

Évaluations des impacts
environnementaux d'une œuvre
d'art numérique

Analyse du cycle de vie de l'œuvre Far Away

Version	V1.0	 
Date	Novembre 2022	
Diffusion	Publique	
Format	Étude complète	

Rédaction

Martin Lambert, Laboratoire Arts & Technologies - Stereolux
martin.lambert@stereolux.org
www.stereolux.org

Contribution

Stéphane Buellet, Chevalvert
Arnaud Juracek, Chevalvert
www.chevalvert.fr

Le Laboratoire Arts & Technologies de Stereolux

Stereolux est un projet culturel et artistique nantais orienté vers les musiques actuelles et les arts numériques. Porté par l'association Songo, il a ouvert en 2011. Lieu de diffusion proposant concerts, spectacles, expositions, performances ou conférences mais aussi de création - recherche et expérimentation artistique, workshops et ateliers - Stereolux rassemble près de 180 000 spectateur·rices tout au long de la saison. Organisé par l'association depuis 2002, le festival Scopitone est un rendez-vous de dimension internationale dédié aux cultures électroniques et aux arts numériques.

Le Laboratoire Arts & Technologies de Stereolux est un espace de rencontre et de croisements entre des domaines d'activités et des écosystèmes variés (artistiques, académiques, industriels, économiques, associatifs, sociétaux...). Il vise à interroger les représentations, les usages et les implications sociales des technologies numériques et se positionne comme un espace de formation, de réflexion et d'expérimentation pour les artistes.

Le studio Chevalvert

Nous sommes un studio de design visuel basé à Paris. Depuis 2007, nous répondons à des commandes de design graphique et créons des œuvres artistiques. Notre équipe réunit différentes compétences des domaines de la création contemporaine.

La singularité du studio se caractérise par son rapport à l'image, orienté objet, systémique, où le processus compte autant que le résultat. Nos savoirs-faire techniques et artistiques nous permettent de développer une approche à la fois globale, transversale et contextuelle sur chacun de nos projets. Les productions du studio se déploient dans les domaines du graphisme, de l'interaction, de l'édition, de la vidéo et des installations spatiales et interactives.

Nos projets sont le fruit d'une rencontre entre l'Art et les technologies. Tous nos cadres de création sont sources d'expérimentation et nous permettent de développer des systèmes graphiques sensibles. Ces architectures formelles sont basées sur un ensemble de variables et composent la grammaire visuelle d'un projet donné. Ces systèmes visuels sont à la fois le point de départ et le produit d'outils génératifs circonstanciels inédits, car conçus par nos soins. Les créations qui en résultent forment le socle de notre processus d'élaboration, et constituent notre méthode de design.

Nous pensons que les outils-systèmes que nous proposons apportent des solutions techniques au plus près des besoins pratiques de nos clients et instaurent des univers esthétiques marquants et novateurs auprès de leurs publics.

Sommaire

Synthèse	5
1. Introduction	9
1.1. Contexte	9
1.1.1. La transition environnementale du secteur culturel	9
1.1.2. Vers un numérique soutenable	10
1.1.3. Les spécificités des arts numériques	10
1.1.4. La question de l'éco-conception	11
1.1.5. Genèse et enjeux de cette étude	13
1.1.6. L'œuvre Far Away	13
1.2. L'analyse de cycle de vie	14
1.2.1. Principes généraux	14
1.2.2. Analyse de cycle de vie d'œuvres artistiques	15
2. Objectifs et champs de l'étude	17
2.1. Objectifs et public cible	17
2.2. Champ de l'étude	17
2.2.1. Système de produit à étudier	17
2.2.2. Fonction	19
2.2.3. Unité fonctionnelle	19
2.2.4. Frontières du système	19
2.2.5. Règles d'affectation	20
2.2.6. Méthodologie d'évaluation des impacts et catégories d'impact sélectionnées	20
2.2.7. Exigences de qualité des données	23
2.2.8. Outils de modélisation	23
3. Inventaire du cycle de vie	24
3.1. Sources des données	24
3.2. Nomenclature	25
3.3. Bilan massique	27
3.4. Données d'inventaire du cycle de vie et hypothèses	27
3.4.1. Production des composants	27
3.4.1.1. Électronique	27
3.4.1.2. Moteurs et éléments mécaniques	31
3.4.1.3. Alimentation électrique	36
3.4.1.4. Boîtiers	38
3.4.1.5. Structure	39
3.4.1.6. Visserie	41
3.4.1.7. Caisses de transport	41
3.4.2. Transport des composants	43
3.4.3. Assemblage	44
3.4.4. Transport de l'œuvre	44
3.4.5. Exposition	45
4. Résultats	46
4.1. Évaluation globale	46
4.2. Normalisation et pondération	47
4.2.1. Normalisation	47
4.2.2. Pondération	48
5. Interprétation	50
5.1. Analyse de contribution	50

5.1.1. Production des composants	50
5.1.2. Transport des composants	52
5.1.3. Assemblage	53
5.1.4. Transport de l'œuvre	54
5.1.5. Exposition	54
5.2 Analyses de sensibilité	55
5.2.1. Origine du métal de la structure et de certains composants mécaniques	55
5.2.2. Nombre d'expositions	56
5.2.3. Distances parcourues lors du transport de l'œuvre	58
5.2.4. Mode de transport utilisé pour le transport de l'œuvre	59
5.2.5. Mix électrique du lieu d'exposition	61
5.3. Évaluation de la qualité des données	63
5.3.1. Contrôle de complétude et de cohérence	63
5.3.2. Représentativité	64
5.4. Limites	65
5.4.1. Non prise en compte de l'étape de fin de vie	65
5.4.2. Données manquantes	65
5.4.3. Représentativité de la base de données utilisée	66
5.4.4. Absence d'évaluation de certains impacts	66
5.4.6. Absence de revue critique	66
6. Conclusion	67
Annexes	69
Annexe A - L'analyse du cycle de vie	69
A.1. Grands principes	69
A.2. Méthodologie de l'ACV	71
A.2.1. Vue d'ensemble	71
A.2.2. Définition des objectifs et du champ de l'étude	71
A.2.3. Inventaire du cycle de vie	72
A.2.4. Évaluation de l'impact environnemental	72
A.2.5. Interprétation des résultats	73
Annexe B - Catégories d'impacts de la méthode PEF	74
Annexe C - Bilan massique détaillé	75
Annexe D - Détail des processus	77
D.1. Production des composants	77
D.2. Transport composants	87
D.3. Assemblage	93
D.4. Transport de l'œuvre et exposition	94
Annexe E - Présentation détaillée des résultats de l'évaluation des impacts du cycle de vie	95
E.1. Valeurs absolues	95
E.2. Valeurs relatives	97
Annexe F - Complétude de l'étape de production des composants	100
Annexe G - Qualité des données	102
Références	107
Index des tableaux et figures	110
Figures	110
Tableaux	110
Sigles et acronymes	112

Synthèse

Contexte et périmètre de l'étude

Cette étude est née du constat que si la question environnementale était un sujet de plus en plus abordé par les artistes, les démarches d'éco-conception des œuvres étaient par encore très peu présentes dans le champ des arts numériques. Pour initier et structurer ce type de démarche, il est nécessaire de mieux comprendre quels sont les impacts environnementaux potentiels générés par des œuvres d'art numérique, et d'identifier les principaux éléments ou étapes (fabrication des composants, déplacement de l'œuvre, fonctionnement, etc.) contribuant à cet impact pour informer les artistes et nourrir leurs réflexions sur les choix de conception.

Dans ce contexte, le Laboratoire Arts & Technologies de Stereolux s'est associé au studio Chevalvert pour réaliser l'analyse de cycle de vie de l'œuvre Far Away. Cette œuvre, conçue par le studio Chevalvert, est composée de 12 totems lumineux et cinétiques, appelés « Sentinelles », réagissant à la présence de spectateurs. Elle est conçue pour être exposée dans un espace public extérieur (parc, place, ...), ce qui implique l'utilisation de composants résistant à l'humidité. Chaque totem comporte des éléments électroniques (haut-parleurs, LEDs, cartes électroniques, capteurs, etc), mécaniques, électriques et structurels.

L'objectif de cette étude est de mieux comprendre les impacts environnementaux générés par une œuvre d'art numérique lors des différentes étapes de son cycle de vie. Elle vise d'une part à quantifier les impacts environnementaux potentiels de cette œuvre, et d'autre part à identifier les étapes du cycle de vie ainsi que les composants et choix techniques ayant le plus d'impact. Une attention particulière est portée aux composants électroniques et numériques, caractéristiques d'une œuvre d'art numérique.

Les étapes du cycle de vie de l'œuvre prises en compte sont :

- La fabrication des composants, depuis l'extraction des matières premières nécessaires jusqu'à leur transformation (lorsque cela est possible), incluant également les caisses de transport et les composants de rechange ;
- Le transport de ces composants jusqu'au lieu d'assemblage de l'œuvre ;
- L'assemblage des composants pour fabriquer l'œuvre ;
- Le transport de l'œuvre depuis son lieu de stockage jusqu'à son lieu de diffusion, puis du lieu de diffusion jusqu'à son lieu de stockage une fois la diffusion terminée ;
- Le fonctionnement de l'œuvre exposée.

L'étape de fin de vie n'est pas prise en compte dans cette étude.

L'unité fonctionnelle retenue est : « la fabrication d'un exemplaire de l'œuvre Far Away, ainsi que de ses caisses de transport et ses pièces de rechange, et sa diffusion pendant 72h dans 5 événements situés en France distants de 500km de son lieu de stockage, avec un retour sur son lieu de stockage à chaque fin de diffusion ».

Méthodologie et données utilisées

Cette étude utilise la méthode de l'analyse du cycle de vie telle que définie par les normes ISO 14040 et 14044. La méthodologie d'évaluation des impacts retenue est celle définie par la Commission Européenne dans le cadre du programme Environmental Footprint.

Cette étude repose sur des données fournies par le studio Chevalvert, détaillant les différents composants utilisés pour la réalisation de l'œuvre. La modélisation des processus impliqués dans les différentes étapes du cycle de vie de l'œuvre a été faite à l'aide de la base de données Environmental Footprint, complétée par quelques données issues de la base de données NegaOctet.

Résultats

Pour les besoins de cette étude, six catégories d'impact ont été sélectionnées parmi les catégories d'impact définies par la méthode Environmental Footprint :

- Changement climatique (kg CO2 eq.) ;
- Particules fines (cas de maladies) ;
- Radiations ionisantes (kg U235 eq.) ;
- Acidification (mol H+ eq.) ;
- Ecotoxicité - Eau douce (CTUe) ;
- Consommation des ressources abiotiques – Eléments (kg Sb eq.) ;

Les résultats pour chaque catégorie d'impact sont présentés en valeurs absolues et relatives dans les Tableaux A et B et dans la Figure A.

ÉTAPE	Acidification (mol H+ eq.)	Changement climatique (kg CO2 eq.)	Consommation des ressources abiotiques – Eléments (kg Sb eq.)	Ecotoxicité - Eau douce (CTUe)	Particules fines (Cas de maladies)	Radiations ionisantes (kg U235 eq.)
Production des composants	1,340E+01	2,154E+03	1,513E-01	7,087E+02	1,886E-04	4,598E+02
Transport des composants	4,770E+00	1,979E+02	1,101E-05	3,482E+01	3,621E-05	2,660E-01
Assemblage	5,543E-02	1,563E+01	1,164E-05	2,917E+00	5,507E-07	1,219E+02
Transport de l'œuvre	2,895E+00	3,758E+02	0,000E+00	9,705E-05	1,526E-05	0,000E+00
Exposition	5,896E-01	1,662E+02	1,239E-04	3,102E+01	5,858E-06	1,297E+03
TOTAL	2,171E+01	2,909E+03	1,514E-01	7,774E+02	2,465E-04	1,879E+03

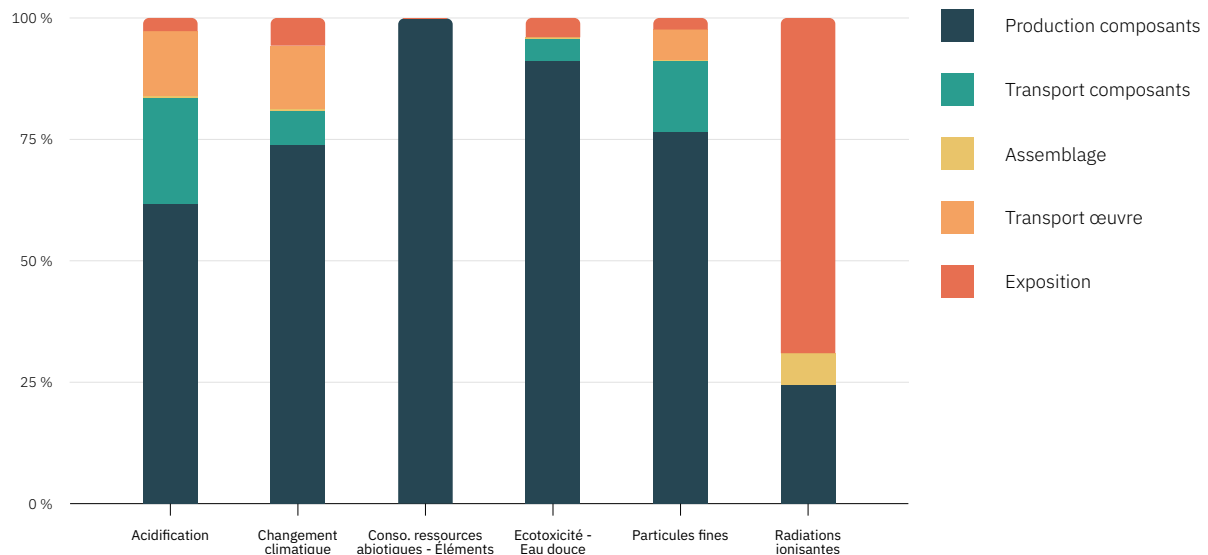
[Tableau A - Évaluation globale et par étape du cycle de vie (valeurs absolues)]

ÉTAPE	Acidification (mol H+ eq.)	Changement climatique (kg CO2 eq.)	Consommation des ressources abiotiques – Eléments (kg Sb eq.)	Ecotoxicité - Eau douce (CTUe)	Particules fines (Cas de maladies)	Radiations ionisantes (kg U235 eq.)
Production des composants	61,73 %	74,03 %	99,90 %	91,16 %	76,52 %	24,47 %
Transport des composants	21,97 %	6,80 %	0,01 %	4,48 %	14,69 %	0,01 %
Assemblage	0,26 %	0,54 %	0,01 %	0,38 %	0,22 %	6,49 %
Transport de l'œuvre	13,33 %	12,92 %	0,00 %	0,00 %	6,19 %	0,00 %
Exposition	2,72 %	5,71 %	0,08 %	3,99 %	2,38 %	69,03 %
TOTAL	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %

[Tableau B - Évaluation globale et par étape du cycle de vie (valeurs relatives)]

Ces résultats font ressortir l'importance l'étape de production des composants pour cinq des six catégories d'impact, et de l'étape d'exposition pour la catégorie «Radiations ionisantes».

La production des composants électroniques joue un rôle particulièrement important dans les impacts environnementaux potentiels de l'œuvre, puisqu'ils représentent à eux seuls environ 38 à 74% des impacts liés à l'étape de production de l'œuvre (voir Tableau C), soit 18 à 65 % des impacts totaux.



[Figure A - Répartition des impacts par étape du cycle de vie]

CATÉGORIE	Acidification (mol H+ eq.)	Changement climatique (kg CO2 eq.)	Consommation des ressources abiotiques – Eléments (kg Sb eq.)	Ecotoxicité - Eau douce (CTUe)	Particules fines (Cas de maladies)	Radiations ionisantes (kg U235 eq.)
Électronique	37,97 %	30,96 %	65,20 %	54,20 %	31,81 %	73,29 %
Moteurs & Mécanique	9,70 %	11,01 %	15,90 %	17,94 %	10,79 %	4,44 %
Alimentation électrique	2,77 %	2,54 %	5,32 %	5,61 %	2,46 %	1,58 %
Boîtiers	2,47 %	2,83 %	0,01 %	4,29 %	2,21 %	0,99 %
Structure	40,29 %	43,90 %	11,00 %	11,58 %	42,23 %	19,81 %
Visserie	1,65 %	1,33 %	0,97 %	2,58 %	1,90 %	0,06 %
Caisses de transport	5,15 %	7,42 %	1,59 %	3,80 %	8,59 %	-0,16 %
TOTAL Production comp.	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %

[Tableau C - Contribution des différentes catégories de composants à l'étape de production des composants (valeurs relatives)]

Limites

De nombreuses hypothèses ont dû être faites du fait d'un manque d'informations précises sur les caractéristiques de certains composants. De plus, aucune donnée primaire (c'est-à-dire issue d'une mesure directe de l'impact environnemental d'un processus impliqué dans le cycle de vie) n'était disponible. Cela a conduit à faire reposer l'étude sur des données secondaires issues principalement de la base de donnée Environmental Footprint. Cette base de donnée n'étant pas exhaustive, aussi bien au niveau des processus disponibles qu'au niveau de leur localisation géographique, certains processus impliqués dans le cycle de vie de l'œuvre n'ont pas pu être pris en compte ou ont été largement approximatés. Ces différents points engendrent des imprécisions et des incertitudes qui limitent la portée des résultats.

Conclusion

Si cette étude reste perfectible, notamment au niveau de la précision et de la représentativité des données utilisées, elle montre que cette œuvre a un impact potentiel particulièrement important au niveau de la consommation de ressources abiotiques (c'est-à-dire au niveau de l'épuisement de ressources minérales). Si sa contribution au réchauffement climatique, indicateur le plus scruté à l'heure actuelle, n'est pas négligeable (il est estimé qu'elle a potentiellement généré environ 3 tonnes de CO₂ au cours de son cycle de vie - soit l'équivalent d'environ 13 000 kilomètres en voiture), cette forte consommation de ressources non renouvelables invite à prendre également en compte d'autres catégories d'impact pouvant elles aussi contribuer fortement à l'empreinte environnementale de l'œuvre.

La production des composants utilisés dans cette œuvre est l'étape contribuant le plus fortement à cinq des six catégories d'impact retenues, à hauteur de 24 à 100 % en fonction de la catégorie d'impact. La production composants électroniques représente un poids environnemental particulièrement important : si elle ne représente qu'environ 1,5 % de la masse totale de l'œuvre, cette catégorie de composants contribue de 18 à 65 % aux résultats finaux, ce qui est considérable. Par ailleurs, les étapes de transport de l'œuvre et d'exposition contribuent de manière non négligeable aux résultats finaux, notamment dans la catégorie d'impact « Radiations ionisantes » pour l'étape d'exposition qui y contribue à hauteur d'environ 70 %.

Le poids environnemental important de l'étape de production des composants découle directement de choix de conception : une attention particulière portée aux types, à la quantité et à l'origine des composants aurait permis de diminuer les impacts environnementaux d'une œuvre comme Far Away. L'emploi de composants électroniques issus d'œuvres obsolètes, ou achetés via des circuits de réemploi, aurait notamment permis de faire diminuer la contribution de cette catégorie de composants. Cette réflexion sur le choix des composants, qui s'inscrit dans une démarche d'éco-conception, invite à porter une réflexion globale, impliquant les artistes mais aussi les producteurs et diffuseurs d'art numérique, sur des modalités de création, de production et de diffusion qui permettraient de laisser plus de temps et de ressources aux artistes pour travailler à la diminution des impacts environnementaux de leurs œuvres.

Une réflexion sur la fin de vie des œuvres d'art numérique est également à mener, même si elle dépasse le seul enjeu environnemental. Le recyclage ou le réemploi de composants d'œuvres n'ayant plus vocation à être diffusées ou achetés d'occasion permettraient de réduire leur empreinte environnementale ou celle d'œuvres ultérieures. Là encore, il s'agit d'une démarche qui ne peut être portée par des artistes seul·es et qui doit s'inscrire dans un cadre global impliquant différents acteurs du secteur.

Les résultats de cette étude étant difficilement transposables à d'autres œuvres d'art numérique, d'autres études de ce type seraient nécessaires pour tenter de dégager des tendances communes et de généraliser certaines conclusions afin mieux accompagner artistes et acteurs du secteurs dans leurs démarches visant à éco-concevoir leurs œuvres. Cette étude peut néanmoins d'ores et déjà permettre d'esquisser des pistes de réflexion sur les impacts environnementaux des arts numériques et les moyens de les réduire.

1. Introduction

1.1. Contexte

1.1.1. La transition environnementale du secteur culturel

Dans un contexte de prise de conscience de la nécessité d'agir sur les impacts environnementaux générés par les activités humaines, le secteur culturel s'interroge aujourd'hui sur les impacts environnementaux de ses activités, et voit émerger différentes initiatives visant à les réduire. Principalement portées sur la réduction de son empreinte carbone et de ses déchets, ces actions s'inscrivent dans un contexte de réflexion profonde sur les pratiques et usages culturels et leurs évolutions, auxquelles le numérique n'est pas étranger. Ces actions peuvent être portées par des acteurs sectoriels, comme le SMA, la FEDELIMA¹ ou le CNM² dans le secteur musical, ou par des acteurs extérieurs au secteur spécialisés dans l'analyse et l'atténuation des impacts environnementaux comme le Shift Project³. Des acteurs spécialisés dans la transition écologique du secteur culturel sont également apparus, comme Arviva⁴ ou Les Augures⁵, et proposent un accompagnement au plus proche des besoins et des modes de fonctionnement propres au secteur culturel. Enfin, certaines structures culturelles prennent l'initiative de s'emparer par elles-mêmes de ce sujet et de mettre en place leurs propres plans d'actions visant à réduire l'impact de leurs activités.

Ces actions peuvent concerner le fonctionnement interne des structures culturelles, les activités qu'elles développent et diffusent, mais aussi les propositions artistiques en elles-mêmes. Elles engendrent ainsi un questionnement profond sur les manières de créer, de programmer et de diffuser, mais aussi sur les modèles économiques du secteur. Ces limites, qui peuvent générer des réticences importantes parmi les acteurs concernés, invitent à développer des approches adaptées aux spécificités de ces différents acteurs culturels. Ce secteur inclut en effet une typologie d'acteurs très large, allant du spectacle vivant au patrimoine en passant par la publicité ou l'architecture⁶, avec chacun leurs propres modes de fonctionnement, contraintes et enjeux.

Plus largement, l'enjeu pour le secteur aujourd'hui est de s'inscrire dans une trajectoire durable et compatible avec les enjeux environnementaux actuels, de manière d'une part à contribuer à l'effort global de transition environnementale, mais aussi à assurer sa pérennité à plus ou moins long terme. Il s'agit ainsi pour les acteurs concernés d'être en phase avec les attentes des artistes, du public et des financeurs, et d'accompagner les changements sociétaux nécessaires pour mettre en place la transition environnementale. Le secteur culturel est en effet concerné à plusieurs titres par cette transition : de part les impacts générés directement par ses activités, comme n'importe quel secteur aujourd'hui, mais aussi de part sa vulnérabilité aux changements et aux crises - qui ne manqueront pas de se manifester dans un contexte de changement climatique et de raréfaction des ressources fossiles, et enfin de part le rôle qu'il joue dans la construction d'imaginaires susceptibles d'accompagner et d'encourager la transition de la société dans son ensemble.

¹ Le SMA et la FEDELIMA ont notamment organisé des rencontres sur la thématique de l'écologie et des musiques actuelles en avril 2022 [1]

² Le CNM a notamment mis en place une plateforme dédiée à l'accompagnement des acteurs du secteur dans leur transition écologique [2]

³ On peut notamment citer le rapport *Décarbonons la culture !* rédigé dans le cadre du PTEF (Plan de Transformation de l'Économie Française) [3]

⁴ Arviva est une association dédiée à la transition écologique dans le spectacle vivant [4]

⁵ Les Augures est une agence de conseil accompagnant les acteurs culturels dans leur transition écologique [5]

⁶ Le Ministère de la Culture retient 9 sous-secteurs dans sa nomenclature d'acteurs du secteur culturel [6]

1.1.2. Vers un numérique soutenable

L'impact environnemental du numérique est un sujet devenu incontournable depuis quelques années. On estime que ce secteur représente aujourd'hui environ 4% des émissions mondiales de gaz à effet de serre, le plaçant au même niveau que le secteur aéronautique, mais qu'il a également un impact important sur la consommation d'eau douce et de minerais¹. Si ce chiffre peut paraître relativement faible, c'est surtout sa croissance qui inquiète : elle est en effet estimée à environ 8% par an². Si cette tendance se maintient, il est estimé que le numérique pourrait représenter d'ici à quelques années jusqu'à 7 à 8% des émissions mondiales de gaz à effet de serre². De même, sa consommation de minerais, par nature non renouvelables à l'échelle humaine, pose question quant à sa durabilité³. En résumé, le numérique ne s'inscrit pas à l'heure actuelle dans une trajectoire compatible avec les enjeux environnementaux actuels et à venir, ce dont de plus en plus d'acteurs du secteur commencent à prendre conscience.

Les différentes études cherchant à évaluer les impacts environnementaux du numérique prennent en compte les terminaux utilisés pour accéder à des services numériques (smartphones, ordinateurs, objets connectés,...), mais aussi les infrastructures transportant (réseaux) ou stockant (datacenter) l'information. Elles intègrent en général les étapes de fabrication des différents constituants, ainsi que leur étape d'utilisation - la question de leur fin de vie étant encore un sujet complexe et qui n'est pas systématiquement pris en compte. Ces études montrent que les impacts environnementaux du numérique sont très largement générés par les terminaux, qui représentent 65 à 90% des impacts en fonction des critères, et lors de la phase de fabrication des équipements⁴. Elles soulignent également l'importance de ne pas se concentrer uniquement sur la consommation électrique de ces équipements, par ailleurs stable malgré l'augmentation importante du volume de données traitées⁵. Il apparaît ainsi que loin d'être « dématérialisé », le numérique a au contraire une empreinte matérielle forte et non soutenable si la dynamique actuelle se poursuit.

Face à ce constat, de nombreuses initiatives émergent aujourd'hui pour mieux comprendre et réduire les impacts environnementaux du numérique. Portées par des acteurs privés, publics ou académiques, elles peuvent porter sur la collecte et le partage de données de meilleure qualité⁶ - point souvent problématique tant ces données peuvent être difficiles d'accès, la sensibilisation et l'accompagnement des acteurs ou utilisateurs⁷, l'évaluation des impacts environnementaux, ou encore l'éco-conception de services, d'infrastructures ou d'équipements. Par ailleurs, ces différentes approches intègrent souvent une dimension sociétale (on parle alors de « numérique responsable »), prenant en compte des questions d'accessibilité ou d'impact social en plus des question environnementale. Cette approche semble aujourd'hui de mieux en mieux prise en compte par les acteurs du secteur numérique, même s'il reste encore beaucoup à faire pour que ces enjeux soient pleinement et systématiquement intégrés aux réflexions et processus de conception, de développement et de déploiement des produits et services numériques.

1.1.3. Les spécificités des arts numériques

En tant que champ artistique, les arts numériques sont par nature intégrés au secteur culturel. Les acteurs qui s'y rattachent en partagent donc les enjeux, et doivent ainsi, comme tous les acteurs culturels, s'inscrire dans une trajectoire de réduction des impacts environnementaux qu'ils génèrent. Mais ils occupent une position

¹ Étude Green IT, *Empreinte environnementale du numérique mondial*, 2019 [7]

² Rapport The Shift Project, *Déployer la sobriété numérique*, 2020 [8]

³ Article de Gauthier Roussilhe, *Explications sur l'empreinte environnementale du secteur numérique*, 2021 [9]

⁴ Rapport de l'ADEME et l'Arcep, *Évaluation de l'impact environnemental du numérique en France*, 2022 [10]

⁵ Article de l'IEA, *Data Centres and Data Transmission Networks*, 2021 [11]

⁶ On peut notamment citer l'initiative NegaOctet, portée par un consortium d'acteurs français [12]

⁷ Voir notamment les actions portées par l'Institut du Numérique Responsable [13]

singulière à plusieurs titres¹ au sein du secteur culturel, ce qui peut influencer la manière dont ils s'emparent de cette problématique.

La diversité des pratiques artistiques qui peuvent s'y rattacher, des arts visuels au spectacle vivant en passant par la vidéo ou les arts plastiques, en font par nature un champ artistique hybride et transversal. Cette transversalité, qui peut engendrer des difficultés à s'intégrer aux dispositifs de financement culturels et compliquer les relations avec institutions culturelles, se retrouve également dans la variété et le nombre d'acteurs se revendiquant de ce champ. Tantôt rattachés au secteur des musiques actuelles, des arts plastiques ou des arts visuels (pour ne citer que quelques exemples), tantôt spécialisés dès l'origine dans les arts numériques, ces différents acteurs portent des historiques et des modes de fonctionnement souvent différents les uns des autres. Cette diversité d'acteurs peut nécessiter une approche fine et différenciée dans la manière dont est traitée la question de la réduction des impacts environnementaux dans le champ des arts numériques. L'implication d'un réseau fédérant ces différents acteurs comme HACNUM² peut à ce titre être cruciale pour aboutir à des actions concrètes et partagées.

Les arts numériques se distinguent aussi d'autres champs artistiques par des modes de création, de production et de diffusion parfois spécifiques. Les modèles économiques des artistes et des structures oeuvrant dans ce champ sont ainsi souvent différents de ceux de l'art contemporain ou du spectacle vivant. Par exemple, les œuvres plastiques relevant du champ de l'art numérique sont rarement vendues en galeries, ou achetées par des musées ou des collections pour intégrer des collections permanentes. Cette particularité interroge notamment la question de leur conservation, sujet de plus en plus abordé par ailleurs mais qui entre en résonance avec des questions environnementales, notamment au sujet de la fin de vie des œuvres. Ces spécificités sont donc également à prendre en compte dans une réflexion globale sur la transition environnementale de ce champ artistique.

Mais ce qui distingue le plus naturellement les arts numériques d'autres champs artistiques reste la place centrale qu'occupent les technologies numériques. Qu'elles soient utilisées comme médium, détournées ou questionnées par les artistes, elles sont le point commun reliant les différents acteurs impliqués dans ce champ artistique. Les arts numériques contribuent ainsi à façonner les expériences, les usages, et les imaginaires des technologies numériques, mais aussi à les interroger et à développer une approche critique sur ce qu'elles génèrent. Cette relation particulière envers le numérique, à la fois outil de création et sujet artistique, fait que les arts numériques sont directement concernés par les réflexions et les actions visant à réduire les impacts environnementaux du numérique.

Les arts numériques sont ainsi à la croisée des évolutions du secteur culturel et du secteur du numérique. Les réflexions sur les impacts environnementaux des arts numériques doivent donc intégrer les initiatives à l'œuvre dans ces deux secteurs, tout en développant des approches particulières prenant en compte ses spécificités.

1.1.4. La question de l'éco-conception

La réduction des impacts environnementaux du secteur culturel peut (et doit) passer par différents leviers : changements dans les modes de déplacements des artistes et des spectateurs, sur les modalités de programmation des artistes, sur les formes des événements, sur le matériel utilisé, sur la nourriture distribuée aux artistes et aux spectateurs, etc. Si beaucoup de ces actions concernent prioritairement les lieux de diffusion, l'éco-conception des œuvres fait également partie des solutions envisagées³.

¹ Vidéo du réseau HACNUM, *Les arts numériques : un champ artistique comme les autres ?*, 2022 [14]

² Réseau national regroupant des acteurs oeuvrant dans les champs des arts hybrides et des cultures numériques [15]

³ Pour une liste plus complète de pistes visant à réduire l'impact environnemental du secteur culturel - mais centrée sur les émissions de gaz à effet de serre, voir le rapport du Shift Project *Décarbonons la culture!* [3]

L'éco-conception est 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"¹. Dit autrement, l'éco-conception vise à réduire les impacts environnementaux d'un produit ou d'un service en prenant en compte l'ensemble de son cycle de vie, c'est-à-dire depuis l'extraction des matières premières jusqu'aux déchets générés lors de sa fin de vie. Les démarches d'éco-conception font appel à différentes méthodes, parmi lesquelles l'analyse du cycle de vie occupe une place importante en permettant d'évaluer les impacts générés par les différentes étapes du cycle de vie. Cette évaluation peut servir à identifier des points à améliorer (procédés, matériaux, choix de conception, etc) pour réduire les impacts environnementaux du produit ou du service, ou à comparer les impacts de différents produits ou services répondant à une même fonction.

Si cette démarche est issue du monde industriel, elle commence aujourd'hui à se développer dans le secteur culturel. Des initiatives intègrent l'éco-conception de manière systématique, comme celle mise en place par l'Opéra de Lyon visant à éco-concevoir des décors², tandis que d'autres, plus ponctuelles, se concentrent sur une œuvre particulière³. Par ailleurs, certain-es artistes, soucieux de l'impact environnemental de leurs projets, cherchent à prendre en compte ces questions dans la manière de les concevoir sans pour autant s'inscrire dans une démarche d'éco-conception à proprement parler⁴. Des actions de sensibilisation et de formation à l'éco-conception à destination d'artistes ou d'acteurs culturels voient ainsi le jour, permettant de sensibiliser et de diffuser cette approche auprès des artistes et de les accompagner dans cette démarche⁵.

L'éco-conception des produits et services numériques est quant à elle devenue un sujet à part entière. De nombreux acteurs intègrent aujourd'hui cette approche dans leur processus de développement, notamment pour les sites web, voire se spécialisent sur ce sujet. D'autres conçoivent et diffusent des guides permettant aux concepteurs de mieux comprendre et agir pour réduire les impacts environnementaux des produits et services qu'ils développent⁶. L'éco-conception de services numériques vise principalement à agir sur l'obsolescence des équipements en réduisant les besoins en énergie et le volume de données échangé du service, de manière à éviter un renouvellement trop fréquent une augmentation trop importante des infrastructures nécessaires au fonctionnement des services numériques. L'éco-conception peut en outre permettre de faciliter la réparation ou le recyclage des équipements, ou encore orienter les choix de matériaux utilisés.

La plupart des œuvres d'art numérique sont composées en partie d'éléments n'intégrant pas de composants électroniques : structures en bois ou en acier, peinture, tissus, etc. Éco-concevoir des œuvres d'art numérique nécessite donc une approche croisant les spécificités des œuvres d'art « non numériques » (fabrication unique ou en petite série, déplacement des œuvres et artistes, conservation,...) et des technologies numériques (obsolescence, renouvellement du matériel, consommation d'énergie et de données, etc). La variété des formes d'arts numériques, de l'installation à la performance en passant par l'œuvre virtuelle, rend néanmoins compliqué la définition d'une approche d'éco-conception commune et globale pouvant être appliquée à tout type d'œuvre. Il est cependant envisageable de sensibiliser les artistes numériques à ces notions, et, peut-être, de définir des points d'attention généraux pouvant permettre d'orienter des choix de conception, notamment autour des technologies numériques. Pour cela, il est nécessaire de mieux connaître et comprendre les impacts

¹ Définition selon la norme ISO 14006 v2020

² L'Opéra de Lyon a engagé depuis plusieurs années une démarche ambitieuse d'éco-conception, notamment via le développement d'un outil d'évaluation et d'aide à la décision pour les équipes techniques [16]

³ C'est le cas de l'installation Ice Watch d'Olafur Eliasson - voir l'article *Qu'est-ce que l'éco-conception ?* sur le site Art of Change 21 [17]

⁴ Voir par exemple le spectacle Oniri 2070 de la compagnie Organic Orchestra, qui propose un spectacle consommant moins d'un kWh [18]

⁵ On peut notamment citer les formations données par Arviva intégrant l'éco-conception [19], ou une structure comme Karbone Prod accompagnant des artistes et acteurs culturels dans cette démarche [20]

⁶ Voir notamment le guide d'éco-conception conçu par l'association Designers Ethiques [21], l'Afnor Spec 2201 [22], ou encore le référentiel développé par la Mission interministérielle Numérique écoresponsable [23]

environnementaux potentiels générés par des œuvre d'art numérique, ce que permet la méthode de l'analyse du cycle de vie .

Au delà d'une réduction des impacts environnementaux des œuvre d'art numérique, qui, comme on l'a vu, s'inscrit dans un mouvement de fond du secteur culturel visant à le mettre en phase avec les enjeux environnementaux et les attentes du public et des artistes, l'éco-conception peut aussi représenter une opportunité pour penser et développer une approche critique des technologies numériques. Plus qu'un outil de conception, il s'agit ainsi de s'en emparer également comme un sujet de création, et d'explorer les implications artistiques de la prise en compte des problématiques environnementales. L'enjeu est donc double : développer une approche plus éco-responsable des arts numériques, mais aussi amorcer des réflexions sur les enjeux conceptuels et esthétiques de ces approches.

1.1.5. Genèse et enjeux de cette étude

Cette étude est née du constat que si la question environnementale était un sujet de plus en plus abordé par les artistes, les démarches d'éco-conception des œuvres était par encore très peu présentes dans le champ des arts numériques - même si, comme on l'a vu, certain-es artistes cherchent déjà à réduire certains impacts de leurs projets. Pour initier et structurer ce type de démarche, il est nécessaire de mieux comprendre quels sont les impact environnementaux potentiels générés par des œuvres d'art numérique, et d'identifier les principaux éléments ou étapes (fabrication des composants, déplacement de l'œuvre, fonctionnement, etc.) contribuant à cet impact pour informer les artistes et nourrir leurs réflexions sur les choix de conception. L'analyse du cycle de vie est une méthode permettant d'obtenir de telles informations, et c'est pourquoi il a été décidé de l'utiliser.

Il ne s'agit donc pas d'une démarche comparative, visant à sélectionner des œuvres en fonction de leurs impacts environnementaux, ni de décerner des bons ou mauvais points aux artistes ou aux œuvres choisissant ou non de s'engager dans une démarche d'éco-conception, mais bien de nourrir les réflexions des acteurs des arts numériques. Cette étude est une première étape, qui pourra être complétée par l'analyse du cycle de vie d'autres œuvres d'art numérique de manière à tenter d'identifier des points communs permettant de généraliser (dans la mesure du possible) des conclusions quant aux principaux postes contribuant aux impacts environnementaux. À terme, si cette démarche s'avère concluante, il s'agira de s'appuyer sur ces évaluations pour proposer un guide de conseils d'éco-conception adapté aux spécificités et à la diversité des œuvre d'art numérique dont les artistes pourront s'emparer pour intégrer cette approche dans leurs projets.

Dans ce contexte, le Laboratoire Arts & Technologies de Stereolux¹ s'est associé au studio Chevalvert² pour réaliser l'analyse de cycle de vie de l'œuvre Far Away. Cette étude, à notre connaissance inédite dans le domaine des arts numériques, propose une évaluation des impacts environnementaux générés par la fabrication et le transport de ses composants, l'assemblage de l'œuvre, son transport et son fonctionnement durant plusieurs expositions. Les conclusions qui en seront tirées ne pourront néanmoins pas être extrapolées directement à d'autres œuvres, chaque œuvre étant particulière.

1.1.6. L'œuvre Far Away

Far Away³ est une œuvre conçue par le studio Chevalvert, composée de 12 totems lumineux et cinétiques, appelés « Sentinelles ». Le développement technique et la fabrication ont été réalisés en collaboration avec Hémisphère⁴, atelier spécialisé dans la réalisation de dispositifs scénographiques pour artistes. Elle a été

¹ Pour une présentation détaillée des activités du Labo Arts & Techs, voir le site web de Stereolux [24]

² Site web du studio Chevalvert [25]

³ Voir une présentation de l'œuvre sur le site de Chevalvert [26]

⁴ Site web Hémisphère [27]



[Figure 1 - Vues de l'œuvre Far Away]

produite par la structure de production Dolus & Dolus¹, sur commande du festival Constellations de Metz² lors duquel elle a été présentée pour la première fois en 2021. Elle a depuis continué à être présentée lors d'autres festival, comme le festival Bright à Bruxelles en 2022.

Pensée pour pouvoir être présentée dans l'espace public, cette œuvre renvoie aux robots d'exploration spatiale et à leur isolation, et propose une réflexion sur les interactions homme-machine, sur la communication spatiale, et, plus largement, sur la notion de vie. Elle repose sur un dispositif lumineux et sonore réagissant à la présence et aux déplacements du public autour de l'œuvre.

1.2. L'analyse de cycle de vie

1.2.1. Principes généraux

L'analyse du cycle de vie est une méthode d'évaluation visant à évaluer les impacts environnementaux d'un produit ou d'un service tout au long de son cycle de vie. Elle est multi-critères, c'est-à-dire qu'elle prend en compte différents types d'impacts (émissions de gaz à effet de serre, pollution des sols ou de l'air, épuisement des ressources, etc), et multi-étapes, puisqu'elle prend en compte les différentes étapes du cycle de vie d'un produit ou d'un service, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à sa mise en décharge ou son recyclage, en passant par les étapes de fabrication, de distribution et d'utilisation. Il s'agit d'une méthode normée, régie par les normes ISO 14040 et 14044.

