de sortie en opposition (même commande) en circuit ouvert	1		1		1	1			1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	Défaillance avec la source, usure sans défaillance
	3	4 mosfets de sortie en série (commande opposée) en court-circuit	15,8		15,8		15,8	23			2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	Défaillance avec la source, usure sans défaillance
	4	4 mosfets de sortie en opposition (même commande) en court-circuit	20		20		20	20			2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	Aucune sans défaillance
4 Mosfets défaillants	1	Condensateur d'entrée en court-circuit	20		20		15	0	[0;4]		0	0	0	0	0	0	0	0	0	Défaillance avec la source, usure sans défaillance
	2	Condensateur d'entrée avec une capacité réduite	13,8		13,8		13,8	23	[-20;20]		2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	Aucune sans défaillance
	3	Condensateur d'entrée avec une ESR plus importante	13,8		13,8		13,8	23			2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	Aucune sans défaillance
	4	Condensateur de sortie en court-circuit	20		20		20	20			2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	Aucune sans défaillance
Condensateurs DC	1	Condensateur de sortie avec une capacité réduite	20		20		20	20			2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	Aucune sans défaillance
	2	Condensateur de sortie avec une ESR plus importante	13,8		13,8		13,8	23			2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	Aucune sans défaillance
	3	Condensateur de sortie avec une capacité réduite	20		20		20	20			2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	Aucune sans défaillance
	4	Condensateur de sortie avec une ESR plus importante	13,8		13,8		13,8	23			2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	Aucune sans défaillance
Comande et gates drivers	1	Faiblesse différentielle entre deux gates drivers en sortie (ESR de différentiel)	20		20		20	20			2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	Défaillance avec la source, usure sans défaillance
	2	Déphasage de commande entre l'entrée et la sortie	11,8		11,8		11,8	11,8			2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	Défaillance avec la source, usure sans défaillance
	3	Faiblesse différentielle entre deux gates drivers en sortie (ESR de différentiel)	11,8		11,8		11,8	11,8			2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	Défaillance avec la source, usure sans défaillance
	4	Déphasage entre deux gates drivers d'entrée	11,8		11,8		11,8	11,8			2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	Défaillance avec la source, usure sans défaillance
Condensateurs AC	1	Condensateur d'entrée en court-circuit	20		20		20	20			2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	Défaillance avec la source, usure sans défaillance
	2	Condensateur d'entrée de puissance en court-circuit	11,8		11,8		11,8	11,8			2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	Défaillance avec la source, usure sans défaillance
	3	Condensateur de sortie en court-circuit	20		20		20	20			2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	Défaillance avec la source, usure sans défaillance
	4	Condensateur de sortie de puissance en court-circuit	11,8		11,8		11,8	11,8			2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	Défaillance avec la source, usure sans défaillance

Figure 6 : Exemple de tableau complet synthétisant les données de défaillances possibles

## VISUALISATION GRAPHIQUE DES DONNEES SOUS FORME DE DIAGRAMME

L'objectif ici est de construire un diagramme permettant :

- De mieux gérer le diagnostic en comprenant quel peut être la source de la défaillance
- De mieux visualiser les points sensibles de la conception, et quelles pannes peuvent être critique.

On peut suivre la méthode suivante :

1. Reporter toutes les défaillances sur un diagramme et les classées par type
2. Relier par des flèches les défaillances à leur conséquence, et ajouter si nécessaire les pannes n'ayant pas été testé mais résultant d'une panne testée
3. Optionnellement, ajouter les défaillances possibles mais incertaines, ou probable sur un temps long en pointillé
4. Ajouter les informations permettant un diagnostic sur les signaux externes à l'aide de pastille : pas de signal, signal faussé, signal fonctionnel, etc.

Diagramme des défaillances possibles en fonction du diagnostic externe

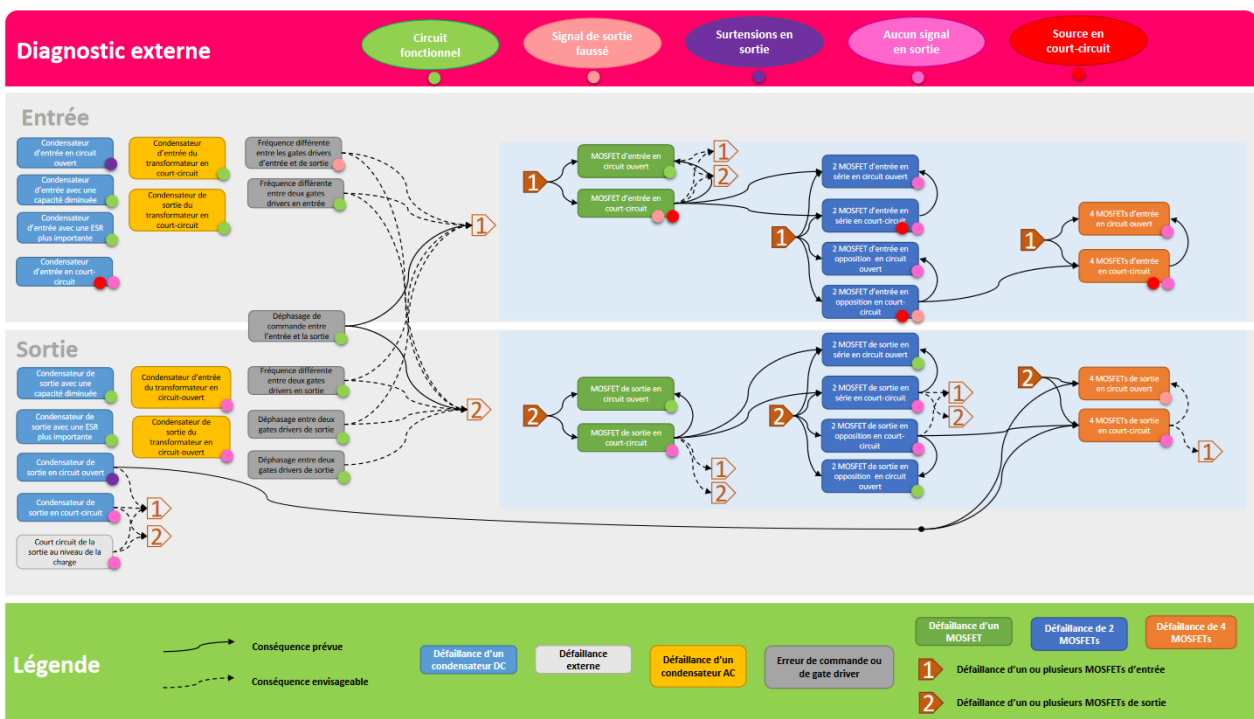


Figure 7 : exemple de diagramme des défaillances de la cellule CSC possible en fonction du diagnostic externe

