



HAL
open science

Analyse des impacts environnementaux et socio-économiques des systèmes d'éclairage

Kevin Bertin

► **To cite this version:**

Kevin Bertin. Analyse des impacts environnementaux et socio-économiques des systèmes d'éclairage. Energie électrique. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2022. Français. NNT : 2022TOU30071 . tel-03770195

HAL Id: tel-03770195

<https://theses.hal.science/tel-03770195>

Submitted on 6 Sep 2022

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

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



THÈSE

**En vue de l'obtention du
DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE
Délivré par l'Université Toulouse 3 - Paul Sabatier**

**Présentée et soutenue par
Kévin BERTIN**

Le 15 mars 2022

**Analyse des impacts environnementaux et socio-économiques
des systèmes d'éclairage**

Ecole doctorale : **GEETS - Génie Electrique Electronique, Télécommunications et
Santé : du système au nanosystème**

Spécialité : **Génie Electrique**

Unité de recherche :
LAPLACE - Laboratoire PLASMA et Conversion d'Énergie

Thèse dirigée par
Georges ZISSIS et Marc-André MEQUIGNON

Jury

M. Hassan AIT HADDOU, Rapporteur
M. Gilles LERONDEL, Rapporteur
M. Bruno LAFITTE, Examinateur
M. Stuart MUCKLEJOHN, Examinateur
Mme Marie-Pierre GLEIZES, Examinatrice
M. David MALEC, Examinateur
M. Georges ZISSIS, Directeur de thèse
M. Marc-André MEQUIGNON, Co-directeur de thèse

Remerciement

La prise de conscience progressive des enjeux environnementaux, techniques, scientifiques et sociétaux contemporains a été pour moi le déclencheur du développement de mon identité terrienne et d'une remise en question totale de mon rôle d'ingénieur. C'est ainsi qu'après six années à exercer je prenais la décision en 2016 d'amorcer un tournant professionnel majeur.

Cette thèse de doctorat qui a rythmé mon quotidien durant ces trois dernières années est l'aboutissement de ce premier tournant. Elle est le fruit de travaux et de réflexions s'inscrivant dans une durée allant bien au-delà de celle définie par sa propre temporalité. Elle se distingue par son approche interdisciplinaire et systémique, ce qui a été pour moi les deux principales motivations lorsque j'ai décidé de l'entamer. Ce caractère particulier nécessite la collaboration entre différents champs scientifiques et ce travail n'aurait pas été possible sans les soutiens scientifiques, techniques ou tout simplement moraux de tous ceux qui m'ont accompagné. Ce sont ces personnes que j'aimerais remercier dans les lignes suivantes.

Je souhaiterais tout d'abord remercier chaleureusement Georges Zissis et Marc Méquignon, respectivement directeur et co-directeur de ma thèse. Merci pour l'écoute, la confiance et l'autonomie que vous m'avez accordé dans la conduite de ces travaux. Cette thèse a été pour moi une opportunité formidable de me former à la démarche scientifique tout en traitant un sujet à la croisée de problématiques techniques et sociales qui me sont chères. Vos conseils, suggestions, recommandations et corrections, ainsi que les différentes rencontres que vous m'avez permises, ont été essentielles dans ma réussite.

J'aimerais ainsi remercier tous ceux que j'ai rencontrés et qui m'ont aidé, soutenu, qui ont montré un intérêt pour mes travaux, ou avec qui j'ai pu collaborer : Laurent Canale et Pascal Dupuis pour leur accueil, leur disponibilité et leurs conseils dans la rédaction de mes premiers articles scientifiques ; Stuart Mucklejohn, Barry Preston, Afroditi Moutsi et Peter Raynham pour l'ensemble de leur collaboration sur les sujets de l'éclairage horticole ; les membres de l'Annex SSL pour l'apport technique et scientifique de leurs travaux et pour m'avoir permis d'y contribuer ; Oussama Ben Abdellah et Guillermo Salas pour leur sérieux et la qualité de leurs contributions ; Emmanuel Laroche, pour la relecture attentive, les suggestions et l'intérêt porté à mes travaux ; Thomas, Julien, et ma mère pour les traductions,

corrections et relectures, Nadège Gunia pour les répétitions et l'administration de la soutenance.

Je souhaiterai également remercier la Région Occitanie et neOCampus pour leur soutien financier qui m'a permis de me consacrer sereinement à l'élaboration de ma thèse malgré la situation particulière liée à l'épidémie de COVID.