Elle peut viser à évaluer les impacts environnementaux potentiels d'un produit ou d'un service dans l'objectif de les diminuer via une démarche d'éco-conception, à comparer les impacts de différents produits ou services remplissant une même fonction, ou encore à réaliser des fiches environnementales de produits.

Une analyse du cycle de vie est toujours dépendante du contexte dans lequel elle a été réalisée. Elle suppose en effet de faire un certain nombre d'hypothèses ou de choix qui empêchent d'extrapoler ses conclusions - pour un

¹ L'association Dolus & Dolus produit des œuvres d'art numérique et organisait le Mirage Festival à Lyon [28]

² Constellations est un festival d'art numérique se déroulant à Metz [29]

même produit ou services, des hypothèses de départ différentes peuvent conduire à des résultats différents. Connaître et prendre en compte de ce contexte et les hypothèses retenues est donc crucial pour assurer une bonne interprétation.

Une étude d'analyse de cycle de vie se découpe en quatre phases, définies par la norme ISO 14040 :

- Définition des objectifs et du champ de l'étude ;
- Inventaire du cycle de vie ;
- Évaluation de l'impact environnemental ;
- Interprétation des résultats.

Pour réaliser l'analyse de cycle de vie d'un produit ou d'un service, il est nécessaire de définir la fonction à laquelle il va répondre. Cette fonction se traduit par une unité fonctionnelle, qui permet de quantifier la fonction du produit ou service et de fournir une référence permettant le calcul des flux entrants ou sortants.

Une présentation plus détaillée de la méthode d'analyse du cycle de vie est disponible en Annexe A.

Cette étude a été menée en tâchant de se conformer aux exigences définies par les normes ISO 14040 et 14044.

1.2.2. Analyse de cycle de vie d'œuvres artistiques

La méthode d'analyse du cycle de vie est en général appliquée dans un contexte industriel, sur des produits fabriqués en plusieurs exemplaires via des processus bien définis.

Utiliser cette méthode dans le cas d'une œuvre artistique nécessite de l'adapter à la marge. En effet, un projet artistique diffère naturellement d'un produit industriel sur différents points :

Unicité

Contrairement à un produit industriel, une œuvre artistique est généralement unique, ou en tout cas produite en peu d'exemplaires. Cela a pour conséquence de rendre complexe le démontage d'exemplaires de l'œuvre pour, par exemple, identifier les composants ou les modes d'assemblage. De même, il peut être compliqué d'étudier l'œuvre en fonctionnement si elle n'est pas accessible au moment de la réalisation de l'étude.

Processus de fabrication

La fabrication d'une œuvre ne s'insère pas dans des processus de fabrication bien définis. Elle se fabrique en général de manière itérative en assemblant des composants divers. Son caractère unique ne permet pas d'étudier précisément les impacts générés par les processus impliqués dans sa fabrication, puisqu'une fois fabriquée ces processus n'existent plus en tant que tels.

Traçabilité des composants

Les différents composants d'une œuvre sont en général achetés « sur étagère » auprès de différents fournisseurs, souvent via des plateformes de vente en ligne ou via des revendeurs spécialisés. Cela empêche d'établir un dialogue avec des fournisseurs, que rendrait possible une relation client-fournisseur stable et qui faciliterait la traçabilité des composants. Dans le cas où des composants seraient fabriqués sur mesure, leur caractère unique ou quasi unique rend difficile la remontée d'informations quant aux impacts générés par cette étape.

Fin de vie

Une œuvre n'a pas, ou rarement, vocation à être jetée ou recyclée après utilisation. Elle est en général soit

conservée pour archivage, soit exposée de manière plus pérenne. Cette particularité, objet de nombreuses réflexions dans le champ des arts numériques, fait qu'il est difficile d'évaluer les impacts générés par la fin de vie d'une œuvre, puisqu'en théorie elle n'en a pas vraiment.

Fonction

Une œuvre d'art n'a pas vocation à remplir une fonction au sens classique du terme, dans le sens où elle ne répond pas à un besoin bien identifié. Au plus simple, on peut considérer que sa fonction est d'exister pour transmettre un propos artistique. Si cela n'empêche pas la définition d'une unité fonctionnelle, cela implique qu'il est parfois difficile de décorrélérer la fonction des choix de conception, qui peuvent être partie intégrante de l'œuvre en tant que telle. Cela rend également difficile la comparaison d'œuvres d'art du point de vue de leurs impacts environnementaux, car leur fonction ne peut par définition pas être la même.

Si ces différents points rendent plus compliqués la réalisation d'une analyse de cycle de vie d'une œuvre d'art par rapport à un produit ou un service « classiques », ils ne la rendent pas impossible pour autant. Ils ont par contre pour conséquence de devoir adapter à la marge la méthodologie, et, surtout, de devoir se baser sur un nombre important d'hypothèses.

2. Objectifs et champs de l'étude

2.1. Objectifs et public cible

Cette étude répond à une volonté de mieux comprendre les impacts environnementaux générés par une œuvre d'art numérique - en l'occurrence l'œuvre Far Away du studio Chevalvert - lors des différentes étapes de son cycle de vie. Elle vise d'une part à quantifier les impacts environnementaux potentiels de cette œuvre, et d'autre part à identifier les étapes du cycle de vie ainsi que les composants et choix techniques ayant le plus d'impacts. Une attention particulière est portée aux composants électroniques et numériques, caractéristiques d'une œuvre d'art numérique.

De manière plus large, et bien que les résultats de cette étude ne soient pas directement transposables à d'autres œuvres d'art numérique, elle vise à alimenter les réflexions sur l'éco-conception d'œuvres d'art numérique en fournissant des premières tendances et informations générales sur les impacts potentiellement générés par des œuvres de ce type. Elle a ainsi vocation à ouvrir une discussion rassemblant des acteurs du secteur sur la manière dont les arts numériques peuvent réduire leur empreinte environnementale.

Cette étude s'adresse à :

- Des artistes souhaitant comprendre les impacts environnementaux potentiels d'une œuvre d'art numérique ;
- Des structures de production ou de diffusion souhaitant accompagner des artistes dans leurs démarches de réduction des impacts environnementaux de ce type de projet, ou mieux prendre en compte ces impacts dans leurs propres démarches environnementales ;
- Des acteurs du champ de l'art numérique souhaitant proposer des actions sectorielles visant à réduire les impacts environnementaux du secteur.

Les modalités de diffusion de cette étude n'ont pas été définies au moment de sa rédaction.

Cette étude n'a pas vocation à être utilisée dans des affirmations comparatives destinées à être divulguées au public.

2.2. Champ de l'étude

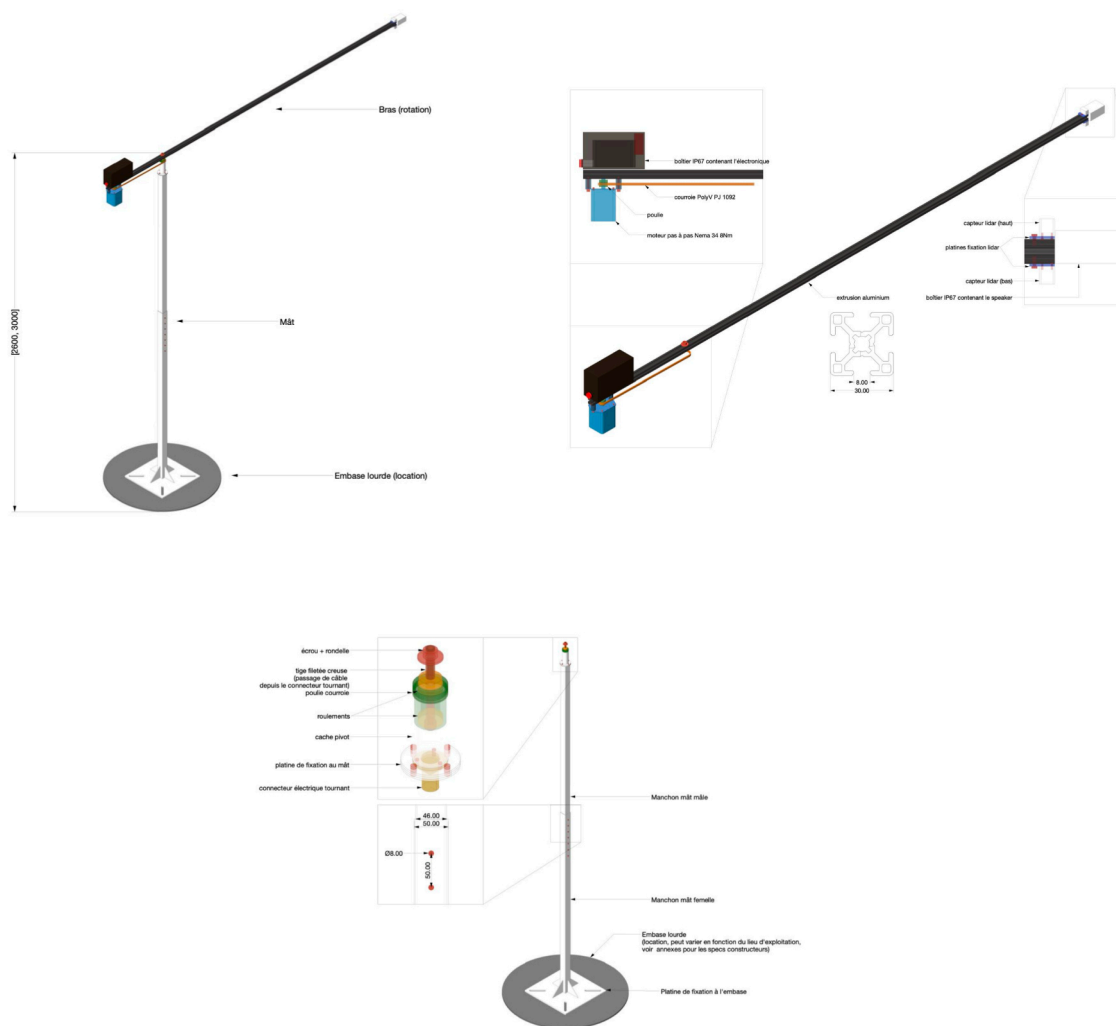
2.2.1. Système de produit à étudier

Far Away est une œuvre composée de 12 mâts en rotation, émettant du son et de la lumière et réagissant à la présence de spectateurs. Elle conçue pour être exposée dans un espace public extérieur (parc, place,...), ce qui implique l'utilisation de composants résistant à l'humidité. De part sa forme, elle a fait l'objet d'une étude visant à confirmer sa stabilité face au vent et à une éventuelle manipulation par du public.

Chaque mât est composé (voir Figure 2) :

- D'un mât en acier, composée d'une partie haute et d'une partie basse assemblée par des vis, ainsi que d'un compartiment contenant des roulements sur lequel est fixé une poulie ;
- Un bras mobile en aluminium relié au moteur, pouvant ainsi pivoter autour de l'axe du mât ;
- d'un boîtier en plastique étanche, situé sur l'arrière du bras et contenant les composants électroniques (cartes ESP32, régulateur de tension,...) permettant de piloter l'ensemble ainsi qu'un voyant LED ;
- D'un moteur, lui aussi situé sur l'arrière du bras et relié à la poulie du mat par une courroie ;
- D'un second boîtier en plastique étanche, situé sur l'avant du bras et contenant des haut-parleurs, auquel est fixé deux capteurs LIDAR permettant l'interaction avec le public ;
- D'un ruban LED permettant d'assurer l'ambiance lumineuse ;

→ D'un troisième boîtier en plastique étanche fixé à la base du mât contenant le système d'alimentation électrique.



[Figure 2 - Schéma technique des mâts]

La base est fixée sur une embase en fonte, fournie par le lieu accueillant l'œuvre. L'œuvre est prévue pour être transportée démontée dans des caisses en bois fabriquées sur mesure ainsi que dans un flight case.

Pour les besoins de cette étude, les composants ont été classés en plusieurs catégories :

- Les composants électroniques : cartes électroniques permettant de piloter et faire fonctionner l'œuvre, haut-parleurs, lumières ;
- Les moteurs et éléments mécaniques : moteurs, courroies, poulies, etc. permettant de mettre en mouvement l'œuvre ;
- Le système d'alimentation électrique : bloc d'alimentation, câbles ;
- Les boîtiers en plastique abritant les différents composants ;
- Les éléments composant la structure : profilés en acier ou aluminium, platines permettant d'accrocher les autres composants ;
- La visserie ;

- Les caisses de transport : flight case, caisses en bois fabriquées sur mesure, visserie utilisés pour la fabrication des caisses.

Ce classement a été fait afin de pouvoir séparer les impacts environnementaux liés aux différentes catégories de composants et mieux comprendre leur poids dans l'impact global. Il était notamment souhaité de pouvoir isoler les impacts liés aux composants électroniques, qui sont spécifiques aux œuvres d'art numérique.

2.2.2. Fonction

Comme mentionné dans l'introduction, il est difficile de définir une fonction à une oeuvre d'art au delà de son existence en tant que telle et de sa monstration à un public. Pour le besoin de cette étude, la fonction retenue est donc simplement : « Être fabriquée et diffusée ».

2.2.3. Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle retenue est : « la fabrication d'un exemplaire de l'oeuvre Far Away, ainsi que de ses caisses de transport et ses pièces de rechange, et sa diffusion pendant 72h dans 5 événements situés en France distants de 500km de son lieu de stockage, avec un retour sur son lieu de stockage à chaque fin de diffusion ».

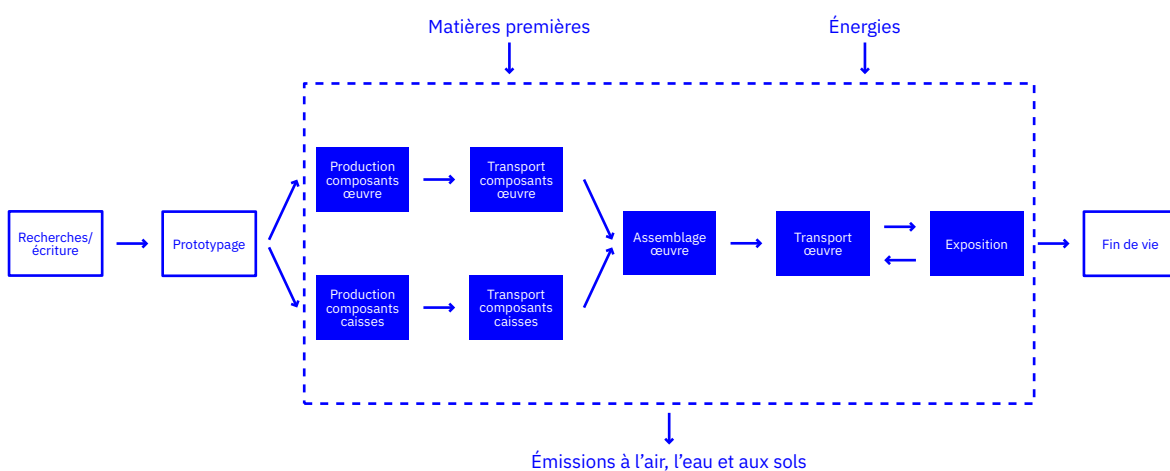
Le nombre de diffusion ainsi que les distances parcourues pour chaque diffusion correspondent à des données moyennes estimées pour ce type d'oeuvre. Leur influence fera l'objet d'analyses de sensibilités présentées au chapitre 5.

2.2.4. Frontières du système

Les frontières du système déterminent les étapes, processus et flux pris en compte dans l'étude d'analyse du cycle de vie. Elles sont schématisées par la Figure 3.

Les étapes prises en compte sont :

- La production des composants, depuis l'extraction des matières premières nécessaires jusqu'à leur transformation (lorsque cela est possible), incluant également les caisses de transport et les composants de rechange ;
- Le transport de ces composants jusqu'au lieu d'assemblage de l'oeuvre ;
- L'assemblage des composants pour fabriquer l'oeuvre ;



[Figure 3 - Frontières du système]

- Le transport de l'oeuvre depuis son lieu de stockage jusqu'à son lieu de diffusion, puis du lieu de diffusion jusqu'à son lieu de stockage une fois la diffusion terminée ;
- Le fonctionnement de l'oeuvre exposée.

L'étape de fin de vie n'est pas prise en compte dans cette étude. En effet, comme présenté dans l'introduction, cette étape n'est pas réellement pensée pour ce type d'oeuvre, ce qui rend compliqué la formulation d'hypothèses basées sur des oeuvres plus anciennes. De plus, l'oeuvre étudiée étant encore amenée à tourner, il n'a pas été possible d'étudier la réalité de sa fin de vie.

Les impacts environnementaux liés à la fabrication des composants ont été entièrement imputés à l'oeuvre, même si leur durée de vie peut dépasser celle (théorique) de l'oeuvre. Ce choix a été fait considérant que ces composants n'avaient pas vocation à être utilisés autrement que pour cette oeuvre, et qu'il n'était pas possible de savoir si certains composants commandés (câbles électriques par exemple) n'avaient pas été utilisés dans leur totalité.

Une réflexion plus générale portant sur la fin de vie des oeuvres numériques et le réemploi de leurs composants dans d'autres projets ou pour d'autres types d'utilisation serait ainsi à mener, mais elle dépasse le champ de cette étude.

Un certain nombre de processus ont été exclus, principalement faute de données disponibles :

- Étape de prototypage de l'oeuvre ;
- Déplacement des artistes ou techniciens impliqués dans la conception, la fabrication (notamment dans le cadre de temps de résidence) et l'installation de l'oeuvre sur le lieu d'exposition ;
- Déplacement du public ayant vu l'oeuvre ;
- Développement des programmes informatiques nécessaires au fonctionnement de l'oeuvre ;
- Emballages utilisés pour le transport des composants ;
- Déchets générés lors de l'assemblage de l'oeuvre (chutes, rebuts, composants ou parties de composants non utilisés,...) ;
- Fabrication et fin de vie des outils utilisés pour l'assemblage de l'oeuvre (seule la consommation d'électricité est prise en compte) ;
- Bâtiments et infrastructures utilisés pour l'assemblage, la diffusion et le stockage de l'oeuvre ;
- Fabrication et distribution des socles en fonte fournis par le lieu accueillant l'oeuvre, étant donné que ce matériel, couramment utilisés dans les salles de concert ou d'exposition, n'était pas directement lié à l'oeuvre.

2.2.5. Règles d'affectation

Aucun processus étudié n'étant multi-fonctionnel, aucune règle d'affectation n'a été utilisée.

2.2.6. Méthodologie d'évaluation des impacts et catégories d'impact sélectionnées

La méthodologie d'évaluation des impacts retenue est celle définie par la Commission Européenne dans le cadre du programme Environmental Footprint¹. Cette méthodologie a été retenue pour deux raisons :

- Le logiciel OpenLCA, utilisé pour cette étude, recommande fortement l'utilisation lorsque la base de données Environmental Footprint est utilisée, pour des raisons de compatibilité des données, et donc de bon fonctionnement du logiciel ;

¹ Le programme Environmental Footprint est un programme de la Commission Européenne développant une méthode d'analyse de cycle de vie de produits (PEF - Product Environmental Footprint) et une base de données compatible avec cette méthode [30]

- Cette méthodologie d'évaluation des impacts rassemble des facteurs de caractérisation largement utilisés dans les analyses du cycle de vie de produits électroniques ou de services numériques, elle est notamment obligatoire pour les évaluations environnementales du programme PEP Ecopasseport² ou de l'ADEME dans le cadre de sa Base Impacts³. Son utilisation est donc cohérente avec la typologie de composants présents dans une œuvre d'art numérique, en lien notamment avec l'accent mis sur les impacts potentiels des composants électroniques.

Cette méthodologie liste 16 catégories d'impact servant à évaluer les impacts potentiels du système de produit étudié :

- Changement climatique (kg CO₂ eq.) ;
- Destruction de la couche d'ozone (kg CFC-11 eq.) ;
- Toxicité humaine – Cancer (CTUh) ;
- Toxicité humaine - Non cancer (CTUh) ;
- Particules fines (cas de maladies) ;
- Radiations ionisantes (kg U235 eq.) ;
- Création d'ozone photochimique (kg NMVOC eq.) ;
- Acidification (mol H+ eq.) ;
- Eutrophisation - Terrestre (mol N eq.) ;
- Eutrophisation - Eau douce (kg P eq.) ;
- Eutrophisation - Eau de mer (kg N eq.) ;
- Ecotoxicité - Eau douce (CTUe) ;
- Impacts liés à l'occupation des sols (sans unité) ;
- Utilisation de l'eau (m³ eq.) ;
- Consommation des ressources abiotiques – Eléments (kg Sb eq.) ;
- Consommation des ressources abiotiques – Fossiles (MJ).

Une présentation de ces catégories d'impact est disponible en Annexe B.

Pour les besoins de cette étude, six catégories d'impact ont été sélectionnées et seront utilisées pour présenter les résultats :

- Changement climatique (kg CO₂ eq.) ;
- Particules fines (cas de maladies) ;
- Radiations ionisantes (kg U235 eq.) ;
- Acidification (mol H+ eq.) ;
- Ecotoxicité - Eau douce (CTUe) ;
- Consommation des ressources abiotiques – Eléments (kg Sb eq.) ;

Ce choix s'est fait principalement parce que certaines données étaient issues d'un extrait de la base de données NegaOctet (voir point 3.1) qui ne donnait accès qu'à un nombre limité de catégories d'impact. Par souci de cohérence, il a donc été choisi d'utiliser les mêmes catégories d'impacts. La catégorie « Utilisation de l'eau », bien que présente dans les catégories fournies par NegaOctet et pertinente au regard de l'objet de cette étude n'a pas été sélectionnée en raison d'incohérences de résultats. Ces incohérences semblent provenir de l'intégration de la base de données Environmental Footprint dans le logiciel OpenLCA.

¹ Le programme PEP Ecopasseport est une démarche de déclaration environnementale portant sur les équipements électriques, électroniques et de génie climatique. Il s'appuie sur la méthode de analyse du cycle de vie pour rédiger des Profils Environnementaux de Produits (PEP) [31]

² La Base Impacts développée par l'ADEME est une base de donnée rassemblant des inventaires de cycle de vie utilisés pour l'affichage environnemental de produits de grande consommation [32]

Changement climatique

Les gaz à effet de serre (par exemple le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), ou le protoxyde d'azote (N₂O)) absorbent le rayonnement infrarouge réémis par la surface de la Terre frappée par le rayonnement solaire. Cette absorption permet une température sur Terre nécessaire à la vie. Mais l'augmentation de leur concentration dans l'atmosphère, d'origine anthropique, induit un déséquilibre global ayant pour conséquence une augmentation anormale dans sa rapidité et son amplitude de la température moyenne sur Terre, contribuant au changement climatique.

Cette catégorie d'impact mesure donc les effets potentiels du système de produit sur sa contribution à l'effet de serre et donc au changement climatique. Elle s'exprime en équivalent CO₂ en masse (kg CO₂ eq.), c'est-à-dire que la masse de gaz contribuant à l'effet de serre est ramenée à l'impact que produirait une masse équivalente de CO₂.

Particules fines

Les particules fines sont des particules en suspension dans l'atmosphère. Elles sont généralement émises par la combustion de matières (bois, combustibles fossiles, etc). Leur petite taille (quelques micromètres) leur permet de pénétrer dans le système respiratoire, d'où elles peuvent provoquer différentes maladies, dont des cancers. Leur impact s'exprime en cas de maladie.

Radiations ionisantes

Cette catégorie d'impact modélise les émissions d'éléments radioactifs dans l'environnement. Ces éléments radioactifs proviennent d'industries utilisant des produits radioactifs, par exemple la production d'électricité à partir d'énergie nucléaire.

L'impact lié à cette catégorie s'exprime en équivalent uranium 235 en masse (kg U235 eq.).

Acidification

Les émissions de certaines substances, notamment les sulfates, les nitrates ou les phosphates, peuvent modifier l'acidité des sols ou de l'eau, engendrant des conséquences sur le développement de la végétation et la qualité des écosystèmes.

L'impact lié à l'acidification se mesure en équivalent mole d'ions hydrogène (mol H⁺ eq.).

Ecotoxicité - eau douce

L'indicateur d'exotoxicité de l'eau douce représente l'impact potentiel en terme d'écotoxicité d'un produit sur les écosystèmes aquatiques.

Il est mesuré en CTUe (Comparative Toxic Unit).

Consommation des ressources abiotiques - Éléments

La consommation de ressources abiotiques correspond à la consommation de ressources naturelles considérées comme « non vivantes ». Elle se divise en deux sous-catégories : la consommation de métaux et de minerais extraits de l'environnement (éléments) et celle de ressources fossiles. Seule la première sous-catégorie est prise en compte dans cette étude. Elle modélise donc l'épuisement de ressources métalliques non renouvelables. Les effets de leur consommation sont estimés à partir des stocks disponibles à l'échelle mondiale.

L'impact lié à cette catégorie s'exprime en équivalent antimoine en masse (kg Sb eq.).

2.2.7. Exigences de qualité des données

Les données utilisées pour la modélisation de l'œuvre doivent être aussi précises, complètes, cohérentes et représentatives que possible, dans la limite de leur disponibilité. Compte tenu de l'aspect parcellaire des données disponibles (voir point 3.1.), et des moyens disponibles pour cette étude, les exigences concernant la qualité des données sont relativement limitées. Elles doivent néanmoins couvrir les points suivants :

- **Représentativité technologique** : les données utilisées doivent être le plus représentatives possible des processus mis en œuvre dans les différentes étapes du cycle de vie de l'œuvre étudiée. Dans le cas où des données seraient manquantes, ou incomplètes, il peut être envisagé d'utiliser des données proches mais pas exactement représentatives, ou d'exclure certains processus de la modélisation.
- **Représentativité géographique** : cette étude s'efforcera autant que possible d'utiliser des données représentatives des zones géographiques dans lesquelles se déroulent les processus étudiés. Dans le cas où cela ne serait pas possible, la représentativité technologique sera priorisée et pourra conduire à utiliser des données situées dans des zones géographiques différentes.
- **Représentativité temporelle** : la validité des données utilisées ne devra pas être antérieure à 4 années au moment de la date de publication de cette étude, soit 2018.
- **Complétude** : dans la mesure du possible, tous processus étudiés devront être pris en compte. Si cela s'avère impossible pour cause de manque de données, cela devra être précisé et expliqué.
- **Cohérence** : afin d'éviter les écarts de résultat dus à des choix de modélisation et à l'utilisation de données provenant de sources disparates, l'utilisation d'une seule source de données sera privilégiée. D'autres sources pourront être ponctuellement utilisées, mais de manière limitée. Une méthodologie identique sera appliquée à tous les processus étudiés.

Une évaluation de la qualité des données au regard de ces exigences est présentée au point 5.3.

2.2.8. Outils de modélisation

L'étude a été réalisée à l'aide du logiciel OpenLCA v1.10.3¹.

La compilation des résultats, notamment le regroupement en certaines catégories (composants électroniques, de structure, etc) a été réalisé à l'aide du logiciel Numbers.

¹ OpenLCA est un logiciel gratuit et open source dédié à l'analyse du cycle de vie développé et distribué par l'entreprise allemande Green Delta [33]

3. Inventaire du cycle de vie

3.1. Sources des données

Le studio Chevalvert a fourni une liste détaillée des différents composants de l'œuvre Far Away. Cette liste comprenait :

- Le nom des composants ;
- Leurs quantités (pour la plupart des composants) ;
- Un lien renvoyant à la fiche produit du composant lorsqu'il avait été acheté en ligne, ou le nom du fournisseur du composant (pour la plupart des composants) ;
- Des informations sur leurs caractéristiques techniques.

La liste détaillée fournie est présentée dans la nomenclature présentée au point 3.2.

Certaines informations étaient manquantes et ont dû être estimées. Les liens renvoyant vers une fiche produit du composant sur le site de son fournisseur n'étaient également pas systématiquement disponibles, dans certains cas seul le nom du fournisseur était fourni. Des schémas techniques fournis ont par ailleurs été utilisés pour calculer les dimensions de certains composants (goussets, mâts en acier,...).

Des informations sur le temps nécessaire à la réalisation de certaines étapes d'assemblage (soudure des composants électroniques par exemple) étaient également fournies, permettant d'estimer la quantité d'électricité nécessaire à leur réalisation.

La collecte de données s'est donc avérée particulièrement complexe. Si ce point est souvent considéré comme long et difficile dans la réalisation d'ACV, cette difficulté a été renforcée dans le cas présent par le fait que les composants ont pour la plupart été achetés « sur étagère » auprès de fournisseurs en ligne via des plateformes de vente grand public (Amazon, Aliexpress) ou spécialisées (RS Online, Prolians...). Il n'a donc pas été possible de collecter des informations auprès de ces fournisseurs, qui sont en général des revendeurs sans connaissances des impacts environnementaux de leurs produits. Les seules informations disponibles étaient donc celles fournies par les fiches produit disponibles sur les sites de vente en ligne.

Certains composants ont été commandés sur mesure auprès d'entreprises spécialisées, comme pour les bras en aluminium ou les pièces fabriquées par découpe laser ou tournage. S'il pouvait être envisagé que ces fournisseurs disposent de données ou d'informations précises sur les processus mis en œuvre ou la composition exacte des composants, le manque d'informations sur la commande qui leur a été passée (date, personne en charge de la commande, etc) n'a pas rendu possible la mise en place d'un dialogue avec eux.

Ce cas est typique de projets artistiques dans lesquels les composants sont achetés dans le commerce à l'unité ou presque, sans relation client-fournisseur sur la durée permettant d'envisager de récupérer des données précises sur les processus impliqués et leurs impacts environnementaux.

L'absence de données primaires, c'est-à-dire issues de mesures liées aux processus effectivement mis en œuvre, a donc imposé de faire de nombreuses hypothèses, que ce soit sur les composants en tant que tels quand les informations étaient manquantes dans les fiches produit (matériaux, parfois dimensions), sur les processus qui ont permis de les fabriquer, ou sur leur transport. De plus, il n'était pas possible d'avoir un accès direct à l'œuvre ou à ses composants, ce qui n'a pas rendu possible la réalisation de mesures de masse ou de dimensions directement sur les composants.

Les différentes étapes du cycle de vie (production et transport des composants, assemblage, diffusion) ont été modélisées en utilisant des données secondaires disponibles dans la base de données Environmental Footprint 2.0 (EF)¹ fournie par la JRC-EC en s'appuyant sur la nomenclature fournie. Cette base de données n'étant néanmoins pas exhaustive, certains processus impliqués n'ont pas pu être pris en compte - c'est le cas

par exemple du tournage ayant permis de réaliser certains composants en acier. Quelques données issues d'un extrait de la base de données NegaOctet² ont également été utilisées. À noter que les données provenant de la base de données NegaOctet correspondait à des indicateurs d'impact, elles ont donc été ajoutées directement au résultat issu de la modélisation par le logiciel OpenLCA.

Ce manque d'information a nécessité un important travail de recherche et l'utilisation de nombreuses hypothèses, détaillées dans les points suivants.

3.2. Nomenclature

CATÉGORIE	COMPOSANT	QUANTITÉ	INFORMATIONS FOURNISSEUR	PRÉCISIONS TECHNIQUES
Électronique	PCB	16	Non	-
	ESP 32	16	Oui	ESP32 (30pin - CH9102X)
	LIDAR	25	Oui	LIDAR TF Mini Plus (IP65)
	Haut-parleurs	13	Oui	HP 3W 4OHMS
	Régulateur 48V - 5V	14	Oui	-
	Ruban LED	9	Oui	SK6812 RGBNW 5m 60leds/m IP67
	Voyant LED	12	Oui	RED LED
	Câble ethernet	1	Oui	Longueur 50m
	Résistance 1k	-	Oui	-
	Transistor 2N2222	-	Non	-
Moteurs et composants mécaniques	Moteur pas à pas	12	Oui	Nema 34 8Nm
	Driver moteur	12	Oui	Driver DM860I
	Roulement à bille	36	Non	Roulement à bille contact oblique etanche 7201
	Courroie	13	Non	Courroie PolyV PJ 1092
	Poulie pivot	16	Oui	Réalisé par tournage
	Poulie moteur	12	Oui	Réalisé par tournage
	Axe pivot	12	Oui	Réalisé par tournage
	Entretoise moteur	24	Oui	Réalisé par tournage
Joint Spi	16	Non	-	
Alimentation électrique	Alimentation DC 48V	12	Oui	Alimentation DC 48V
	Rallonge électrique 1m	12	Oui	Rallonge 1m 3G1,5 / 16A / male-femelle

¹ La base de données EF, développée dans le cadre du programme Environmental Footprint [30], rassemble des données secondaires d'inventaire et a originellement vocation à être utilisée dans le cadre de démarches utilisant la méthode PEF. Les données mises à disposition ont été compilées par l'équipe d'OpenLCA pour pouvoir être utilisées dans ce logiciel [34]

² Le consortium NegaOctet a développé une base de données spécialisée dans les technologies numériques [12]

CATÉGORIE	COMPOSANT	QUANTITÉ	INFORMATIONS FOURNISSEUR	PRÉCISIONS TECHNIQUES
Alimentation électrique (suite)	Câble 2x2.5mm ² gainé	1	Non	Bobine de 50m
	Câble 2x2.5mm ²	1	Oui	Bobine de 100m
	Connecteurs tournants	12	Oui	Connecteur tournant 2CH 30A Ø22
Boitiers	Boîtier avant	13	Oui	RS PRO 85 x 56 x 40
	Boîtier arrière	12	Oui	MB4 Multicomp Pro
	Boîtier sol	13	Oui	RS PRO 160x260x90
	Presses étoupe	5	Oui	Presses étoupe pour in220 - out220 (3G1,5 Ø9mm) - PG13.5
Structure	Profilé aluminium (bras)	12	Oui	Profilé 30 B-Type rainure 8 longueur (avec taraudage)
	Embout de protection	24	Oui	-
	Cache rainure	12	Oui	-
	Profilé acier (mat bas)	4	Oui	Tube Carré 50x50x2 longueur 6m
	Profilé acier (mat haut)	4	Oui	Tube Carré 45x45x2 longueur 6m
	Profilé acier (compartiment roulement)	13	Oui	Tube acier sans soudure 45 ep 2mm
	Platine moteur	16	Oui	Réalisé par découpe laser
	Platine jonction pivot	16	Oui	Réalisé par découpe laser, 3pièces
	Platine embase du mat	16	Oui	Réalisé par découpe laser, dimension
	Goussets	64	Oui	Réalisé par découpe laser
	Platine capteur LIDAR	32	Oui	PMMA noir ép 3mm
	Visserie	Ecrou KM1	50	Non
Rondelle pour écrou KM1		25	Non	-
Vis fixation LIDAR		50	Oui	M2 6mm
Vis fixation Haut-parleurs		50	Oui	M2 10mm (noir)
Ecrou M2		50	Oui	-
Vis fixation platine		50	Oui	M4 12mm (noir)
Vis fixation boîte avant		50	Oui	M8 16mm
Vis fixation boîte arrière		50	Oui	M4 25mm
Ecrou M4		50	Oui	tête marteau
Ecrou M8		50	Oui	tête marteau
Caisses transport	Flight case	1	Oui	-
	Roues	3	Oui	-
	Poignées	12	Oui	-
	Panneaux contre -plaqué	7	Oui	CP peuplier 2520 x 1850 ép 15mm
	Tasseau raboté	19	Oui	27x60 L4,8m
	Bois habillage intérieur	1	Non	-
	Visserie	1	Oui	-

[Tableau 1 - Nomenclature fournie par Chevalvert]

Les quantités en rouges dans le Tableau 1 ont été estimées.

3.3. Bilan massique

À partir des informations fournies, il a été possible d'estimer un bilan massique de l'œuvre et de ses caisses de transport. La masse des différentes catégories de composants est détaillée dans le Tableau 2 ci-dessous.

CATÉGORIE	MASSE TOTALE (kg)	% MASSE ŒUVRE (hors caisses)	% MASSE ŒUVRE (avec caisses)
Électronique	9,090	2,95 %	1,47 %
Moteurs et composants mécaniques	53,954	17,48 %	8,75 %
Alimentation électrique	28,776	9,32 %	4,66 %
Boîtiers	14,411	4,67 %	2,34 %
Structure	198,650	64,37 %	32,20 %
Visserie	3,750	1,22 %	0,61 %
TOTAL (hors caisses)	308,631	100,00 %	50,03 %
Caisses transport (vides)	308,287	-	49,97 %
TOTAL (avec caisses)	616,917	-	100,00 %

[Tableau 2 - Bilan massique par catégorie]

Les informations sur la masse des différents composants n'étaient pas systématiquement disponibles dans les fiches produits accessibles via les liens fournis. Dans ce cas, la masse a été définie soit :

- Par calcul, quand les dimensions et les matériaux du composants étaient connus ;
- En utilisant la masse de composants similaires vendus par d'autres fournisseurs qui précisaient ce type d'information dans leur fiche produit ;
- En estimant la masse en se basant sur l'expérience quand aucune information précise n'était connue.

Un tableau présentant les masses de chaque composants de manière détaillée est disponible en Annexe C.

3.4. Données d'inventaire du cycle de vie et hypothèses

Cette partie présente les données et hypothèses utilisées pour modéliser les différents processus impliqués dans le cycle de vie de l'œuvre, réparties part étapes du cycle de vie et par catégories de composants. Une présentation détaillée des processus issus des bases de données EF et NegaOctet utilisés pour la modélisation des différentes étapes du cycle de vie est disponible en Annexe D.

3.4.1. Production des composants

3.4.1.1. Électronique

Cartes PCB

Description : Le type de carte PCB, ses dimensions, les composants électroniques montés, ainsi que le lieu d'origine de fabrication n'était pas connus.

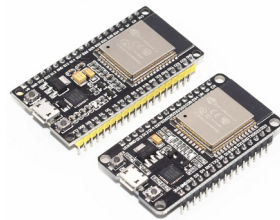
Hypothèses : Il est supposé qu'elles servent à relier et coordonner les différents composants électroniques de l'œuvre. Il a été fait l'hypothèse qu'elles avaient été complétées par les résistances et transistors listés dans la liste des composants fournie, et qu'elles pouvaient donc être assimilées à des cartes assemblées. Ainsi, les impacts liés à la production des résistances et transistors (voir ci-dessous) n'a pas été pris en compte. Les dimensions exactes de ces cartes n'étant pas connues, il a été supposé que leur dimension était identique à celle de la carte ESP 32, soit environ $2,1575E-02 \text{ m}^2$.

Remarque : Ces cartes PCB ne comportent en théorie pas de micro-processeurs, contrairement au processus issu de la base de données EF utilisé. Il est donc probable que leurs impacts soient sur-évalués, mais cela a été jugé négligeable au vu de leur contribution au résultat final.

ESP 32

Description : Les cartes ESP 32 servent au contrôle des différents éléments de l'œuvre. Elles embarquent le programme informatique nécessaire à son bon fonctionnement. Elles ont été achetées auprès d'un fournisseur chinois via la plateforme Aliexpress.

Hypothèses : Leur superficie a été calculée à partir des informations trouvées en ligne auprès d'un fournisseur distribuant le même modèle que celui utilisé.



[Figure 4 - Carte ESP 32]

Capteurs LIDAR

Description : Les capteurs LIDAR servent à repérer la présence du public. Ils ont été achetés auprès d'un fournisseur chinois via la plateforme Gotronic. Ils ont été décomposés en deux sous ensembles :

- Une carte électronique ;
- Un boîtier plastique en mélange d'ABS et de polycarbonate.

Hypothèses : Il a été fait l'hypothèse que la superficie de la carte électronique correspondait à celle de la base du capteur. Il a également été fait l'hypothèse que le boîtier plastique représentait la moitié de la masse totale du composant, et qu'il était composé à 50% d'ABS et à 50% de polycarbonate. Il a été fait l'hypothèse que le boîtier était produit par thermoformage.

Remarques : Le processus de thermoformage correspond à des données européennes, alors que les capteurs



[Figure 5 - Capteur LIDAR TF-MINI-PLUS]

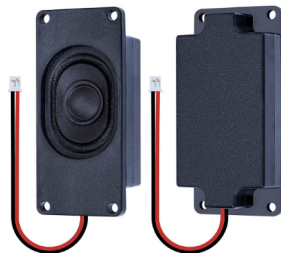
LIDAR ont été fabriqués en Chine. Aucun processus de thermoformage reposant sur des données chinoises ou mondiales n'était disponible dans la base de données EF. Le câble fourni avec le capteur LIDAR n'a pas été pris en compte, faute d'informations sur sa nature.

Haut parleurs

Description : Les haut parleurs, d'une puissance de 3W, permettent de diffuser l'ambiance sonore. Ils ont été acheté en ligne auprès d'un fournisseur chinois, qui ne donnait que peu d'information sur leurs composants ou leur processus de fabrication.