## VISUALISATION DES DONNEES EN FONCTION D'UN SIGNAL DE DIAGNOSTIC

Une autre manière de préparer la possibilité de diagnostiquer la carte est de choisir un ou plusieurs signaux à mesurer, et pas nécessairement un signal externe, qui permettra de d'identifier les défaillances probables en fonction de ses valeurs et forme.

On peut ainsi construire une table de données en triant les résultats en fonction de la valeur de ce signal, et en rapprochant les signaux ayant des formes relativement similaires, comme ci-dessous.

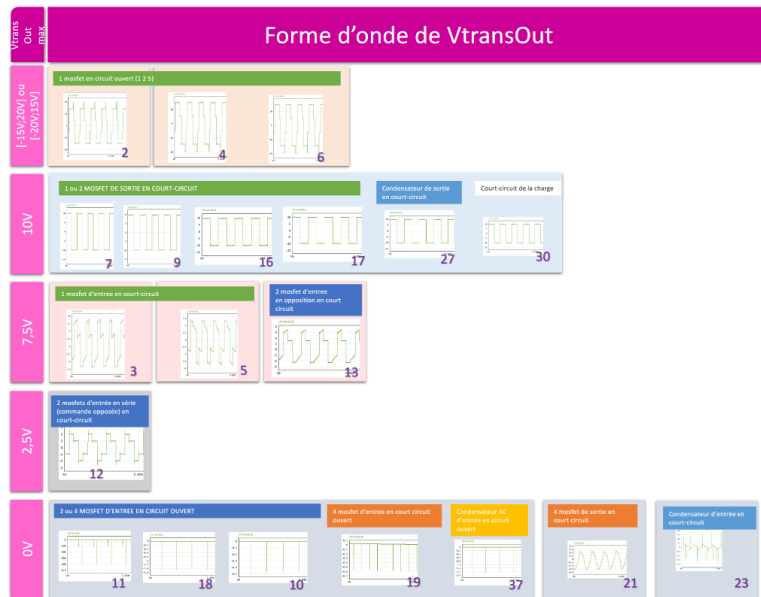


Figure 8 : exemple d'une partie de la table de valeur de VtransOut permettant de diagnostiquer une cellule CSC

On note cependant que les valeurs réelles auront probablement des formes d'ondes plus ou moins différentes de la simulation, à cause d'imprécision ou de perturbation externe et interne au circuit non simulée. L'objectif est donc ici de dégager une tendance.

#### CONFIRMATION PRATIQUE DES SUPPOSITIONS LES PLUS PERTINENTES

On souhaite confirmer un maximum ces données dans la pratique. On peut réaliser des expériences de défaillance, en court-circuitant, dessoudant ou modifiant un composant. Pour cela, en fonction des situations, plusieurs méthodes sont envisageables :

- **Confirmation de l'exactitude du modèle grâce à des tests non destructifs**

On vérifie que les signaux obtenus en simulation témoin et sur des simulations non destructives correspondent à la réalité. Si besoin on complète le modèle.

- **Validation des défaillances non-destructives**

On essaye de corriger un maximum de données obtenues en testant les défaillances n'endommageant pas la carte de manière conséquente, ou les défaillances proche mais inférieures aux maximum rating. L'objectif ici est de s'assurer qu'il n'y a pas de défaillance supplémentaire à traiter dans ces cas et que nos résultats sont corrects.

- **Validation des défaillances destructives**

Avec un maximum de précautions (protections individuelles, isolation de la carte dans un caisson fermé, limitation en courant...) on peut tester les défaillances les plus destructives parmi la liste des 5 composants les plus à même de casser.

Quel que soit le modèle d'expérience choisit, enregistrer un maximum d'information à chaque test permettra une plus fine identification de la panne par le concepteur.

## Résultats du test de défaillance en situation matérielle réelle

Nom de l'expérience	Manière de simuler la défaillance	Vin	Vout	Ia	Iout	VtransOut1 (100ns)	VtransOut2 (5µs)	Vidéo	T° max	Image thermique	Impacts	Notes
Témoin	Aucune défaillance	20	19,11	0,96	0,93				41,4		Fonctionnement normal	
LDO d'entrée en circuit ouvert	Déssouder le LDO d'entrée	20	0	0	0			3	31,2		aucun	
LDO de sortie en circuit ouvert	Déssouder le LDO de sortie	20	17,5	0,85	0,85			1	62		aucun, sortie plus faible	
Commande nulle sur un couple de MOSFETS d'entrée	Déconnecter la pin INA (1) d'un gate driver d'entrée	20	9,9	0,3	0,45			4	43,4		aucune, sortie divisée par deux	
Commande nulle sur un couple de MOSFETS de sortie	Déconnecter la pin INA (1) d'un gate driver de sortie	20	18,6	0,925	0,9			5	49		aucun	
Condensateur AC d'entrée en court-circuit	Déssouder Cac in et le remplacer par un fil	20	19,09	0,95	0,9			6	51,4		Aucun	
2 condensateurs AC d'entrée en court-circuit	Déssouder Cac in et le remplacer par un fil	20	19	0,95	0,9				51,5		Aucun	En théorie Cac absorbe le courant continue qui s'accumule dans le transformateur à cause de la légère imperfection du duty cycle de 50 %. Sans Cac, un courant s'accumule qui va finir par causer une destruction d'un composant. En pratique cette accumulation n'est pas constatée
[fausse manip : align phase ce tests correspond à un déphasage entrée-sortie] 2 condensateurs AC d'entrée en court-circuit	Déssouder Cac in et le remplacer par un fil	20	11 puis 0	2,5	0,5			7	226		Sortie à 11V puis à 0, surchauffe de l'ensemble de la carte, notamment les gate drivers et les bobines. Destruction de la diode bootstrap	
[fausse manip : align phase]	Ressoudage de Cac et remplacement diode	20	11	0,275	0,5				149,6		chauffe général de la carte, principalement vers les gates drivers et bobines	Il y avait en fait un problème d'alignement de phase II en realignant les phases la cellule fonctionne mais une légère oscillation apparaît. Teste à refaire
Diode de schottky in en circuit ouvert	Déssouder la diode de schottky	20	9,9	0,25	0,5				40,8		Aucun	
Diode de schottky en court circuit	Court-circuiter la diode de schottky	20	5,6	0,95	0,3				124,3		bcp de bruit dans la cellule. Chauffe générale. Chauffe du court circuit. Impact sur les bobines et un mosfet	