Au terme de ce premier tournant, mais au crépuscule du suivant, je remercie également celles et ceux qui me sont chers et que j'ai parfois délaissés ces derniers mois pour achever cette thèse. Leur présence, leur soutien et leurs encouragements ont été déterminant dans ma réussite. Je suis tout d'abord redevable à mes parents pour leur soutien moral et leur confiance totale malgré leur inquiétude face à ma réorientation. J'ai également une pensée toute particulière pour l'ensemble du Master Eco-Ingénierie de l'INP Toulouse qui m'a aidé à trouver ma voie et sans qui je ne serai pas la même personne aujourd'hui. Merci à Mathilde qui m'a aidé à mieux me connaître et m'accepter. Merci à Arnaud DiMaria et Vincent Cathelineau pour cette belle aventure du Transilab et pour avoir été une source d'inspiration et de connaissances inestimables. Merci au Kennedy&Co pour m'avoir supporté et soutenu dans cette période éprouvante. Merci à l'OM de m'avoir procuré ma dose d'émotion pure hebdomadaire. Merci aux lockdown sessions qui m'ont aidé à décompresser en plein confinement. Merci à Guizz, JeanZ, Julianor et Patator pour ces évadées virtuelles salvatrices. Merci enfin à Vincent pour ton amitié et tous ces moments passés ensemble.

Je souhaiterai finalement remercier celles et ceux qui m'ont inspiré par leur travaux et leurs engagements : Edgar Morin, Donella et Dennis Meadows, Rob Hopkins, Carbone 4, le Shift Project, Aurélien Barrau, Dominique Bourg, Pablo Servigne, Arthur Keller, Osons Comprendre, Defakator, l'ATECOPOL et les Economistes Atterrés. Que l'alarme que vous activée, certains depuis plusieurs décennies, puissent être entendue et comprise.

TABLE DES MATIERES

Remerciement.....	1
1 Résumé.....	7
1.1 Objectifs.....	7
1.2 Etudes réalisées	8
2 Introduction – La lumière au fil du temps	10
2.1 De la lumière naturelle aux premières torches et bougies	10
2.2 Les premières lampes électriques (XIXème – début XXème siècle).....	12
2.3 Les lampes contemporaines (fin XXème début XXIème siècle).....	12
3 Les multiples usages et normes de l'éclairage	15
3.1 Terminologie associée à l'éclairage et notions de photométrie :.....	15
3.2 L'éclairage naturel.....	20
3.3 L'éclairage artificiel.....	20
3.3.1 L'éclairage extérieur	20
3.3.2 L'éclairage intérieur	22
3.3.3 Des technologies et des usages en constante évolution	22
4 Contexte : Les différents enjeux de l'Anthropocène.....	25
4.1 Un monde fini et des stocks de ressources limitées	25
4.1.1 Ressources énergétiques et matérielles	26
4.1.2 Les matériaux critiques pour l'éclairage	28
4.1.3 Alternatives et matériaux de substitution.....	32
4.2 La réponse institutionnelle : les objectifs du développement soutenable	33
4.3 Vers un changement de paradigme ?.....	35
4.3.1 Sobriété énergétique et matérielle	37
4.3.2 Le cas de la transition numérique	38
4.4 Premier bilan pour l'éclairage artificiel	41
5 Les méthodes et outils pour l'analyse des impacts des technologies.....	44
5.1 Une palette d'outils pour l'analyse des impacts environnementaux et socio-économique.....	44

5.1.1	L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) ou l'ACV environnementale.....	44
5.1.2	L'empreinte carbone.....	52
5.1.3	Le Coût du Cycle de vie (CCV).....	53
5.1.4	L'Analyse de Cycle de Vie Sociale (ACV-S).....	56
5.1.5	L'Analyse de Soutenabilité des Cycles de Vie (ASCV).....	58
5.2	...avec leurs limites dans leur utilisation et dans la prise en compte des impacts d'usages.....	61
5.2.1	Les incertitudes sur les externalités.....	62
5.2.2	Les risques photo-biologiques.....	64
5.2.3	Pollution lumineuse.....	71
5.2.4	Usure et risques de panne.....	76
5.2.5	La fin de vie.....	78
5.2.6	Effets sociaux et sociétaux.....	80
6	Etudes.....	84
6.1	ACV des systèmes d'éclairage en fonction de différents mix électriques.....	87
6.1.1	Introduction.....	87
6.1.2	Objectifs et cadre de l'étude.....	88
6.1.3	Méthode d'analyse des impacts potentiels.....	89
6.1.4	Frontière de l'étude.....	90
6.1.5	Caractéristiques des lampes étudiées.....	91
6.1.6	Définition du flux lumineux maintenu (M-lmO).....	92
6.1.7	Unité fonctionnelle et flux de référence.....	94
6.1.8	Inventaire du Cycle de Vie.....	95
6.1.9	Résultats.....	98
6.1.10	Discussion.....	120
6.1.11	Conclusion.....	129
6.2	Optimum de durabilité économique.....	131
6.2.1	Méthodes.....	131
6.2.2	Données.....	132