Remarque : Contrairement à la plupart des autres composants, ils ont été modélisés en utilisant des informations issues de la base de données NegaOctet. Il a été en effet particulièrement difficile de trouver des informations précises sur la composition de ce type de haut parleurs, ou sur leurs impacts environnementaux. L'item «Connected speaker» a ainsi été utilisé, en ne prenant en compte que les impacts liés à sa fabrication, bien que ce type d'objet comporte d'autres éléments électroniques (micro, carte PCB, etc) que les haut parleurs étudiés. La masse des haut parleurs et de l'item «Connected speaker» étant connues, une allocation à la masse a été appliquée.

Du fait de l'utilisation d'un produit plus complexe et comportant plus d'électronique que le composant étudié, il est possible que les impacts estimés soient légèrement surévalués.



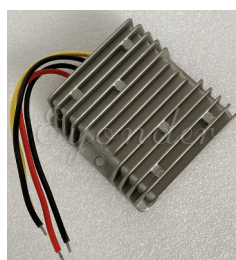
[Figure 6 - Haut parleurs 3 Watt 4 Ohm]

Régulateurs 48V-5V

Description : Les régulateurs permettent de convertir la tension d'entrée de 48V issue des blocs d'alimentation en tension d'une valeur de 5V pour alimenter les composants électroniques. Ils ont été achetés auprès d'un fournisseur chinois via la plateforme Aliexpress. Leur masse et leurs dimensions étaient connues. Ils ont été décomposés en trois sous-ensembles :

- La carte électronique ;
- L'enveloppe protégeant les composants électronique ;
- Quatre fils électriques permettant de les relier aux autres composants.

Hypothèses : Il a été fait l'hypothèse que l'enveloppe était en aluminium. Si la masse globale d'un régulateur était connue, la masse de ses différents sous-ensembles a fait l'objet d'hypothèses. Il a ainsi été supposé que



[Figure 7 - Régulateur 48V-5V]

l'enveloppe en aluminium représentait 90% de cette masse. Les dimensions de la carte électronique a été supposée identique à celle de la base du régulateur. Enfin, la longueur des fils a été approximée, et seule la production du cuivre de ces fils a été prise en compte. Une hypothèse a également été faite sur le processus de fabrication de l'enveloppe, qui a été supposée avoir été réalisée par moulage.

Remarque : Hormis le processus utilisé pour modéliser la carte électronique, les processus représentent des données européennes alors que ce régulateur a été produit en Chine, faute de processus correspondant reposant sur des données chinoises ou mondiales disponible dans la base de données EF.

Rubans LED

Description : Les rubans LED assurent l'ambiance lumineuse de l'œuvre en étant fixés aux bras en aluminium. Ils ont été achetés auprès d'un fournisseur chinois via la plateforme Aliexpress. Le type d'enrobage, la longueur des rubans, leurs dimensions et le nombre de LEDs étaient connus. Ils ont été décomposés en trois sous-ensembles :

- Les LEDs ;
- Le circuit électronique permettant de piloter les LEDs ;
- Un enrobage en silicone permettant de protéger les composants électroniques, notamment de l'humidité.

Hypothèses : La masse n'étant pas connue, elle a été extrapolée depuis un composant similaire vendu par un autre fournisseur. Il a été fait l'hypothèse que le circuit électronique représentait 10% de cette masse.

Remarques : Seule la production du silicone a pu être prise en compte, le processus de vulcanisation n'étant pas disponible dans la base de données EF. Le processus utilisé pour la production du silicone correspond à des données européennes alors que le ruban LED a été produit en Chine. Aucun processus correspondant reposant sur des données chinoises ou mondiales n'était disponible dans la base de données EF. Il a néanmoins été supposé que cela n'avait pas un impact important sur le résultat final. Le processus d'assemblage de ces trois sous-ensemble n'a pas été pris en compte faute de données disponibles. À noter que

Voyants LED

Description : Les voyants LED sont composé d'un corps en plastique surmonté d'un dispositif lumineux composé de LEDs. Leur rôle dans l'oeuvre n'est pas connu avec précision. Ils ont été achetés auprès d'un fournisseur chinois via la plateforme Aliexpress.

Hypothèses : En se basant sur des modèles similaires, il a été fait l'hypothèses que ces dispositifs lumineux comportait 4 LEDs. Seules leurs dimensions étaient connues. Il a été fait l'hypothèse que le corps était en ABS, et qu'il avait été obtenu par un processus de moulage par injection. La masse de ce corps a été déduite en soustrayant la masse des LEDs de la masse totale, en se basant sur celle utilisée dans le processus issu de la base de données EF. Il a également été fait l'hypothèse que le corps était produit via un processus de moulage par injection.



[Figure 8 - Voyants LED]

Remarques : Le processus de moulage par injection correspond à des données européennes, alors que les voyants LED ont été fabriqués en Chine. Aucun processus de moulage par reposant sur des données chinoises ou mondiales n'était disponible dans la base de données EF.

Câble Ethernet

Description : Le câble Ethernet permet la transmission d'information entre les composants électronique, et participe donc à leur pilotage. Il a été acheté auprès d'un fournisseur belge via la plateforme Amazon.

Hypothèses : La masse n'étant pas connue, elle a été extrapolée depuis un composant similaire vendu par un autre fournisseur.

Remarques : Ce câble a été modélisé en utilisant des éléments issus de la base de données NegaOctet. L'item «Cable; Cat6a» a été utilisé pour le câble en tant que tel, et l'item «Connector; RJ45» pour les deux prises RJ45 situées aux extrémités du câble, à chaque fois en ne prenant en compte que les impacts liés à la fabrication.

Résistance 1k et Transistor 2N2222

Description : Aucune information n'était disponible quant à l'utilisation précise de ces éléments électronique. Un lien vers le site du fournisseur des résistances était fourni, mais il n'a pas permis d'obtenir leur masse ou leur lieu de fabrication. Aucune information n'était fournie au sujet des transistors.

Hypothèses : La masse de ces composants a été déduite à partir d'informations obtenues sur les sites de fournisseurs proposant des composants identiques. Il a été fait l'hypothèse que ces composants ont été fabriqués en Chine, et qu'ils ont été montés sur les cartes PCB. Pour tenir compte du fait que le processus utilisé pour modéliser les cartes PCB représentait des cartes montées, donc intégrant a priori des composants du type résistance et transistor, la production des résistances et des transistor n'a pas été prise en compte afin d'éviter un double comptage.

3.4.1.2. Moteurs et éléments mécaniques

Moteurs pas à pas

Description : Les moteurs pas à pas permettent la mise en mouvement du bras en aluminium en le faisant pivoter autour des mâts en acier. Ils sont de type Nema 34, avec un couple de maintien de 8 Nm. Ils ont été achetés en ligne auprès d'une plateforme spécialisée. La fiche produit du fournisseur précisait leurs caractéristiques techniques, leurs dimensions, leur masse ainsi que le fait qu'ils aient été produits en Chine.

Hypothèses : Aucun processus correspondant à la fabrication de ce type de composant n'était disponible dans la base de données EF. Pour modéliser sa production, il a été utilisé une fiche de déclaration environnementale PEP (Profil Environnemental Produit) d'un composant similaire¹. Cette fiche présentait la répartition massiques des différents matériaux utilisés pour la fabrication de moteurs de ce type, ainsi que les impacts environnementaux liés à leurs différentes étapes de cycle de vie. Cependant, la méthodologie d'évaluation des impacts utilisée pour la fiche PEP ainsi que les catégories d'impact disponibles étaient différentes de celle utilisée pour cette étude. Leur utilisation pouvant poser des problèmes de cohérences dans le résultat final, il a été décidé de ne pas les utiliser et de ne se baser que sur les matériaux listés. Cela implique que seule l'étape de production des matériaux est prise en compte, sauf dans le cas de composants complexes (cartes électroniques par exemple) dont la production a pu être prise en compte car des processus correspondant étaient disponibles dans la base de données EF.

¹ Il s'agit d'une fiche PEP Ecopasseport concernant la gamme de moteurs Lexium BDM43 à BDM77 développés par l'entreprise Schneider Electric [35]

La répartition massique des matériaux composant le moteur décrit dans la fiche PEP prenait en compte les matériaux d'emballage, ce qui n'est pas le cas de cette étude. Une nouvelle répartition a donc été calculée en ne prenant en compte cette fois que les matériaux utilisés dans la fabrication du moteur. Chaque matériau utilisé a ensuite été ramené à la masse du moteur Nema 34 étudié. Le Tableau 3 ci-dessous présente les matériaux listés dans la fiche PEP et les masses prises en compte pour la modélisation.

MATÉRIAUX	RÉPARTITION MASSIQUE MOTEUR PEP (%) (avec emballage)	RÉPARTITION MASSIQUE MOTEUR PEP (%) (hors emballage)	MASSE MATÉRIAU POUR NEMA 34 (kg)
Acier	40,3 %	49,9 %	1,747
Acier inoxydable	0,3 %	0,4 %	0,013
Laiton	0,5 %	0,6 %	0,022
Cuivre	0,2 %	0,2 %	0,009
Aluminium	7,2 %	8,9 %	0,312
Polyamide (PA)	0,1 %	0,1 %	0,004
Polyéthylène Terephthalate (PET)	1,6 %	2 %	0,069
Cartes électroniques	0,7 %	0,9 %	0,030
Câbles et connecteurs	25,4 %	31,5 %	1,101
Colle	0,3 %	0,4 %	Non pris en compte (absent base de données EF)
Alliages non ferreux	4,2 %	5,2 %	Non pris en compte (informations insuffisantes)
Carton (emballage)	15,9 %	Non pris en compte	Non pris en compte
Papier (emballage)	1,0 %	Non pris en compte	Non pris en compte
Film Polyéthylène (emballage)	2,4 %	Non pris en compte	Non pris en compte

[Tableau 3 - Matériaux utilisés pour modéliser un moteur pas à pas]

Comme le montre ce tableau, certains matériaux n'ont pas pu être pris en compte faute de processus correspondants dans la base de données EF. Lorsque cela n'était pas précisé, des hypothèses ont été faites sur le type précis et le processus de production de certains matériaux (par exemple, il a été supposé que l'acier utilisé était laminé à froid).

Le processus correspondant à la production de cartes électroniques de la base de données EF utilise pour unité une superficie (des m²), sans proposer de correspondance entre la surface et la masse. Il a donc été fait l'hypothèse qu'une carte électronique d'une superficie correspondant à celle de la base du moteur, soit 86x86mm².

Il a été fait l'hypothèse que les câbles utilisés étaient de type 3 fils. Le processus correspondant de la base de données EF utilise pour unité une longueur (des m), mais propose une masse linéaire qui a été utilisée pour en déduire la longueur de câble totale. Étant donné l'absence d'informations plus précises de la catégorie « câbles et connecteurs » de la fiche PEP, il a été fait l'hypothèse que l'entièreté de la masse de cette catégorie pouvait être imputée aux câbles.

Remarques : Le type de moteur décrit dans la fiche PEP ne présente pas tout à fait les mêmes caractéristiques techniques que celui analysé dans cette étude. Il a néanmoins décidé de s'appuyer tout de même sur cette fiche, faute de meilleure option.

La production des moteurs en tant que telle, c'est-à-dire les processus de transformation des matériaux et d'assemblage, n'a pas pu être pris en compte faute de données disponibles, hormis pour certains composants comme les cartes électroniques.

Certains processus utilisés correspondent à des données européennes, alors que les moteurs ont été produits

en Chine, faute d'alternative disponible dans la base de données EF.

Les informations fournies par la fiche PEP concernant le pourcentage de la masse alloué aux câbles et connecteurs conduit à estimer la longueur totale de câble utilisée pour un moteur à environ 18m, ce qui paraît difficilement cohérent. Comme précisé dans les hypothèses, ce résultat est obtenu en partant de l'hypothèse que la totalité de cette masse correspond aux câbles, fautes de données plus précises, et que la masse linéaire de ces câbles est identique à celle utilisée pour le processus de la base de données EF (60g/m). Il est donc probable qu'un certain nombre d'éléments entrant dans cette catégorie ne sont pas des câbles, mais il n'est pas possible de savoir avec précision à quoi ils correspondent. Cette approximation a donc été conservée, faute de meilleure option.

Drivers

Description : Les drivers permettent le pilotage des moteurs. Ils ont été achetés en ligne auprès d'une plateforme spécialisée. La fiche produit du fournisseur précisait leurs caractéristiques techniques, leurs dimensions, leur masse ainsi que le fait qu'ils aient été produits en Chine.

Hypothèses : Aucun processus correspondant à la fabrication de ce type de composant n'était disponible dans la base de données EF. Comme pour les moteurs, une fiche de déclaration environnementale PEP (Profil Environnemental Produit) d'un composant similaire¹ a été utilisé pour modéliser sa production. Là encore, il a été décidé de ne pas utiliser les informations sur les impacts environnementaux de ce produit fournies par la fiche PEP et de ne se baser que sur les matériaux listés. Cela implique que seule l'étape de production des matériaux est prise en compte, sauf dans le cas de composants complexes (cartes électroniques par exemple) dont la production a pu être prise en compte car des processus correspondant étaient disponibles dans la base de données EF.

Comme pour les moteurs, les matériaux utilisés pour l'emballage, inclus dans la fiche PEP, n'ont pas été pris en compte. Une nouvelle répartition a donc été calculée en ne prenant en compte cette fois que les matériaux utilisés dans la fabrication du moteur. Chaque matériau utilisé a ensuite été ramené à la masse du driver étudié. Le Tableau 4 ci-dessous présente les matériaux listés dans la fiche PEP et les masses prises en compte pour la modélisation.

Certains matériaux n'ont pas pu être pris en compte faute de processus correspondants dans la base de données EF. Lorsque cela n'était pas précisé, des hypothèses ont été faites sur le type précis et le processus de production de certains matériaux (par exemple, il a été supposé que l'acier utilisé était laminé à froid). Le processus correspondant à la production de cartes électroniques de la base de données EF utilise pour unité une superficie (des m²), sans proposer de correspondance entre la surface et la masse. Il a donc été fait l'hypothèse qu'une carte électronique d'une superficie correspondant à celle de la base du driver, soit 95,5x86mm².

Il a été fait l'hypothèse que les câbles utilisés étaient de type 3 fils. Le processus correspondant de la base de données EF utilise pour unité une longueur (des m), mais propose une masse linéaire qui a été utilisée pour en déduire la longueur de câble totale. Étant donné l'absence d'informations plus précises de la catégorie « câbles et connecteurs » de la fiche PEP, il a été fait l'hypothèse que l'entièreté de la masse de cette catégorie pouvait être imputée aux câbles.

Remarques : Le type de driver décrit dans la fiche PEP ne présente pas tout à fait les mêmes caractéristiques techniques que celui analysé dans cette étude. Il a néanmoins décidé de s'appuyer tout de même sur cette fiche, faute de meilleure option.

La production des drivers en tant que telle, c'est-à-dire les processus de transformation des matériaux et d'assemblage, n'a pas pu être pris en compte faute de données disponibles, hormis pour certains composants comme les cartes électroniques.

Certains processus utilisés correspondent à des données européennes, alors que les drivers ont été produits en

¹ Il s'agit d'une fiche PEP concernant la gamme de drivers Lexium SD3 développés par l'entreprise Schneider Electric [36]

MATÉRIAUX	RÉPARTITION MASSIQUE DRIVER PEP (%) (avec emballage)	RÉPARTITION MASSIQUE DRIVER PEP (%) (hors emballage)	MASSE MATÉRIAU POUR DRIVER (kg)
Aluminium	33,8 %	38,8 %	0,213
Acier	8,6 %	9,9 %	0,054
Cuivre	10 %	11,5 %	0,063
Zinc	10 %	11,5 %	0,063
Polyacetal (POM)	10 %	11,5 %	Non pris en compte (absent base de données EF)
Polyamide (PA)	0,3 %	0,3 %	0,002
Polycarbonate (PC)	12,3 %	14,1 %	0,078
Câbles et connecteurs	1,9 %	2,2 %	0,012
Cartes électroniques	29,2 %	33,5 %	0,184
Carton (emballage)	12,8 %	Non pris en compte	Non pris en compte
Papier (emballage)	90 %	Non pris en compte	Non pris en compte
PE polyethylene (emballage)	0,04 %	Non pris en compte	Non pris en compte

[Tableau 4 - Matériaux utilisés pour modéliser un driver]

Chine, faute d'alternative disponible dans la base de données EF.

Les informations fournies par le fiche PEP concernant le pourcentage de la masse alloué aux câbles et connecteurs conduit à estimer la longueur totale de câble utilisée pour un moteur à environ 0,2 cm, ce qui paraît trop faible. Le type de câble utilisé dans le driver de la fiche PEP doit donc être différent de celui utilisé pour la modélisation, mais cette approximation a été conservée faute de meilleure option.

Roulements à billes

Description : Les roulements à billes permettent la rotation des bras en aluminium autour des mâts. Aucune information concernant le fournisseur choisi n'était disponible. Il en ont été décomposés en deux sous-ensemble :

- La cage et les billes en acier inoxydable ;
- La paroi en nylon.

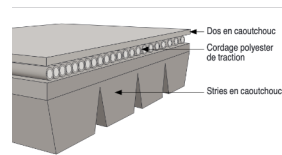
Hypothèses : Il a été fait l'hypothèse que les éléments en acier représentaient 80% de la masse totale d'un roulement, et que la paroi en nylon représentait 20% de cette masse. Leur masse n'étant pas connue, elle a été extrapolée depuis un composant similaire vendu en ligne.

Remarque : Le processus de fabrication du roulement en tant que tel n'a pas été pris en compte faute de données disponibles.

Courroies

Description : Les courroies permettent la transmission du mouvement mécanique du moteur vers les bras en aluminium. Elles correspondent au modèle Poly V PJ 1092. Aucune information n'était disponible sur leur fournisseur ou leurs caractéristiques. Une courroie Poly V est composée de nervures et d'un enrobage en caoutchouc synthétique, et d'une armature en polyester.

Hypothèses : Leur masse n'étant pas connue, elle a été extrapolée depuis un composant similaire vendu en ligne. Il a été fait l'hypothèse que le caoutchouc représentait 90% de la masse totale de la courroie, et le polyester 10%, et que le caoutchouc était du type Styrene-butadiene.



[Figure 10 - Schéma d'une courroie Poly V]

Remarques : Seul le processus de transformation par moulage du caoutchouc a été pris en compte, le processus de transformation du polyester a été exclu faute de données correspondantes dans la base de données utilisée. Le processus utilisé pour modéliser la production de polyester correspond à la production de résine de polyester, qui a priori ne correspond pas tout à fait au type de polyester utilisé dans une courroie. Il a néanmoins été décidé d'utiliser ce processus par défaut d'une meilleure option. À noter également que les processus de production du caoutchouc et du polyester sont basés sur une moyenne mondiale hors Europe, tandis que le moulage du caoutchouc est basé sur une moyenne européenne. Cela correspond à l'hypothèse selon laquelle la matière première serait produite hors Europe mais la courroie serait fabriquée en Europe, ce qui semble être une hypothèse réaliste.

Joint Spi

Description : Les joints Spi assurent l'étanchéité au niveau de l'axe de rotation. Ils sont composés d'une armature et d'un ressort en métal, ainsi que d'un corps en caoutchouc permettant d'assurer l'étanchéité. Aucune information sur les joints Spi acheté pour cette œuvre n'était disponible. La masse

Hypothèses : Leur masse n'étant pas connue, elle a été extrapolée depuis un composant similaire vendu en ligne. Il a été fait l'hypothèse que le caoutchouc représentait 90% de cette masse, et les éléments métalliques 10%. Il a également été supposé que le métal était de l'acier, et que le caoutchouc était du type Styrene-butadiène. Enfin, il est supposé que ce composant a été produit en Chine.

Remarques : Il n'a pas été possible de prendre en compte la fabrication du joint en tant que tel faute de données disponibles. Seule le processus de moulage du caoutchouc a été pris en compte, en plus des processus de fabrication des matières premières. Il n'a pas été non plus possible d'utiliser des données hors Europe pour le processus de moulage du caoutchouc faute de processus disponibles dans la base de données EF.

Poulie pivot, poulie moteur, axe pivot, entretoise moteur

Description : Ces différents composants permettent de relier le bras au mat via la courroie et d'ainsi faire pivoter le bras autour du mat. Ils sont en acier, et ont été fabriqués par tournage. Ils ont été achetés auprès de deux entreprises spécialisées dans la réalisation de pièces en acier sur mesure. Seules les dimensions de certains de ces composants étaient connues. Le type d'acier utilisé n'était pas précisé.

Hypothèses : Les dimensions de certains de ces composants n'étant pas connues, des hypothèses ont été faites en se basant sur les plans de l'œuvre fournis. Il a été possible d'en déduire leur masse en utilisant la masse volumique de l'acier (7800 kg/m^3). Le fait que l'acier soit laminé à chaud ou à froid n'étant pas connu, il a été fait l'hypothèse qu'il s'agissait d'un laminage à froid. Il a été supposé que cet acier provenait de Chine, cette hypothèse fera l'objet d'une analyse de sensibilité présentée au point 5.2.1.

Remarque : Le processus de tournage, absent de la base de données EF, n'a pas été pris en compte. Seule la production de l'acier a pu l'être.

3.4.1.3. Alimentation électrique

Alimentation DC 48V

Description : L'alimentation permet de fournir les composants électriques et électroniques de l'oeuvre en électricité à la bonne tension. Les bloc d'alimentation utilisés fournissent une puissance nominale de 400W, une tension de sortie de 48V et un ampérage de sortie de 8,3A. Ils ont été achetés en ligne auprès d'une plateforme spécialisée. La fiche produit du fournisseur précisait leurs caractéristiques techniques, leurs dimensions, ainsi que leur masse.

Hypothèses : Aucun processus correspondant à la fabrication de ce type de composant n'était disponible dans la base de données EF. Comme pour les moteurs pas à pas, il a été utilisé une fiche de déclaration environnementale PEP (Profil Environnemental Produit) d'un composant similaire¹ pour modéliser sa production. Cette fiche présentait la répartition massique des différents matériaux utilisés pour la fabrication d'un bloc d'alimentation, ainsi que les impacts environnementaux liés à leurs différentes étapes de cycle de vie. Cependant, la méthodologie d'évaluation des impacts utilisée pour la fiche PEP ainsi que les catégories d'impact disponibles étaient différentes de celle utilisée pour cette étude. Leur utilisation pouvant poser des problèmes de cohérences dans le résultat final, il a été décidé de ne pas les utiliser et de ne se baser que sur les matériaux listés. Cela implique que seule l'étape de production des matériaux a pu être prise en compte. La répartition massique des matériaux composant le bloc d'alimentation décrit dans la fiche PEP prenait en compte les matériaux d'emballage, ce qui n'est pas le cas de cette étude. Une nouvelle répartition a donc été calculée en ne prenant en compte cette fois que les matériaux utilisés dans la fabrication du bloc d'alimentation. Chaque matériau utilisé a ensuite été ramené à la masse du bloc d'alimentation étudié. Le Tableau 5 présente les matériaux listés dans la fiche PEP et les masses prises en compte pour la modélisation. Comme le montre ce tableau, certains matériaux n'ont pas pu être pris en compte faute de processus correspondants dans la base de données EF ou d'information suffisantes fournies par la fiche PEP. Lorsque cela n'était pas précisé, des hypothèses ont été faites sur le type précis et le processus de production de certains matériaux (par exemple, il a été supposé que l'acier utilisé était laminé à froid). Il a par ailleurs été fait l'hypothèse que ce bloc d'alimentation était produit en Chine.

Remarques : Le type de bloc d'alimentation décrit dans la fiche PEP ne présente pas tout à fait les mêmes caractéristiques techniques que celui analysé dans cette étude. Il a néanmoins décidé de s'appuyer tout de même sur cette fiche, faute de meilleure option.

La production des blocs d'alimentation en tant que telle, c'est-à-dire les processus de transformation des matériaux et d'assemblage des composants, n'a pas pu être pris en compte faute de données disponibles. Certains processus utilisés correspondent à des données européennes, alors que les moteurs ont été produits en Chine, faute d'alternative disponible dans la base de données EF.

Câbles électriques

Description : Plusieurs câbles électriques sont utilisés :

- Des rallonges électriques, permettant d'assurer l'alimentation en électricité de l'oeuvre ;
- Une bobine de 100m de câble 2x2,5mm² gainé, dont l'utilisation n'est pas précisée mais dont il est supposé qu'elle sert à relier les composants électriques et électroniques des mâts entre eux ;
- Une bobine de 50m de câble 2x2,5mm², dont l'utilisation n'est là encore pas précisée mais dont il est supposé qu'elle sert à relier les haut parleurs aux cartes électroniques.

Les deux premiers ont été achetés en ligne auprès d'un fournisseur spécialisé, le troisième a été acheté en ligne sur la plateforme Amazon. Peu d'informations étaient connues sur les caractéristiques de ces câbles, hormis

¹ Il s'agit d'une fiche PEP concernant la gamme de blocs d'alimentation à découpage ABL développés par l'entreprise Schneider Electric [37]

MATÉRIAUX	RÉPARTITION MASSIQUE ALIMENTATION PEP (%) (avec emballage)	RÉPARTITION MASSIQUE ALIMENTATION PEP (%) (hors emballage)	MASSE MATÉRIAU POUR BLOC ALIMENTATION (kg)
Aluminium	21,1 %	22,9 %	0,184
Ferrites	17,3 %	18,8 %	0,150
Cuivre	12,6 %	13,7 %	0,110
Acier	11,2 %	12,2 %	0,097
Acier inoxydable	2,9 %	3,2 %	0,025
Alliages	4,1 %	4,5 %	Non pris en compte (informations insuffisantes)
Fibre de verre	1,5 %	1,6 %	0,013
Electrolyte	1,2 %	1,3 %	0,010
Résine Epoxy	3,5 %	3,8 %	0,030
Polybuthylene Terephthalate (PBT)	4,9 %	5,3 %	0,043
Polyphenylene Ether (PPE)	2,5 %	2,7 %	Non pris en compte (absent base de données EF)
Polyethylene Terephthalate (PET)	1,3 %	1,4 %	0,011
Polyamide 66 (PA66)	1,2 %	1,3 %	0,010
Divers	5,5 %	6,0 %	Non pris en compte (informations insuffisantes)
Carton (emballage)	7,6 %	Non pris en compte	Non pris en compte
Papier (emballage)	1,6 %	Non pris en compte	Non pris en compte

[Tableau 5 - Matériaux utilisés pour modéliser un bloc d'alimentation]

leur type et un lien vers le site du fournisseur. Leur masse linéaire ainsi que leur lieu de fabrication n'étaient ainsi pas connues.

Hypothèses : Les masses des câbles ont été estimées à partir d'informations fournies par d'autres fournisseurs proposant ce type de composant. Le gainage du deuxième câble n'a pas été pris en compte, faute d'informations sur sa nature. Il est fait l'hypothèse que ces câbles ont été produits en Europe, au vu des informations trouvées sur les sites des fournisseurs.

Tous les câbles électriques ont été modélisés par le même processus issu de la base de données EF. Pour la rallonge électrique, un facteur 2 a été appliqué à ce processus pour faire correspondre la masse linéaire estimée avec celle du câble modélisé. Pour les câbles 2x2,5mm², un facteur 2/3 a été appliqué pour tenir compte du fait qu'il s'agissait de câbles 2 fils, alors que le processus utilisé concernait un câble 3 fils.

Remarques : Un écart relativement important a été constaté entre la masse des bobines de câble 2x2,5mm² obtenue via des fiches produit d'autres fournisseurs et la masse linéaire des câbles modélisés par le processus issu de la base de données EF. Cet écart peut s'expliquer par le fait que les fournisseurs intègrent dans la masse totale présentée la masse de la bobine en plastique servant à enrouler le câble. C'est cette masse totale obtenue via d'autres fournisseurs qui a été utilisée.

Connecteurs tournants

Description : Les connecteurs tournants permettent d'assurer la liaison électrique entre des éléments situés de part et d'autre d'un axe de rotation. Un connecteur tournant est composé d'un stator et d'un rotor en plastique, reliés par des balais et un anneau en matériaux nobles assurant la transmission du courant électrique, ainsi que

de câbles électriques en cuivre. Ils ont été achetés auprès d'un fournisseur chinois via la plateforme Aliexpress.

Hypothèses : Il a été supposé que le corps en plastique était composé d'ABS. Seul la production du cuivre des câbles électrique a été prise en compte. Il a été fait l'hypothèse que le corps des voyants était produit par injection.

Remarques : La production des matériaux nobles permettant la transmission du courant électrique n'a pas été prise en compte pour cause de résultats incohérents. L'assemblage des différentes parties composant ces connecteurs tournant n'a pas été prise en compte faute de données disponibles. Les processus de production du cuivre et d'injection correspondent à des données européennes, alors que les connecteurs tournants sont fabriqués en Chine. Aucun processus correspondant reposant sur des données chinoises ou mondiales n'était disponible dans la base de données EF. Néanmoins, il a été estimé que cette approximation était admissible compte tenu de la part de ce composant dans le résultat final.



[Figure 9 - Connecteur tournant]

3.4.1.4. Boîtiers

Boîtiers avant, boîtier arrière, boîtier sol

Description : Les boîtiers permettent de protéger les différents composants électriques et électroniques de l'œuvre. Ils ont été achetés en ligne auprès d'un revendeur spécialisé. Ils sont composés d'ABS d'après les fiches produits disponibles sur les sites de leurs fournisseurs. Leur masse étaient également fournies.

Hypothèse : Il a été fait l'hypothèse que les boîtiers étaient produits par injection.

Remarques : Peu d'informations étaient disponibles concernant leur lieu de production, mais les informations présentes sur les fiches produits semblent indiquer une production européenne, ce qui est cohérent avec la localisation du processus d'injection mais pas avec celle du processus de production de l'ABS. On peut cependant émettre l'hypothèse que le plastique ait été produit en dehors de l'Europe mais que le moulage par injection ait été fait en Europe.

Presses étoupe

Description : Les presses étoupe permettant permettent d'assurer l'étanchéité au niveau des passages de câble de certains boîtiers. Ils ont été achetés auprès d'un fournisseur chinois via la plateforme Aliexpress. Peu d'informations étaient fournies, hormis leurs dimensions et leur matériau principal.

Hypothèse : Leur masse a été obtenue sur le site d'un autre fournisseur proposant un produit identique. Il a été fait l'hypothèse que les boîtiers étaient produits par injection, et qu'ils provenaient de Chine.

Remarques : Seule la matière du corps en plastique des presses étoupe était précisée sur le site du fournisseur, mais pas celle de l'étoupe à proprement parler. Elle n'a donc pas été prise en compte. Le processus d'injection correspond à des données européennes, alors que les presses étoupes ont a priori été fabriqués en Chine.

Aucun processus correspondant reposant sur des données chinoises ou mondiales n'était disponible dans la base de données EF.

3.4.1.5. Structure

Bras en aluminium

Description : Le bras en aluminium est composé d'un profilé en aluminium anodisé, supportant des boîtiers habitant les composants électroniques et mécaniques, ainsi que les haut parleurs et les rubans LED. Ils ont été achetés auprès d'un fournisseur français spécialisé dans la découpe de ce type de pièce. Les dimensions ainsi que la masse des bras étaient connues. L'origine de l'aluminium n'était néanmoins pas précisée par le fournisseur.

Hypothèses : Il a été fait l'hypothèse qu'il avait été produit en Chine, cette hypothèse fera l'objet d'une analyse de sensibilité présentée au 5.2.1.

Remarque : Seuls les processus de production de l'aluminium et d'extrusion ont été pris en compte. Le processus de découpe des profilés n'a pas été pris en compte, faute de processus correspondant dans la base de données EF. Par ailleurs, il est supposé que l'aluminium provient de Chine. Or, seuls des processus reposant sur des moyennes européennes étant disponibles dans la base de données EF, cette hypothèse sur l'origine de l'aluminium ne peut pas être prise en compte à l'étape de production. Elle sera prise par contre prise en compte dans l'étape de transport du composant.

Embouts de protection pour profilé

Description : Les embouts de protection permettent de boucher l'extrémité du profilé pour éviter les infiltrations. Ils ont été achetés auprès du même fournisseur ayant réalisé les profilés en aluminium des bras et, d'après son site, sont composés de nylon. Leur masse était également fournie. Leur lieu de production n'était pas précisé.

Hypothèses : Il a été fait l'hypothèse que ces embouts étaient fabriqués via un processus de moulage par injection, et qu'ils avaient été produits en Chine.

Remarques : Le processus d'injection utilisé pour la modélisation correspond à des données européennes, alors qu'il est fait l'hypothèse que ces embouts ont été fabriqués en Chine. Aucun processus correspondant reposant sur des données chinoises ou mondiales n'était disponible dans la base de données EF.

Caches rainures

Description : Les caches rainures viennent se fixer dans les rainures des bras en aluminium et permettent ainsi d'éviter les infiltrations d'eau. Ils sont composés de PVC. Aucune information relative à leur masse, à leurs dimensions ou à leur origine n'était disponibles.

Hypothèses : La masse a été estimée approximativement. Il a été supposé qu'ils étaient fabriqués via un processus de moulage par injection, et qu'ils avaient été produits en Chine.

Remarques : Les processus utilisés pour la modélisation correspondent à des données européennes, alors qu'il est supposé que ces caches rainures ont été produits en Chine. Aucun processus correspondant à des données chinoises n'était cependant disponible dans la base de données EF.

Mâts en acier

Description : Les mâts en acier permettent de supporter le bras en aluminium. Ils sont constitués d'une partie

basse et d'une partie haute assemblées par vis, réalisées à partir de tubes carrés en acier. Ces tubes ont été achetés en ligne sur une plateforme de vente destinée aux professionnels du bâtiment, mais leur fiche produit n'était plus disponible au moment de la réalisation de cette étude. Aucune information sur leur origine ni sur les processus effectivement mis en oeuvre n'était donc accessible.

Hypothèses : Leurs dimensions ont été déduites grâce aux informations ou plans fournis, ce qui a permis d'estimer la masse en se basant sur la masse volumique de l'acier. Le fait que l'acier soit laminé à chaud ou à froid n'étant pas connu, il a été fait l'hypothèse qu'il s'agissait d'un laminage à froid. Il a été fait l'hypothèse que l'acier avait été produit en Chine, cette hypothèse fait l'objet d'une analyse de sensibilité présentée au point 5.2.1. Il a également été fait l'hypothèse que transformation de l'acier en profilé était faite par un processus de pliage.

Remarque : L'oeuvre étant conçue pour être présentée en extérieur, elle doit pouvoir résister aux intempéries. L'acier utilisé n'étant pas de l'acier inoxydable, les éléments composant les mâts ont été peint avec une peinture permettant de les protéger. Aucune information n'étant disponible sur la peinture utilisée (type, quantité, etc), elle n'a donc pas été prise en compte.

Compartiment roulements

Description : Ces compartiments sont destinés à accueillir les roulement, et sont fixés au niveau de la liaison entre les mâts et les bras. Ils sont obtenus par la découpe de tubes en acier doux étiré, et ont été acheté auprès d'un fournisseur spécialisé dans ce type de pièces. Leur longueur n'étant pas précisée, elle a été estimée à part des plans fournis ce qui a permis d'estimer leur masse, la masse volumique de l'acier utilisé étant fournie par le fournisseur.

Hypothèses : Leur longueur n'étant pas précisée, elle a été estimée à part des plans fournis ce qui a permis d'estimer leur masse, la masse linéaire de l'acier utilisé étant fournie par le fournisseur. Le fait que l'acier soit laminé à chaud ou à froid n'étant pas connu, il a été fait l'hypothèse qu'il s'agissait d'un laminage à froid. Il a été fait l'hypothèse que l'acier avait été produit en Chine, cette hypothèse fait l'objet d'une analyse de sensibilité présentée au point 5.2.1. Il a également été fait une hypothèse que la transformation de l'acier en tube était faite par un processus d'étirage.

Remarque : La découpe des tubes n'a pas été prise en compte, faute de processus correspondant disponible dans la base de données EF.

Platine moteur, platine jonction pivot, platine embase du mat, goussets

Description : Ces différents composants en acier permettent de fixer les autres composants à la structure (platines), de faire tenir le mat (embases), et de stabiliser (goussets). Ils sont fabriqués par un processus de découpe laser, et ont été achetés auprès d'une entreprise spécialisée dans la réalisation sur mesure de pièces de ce type. Les dimensions des platines moteur ont été extrapolées à partir des dimensions des moteurs utilisés, et celles des goussets à partir de schémas techniques. Les dimensions des platines d'embase du mat étaient connues, ainsi que la section des platines de jonction pivot.

Hypothèses : Leurs dimensions ont été déduites grâce aux informations ou plans fournis, ce qui a permis d'estimer la masse en se basant sur la masse volumique de l'acier. Comme pour les autres éléments en acier, il a été fait l'hypothèse qu'il s'agissait d'acier laminé à froid produit en Chine. Le processus de production de l'acier et le processus de découpe laser ont pu être pris en compte.

Remarque : Le processus de découpe laser a été réalisé en France, mais le seul processus correspondant dans la base de données EF se base sur des données mondiales moyennes.

Platine capteur LIDAR

Description : Ces platines sont destinées à supporter les capteurs LIDAR accrochés au bras en aluminium. Elles ont été achetées auprès d'un fournisseur spécialisé basé en France, et sont constituées de PMMA d'épaisseur 3mm.

Hypothèses : Les dimensions de ces platines n'étant pas connues, il a été supposé qu'elles étaient identiques à celles du capteur. Il a ainsi été possible d'en déduire leur masse, en utilisant la masse volumique du PMMA. Il a été fait l'hypothèse que les plaques de PMMA utilisées étaient produites par injection. La découpe des plaques aux bonnes dimensions n'a pas été prise en compte, faute de processus correspondant dans la base de données EF.

Remarque : La localisation des deux processus impliqués dans la production de ce composant semble cohérente avec les données disponibles, puisque les platines ont été achetées à une entreprise française spécialisée dans la réalisation de pièces en plastique moulées. Il est donc probable que le plastique ait été produit ailleurs qu'en France mais moulé par l'entreprise.

3.4.1.6. Visserie

Description : Cette catégorie regroupe les différentes vis et écrous utilisés pour assembler la structure et les composants, qui peuvent être de différentes tailles.

Hypothèses : Il a été supposé que tous ces composants étaient composés d'acier inoxydable laminé à froid. La masse d'une vis a été estimée à 10g, et celle d'un écrou à 6g.

Remarque : Le processus de fabrication de la vis a proprement parler n'a pas été pris en compte, faute de données ou de processus correspondant dans la base de données EF.

3.4.1.7. Caisses de transport

Deux types de caisses sont utilisées pour transporter l'installation : un flight case, acheté directement auprès d'un fournisseur, et des caisses en contreplaqué fabriquées sur mesure.

Flight case

Description : Le flight case permet de transporter certains éléments de l'oeuvre de son lieu de stockage à son lieu d'exposition. Le type d'éléments transportés n'est pas connu. Il est composé d'un corps en contreplaqué et d'éléments de renforts en aluminium, et a été acheté en ligne auprès d'un fournisseur spécialisé dans la revente de matériel technique utilisé dans le spectacle. Seule la masse totale du flight case était disponible sur le site du fournisseur. L'origine des matériaux ainsi que le lieu de fabrication n'était pas précisés.

Hypothèses : Il a été fait l'hypothèse que le contreplaqué représentait 80% de la masse totale, et les éléments en aluminium 20%. Il a également été fait l'hypothèse que les matériaux composant le flight case (aluminium,



[Figure 11 - Flight case]

bois) ont été produit en Chine avant d'être assemblés en Allemagne.

Remarques : Seule la production des matériaux (contreplaqué, aluminium) a été prise en compte, faute d'information supplémentaires disponibles sur le site du fournisseur. Les seuls processus disponibles dans la base de données EF correspondent à des données européennes, alors qu'il est supposé que les matériaux proviennent de Chine. Cette origine n'a donc pu être prise en compte que pour le transport de ces matériaux.

Caisses en contreplaqué

Description : Trois caisses en contreplaqué de peuplier, destinées à recevoir les éléments de l'oeuvre démontés, ont été fabriquées spécialement pour transporter l'oeuvre. Ces caisses sont composées de :

- Panneaux en contreplaqués formant l'extérieur de la caisse, achetés auprès d'un fournisseur français produisant son bois localement ;
- Tasseaux rabotés, dont le type de bois et le fournisseur n'étaient pas connus ;
- Panneaux de bois pour l'habillage intérieur des caisses, permettant de maintenir les éléments de l'oeuvre à l'intérieur de la caisse, dont le type de bois et le fournisseur n'étaient pas connus ;
- Roues (4 par caisse), achetées en ligne auprès d'un revendeur spécialisé. Elles sont constituées d'une structure d'acier galvanisé, de roues en caoutchouc synthétique, et d'un moyeu en nylon ;
- Poignées (4 par caisse), achetées en ligne auprès d'un revendeur spécialisé. Elles sont composées d'une structure en acier galvanisé et d'une garde en PVC ;
- Éléments de visserie pour assembler le tout.
-

Les dimensions des panneaux en contreplaqué et des tasseaux rabotés étaient fournies, mais pas celles des panneaux de bois utilisés pour l'habillage intérieur. Des informations sur la masse et les matériaux des roues et des poignées ont pu être trouvées sur le site du revendeur.