Figure 9 : exemple d'un échantillon de données pratique récoltée, conduisant à une correction des diagrammes et tables de diagnostic

Dans l'idéal, il faudrait tester la **répétabilité** des résultats trouvés pour être sûr que de la fiabilité de ces derniers, si le coût de la carte le permet.

Une autre manière de procéder est de récolter ces données au fur et à mesure des défaillances constatées et diagnostiquées. Pour cela, se mettre en lien avec les services de réparation de notre produit permettra d'améliorer sa réparation tout au long de sa vie.

## PROCEDURE DE DIAGNOSTIC

On peut ensuite établir une procédure de diagnostic de la carte avec ces données. Une procédure de diagnostic est une liste de tests à effectuer permettant d'identifier la cause de la casse en affinant petit à petit les possibilités.

Elle peut se construire avec la structure suivante :

1. Des **conseils basiques** : redémarrer l'appareil, vérifier le branchement, vérifier les voyant allumer, relever les potentiels codes d'erreurs et s'y reporter.
2. **Identification de la cause et la manière dont s'est déroulée la casse** pour en obtenir des indices sur la panne : action particulière, branchement à un autre appareil, bruit, choc, température extrême ou liquide.
3. **Proposition de mesures basiques à effectuer**. Pour cela on peut déjà classer les conséquences des défaillances en fonction de leur résultat sur les signaux d'entrée, de sorti, ou un signal notable (comme effectué dans les parties précédentes)
4. Affinage des possibilités avec la **mesure de points précis de la carte**, par exemple en entrée et sortie de chaque bloc fonctionnel et chaque alimentation auxiliaire.
5. Indication des mesures à effectuer pour **vérifier le bon fonctionnement des composants de sécurité** (fusible...) et **des composants de la liste des composants faillibles** (continuité, résistance, valeurs...).

6. **Procédures plus complexes pouvant être mise en place par les réparateurs expérimentés** : travail sous tension, mise en tension d'une partie de la carte, mesure de nombreux composants, utilisation de carte de diagnostics, etc.

Ces informations peuvent ensuite être ordonnées et classées en fonction du niveau de difficulté des procédures pour qu'elles s'adressent aux réparateurs appropriés.

#### AJOUT DE METHODE DE DIAGNOSTIC VISUEL

Une manière simple de faciliter le diagnostic dès la conception est d'ajouter des indicateurs visuels dans le circuit, comme par exemple une LED indiquant le bon fonctionnement d'un module donné du circuit.

Cela permettra au réparateur d'immédiatement savoir vers où se diriger pour diagnostiquer la panne, ou à défaut et si c'est possible, de remplacer tout le module.

#### SIMULATIONS PHYSIQUES

Les étapes de simulations physiques du circuit conçu peuvent être l'occasion de vérifier différents paramètres, notamment :

- Vérifier la robustesse du circuit et le (sur)**dimensionnement des valeurs des composants** pour qu'ils résistent à l'usure.
- Identifier les signaux entrants, sortant et traversant le circuit en fonctionnements normal.
- Identifier un ou des points de mesures stratégiques pour établir un diagnostic précis.

#### CHOIX DES COMPOSANTS & EMPREINTE

Le choix des composants répondant aux spécifications voulus par le circuit est cruciale pour la réparation. C'est en effet l'occasion, en plus de choix de surdimensionnement des composants pour favoriser leurs robustesses en cas de défaillance, de viser standardisation et accessibilité.

Si ces choix peuvent être contraignant et antagonistes avec des logiques de performance et de miniaturisation, on peut le prioriser sur la liste des composants propices à être défaillant établie précédemment.

#### DUREE DE VIE

Prendre en compte la durée de vie du composant (nombre de cycle, MTBF, MTTR, Failure rate, ...) ainsi que les *Maximum rating* concernant les valeurs thermiques sont des critères à prendre en compte dans le choix des composant pour leur assurer une longue durée de vie. Cela permet aussi d'éviter qu'une défaillance du circuit cause de nombreuse autre défaillance.

#### STANDARDISATION

Dans le choix des composants, viser des composants courants, ayant des valeurs standards permet aux réparateurs de pouvoir beaucoup plus facilement remplacer le composant endommagé. Si certains composants ont des valeurs standardisées (résistances, condensateurs, inductances...), pour d'autres composants (semi-conducteurs) il faut plutôt viser ceux qui sont les plus couramment utilisés.

L'électronique de puissance étant pour l'instant peu standardisée, réfléchir à des processus de standardisation au sein des produits d'une même entreprise est déjà un début qui peut permettre aux réparateurs de récupérer des composants sur d'autres cartes endommagées.

#### DISPONIBILITE

Il est essentiel que les réparateurs puissent remplacer les composants défectueux facilement. Ainsi il faut s'assurer de la disponibilité des composants sur le long terme. Cela peut passer par la standardisation mais aussi par la demande d'engagement de disponibilité pendant un certain nombre d'années auprès des fournisseurs lors de l'industrialisation.