6.2.3	Résultats	134
6.2.4	Discussions	135
6.2.5	Conclusion.....	136
6.3	Analyse Multicritère des systèmes d'éclairage horticoles.	138
6.3.1	Description du cas d'étude et données	139
6.3.2	ACV des systèmes d'éclairage horticoles	144
6.3.3	Etude de la pollution lumineuse des serres.....	153
6.3.4	Etude de retour sur investissement.....	177
6.3.5	Analyse Multicritère	179
6.3.6	Conclusion.....	184
7	Discussion.....	187
8	Conclusion	192
9	REFERENCES.....	194
10	ANNEXES	215
10.1	Données d'inventaire.....	215
10.1.1	CFL.....	215
10.1.2	LED O.....	216
10.1.3	LED N1 à 4.....	218
10.1.4	T5.....	220
10.1.5	Transport	222
10.2	Caractérisation des impacts par phase du cycle de vie	222
10.2.1	France	223
10.2.2	Australie	226
10.2.3	Nouvelle-Zélande.....	230
10.2.4	Union Européenne.....	233
10.3	Données inventaires lampes horticoles	237
10.3.1	HPS.....	237
10.3.2	MH.....	238
10.3.3	LED	240

10.4	Halo Lumineux au sol au seuil de 5 lux et 1 lux	242
10.5	Matrice Multicritère	243
10.6	Analyse Multicritère selon les observateurs.....	246
10.6.1	Environnement	246
10.6.2	Nuisances Lumineuse	247
10.6.3	Economie	248

1 Résumé

Tout d'abord, un bref historique des systèmes d'éclairage et une présentation des terminologies et usages qui leurs sont associés sont présentés. Ensuite, une analyse systémique des enjeux de l'Anthropocène et de ce qu'ils impliquent pour la transition sociétale présente le contexte de ce travail. Elle met en avant un impératif de sobriété matérielle et énergétique indispensable pour la mitigation des crises climatiques. S'ensuit un premier bilan à propos des apports et des risques relatifs au développement des nouvelles technologies de l'éclairage. La révolution récente des systèmes d'éclairage, qui a vu la technologie LED être largement adoptée, a permis de faire des progrès considérables en termes d'efficacité énergétique pendant la phase d'utilisation et a ainsi participé à réduire les impacts environnementaux ainsi que les coûts associés aux systèmes d'éclairage. Toutefois, malgré des avancées majeures en termes d'efficacité énergétique, de nombreux questionnements sont apparus au sujet des impacts potentiels des systèmes d'éclairage, sur notre environnement, notre santé, notre bien-être et notre productivité qu'ils soient positifs ou négatifs, ne sont pas considérés et ne doivent plus être négligés. Une large étude bibliographique développe chacun de ces impacts, allant des risques photo-biologiques à la pollution lumineuse en passant par différents aspects sociotechniques liés aux usages de l'éclairage. Enfin une étude des différentes méthodes d'analyse d'impacts existantes ou en développement est réalisée afin d'en identifier les avantages et les limites. Alors que l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) est probablement l'outil le plus performant et le plus reconnu pour l'étude des impacts des produits et des services, ses évolutions, l'Analyse de Cycle Vie Sociale (ACV-S) et l'Analyse de Soutenabilité du Cycle de Vie (ASCV) sont encore en plein développement et nécessiteront probablement encore quelques années avant d'être uniformément reconnues et utilisées.

1.1 Objectifs

La problématique de cette thèse est d'évaluer les développements récents et futurs des systèmes d'éclairage face aux différents enjeux de la lutte contre les dérèglements climatiques. Pour cela, ce travail adopte une posture interdisciplinaire et étudie les différents impacts environnementaux et socio-économiques directs ou indirects que l'usage des systèmes d'éclairage peut générer sur l'Homme et son environnement. L'objectif est de mettre en place ou de développer des méthodes qui permettent d'identifier et comparer ces impacts en fonction des usages. Ces différentes méthodes doivent permettre d'identifier de nouvelles pratiques pour que

les systèmes d'éclairage contribuent efficacement à diminuer les impacts des activités humaines notamment en identifiant et limitant l'apparition ou les transferts d'impacts mal anticipés. Dans un premier temps, les aspects de durabilité et d'efficacité sont discutés en s'appuyant sur les ACVs de différentes lampes en fonction des mix électriques et sur une analyse du Coût du Cycle de Vie (CCV). Dans un second temps, les impacts de l'éclairage horticole sont évalués (ACV et pollution lumineuse) et associés à une étude économique, ils alimentent une analyse multicritère qui permet l'aide à la décision autour des systèmes d'éclairage.