Hypothèses : Il a été supposé que tous les éléments en bois (panneaux en contreplaqué, tasseaux rabotés, panneaux de bois pour habillage intérieur) étaient en contreplaqué. Il a également été supposé que tous ces éléments provenaient du même fournisseur produisant son bois en France. Leurs masses ont été déduites à partir des dimensions fournies et de la masse volumique du contreplaqué, bien que des hypothèses aient été faites pour le bois pour habillage intérieur dont les dimensions n'étaient pas connues.

La masse totale d'une roue était connue, mais des hypothèses ont été faites quant aux masses de ses différents matériaux. Ainsi, il a été supposé que l'acier représentait 75% du total, le nylon 15% et le caoutchouc 10%.

De même, la masse totale d'une poignée était connue, et il a été fait l'hypothèse que l'acier représentait 90% de cette masse et le PVC 10%.

Les lieux de production des matériaux composant les roues et les poignées n'étaient pas connus, mais il a été fait l'hypothèse qu'ils provenaient de Chine avant d'être assemblés en Allemagne.

Concernant la visserie utilisée pour assembler les caisses, il a été fait l'hypothèse qu'il s'agissait de vis en acier inoxydable et que la masse totale était de 1kg.

Remarque : Certains processus de la base de données EF ne proposaient que des données européennes, alors qu'il a été fait l'hypothèse que certains avaient été réalisés en Chine. Dans ce cas, cette hypothèse n'a donc pu être prise en compte que pour le transport de ces matériaux. En dehors de la production des matériaux, seul le



[Figure 12 - Caisse de transport]

moulage du caoutchouc et du PVC a pu être pris en compte, faute d'information sur les autres processus impliqués ou de processus correspondant dans la base de données EF.

3.4.2. Transport des composants

Les trajets et modes de transports précis des différents composants n'étant pas connus, des hypothèses ont été faites au cas par cas en se basant sur les informations disponibles dans les fiches produits et sur celles fournies par le studio Chevalvert. L'assemblage de l'oeuvre ayant été fait à Lyon, il a été supposé que tous les composants étaient envoyés à Lyon.

De manière générale, la modélisation du transport s'est faite en s'appuyant sur les hypothèses suivantes :

- Lorsque le composant a été commandé via une plateforme en ligne directement auprès du fabricant (cas de Aliexpress notamment) :
 - Si la durée de livraison était inférieure à une semaine, il a été supposé un trajet en avion jusqu'à Paris puis un trajet en petit camion jusqu'à Lyon ;
 - Si la durée de livraison était supérieure à une semaine, il a été supposé un trajet en bateau de Shanghai jusqu'à Rotterdam, un trajet en camion jusqu'à Paris puis un trajet en petit camion jusqu'à Lyon ;
- Lorsque le composant a été commandé via une plateforme en ligne disposant d'un stock de produits (cas d'Amazon ou de RS Online notamment) :
 - Si le composant a été produit en Asie, il a été supposé un trajet en bateau de Shanghai jusqu'à Rotterdam, un trajet en camion jusqu'à l'entrepôt du fournisseur (si l'information était connue) ou Paris (si pas d'informations) puis un trajet en petit camion jusqu'à Lyon ;
 - Si le composant a été produit en Europe, il a été supposé un trajet en petit camion jusqu'à l'entrepôt du fournisseur (si l'information était connue) ou Paris (si pas d'informations) puis un trajet en petit camion jusqu'à Lyon ;
- Lorsque le composant était commandé auprès d'une entreprise ayant réalisé une opération de transformation de matière première (tournage, découpe laser, etc), il a été supposé que la matière première (acier, aluminium) était acheminée en bateau de Shanghai à Rotterdam, puis en camion de Rotterdam au lieu de production, avant que le composant finalisé ne soit transporté en petit camion du lieu de production jusqu'à Lyon. L'origine de la matière première (Asie ou Europe) fait partie des paramètres testés dans l'analyse de sensibilité au point 5.2.1. ;
- Lorsque le composant a été commandé auprès d'un fournisseur identifié mais qu'aucune information n'était disponible sur le lieu de production de ce composant, seul le trajet depuis le site du fournisseur a été pris en compte ;
- Lorsque ni le fournisseur et ni le lieu de production du composant n'étaient connus, il a été supposé un trajet en bateau d'une distance de 20000 km suivi d'un trajet en camion de 1000 km (cas d'un composant produit en Chine), ou un trajet en camion de 1000 km (cas d'un composant produit en Europe), puis, dans les deux cas, un trajet de 300 km en petit camion pour la livraison ;
- Lorsque le composant était un produit composé de différents éléments (par exemple le flight case, composé de bois et d'aluminium), et si cela était possible, le trajet des matières premières jusqu'au lieu de fabrication de ces composants a été pris en compte.

Les processus issus de la base de données EF utilisés pour la modélisation sont :

- Pour le transport en bateau : « Transoceanic ship, containers, consumption mix, to consumer, heavy fuel oil driven, cargo, 27.500 dwt payload capacity, ocean going - GLO » ;
- Pour le transport en camion (Europe) : « Articulated lorry transport, Total weight 28-32 t, mix Euro 0-5, consumption mix, to consumer, diesel driven, Euro 0 - 5 mix, cargo, 28 - 32t gross weight / 22t payload capacity - EU-28+3 » ;
- Pour le transport en camion (Asie) : « Articulated lorry transport, Total weight 28-32 t, mix Euro 0-5, consumption mix, to consumer, diesel driven, Euro 0 - 5 mix, cargo, 28 - 32t gross weight / 22t payload capacity - RAS » ;
- Pour le transport en avion : « Cargo plane, consumption mix, to consumer, technology mix, kerosene driven, cargo, 65 t payload - GLO » ;

- Pour le transport en petit camion : « Articulated lorry transport, Total weight <7.5 t, mix Euro 0-5, consumption mix, to consumer, diesel driven, Euro 0 - 5 mix, cargo, up to 7,5t gross weight / 3,3t payload capacity - UE 28+3 ».

Ces différents processus ne prennent pas en compte les impacts générés par le cycle de vie du moyen de transport (fabrication, fin de vie) ni les impacts générés par la chaîne logistique du carburant.

3.4.3. Assemblage

Une fois les différents composants réceptionnés dans le lieu de fabrication de l'oeuvre, à Lyon, ils sont assemblés pour finaliser sa fabrication par les prestataires du studio Chevalvert chargés du volet technique de l'oeuvre. Plus précisément, cette étape consiste en :

- Le soudage des composants électroniques (carte PCB, etc) ;
- La découpe des mats en aciers à la bonne longueur ;
- Le soudage des mats, goussets et embases en acier ;
- La découpe et le vissage des différents éléments en bois composant les caisses de transport ;
- L'assemblage et le vissage des différents éléments entre eux (boîtiers, éléments mécaniques, etc).

Peu d'informations étaient disponibles sur les outils utilisés ou les processus précisément mis en oeuvre, mis à part une liste détaillant des temps de travail (jours/homme) pour certaines étapes. En ce basant sur cette information, il été supposé que :

- Le soudage des composants électroniques avait été réalisé à l'aide d'un poste à souder de d'une puissance de 50 W, et que cette étape avait nécessité 4 jours de sondage à raison de 7 heures par jour - représentant une consommation électrique totale de 1,4 kWh ;
- La découpe des mats en acier avait été réalisée à l'aide d'une scie circulaire d'une puissance de 1800 W, et que cette étape avait nécessité 1 heure de travail - représentant une consommation électrique totale de 1,8 kWh ;
- Le soudage des éléments de structure (mats, embases, goussets) avait été réalisé à l'aide d'un poste à souder d'une puissance de 3000 W, utilisé pendant 7 jours à raison de 7 heures par jours - représentant une consommation électrique totale de 147 kWh ;
- La découpe des différents éléments en bois composant les caisses de transport avait été réalisée à l'aide d'une scie circulaire d'une puissance de 1800 W, et que cette étape avait nécessité 4 heures de travail - représentant une consommation électrique totale de 7,2 kWh;
- Le vissage des caisses de transport avait été réalisé à l'aide d'une visseuse d'une puissance de 500 W, et que cette étape avait nécessité 4 heures de travail - représentant une consommation électrique totale de 2 kWh ;
- L'assemblage et le vissage des différents éléments avaient été réalisés à l'aide d'une visseuse d'une puissance de 500 W, et que cette étape avait nécessité 2 jours de travail à raison de 4 heures par jour - représentant une consommation électrique totale de 4 kWh.

Seule la consommation électrique des outils utilisés a été prise en compte à cette étape. Elle a été modélisée en utilisant le processus « Electricity grid mix 1kV-60kV, consumption mix, to consumer, AC, technology mix, 1kV - 60kV - FR », auquel a été appliqué un facteur de conversion de 2,47 % correspondant aux pertes liées à la conversion de la moyenne à la basse tension.

3.4.4. Transport de l'oeuvre

Cette étape correspond au transport de l'oeuvre depuis son lieu de stockage à Lyon jusqu'à son lieu d'exposition.

Dans ce scénario de référence, conformément à l'unité fonctionnelle retenue et présentée au point 2.2.3., il a été retenu que l'oeuvre était présentée dans 5 lieux d'exposition, distant d'une moyenne de 500 km de son lieu de stockage à Lyon (soit 1000 km aller-retour).

La masse totale du matériel transporté, incluant l'oeuvre en tant que telle, ses composants de rechange et ses caisses de transport est d'environ 617 kg.

Le moyen de transport a été modélisé par le processus « Articulated lorry transport, Total weight <7.5 t, mix Euro 0-5, consumption mix, to consumer, diesel driven, Euro 0 - 5 mix, cargo, up to 7,5t gross weight / 3,3t payload capacity - UE 28+3 ». Ce processus ne prend pas en compte les impacts générés par le cycle de vie du moyen de transport (fabrication, fin de vie) ni les impacts générés par la chaîne logistique du carburant.

La charge utile du camion utilisé pour la modélisation est de 5 tonnes, ce qui est sans doute plus que le véhicule réellement utilisé. Il s'agissait cependant du plus petit véhicule de ce type disponible dans la base de données EF.

3.4.5. Exposition

Cette étape correspond au fonctionnement de l'oeuvre une fois arrivée sur son lieu d'exposition. Elle intègre son montage, son fonctionnement à proprement parler, c'est-à-dire sa période d'exposition au public, et son démontage. Il est fait l'hypothèse que les différentes expositions de l'oeuvre ont lieu en France, donc avec un mix électrique français.

Montage et démontage

Aucune information n'était disponible quant à la durée du montage et du démontage de l'oeuvre, ni sur les outils utilisés. Il a été supposé que chacune de ces étapes nécessitait 4 heures de travail (soit 8 heures en tout), et qu'elles impliquaient l'utilisation d'une visseuse d'une puissance de 500 W utilisée pendant toute cette durée. Cela représente une consommation électrique totale de 4 kWh.

Seule la consommation électrique des outils utilisés a été prise en compte. Elle a été modélisée en utilisant le processus « Electricity grid mix 1kV-60kV, consumption mix, to consumer, AC, technology mix, 1kV - 60kV - FR », auquel a été appliqué un facteur de conversion de 2,47 % correspondant aux pertes liées à la conversion de la moyenne à la basse tension.

Fonctionnement

L'oeuvre est alimentée par 12 blocs d'alimentation (un par Sentinelle) d'une puissance de 400 W. Selon l'unité fonctionnelle, il est prévu que l'oeuvre fonctionne pendant 72h, soit 12 heures par jour pendant 6 jours. Il n'a pas été possible d'évaluer la consommation réelle de l'oeuvre en fonctionnement, il a donc été supposé qu'elle fonctionnait en permanence à pleine puissance. Il est ainsi probable que sa consommation électrique soit sur-évaluée.

Une consommation électrique totale de 345,6 kWh a donc été retenue pour sa phase de fonctionnement. Elle a été modélisée via le processus « Electricity grid mix 1kV-60kV, consumption mix, to consumer, AC, technology mix, 1kV - 60kV - FR », auquel a été appliqué un facteur de conversion de 2,47% correspondant aux pertes liées à la conversion de la moyenne à la basse tension.

4. Résultats

Ce chapitre présente les résultats de l'évaluation des impacts du cycle de vie. Il propose une évaluation globale et une répartition par étapes du cycle de vie (production des composants, transport des composants, assemblage, transport de l'œuvre, exposition). Ces résultats sont obtenus multipliant les flux élémentaires consommés et générés par chaque processus impliqué, et en les multipliant par des facteurs d'impact spécifiques à chaque catégorie d'impact (voir Annexe A).

Il est important de noter qu'il s'agit d'impact environnementaux potentiels et non réels, puisque leur calcul repose sur un certain nombre d'hypothèses de modélisation et ne résultent pas d'une mesure physique.

4.1. Évaluation globale

Le Tableau 6 ci-dessous présente les résultats de l'évaluation des impacts du cycle de vie, en prenant en compte l'unité fonctionnelle définie au point 2.2.3 et les catégories d'impact sélectionnées et décrites au point 2.2.5. Il présente le résultat total pour chaque catégorie d'impact, ainsi que les résultats par étape du cycle de vie.

ÉTAPE	Acidification (mol H+ eq.)	Changement climatique (kg CO2 eq.)	Consommation des ressources abiotiques – Éléments (kg Sb eq.)	Ecotoxicité - Eau douce (CTUe)	Particules fines (Cas de maladies)	Radiations ionisantes (kg U235 eq.)
Production des composants	1,340E+01	2,154E+03	1,513E-01	7,087E+02	1,886E-04	4,598E+02
Transport des composants	4,770E+00	1,979E+02	1,101E-05	3,482E+01	3,621E-05	2,660E-01
Assemblage	5,543E-02	1,563E+01	1,164E-05	2,917E+00	5,507E-07	1,219E+02
Transport de l'œuvre	2,895E+00	3,758E+02	0,000E+00	9,705E-05	1,526E-05	0,000E+00
Exposition	5,896E-01	1,662E+02	1,239E-04	3,102E+01	5,858E-06	1,297E+03
TOTAL	2,171E+01	2,909E+03	1,514E-01	7,774E+02	2,465E-04	1,879E+03

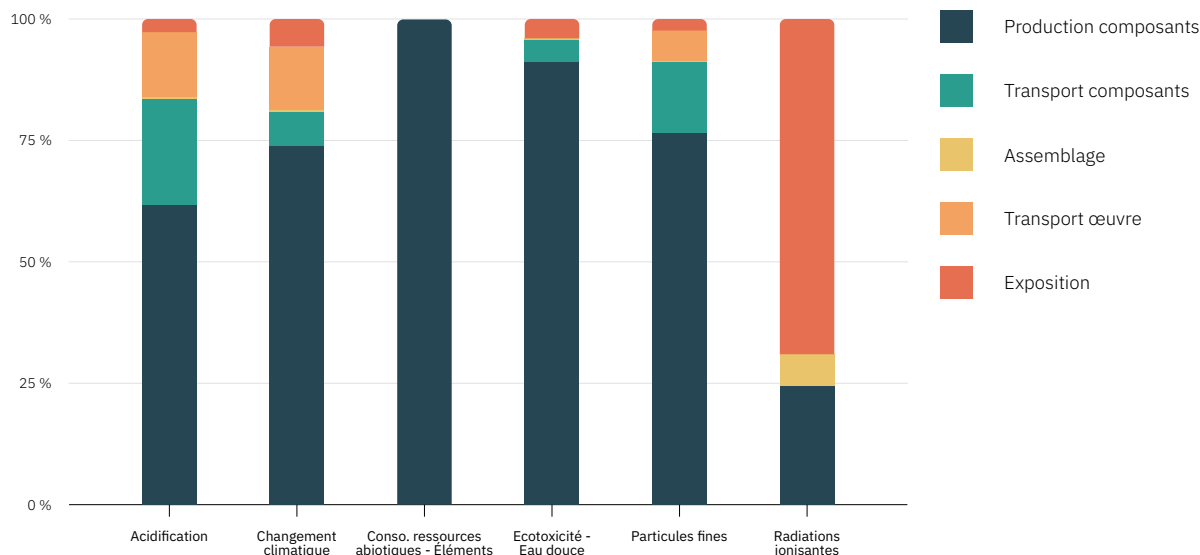
[Tableau 6 - Évaluation globale et par étape du cycle de vie (valeurs absolues)]

Le Tableau 7 présente les mêmes résultats, mais de manière relative à l'impact potentiel total pour chaque catégorie.

ÉTAPE	Acidification (mol H+ eq.)	Changement climatique (kg CO2 eq.)	Consommation des ressources abiotiques – Éléments (kg Sb eq.)	Ecotoxicité - Eau douce (CTUe)	Particules fines (Cas de maladies)	Radiations ionisantes (kg U235 eq.)
Production des composants	61,73 %	74,03 %	99,90 %	91,16 %	76,52 %	24,47 %
Transport des composants	21,97 %	6,80 %	0,01 %	4,48 %	14,69 %	0,01 %
Assemblage	0,26 %	0,54 %	0,01 %	0,38 %	0,22 %	6,49 %
Transport de l'œuvre	13,33 %	12,92 %	0,00 %	0,00 %	6,19 %	0,00 %
Exposition	2,72 %	5,71 %	0,08 %	3,99 %	2,38 %	69,03 %
TOTAL	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %

[Tableau 7 - Évaluation globale et par étape du cycle de vie (valeurs relatives)]

La Figure 13 reprend sous forme de graphique les résultats du tableau précédent.



[Figure 13 - Répartition des impacts par étape du cycle de vie]

Une présentation détaillée de ces résultats incluant chaque composant et étape du cycle de vie est disponible en Annexe E.

4.2. Normalisation et pondération

4.2.1. Normalisation

La normalisation consiste à ramener les résultats des différentes catégories d'impact à une référence commune en les divisant par des facteurs de normalisation propre à chaque catégorie d'impact. Cette étape permet de mieux comprendre l'importance relative des résultats pour chaque catégorie d'impact, en les comparant à un système de référence.

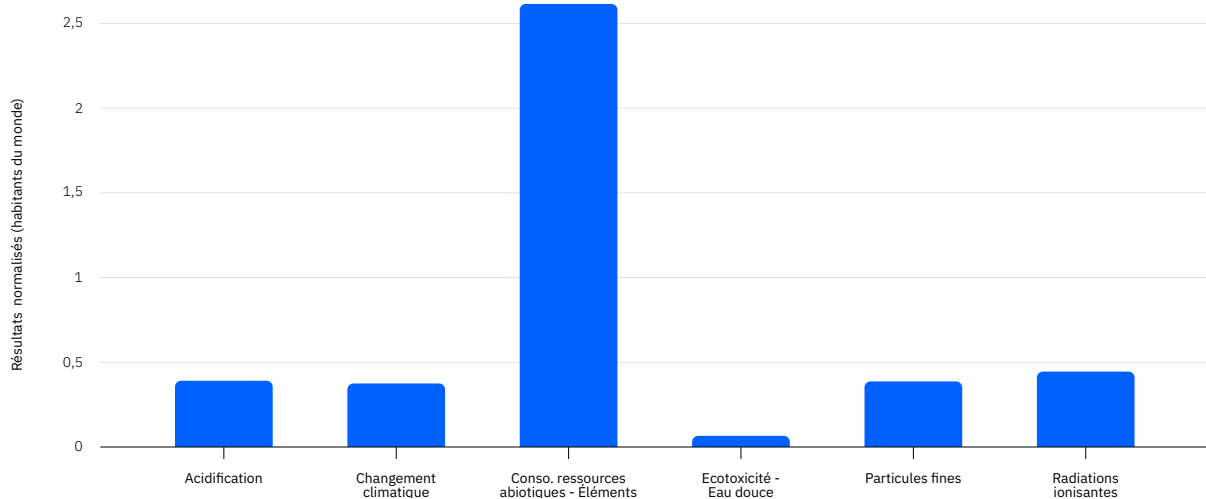
Dans cette étude, chaque impact est traduit en équivalent « habitant du monde ». Cela signifie qu'un facteur de normalisation correspondant à la contribution annuelle moyenne d'un habitant du monde est défini pour chaque catégorie d'impact. Ainsi, un résultat normalisé affichant une valeur égale à 1 signifie que l'impact potentiellement généré pour cette catégorie est équivalent à celui généré par 1 habitant moyen du monde sur une année. La méthode de normalisation utilisée est celle définie par la Commission Européenne dans le cadre du programme Environmental Footprint¹, elle a été choisie pour sa cohérence avec la base de données et la méthode d'évaluation des impacts utilisées, puisque toutes deux sont également issues du programme Environmental Footprint.

Les facteurs de normalisation utilisés pour chaque catégorie d'impact et les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 8 et la Figure 14 ci-dessous.

¹Cette méthode est définie dans le document « PEF Guidance v6.3 » [38]

ÉTAPE	Acidification (mol H+ eq.)	Changement climatique (kg CO2 eq.)	Consommation des ressources abiotiques – Éléments (kg Sb eq.)	Ecotoxicité - Eau douce (CTUe)	Particules fines (Cas de maladies)	Radiations ionisantes (kg U235 eq.)
Facteur de normalisation	5,550E+01	7,760E+03	5,790E-02	1,180E+04	6,370E-04	4,220E+03
Résultats normalisés (habitants du monde)	3,912E-01	3,749E-01	2,615E+00	6,588E-02	3,869E-01	4,452E-01

[Tableau 8 - Résultats normalisés]



[Figure 14 - Résultats normalisés]

4.2.2. Pondération

La pondération attribue un facteur à chaque catégorie d'impact normalisée représentant leur importance relative. Dit autrement, cela consiste à appliquer un jugement de valeur à ces catégories de manière à refléter l'importance relative accordée aux différentes catégories d'impact. Ces facteurs représentent l'importance relative accordée à une catégorie d'impact donnée par rapport à l'impact environnemental total.

Les résultats de chaque catégorie d'impact peuvent ainsi être comparés entre eux, et il devient possible de définir quelle catégorie d'impact a le plus d'importance vis-à-vis de l'impact environnemental global du produit étudié. Il devient également possible d'additionner les résultats pondérés pour obtenir un score unique.

Les facteurs utilisés pour la pondération peuvent être définis de différentes manières. Il est important de noter que dans tous les cas, leur définition ne se fait pas sur des bases scientifiques, mais sur des choix de valeurs. Comme pour la normalisation, cette étude s'appuie sur la méthode définie par la Commission Européenne dans le cadre du programme Environmental Footprint présentée dans le document PEF Guidance v6.3. Les facteurs de pondération présentés dans cette méthode se basent pour moitié sur un sondage du public et d'experts, et pour moitié sur un jugement d'experts fondé sur les limites planétaires. Par exemple, le facteur de pondération utilisé pour la catégorie « Changement climatique » est de 22,19 %. Cela signifie qu'il est estimé que cette catégorie contribue à hauteur de 22,19 % à l'impact environnemental total du produit étudié.

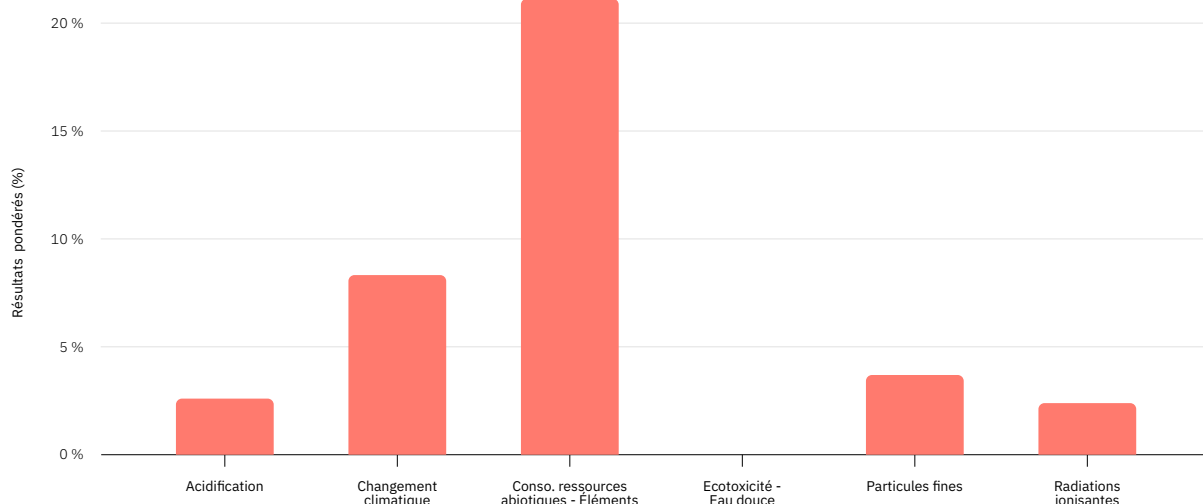
Cette méthode préconise d'utiliser la pondération pour identifier et sélectionner les catégories d'impact les plus importantes, c'est-à-dire celles contribuant à plus de 80 % au résultat pondéré total. Cette approche ne sera

pas utilisée pour cette étude, le choix des catégories d'impact ayant été contraint par l'utilisation d'une base de données autre que la base de données EF qui ne proposait qu'une sélection restreinte de catégories d'impact (voir point 2.2.6).

Les facteurs de pondération utilisés pour chaque catégorie d'impact et les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 9 et la Figure 15 ci-dessous. À noter que la catégorie d'impact « Ecotoxicité - Eau douce » n'est pas prise en compte dans la méthode utilisée, elle n'est donc pas représentée dans les résultats.

ÉTAPE	Acidification (mol H+ eq.)	Changement climatique (kg CO2 eq.)	Consommation des ressources abiotiques – Éléments (kg Sb eq.)	Ecotoxicité - Eau douce (CTUe)	Particules fines (Cas de maladies)	Radiations ionisantes (kg U235 eq.)
Facteur de pondération (%)	6,64 %	22,19 %	8,08 %	-	9,54 %	5,37 %
Résultats pondérés (%)	2,60 %	8,32 %	21,13 %	-	3,69 %	2,39 %

[Tableau 9 - Résultats pondérés]



[Figure 15 - Résultats pondérés]

Remarque : la somme des résultats pondérés n'est pas égale à 100 %. Cela s'explique par le fait que les facteurs de pondération sont calculés en tenant compte de toutes les catégories d'impact définies par la méthode utilisée (voir Annexe B), tandis que seules six catégories sont prises en compte dans cette étude. Les résultats pondérés présentés ci-dessous ne donnent donc qu'une représentation partielle de l'impact environnemental global de l'œuvre étudiée.

Cette étape de pondération permet de relativiser l'impact environnemental des catégories choisies. En effet, si l'accent est souvent mis sur le changement climatique, ces résultats montrent que d'autres catégories moins souvent traitées comme la consommation de ressources abiotiques, qui représente environ 21 % de l'empreinte environnementale globale de l'œuvre étudiée, peuvent également avoir un poids important et ne doivent donc pas être négligées.

5. Interprétation

5.1. Analyse de contribution

Cette partie propose une analyse de la contribution des différentes étapes du cycle de vie et des processus qui y sont associés au résultat global pour chaque catégorie d'impact étudiée. Une présentation de la contribution des différentes étapes ayant été présentée au chapitre précédent, elle se concentrera sur la contribution des catégories de composants ou des processus impliqués dans chaque étape.

5.1.1. Production des composants

L'étape de production des composants, qui inclut l'extraction des matières premières, leur transformation, et l'assemblage des composants, est l'étape qui génère le plus d'impact pour cinq des six catégories étudiées. Elle représente ainsi entre 24,47 et 99,90 % des impacts, selon la catégorie concernée, ce qui en fait une des principales contributrices à l'impact environnemental total de l'œuvre.

Pour rappel, les composants ont été regroupés en sept catégories afin de simplifier la lecture des résultats (voir point 2.2.1) :

- Électronique
- Moteurs et éléments mécaniques
- Alimentation électrique
- Boîtiers
- Structure
- Visserie ;
- Caisses de transport.

Les Tableaux 10 et 11 ci-dessous présentent la contribution en valeurs absolue et relative de ces différentes catégories à l'étape de production des composants.

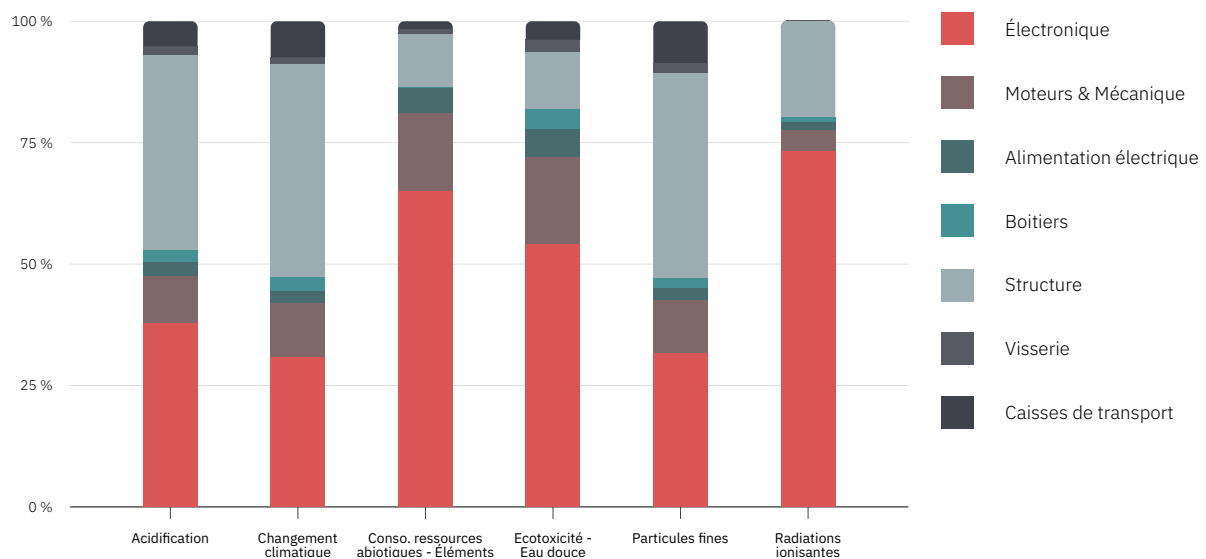
CATÉGORIE	Acidification (mol H+ eq.)	Changement climatique (kg CO2 eq.)	Consommation des ressources abiotiques – Éléments (kg Sb eq.)	Ecotoxicité - Eau douce (CTUe)	Particules fines (Cas de maladies)	Radiations ionisantes (kg U235 eq.)
Électronique	5,089E+00	6,668E+02	9,864E-02	3,841E+02	5,999E-05	3,369E+02
Moteurs & Mécanique	1,300E+00	2,371E+02	2,406E-02	1,271E+02	2,035E-05	2,040E+01
Alimentation électrique	3,718E-01	5,475E+01	8,048E-03	3,978E+01	4,648E-06	7,251E+00
Boîtiers	3,307E-01	6,093E+01	1,409E-05	3,037E+01	4,160E-06	4,532E+00
Structure	5,400E+00	9,455E+02	1,664E-02	8,207E+01	7,964E-05	9,107E+01
Visserie	2,209E-01	2,869E+01	1,474E-03	1,830E+01	3,591E-06	2,911E-01
Caisses de transport	6,904E-01	1,599E+02	2,411E-03	2,692E+01	1,620E-05	-7,261E-01
TOTAL Production comp.	1,340E+01	2,154E+03	1,513E-01	7,087E+02	1,886E-04	4,598E+02

[Tableau 10 - Contribution des différentes catégories de composants à l'étape de production des composants (valeurs absolues)]

CATÉGORIE	Acidification (mol H+ eq.)	Changement climatique (kg CO2 eq.)	Consommation des ressources abiotiques – Éléments (kg Sb eq.)	Ecotoxicité - Eau douce (CTUe)	Particules fines (Cas de maladies)	Radiations ionisantes (kg U235 eq.)
Électronique	37,97 %	30,96 %	65,20 %	54,20 %	31,81 %	73,29 %
Moteurs & Mécanique	9,70 %	11,01 %	15,90 %	17,94 %	10,79 %	4,44 %
Alimentation électrique	2,77 %	2,54 %	5,32 %	5,61 %	2,46 %	1,58 %
Boitiers	2,47 %	2,83 %	0,01 %	4,29 %	2,21 %	0,99 %
Structure	40,29 %	43,90 %	11,00 %	11,58 %	42,23 %	19,81 %
Visserie	1,65 %	1,33 %	0,97 %	2,58 %	1,90 %	0,06 %
Caisses de transport	5,15 %	7,42 %	1,59 %	3,80 %	8,59 %	-0,16 %
TOTAL Production comp.	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %

[Tableau 11 - Contribution des différentes catégories de composants à l'étape de production des composants (valeurs relatives)]

La Figure 16 reprend sous forme de graphique les résultats du tableau précédent.



[Figure 16 - Répartition des impacts liés à la production des composants par catégories de composants]

La catégorie Électronique s'avère être une contributrice majeure au résultat total de cette étape du cycle de vie, particulièrement pour les catégories d'impact « Consommation de ressources abiotiques - Éléments », « Ecotoxicité - Eau douce » et « Radiations ionisantes ». Cette contribution importante est à mettre au regard de la masse totale des composants électroniques, qui ne représentent que 1,47 % de la masse totale de l'œuvre incluant les caisses de transport. La production des rubans LEDs contribue très fortement aux impacts de cette étape, puisqu'ils génèrent à eux seuls 54,78 % de l'impact lié à la production des composants dans la catégorie « Consommation de ressources abiotiques - Éléments », 14,91 % de l'impact dans la catégorie « Changement climatique » et 17,39 % de l'impact dans la catégorie « Acidification ». Le poids environnemental important de ces composants provient principalement de la production des LEDs en tant que telles.

La catégorie Structure s'avère un autre poste de contribution important au résultat total de cette étape du cycle de vie, principalement pour les catégories « Changement climatique », « Acidification » et « Particules fines ». Cette contribution s'explique principalement par la production du métal (acier, aluminium) utilisé dans les

composants de cette catégorie, et, dans une moindre mesure, par le processus de découpe laser (pour la catégorie « Acidification »).

La catégorie Moteurs & éléments mécanique apparaît également comme une contributrice importante, bien que dans une moindre mesure par rapport aux catégories précédente. Cette contribution s'explique principalement par le processus de production des câbles en cuivre des moteurs pas à pas, or, comme présenté au point 3.4.1.2, il a été fait d'importantes hypothèses sur la quantité de câble utilisés dans ces composants. Il est donc probable que l'impact de ces composants, et donc de cette catégorie, soit surévalué, même s'il est difficile d'estimer dans quelle mesure.

5.1.2. Transport des composants

L'étape de transport des composant représente de 0,01 à 22,05 % des impacts selon les catégories concernées. Ce n'est donc pas l'étape contribuant le plus fortement au résultat total, même si sont importance dans certaines catégories d'impact n'est pas négligeable.

Pour cette analyse, il a été choisi d'utiliser une répartition par mode de transport, et non pas par type de composant afin de mieux mettre en avant l'impact générés par des achats « lointains » ayant nécessité l'utilisation de l'avion ou du bateau.

Les Tableaux 10 et 11 ci-dessous présentent la contribution en valeurs absolue et relative de ces différents modes de transport à l'étape de transport des composants.

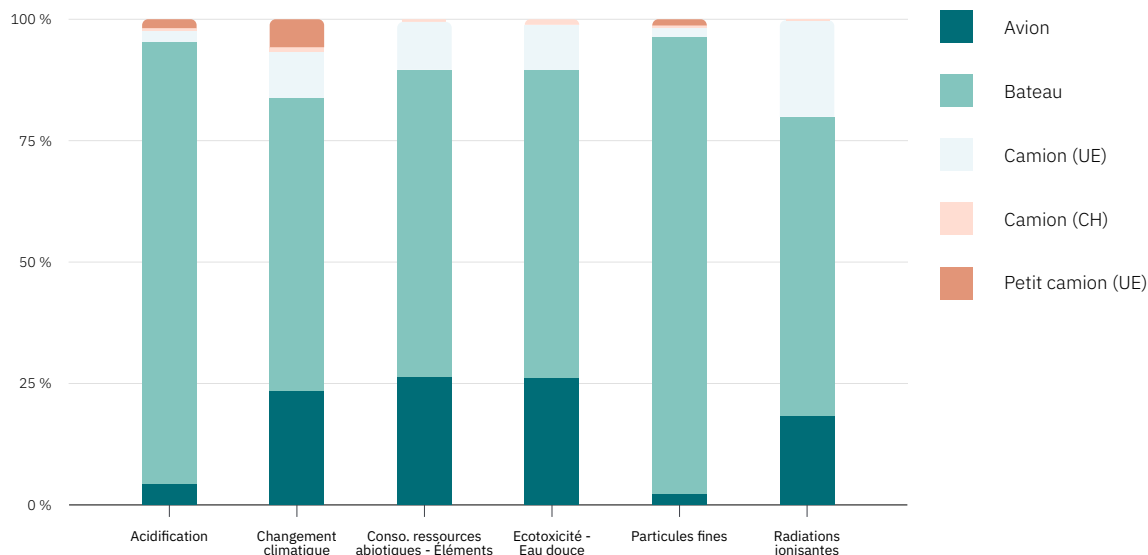
MODE DE TRANSPORT	Acidification (mol H+ eq.)	Changement climatique (kg CO2 eq.)	Consommation des ressources abiotiques – Eléments (kg Sb eq.)	Ecotoxicité - Eau douce (CTUe)	Particules fines (Cas de maladies)	Radiations ionisantes (kg U235 eq.)
Avion	2,030E-01	4,652E+01	2,918E-06	9,087E+00	7,968E-07	4,901E-02
Bateau	4,340E+00	1,192E+02	6,942E-06	2,215E+01	3,413E-05	1,636E-01
Camion (UE)	1,149E-01	1,875E+01	1,087E-06	3,185E+00	6,380E-07	5,287E-02
Camion (CH)	2,426E-02	2,006E+00	6,044E-08	3,971E-01	1,778E-07	5,536E-04
Petit camion	8,781E-02	1,140E+01	-5,802E-16	2,944E-06	4,629E-07	-1,317E-11
TOTAL Transport comp.	4,770E+00	1,979E+02	1,101E-05	3,482E+01	3,621E-05	2,660E-01

[Tableau 12 - Contribution des différentes modes de transport à l'étape de transport des composants (valeurs absolues)]

MODE DE TRANSPORT	Acidification (mol H+ eq.)	Changement climatique (kg CO2 eq.)	Consommation des ressources abiotiques – Eléments (kg Sb eq.)	Ecotoxicité - Eau douce (CTUe)	Particules fines (Cas de maladies)	Radiations ionisantes (kg U235 eq.)
Avion	4,26 %	23,51 %	26,51 %	26,10 %	2,20 %	18,43 %
Bateau	90,99 %	60,25 %	63,07 %	63,61 %	94,27 %	61,49 %
Camion (UE)	2,41 %	9,47 %	9,88 %	9,15 %	1,76 %	19,87 %
Camion (CH)	0,51 %	1,01 %	0,55 %	1,14 %	0,49 %	0,21 %
Petit camion	1,84 %	5,76 %	0,00 %	0,00 %	1,28 %	0,00 %
TOTAL Transport comp.	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %

[Tableau 13 - Contribution des différentes modes de transport à l'étape de transport des composants (valeurs relatives)]

La Figure 16 reprend sous forme de graphique les résultats du tableau précédent.



[Figure 17 - Répartition des impacts liés au transport des composants par mode de transport]

Le transport par bateau est de loin le principal contributeur à cette étape du cycle de vie, quelque soient les catégories d'impact considérées. Il a en effet été fait l'hypothèse que de nombreux composants provenant de Chine transitaient par ce mode de transport. C'est le cas en particulier du métal utilisé pour des éléments de structures et des composants mécaniques, dont il a été fait l'hypothèse qu'il avait été produit en Chine et transporté en bateau jusqu'en France. Ce type de composants représente à lui seul environ 72 % des impacts liés à ce mode de transport, toutes catégories d'impact confondues. Ces composants étant particulièrement lourds (les éléments de structure représentent plus de 32 % de la masse totale de l'œuvre incluant les caisses de transport), il est normal qu'ils aient une influence forte sur l'impact des modes de transport utilisés pour les transporter. L'hypothèse de l'origine du métal fait l'objet d'une analyse de sensibilité présentée au point 5.2.1.