## BOITIER, TAILLE ET EMPREINTE

La miniaturisation des composants rend particulièrement difficile la réparation. Si les réparateurs spécialisés peuvent être équipés pour de la microélectronique, les réparateurs associatifs ou particuliers resteront souvent à un niveau de compétence, matériel et connaissance les limitant aux composants traversants classiques.

Ainsi on recommande :

- D'éviter les composants trop petits par exemple les CMS en 0406.
- De faire attention à la proximité entre deux pins : par exemple les branchements de recharge micro-USB, ou HDMI sont couramment défectueux mais complexes à resouder à cause de la quantité de pins.
- De faire attention à la taille des pins : pour une même taille de boîtier les pins du composant peuvent être très peu apparents tout comme facilement accessibles.
- D'éviter les composants nécessitant un pad non apparent, sous le composant.

Lors de la création de l'empreinte du composant, toute action facilitant le soudage et le dessoudage est à privilégier. On peut notamment étendre la taille des pads pour faciliter leur accessibilité avec un fer à souder.

## PLACEMENT & ROUTAGE

Lors du placement des composants et du routage, diverses actions peuvent être réalisées pour poursuivre le travail favorisant l'accessibilité des composants (notamment les composants faillibles), mais c'est aussi le bon moment pour faciliter les procédures de diagnostic et l'identification des composants.

## CONCEPTION MODULAIRE PHYSIQUE

Si le schéma électrique a déjà pris en compte des enjeux de modularité, la conception physique du PCB peut être l'occasion de matérialiser physiquement cette modularité, en séparant les différents modules du circuit et en les rendant ainsi diagnostiquable, remplaçable et réparable un à un, à l'échelle du sous-ensemble.

Le travail autour de la modularité de mes collègues du projet VIVAE peut être intéressant sur ce point, comme *Towards circular power electronics in the perspective of modularity* (Tugce Turkbay, 2023).

## ESPACEMENT ET FREINS THERMIQUE

Le placement des composants doit prendre en compte le besoin de laisser la place aux outils nécessaires au dessoudage du composant. Les outils de routage de carte électronique intègrent souvent des visualisations en trois dimensions qui peuvent aider à visualiser les obstacles potentiels.

Lors du routage, paramétrer la présence de freins thermiques, notamment sur les plans de masse facilitera le dessoudage, parfois quasi impossible sans dommage à cause de la dissipation thermique dans la carte.

## PRESENCE DE TESTPOINTS

Pour faciliter le diagnostic, la présence de points de test (testpoints) bien identifiés sur la carte est essentielle.

On peut s'assurer de leur présence :

- Autour des composants les plus faillibles

- Aux entrées et sorties de la carte
- A chaque conversion de signal conséquente
- Autour des optocoupleurs de feedback dans les alimentations (pour faciliter l'identification de la défaillance de toute une partie de l'alimentation).

## REFERENCE DES COMPOSANTS, NIVEAUX DE TENSION ET AUTRES INFORMATION

La réparabilité d'un circuit va souvent se jouer autour d'un point important : la possibilité d'identifier le composant défaillant. Trop souvent, aucune indication claire n'est disponible pour retrouver et remplacer ce composant, ou parfois le marquage sur le composant a brûlé lors de la défaillance du composant.

**Écrire clairement les références des composants** à côté des composants donne plus de chances aux réparateurs. Mais encore faut-il que ces références soient suffisantes pour trouver un composant de remplacement. Pour un composant classique (comme une résistance ou un condensateur électrolytique), indiquer la valeur du composant à côté suffit généralement. Pour les composants plus spécifiques, on peut au choix donner la référence du fournisseur, ou donner un code permettant de retrouver le composant dans la documentation, à condition de rendre cette dernière accessible.

Indiquer **les niveaux de tensions** attendues ou les valeurs de références à certains points clés du circuit sont des informations qui faciliteront le diagnostic, notamment les différents niveaux de tensions des alimentations auxiliaires dans le circuit. Pour faciliter et sécuriser l'autoréparation, on peut aussi **indiquer clairement les zones où le niveau de tension rend la maintenance dangereuse pour un réparateur non expérimenté.**

On peut également procéder à un **marquage par un symbole ou une couleur des composants susceptibles d'être défaillants**, ou les composants de sécurité susceptibles de nécessiter un remplacement, comme les fusibles.

## ACCES A LA DOCUMENTATION ET IDENTIFICATION DU CIRCUIT

Inscrire **l'identification de la carte électronique** (modèle, numéro de série, fabricant, distributeur, version...) sur un espace disponible facilitera les possibilités de trouver de la documentation ou de l'assistance sur la carte.

Cela peut aussi passer par l'ajout d'un QR code sur la carte renvoyant directement à la documentation de la carte électronique.

Ajouter sur la carte électronique un logo **indiquant le caractère réparable de l'objet** pourra permettre aux réparateurs amateurs de passer le frein psychologique présent chez de nombreuses personnes, jetant par défaut leurs objets en pensant la réparation trop complexe et trop coûteuse.

Le concepteur en électronique ne sera pas nécessairement impliqué dans la phase de conception mécanique du produit (boîtier, assemblage, etc.).

Bien que cette partie soit déjà beaucoup documenté dans la littérature de la réparation, nous reportons ici quelques recommandations courantes pour permettre aux concepteurs de prendre en main cette partie également.

### OUTILS

L'objectif est de permettre à un maximum d'utilisateur de démonter l'objet. Ainsi on recommande l'**utilisation de fixations durables permettant un désassemblage avec du matériel commun** définis par l'indice de réparabilité français et la norme NF EN45554<sup>1</sup> : tournevis (tête fendue, cruciforme, 6 lobes, torx), clés (allen, plates), pinces (universelles, à bec demi-rondes, coupantes diagonales, multiprises), pince étau, levier, pincette, marteau, cutter, loupe.

Les outils plus spécifiques à l'électronique ou moins courant comme les pinces universelles pour le dénudage et le sertissage, multimètre, voltmètre, fer à souder, ou même le pistolet à colle peuvent être envisagé même s'il est préférable de privilégier des connecteurs ne nécessitant pas de soudure si l'on souhaite que n'importe quel particulier puisse le réparer.