1.2 Etudes réalisées

Différentes études de cas permettent, tout d'abord, de discuter des impératifs de durabilité et d'efficacité à travers notamment l'influence des mix électriques sur les résultats et les conclusions de l'ACV des systèmes d'éclairage. Cette première étude introduit le Megalumen.heure maintenu comme unité fonctionnelle et met en évidence différents profils énergétiques ainsi que la présence d'un point de bascule en France qui tend à voire la phase de fabrication contribuer autant, voire plus, aux impacts potentiels que la phase d'utilisation (de façon similaire aux équipements électroniques ou informatiques). Ce constat incite à ne plus miser seulement sur l'efficacité énergétique, et fait de la durabilité des lampes un paramètre déterminant qu'il est nécessaire de développer. Dans un second temps, une méthode d'analyse du coût du cycle de vie (CCV) confirme cet impératif de durabilité en définissant un optimum économique de durée de vie environ deux fois supérieur à la moyenne des lampes que l'on trouve actuellement sur le marché.

Pour finir ce travail se concentre sur une analyse multicritère d'un usage émergent des systèmes d'éclairage : les serres horticoles. Une ACV est tout d'abord réalisée pour évaluer les performances et les impacts de différentes lampes spécifiques à cet usage. Ensuite une quantification de la pollution lumineuse sur les parois et à l'extérieur de la serre met en évidence les systèmes qui contribuent le plus aux nuisances lumineuses nocturnes ainsi que les moyens de s'en prémunir. Puis une étude de retour sur investissement évalue les performances économiques des différentes configurations testées. Enfin une analyse multicritère basée sur le processus d'analyse hiérarchique (AHP) a permis de déterminer quels systèmes d'éclairage sont les plus pertinents en fonction de tous les paramètres et résultats précédents. Les résultats indiquent que les lampes HPS et LED sont les plus performantes selon le point de vue de trois observateurs : « environnement », « nuisances lumineuses » et « économie ».

Enfin, les résultats sont discutés et quelques recommandations sont proposées afin d'améliorer les usages et pratiques autour de l'éclairage.

2 Introduction – La lumière au fil du temps

L'avènement d'un éclairage fiable dans les foyers et dans nos entreprises a joué et continue de jouer un rôle majeur dans l'organisation des modes de vie moderne. Avec l'impact de l'eau courante sur la santé générale et peut-être celui d'Internet sur nos moyens de communication et d'organisation, il est difficile d'imaginer une technologie plus impactante que l'éclairage. L'électrification de l'éclairage a ainsi peu à peu artificialisé notre rapport à la lumière en nous permettant d'étendre nos journées, et de modifier nos rythmes de vie et organisations, en étant moins soumis aux contraintes des cycles solaires. L'éclairage a ainsi parcouru un long chemin pour arriver là où il en est aujourd'hui même si son déploiement est encore inégal en fonction des régions du monde. Cette introduction propose un bref historique des différentes technologies qui se sont succédées jusqu'aux lampes contemporaines qui nous intéressent plus particulièrement dans le cadre de ce travail.

2.1 De la lumière naturelle aux premières torches et bougies

Avant toutes choses, il est important de revenir sur ce qui a été la toute première source de lumière : la lumière naturelle. C'est le début de l'histoire de l'éclairage, mais sous une forme qui n'a été ni créée ni contrôlée par l'Homme. La lumière naturelle, le soleil, la lune et les étoiles ont été les sources d'éclairage pendant de nombreuses années avant l'apparition de l'Homme. Cette lumière naturelle a ensuite régi pendant des millénaires les cycles biologiques ainsi que le rythme circadien des Hommes et de leurs ancêtres ou encore des différentes espèces peuplant la Terre.

C'est l'Homme qui, le premier, a voulu créer de la lumière à un moment de l'année où il n'y en avait pas et à un endroit où il en avait besoin. Cette première utilisation de la lumière artificielle remonte à la préhistoire et les traces de ces premières tentatives ne sont bien souvent que des hypothèses. A l'origine, la première lumière fabriquée par l'homme devait être le feu, bien qu'il ait probablement servi davantage à se réchauffer ou à cuisiner et à se protéger plutôt qu'à rallonger la journée. Selon l'Illuminating Engineering Society, *"la première tentative d'éclairage par l'homme a eu lieu il y a environ 70 000 ans. La première lampe inventée était faite à partir d'un coquillage, d'une roche creuse ou d'un autre objet non-inflammable similaire qui était rempli d'un matériau combustible (probablement*

de l'herbe ou du bois séché), saupoudré de graisse animale (l'essence à briquet originale) et enflammé." [1]

Les torches portatives ou montées sur bâtiment ont ensuite progressé bien au-delà de leur début rudimentaire, mais les principes de base restent les mêmes : la source de combustible est un certain type d'huile, de cire ou de matériau combustible entouré d'un matériau ininflammable. C'est grâce notamment à l'apparition des premières technologies de ventilation (par exemple, les tubes et les cheminées) qu'on a pu considérablement améliorer notre capacité à utiliser efficacement le feu pour l'éclairage [2].