L'avion est le second mode de transport contributeur pour toutes les catégories d'impact, hormis la catégorie «Radiation ionisantes». Il a été fait l'hypothèse qu'il avait été principalement utilisé pour le transport de certains composants électroniques commandés via des plateformes de vente en ligne et livrés rapidement. Son importance dans les résultats d'impact est à mettre au regard de la très faible masse totale des composants concernés, ce qui montre qu'il s'agit d'un mode de transport particulièrement coûteux d'un point de vue environnemental.

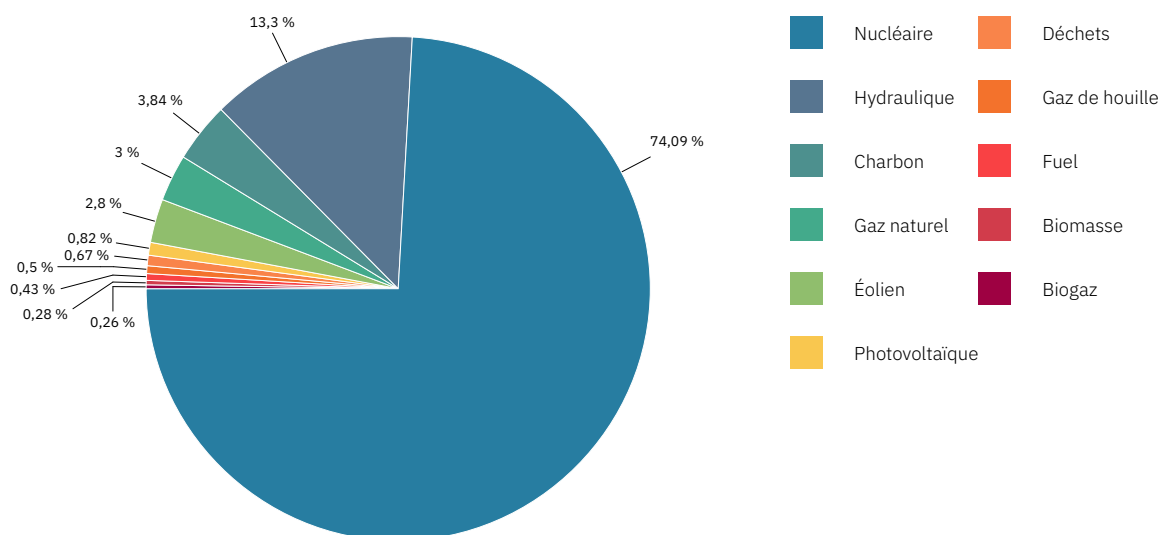
La dernière étape de transport des composants, assimilée à l'étape de livraison depuis le fournisseur final jusqu'au lieu d'assemblage, contribue marginalement aux résultats. Cela est dû à l'hypothèse faite lors de la modélisation qu'un petit camion (poids inférieur à 7,5 tonnes, voir point 3.4.2) était utilisé. Cette hypothèse semble réaliste dans le cas où il s'agit d'une livraison d'un petit composant, mais elle est sans doute relativement sous estimée car certains composants ont pu être livrés par un véhicule plus lourd, sans qu'il soit possible d'avoir plus d'informations. Ce choix n'a néanmoins que peu d'impact sur le résultat final.

5.1.3. Assemblage

L'étape d'assemblage correspond au montage de l'œuvre à Lyon, au sein des locaux du prestataire technique du studio Chevalvert. Comme expliqué au point 3.4.3, seule la consommation électrique des outils utilisés pour cet assemblage a été prise en compte, ce qui a donné lieu à un certain nombre d'hypothèse sur leur consommation. Cette étape a un impact environnemental marginal, de l'ordre de 0,01 à 0,54 % pour la plupart des catégories d'impact, hormis pour la catégorie «Radiation ionisantes» pour laquelle elle représente 6,49 % du total.

Sa part importante dans le résultat total de la catégorie « Radiation ionisantes » s’explique par le choix d’un mix électrique français pour modéliser la consommation électrique des outils, puisque l’assemblage a été effectué en France. Ce mix électrique se caractérise par une part importante d’électricité issue de l’énergie nucléaire, qui contribue fortement à cette catégorie.

La Figure 18 ci-dessous présente le mix électrique français tel que modélisé dans la base de données EF utilisée pour réaliser cette étude. Les données utilisées sont assez anciennes, puisqu’elles datent de 2013. Le mix électrique actuel se caractérise notamment par une part un peu moins importante du nucléaire (69% au lieu de 74%), et une part plus importante de l’éolien (7% au lieu de 2,8%)¹. Cette évolution aurait pu modifier à la marge la contribution de cette étape au résultat total, mais il a été jugé que cela n’aurait pas été significatif.



[Figure 18 - Mix électrique français modélisé dans la base de données EF (données 2013)]

5.1.4. Transport de l’œuvre

Une fois l’œuvre assemblée, elle est transportée jusqu’à son lieu d’exposition. Comme présenté au point 3.4.4, il a été fait l’hypothèse que ce transport était fait par un petit camion, c’est-à-dire un camion disposant d’une charge utile de 5 tonnes. Cette étape contribue de manière relativement importante au résultat total des catégories d’impact « Changement climatique », pour laquelle elle représente le deuxième poste de contribution, « Acidification » et « Particules fines », pour lesquelles elle représente le troisième poste de contribution.

Les impacts liés à cette étape sont fortement dépendant du mode de transport utilisé, mais aussi du nombre d’exposition et des distances parcourues entre le lieu de stockage de l’œuvre et le lieu d’exposition. La sensibilité des résultats de cette étape à ces différents paramètres a fait l’objet de différentes analyses de sensibilité détaillées au point 5.2.

5.1.5. Exposition

L’étape d’exposition de l’œuvre contribue de manière assez faible à toutes les catégories d’impact, sauf pour la catégorie « Radiations ionisantes » où pour laquelle elle est, de loin, l’étape la plus contributrice, à hauteur d’environ 69 % du résultat total.

¹ Voir le bilan électrique 2021 de RTE [39]

Comme pour l'étape d'assemblage, seule la consommation d'électricité a été prise en compte et le mix électrique français a été utilisé pour la modélisation. La contribution de cette étape au résultat de la catégorie « Radiations ionisantes » s'explique donc par la part importante du nucléaire dans le mix électrique choisi, ainsi que par la consommation électrique relativement importante de l'oeuvre (345,6 kWh pour une exposition) durant son temps d'exposition. Cette spécificité du mix électrique français explique également la faible contribution de cette étape aux autres catégories d'impact.

Conformément à l'unité fonctionnelle définie au point 2.2.3, il a été fait l'hypothèse que l'oeuvre n'était exposée qu'en France, et ne dépendait donc que du mix électrique français. La sensibilité des résultats de cette étape à l'utilisation d'autres mix électriques, c'est-à-dire au fait qu'elle puisse être exposée dans d'autres pays, est présentée au point 5.2.5.

5.2 Analyses de sensibilité

Cette partie vise à tester la sensibilité des résultats finaux à certains paramètres ou hypothèses utilisés dans l'étude. On va donc chercher à tester d'autres hypothèses ou à faire varier certains paramètres pour comparer le résultat obtenu au scénario de référence, basé sur l'unité fonctionnelle définie au point 2.2.3 et correspondant aux paramètres et hypothèses dont le résultat a été présenté dans les parties précédentes.

5.2.1. Origine du métal de la structure et de certains composants mécaniques

Cette première analyse propose de tester la sensibilité des résultats à l'origine du métal (acier et aluminium) utilisé pour la structure et pour certains composants mécaniques. Il a en effet été fait l'hypothèse que l'acier et l'aluminium avaient été produits en Chine puis acheminés jusqu'au fournisseur en charge de la transformation des composants, avant d'être transportés jusqu'au lieu d'assemblage. Afin de comprendre quelle influence cette hypothèse a dans les résultats, nous comparerons ici les résultats du scénario de référence avec un scénario dans lequel il est fait l'hypothèse que ce métal avait été produit en Europe.

Les composants concernés sont :

- Les composants en acier réalisés par tournage présents dans la catégorie « Moteur et éléments mécaniques » : poulie pivot, poulie moteur, axe pivot, entretoise moteur ;
- Les éléments en acier de la catégorie « Structure » : mâts (parties basse, haute, haute compartiment roulement), platine moteur, platine jonction pivot, platine embase du mât, goussets ;
- Le profilé en aluminium utilisé pour le bras.

Cette hypothèse implique différents changements dans les processus et paramètres utilisés :

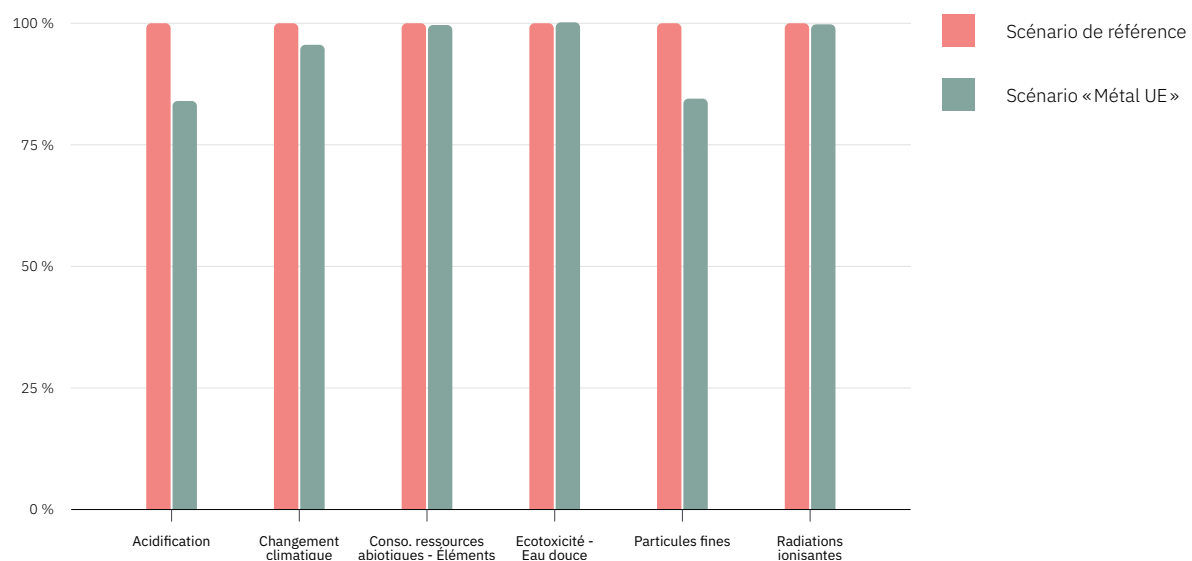
- La production de l'acier, qui dans le scénario de référence repose sur des données mondiales, est ici remplacée par un processus basé sur des données européennes. Le type d'acier (acier laminé à froid) reste inchangé.
- Lorsque cela était possible, des processus de transformation de l'acier reposant sur des données européennes plutôt que mondiales ont été utilisés, bien que cela n'ait pas toujours été possible faute d'options disponibles dans la base de données utilisée.
- Les processus de production et de transformation de l'aluminium utilisés pour le scénario de référence reposaient déjà sur des données européennes, faute d'autres options dans la base de données utilisée. Ils n'ont donc pas été modifiés.
- Les transports en bateau depuis la Chine puis en camion depuis le port d'arrivée jusqu'au site du fournisseur des composants concernés ont été remplacés par un unique trajet en camion de 3500 km. Les trajets en petit camion du site du fournisseur jusqu'au lieu d'assemblage n'ont pas été modifiés.

Tous les autres paramètres sont identiques aux deux scénarios.

Le Tableau 14 ci-dessous présente la variation des résultats des différentes catégories d'impact du scénario se basant sur un métal produit en Europe par rapport au scénario de référence. La Figure 19 reprend ces résultats sous forme de graphique.

ÉTAPE	Acidification (mol H+ eq.)	Changement climatique (kg CO2 eq.)	Consommation des ressources abiotiques – Éléments (kg Sb eq.)	Ecotoxicité - Eau douce (CTUe)	Particules fines (Cas de maladies)	Radiations ionisantes (kg U235 eq.)
Production des composants	-3,19 %	-3,26 %	-0,36 %	+1,82 %	-7,34 %	-0,89 %
Transport des composants	-63,82 %	-29,65 %	-31,10 %	-32,67 %	-67,30 %	-13,91 %
Assemblage	-	-	-	-	-	-
Transport de l'œuvre	-	-	-	-	-	-
Exposition	-	-	-	-	-	-
TOTAL	-15,99 %	-4,43 %	-0,36 %	+0,19 %	-15,50 %	-0,22 %

[Tableau 14 - Variation des résultats entre le scénario « Métal UE » et le scénario de référence]



[Figure 19 - Influence de l'origine du métal sur les résultats]

De manière logique, ce scénario n'a d'influence que sur les étape de production et de transport des composants. On constate des variations significatives des résultats pour les catégories « Acidification » et « Particules fines », une variation modérée pour la catégorie « Changement climatique », et peu de variations pour les autres catégories.

Ces résultats montre que l'origine du métal peut avoir une importance significative dans les résultats finaux, et que des investigations supplémentaires seraient nécessaires pour mieux connaître l'origine du métal réellement utilisé dans l'œuvre étudiée. Ils montrent également que cette origine du métal est un point d'attention à avoir lors de la conception d'œuvres similaires.

5.2.2. Nombre d'expositions

Le scénario de référence se base sur un nombre d'expositions défini par l'unité fonctionnelle, soit 5 expositions. Il est néanmoins possible que l'oeuvre soit amenée à tourner plus ou moins. Cette analyse propose donc de

tester la sensibilité des résultats au nombre d'expositions de l'œuvre.

Le nombre d'expositions a une influence sur :

- La distance totale parcourue lors de l'étape de transport de l'œuvre ;
- La consommation électrique totale de l'étape d'exposition.

Pour cette analyse, deux scénarios ont été définis et comparés au scénario de référence : un premier dans lequel il est fait l'hypothèse que l'œuvre est moins exposée que dans le scénario de référence (3 expositions), et un second dans lequel elle l'est plus (8 expositions). Le premier scénario est appelé N3, le second N8.

Tous les autres paramètres et hypothèses sont inchangés par rapport au scénario de référence.

Les Tableaux 15 et 16 présentent les variations des résultats par rapport au scénario de référence pour les scénarios N3 et N8. La Figure 20 rassemble ces deux tableaux et reprend les résultats sous forme de graphique.

ÉTAPE	Acidification (mol H+ eq.)	Changement climatique (kg CO2 eq.)	Consommation des ressources abiotiques – Éléments (kg Sb eq.)	Ecotoxicité - Eau douce (CTUe)	Particules fines (Cas de maladies)	Radiations ionisantes (kg U235 eq.)
Production des composants	-	-	-	-	-	-
Transport des composants	-	-	-	-	-	-
Assemblage	-	-	-	-	-	-
Transport de l'œuvre	-40,00 %	-40,00 %	-	-40,00 %	-40,00 %	-
Exposition	-40,00 %	-40,00 %	-40,00 %	-40,00 %	-40,00 %	-40,00 %
TOTAL	-6,42 %	-7,45 %	-0,03 %	-1,60 %	-3,43 %	-27,61 %

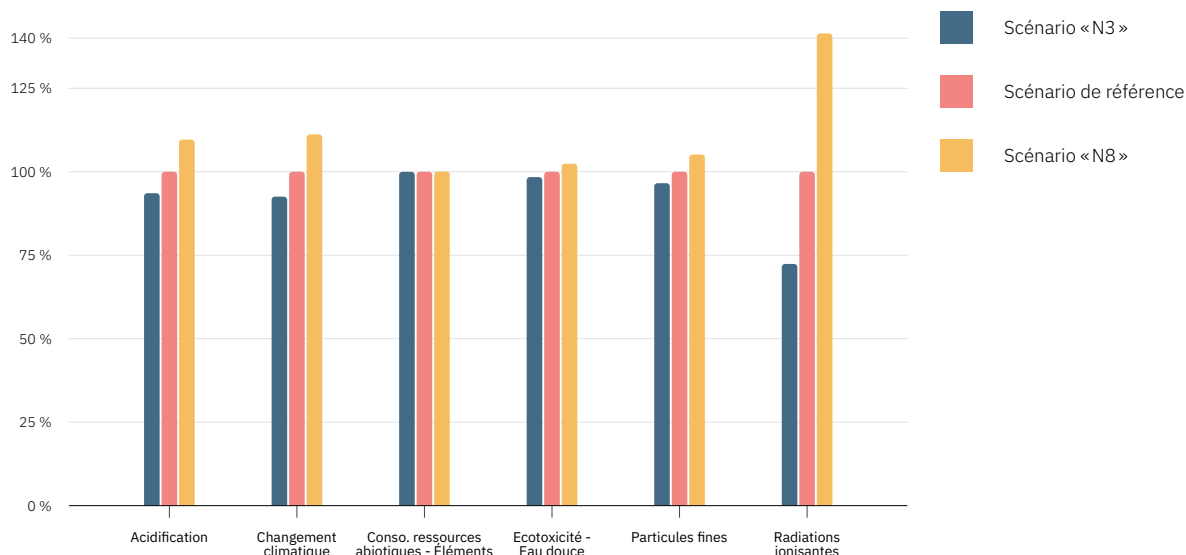
[Tableau 15 - Variation des résultats entre le scénario « N3 » et le scénario de référence]

ÉTAPE	Acidification (mol H+ eq.)	Changement climatique (kg CO2 eq.)	Consommation des ressources abiotiques – Éléments (kg Sb eq.)	Ecotoxicité - Eau douce (CTUe)	Particules fines (Cas de maladies)	Radiations ionisantes (kg U235 eq.)
Production des composants	-	-	-	-	-	-
Transport des composants	-	-	-	-	-	-
Assemblage	-	-	-	-	-	-
Transport de l'œuvre	+60,00 %	+60,00 %	-	+60,00 %	+60,00 %	-
Exposition	+60,00 %	+60,00 %	+60,00 %	+60,00 %	+60,00 %	+60,00 %
TOTAL	+9,63 %	+11,18 %	+0,05 %	+2,39 %	+5,14 %	+41,42 %

[Tableau 16 - Variation des résultats entre le scénario « N8 » et le scénario de référence]

Cette analyse montre une forte sensibilité des résultats au nombre de tournée pour la catégorie «Radiations ionisantes», ce qui n'est pas surprenant étant donné la dépendance de cette catégorie à l'électricité consommée lors de l'étape d'exposition. Les catégories «Acidification», «Changement climatique» et «Particules fines» montrent également une sensibilité significative à la variation de ce paramètre.

Si le nombre d'expositions n'est pas réellement un paramètre sur lequel il est possible de jouer lors de la conception de l'œuvre, cette analyse montre qu'il influe tout de même significativement sur ses impacts environnementaux. Comme dit précédemment, l'influence de ce paramètre est étroitement liée aux distances



[Figure 20 - Influence du nombre de tournées sur les résultats]

parcourues entre le lieu de stockage et les lieux d'exposition ainsi qu'à la consommation électrique de l'œuvre en fonctionnement. Ces résultats invitent à affiner la connaissance de la consommation électrique réelle, ainsi qu'à conduire des réflexions visant à optimiser cette consommation électrique dans une démarche d'éco-conception.

5.2.3. Distances parcourues lors du transport de l'œuvre

Comme défini par l'unité fonctionnelle, le scénario de référence se base sur une distance moyenne de 500 km (soit une distance parcourue totale de 1000 km en intégrant le retour) entre le lieu de stockage de l'œuvre, à Lyon, et les lieux d'exposition. L'hypothèse de ce scénario de référence est donc que les lieux d'exposition sont plutôt situés en France. Il est néanmoins possible que l'œuvre soit amenée à être présentée à l'étranger, ou dans des villes plus éloignées de Lyon.

Pour tester la sensibilité des résultats aux distances parcourues, cette analyse compare le scénario de référence à un scénario dans lequel la distance moyenne séparant le lieu de stockage du lieu d'exposition est portée à 750 km, soit une distance totale parcourue de 1500 km, tous les autres paramètres et hypothèses restant inchangés par rapport au scénario de référence.

Cette augmentation de la distance parcourue n'a d'influence que sur l'étape de transport de l'œuvre.

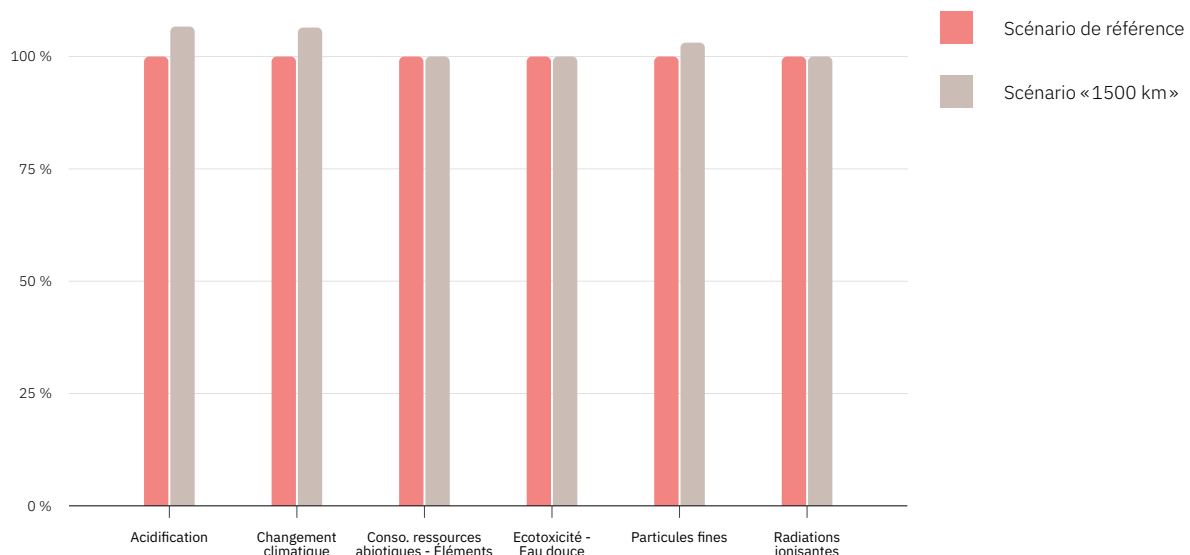
Le Tableau 17 présente les variations des résultats par rapport au scénario de référence, et la Figure 21 reprend ces résultats sous forme de graphique.

Comme le montrent le tableau et le graphique ci-dessous, l'allongement de la distance parcourue influence significativement les résultats des catégories «Acidification» et «Changement climatique», et, dans une moindre mesure, la catégorie «Particules fines». Cela s'explique par le fait que le transport s'effectuant en camion à moteur thermique, mode de transport qui contribue directement à ces catégories d'impact.

La question de la distance parcourue par l'œuvre s'avère donc un paramètre pouvant jouer de manière significative sur les résultats finaux, même si elle ne modifie pas fondamentalement les conclusions de l'étude, notamment au niveau de la contribution des différentes étapes du cycle de vie qui reste sensiblement similaire au scénario de référence.

ÉTAPE	Acidification (mol H+ eq.)	Changement climatique (kg CO2 eq.)	Consommation des ressources abiotiques – Éléments (kg Sb eq.)	Ecotoxicité - Eau douce (CTUe)	Particules fines (Cas de maladies)	Radiations ionisantes (kg U235 eq.)
Production des composants	-	-	-	-	-	-
Transport des composants	-	-	-	-	-	-
Assemblage	-	-	-	-	-	-
Transport de l'œuvre	+50,00 %	+50,00 %	-	+50,00 %	+50,00 %	-
Exposition	-	-	-	-	-	-
TOTAL	+6,67 %	+6,46 %	0,00 %	0,00 %	+3,10 %	0,00 %

[Tableau 17 - Variation des résultats entre le scénario « 1500 km » et le scénario de référence]



[Figure 21 - Influence de la distance parcourue lors du transport de l'œuvre sur les résultats]

5.2.4. Mode de transport utilisé pour le transport de l'œuvre

Dans le scénario de référence, le transport de l'œuvre est assuré par camion. Ce mode de transport correspond au mode de transport habituellement utilisé pour des œuvres de ce type, et est donc a priori semblable au mode de transport réellement utilisé. Cependant, on pourrait imaginer qu'une partie du trajet soit effectué en train, dans un souci de diminution des émissions de gaz à effet de serre liées au transport de l'œuvre.

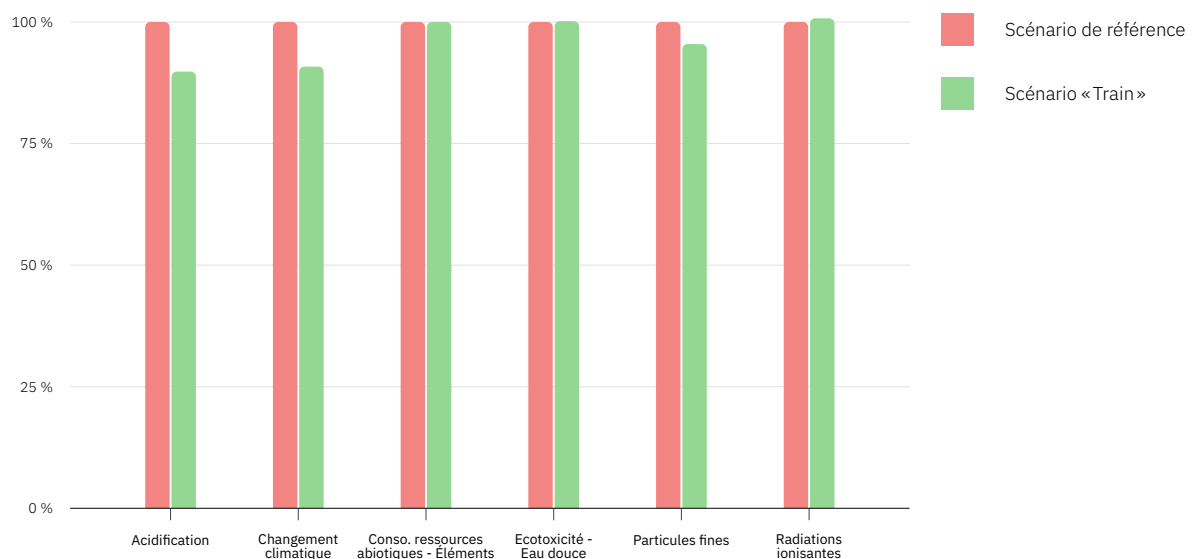
Cette analyse propose ainsi d'évaluer la sensibilité des résultats au mode de transport choisi pour transporter l'œuvre de son lieu de stockage à son lieu d'exposition. Contrairement aux autres analyses de sensibilité présentées dans ce chapitre, il ne s'agit pas ici d'évaluer la sensibilité des résultats à une hypothèse ou un paramètre de l'étude, étant donné qu'il existe peu d'incertitude quant au mode de transport réellement utilisé, mais plutôt de comparer le scénario de référence à une alternative a priori plus vertueuse d'un point de vue environnemental.

Dans ce scénario, il est supposé que 80 % du trajet de transport de l'œuvre est effectué en train, et les 20 % restant en petit camion afin de prendre en compte le trajet depuis et vers la gare. Un processus de la base de données EF modélisant le transport par train basé sur des données européennes est utilisé.

Le Tableau 18 présente les variations des résultats par rapport au scénario de référence, et la Figure 22 reprend ces résultats sous forme de graphique.

ÉTAPE	Acidification (mol H+ eq.)	Changement climatique (kg CO2 eq.)	Consommation des ressources abiotiques – Éléments (kg Sb eq.)	Ecotoxicité - Eau douce (CTUe)	Particules fines (Cas de maladies)	Radiations ionisantes (kg U235 eq.)
Production des composants	-	-	-	-	-	-
Transport des composants	-	-	-	-	-	-
Assemblage	-	-	-	-	-	-
Transport de l'œuvre	-76,50 %	-71,04 %	-	+1396850,48 %	-73,26 %	-
Exposition	-	-	-	-	-	-
TOTAL	-10,20 %	-9,18 %	+0,01 %	+0,17 %	-4,54 %	+0,75 %

[Tableau 18 - Variation des résultats entre le scénario « Train » et le scénario de référence]



[Figure 22 - Influence du mode de transport de l'oeuvre sur les résultats]

Remarque : dans le Tableau 18, on constate une variation du résultat de la catégorie « Ecotoxicité » extrêmement importante pour l'étape de transport de l'oeuvre, tandis que cette variation est négligeable sur l'ensemble du cycle de vie. Cette variation s'explique par le fait que le mode de transport choisi pour le scénario de référence (petit camion) contribue de manière quasi nulle à cette catégorie. Le train y contribue plus fortement, ce qui explique la variation importante à cette étape du cycle de vie, mais cette contribution reste marginale une fois l'ensemble des étapes prises en compte.

Cette analyse montre que le choix de transporter principalement l'oeuvre par train peut avoir une influence non négligeable sur ses impacts environnementaux, principalement pour les catégories « Acidification » et « Changement climatique ». Plus qu'un choix de conception, il s'agit ici d'un choix de diffusion qui gagnerait à mieux être pris en compte par les artistes, même s'il pose d'autres problèmes par ailleurs (coût, complexité de mise en oeuvre,...).

5.2.5. Mix électrique du lieu d'exposition

Le scénario de référence repose sur l'hypothèse d'une œuvre diffusée en France, et donc alimentée par le mix électrique français lors de son étape d'exposition. La composition de ce mix est présentée au point 5.1.3.

Comme le montrent les résultats présentés au chapitre 4, la composition de ce mix fait que cette étape du cycle de vie contribue peu aux différentes catégories d'impact, hormis pour la catégorie « Radiation ionisantes » pour laquelle il représente environ 69 % du résultat.

Il est néanmoins possible que l'œuvre soit, à moment ou à un autre, présentée dans un pays autre que la France, et donc doté d'un mix électrique différent. Dans cette analyse, il est ainsi étudié la sensibilité des résultats à différents mix électriques de pays européens. Deux scénarios sont comparés au scénario de référence :

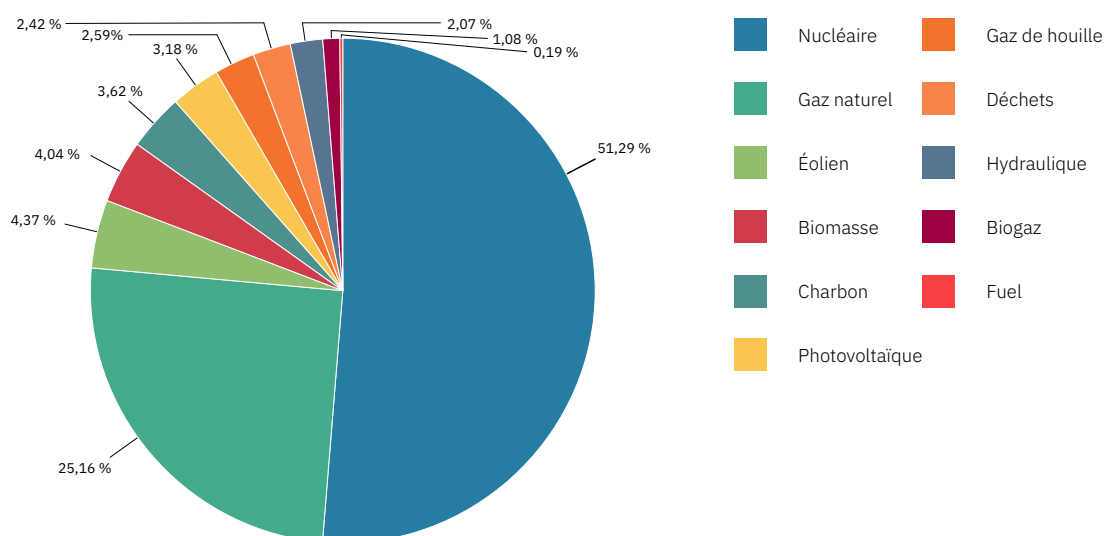
- Un premier dans lequel une des cinq expositions a lieu en Belgique (scénario « BE »), les quatre autres ayant lieu en France ;
- Un second dans lequel une des cinq expositions a lieu en Belgique et une autre en Allemagne (scénario « BE + DE »), les trois autres ayant lieu en France.

Les mix électriques de ces deux pays utilisés pour la modélisation des processus de la base de données EF sont présentés dans les Figures 23 et 24 ci-dessous.

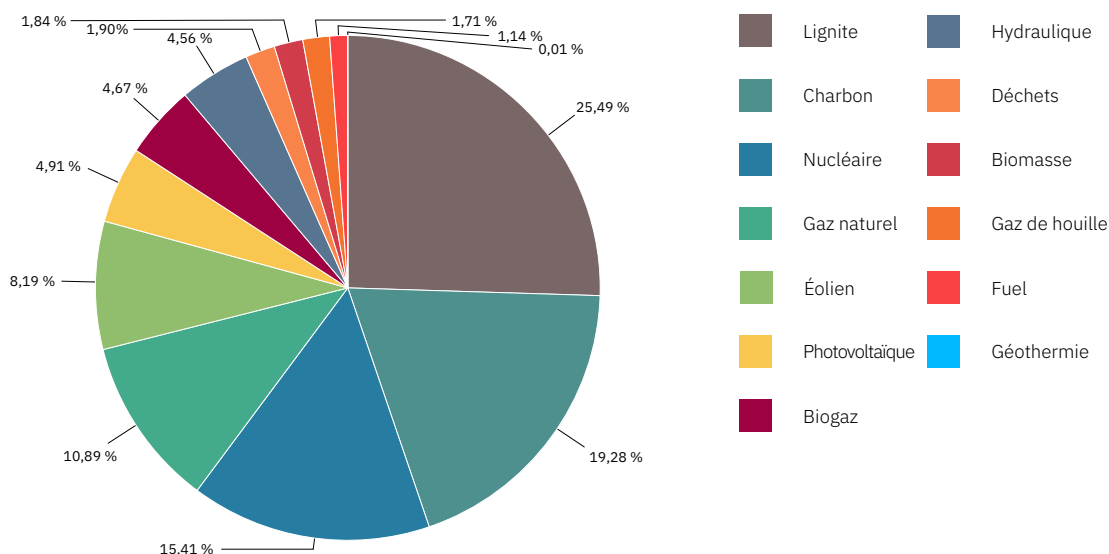
Dans cette analyse, seul le mix électrique utilisé pour l'étape d'exposition diffère du scénario de référence. Tous les autres paramètres et hypothèses sont inchangés par rapport au scénario de référence.

Les Tableaux 19 et 20 présentent les variations des résultats par rapport au scénario de référence pour les scénarios « BE » et « BE + DE ». La Figure 25 rassemble ces deux tableaux et reprend les résultats sous forme de graphique.

Cette analyse montre que le mix électrique du pays du lieu d'exposition peut avoir une influence significative sur les catégories « Changement climatique » (pour le scénario « BE + DE ») et « Radiations ionisantes », qui s'explique par les modes de production d'électricité des pays concernés, plus ou moins carbonés. Là encore, cette analyse ne permet pas d'orienter des choix de conception, puisque ces résultats sont indépendants de l'œuvre en tant que telle. Elle permet cependant de montrer que le résultat de l'analyse est dépendant des hypothèses faites au moment du choix de l'unité fonctionnelle.



[Figure 23 - Mix électrique belge modélisé dans la base de données EF (données 2013)]



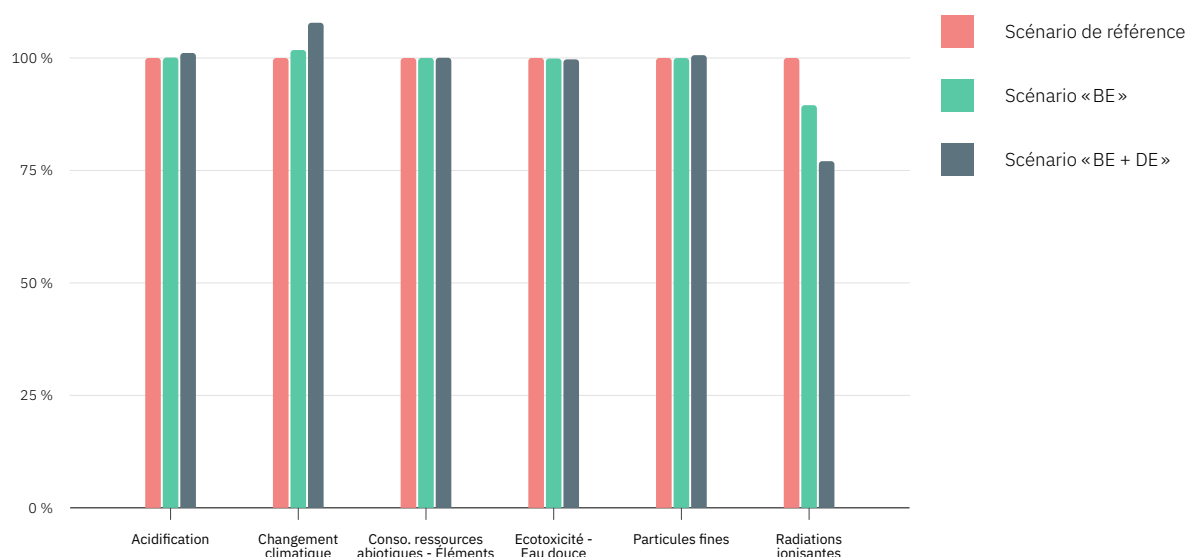
[Figure 24 - Mix électrique allemand modélisé dans la base de données EF (données 2013)]

ÉTAPE	Acidification (mol H+ eq.)	Changement climatique (kg CO2 eq.)	Consommation des ressources abiotiques – Éléments (kg Sb eq.)	Ecotoxicité - Eau douce (CTUe)	Particules fines (Cas de maladies)	Radiations ionisantes (kg U235 eq.)
Production des composants	-	-	-	-	-	-
Transport des composants	-	-	-	-	-	-
Assemblage	-	-	-	-	-	-
Transport de l'œuvre	-	-	-	-	-	-
Exposition	+3,76 %	+30,92 %	+15,44 %	-3,13 %	-0,79 %	-15,20 %
TOTAL	+0,10 %	+1,77 %	+0,01 %	-0,12 %	-0,02 %	-10,49 %

[Tableau 19 - Variation des résultats entre le scénario « BE » et le scénario de référence]

ÉTAPE	Acidification (mol H+ eq.)	Changement climatique (kg CO2 eq.)	Consommation des ressources abiotiques – Éléments (kg Sb eq.)	Ecotoxicité - Eau douce (CTUe)	Particules fines (Cas de maladies)	Radiations ionisantes (kg U235 eq.)
Production des composants	-	-	-	-	-	-
Transport des composants	-	-	-	-	-	-
Assemblage	-	-	-	-	-	-
Transport de l'œuvre	-	-	-	-	-	-
Exposition	+40,76 %	+136,96 %	+65,20 %	-7,79 %	+26,64 %	-33,23 %
TOTAL	+1,11 %	+7,83 %	+0,05 %	-0,31 %	+0,63 %	-22,94 %

[Tableau 20 - Variation des résultats entre le scénario « BE + DE » et le scénario de référence]



[Figure 25 - Influence du mix électrique du lieu d'exposition sur les résultats]

5.3. Évaluation de la qualité des données

5.3.1. Contrôle de complétude et de cohérence

Complétude

Selon la norme ISO 14044, le contrôle de complétude vise à vérifier que toutes les informations pertinentes et les données requises pour l'interprétation sont disponibles et complètes.

Dans le cadre de cette étude, toutes les étapes du cycle de vie de l'œuvre (hormis la fin de vie) ainsi que tous les composants ont été pris en compte. Néanmoins, certains processus liés à la fabrication de composants n'ont pas pu être intégrés, ou seulement partiellement, principalement du fait de manquements dans la base de données utilisée qui ont empêché leur modélisation ou d'informations non disponibles dans la nomenclature.

L'Annexe F présente de manière détaillée les processus pris en compte dans l'étape de production des composants. Pour l'étape d'assemblage, seul le processus de soudage a été partiellement pris en compte, puisque seule sa consommation d'électricité a pu être modélisée. Pour les étapes de transport de l'œuvre et d'exposition, tous les processus ont pu être pris en compte.

Cohérence

La même méthodologie a été appliquée tout au long de l'étude, s'efforçant de respecter dans les normes ISO 14040 et 14044.

Toutes les données utilisées pour la modélisation proviennent de la base de données EF, à l'exception de la modélisation des haut-parleurs et des câbles RJ45 qui ont été faite à l'aide de la base de données NegaOctet.

5.3.2. Représentativité

L'évaluation de la qualité des données est faite en utilisant trois critères¹ :

- La représentativité temporelle (TiR) ;
- La représentativité technologique (TeR) ;
- La représentativité géographique (GR).

Cette représentativité caractérise le niveau auquel les processus utilisés pour la modélisation décrivent le système étudié, et permet donc d'évaluer leur qualité.