Un des enjeux est également d'éviter les fixations nécessitant des tournevis ou des outils particulièrement long et fin (il est préférable que la vis puisse être atteinte avec un tournevis commun et ne nécessite pas l'achat d'un nouveau tournevis).

### FIXATIONS ET CONNECTEURS

L'enjeu est de prioriser des fixations solides, durables et démontable par n'importe qui.

Ainsi, les **vis** sont identifiées comme les fixations préférées des réparateurs, là où les **clips en plastiques sont généralement source de casses**. Le **pas de vis doit également être solide**, cela arrive couramment que ce dernier soit dans un matériau plastique de mauvaise qualité qui casse à terme.

Les conseils donnés dans *Multiple generation life-cycles for product sustainability the way forward* (T.F. Go, 2015) sont les suivants :

- Eviter les fixations permanentes qui requièrent une opération destructive pour les défaire (scellement, rivetage, etc.). Pour autant, si une fixation d'un tel type est nécessaire, s'assurer qu'il est possible de la défaire sans endommager le reste de l'appareil ou du boîtier.
- Réduire le nombre de fixations susceptible d'être endommagé ou cassé quand on les défait.
- Augmenter la résistance à la corrosion des fixations.
- Réduire le nombre de fixation.
- Réduire le nombre de fixation de type « press-fits ».
- Réduire le nombre de fixation invisible au premier regard.
- Standardiser les fixations en réduisant le nombre de différents types et tailles de fixation dans l'appareil

Il peut être intéressant de marquer sur le boîtier ou les cartes électroniques la position des vis avec un code couleur, permettant de les repérer et manipuler rapidement.

Les mêmes conseils sont à appliquer pour les connecteurs : il faut qu'ils soient solides, durable et démontable. C'est un enjeu important car ils sont souvent sources de casse.

---

<sup>1</sup> Norme NF EN 45554 "Méthodes générales pour l'évaluation de la capacité de réparation, réutilisation et amélioration des produits liés à l'énergie", 2020



- Prioriser des connecteurs solides et démontables
- Éviter qu'une tension sur un câble apparent s'applique directement sur une soudure (effectuer une boucle quelque part peut réduire ce risque).
- Éviter les connecteurs « snap & fits ».
- Prioriser des connexions inter-cartes démontable facilement (sans soudure).
- Visibiliser les parties des connecteurs nécessitant une action pour être ouvert (fiche des nappes de smartphones).
- Laisser de la marge sur les fils et câbles, pour qu'une connexion puisse être réparée en recoupant le câble et pour éviter des tensions au démontage.
- Indiquer clairement les pôles et fonctions des connecteurs.

## BOITIER

De plus en plus souvent les boîtiers sont scellés ou collés ce qui empêche un désassemblage non destructif. De plus on croise couramment des boîtiers remplis de matière plastique (pour des enjeux d'étanchéité, de vibration...) qui empêche toute réparation. La colle ou patte blanche disposée parfois sur les composants est également à proscrire.

Un enjeu de taille réside dans les boîtiers CEM, parfois difficiles à démonter sans casse (notamment dans les alimentations d'ordinateur).

La recherche de documentation est une étape essentielle pour les réparations. Une bonne réparation doit être accessible, complète et lisible. Néanmoins il est souvent difficile pour les fabricants de donner accès aux informations de conceptions pour garder leurs secrets de fabrication et leur compétitivité.

Les réparateurs que nous avons interrogés nous permettent de mieux identifier quelles documentations leurs semblent particulièrement utiles pour les réparations.

Tableau 2 : Utilité perçue des documentations possibles

Type de documentation	Daniele Dargaud	Alexis & Benoit	Pablo Garcia	Dominique Clément	Alban	Hugo	Total
Identification sans équivoque du produit (type de produit, marque, nom commercial, modèle et éventuellement le numéro de série)	1	1	1	1	1	0,8	0,97
Schéma de démontage ou vue éclatée		1	1	1	1	0,8	0,96
Schémas de câblage et de raccordement	1	1		1		0,8	0,95
Schémas des cartes électroniques	1	1	0,5	1	1	0,8	0,88
Valeurs de références pour la mesure	1	0,75	1	0,8		0,8	0,90
Liste du matériel de réparation et de test nécessaire à la réparation	1	0	1	0		0,8	0,56
Manuel technique d'instructions relatives à la réparation	1	0,75	1	0,8		0,5	0,89
Codes d'erreurs et de diagnostic + logs machines		1	1	1		1	1,00
Informations sur composants et diagnostic	1	1	1	0,9	1	0,8	0,95
Instructions logicielles (y compris réinitialisation)	1	1	1	0,5		0,8	0,86
Logiciel de débogage		1	0	0		0,8	0,45
Accès aux incidents signalés et enregistrés dans l'équipement	1	0,75	0,2	1		1	0,79
Bulletins techniques			0	0		0	0,00
Encadrement spécifique de l'auto-réparation (opérations conseillées, instructions de sécurité et de réparation, répercussions éventuelles sur la garantie)	1	0	1	0		0	0,40
Informations sur accès aux réparateurs professionnels		0,75	0	0		0,8	0,39
Information de remplacement & fournisseurs		0	1	0		1	0,50
Détection des pannes et actions requises (approche grand public)		0	0	0,8		0,8	0,40
Conseils d'utilisation et d'entretien		1	1	0		0,8	0,70
Séquence de réassemblage	1	1	1	0,8		0,8	0,92
Plan d'impression 3D		0,2	1	0,8	1	0,8	0,76
Reconditionnement		0	0	0		0,8	0,20
Accès à un service center	1	0	0	0		1	0,40
Instructions de transport		0	1	0		1	0,50
Matériel d'entraînement pour la réparation		0	0	0		0,8	0,20
Couple recommandé pour les fixations		0	0	0		1	0,25
Compatibilité de certaines parties avec d'autres produits	1	0,2	1	1		1	0,84
Spécifications fonctionnelles de parties		0,5	1	1		0,8	0,83

Les documents perçus comme essentiels par des acteurs de la maintenance et des repair cafés sont donc :

- L'identification sans équivoque du produit
- Les schémas de démontages ou vue éclatée
- La séquence de réassemblage
- Les schémas de câblage ou raccordement
- Les codes d'erreurs et de diagnostics + les logs
- Les informations sur les composants et leurs diagnostics
- Manuel technique d'instructions relatives à la réparation
- Schémas électroniques

Nous pensons qu'il peut être assez simple de créer des documentations pertinentes et utiles facilitant la réparation en incluant les documents suivants :

- Informations de sécurité vis-à-vis de l'autoréparation, indiquant clairement les risques encourus dans l'autoréparation, et les zones à ne pas toucher en tension.