Cependant, l'avancée technologique la plus importante a sans doute été l'introduction de la mèche pour produire des bougies. Les mèches, associées aux premiers matériaux utilisés pour les bougies, comme la cire d'abeille ou le suif (un dérivé de la graisse animale), représentaient alors le progrès technologique le plus important en matière d'éclairage depuis la découverte du feu lui-même. Il y a des indications selon lesquelles le coquillage de mer avec sa mèche naturelle, ait été utilisé comme source de lumière dans le golfe Persique il y a au moins 4500 ans [3]. Selon l'auteur Patricia Telesco, "*des chandeliers datant du quatrième siècle avant J.-C. ont été découverts en Égypte*". Elle attribue aux Grecs et aux Romains l'introduction de la mèche dans l'idée égyptienne de l'éclairage au suif sans mèche [4]. Enfin de l'autre côté du monde, les sociétés asiatiques fabriquaient des bougies à partir de graisse de baleine vers 200 ans avant J-C [5]. Au fur et à mesure du temps, les Hommes ont également appris à mieux exploiter les sources de lumière naturelle comme par exemple avec l'architecture du Panthéon de Rome conçue en grande partie autour de son oculus sommital central comme unique source de lumière directe du monument.

Par la suite et ce jusqu'au XVIIIème siècle, il y a peu d'avancement significatif dans la manière dont les Hommes ont produit de la lumière. Le carburant et le combustible évolue mais la technique reste relativement similaire. La première lampe à gaz a été inventée en 1790 en Angleterre et a, ensuite, été introduite au Etats-Unis pour être d'abord utilisée pour l'éclairage de rue à Philadelphie et Baltimore.

2.2 Les premières lampes électriques (XIXème – début XXème siècle)

C'est le début des années 1800 qui marque les débuts réels de l'artificialisation de notre rapport à la lumière avec l'apparition des premières lampes électriques. Elles ont tout d'abord été utilisées pour l'éclairage des rues afin de lutter contre les agressions dans les zones urbaines. Au XIXème siècle, on retrouve également une utilisation pour l'éclairage et l'exploitation des mines de charbon (ce qui sera également responsable des « coups de grisou »). Dans les années 1840, la lampe à arc est introduite à Paris. Au début des années 1860, les lampes fluorescentes ont été inventées. Thomas Edison a mis au point l'ampoule à incandescence à filament de carbone en 1879, qui est devenue la norme d'éclairage pendant des décennies [6]. Au début des années 1880, l'électricité à courant continu s'est répandue dans les villes, suivie par le courant alternatif à la fin des années 1880, ce qui a permis d'enrayer la tendance à l'utilisation des lampes à gaz et la conversion des appareils à gaz pour une utilisation de l'électricité a ainsi commencé [7]. L'électricité a rapidement remplacé le gaz pour l'éclairage général même si en Europe, le gaz a continué à être largement utilisé pendant encore un certain nombre d'années. En 1901, la lampe à vapeur de mercure utilisant le courant standard a été inventé par Peter Cooper Hewitt. En 1904, Daniel Mc Farlan Moore introduit les lampes fluorescentes sur le marché, ce qui poussa Général Electric à améliorer les lampes à incandescences avec un filament en tungstène. Au XXème siècle, divers types d'éclairage à décharge à haute intensité (DHI) ont été mis au point, le sodium haute-pression, la vapeur de mercure et les halogénures métalliques. Toutes ces lampes utilisent le même type de technologie, en envoyant un courant électrique entre deux électrodes et à travers un tube rempli de gaz inerte, qui permet d'émettre une lumière visible. Lorsque les lampes au néon ont été introduites, elles utilisaient de l'argon ou du krypton dans un tube fermé, que l'électricité faisait briller [8].