Pour chaque donnée utilisée, et pour chaque critère de représentativité, une note de 1 à 5 est donnée, 1 correspondant à la meilleure qualité et 5 à la moins bonne. Le Tableau 21 ci-dessous présente les critères de notation pour les trois critères de représentativité :

Note	TiR	TeR	GR
1	La date de publication du rapport se situe dans la période de validité de l'ensemble de données	La technologie utilisée dans l'étude est exactement la même que celle couverte par l'ensemble de données	Le processus modélisé dans l'étude a lieu dans le pays pour lequel l'ensemble de données est valide
2	La date de publication du rapport se situe au plus tard 2 ans après la date de validité de l'ensemble de données	Les technologies utilisées dans l'étude sont incluses dans l'ensemble des technologies couvertes par l'ensemble de données	Le processus modélisé dans l'étude a lieu dans la région géographique (par exemple l'Europe) pour laquelle l'ensemble de données est valide
3	La date de publication du rapport se situe au plus tard 4 ans après la date de validité de l'ensemble de données	Les technologies utilisées dans l'étude ne sont que partiellement incluses dans le périmètre de l'ensemble de données.	Le processus modélisé dans l'étude a lieu dans l'une des régions géographiques pour lesquelles l'ensemble de données est valide
4	La date de publication du rapport se situe au plus tard 6 ans après la date de validité de l'ensemble de données	Les technologies utilisées dans l'étude sont similaires à celles incluses dans le périmètre de l'ensemble de données.	Le processus modélisé dans l'étude a lieu dans un pays qui n'est pas inclus dans la ou les régions géographiques pour lesquelles l'ensemble de données est valide, mais des similitudes suffisantes sont estimées sur la base d'un avis d'expert
5	La date de publication du rapport EE est postérieure de 6 ans à la date de validité de l'ensemble de données	Les technologies utilisées dans l'étude sont différentes de celles incluses dans le périmètre de l'ensemble de données	Le processus modélisé dans l'étude a lieu dans un pays différent de celui pour lequel l'ensemble de données est valide

[Tableau 21 - Critères de notation pour la représentativité des données]

L'Annexe G présente le résultat de cette notation pour tous les processus pris en compte.

Représentativité temporelle

Les données utilisées pour la modélisation provenaient principalement de la base de donnée Environnemental Footprint 2.0 (EF) fournie par la JRC-EC. La période de validité de ces données s'étendait jusqu'au 1^{er} janvier 2020, cette étude a donc été réalisée au plus tard 4 ans après la date de validité de l'ensemble des données. Certaines données ont été extraites de la base de données NegaOctet, pour laquelle il a été considéré que la période de validité des données était encore en cours au moment de la finalisation de cette étude. La représentativité temporelle des données est donc jugée acceptable.

¹ Cette approche est définie par le référentiel PEF, et est présentée dans le PEF Guide version 6.3, Chapitre 7.19.2.2 [38]. À noter que ce guide préconise l'utilisation d'un quatrième critère, la précision de la mesure des données, qui n'a pas été utilisé dans cette étude étant donné qu'elle ne se base que sur des données secondaires.

Représentativité technologique

La représentativité technologique varie suivant les processus utilisés pour la modélisation. Dans la plupart des cas, il a été cherché à modéliser au plus proche du réel les processus impliqués dans les différentes étapes du cycle de vie de l'œuvre étudiée. Dans certains cas, il a été choisi d'utiliser des processus issus de la base de données EF n'étant pas exactement ceux en théorie utilisés réellement, mais s'en approchant fortement (c'est le cas par exemple des processus de production des cartes électroniques ou des LEDs). Quand aucun processus jugé suffisamment proche n'était disponible dans la base de données utilisée, il a été choisi de les exclure de l'étude (c'est le cas par exemple du processus de tournage utilisé dans la production de certains composants mécaniques). Certains composants dont les matériaux ou les processus de fabrication n'étaient ni connus et ni disponible dans la base de données utilisée ont été modélisés en s'appuyant sur des données de la littérature décrivant la composition de composants plus ou moins similaires, de manière à pouvoir modéliser à minima l'extraction et la transformation des matériaux (c'est le cas par exemple des moteurs ou des blocs d'alimentation). Les caractéristiques techniques et les matériaux de ces composants pouvaient différer de celles des composants réellement utilisés dans l'œuvre, mais il a été supposé qu'ils étaient suffisamment proches pour pouvoir être utilisés. La représentativité technologique des données est donc perfectible.

Représentativité géographique

Il a été choisi de privilégier la représentativité technologique à la représentativité géographique. Ainsi, certains processus issus de la base de données EF ont permis de modéliser de manière relativement précise des processus réels, mais reposaient sur des données situées dans des régions géographiques différentes. La représentativité géographique des données est donc elle aussi perfectible.

5.4. Limites

En premier lieu, il est important de rappeler que cette étude ne s'applique qu'à l'œuvre étudiée, Far Away, et en tenant compte du périmètre présenté au chapitre 2. Les résultats ne peuvent donc pas en l'état être extrapolés à d'autres œuvres d'art numérique. Par ailleurs, cette étude permet d'obtenir une idée globale des impacts environnementaux de cette œuvre, mais elle ne permet pas de les chiffrer avec précision. Il est également important de rappeler qu'une analyse de cycle de vie représente des impacts environnementaux potentiels et non réels.

5.4.1. Non prise en compte de l'étape de fin de vie

L'étape de fin de vie de l'œuvre n'a pas été prise en compte, faute d'informations à son sujet. Cette absence limite la portée de l'étude, car cette étape peut potentiellement jouer un rôle important (positif comme négatif) dans les résultats. Cette étude ne présente donc qu'une vision partielle des impacts environnementaux générés par cette œuvre.

5.4.2. Données manquantes

Comme présenté au chapitres 2 et 3, un certain nombre de données liées aux composants utilisés étaient manquantes (quantité, matériaux, processus de fabrication, etc), ce qui a conduit à émettre un grand nombre d'hypothèses. De plus, aucune donnée primaire concernant les impacts environnementaux n'étant disponible, il a été nécessaire de s'appuyer uniquement sur des données secondaires. Ces deux points sont potentiellement générateurs d'incertitudes et d'imprécisions, qu'il n'a pas été possible de quantifier.

5.4.3. Représentativité de la base de données utilisée

Cette étude s'est très largement appuyée sur la base de données EF pour modéliser le système étudié. Or, un certain nombre de processus mis en œuvre n'étaient pas disponibles dans cette base de données, tandis que d'autres l'étaient mais ne couvraient pas nécessairement la bonne zone géographique. Cela a conduit à ne pas prendre en compte certains processus, entraînant une sous-estimation probable des impacts environnementaux de l'œuvre.

5.4.4. Absence d'évaluation de certains impacts

Pour différentes raisons méthodologiques présentées au point 2.2.6, seuls certaines catégories d'impact ont été prises en compte. Les résultats ne donnent donc qu'une vision partielle des impacts potentiellement générés par l'œuvre.

5.4.6. Absence de revue critique

Cette étude n'a pas fait l'objet d'une revue critique, qui aurait permis de s'assurer de la qualité de la méthodologie employée.

6. Conclusion

Cette étude visait à mieux comprendre les impacts environnementaux générés par une œuvre d'art numérique - en l'occurrence l'œuvre Far Away du studio Chevalvert - lors des différentes étapes de son cycle de vie, en quantifiant les impacts environnementaux potentiels de cette œuvre, et en identifiant les étapes du cycle de vie ainsi que les composants et choix techniques ayant le plus d'impact.

Les résultats montrent que cette œuvre a un impact potentiel particulièrement important au niveau de la consommation de ressources abiotiques (c'est-à-dire au niveau de l'épuisement de ressources minérales), qui représente environ 21 % de son empreinte environnementale globale. Si sa contribution au réchauffement climatique, indicateur le plus scruté à l'heure actuelle, n'est pas négligeable (il est estimé qu'elle a potentiellement généré environ 3 tonnes de CO₂ au cours de son cycle de vie), cette forte consommation de ressources non renouvelables invite à prendre également en compte d'autres catégories d'impact pouvant elles aussi contribuer fortement à l'empreinte environnementale de l'œuvre.

La production des composants utilisés dans cette œuvre est l'étape contribuant le plus fortement à cinq des six catégories d'impact retenues, à hauteur de 24 à 100 % en fonction de la catégorie d'impact. La production composants électroniques représente un poids environnemental particulièrement important : si elle ne représente qu'environ 1,5 % de la masse totale de l'œuvre, cette catégorie de composants contribue de 18 à 65 % aux résultats finaux, ce qui est considérable. Par ailleurs, les étapes de transport de l'œuvre et d'exposition contribuent de manière non négligeable aux résultats finaux, notamment dans la catégorie d'impact «Radiations ionisantes» pour l'étape d'exposition qui y contribue à hauteur d'environ 70 %. Ces deux étapes sont cependant particulièrement sensibles aux hypothèses faites dans le cadre de cette étude, notamment le nombre d'expositions et leur localisation géographique.

Le poids environnemental important de l'étape de production des composants découle directement de choix de conception : une attention particulière portée aux types, à la quantité et à l'origine des composants aurait permis de diminuer les impacts environnementaux d'une œuvre comme Far Away. L'emploi de composants électroniques issus d'œuvres obsolètes, ou achetés via des circuits de réemploi, aurait notamment permis de faire diminuer la contribution de cette catégorie de composants. Cette réflexion sur le choix des composants, qui s'inscrit dans une démarche d'éco-conception, peut néanmoins potentiellement se heurter à différentes contraintes et impératifs liés aux modes de création et de production des œuvres d'art numérique, puisqu'elle peut avoir une incidence forte sur le temps de production et le budget, ainsi que sur la forme finale de l'œuvre. De même, le nombre d'expositions et les modes de transport utilisés pour la diffusion peuvent être des leviers importants de réduction de l'empreinte environnementale de l'œuvre, mais qui s'inscrivent dans une démarche dépassant les choix artistiques à proprement parler. Cela invite à porter une réflexion globale, impliquant les artistes mais aussi les producteurs et diffuseurs d'art numérique, sur des modalités de création, de production et diffusion qui permettraient de laisser plus de temps et de ressources aux artistes pour travailler à la diminution des impacts environnementaux de leurs œuvres.

Une réflexion sur la fin de vie des œuvres d'art numérique est également à mener, même si elle dépasse l'enjeu environnemental. Le recyclage ou le réemploi de composants d'œuvres n'ayant plus vocation à être diffusées ou achetées d'occasion permettraient de réduire leur empreinte environnementale ou celle d'œuvres ultérieures. Là encore, il s'agit d'une démarche qui ne peut être portée par des artistes seul-es et qui doit s'inscrire dans un cadre global impliquant différents acteurs du secteur. Cette étape de la fin de vie des œuvres gagnerait en tout cas à être approfondie afin de pouvoir être intégrée à d'autres analyses de cycle de vie d'œuvres d'art numérique.

Cette étude reste perfectible, notamment au niveau de la précision et de la représentativité des données utilisées, et les résultats sont sensibles à certaines hypothèses et paramètres. Cela invite à les interpréter avec nuance, mais ne remet a priori pas en cause les principales conclusions, et notamment l'importance relative des différentes étapes du cycle de vie dans les impacts environnementaux potentiellement générés par cette œuvre.

Les résultats de cette étude étant difficilement transposables à d'autres œuvres d'art numérique, d'autres études de ce type seraient nécessaires pour tenter de dégager des tendances communes et de généraliser certaines conclusions afin mieux accompagner artistes et acteurs du secteurs dans leurs démarches visant à éco-concevoir leurs œuvres. Cette étude peut néanmoins d'ores et déjà permettre d'esquisser des pistes de réflexion sur les impacts environnementaux des arts numériques et les moyens de les réduire.

Annexes

Annexe A - L'analyse du cycle de vie

A.1. Grands principes

L'analyse du cycle de vie (ACV) est une méthodologie quantitative d'évaluation environnementale développée depuis les années 1990 et régie par les normes ISO 14040 et 14044. Elle vise à évaluer les impacts environnementaux d'un produit ou d'un service en se basant sur une approche :

- **Multi-étapes** : elle prend en compte les différentes étapes du cycle de vie d'un produit ou d'un service, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de vie, en passant par les étapes de fabrication, de transport, d'utilisation et d'entretien ;
- **Multi-critères** : elle prend en compte plusieurs indicateurs environnementaux, comme par exemple la contribution au changement climatique, la pollution de l'eau ou de l'air, l'épuisement de ressources abiotiques, la toxicité sur les écosystèmes, etc. À noter que les indicateurs pris en compte peuvent varier suivant les analyses et les contextes.

Flux et processus

L'ACV repose sur les notions de flux et de processus : le cycle de vie d'un produit ou d'un service est décomposé en différents processus (activités de transformation), reliés par des flux de produit, de matière ou d'énergie. Ces flux peuvent provenir ou être à destination de l'écosphère, c'est-à-dire de l'environnement naturel, ou être interne à la technosphère, c'est-à-dire à l'ensemble des activités humaines. Dans le premier cas, on parle alors de flux élémentaires entrants ou sortants, et de flux de produits ou flux économiques entrants ou sortants dans le second.

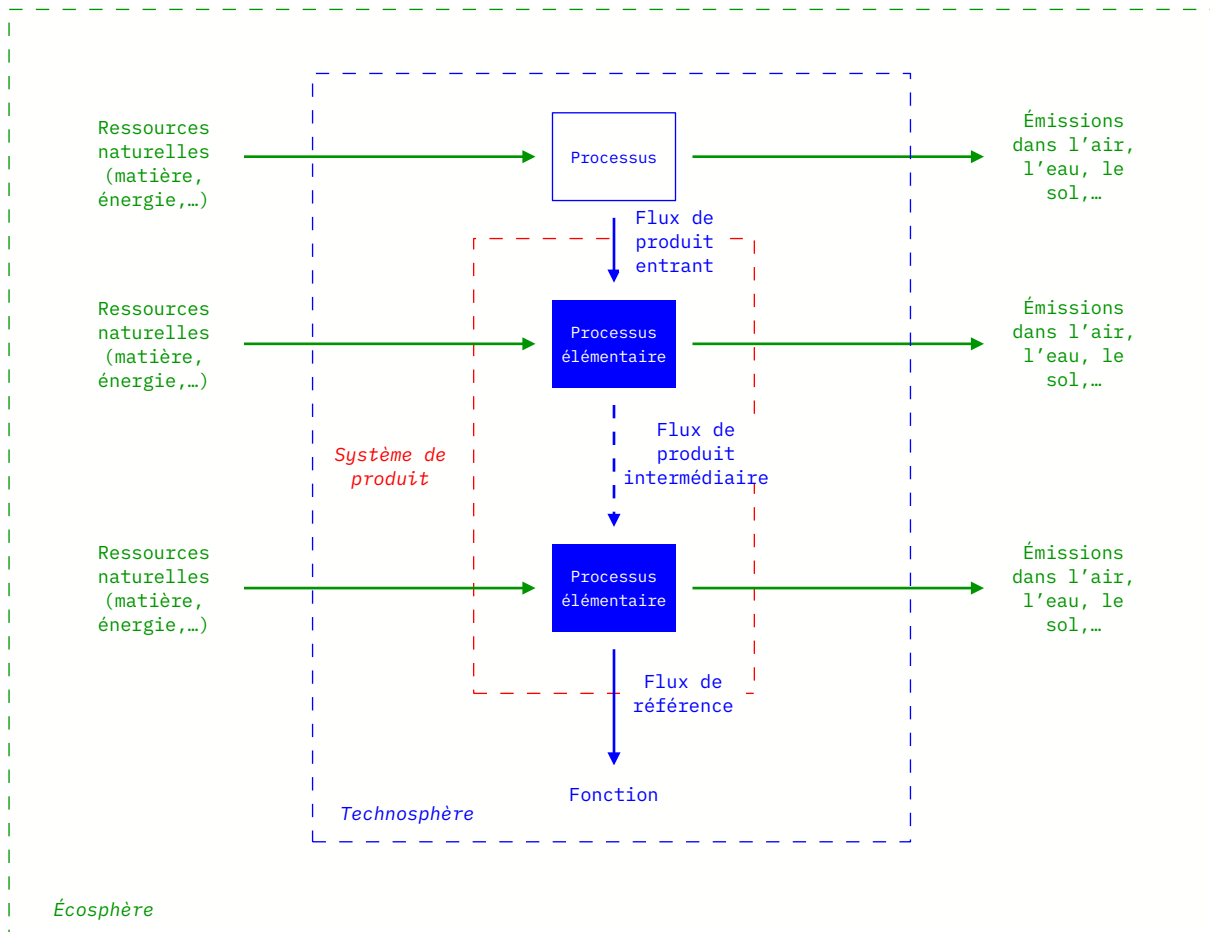
Fonction et unité fonctionnelle

Le produit ou service étudié est défini par sa fonction. C'est elle qui est étudiée dans une ACV, et non le produit ou service en tant que tel. L'objectif est d'ainsi pouvoir comparer des produits ou services différents mais remplissant une même fonction (par exemple, une serviette et un sèche main électrique remplissent tous les deux la même fonction, mais sont de conception très différente).

L'unité fonctionnelle est la performance quantifiée de cette fonction (par exemple, se sécher les mains trois fois par jour). Elle sert de référence à l'étude, à partir de laquelle sont quantifiés les différents flux entrants et sortants. Ainsi, pour comparer deux produits ou services remplissant la même fonction, on va utiliser la même unité fonctionnelle pour dimensionner les flux élémentaires et de produits impliqués dans leur cycle de vie. L'unité fonctionnelle doit être mesurable et additive, et inclure des caractéristiques de performances et des éléments de contexte (durée de la fonction, lieu éventuellement, etc). Les résultats d'une étude ACV ne sont donc valables que pour la fonction étudiée et dépendent de l'unité fonctionnelle définie.

Système de produit

Une ACV repose sur la définition d'un système de produit, qui rassemble les processus qui permettent de remplir la fonction étudiée et qui font donc l'objet de l'analyse. On parle alors de processus élémentaires. Ces processus élémentaires sont liés entre eux par des flux de produit intermédiaire, à l'écosphère par des flux élémentaires entrants ou sortants, et à la technosphère par des flux de produits entrants ou sortants. Le flux de produit sortant du système de produit, correspondant aux extrants nécessaires pour remplir la fonction étudiée, est appelé flux de référence.



[Figure A-1 - Représentation schématique des flux et processus d'une ACV]

L'objectif d'une ACV va donc être de quantifier les flux élémentaires impliqués dans les différents processus étudiés, de manière à évaluer les impacts générés sur l'écosphère, et donc sur l'environnement. Il s'agira toujours d'impacts potentiels, et non d'impacts réels.

Étant donné qu'il est pratiquement impossible de mesurer directement tous les flux élémentaires de tous les processus impliqués, une ACV repose quasi systématiquement sur l'utilisation de base de données regroupant des processus modélisés et les flux qu'ils utilisent ou qu'ils génèrent. Ces bases de données peuvent être plus ou moins complètes et spécialisées, et s'utilisent à l'aide de logiciels spécialisés.

Applications

Une ACV peut avoir différentes applications. Elle peut permettre le développement et l'amélioration d'un produit ou d'un service, en contribuant à informer une démarche d'éco-conception. Elle peut également contribuer à la planification stratégique d'une entreprise, en orientant des choix technologiques ou des investissements, ou à sa stratégie marketing, en comparant la performance environnementale de produits concurrents (benchmarking) ou en appuyant la communication autour d'un produit. Elle est également utilisée pour orienter des politiques publiques, notamment dans l'interdiction de produits jugés trop polluants ou pour élaborer des réglementations.

Limites

L'ACV présente cependant des limites : elle ne prend notamment pas en compte certains types de pollution liés à un produit ou service (bruit, odeurs, pollution lumineuse et visuelle, etc), et reste une approche théorique et relative, car très dépendante des hypothèses de départ, de l'usage d'un produit.

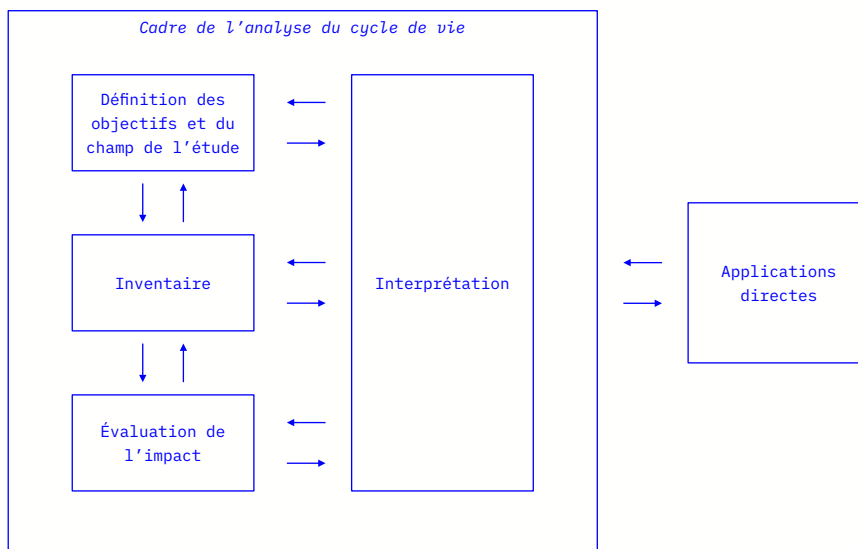
A.2. Méthodologie de l'ACV

A.2.1. Vue d'ensemble

La norme ISO 14040 définit quatre étapes interdépendantes dans la réalisation d'une ACV :

- Définition des objectifs et du champ de l'étude
- Inventaire du cycle de vie (ICV)
- Évaluation de l'impact environnemental (AICV)
- Interprétation des résultats

Il s'agit d'une approche itérative, dans le sens où chaque étape dépend des résultats des autres étapes, ce qui peut impliquer de revenir sur des étapes précédentes au fur et à mesure de l'étude.



[Figure A-2 - Phases d'une ACV (d'après ISO 14040)]

A.2.2. Définition des objectifs et du champ de l'étude

Cette première étape décrit les objectifs de l'étude, c'est-à-dire les raisons ayant conduit à réaliser cette étude, ses applications envisagées, sa cible et la forme du rapport. Elle présente également le système de produit étudié et ses frontières, c'est-à-dire la fonction et l'unité fonctionnelle étudiée ainsi que les processus pris en compte ou exclus de l'étude. Cette étape présente également la méthodologie de l'étude, notamment les catégories d'impact sélectionnées. Elle va ainsi permettre de définir le niveau de détail de l'étude, la qualité des données utilisées, les hypothèses faites, les limites de l'étude, etc. Tous ces points dépendent des applications envisagées et du produit ou service étudié, ce qui implique de bien présenter les choix faits au moment du cadrage de l'étude.

A.2.3. Inventaire du cycle de vie

L'inventaire du cycle de vie (ICV) consiste à collecter les données utilisées pour quantifier les flux élémentaires entrants et sortants du système de produit. Cette collecte peut amener à revoir les objectifs et le périmètre de l'étude, notamment si cette étape fait apparaître des difficultés dans la collecte de certaines données.

Ces données peuvent être dites primaires, c'est-à-dire directement collectées sur des processus impliqués dans le système de produit (par exemple une installation industrielle), ou secondaires, c'est-à-dire issues de la littérature scientifique ou de bases de données existantes. Dans les deux cas, les données utilisées doivent permettre de quantifier des flux élémentaires impliqués dans le système de produit étudié. Les données utilisées peuvent être mesurées directement sur le processus étudié, calculées à partir de modèles représentant des processus ou des phénomènes, ou estimées par des experts.

On parle également de données d'avant plan quand elles concernent des processus élémentaires, donc inclus dans le système de produit, ou de données d'arrière plan, quand elles concernent des processus extérieurs au système de produit.

En réalité, peu de processus industriels ne comportent qu'un seul extrant (on parle alors de co-produits). Cela peut amener à définir des règles d'affectation, qui consistent à attribuer un certain pourcentage des flux élémentaires entrants ou sortants à chaque produit du processus. Cette affectation peut être basée sur des critères de physiques ou économiques. La norme ISO 14044 préconise néanmoins d'éviter autant que possible les affectations, en jouant notamment sur la division en sous-processus des processus étudiés ou en incluant dans le système de produit les fonctions des co-produits.

A.2.4. Évaluation de l'impact environnemental

L'évaluation de l'impact environnemental, ou analyse d'impact sur le cycle de vie (AICV) permet d'évaluer les impacts environnementaux potentiellement générés par le produit ou service étudié à partir des données collectées lors de l'étape d'inventaire du cycle de vie. Dit autrement, son objectif est d'interpréter les données collectées pour en comprendre leur signification en termes environnementaux en quantifiant les échanges entre le système de produit et l'environnement.

On commence par sélectionner les catégories d'impacts, qui représentent les points environnementaux étudiés (par exemple, la contribution au réchauffement climatique). Chaque catégorie d'impact est définie par un indicateur d'impact, c'est-à-dire une représentation quantifiable de cette catégorie (par exemple, le forçage radiatif infrarouge).

Les flux étudiés vont ensuite être attribués aux différentes catégories d'impact (on parle de classification), puis quantifiés à l'aide de facteurs de caractérisation, qui vont permettre de les convertir en unités communes d'un indicateur de catégorie (par exemple, des émissions de gaz à effet de serre vont être converties en kg CO₂ équivalent). Cette étape nécessite l'utilisation de modèles de caractérisation, qui peuvent être différents et qu'il convient donc de bien préciser au moment de la rédaction de l'étude. Ainsi convertit en unité commune, les flux issus de l'étape d'inventaire peuvent être agrégés en un unique résultat de catégorie d'impact pour chaque catégorie d'impact prise en compte dans l'étude.

Les catégories d'impacts peuvent être orientées « problèmes » (ou mid-point), ou « dommages » (ou end-point), qui permettent de regrouper différentes catégories d'impact dans des aires de protection plus larges (qualité des écosystèmes, santé humaine, ressources naturelles).

Les normes ISO proposent trois éléments optionnels, un fois les résultats de l'AICV calculés :

- La normalisation, qui est le calcul de l'importance des résultats d'indicateurs de catégorie par rapport à certaines informations de références. L'objectif est d'ainsi mieux comprendre l'importance relative de chaque résultat d'indicateur. Cela permet par exemple de contrôler des incohérences, de fournir des

TERME	EXEMPLE
Catégorie d'impact	Changement climatique
Résultats de l'inventaire	Quantité d'un gaz à effet de serre par unité fonctionnelle
Modèle de caractérisation	Modèle de base sur 100 ans élaboré par le Groupe d'Experts Environnemental sur l'Évolution du climat (GIEC)
Indicateur de catégorie	Forçage radiatif infrarouge (W/m ²)
Facteurs de caractérisation	Potentiel de réchauffement global (GWP100) pour chaque GES (kg CO ₂ équivalent/kg gaz)
Résultat d'indicateur de catégorie	kg CO ₂ équivalent par unité fonctionnelle
Impacts finaux par catégorie	Récifs coralliens, forêts, récoltes,...
Pertinence environnementale	Le forçage radiatif infrarouge est une donnée indirecte pour des effets potentiels sur le climat, dépendant de l'absorption de chaleur atmosphérique intégrée engendrée par les émissions de la répartition dans le temps de l'absorption de chaleur.

[Tableau A-1 - Exemple de termes (d'après ISO 14044)]

informations sur la portée relative de certains indicateurs, ou de réaliser des calculs supplémentaires comme la pondération. Les informations de références peuvent par exemple être relatives aux émissions ou à la consommation de ressources pour une zone géographique donnée, ou être en lien avec un scénario de référence (dans le cas d'une comparaison entre systèmes de produit).

- La pondération, qui consiste à convertir les résultats d'indicateurs de catégories d'impact en utilisant des facteurs numériques basés sur des choix de valeurs. Elle peut inclure l'agrégation des résultats d'indicateurs pondérés.
- Le regroupement, qui consiste à regrouper certaines catégories d'impact dans un ou plusieurs ensembles en se basant sur des choix de valeurs. Il peut impliquer un tri sur une base nominale (par exemple, les échelles spatiales) et/ou sur une hiérarchie donnée des catégories d'impacts.

A.2.5. Interprétation des résultats

Cette dernière étape représente la phase finale de l'étude d'ACV. Elle a pour objectif d'analyser et de discuter des résultats des étapes précédentes. Elle permet d'établir des conclusions, de présenter les limites de l'étude et d'établir des recommandations. C'est lors de cette phase que le rapport d'étude est rédigé.

Elle comporte une phase d'identification des points significatifs des résultats, en lien avec les objectifs et le champ de l'étude. Cela peut notamment passer par une analyse de contribution, qui permet d'évaluer l'apport de différents processus ou étapes du cycle de vie dans les résultats finaux. Elle inclut également des phases de vérification, avec par exemple des analyses de sensibilité qui visent à évaluer la variabilité des résultats par rapport à certains paramètres, de contrôle de la qualité des données ou de la cohérence des résultats et de la méthodologie.

Annexe B - Catégories d'impacts de la méthode PEF

CATÉGORIE D'IMPACT	INDICATEUR	UNITÉ	MODÈLE
Changement climatique	Radiative forcing as Global Warming Potential (GWP100)	kgCO2eq	Baseline model of 100 years of the IPCC (based on IPCC 2013)
Destruction de la couche d'ozone	Ozone Depletion Potential (ODP)	kg CFC-11 eq	Steady-state ODPs as in (WMO 1999)
Toxicité humaine – Cancer	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	CTUh	USEtox model Rosenbaum et al, 2008)
Toxicité humaine - Non cancer	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	CTUh	USEtox model Rosenbaum et al, 2008)
Particules fines	Impact on human health	Cas de maladie	PM method recommended by UNEP (UNEP 2016)
Radiations ionisantes	Human exposure efficiency relative to U235	kBq U235 eq	Human health effect model as developed by Dreicer et al. 1995 (Frischknecht et al, 2000)
Création d'ozone photochimique	Tropospheric ozone concentration increase	kg NMVOC eq	LOTOS-EUROS model (Van Zelm et al, 2008) as implemented in ReCiPe 2008
Acidification	Accumulated Exceedance (AE)	mol H+ eq	Accumulated Exceedance (Seppälä et al. 2006, Posch et al, 2008)
Eutrophisation - Terrestre	Accumulated Exceedance (AE)	mol N eq	Accumulated Exceedance (Seppälä et al. 2006, Posch et al, 2008)
Eutrophisation - Eau douce	Fraction of nutrients reaching freshwater end compartment (P)	kg P eq	EUTREND model (Struijs et al, 2009) as implemented in ReCiPe
Eutrophisation - Eau de mer	Fraction of nutrients reaching marine end compartment (N)	kg N eq	EUTREND model (Struijs et al, 2009) as implemented in ReCiPe
Ecotoxicité - Eau douce	Comparative Toxic Unit for ecosystems (CTUe)	CTUe	USEtox model, (Rosenbaum et al, 2008)
Impacts liés à l'occupation des sols	- Soil quality index - Biotic production - Erosion resistance - Mechanical filtration - Groundwater replenishment	- Dimensionless (pt) - kg biotic production - kg soil - m ³ water - m ³ groundwater	Soil quality index based on LANCA (Beck et al. 2010 and Bos et al. 2016)
Utilisation de l'eau	User deprivation potential (deprivation-weighted water consumption)	m ³ world eq	Available Water REmaining (AWARE) as recommended by UNEP, 2016
Consommation des ressources abiotiques – Éléments	Abiotic resource depletion (ADP ultimate reserves)	kg Sb eq	CML 2002 (Guinée et al., 2002) and van Oers et al. 2002.
Consommation des ressources abiotiques	Abiotic resource depletion – fossil fuels (ADP-fossil) ²⁴	MJ	CML 2002 (Guinée et al., 2002) and van Oers et al. 2002

Annexe C - Bilan massique détaillé

CATÉGORIE	COMPOSANT	MASSE UNITAIRE (kg)	MASSE TOTALE (kg)	% MASSE ŒUVRE (hors caisses)	% MASSE ŒUVRE (avec caisses)
Électronique	PCB	0,005	0,080	0,03 %	0,01 %
	ESP 32	0,010	0,160	0,05 %	0,03 %
	LIDAR	0,012	0,300	0,10 %	0,05 %
	Haut-parleurs	0,024	0,312	0,10 %	0,05 %
	Régulateur 48V - 5V	0,300	4,200	1,36 %	0,68 %
	Ruban LED	0,299	2,691	0,00 %	0,00 %
	Voyant LED	0,018	0,215	0,01 %	0,00 %
	Câble ethernet	1,100	1,100	0,87 %	0,44 %
	Résistance 1k	9,000E-5	0,001	0,07 %	0,03 %
	Transistor 2N2222	0,002	0,030	0,36 %	0,18 %
	Sous-total Électronique	-	9,090	2,95 %	1,47 %v
Moteurs et composants mécaniques	Moteur pas à pas	3,500	42,000	13,61 %	6,81 %
	Driver moteur	0,550	6,600	2,14 %	1,07 %
	Roulement à bille	0,036	0,936	0,52 %	0,26 %
	Courroie	0,010	0,130	0,08 %	0,04 %
	Poulie pivot	0,100	1,600	0,39 %	0,19 %
	Poulie moteur	0,100	1,200	0,39 %	0,19 %
	Axe pivot	0,100	1,200	0,30 %	0,15 %
	Entretoise moteur	0,010	0,240	0,04 %	0,02 %
	Joint Spi	0,003	0,048	0,02 %	0,01 %
Sous-total Moteurs & méca	-	53,954	17,48 %	8,75 %	
Alimentation électrique	Alimentation DC 48V	1,15	13,800	4,47 %	2,24 %
	Rallonge électrique 1m	0,013	0,156	0,05 %	0,03 %
	Câble 2x2.5mm ² gainé	9,750	9,750	3,16 %	1,58 %
	Câble 2x2.5mm ²	4,880	4,880	1,58 %	
	Connecteur tournant	0,016	0,190	0,06 %	0,03 %
Sous-total Alim. électrique	-	28,776	9,32 %	4,66 %	
Boîtiers	Boîtier avant	0,100	1,300	0,42 %	0,21 %
	Boîtier arrière	0,466	5,592	1,81 %	0,91 %
	Boîtier sol	0,576	7,488	2,43 %	1,21 %
	Presses étoupe	0,006	0,031	0,01 %	0,01 %
Sous-total Boîtiers	-	14,411	4,67 %	2,34 %	

CATÉGORIE	COMPOSANT	MASSE UNITAIRE (kg)	MASSE TOTALE (kg)	% MASSE ŒUVRE (hors caisses)	% MASSE ŒUVRE (avec caisses)
Structure	Profilé aluminium (bras)	2,520	30,240	9,80 %	4,90 %
	Embout de protection	0,002	0,056	0,02 %	0,01 %
	Cache rainure	0,010	0,120	0,04 %	0,02 %
	Profilé acier (mat bas)	17,797	71,886	23,29 %	11,65 %
	Profilé acier (mat haut)	16,678	64,000	20,74 %	10,37 %
	Profilé acier (compartiment roulement)	0,400	5,200	1,68 %	0,84 %
	Platine moteur	0,173	2,769	0,90 %	0,45 %
	Platine jonction pivot	0,115	1,833	0,59 %	0,30 %
	Platine embase du mat	1,248	19,968	6,47 %	3,24 %
	Goussets	0,039	2,496	0,81 %	0,40 %
	Platine capteur LIDAR	0,003	0,083	0,03 %	0,01 %
	Sous-total Structure	-	198,650	64,37 %	32,20 %
Visserie	Ecrou KM1	0,006	0,300	0,10 %	0,05 %
	Rondelle pour écrou KM1	0,002	0,050	0,02 %	0,01 %
	Vis fixation LIDAR	0,010	0,500	0,16 %	0,08 %
	Vis fixation Haut-parleur	0,010	0,500	0,16 %	0,08 %
	Ecrou M2	0,006	0,300	0,10 %	0,05 %
	Vis fixation platine	0,010	0,500	0,16 %	0,08 %
	Vis fixation boîte avant	0,010	0,500	0,16 %	0,08 %
	Vis fixation boîte arrière	0,010	0,500	0,16 %	0,08 %
	Ecrou M4	0,006	0,300	0,10 %	0,05 %
	Ecrou M8	0,006	0,300	0,10 %	0,05 %
	Sous-total Visserie	-	3,750	1,22 %	0,61 %
Caisses transport (vides)	Flight case	14,400	14,400	-	2,33 %
	Roues	4,000	12,000	-	1,95 %
	Poignées	0,270	3,240	-	0,53 %
	Panneaux contre -plaqué	29,371	205,594	-	33,33 %
	Tasseau raboté	3,300	62,052	-	10,06 %
	Bois habillage intérieur	10,000	10,000	-	1,62 %
	Visserie	1,000	1,000	-	0,16 %
	Sous-total Caisses transport (vides)	-	308,287	-	49,97 %
TOTAL	TOTAL hors caisses		308,631	100 %	50,03 %
	TOTAL avec caisses		616,917	-	100,00 %

Légende
Donnée fournie
Donnée calculée
Donnée estimée

Annexe D - Détail des processus

D.1. Production des composants

CATÉGORIE	COMPOSANT	SOUS-COMPOSANT OU PROCESSUS	INVENTAIRE EF	SOURCE	UNITÉ	QUANTITÉ POUR 1 COMPOSANT	QUANTITÉ TOTALE
Électronique	PCB	Carte électronique	Populated Printed wiring board (PWB) (2-layer), production mix, at plant, via the subtractive method (as opposed to additive method), 2-layer - World	EF DATABASE	m2	2,158E-02	3,452E-01
	ESP 32	Carte électronique	Populated Printed wiring board (PWB) (2-layer), production mix, at plant, via the subtractive method (as opposed to additive method), 2-layer - World	EF DATABASE	m2	2,158E-02	3,452E-01
	LIDAR	Carte électronique	Populated Printed wiring board (PWB) (2-layer), production mix, at plant, via the subtractive method (as opposed to additive method), 2-layer - World	EF DATABASE	m2	1,360E-02	3,399E-01
		Plastique (ABS)	Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), production mix, at plant, emulsion polymerisation, bulk polymerisation or combined processes - World w/o EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	3,090E-03	7,725E-02
		Plastique (PC)	Polycarbonate (PC) granulate, production mix, at plant, Technology mix, dipenyl carbonate route and phosgene route, 1.20–1.22 g/cm ³ - World w/o EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	3,090E-03	7,725E-02
		Moulage plastique	Thermoforming, production mix, at plant, plastic thermoforming, 25% loss, 2.5 MJ electricity, 0.5 MJ thermal energy - EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	6,000E-01	1,500E+01
	Haut-parleurs	-	Connected Speaker	NEGAOCTET	items	2,900E-02	3,770E-01
	Régulateur 48V - 5V	Carte électronique	Populated Printed wiring board (PWB) (2-layer), production mix, at plant, via the subtractive method (as opposed to additive method), 2-layer - World	EF DATABASE	m2	5,476E-03	7,666E-02
		Aluminium	Aluminium ingot mix, production mix, to consumer, primary production, aluminium ingot product, primary production - EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	2,714E-01	3,799E+00

CATÉGORIE	COMPOSANT	SOUS-COMPOSANT OU PROCESSUS	INVENTAIRE EF	SOURCE	UNITÉ	QUANTITÉ POUR 1 COMPOSANT	QUANTITÉ TOTALE
Électronique (suite)	Régulateur 48V - 5V (suite)	Moulage aluminium	Aluminium casting, single route, at plant, primary production, aluminium casting, 2.7 g/cm3 - EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	2,700E-01	3,780E+00
		Cuivre (fils électriques)	Copper Wire Drawing, single route, at plant, wire drawing, 8.92 g/cm3 - EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	3,228E-05	4,520E-04
	Ruban LED	LED	Light Emitting Diode (LED), high power, production mix, at plant, front-end and back-end processing of the wafer, including Czochralski method of silicon growing, 5 mm, 350 mg - World	EF DATABASE	items	3,000E+02	2,700E+03
		Carte électronique	Populated Printed wiring board (PWB) (2-layer), production mix, at plant, via the subtractive method (as opposed to additive method), 2-layer - World	EF DATABASE	m ²	5,000E-02	4,500E-01
		Silicone (tube)	Silicone, high viscosity, production mix, at plant, hydrolysis and methanolysis of dimethyldichloro silane, >30 000 centi Poise - EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	1,746E-01	1,571E+00
	Voyant LED	LED	Light Emitting Diode (LED), high power, production mix, at plant, front-end and back-end processing of the wafer, including Czochralski method of silicon growing, 5 mm, 350 mg - World	EF DATABASE	items	4,000E+00	4,800E+01
		Corps en plastique (ABS)	Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), production mix, at plant, emulsion polymerisation, bulk polymerisation or combined processes - World w/o EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	1,701E-02	2,041E-01
		Moulage plastique	Injection moulding, production mix, at plant, plastic injection moulding, for PP, HDPE and PE - EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	1,652E-02	1,982E-01
	Câble ethernet	Câble	Cable; Cat 6a (Manufacturing)	NEGAOCTET	m	5,000E+01	5,000E+01
		Ports RJ45	Connector; RJ45 (Manufacturing)	NEGAOCTET	items	2,000E+00	2,000E+00
Résistance 1k	Pris en compte dans PCB						
Transistor 2N2222	Pris en compte dans PCB						