- La Bill of Material (BOM), le tableau reliant les codes des composants à la référence permettant de les identifier et les commander
- Les informations de maintenance du produit
- Des diagrammes fonctionnels ou des diagrammes blocs permettant d'identifier les différentes zones de la carte électronique/du produit.
- Des procédures de maintenance et de réparation adaptés aux réparateurs
  - Procédures de maintenance et d'entretien basique pour les utilisateurs (démontage, nettoyage, réinitialisation, ...)
  - Procédures de test débutant (voyants allumés, codes d'erreurs, tension d'entrée, de sortie, ...)
  - Procédures intermédiaires (Valeurs de références et signaux à divers points stratégiques de la carte, listes des composants faillibles et manière de les tester, ordre des tests à effectuer)
  - Procédures complètes (schéma électronique complet, simulation numérique du circuit, valeurs attendues, diagramme de défaillance)

Les procédures de diagnostics sont le résultat du travail effectué dans la première partie. Si le secret industriel est un enjeu, le fabricant peut choisir de ne fournir publiquement uniquement les procédures d'entretien et maintenance, débutant et intermédiaire, mais réserver le partage des documents complets aux réparateurs agréés et aux services après-ventes de l'entreprise.

## MODELE ECONOMIQUE ET ECONOMIE CIRCULAIRE

Si nous ne comptons pas ici détailler cette partie qui mérite un travail de recherche à part entière, il doit être clair que les enjeux de réparabilité ne sont que minoritairement des choix techniques. Le modèle économique choisit pour la commercialisation du produit a tout autant d'impact que les choix systémiques de l'économie : par défaut la boucle économique ne sera pas fermée si aucun choix économiques et organisationnels ne sont mis en place, et modifier la taille de quelques composants n'y changera pas grand-chose.

Le modèle économique doit réfléchir à qu'est-ce que deviendra le produit une fois endommagé : compte-on sur l'utilisateur pour le réparer ? Sur un réparateur indépendant ? Y a-t-il des réparateurs agréés à qui l'on est prêt à fournir un plus grand niveau d'information ? L'entreprise distribuant le produit dispose t'elle d'un service après-vente, interne ou externe ? Est-ce que le service après-vente remplace systématiquement les produits ou cherche t'il à les réparer ? Est-il possible de garder des pièces fonctionnelles de produits endommagés pour en reconditionner d'autre ? Où est-il possible d'acheter des pièces détachées ou des composants pour réparer notre système ? Est-ce que cet achat passe par le distributeur ou le fabricant ou est-il fait chez une entreprise tierce ? Comment peut-on envisager un deuxième usage du produit pour une autre fonction ? Comment va-t-il être recyclé ? ...

Toutes ces questions impliquent que le fabricant se pose la question d'avec quels autres acteurs il va travailler et qu'il base son organisation en fonction des réponses à ces questions.

Par exemple Fairphone est un exemple d'une entreprise ayant fait le choix d'un modèle économique basé sur la réparation. Ainsi leur produit est vendu plus chère mais est attrayant grâce à cet argument commercial. Fairphone base une partie de ses revenus sur la vente des pièces détachées permettant la réparation de ses produits et fournit gratuitement les tutoriels et services de diagnostic des pannes rencontrés.

# TABLEAU D'AUTO-NOTATION EVALUANT LA REPARABILITE EN ELECTRONIQUE DE PUISSANCE

Pour évaluer la réparabilité de l'appareil électronique conçu, un tableau adapté de l'indice de réparabilité français a été conçu (en annexe à ce document). Ce tableau, destiné aux concepteurs en électronique, base son évaluation sur 5 catégories, en plus des informations identifiant le produit :