2.3 Les lampes contemporaines (fin XXème début XXIème siècle)

Dans un premier temps pour réduire l'encombrement des tubes fluorescents, les premières lampes fluorescentes de forme circulaire ou en U ont été brevetées en 1941 [9]. Les lampes fluorescentes compactes (CFL) ont été mises au point sous leur forme spirale en 1976 par Edward E. Hammer, ingénieur chez General Electric, en réponse à la crise pétrolière des années 1970. C'est seulement dans les années

1990-2000, que les lampes CFL ont commencé à être largement adoptées notamment après la réduction de leur encombrement et l'intégration du ballast dans la lampe [10]. La technologie est basée sur une version miniature du système fluorescent linéaire (un ballast et une lampe). Comme les lampes fluorescentes linéaires, les CFL contiennent une petite quantité de mercure dans le tube à arc qui est récupérable, mais seulement si la CFL est collectée et recyclée correctement. En France, elles ont progressivement remplacé les lampes à incandescences, suite à leur interdiction en 2012, et ceci jusqu'à la mise sur le marché des premières lampes à diode électroluminescente (LED).

En 1962, Nick Holonyak, consultant chez General Electric invente la première LED. C'est ensuite dans les années 1990 grâce aux travaux de Shuji Nakamura et Takashi Mukai sur la technologie des semi-conducteurs InGaN que furent inventées les LEDs bleues, et par la suite des lampes LEDs blanches grâce à l'utilisation d'un luminophore jaune. En 2014, Shuji Nakamura reçut le prix Nobel de physique en compagnie de Isamu Akasaki et Hiroshi Amano pour ces travaux. La lampe LED est une lampe à l'état solide (SSL) qui ne nécessite pas de boîtier en verre comme les ampoules traditionnelles et produit de la lumière en convertissant le courant électrique à l'aide d'un semi-conducteur, qui est devenu beaucoup plus économe en énergie et moins cher au fil du temps.



Figure 1. Les différents types de lampes contemporaines

Il existe trois méthodes courantes par lesquelles les LED produisent de la lumière blanche. La première est l'approche de conversion du phosphore, dans laquelle la lumière bleue ou UV des LEDs pompe la lumière dans un phosphore qui convertit la lumière en un spectre plus distribué ressemblant à la lumière blanche. Deuxièmement, il peut y avoir des lampes LEDs qui mélangent la lumière de différentes LEDs de couleurs discrètes pour créer de la lumière blanche. Enfin, il existe une approche hybride dans laquelle des LEDs à conversion de phosphore et des LEDs de couleur discrète sont combinées pour créer l'émission de la lumière souhaitée. Les lampes LEDs sont considérées comme des systèmes d'éclairage ultra efficaces. Elles peuvent en effet actuellement atteindre une efficacité supérieure à 100lm/W et la durée de vie annoncée par les fabricants a

considérablement augmenté ces dernières années, passant de 10000h pour les premières lampes LEDs à plus de 25000h, tandis que leur processus de fabrication a été amélioré, réduisant la quantité globale de matériaux et d'énergie nécessaires. Le plan de projection vise une efficacité de plus de 200lm/W et une durée de vie de 50000h pour les prochaines années [11]. Ces projections ont été confirmées en 2021 avec Phillips qui a mis sur le marché la première lampe LED blanche (3000K) pour un usage domestique annonçant une efficacité de 210 lm/W et une durée de vie nominale de 50000 h¹.

¹ <https://www.lighting.philips.co.uk/consumer/p/led-bulb/8719514343788>

3 Les multiples usages et normes de l'éclairage

Tout d'abord il est nécessaire de revenir sur certaines notions de base de photométrie, ainsi que la terminologie liée aux caractéristiques des lampes et des luminaires.

3.1 Terminologie associée à l'éclairage et notions de photométrie :

Le flux lumineux décrit la quantité de lumière rayonnée par une source dans toutes les directions de l'espace. Il s'exprime en lumens (lm). Le flux lumineux permet ainsi de comparer la puissance lumineuse de différentes sources.

L'éclairement est la densité du flux lumineux reçue par une surface. Il est exprimé en lux (lx). 1 lx est égal à 1 lm/m². Les valeurs d'éclairement peuvent varier considérablement dans un environnement naturel, allant de 0.2 lx une nuit de pleine lune à 100000 lx sous le soleil en été.

L'intensité lumineuse considère l'aspect directionnel de la lumière. Elle correspond au flux lumineux émis par une unité d'angle solide dans une direction donnée. Elle est exprimée en candelas (cd).

La luminance est la seule grandeur perçue réellement par l'œil humain et correspond à la sensation visuelle créée par une source ou par une surface éclairée. Elle est directement liée à l'éclairement rétinien et est exprimé en candelas par mètre carré (cd/m²).

La distribution de puissance spectrale (SPD) ou le spectre est la représentation de l'énergie produite par une source lumineuse sur chaque longueur d'onde du spectre lumineux compris entre 380nm et 760nm pour la lumière visible. Elle est exprimée en Watt (W), mais est également souvent représenté de manière relative et donc sans unité.