CATÉGORIE	COMPOSANT	SOUS-COMPOSANT OU PROCESSUS	INVENTAIRE EF	SOURCE	UNITÉ	QUANTITÉ POUR 1 COMPOSANT	QUANTITÉ TOTALE
Moteurs & Éléments mécaniques	Moteurs pas à pas	Acier	Steel cold rolled coil, single route, at plant, blast furnace route, carbon steel - RoW	EF DATABASE	kg	1,747E+00	2,096E+01
		Acier inoxydable	Stainless steel cold rolled, production mix, at plant, hot rolling, stainless steel - RoW	EF DATABASE	kg	1,300E-02	1,560E-01
		Laiton	Brass, single route, at plant, anode furnace and casting, from copper and zinc, primary production, 8.41- 8.86 g/cm3 - EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	2,200E-02	2,640E-01
		Cuivre	Copper sheet, single route, at plant, melting and mechanical treatment (fabrication), 8.92 g/cm3 - EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	9,000E-03	1,080E-01
		Aluminium	Aluminium ingot mix, production mix, to consumer, primary production, aluminium ingot product, primary production - EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	3,120E-01	3,744E+00
		PA Polyamide	Nylon 6 granulate, production mix, at plant, reaction of caprolactam with water, 1.08 g/cm3 - World w/o EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	4,000E-03	4,800E-02
		PBT Polybutylene Terephthalate	Polybutylene Terephthalate (PBT) Granulate, production mix, at plant, from dimethyl terephthalate and 1.4 butanediol, 1.28- 1.40 g/cm3 - World w/o EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	6,900E-02	8,280E-01
		Carte électronique	Populated Printed wiring board (PWB) (2-layer), production mix, at plant, via the subtractive method (as opposed to additive method), 2-layer - World	EF DATABASE	m2	7,400E-02	8,880E-01
		Câbles	Cable, three-conductor cable, production mix, at plant, technology mix, three-conductor cable, 1m, 60 g/m - EU-28+EFTA	EF DATABASE	m	1,835E+01	2,202E+02
		Driver moteur	Aluminium	Aluminium ingot mix, production mix, to consumer, primary production, aluminium ingot product, primary production - EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	2,134E-01
	Acier	Steel cold rolled coil, single route, at plant, blast furnace route, carbon steel - RoW	EF DATABASE	kg	5,429E-02	6,515E-01	

CATÉGORIE	COMPOSANT	SOUS-COMPOSANT OU PROCESSUS	INVENTAIRE EF	SOURCE	UNITÉ	QUANTITÉ POUR 1 COMPOSANT	QUANTITÉ TOTALE
Moteurs & Éléments mécaniques (suite)	Driver moteur (suite)	Cuivre	Copper sheet, single route, at plant, melting and mechanical treatment (fabrication), 8.92 g/cm ³ - EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	6,313E-02	7,576E-01
		Zinc	Zinc, consumption mix, to consumer, technology mix, primary production, 7.14 g/cm ³ - GLO	EF DATABASE	kg	6,313E-02	7,576E-01
		Câbles	Cable, three-conductor cable, production mix, at plant, technology mix, three-conductor cable, 1m, 60 g/m - EU-28+EFTA	EF DATABASE	m	1,999E-04	2,399E-03
		Carte électronique	Populated Printed wiring board (PWB) (2-layer), production mix, at plant, via the subtractive method (as opposed to additive method), 2-layer - World	EF DATABASE	m ²	1,327E-02	1,593E-01
		PA Polyamide	Nylon 6 granulate, production mix, at plant, reaction of caprolactam with water, 1.08 g/cm ³ - World w/o EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	1,894E-03	2,273E-02
		Polycarbonate	Polycarbonate (PC) granulate, production mix, at plant, Technology mix, diphenyl carbonate route and phosgene route, 1.20–1.22 g/cm ³ - World w/o EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	1,894E-03	2,273E-02
	Roulement à bille	Billes et cage	Stainless steel cold rolled, production mix, at plant, hot rolling, stainless steel - RoW	EF DATABASE	kg	2,880E-02	7,488E-01
		Paroi	Nylon 6 granulate, production mix, at plant, reaction of caprolactam with water, 1.08 g/cm ³ - World w/o EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	7,200E-03	1,872E-01
	Courroie	Caoutchouc	Styrene-butadiene rubber (SBR), production mix, at plant, Emulsion polymerization of styrene and butadiene, 23.5 % styrene - World w/o EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	9,450E-03	1,229E-01
		Moulage caoutchouc	Injection moulding of rubber, production mix, at plant, plastic injection moulding, 0.05 kg scrap - EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	9,000E-03	1,170E-01

CATÉGORIE	COMPOSANT	SOUS-COMPOSANT OU PROCESSUS	INVENTAIRE EF	SOURCE	UNITÉ	QUANTITÉ POUR 1 COMPOSANT	QUANTITÉ TOTALE	
Moteurs & Éléments mécaniques (suite)	Courroie (suite)	Polyester	Polyester resin, production mix, at plant, esterification and polymerization, from propylene glycol, phthalic anhydride and styrene, 1.22- 1.38 g/cm3	EF DATABASE	kg	1,000E-03	1,300E-02	
	Joint Spi	Caoutchouc	Styrene-butadiene rubber (SBR), production mix, at plant, Emulsion polymerization of styrene and butadiene, 23.5 % styrene - World w/o EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	2,835E-03	4,536E-02	
		Moulage caoutchouc	Injection moulding of rubber, production mix, at plant, plastic injection moulding, 0.05 kg scrap - EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	2,700E-03	4,320E-02	
		Acier	Steel cold rolled coil, single route, at plant, blast furnace route, carbon steel	EF DATABASE	kg	3,000E-04	4,800E-03	
	Poulie pivot	Acier	Steel cold rolled coil, single route, at plant, blast furnace route, carbon steel - RoW	EF DATABASE	kg	1,000E-01		
		Tournage	Non pris en compte (données absentes)	-	-	-	-	
	Poulie moteur	Acier	Steel cold rolled coil, single route, at plant, blast furnace route, carbon steel - RoW	EF DATABASE	kg	1,000E-01	1,200E+00	
		Tournage	Non pris en compte (données absentes)	-	-	-	-	
	Axe pivot	Acier	Steel cold rolled coil, single route, at plant, blast furnace route, carbon steel - RoW	EF DATABASE	kg	1,000E-01	1,200E+00	
		Tournage	Non pris en compte (données absentes)	-	-	-	-	
	Entretoise moteur	Acier	Steel cold rolled coil, single route, at plant, blast furnace route, carbon steel - RoW	EF DATABASE	kg	1,000E-02	2,400E-01	
		Tournage	Non pris en compte (données absentes)	-	-	-	-	
	Alimentation électrique	Alimentation DC 48V	Aluminium	Aluminium ingot mix, production mix, to consumer, primary production, aluminium ingot product, primary production - EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	1,840E-01	2,208E+00
			Ferrite	Ferrite (iron ore), production mix, at plant, iron ore mining and processing, 5.00 g/cm3 - GLO	EF DATABASE	kg	1,500E-01	1,800E+00

CATÉGORIE	COMPOSANT	SOUS-COMPOSANT OU PROCESSUS	INVENTAIRE EF	SOURCE	UNITÉ	QUANTITÉ POUR 1 COMPOSANT	QUANTITÉ TOTALE
Alimentation électrique (suite)	Alimentation DC 48V (suite)	Cuivre	Copper sheet, single route, at plant, melting and mechanical treatment (fabrication), 8.92 g/cm ³ - EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	1,100E-01	1,320E+00
		Acier	Steel cold rolled coil, single route, at plant, blast furnace route, carbon steel - RoW	EF DATABASE	kg	9,700E-02	1,164E+00
		Acier inoxydable	Stainless steel cold rolled, production mix, at plant, hot rolling, stainless steel - RoW	EF DATABASE	kg	2,500E-02	3,000E-01
		Fibre de verre	Glass fibres, at plant, production mix, per kg glass fibres - EU-28+3	EF DATABASE	kg	1,300E-02	1,560E-01
		Résine Epoxy	epoxy resin production, production mix, at plant, technology mix, 100% active substance - RER	EF DATABASE	kg	3,000E-02	3,600E-01
		Polybutylene Terephthalate (PBT)	Polybutylene Terephthalate (PBT) Granulate, production mix, at plant, from dimethyl terephthalate and 1.4 butanediol, 1.28- 1.40 g/cm ³ - World w/o EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	4,300E-02	5,160E-01
		Polyethylene Terephthalate (PET)	PET granulates, amorphous, production mix, at plant, Polymerisation of ethylene, 0.91- 0.96 g/cm ³ , 28 g/mol per repeating unit - EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	1,100E-02	1,320E-01
		Polyamide 66 (PA66)	Nylon 6 granulate, production mix, at plant, reaction of caprolactam with water, 1.08 g/cm ³ - World w/o EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	1,000E-02	1,200E-01
Rallonge électrique 1m	Câble électrique	Cable, three-conductor cable, production mix, at plant, technology mix, three-conductor cable, 1m, 60 g/m - EU-28+EFTA	EF DATABASE	m	2,000E+00	2,400E+01	
Câble 2x2.5mm ² gainé	Câble électrique	Cable, three-conductor cable, production mix, at plant, technology mix, three-conductor cable, 1m, 60 g/m - EU-28+EFTA	EF DATABASE	m	3,333E+01	3,333E+01	
Câble 2x2.5mm ²	Câble électrique	Cable, three-conductor cable, production mix, at plant, technology mix, three-conductor cable, 1m, 60 g/m - EU-28+EFTA	EF DATABASE	m	6,667E+01	6,667E+01	

CATÉGORIE	COMPOSANT	SOUS-COMPOSANT OU PROCESSUS	INVENTAIRE EF	SOURCE	UNITÉ	QUANTITÉ POUR 1 COMPOSANT	QUANTITÉ TOTALE
Alimentation électrique (suite)	Connecteur tournant	Câble électrique (cuivre)	Copper Wire Drawing, single route, at plant, wire drawing, 8.92 g/cm3 - EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	2,522E-05	3,026E-04
		Plastique (ABS)	Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), production mix, at plant, emulsion polymerisation, bulk polymerisation or combined processes - World w/o EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	1,625E-02	1,950E-01
		Moulage plastique	Injection moulding, production mix, at plant, plastic injection moulding, for PP, HDPE and PE - EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	1,577E-02	1,893E-01
Boîtiers	Boitier avant	Plastique (ABS)	Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), production mix, at plant, emulsion polymerisation, bulk polymerisation or combined processes - World w/o EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	1,030E-01	1,339E+00
		Moulage plastique	Injection moulding, production mix, at plant, plastic injection moulding, for PP, HDPE and PE - EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	1,000E-01	1,300E+00
	Boitier arrière	Plastique (ABS)	Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), production mix, at plant, emulsion polymerisation, bulk polymerisation or combined processes - World w/o EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	4,800E-01	5,760E+00
		Moulage plastique	Injection moulding, production mix, at plant, plastic injection moulding, for PP, HDPE and PE - EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	4,660E-01	5,592E+00
	Boitier sol	Plastique (ABS)	Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), production mix, at plant, emulsion polymerisation, bulk polymerisation or combined processes - World w/o EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	5,933E-01	7,713E+00
		Moulage plastique	Injection moulding, production mix, at plant, plastic injection moulding, for PP, HDPE and PE - EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	5,760E-01	7,488E+00
	Presses étoupe	Plastique (Nylon)	Nylon 6 granulate, production mix, at plant, reaction of caprolactam with water, 1.08 g/cm3 - World w/o EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	6,386E-03	3,193E-02
		Moulage plastique	Injection moulding, production mix, at plant, plastic injection moulding, for PP, HDPE and PE - EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	6,200E-03	3,100E-02

CATÉGORIE	COMPOSANT	SOUS-COMPOSANT OU PROCESSUS	INVENTAIRE EF	SOURCE	UNITÉ	QUANTITÉ POUR 1 COMPOSANT	QUANTITÉ TOTALE
Structure	Profilé aluminium (bras)	Aluminium	Aluminium ingot mix, production mix, to consumer, primary production, aluminium ingot product, primary production - EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	3,334E+00	4,001E+01
		Extrusion aluminium	Aluminium extrusion, single route, at plant, primary production, aluminium extrusion, 2.7 g/cm3 - EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	2,520E+00	3,024E+01
	Embout de protection	Plastique (Nylon)	Nylon 6 granulate, production mix, at plant, reaction of caprolactam with water, 1.08 g/cm3 - World w/o EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	2,421E-03	5,809E-02
		Moulage plastique	Injection moulding, production mix, at plant, plastic injection moulding, for PP, HDPE and PE - EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	2,350E-03	5,640E-02
	Cache rainure pour profilé	Plastique (PVC)	PVC granulates, low density, production mix, at plant, polymerisation of vinyl chloride, 62 g/mol per repeating unit - EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	1,030E-02	1,236E-01
		Moulage plastique	Injection moulding, production mix, at plant, plastic injection moulding, for PP, HDPE and PE - EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	1,000E-02	1,200E-01
	Profilé acier (mat bas)	Acier	Steel cold rolled coil, single route, at plant, blast furnace route, carbon steel - RoW	EF DATABASE	kg	1,79712E+01	7,188E+01
		Fabrication tube carré	Steel sheet stamping and bending, single route, at plant, stamping and bending, 5% loss - GLO	EF DATABASE	kg	1,600E+01	6,400E+01
	Profilé acier (mat haut)	Acier	Steel cold rolled coil, single route, at plant, blast furnace route, carbon steel - RoW	EF DATABASE	kg	1,678E+01	6,714E+01
		Fabrication tube carré	Steel sheet stamping and bending, single route, at plant, stamping and bending, 5% loss - GLO	EF DATABASE	kg	1,600E+01	6,400E+01
	Profilé acier (compartiment roulement)	Acier	Steel cold rolled coil, single route, at plant, blast furnace route, carbon steel - RoW	EF DATABASE	kg	4,700E-01	6,110E+00
		Fabrication tube	Drawing of steel pipe, single route, at plant, slab casting, rolling, pickling, thermal treatment, 1m length - RoW	EF DATABASE	kg	4,000E-01	5,200E+00

CATÉGORIE	COMPOSANT	SOUS-COMPOSANT OU PROCESSUS	INVENTAIRE EF	SOURCE	UNITÉ	QUANTITÉ POUR 1 COMPOSANT	QUANTITÉ TOTALE	
Structure (suite)	Platine moteur	Acier	Steel cold rolled coil, single route, at plant, blast furnace route, carbon steel - RoW	EF DATABASE	kg	1,731E-01	2,769E+00	
		Découpe laser	Laser cutting of steel parts, production mix, at plant, laser cutting, 1 meter cut - World	EF DATABASE	items	3,440E-01	5,504E+00	
	Platine jonction pivot	Acier	Steel cold rolled coil, single route, at plant, blast furnace route, carbon steel - RoW	EF DATABASE	kg	1,150E-01	1,840E+00	
		Découpe laser	Laser cutting of steel parts, production mix, at plant, laser cutting, 1 meter cut - World	EF DATABASE	items	5,700E-01	9,120E+00	
	Platine embase du mat	Acier	Steel cold rolled coil, single route, at plant, blast furnace route, carbon steel - RoW	EF DATABASE	kg	1,248E+00	1,997E+01	
		Découpe laser	Laser cutting of steel parts, production mix, at plant, laser cutting, 1 meter cut - World	EF DATABASE	items	8,000E-01	1,280E+01	
	Goussets	Acier	Steel cold rolled coil, single route, at plant, blast furnace route, carbon steel - RoW	EF DATABASE	kg	3,900E-02	2,496E+00	
		Découpe laser	Laser cutting of steel parts, production mix, at plant, laser cutting, 1 meter cut - World	EF DATABASE	items	1,710E-01	5,472E+00	
	Platine capteur LIDAR	Plastique (PMMA)	Polymethyl methacrylate (PMMA) granulate, production mix, at plant, bulk polymerisation, from methyl methacrylate, 1.18 g/cm3 - World w/o EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	2,680E-03	8,576E-02	
		Moulage plastique	Injection moulding, production mix, at plant, plastic injection moulding, for PP, HDPE and PE - EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	2,602E-03	8,326E-02	
	Visserie	Ecrou KM1	Acier inoxydable	Stainless steel cold rolled, production mix, at plant, hot rolling, stainless steel - RoW	EF DATABASE	kg	6,000E-03	3,000E-01
		Rondelle pour écrou KM1	Acier inoxydable	Stainless steel cold rolled, production mix, at plant, hot rolling, stainless steel - RoW	EF DATABASE	kg	2,000E-03	5,000E-02
Vis fixation LIDAR		Acier inoxydable	Stainless steel cold rolled, production mix, at plant, hot rolling, stainless steel - RoW	EF DATABASE	kg	1,000E-02	5,000E-01	
Vis fixation Haut-parleur		Acier inoxydable	Stainless steel cold rolled, production mix, at plant, hot rolling, stainless steel - RoW	EF DATABASE	kg	1,000E-02	5,000E-01	

CATÉGORIE	COMPOSANT	SOUS-COMPOSANT OU PROCESSUS	INVENTAIRE EF	SOURCE	UNITÉ	QUANTITÉ POUR 1 COMPOSANT	QUANTITÉ TOTALE
Visserie (suite)	Ecrou M2	Acier inoxydable	Stainless steel cold rolled, production mix, at plant, hot rolling, stainless steel - RoW	EF DATABASE	kg	6,000E-03	3,000E-01
	Vis fixation platine	Acier inoxydable	Stainless steel cold rolled, production mix, at plant, hot rolling, stainless steel - RoW	EF DATABASE	kg	1,000E-02	5,000E-01
	Vis fixation boîte avant	Acier inoxydable	Stainless steel cold rolled, production mix, at plant, hot rolling, stainless steel - RoW	EF DATABASE	kg	1,000E-02	5,000E-01
	Vis fixation boîte arrière	Acier inoxydable	Stainless steel cold rolled, production mix, at plant, hot rolling, stainless steel - RoW	EF DATABASE	kg	1,000E-02	5,000E-01
	Ecrou M4	Acier inoxydable	Stainless steel cold rolled, production mix, at plant, hot rolling, stainless steel - RoW	EF DATABASE	kg	6,000E-03	3,000E-01
	Ecrou M8	Acier inoxydable	Stainless steel cold rolled, production mix, at plant, hot rolling, stainless steel - RoW	EF DATABASE	kg	6,000E-03	3,000E-01
Caisses transport (vides)	Flight case	Structure en contreplaqué	Plywood, outdoor use, production mix, at plant, attaching veneer layers, 5% moisture - EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	1,152E+01	1,152E+01
		Renforts en aluminium	Aluminium sheet rolling, single route, at plant, primary production, aluminium deep-drawing, 2,7 g/cm ³ - EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	2,880E+00	2,880E+00
	Roues	Structure en acier galvanisé	Steel electrogalvanized coil, single route, at plant, steel sheet electrogalvanization, 1,5 mm sheet thickness, 0.02 mm zinc thickness - RoW	EF DATABASE	kg	3,000E+00	9,000E+00
		Moyeu en plastique (Nylon)	Nylon 6 granulate, production mix, at plant, reaction of caprolactam with water, 1.08 g/cm ³ - EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	6,000E-01	1,800E+00
		Roue en caoutchouc	Styrene-butadiene rubber (SBR), production mix, at plant, Emulsion polymerization of styrene and butadiene, 23.5 % styrene - EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	4,000E-01	1,200E+00
		Moulage du caoutchouc	Injection moulding of rubber, production mix, at plant, plastic injection moulding, 0.05 kg scrap - EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	4,000E-01	1,200E+00

CATÉGORIE	COMPOSANT	SOUS-COMPOSANT OU PROCESSUS	INVENTAIRE EF	SOURCE	UNITÉ	QUANTITÉ POUR 1 COMPOSANT	QUANTITÉ TOTALE
Caisses transport (vides) (suite)	Poignées	Éléments en acier galvanisé	Steel electrogalvanized coil, single route, at plant, steel sheet electrogalvanization, 1.5 mm sheet thickness, 0.02 mm zinc thickness - RoW	EF DATABASE	kg	2,430E-01	2,916E+00
		Prise en main en plastique (PVC)	PVC granulates, low density, production mix, at plant, polymerisation of vinyl chloride, 62 g/mol per repeating unit - EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	2,781E-02	3,337E-01
		Prise en main en plastique (moulage plastique)	Injection moulding, production mix, at plant, plastic injection moulding, for PP, HDPE and PE - EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	2,700E-02	3,240E-01
	Panneaux contre-plaqué	Planches	Plywood, outdoor use, production mix, at plant, attaching veneer layers, 5% moisture - EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	2,937E+01	2,056E+02
	Tasseau raboté	Planches	Plywood, outdoor use, production mix, at plant, attaching veneer layers, 5% moisture - EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	3,266E+00	6,205E+01
	Bois habillage intérieur	Planches	Plywood, outdoor use, production mix, at plant, attaching veneer layers, 5% moisture - EU-28+EFTA	EF DATABASE	kg	1,000E+01	1,000E+01
	Visserie	Acier inoxydable	Stainless steel cold rolled, production mix, at plant, hot rolling, stainless steel - RoW	EF DATABASE	kg	1,000E+00	1,000E+00

D.2. Transport composants

MODE DE TRANSPORT	PROCESSUS EF DATABASE
Avion	Cargo plane, consumption mix, to consumer, technology mix, kerosene driven, cargo, 65 t payload - GLO
Bateau	Transoceanic ship, containers, consumption mix, to consumer, heavy fuel oil driven, cargo, 27.500 dwt payload capacity, ocean going - GLO
Camion (CH)	Articulated lorry transport, Total weight 28-32 t, mix Euro 0-5, consumption mix, to consumer, diesel driven, Euro 0 - 5 mix, cargo, 28 - 32t gross weight / 22t payload capacity - RAS
Camion (UE)	Articulated lorry transport, Total weight 28-32 t, mix Euro 0-5, consumption mix, to consumer, diesel driven, Euro 0 - 5 mix, cargo, 28 - 32t gross weight / 22t payload capacity - EU-28+3
Petit camion (livraison composants) (UE)	Articulated lorry transport, Total weight <7.5 t, mix Euro 0-5, consumption mix, to consumer, diesel driven, Euro 0 - 5 mix, cargo, up to 7,5t gross weight / 3,3t payload capacity - UE 28+3
Petit camion (diffusion) (UE)	Articulated lorry transport, Total weight <7.5 t, mix Euro 0-5, consumption mix, to consumer, diesel driven, Euro 0 - 5 mix, cargo, up to 7,5t gross weight / 3,3t payload capacity - UE 28+3

CATÉGORIE	COMPOSANT	ÉTAPES	INVENTAIRE EF	SOURCE	UNITÉ	QUANTITÉ POUR 1 COMPOSANT	QUANTITÉ TOTALE
Électronique	PCB	Shenzen > Paris	Avion	EF DATABASE	t*km	4,800E-02	7,680E-01
		Paris > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	2,355E-03	3,768E-02
	ESP 32	Shenzen > Paris	Avion	EF DATABASE	t*km	9,600E-02	1,536E+00
		Paris > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	4,710E-03	7,536E-02
	LIDAR	Shenzen > Paris	Avion	EF DATABASE	t*km	9,854E-02	2,464E+00
		Paris > Blagny	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	3,204E-03	8,010E-02
		Blagny > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	6,288E-03	1,572E-01
	Haut-parleurs	Fuzhou > Shangai	Camion (CH)	EF DATABASE	t*km	1,867E-02	2,427E-01
		Shanghai > Rotterdam	Bateau	EF DATABASE	t*km	4,560E-01	5,928E+00
		Rotterdam > Paris	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	1,073E-02	1,395E-01
		Paris > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	1,130E-02	1,470E-01
	Régulateur 48V - 5V	Guangzhou > Paris	Avion	EF DATABASE	t*km	2,850E+00	3,990E+01
		Paris > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	1,413E-01	1,978E+00
	Ruban LED	Shenzhen > Paris	Avion	EF DATABASE	t*km	2,870E+00	2,583E+01
		Paris > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	1,408E-01	1,267E+00
	Voyant LED	Shenzhen > Paris	Avion	EF DATABASE	t*km	1,720E-01	2,064E+00
		Paris > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	8,439E-03	1,013E-01
	Câble ethernet	Anvers > Paris	Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	3,817E-01	3,817E-01
		Paris > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	5,181E-01	5,181E-01
	Résistance 1k	Shanghai > Rotterdam	Bateau	EF DATABASE	t*km	1,710E-03	2,736E-02
		Rotterdam > Beauvais	Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	3,753E-05	6,005E-04
Beauvais > Lyon		Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	5,004E-05	8,006E-04	
Transistor 2N2222	Asie > Europe	Bateau	EF DATABASE	t*km	3,800E-02	6,080E-01	
	Europe > Europe	Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	1,900E-03	3,040E-02	
	Europe > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	5,700E-04	9,120E-03	
Moteurs & Éléments mécaniques	Moteur pas à pas	Nankin > Shanghai	Camion (CH)	EF DATABASE	t*km	1,750E+00	2,100E+01
		Shanghai > Rotterdam	Bateau	EF DATABASE	t*km	8,912E+01	1,069E+03
		Rotterdam > Paris	Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	1,565E+00	1,877E+01
		Paris > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	1,649E+00	1,978E+01
	Driver moteur	Nankin > Shanghai	Camion (CH)	EF DATABASE	t*km	2,750E-01	3,300E+00
		Shanghai > Rotterdam	Bateau	EF DATABASE	t*km	1,400E+01	1,681E+02
		Rotterdam > Paris	Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	2,459E-01	2,950E+00
		Paris > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	2,591E-01	3,109E+00

CATÉGORIE	COMPOSANT	ÉTAPES	INVENTAIRE EF	SOURCE	UNITÉ	QUANTITÉ POUR 1 COMPOSANT	QUANTITÉ TOTALE	
Moteurs & Éléments mécaniques (suite)	Roulement à bille	Shangai > Rotterdam	Bateau	EF DATABASE	t*km	9,167E-01	2,383E+01	
		Rotterdam > Paris	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	1,609E-02	4,184E-01	
		Paris > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	1,696E-02	4,409E-01	
	Courroie	Asie > Europe	Bateau	EF DATABASE	t*km	2,000E-01	2,600E+00	
		Europe > Europe	Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	1,000E-02	1,300E-01	
		Europe > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	3,000E-03	3,900E-02	
	Joint Spi	Asie > Europe	Bateau	EF DATABASE	t*km	6,000E-02	9,600E-01	
		Europe > Europe	Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	3,000E-03	4,800E-02	
		Europe > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	9,000E-04	1,440E-02	
	Poulie pivot	Shangai > Rotterdam	Bateau	EF DATABASE	t*km	2,546E+00	4,074E+01	
		Rotterdam > Chassieu	Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	8,790E-02	1,406E+00	
		Chassieu > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	2,200E-03	3,520E-02	
	Poulie moteur	Shangai > Rotterdam	Bateau	EF DATABASE	t*km	2,546E+00	3,056E+01	
		Rotterdam > Lyon	Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	8,650E-02	1,038E+00	
		Lyon > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	1,000E-03	1,200E-02	
	Axe pivot	Shangai > Rotterdam	Bateau	EF DATABASE	t*km	2,546E+00	3,056E+01	
		Rotterdam > Lyon	Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	8,650E-02	1,038E+00	
		Lyon > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	1,000E-03	1,200E-02	
	Entretoise moteur	Shangai > Rotterdam	Bateau	EF DATABASE	t*km	2,546E-01	6,111E+00	
		Rotterdam > Lyon	Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	8,650E-03	2,076E-01	
		Lyon > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	1,000E-04	2,400E-03	
	Alimentation électrique	Alimentation DC 48V	Nankin > Shanghai	Camion (CH)	EF DATABASE	t*km	5,750E-01	6,900E+00
			Shanghai > Rotterdam	Bateau	EF DATABASE	t*km	2,928E+01	3,514E+02
			Rotterdam > Paris	Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	5,141E-01	6,169E+00
Paris > Lyon			Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	5,417E-01	6,500E+00	
Rallonge électrique 1m		Louigny > Wissous	Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	3,341E-03	4,009E-02	
		Wissous > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	5,837E-03	7,004E-02	
Câble 2x2.5mm ² gainé		Louigny > Wissous	Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	2,506E+00	2,506E+00	
		Wissous > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	4,378E+00	4,378E+00	
Câble 2x2.5mm ²		Büchenbach > Buchdorf	Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	3,221E-01	3,221E-01	
		Buchdorf > Lyon	Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	3,728E+00	3,728E+00	
		Lyon > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	4,880E-02	4,880E-02	
Connecteur tournant		Shenzhen > Paris	Avion	EF DATABASE	t*km	1,517E-01	1,820E+00	
		Paris > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	7,442E-03	8,930E-02	
Boîtiers		Boitier avant	UK > Beauvais	Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	3,760E-02	4,888E-01
			Beauvais > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	5,560E-02	7,228E-01

CATÉGORIE	COMPOSANT	ÉTAPES	INVENTAIRE EF	SOURCE	UNITÉ	QUANTITÉ POUR 1 COMPOSANT	QUANTITÉ TOTALE
Boîtiers (suite)	Boîtier arrière	UK > Limonest	Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	3,760E-02	4,512E-01
		Limonest > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	5,560E-02	6,672E-01
	Boîtier sol	UK > Beauvais	Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	3,760E-02	4,888E-01
		Beauvais > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	5,560E-02	7,228E-01
	Presses étoupe	Shanghai > Paris	Avion	EF DATABASE	t*km	5,704E-02	2,852E-01
		Paris > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	2,920E-03	1,460E-02
Structure	Profilé aluminium (bras)	Shanghai > Rotterdam	Bateau	EF DATABASE	t*km	6,417E+01	7,700E+02
		Rotterdam > Lognes	Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	1,139E+00	1,367E+01
		Lognes > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	7,484E-01	8,981E+00
	Embout de protection	Shanghai > Rotterdam	Bateau	EF DATABASE	t*km	5,984E-02	1,436E+00
		Rotterdam > Lognes	Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	1,062E-03	2,549E-02
		Lognes > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	1,105E-03	2,651E-02
	Cache rainure pour profilé	Shanghai > Rotterdam	Bateau	EF DATABASE	t*km	2,546E-01	1,630E+01
		Rotterdam > Marolles en Brie	Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	4,590E-03	2,938E-01
		Marolles en Brie > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	4,600E-03	2,944E-01
	Profilé acier (mat bas)	Shanghai > Rotterdam	Bateau	EF DATABASE	t*km	4,074E+02	1,630E+03
		Rotterdam > Lyon	Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	1,384E+01	5,536E+01
		Lyon > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	1,600E-01	6,400E-01
	Profilé acier (mat haut)	Shanghai > Rotterdam	Bateau	EF DATABASE	t*km	4,576E+02	1,830E+03
		Rotterdam > Lyon	Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	1,555E+01	6,218E+01
		Lyon > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	1,800E-01	7,200E-01
	Profilé acier (compartiment roulement)	Shanghai > Rotterdam	Bateau	EF DATABASE	t*km	1,019E+01	1,324E+02
		Rotterdam > Annecy	Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	3,772E-01	4,904E+00
		Annecy > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	5,320E-02	6,916E-01
	Platine moteur	Shanghai > Rotterdam	Bateau	EF DATABASE	t*km	4,407E+00	7,051E+01
		Rotterdam > Chassieu	Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	1,521E-01	2,434E+00
		Chassieu > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	3,807E-03	6,092E-02
	Platine jonction pivot	Shanghai > Rotterdam	Bateau	EF DATABASE	t*km	2,916E+00	4,667E+01
		Rotterdam > Chassieu	Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	1,007E-01	1,611E+00
		Chassieu > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	2,520E-03	4,032E-02

CATÉGORIE	COMPOSANT	ÉTAPES	INVENTAIRE EF	SOURCE	UNITÉ	QUANTITÉ POUR 1 COMPOSANT	QUANTITÉ TOTALE
Structure (suite)	Platine embase du mat	Shanghai > Rotterdam	Bateau	EF DATABASE	t*km	8,776E+01	1,404E+03
		Rotterdam > Chassieu	Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	3,029E+00	4,847E+01
		Chassieu > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	7,582E-02	1,213E+00
	Goussets	Shanghai > Rotterdam	Bateau	EF DATABASE	t*km	9,931E-01	6,356E+01
		Rotterdam > Chassieu	Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	3,428E-02	2,194E+00
		Chassieu > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	8,580E-04	5,491E-02
	Platine capteur LIDAR	? > Villeurbane	Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	1,821E-03	5,828E-02
		Villeurbane > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	2,602E-05	8,326E-04
	Visserie	Ecrou KM1	Shanghai > Rotterdam	Bateau	EF DATABASE	t*km	1,528E-01
Rotterdam > Paris			Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	2,682E-03	1,341E-01
Paris > Lyon			Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	2,826E-03	1,413E-01
Rondelle pour écrou KM1		Shanghai > Rotterdam	Bateau	EF DATABASE	t*km	5,093E-02	1,273E+00
		Rotterdam > Paris	Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	8,940E-04	2,235E-02
		Paris > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	9,420E-04	2,355E-02
Vis fixation LIDAR		Beauvais > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	5,560E-03	2,780E-01
Vis fixation Haut-parleur		Beauvais > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	5,560E-03	2,780E-01
Ecrou M2		Beauvais > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	3,336E-03	1,668E-01
Vis fixation platine		Beauvais > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	5,560E-03	2,780E-01
Vis fixation boîte avant		Beauvais > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	5,560E-03	2,780E-01
Vis fixation boîte arrière		Beauvais > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	5,560E-03	2,780E-01
Ecrou M4		Shanghai > Rotterdam	Bateau	EF DATABASE	t*km	1,528E-01	7,639E+00
		Rotterdam > Paris	Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	2,682E-03	1,341E-01
		Paris > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	2,826E-03	1,413E-01
Ecrou M8	Shanghai > Rotterdam	Bateau	EF DATABASE	t*km	1,528E-01	7,639E+00	
	Rotterdam > Paris	Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	2,682E-03	1,341E-01	
	Paris > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	2,826E-03	1,413E-01	
Caisses transport (vides)	Flight case	(Aluminium) Shanghai > Rotterdam	Bateau	EF DATABASE	t*km	7,333E+01	7,333E+01
		(Aluminium) Rotterdam > Burgebrach	Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	1,814E+00	1,814E+00

CATÉGORIE	COMPOSANT	ÉTAPES	INVENTAIRE EF	SOURCE	UNITÉ	QUANTITÉ POUR 1 COMPOSANT	QUANTITÉ TOTALE
Caisses transport (vides) (suite)	Flight case (suite)	(Bois) Shanghai > Rotterdam	Bateau	EF DATABASE	t*km	2,933E+02	2,933E+02
		(Bois) Rotterdam > Burgebrach	Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	7,258E+00	7,258E+00
		(Flight case) Burgebrach > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	1,169E+01	1,169E+01
	Roues	(Acier) Shanghai > Rotterdam	Bateau	EF DATABASE	t*km	7,639E+01	2,292E+02
			Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	1,890E+00	5,670E+00
		(Plastique) Shanghai > Rotterdam	Bateau	EF DATABASE	t*km	2,546E+01	7,639E+01
			Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	6,300E-01	1,890E+00
		(Roues) Burgebrach > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	3,248E+00	9,744E+00
	Poignées	(Acier) Shanghai > Rotterdam	Bateau	EF DATABASE	t*km	6,188E+00	7,425E+01
			Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	1,101E-01	1,321E+00
		(Plastique) Shanghai > Rotterdam	Bateau	EF DATABASE	t*km	6,875E-01	0,000E+00
			Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	1,223E-02	1,468E-01
		(Poignées) Frankfurt am Main > Burgebrach	Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	4,995E-02	5,994E-01
		(Poignées) Burgebrach > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	2,192E-01	2,631E+00
	Panneaux contre-plaqué	Thoraise > Vénissieux	Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	6,491E+00	4,544E+01
		Vénissieux > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	5,874E-01	4,112E+00
	Tasseau raboté	Thoraise > Vénissieux	Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	7,218E-01	1,371E+01
		Vénissieux > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	6,532E-02	6,532E-02
	Bois habillage intérieur	Thoraise > Vénissieux	Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	2,210E+00	2,210E+00
		Vénissieux > Lyon	Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	2,000E-01	2,000E-01
	Visserie	Shanghai > Rotterdam	Bateau	EF DATABASE	t*km	2,546E+01	2,546E+01
Rotterdam > Paris		Camion (UE)	EF DATABASE	t*km	8,650E-01	8,650E-01	
Paris > Lyon		Petit camion (UE)	EF DATABASE	t*km	1,000E-02	1,000E-02	

D.3. Assemblage

CATÉGORIE	ÉTAPE	PROCESSUS	INVENTAIRE EF	SOURCE	UNITÉ	QUANTITÉ TOTALE
Assemblage structure	Découpe profilés acier	Consommation électrique scie circulaire puissance 1800 W	Electricity grid mix 1kV-60kV, consumption mix, to consumer, AC, technology mix, 1kV - 60kV + facteur conversion medium/low voltage - FR	EF DATABASE	kWh	1,800E+00
	Soudure éléments structure	Consommation électrique poste à souder puissance 3000 W	Electricity grid mix 1kV-60kV, consumption mix, to consumer, AC, technology mix, 1kV - 60kV + facteur conversion medium/low voltage - FR	EF DATABASE	kWh	1,470E+02
Fabrication caisses de transport	Découpe panneaux contre-plaqué	Consommation électrique scie circulaire puissance 1800 W	Electricity grid mix 1kV-60kV, consumption mix, to consumer, AC, technology mix, 1kV - 60kV + facteur conversion medium/low voltage - FR	EF DATABASE	kWh	7,200E+00
	Soudure éléments structure	Consommation électrique visseuse puissance 500 W	Electricity grid mix 1kV-60kV, consumption mix, to consumer, AC, technology mix, 1kV - 60kV + facteur conversion medium/low voltage - FR	EF DATABASE	kWh	2,000E+00
Assemblage installation	Soudure composants électroniques	Consommation électrique poste à souder 50 W	Electricity grid mix 1kV-60kV, consumption mix, to consumer, AC, technology mix, 1kV - 60kV + facteur conversion medium/low voltage - FR	EF DATABASE	kWh	1,400E+00
	Assemblage éléments vissés	Consommation électrique visseuse puissance 500 W	Electricity grid mix 1kV-60kV, consumption mix, to consumer, AC, technology mix, 1kV - 60kV + facteur conversion medium/low voltage - FR	EF DATABASE	kWh	4,000E+00

D.4. Transport de l'œuvre et exposition

CATÉGORIE	ÉTAPE	PROCESSUS	INVENTAIRE EF	SOURCE	UNITÉ	QUANTITÉ TOTALE
Transport œuvre	Transport œuvre lieu de stockage > lieu d'exposition (A/R)	Trajet en petit camion	Articulated lorry transport, Total weight 7.5-12 t, mix Euro 0-5, consumption mix, to consumer, diesel driven, Euro 0 - 5 mix, cargo, 7.5 - 12t gross weight / 5t payload capacity - UE 28+3	EF DATABASE	t*km	3,203E+03
Montage / Démontage sur lieu d'exposition	Montage	Consommation électrique visseuse puissance 500 W	Electricity grid mix 1kV-60kV, consumption mix, to consumer, AC, technology mix, 1kV - 60kV + facteur conversion medium/low voltage - FR	EF DATABASE	kWh	2,000E+00
	Démontage	Consommation électrique visseuse puissance 500 W	Electricity grid mix 1kV-60kV, consumption mix, to consumer, AC, technology mix, 1kV - 60kV + facteur conversion medium/low voltage - FR	EF DATABASE	kWh	2,000E+00
Fonctionnement durée exposition	Fonctionnement	Consommation électrique installation en fonctionnement (1.2x400 W)	Electricity grid mix 1kV-60kV, consumption mix, to consumer, AC, technology mix, 1kV - 60kV + facteur conversion medium/low voltage - FR	EF DATABASE	kWh	3,456E+02

Annexe E - Présentation détaillée des résultats de l'évaluation des impacts du cycle de vie