- Robustesse
- Documentation
- Diagnostic
- Réparation
- Remplacement

Information relative au produit et calcul de son indice		Nom du produit							
Date de calcul		A compléter							
Demandeur de l'évaluation									
Catégorie	Caractéristique	Critères	Mode d'évaluation	Impact	Notes	Sous totaux			
Robustesse du circuit face aux défaillances	Composants de sécurité (basse, fusible, diode, surtension, diodes, circuits antistatique...)	Plan de sécurité, présence d'une résistance contre les surtensions, présence de fusible ou composant équivalent, présence d'autres composants de sécurité	Note (0, 1, 2, 3 en fonction du nombre de critères remplis)	5	3/3				
Documentation & identification du produit	Présence d'une identification claire du produit (type de produit, marque, série commerciale, modèle et éventuellement numéro de série) permettant de retrouver la documentation Identification sans équivoque du produit	Présence d'une identification claire du produit (type de produit, marque, série commerciale, modèle et éventuellement numéro de série) permettant de retrouver la documentation Présence de la documentation ou lien direct	Non/Oui (0 ou 1)	3	1/1				
Diagnostic	Procédures de diagnostic et outils nécessaires	Existence d'un service manuel ou équivalent avec des procédures de diagnostic permettant d'identifier la cause de pannes, autour des composants faillibles* (lié à la note Volant de	Non/Oui (0 ou 1)	5	1/1				
Réparation	Facilité de démontage et remontage du boîtier, accessibilité de la carte	Nombre d'étapes nécessaires pour accéder aux PCB (DDI)	Note (sur base d'intervalle) : Non démontable (0), supérieur ou égale à 18 étapes (1), entre 18 et 12 (2), entre 12 et 6 (3),	4	4/4				
Remplacement des pièces/composants	Conception modulaire standardisation	Le circuit est fractionné en divers modules remplaçables par des pièces fournies en ligne	Non/Oui (0 ou 1)	2	1/1				
		Taux de standardisation moyen des composants faillibles	Note : composant sur mesure (0), composant trouvable chez un unique fournisseur (1), composants trouvable chez de nombreux fournisseurs (2), composants trouvable chez de nombreux fournisseurs, en grande quantité (3), composant appartenant à une liste de composants normalisés (4)	4	4/4				
Disponibilité des pièces	Prix des pièces	Engagement sur la durée de disponibilité des pièces détachées (pièces pérennisées en pièces fonctionnelles)	Note (sur base d'intervalle) : non disponible (0), inférieur à 9 ans (1), entre 9 et 11 ans (2), entre 11 et 13 ans (3), supérieur à 13 ans (4)	4	4/4				
		Engagement sur les délais de livraison des pièces détachées	Note (sur base d'intervalle) : non disponible (0), supérieur à 10 (1), entre 10 et 5 (2), entre 5 et 0 (3), inférieur 0 (4)	4	4/4				
Réparateurs	Requalification	Prix des pièces	Calcul : $(\text{prix} \times \text{quantité}) / \text{moyenne}(\text{autres} \times \text{quantité}) / \text{prix} \text{ HT du produit}$	5	0,00 € 5,00 €			10/10	
		Moyenne des prix HT des autres pièces							
Remplacement des pièces/composants	Compatibilité de certaines pièces avec d'autres produits	Indication sur la présence d'un SAV et d'un service de réparation locale	Non/Oui (0 ou 1)	3	1/1				
		Indication sur la présence de réparateurs professionnels agréés	Non/Oui (0 ou 1)	3	1/1				
Remplacement des pièces/composants	Compatibilité de certaines pièces avec d'autres produits	Indications sur la présence de réparateurs professionnels	Non/Oui (0 ou 1)	3	1/1			5/5	
		Distance moyenne entre un utilisateur et le centre de réparation le plus proche	Note (basé sur un intervalle) : supérieur à 3000 km (0) entre 1000 et 3000 km (1) (échelle continent), entre 150 et 1000km (2) (échelle pays), inférieur à 150 km (3) (échelle département)	3	4/4				
Remplacement des pièces/composants	Compatibilité de certaines pièces avec d'autres produits	Indication permettant de requalifier le produit en l'assurant de son retour à un fonctionnement normal après le remplacement d'un composant faillible	Note : Aucune information de requalification (0), mesures[] permettant de l'assurer du fonctionnement normal de l'ensemble du système (1), mesures permettant de s'assurer du fonctionnement normal des groupes fonctionnels autour des composants (2)	3	2/2				
		Les pièces peuvent être réutilisées comme pièce détachée pour réparer un autre produit ou d'autre produit de la marque, sans modification particulière	Note : aucune pièce ne peut être réutilisée sur un autre produit (0), une pièce peut être utilisée sur un autre produit (1) plusieurs pièces peuvent être utilisées sur un autre produit (2) la totalité des pièces peuvent être utilisées sur un autre produit (3)	2	3/3				

Figure 10 : aperçu du tableau d'évaluation de la réparabilité d'une carte électronique

Une note finale est ensuite attribuée, ainsi que deux sous-notes : une première relevant des enjeux de conception technique et une deuxième relevant plus d'aspect informatifs et marketing autour du produit.

Catégorie	Sous totaux	Conception pour la réparabilité	Enjeux de documentation, marketing, gestion de projet et modèle	Totaux
Robustesse du circuit face aux défaillances	10/10	10/10		Conception pour la réparabilité 10/10
Documentation & identification du produit	10/10	10/10	10/10	Enjeux de documentation, marketing, gestion de projet et modèle économique pour la réparabilité 10/10
Diagnostic	10/10	10/10	10/10	
Réparation	10/10	10/10	10/10	
Remplacement des pièces/composants	10/10	10/10		<b>Note totale de réparabilité 20/20</b>

Figure 11 : aperçu des notes données par le tableau d'évaluation de la réparabilité d'une carte électronique

Ce tableau se veut complémentaire aux conseils donnés dans ce document et simple d'utilisation pour guider le concepteur dans ses choix.



ANR Vivae. (s.d.). *InnoVatIve life cycles to retain the VAlue of power Electronics – VIVAE*. Récupéré sur Agence Nationale de la Recherche: <https://anr.fr/Project-ANR-21-CE10-0010>

Ateliéphémère. (2016). *Guide pour apprendre à réparer ses appareils électroménagers et électroniques soi-même*. Saint-Etienne: Autoédition.

Azote, S. R. (s.d.). Les limites planétaires et leur dépassement en 2022. *Les limites planétaires et leur dépassement en 2022*. Stockholm Resilience Centre, based on analysis in Wang-Erlandsson et al 2022.

BRGM, consultants de CRU et de McKinsey. (2022, février 23). *Les métaux stratégiques pour la transition énergétique*. Récupéré sur brgm.fr: <https://www.brgm.fr/fr/evenement/conference/metaux-strategiques-transition-energetique>

Huai Wang, M. L. (2014). Transitioning to Physics-of-Failure as a Reliability Driver in Power Electronics. *IEEE JOURNAL OF EMERGING AND SELECTED TOPICS IN POWER ELECTRONICS, VOL. 2, NO. 1, MARCH 2014, 97*.

Johannes Flack, C. F. (2018). Reliability of Power electronics systems, an industry perspective. *IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS MAGAZINE June 2018, 24*.

Roussilhe, G. (s.d.). *Eau et puces électronique, l'avenir climatique et industriel de taiwan*. Récupéré sur gauthierroussilhe.com: <https://gauthierroussilhe.com/articles/eau-et-puces-electroniques-l-avenir-climatique-et-industriel-de-taiwan>

Roussilhe, G. (s.d.). *Explication sur l'empreinte environnementale du numérique*. Récupéré sur gauthierroussilhe.com: <https://gauthierroussilhe.com/articles/explication-sur-l-empreinte-environnementale-du-numerique>

Shaoyong Yang, A. B. (2011). *An Industry-Based Survey of Reliability in Power Electronic Converters*. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 47, NO. 3*.