Le rendement lumineux (ou efficacité lumineuse) η est obtenu en divisant flux lumineux ϕ d'une lampe, exprimé en lumens, par sa puissance P, exprimée en watts. L'unité du rendement lumineux est le lm/W. Soit : $\eta = \phi / P$ (lm/W).

La durée de vie représente généralement le nombre d'heures moyen de fonctionnement d'un lot de lampes avant que 50 % d'entre elles ne soient hors service. La notion de 'hors service' peut différer d'une région du monde à l'autre. En Europe, une lampe est considérée comme étant hors service lorsqu'elle n'émet plus

que 70 % de son flux lumineux initial (85 % pour les lampes incandescentes). Aux Etats-Unis, une lampe est considérée comme hors service lorsqu'elle ne fonctionne plus, ce qui change fondamentalement la perception de cette notion.

Le rendement du luminaire (LOR – Light Output Ratio) est la caractéristique optique principale d'un luminaire et il est défini comme étant le rapport du flux lumineux émis par le luminaire et du flux lumineux émis par ses lampes

$$LOR = \frac{\Phi_{luminaire}}{\Phi_{lampe}} \quad (\text{Équation 1})$$

Le rendement du luminaire inférieur (DLOR) et supérieur (ULOR) sont définis respectivement comme étant le rapport entre le flux lumineux inférieur ou supérieur émis par le luminaire et le flux lumineux total de la ou des sources lumineuses.

La distribution lumineuse du luminaire décrit comment la lumière émise par la source est distribuée dans l'espace. Pour les gammes professionnelles de luminaires, la distribution lumineuse est spécifiée, dans les catalogues techniques, au moyen d'un diagramme polaire reprenant les distributions perpendiculaire et parallèle à l'axe principal du luminaire. Trois types de distribution sont identifiés : la distribution extensive, où le faisceau lumineux est large, donnant un éclairage relativement uniforme ; la distribution intensive avec un faisceau lumineux étroit, donnant un éclairage d'accentuation et la distribution asymétrique, qui est utilisée pour éclairer des surfaces verticales comme des murs ou des tableaux. (Figure 2 ci-dessous)

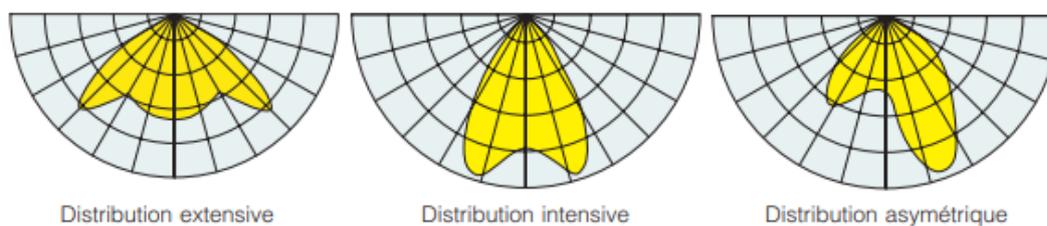


Figure 2: Représentation des différents types de distribution lumineuse

La description de la distribution spatiale du flux lumineux d'un luminaire est, pour les gammes professionnelles, souvent disponible sous format électronique (fichiers photométriques) permettant ainsi la modélisation d'une installation d'éclairage à l'aide de logiciels spécifiques.

La température de couleur (CCT) caractérise principalement la couleur de la lumière émise et donc l'ambiance lumineuse créée. Elle s'exprime en kelvins (K) et

correspond à la température à laquelle on devrait porter un corps noir pour qu'il émette une couleur identique à celle émise par la source. On parle de couleurs froides (tirant vers le bleu) lorsque la température de couleur est élevée (supérieure à 5000 K) et de couleurs chaudes (tirant vers le rouge orange) lorsque cette température est inférieure à 3300 K. Il est cependant important de préciser que des lampes avec des distributions de puissances spectrales différentes peuvent avoir la même température de couleur. La température de couleur ne rend donc pas compte complètement des particularités du spectre.

L'indice de rendu de couleur (IRC) mesure la capacité d'une source lumineuse à bien restituer les couleurs des objets éclairés. L'IRC est compris entre 0 et 100 et il est mesuré sur une palette de 8 échantillons de couleurs généraux et 7 échantillons supplémentaires spécifiques. Sa valeur moyenne est exprimée en Ra. La méthode de mesure a été définie par le Comité International de l'éclairage (CIE) [12]. Un IRC supérieur à 80 est généralement recommandé pour les applications intérieures. Par la suite, l'IRC qui ne donnait pas entièrement satisfaction a été amélioré avec la méthode TM 30.