E.1. Valeurs absolues

ÉTAPE	Acidification (mol H+ eq.)	Changement climatique (kg CO2 eq.)	Consommation des ressources abiotiques – Éléments (kg Sb eq.)	Ecotoxicité - Eau douce (CTUe)	Particules fines (Cas de maladies)	Radiations ionisantes (kg U235 eq.)
Production composants	1,340E+01	2,154E+03	1,513E-01	7,087E+02	1,886E-04	4,598E+02
Électronique	5,089E+00	6,668E+02	9,864E-02	3,841E+02	5,999E-05	3,369E+02
PCB	2,894E-01	5,306E+01	3,810E-03	2,298E+01	3,826E-06	1,308E+00
ESP 32	2,894E-01	5,306E+01	3,810E-03	2,298E+01	3,826E-06	1,308E+00
LIDAR	3,121E-01	6,277E+01	3,755E-03	2,336E+01	4,055E-06	4,908E+00
HP 3W	4,756E-02	7,420E+00	1,039E-03	1,141E+02	2,629E-07	1,404E+01
Régulateur 48V - 5V	1,659E-01	4,350E+01	8,522E-04	7,120E+00	1,891E-06	9,319E+00
Résistance 1k						
Transistor 2N2222						
SK6812	3,780E+00	4,341E+02	8,296E-02	1,231E+02	4,447E-05	3,033E+01
RED LED	6,452E-02	7,169E+00	1,378E-03	2,029E+00	7,509E-07	5,514E-01
Câble ethernet	1,402E-01	5,736E+00	1,037E-03	6,846E+01	9,112E-07	2,752E+02
Moteurs & Mécanique	1,300E+00	2,371E+02	2,406E-02	1,271E+02	2,035E-05	2,040E+01
Nema 34 8Nm	9,700E-01	1,657E+02	1,983E-02	8,324E+01	1,521E-05	1,329E+01
Driver DM860I	2,343E-01	5,028E+01	3,591E-03	3,837E+01	3,010E-06	6,906E+00
Poulie pivot	1,651E-02	4,917E+00	1,270E-04	4,600E-01	4,868E-07	2,901E-02
Entretoise moteur	2,476E-03	7,375E-01	1,905E-05	6,900E-02	7,302E-08	4,352E-03
Poulie Moteur	1,238E-02	3,688E+00	9,525E-05	3,450E-01	3,651E-07	2,176E-02
Axe pivot	1,238E-02	3,688E+00	9,525E-05	3,450E-01	3,651E-07	2,176E-02
Roulement bille contact oblique	4,863E-02	7,250E+00	2,945E-04	3,905E+00	7,788E-07	8,327E-02
Courroie PolyV	2,148E-03	6,042E-01	9,583E-08	2,809E-01	4,034E-08	3,828E-02
Joint Spi	7,465E-04	2,197E-01	4,137E-07	9,500E-02	1,502E-08	1,399E-02
Alimentation électrique	3,718E-01	5,475E+01	8,048E-03	3,978E+01	4,648E-06	7,251E+00
Alimentation DC 48V 400W	1,163E-01	3,067E+01	2,795E-04	1,181E+01	1,781E-06	5,516E+00
Rallonge 1m	4,924E-03	4,565E-01	1,523E-04	5,405E-01	5,515E-08	3,286E-02
Câble 2x2.5mm ² gainé	8,207E-02	7,609E+00	2,539E-03	9,008E+00	9,191E-07	5,476E-01
Câble 2x2.5mm ²	1,641E-01	1,522E+01	5,078E-03	1,802E+01	1,838E-06	1,095E+00
Connecteur tournant	4,343E-03	7,985E-01	1,853E-07	3,993E-01	5,462E-08	5,951E-02

ÉTAPE	Acidification (mol H+ eq.)	Changement climatique (kg CO2 eq.)	Consommation des ressources abiotiques – Éléments (kg Sb eq.)	Ecotoxicité - Eau douce (CTUe)	Particules fines (Cas de maladies)	Radiations ionisantes (kg U235 eq.)
Boîtiers	3,307E-01	6,093E+01	1,409E-05	3,037E+01	4,160E-06	4,532E+00
Boitier avant	2,982E-02	5,483E+00	1,272E-06	2,742E+00	3,750E-07	4,086E-01
Boitier arrière	1,283E-01	2,359E+01	5,472E-06	1,179E+01	1,613E-06	1,758E+00
Boitier sol	1,718E-01	3,158E+01	7,328E-06	1,579E+01	2,160E-06	2,354E+00
Presses étoupe	8,256E-04	2,766E-01	2,195E-08	4,350E-02	1,107E-08	1,136E-02
Structure	5,400E+00	9,455E+02	1,664E-02	8,207E+01	7,964E-05	9,107E+01
Profilé aluminium	8,934E-01	2,949E+02	5,559E-05	1,831E+01	9,256E-06	8,565E+01
Embout protection	1,502E-03	5,033E-01	3,994E-08	7,914E-02	2,014E-08	2,067E-02
Cache rainure	3,953E-03	1,803E+00	3,621E-07	2,198E-01	3,761E-08	2,946E-01
Profilé acier (mat bas)	7,842E-01	2,324E+02	5,986E-03	2,255E+01	2,325E-05	1,799E+00
Profilé acier (mat haut)	6,982E-01	2,069E+02	5,329E-03	2,008E+01	2,070E-05	1,602E+00
Profilé acier (compartiment roulement)	7,332E-02	2,025E+01	4,865E-04	2,372E+00	2,263E-06	1,383E-01
Platine moteur	2,743E-01	8,841E+00	2,198E-04	9,092E-01	1,453E-06	9,770E-02
Platine jonction pivot	4,261E-01	6,204E+00	1,461E-04	7,164E-01	1,571E-06	1,120E-01
Platine embase du mat	2,147E+00	1,716E+02	4,377E-03	1,658E+01	2,070E-05	1,305E+00
Goussets	9,643E-02	1,562E+00	3,717E-05	1,767E-01	3,700E-07	2,619E-02
Platine capteur LIDAR	2,130E-03	4,303E-01	5,286E-08	7,136E-02	2,914E-08	2,545E-02
Visserie	2,209E-01	2,869E+01	1,474E-03	1,830E+01	3,591E-06	2,911E-01
Ecrou KM1	1,767E-02	2,295E+00	1,180E-04	1,464E+00	2,873E-07	2,329E-02
Rondelle pour écrou KM1	2,945E-03	3,825E-01	1,966E-05	2,440E-01	4,788E-08	3,882E-03
Vis fixation lidar	2,945E-02	3,825E+00	1,966E-04	2,440E+00	4,788E-07	3,882E-02
Vis fixation Speaker	2,945E-02	3,825E+00	1,966E-04	2,440E+00	4,788E-07	3,882E-02
Ecrou M2	1,767E-02	2,295E+00	1,180E-04	1,464E+00	2,873E-07	2,329E-02
Vis fixation platine	2,945E-02	3,825E+00	1,966E-04	2,440E+00	4,788E-07	3,882E-02
Vis fixation boîte avant	2,945E-02	3,825E+00	1,966E-04	2,440E+00	4,788E-07	3,882E-02
Vis fixation boîte arrière	2,945E-02	3,825E+00	1,966E-04	2,440E+00	4,788E-07	3,882E-02
Ecrou M4	1,767E-02	2,295E+00	1,180E-04	1,464E+00	2,873E-07	2,329E-02
Ecrou M8	1,767E-02	2,295E+00	1,180E-04	1,464E+00	2,873E-07	2,329E-02
Caisses transport	6,904E-01	1,599E+02	2,411E-03	2,692E+01	1,620E-05	-7,261E-01
Flight case	2,064E-02	5,032E+00	6,151E-07	5,931E-01	4,199E-07	2,014E-01
Roues	1,642E-01	5,082E+01	1,520E-03	6,856E+00	4,542E-06	1,122E+00
Poignées	4,528E-02	1,125E+01	4,920E-04	1,479E+00	1,419E-06	2,494E-01
Panneau CP	2,972E-01	6,305E+01	4,482E-06	9,711E+00	6,561E-06	-1,760E+00
Tasseau raboté	8,971E-02	1,903E+01	1,353E-06	2,931E+00	1,980E-06	-5,311E-01
Bois habillage intérieur	1,446E-02	3,067E+00	2,180E-07	4,723E-01	3,191E-07	-8,559E-02
Visserie	5,889E-02	7,651E+00	3,932E-04	4,880E+00	9,577E-07	7,764E-02

ÉTAPE	Acidification (mol H+ eq.)	Changement climatique (kg CO2 eq.)	Consommation des ressources abiotiques – Eléments (kg Sb eq.)	Ecotoxicité - Eau douce (CTUe)	Particules fines (Cas de maladies)	Radiations ionisantes (kg U235 eq.)
Transport composants	4,770E+00	1,979E+02	1,101E-05	3,482E+01	3,621E-05	2,660E-01
Avion	2,030E-01	4,652E+01	2,918E-06	9,087E+00	7,968E-07	4,901E-02
Bateau	4,340E+00	1,192E+02	6,942E-06	2,215E+01	3,413E-05	1,636E-01
Camion (UE)	1,149E-01	1,875E+01	1,087E-06	3,185E+00	6,380E-07	5,287E-02
Camion (CH)	2,426E-02	2,006E+00	6,044E-08	3,971E-01	1,778E-07	5,536E-04
Petit camion	8,781E-02	1,140E+01	-5,802E-16	2,944E-06	4,629E-07	-1,317E-11
Assemblage	5,543E-02	1,563E+01	1,164E-05	2,917E+00	5,507E-07	1,219E+02
Consommation électrique	5,543E-02	1,563E+01	1,164E-05	2,917E+00	5,507E-07	1,219E+02
Transport œuvre	2,895E+00	3,758E+02	0,000E+00	9,705E-05	1,526E-05	0,000E+00
Petit camion	2,895E+00	3,758E+02	0,000E+00	9,705E-05	1,526E-05	0,000E+00
Exposition	5,896E-01	1,662E+02	1,239E-04	3,102E+01	5,858E-06	1,297E+03
Consommation électrique	5,896E-01	1,662E+02	1,239E-04	3,102E+01	5,858E-06	1,297E+03
TOTAL	2,171E+01	2,909E+03	1,514E-01	7,774E+02	2,465E-04	1,879E+03

E.2. Valeurs relatives

ÉTAPE	Acidification (mol H+ eq.)	Changement climatique (kg CO2 eq.)	Consommation des ressources abiotiques – Eléments (kg Sb eq.)	Ecotoxicité - Eau douce (CTUe)	Particules fines (Cas de maladies)	Radiations ionisantes (kg U235 eq.)
Production composants	61,73 %	74,03 %	99,90 %	91,16 %	76,52 %	24,47 %
Électronique	23,44 %	22,92 %	65,14 %	49,41 %	24,34 %	17,93 %
PCB	1,33 %	1,82 %	2,52 %	2,96 %	1,55 %	0,07 %
ESP 32	1,33 %	1,82 %	2,52 %	2,96 %	1,55 %	0,07 %
LIDAR	1,44 %	2,16 %	2,48 %	3,00 %	1,65 %	0,26 %
HP 3W	0,22 %	0,26 %	0,69 %	14,68 %	0,11 %	0,75 %
Régulateur 48V - 5V	0,76 %	1,50 %	0,56 %	0,92 %	0,77 %	0,50 %
Résistance 1k	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
Transistor 2N2222	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
SK6812	17,41 %	14,92 %	54,78 %	15,83 %	18,04 %	1,61 %
RED LED	0,30 %	0,25 %	0,91 %	0,26 %	0,30 %	0,03 %
Câble ethernet	0,65 %	0,20 %	0,68 %	8,81 %	0,37 %	14,65 %

ÉTAPE	Acidification (mol H+ eq.)	Changement climatique (kg CO2 eq.)	Consommation des ressources abiotiques – Éléments (kg Sb eq.)	Ecotoxicité - Eau douce (CTUe)	Particules fines (Cas de maladies)	Radiations ionisantes (kg U235 eq.)
Moteurs & Mécanique	5,99 %	8,15 %	15,89 %	16,35 %	8,26 %	1,09 %
Nema 34 8Nm	4,47 %	5,70 %	13,10 %	10,71 %	6,17 %	0,71 %
Driver DM860I	1,08 %	1,73 %	2,37 %	4,94 %	1,22 %	0,37 %
Poulie pivot	0,08 %	0,17 %	0,08 %	0,06 %	0,20 %	0,00 %
Entretoise moteur	0,01 %	0,03 %	0,01 %	0,01 %	0,03 %	0,00 %
Poulie Moteur	0,06 %	0,13 %	0,06 %	0,04 %	0,15 %	0,00 %
Axe pivot	0,06 %	0,13 %	0,06 %	0,04 %	0,15 %	0,00 %
Roulement bille contact oblique	0,22 %	0,25 %	0,19 %	0,50 %	0,32 %	0,00 %
Courroie PolyV	0,01 %	0,02 %	0,00 %	0,04 %	0,02 %	0,00 %
Joint Spi	0,00 %	0,01 %	0,00 %	0,01 %	0,01 %	0,00 %
Alimentation électrique	1,71 %	1,88 %	5,32 %	5,12 %	1,89 %	0,39 %
Alimentation DC 48V 400W	0,54 %	1,05 %	0,18 %	1,52 %	0,72 %	0,29 %
Rallonge 1m	0,02 %	0,02 %	0,10 %	0,07 %	0,02 %	0,00 %
Câble 2x2.5mm ² gainé	0,38 %	0,26 %	1,68 %	1,16 %	0,37 %	0,03 %
Câble 2x2.5mm ²	0,76 %	0,52 %	3,35 %	2,32 %	0,75 %	0,06 %
Connecteur tournant	0,02 %	0,03 %	0,00 %	0,05 %	0,02 %	0,00 %
Boîtiers	1,52 %	2,09 %	0,01 %	3,91 %	1,69 %	0,24 %
Boîtier avant	0,14 %	0,19 %	0,00 %	0,35 %	0,15 %	0,02 %
Boîtier arrière	0,59 %	0,81 %	0,00 %	1,52 %	0,65 %	0,09 %
Boîtier sol	0,79 %	1,09 %	0,00 %	2,03 %	0,88 %	0,13 %
Presses étoupe	0,00 %	0,01 %	0,00 %	0,01 %	0,00 %	0,00 %
Structure	24,87 %	32,50 %	10,99 %	10,56 %	32,32 %	4,85 %
Profilé aluminium	4,11 %	10,14 %	0,04 %	2,36 %	3,76 %	4,56 %
Embout protection	0,01 %	0,02 %	0,00 %	0,01 %	0,01 %	0,00 %
Cache rainure	0,02 %	0,06 %	0,00 %	0,03 %	0,02 %	0,02 %
Profilé acier (mat bas)	3,61 %	7,99 %	3,95 %	2,90 %	9,43 %	0,10 %
Profilé acier (mat haut)	3,22 %	7,11 %	3,52 %	2,58 %	8,40 %	0,09 %
Profilé acier (compartiment roulement)	0,34 %	0,70 %	0,32 %	0,31 %	0,92 %	0,01 %
Platine moteur	1,26 %	0,30 %	0,15 %	0,12 %	0,59 %	0,01 %
Platine jonction pivot	1,96 %	0,21 %	0,10 %	0,09 %	0,64 %	0,01 %
Platine embase du mat	9,89 %	5,90 %	2,89 %	2,13 %	8,40 %	0,07 %
Goussets	0,44 %	0,05 %	0,02 %	0,02 %	0,15 %	0,00 %
Platine capteur LIDAR	0,01 %	0,01 %	0,00 %	0,01 %	0,01 %	0,00 %

ÉTAPE	Acidification (mol H+ eq.)	Changement climatique (kg CO2 eq.)	Consommation des ressources abiotiques – Éléments (kg Sb eq.)	Ecotoxicité - Eau douce (CTUe)	Particules fines (Cas de maladies)	Radiations ionisantes (kg U235 eq.)
Visserie	1,02 %	0,99 %	0,97 %	2,35 %	1,46 %	0,02 %
Ecrou KM1	0,08 %	0,08 %	0,08 %	0,19 %	0,12 %	0,00 %
Rondelle pour écrou KM1	0,01 %	0,01 %	0,01 %	0,03 %	0,02 %	0,00 %
Vis fixation lidar	0,14 %	0,13 %	0,13 %	0,31 %	0,19 %	0,00 %
Vis fixation Speaker	0,14 %	0,13 %	0,13 %	0,31 %	0,19 %	0,00 %
Ecrou M2	0,08 %	0,08 %	0,08 %	0,19 %	0,12 %	0,00 %
Vis fixation platine	0,14 %	0,13 %	0,13 %	0,31 %	0,19 %	0,00 %
Vis fixation boîte avant	0,14 %	0,13 %	0,13 %	0,31 %	0,19 %	0,00 %
Vis fixation boîte arrière	0,14 %	0,13 %	0,13 %	0,31 %	0,19 %	0,00 %
Ecrou M4	0,08 %	0,08 %	0,08 %	0,19 %	0,12 %	0,00 %
Ecrou M8	0,08 %	0,08 %	0,08 %	0,19 %	0,12 %	0,00 %
Caisses transport	3,18 %	5,50 %	1,59 %	3,46 %	6,57 %	-0,04 %
Flight case	0,10 %	0,17 %	0,00 %	0,08 %	0,17 %	0,01 %
Roues	0,76 %	1,75 %	1,00 %	0,88 %	1,84 %	0,06 %
Poignées	0,21 %	0,39 %	0,32 %	0,19 %	0,58 %	0,01 %
Panneau CP	1,37 %	2,17 %	0,00 %	1,25 %	2,66 %	-0,09 %
Tasseau raboté	0,41 %	0,65 %	0,00 %	0,38 %	0,80 %	-0,03 %
Bois habillage intérieur	0,07 %	0,11 %	0,00 %	0,06 %	0,13 %	-0,00 %
Visserie	0,27 %	0,26 %	0,26 %	0,63 %	0,39 %	0,00 %
Transport composants	21,97 %	6,80 %	0,01 %	4,48 %	14,69 %	0,01 %
Avion	0,93 %	1,60 %	0,00 %	1,17 %	0,32 %	0,00 %
Bateau	19,99 %	4,10 %	0,00 %	2,85 %	13,85 %	0,01 %
Camion (UE)	0,53 %	0,64 %	0,00 %	0,41 %	0,26 %	0,00 %
Camion (CH)	0,11 %	0,07 %	0,00 %	0,05 %	0,07 %	0,00 %
Petit camion	0,40 %	0,39 %	-0,00 %	0,00 %	0,19 %	0,00 %
Assemblage	0,26 %	0,54 %	0,01 %	0,38 %	0,22 %	6,49 %
Consommation électrique	0,26 %	0,54 %	0,01 %	0,38 %	0,22 %	6,49 %
Transport œuvre	13,33 %	12,92 %	0,00 %	0,00 %	6,19 %	0,00 %
Petit camion	13,33 %	12,92 %	0,00 %	0,00 %	6,19 %	0,00 %
Exposition	2,72 %	5,71 %	0,08 %	3,99 %	2,38 %	69,03 %
Consommation électrique	2,72 %	5,71 %	0,08 %	3,99 %	2,38 %	69,03 %
TOTAL	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %

Annexe F - Complétude de l'étape de production des composants

CATÉGORIES	COMPOSANTS	PRODUCTION MATÉRIAUX	FABRICATION COMPOSANT	TRANSPORT
Électronique	PCB			
	ESP 32			
	LIDAR			
	Haut-parleurs			
	Régulateur 48V - 5V			
	Ruban LED			
	Voyant LED			
	Câble ethernet			
	Résistance 1k	Intégré dans PCB		
	Transistor 2N2222	Intégré dans PCB		
Moteurs & Éléments mécaniques	Moteur pas à pas			
	Driver moteur			
	Connecteur tournant			
	Roulement à bille			
	Courroie			
	Joint Spi			
	Poulie pivot			
	Poulie moteur			
	Axe pivot			
	Entretoise moteur			
Alimentation électrique	Alimentation DC 48V			
	Rallonge électrique 1m			
	Câble 2x2.5mm ² gainé			
	Câble 2x2.5mm ²			
Boîtiers	Boîtier avant			
	Boîtier arrière			
	Boîtier sol			
	Presses étoupe			
Structure	Profilé aluminium (bras)			
	Embout de protection			
	Cache rainure			
	Profilé acier (mat bas)			
	Profilé acier (mat haut)			
	Profilé acier (compartiment roulement)			
	Platine moteur			

CATÉGORIES	COMPOSANTS	PRODUCTION MATÉRIAUX	FABRICATION COMPOSANT	TRANSPORT
Structure (suite)	Platine jonction pivot			
	Platine embase du mat			
	Goussets			
	Platine capteur LIDAR			
Visserie	Ecrou KM1			
	Rondelle pour écrou KM1			
	Vis fixation LIDAR			
	Vis fixation Haut-parleurs			
	Ecrou M2			
	Vis fixation platine			
	Vis fixation boîte avant			
	Vis fixation boîte arrière			
	Ecrou M4			
	Ecrou M8			
Caisses de transport (vides)	Flight case			
	Roues			
	Poignées			
	Panneaux contre -plaqué			
	Tasseau raboté			
	Bois habillage intérieur			
	Visserie			

Légende

	Prise en compte complète
	Prise en compte partielle
	Non pris en compte

Annexe G - Qualité des données

ÉTAPE	CATÉGORIE	COMPOSANT	SOUS-COMPOSANT OU PROCESSUS	SOURCE	TiR	TeR	GR
PRODUCTION COMPOSANTS	Électronique	PCB	-	EF DATABASE	3	3	3
		ESP 32	-	EF DATABASE	3	3	3
		LIDAR TF	Carte électronique	EF DATABASE	3	3	3
			Plastique (ABS)	EF DATABASE	3	4	5
			Plastique (PC)	EF DATABASE	3	4	3
			Moulage plastique	EF DATABASE	3	4	3
		HP 3W 40HMS	-	NEGAOCTET	1	5	2
		Régulateur 48V - 5V	Carte électronique	EF DATABASE	3	2	5
			Aluminium	EF DATABASE	3	2	5
			Moulage aluminium	EF DATABASE	3	3	5
			Cuivre (fils électriques)	EF DATABASE	3	2	5
		SK6812 RGBNW	LED	EF DATABASE	3	4	3
	Carte électronique		EF DATABASE	3	3	3	
	Silicone		EF DATABASE	3	5	5	
	RED LED	LED	EF DATABASE	3	4	3	
		Plastique (PMMA)	EF DATABASE	3	3	3	
		Moulage plastique	EF DATABASE	3	3	5	
	Câble ethernet	Câble	NEGAOCTET	1	1	3	
		Ports RJ45	NEGAOCTET	1	1	3	
	Résistance 1k	-	-	-	-	-	
	Transistor 2N2222	-	-	-	-	-	
	Moteurs & Éléments mécaniques	Nema 34 8Nm	Acier	EF DATABASE	4	2	3
			Acier inoxydable	EF DATABASE	4	2	3
Laiton			EF DATABASE	4	2	5	
Cuivre			EF DATABASE	4	2	5	
Aluminium			EF DATABASE	4	2	5	
PA Polyamide			EF DATABASE	4	2	3	
PBT Polybutylene Terephthalate			EF DATABASE	4	2	3	
Carte électronique			EF DATABASE	4	3	3	
Câbles		EF DATABASE	4	3	5		
Driver DM860I		Aluminium	EF DATABASE	4	2	5	
		Acier	EF DATABASE	4	2	3	
		Cuivre	EF DATABASE	4	2	5	
		Zinc	EF DATABASE	4	2	3	
		Câbles	EF DATABASE	4	3	5	

ÉTAPE	CATÉGORIE	COMPOSANT	SOUS-COMPOSANT OU PROCESSUS	SOURCE	TiR	TeR	GR		
PRODUCTION COMPOSANTS (SUITE)	Moteurs & Éléments mécaniques (suite)	Driver DM860I (suite)	Carte électronique	EF DATABASE	4	3	3		
			PA Polyamide	EF DATABASE	4	3	3		
			Polycarbonate	EF DATABASE	4	2	3		
		Connecteur tournant		Câble électrique (cuivre)	EF DATABASE	3	2	5	
				Plastique (PMMA)	EF DATABASE	3	2	3	
				Moulage plastique	EF DATABASE	3	2	5	
		Roulement bille contact oblique		Billes et cage	EF DATABASE	3	2	3	
				Paroi	EF DATABASE	3	4	3	
		Courroie PolyV		Caoutchouc	EF DATABASE	3	2	3	
				Moulage caoutchouc	EF DATABASE	3	2	5	
				Polyester	EF DATABASE	3	2	3	
		Joint Spi		Caoutchouc	EF DATABASE	3	3	3	
				Moulage caoutchouc	EF DATABASE	3	2	5	
				Acier	EF DATABASE	3	2	3	
		Poulie pivot		Acier	EF DATABASE	3	2	3	
		Poulie Moteur		Acier	EF DATABASE	3	2	3	
		Axe pivot		Acier	EF DATABASE	3	2	3	
		Entretoise moteur		Acier	EF DATABASE	3	2	3	
		Alimentation électrique		Alimentation DC 48V	Aluminium	EF DATABASE	4	2	5
					Ferrite	EF DATABASE	4	2	3
Cuivre	EF DATABASE				4	2	5		
Acier	EF DATABASE				4	2	3		
Acier inoxydable	EF DATABASE				4	2	3		
Fibre de verre	EF DATABASE				4	2	5		
Résine Epoxy	EF DATABASE				4	2	5		
Polybutylène Terephthalate (PBT)	EF DATABASE				4	2	3		
Polyéthylène Terephthalate (PET)	EF DATABASE				4	2	3		
Polyamide 66 (PA66)	EF DATABASE				4	3	3		
Rallonge 1m 3G1,5	Câble électrique			EF DATABASE	3	3	2		
Câble 2x2.5mm ² gainé (bobine de 50m)	Câble électrique			EF DATABASE	3	4	2		
Câble 2x2.5mm ² (bobine de 100m)	Câble électrique			EF DATABASE	3	4	2		
Boîtiers	Boîtier avant		Plastique (ABS)	EF DATABASE	3	2	3		
			Moulage plastique	EF DATABASE	3	2	3		
	Boîtier arrière		Plastique (ABS)	EF DATABASE	3	2	3		
			Moulage plastique	EF DATABASE	3	2	3		

ÉTAPE	CATÉGORIE	COMPOSANT	SOUS-COMPOSANT OU PROCESSUS	SOURCE	TiR	TeR	GR
PRODUCTION COMPOSANTS (SUITE)	Boitiers (suite)	Boitier sol	Plastique (ABS)	EF DATABASE	3	2	3
			Moulage plastique	EF DATABASE	3	2	3
		Presses étoupe	Plastique (Nylon)	EF DATABASE	3	2	3
			Moulage plastique	EF DATABASE	3	2	3
	Structure	Profilé Aluminium	Aluminium	EF DATABASE	3	2	5
			Extrusion aluminium	EF DATABASE	3	3	5
		Embout de protection pour profilé alu	Plastique (Nylon)	EF DATABASE	3	2	5
			Moulage plastique	EF DATABASE	3	3	5
		Cache rainure à clipser pour profilé alu	Plastique (PVC)	EF DATABASE	3	2	5
			Moulage plastique	EF DATABASE	3	3	5
		Mat en acier (bas)	Acier	EF DATABASE	3	2	3
			Tube carré	EF DATABASE	3	2	3
		Mat en acier (haut)	Acier	EF DATABASE	3	2	3
			Tube carré	EF DATABASE	3	2	3
		Mat en acier (compartiment roulement)	Acier	EF DATABASE	3	2	3
			Tube	EF DATABASE	3	2	3
		Platine moteur	Acier	EF DATABASE	3	2	3
			Découpe laser	EF DATABASE	3	2	3
		Platine jonction pivot	Acier	EF DATABASE	3	2	3
			Découpe laser	EF DATABASE	3	2	3
		Platine embase du mat	Acier	EF DATABASE	3	2	3
			Découpe laser	EF DATABASE	3	2	3
		Goussets	Acier	EF DATABASE	3	2	3
			Découpe laser	EF DATABASE	3	2	3
	Platine capteur LIDAR	Plastique (PMMA)	EF DATABASE	3	3	3	
		Moulage plastique	EF DATABASE	3	3	3	
	Visserie	Ecrou KM1	Acier inoxydable	EF DATABASE	3	3	3
Rondelle pour écrou KM1		Acier inoxydable	EF DATABASE	3	3	3	
Vis fixation lidar		Acier inoxydable	EF DATABASE	3	3	3	
Vis fixation Speaker		Acier inoxydable	EF DATABASE	3	3	3	
Ecrou M2		Acier inoxydable	EF DATABASE	3	3	3	
Vis fixation platine		Acier inoxydable	EF DATABASE	3	3	3	
Vis fixation boîte avant		Acier inoxydable	EF DATABASE	3	3	3	
Vis fixation boîte arrière		Acier inoxydable	EF DATABASE	3	3	3	
Ecrou M4		Acier inoxydable	EF DATABASE	3	3	3	
Ecrou M8		Acier inoxydable	EF DATABASE	3	3	3	

ÉTAPE	CATÉGORIE	COMPOSANT	SOUS-COMPOSANT OU PROCESSUS	SOURCE	TiR	TeR	GR
PRODUCTION COMPOSANTS (SUITE)	Boîtes de transport	Flight case	Structure en contreplaqué	EF DATABASE	3	3	5
			Renforts en aluminium	EF DATABASE	3	2	5
		Roues	Structure en acier galvanisé	EF DATABASE	3	2	3
			Moyeu en plastique (Nylon)	EF DATABASE	3	2	3
			Roue en caoutchouc	EF DATABASE	3	3	3
		Moulage du caoutchouc		EF DATABASE	3	2	3
				EF DATABASE	3	3	3
				EF DATABASE	3	3	3
		Poignées	Éléments en acier galvanisé	EF DATABASE	3	3	3
			Prise en main en plastique (PVC)	EF DATABASE	3	3	3
			Prise en main en plastique (moulage plastique)	EF DATABASE	3	3	3
		Panneau CP	Planches	EF DATABASE	3	2	2
		Tasseau raboté	Planches	EF DATABASE	3	4	2
		Bois habillage intérieur	Planches	EF DATABASE	3	4	2
Visserie	Acier inoxydable	EF DATABASE	3	3	3		
TRANSPORT COMPOSANTS	-	-	Avion	EF DATABASE	3	2	3
			Bateau	EF DATABASE	3	2	3
			Camion (CH)	EF DATABASE	3	2	2
			Camion (UE)	EF DATABASE	3	2	2
			Petit camion (UE)	EF DATABASE	3	3	2
ASSEMBLAGE	Assemblage structure	Découpe profilés acier	Consommation électrique scie circulaire puissance 1800 W	EF DATABASE	3	1	1
			Soudure éléments structure	Consommation électrique poste à souder puissance 3000 W	EF DATABASE	3	1
	Fabrication caisses	Découpe panneaux contre-plaqué	Consommation électrique scie circulaire puissance 1800 W	EF DATABASE	3	1	1
			Soudure éléments structure	Consommation électrique visseuse puissance 500 W	EF DATABASE	3	1
	Assemblage installation	Soudure composants électroniques	Consommation électrique poste à souder 50 W	EF DATABASE	3	1	1
			Assemblage éléments vissés	Consommation électrique visseuse puissance 500 W	EF DATABASE	3	1
TRANSPORT ŒUVRE	-	-	Petit camion (UE)	EF DATABASE	3	3	2

ÉTAPE	CATÉGORIE	COMPOSANT	SOUS-COMPOSANT OU PROCESSUS	SOURCE	TiR	TeR	GR
EXPOSITION	Montage	Assemblage éléments vissés	Consommation électrique visseuse puissance 500 W	EF DATABASE	3	1	1
	Fonctionnement	-	Consommation électrique installation	EF DATABASE	3	1	1
	Démontage	Assemblage éléments vissés	Consommation électrique visseuse puissance 500 W	EF DATABASE	3	1	1

Références

- [1] Rencontres Nationales - Écologie et musiques actuelles, organisées par le SMA, la FEDELIMA et la Gaîté Lyrique en avril 2022
https://www.fedelima.org/IMG/pdf/programme_rencontres_ecologie_musiques_actuelles_2022_fedelima_sma_gaite_lyrique.pdf
- [2] CNM, Transition écologique
<https://cnm.fr/transition-ecologique/>
- [3] The Shift Project, *Décarbonons la culture !*, 2021
<https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2021/11/211130-TSP-PTEF-Rapport-final-Culture-v2.pdf>
- [4] Site web Arviva
<https://wp.arviva.org/>
- [5] Site web Les Augures
<https://lesaugures.com/>
- [6] Liste des codes NAF du secteur culturel
<https://www.culture.gouv.fr/content/download/57548/file/Secteur%20culturel%20%28codes%20NAF%29.pdf?inLanguage=fre-FR>
- [7] Green IT, *Empreinte environnementale du numérique mondial*, 2019
https://www.greenit.fr/wp-content/uploads/2019/10/2019-10-GREENIT-etude_EENM-rapport-accessible.VF_.pdf
- [8] The Shift Project, *Déployer la sobriété numérique*, 2020
https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2020/10/Deployer-la-sobriete-numerique_Rapport-complet_ShiftProject.pdf
- [9] Gauthier Roussilhe, *Explications sur l'empreinte environnementale du secteur numérique*, 2021
<https://gauthierroussilhe.com/articles/explications-sur-l-empreinte-environnementale-du-numerique>
- [10] ADEME et Arcep, *Évaluation de l'impact environnemental du numérique en France*, 2022
https://www.arcep.fr/uploads/tx_gspublication/etude-numerique-environnement-ademe-arcep-note-synthese_janv2022.pdf
- [11] IEA, *Data Centres and Data Transmission Networks*, 2021
<https://www.iea.org/reports/data-centres-and-data-transmission-networks>
- [12] Site web NegaOctet
<https://negaoctet.org/>
- [13] Site web Institut du Numérique Responsable
<https://institutnr.org/>
- [14] Vidéo réalisée par l'Observatoire des Politiques Culturelles, *Les arts numériques : un champ artistique comme les autres ?*, 2022
<https://hacnum.org/ressource/les-arts-numeriques-un-champ-artistique-comme-les-autres/>
- [15] Site web HACNUM
<https://hacnum.org>

- [16] Engagement environnementale de l'Opéra de Lyon
<https://www.opera-lyon.com/l-opera-de-lyon/un-opera-engage/engagement-environnemental>
- [17] Alice Audouin et Philippe Osset - Art of Change 21, *Qu'est que l'éco-conception ?*, 2020
<https://artofchange21.com/fr/quest-que-leco-conception/>
- [18] Organic Orchestra, *Oniri 2070*
<https://organic-orchestra.com/oniri-2070/>
- [19] Formation Arviva : *Concevoir la transformation écologique du spectacle vivant*
<https://wp.arviva.org/formation/>
- [20] Site web Karbone Prod
<https://www.karboneprod.fr/>
- [21] Designers Éthiques, *Guide d'écoconception de services numérique*, 2022
<https://eco-conception.designersethiques.org/guide/fr/>
- [22] AFNOR, *SPEC 2201 - Éconception des services numériques*, 2022
<https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/afnor-spec-2201/econception-des-services-numeriques/fa203506/323315>
- [23] Mission interministérielle Numérique écoresponsable, *Référentiel général d'écoconception de services numériques*, 2021
<https://ecoresponsable.numerique.gouv.fr/publications/referentiel-general-econception/>
- [24] Site web du Labo Arts & Techs de Stereolux
<https://www.stereolux.org/labo-arts-techs/presentation>
- [25] Site web du studio Chevalvert
<https://chevalvert.fr/>
- [26] Chevalvert, *Far Away*, 2021
<https://chevalvert.fr/fr/projects/far-away>
- [27] Site web Hémisphère
<http://www.hemisphere-project.com/>
- [28] Association Dolus & Dolus / Mirage Festival
<https://www.miragefestival.com/productions>
- [29] Site web du festival Constellations, Metz
<https://www.constellations-metz.fr/>
- [30] Commission Européenne, *Understanding Product Environmental Footprint and Organisation Environmental Footprint methods*, 2021
https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/pdf/EF%20simple%20guide_v7_clen.pdf
- [31] Site web PEP Ecopasseport
<http://www.pep-ecopassport.org>
- [32] Site web Base Impacts ADEME
<https://base-impacts.ademe.fr/>

- [33] Site web OpenLCA
<https://www.openlca.org/>
- [34] Green Delta, *Product Environmental Footprints - Secondary data in openLCA*, 2019
<https://nexus.openlca.org/ws/files/16088>
- [35] Schneider Electric, *Fiche PEP moteurs Lexium BDM43 à BDM77*
https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Product+environmental&p_File_Name=ENVPEP111237EN_V2.pdf&p_Doc_Ref=ENVPEP111237EN
- [36] Schneider Electric, *Fiche PEP drivers Lexium SD3*
https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Product+environmental&p_File_Name=ENVPEP111115EN_V2.pdf&p_Doc_Ref=ENVPEP111115EN
- [37] Schneider Electric, *Fiche PEP alimentation ABL*
https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Product+environmental&p_File_Name=ENVPEP130205EN_V2.pdf&p_Doc_Ref=ENVPEP130205EN
- [38] Commission Européenne, *Product Environmental Footprint Category Rules Guidance - Version 6.3*, 2018
https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/pdf/PEFCR_guidance_v6.3.pdf
- [39] RTE, *Bilan Électrique 2021*
https://bilan-electrique-2021.rte-france.com/production_totale/#

Index des tableaux et figures

Figures

- Figure 1 - Vues de l'œuvre Far Away
- Figure 2 - Schéma technique des mâts
- Figure 3 - Frontières du système
- Figure 4 - Carte ESP 32
- Figure 5 - Capteur LIDAR TF-MINI-PLUS
- Figure 6 - Haut parleurs 3 Watt 4 Ohm
- Figure 7 - Régulateur 48V-5V
- Figure 8 - Voyants LED
- Figure 9 - Connecteur tournant
- Figure 10 - Schéma d'une courroie Poly V
- Figure 11 - Flight case
- Figure 12 - Caisse de transport
- Figure 13 - Répartition des impacts par étape du cycle de vie
- Figure 14 - Résultats normalisés
- Figure 15 - Résultats pondérés
- Figure 16 - Répartition des impacts liés à la production des composants par catégories de composants
- Figure 17 - Répartition des impacts liés au transport des composants par mode de transport
- Figure 18 - Mix électrique français modélisé dans la base de données EF (données 2013)
- Figure 19 - Influence de l'origine du métal sur les résultats
- Figure 20 - Influence du nombre de tournées sur les résultats
- Figure 21 - Influence de la distance parcourue lors du transport de l'œuvre sur les résultats
- Figure 22 - Influence du mode de transport de l'oeuvre sur les résultats
- Figure 23 - Mix électrique belge modélisé dans la base de données EF (données 2013)
- Figure 24 - Mix électrique allemand modélisé dans la base de données EF (données 2013)
- Figure 25 - Influence du mix électrique du lieu d'exposition sur les résultats

Tableaux

- Tableau 1 - Liste des composants fournie par Chevalvert
- Tableau 2 - Bilan massique par catégorie
- Tableau 3 - Matériaux utilisés pour modéliser un moteur pas à pas
- Tableau 4 - Matériaux utilisés pour modéliser un driver
- Tableau 5 - Matériaux utilisés pour modéliser un bloc d'alimentation
- Tableau 6 - Évaluation globale et par étape du cycle de vie (valeurs absolues)
- Tableau 7 - Évaluation globale et par étape du cycle de vie (valeurs relatives)
- Tableau 8 - Résultats normalisés
- Tableau 9 - Résultats pondérés
- Tableau 10 - Contribution des différentes catégories de composants à l'étape de production des composants (valeurs absolues)
- Tableau 11 - Contribution des différentes catégories de composants à l'étape de production des composants (valeurs relatives)
- Tableau 12 - Contribution des différents modes de transport à l'étape de transport des composants (valeurs absolues)
- Tableau 13 - Contribution des différents modes de transport à l'étape de transport des composants (valeurs relatives)

- Tableau 14 - Variation des résultats entre le scénario « Métal UE » et le scénario de référence
- Tableau 15 - Variation des résultats entre le scénario « N3 » et le scénario de référence
- Tableau 16 - Variation des résultats entre le scénario « N8 » et le scénario de référence
- Tableau 17 - Variation des résultats entre le scénario « 1500 km » et le scénario de référence
- Tableau 18 - Variation des résultats entre le scénario « Train » et le scénario de référence
- Tableau 19 - Variation des résultats entre le scénario « BE » et le scénario de référence
- Tableau 20 - Variation des résultats entre le scénario « BE + DE » et le scénario de référence
- Tableau 21 - Critères de notation pour la représentativité des données

Sigles et acronymes

ACV	Analyse du Cycle de Vie
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
AFNOR	Association Française de Normalisation
ARCEP	Autorité de Régulation des Communications Électroniques et des Postes
BE	Belgique
CH	Chine
CNM	Centre National de la Musique
DE	Allemagne
EC-JRC	European Commission - Joint Research Center
EF	Environmental Footprint
FEDELIMA	Fédération des Lieux de Musiques Actuelles
HACNUM	Réseau national des arts hybrides et cultures numériques
IEA	International Energy Agency
ISO	International Organization for Standardization
LED	Light-Emitting Diode
LIDAR	Laser Imaging Detection and Ranging
PCB	Printed Circuit Board
PEF	Product Environmental Footprint
PEP	Profil Environnemental Produit
RTE	Réseau de transport d'Électricité
SMA	Syndicat des Musiques Actuelles
UE	Union Européenne