SystExt. (2021). *Controverse minière, Vol 1 & 2*.

T.F. Go, D. W. (2015). Multiple generation life-cycles for product sustainability: the way forward. *Journal of cleaner production - Elsevier*.

Tugce Turkbay, T. A. (2023). Towards circular power electronics in the perspective of modularity. *Elsevier*.

Tableau 1 : Design for environmental guidelines (T.F. Go, 2015)

## Design for environmental guidelines.

Guideline aspects	Guidelines
Product Structure Guidelines	<ul style="list-style-type: none"> <li>i. Design a product to be multifunctional or create multifunctional parts (Otto and Wood, 2001)</li> <li>ii. Minimize the number of parts (Al-Okush and Caudill, 1999; Black and Decker, 2003; Graedel and Allenby, 1995; Otto and Wood, 2001)</li> <li>iii. Avoid separate springs, pulleys, or harnesses. Instead, embed these functions into parts (Otto and Wood, 2001)</li> <li>iv. Make designs as modular as possible, with separation of functions (Al-Okush and Caudill, 1999; Bevilacqua et al., 2012; Graedel and Allenby, 1995; Otto and Wood, 2001)</li> <li>v. Design a reusable platform and reusable modules (Bevilacqua et al., 2012; Otto and Wood, 2001)</li> <li>vi. Locate unrecyclable parts in one subsystem that can be quickly removed (Bevilacqua et al., 2012; Otto and Wood, 2001)</li> <li>vii. Locate parts with the highest value in easily accessible places, with an optimized removal direction (Otto and Wood, 2001)</li> <li>viii. Design parts for stability during disassembly (Al-Okush and Caudill, 1999; Black and Decker, 2003; Graedel and Allenby, 1995; Otto and Wood, 2001)</li> <li>ix. Reduce the product's disassembly time (Al-Okush and Caudill, 1999; Black and Decker, 2003; Graedel and Allenby, 1995; Otto and Wood, 2001)</li> <li>x. In plastics parts, avoid embedded metal inserts or reinforcements (Otto and Wood, 2001)</li> <li>xi. Access and break points should be made obvious (Otto and Wood, 2001)</li> <li>xii. Specify remanufactured parts (Bevilacqua et al., 2012; Otto and Wood, 2001)</li> <li>xiii. Specify reusable containers for shipping or consumables within the product (Bevilacqua et al., 2012; Otto and Wood, 2001)</li> <li>xiv. Design power-down features for different subsystems in a product when they are not in use (Al-Okush and Caudill, 1999; Black and Decker, 2003; Graedel and Allenby, 1995; Otto and Wood, 2001)</li> <li>xv. Implement commonality and upgradability of components (Al-Okush and Caudill, 1999; Graedel and Allenby, 1995)</li> </ul>
Material Selection Guidelines	<ul style="list-style-type: none"> <li>i. Avoid regulated and restricted materials (Bevilacqua et al., 2012; Black and Decker, 2003; Otto and Wood, 2001)</li> <li>ii. Minimize the number of different types of materials (Fuji Xerox; Otto and Wood, 2001)</li> <li>iii. For attached parts, standardize with the same or a compatible (Al-Okush and Caudill, 1999; Graedel and Allenby, 1995; Otto and Wood, 2001)</li> <li>iv. Eliminate incompatible materials (Bevilacqua et al., 2012; Otto and Wood, 2001)</li> <li>v. Mark the material on all parts (Al-Okush and Caudill, 1999; Graedel and Allenby, 1995; Otto and Wood, 2001)</li> <li>vi. Use materials that can be recycled, typically ones as pure as possible (no additives) (Al-Okush and Caudill, 1999; Bevilacqua et al., 2012; Black and Decker, 2003; Fuji Xerox; Graedel and Allenby, 1995; Otto and Wood, 2001)</li> <li>vii. Avoid composite materials (Otto and Wood, 2001)</li> <li>viii. Use high strength-to-weight materials on moving parts (Bevilacqua et al., 2012; Otto and Wood, 2001)</li> <li>ix. Use low-alloy metals which are more recyclable than high-alloy ones (Bevilacqua et al., 2012; Otto and Wood, 2001)</li> <li>x. Hazardous parts should be clearly marked and easily removed (Bevilacqua et al., 2012; Black and Decker, 2003; Fuji Xerox; Otto and Wood, 2001)</li> <li>xi. Select suitable materials to ensure reliability and durability of the product (Bevilacqua et al., 2012)</li> </ul>
Labelling and Finish Guidelines	<ul style="list-style-type: none"> <li>i. Ensure compatibility of ink where printing is required on parts (Otto and Wood, 2001)</li> <li>ii. Eliminate incompatible paints on parts – use label imprints or even inserts (Otto and Wood, 2001)</li> <li>iii. Use unplated metals which are more recyclable than plated (Otto and Wood, 2001)</li> <li>iv. Use electronic part documentation (Otto and Wood, 2001)</li> </ul>
Fastening Guidelines	<ul style="list-style-type: none"> <li>i. Minimize the number of fasteners (Otto and Wood, 2001)</li> <li>ii. Minimize the number of fastener removal tools needed (Otto and Wood, 2001)</li> <li>iii. Fasteners should be easy to remove (Otto and Wood, 2001)</li> <li>iv. Fastening points should be easy to access (Otto and Wood, 2001)</li> <li>v. Snap fits should be obviously located and able to be torn apart using standard tools (Otto and Wood, 2001)</li> <li>vi. Try to use fasteners of material compatible with the connecting parts (Otto and Wood, 2001)</li> <li>vii. If two parts cannot be compatible, make them easy to separate (Otto and Wood, 2001)</li> <li>viii. Eliminate adhesive unless compatible with both parts joined (Otto and Wood, 2001)</li> <li>ix. Minimize the number and length of interconnecting wires or cables used (Otto and Wood, 2001)</li> <li>x. Connections can be designed to break as an alternative to removing fasteners (Otto and Wood, 2001)</li> </ul>