La TM 30 mesure le rendu des couleurs d'une source lumineuse sous deux angles, d'une part la fidélité des couleurs (Indice de fidélité des couleurs Rf) et d'autre part le degré de saturation des couleurs (Relative Gamut Index – indice de hausse ou baisse de saturation Rg) [13]. La saturation exprime alors l'intensité de la coloration par rapport au maximum possible. La valeur Rf décrit la similarité des couleurs en comparant avec une couleur de référence, le rendu de 99 couleurs échantillons, réparties selon 7 types (nature, peau, textile, peinture, plastique, matière imprimée, systèmes de couleurs).

L'UGR (Unified Glare Ratio) est un facteur calculé via une formule unifiée visant à évaluer l'éblouissement d'inconfort créé par une source lumineuse donnée. De façon simplifiée, le facteur dépend de la luminance de fond, de la luminance des parties éclairantes, de l'angle solide et de la position des luminaires. Pour un luminaire donné, l'UGR varie généralement entre 10 et 30. Un luminaire avec un UGR inférieur à 13 possède un éblouissement d'inconfort négligeable, un UGR supérieur à 28 indique un éblouissement intolérable.

Le **PAR** est défini comme le rayonnement photosynthétique actif. Il désigne la gamme spectrale du rayonnement solaire de 400 à 700 nanomètres que les organismes photosynthétiques sont capables d'utiliser dans le processus de

photosynthèse Il ne s'agit pas d'une métrique à proprement parlé mais plutôt d'un modèle d'absorption qui définit la fenêtre de lumière requise pour que la photosynthèse puisse se faire. Ce modèle d'absorption est représenté par le spectre d'action photosynthétique (Figure 3).

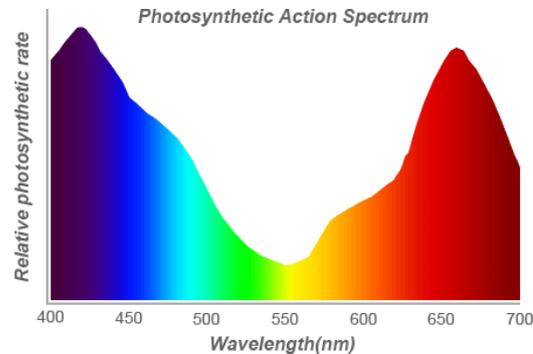


Figure 3. Spectre d'action photosynthétique

Le spectre d'action photosynthétique est une moyenne de l'absorption lumineuse nécessaire pour les plantes. Chaque plante a en réalité une courbe d'absorption spécifique, mais la courbe de la Figure 3 reste l'une des plus populaires pour déterminer la lumière dont les plantes ont besoin. On constate deux pics sur cette courbe : l'un autour de 420 nm dans le bleu et une seconde autour de 670 nm dans le rouge. En revanche la majorité de la lumière verte (entre 520 et 570nm) est réfléchiée par la plante, c'est pourquoi la majorité des plantes apparaissent vertes pour l'œil humain.

. En 1970, le docteur McCree proposa une courbe représentant le pourcentage d'énergie radiative moyen pour un ensemble de plantes [14]. Cette courbe est communément appelée la courbe de McCree et est présentée dans la Figure 4.

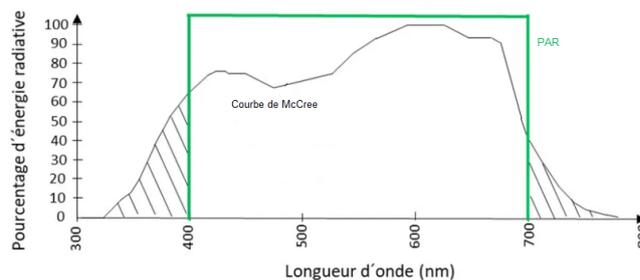


Figure 4. Courbe de McCree adaptée de [14]

Comparé au spectre d'action photosynthétique, la courbe de McCree montre que les plantes font également usages des UVs (300-400nm), des infrarouges profonds (700-750nm) mais également de la lumière verte. Dans le cadre de l'éclairage horticole il est nécessaire de s'assurer que le spectre produit par l'ensemble des luminaires se rapproche autant que possible de ces deux courbes,

car toute la lumière en dehors de ces courbes n'est pas absorbée par les plantes, et résulte en une réduction de l'efficacité globale de l'installation et un gaspillage de lumière et d'énergie.

Plusieurs unités peuvent être utilisées pour caractériser une lumière dans le cadre de la production de végétaux. A l'image des lumens et des lux, l'industrie horticole utilise un set d'unité permettant de définir au mieux la quantité et la qualité de la lumière spectrale émise dans le PAR pour un environnement donné

Le **PPF** est le flux de photons photosynthétiques. C'est une analogie directe au Lumen. Le PPF est exprimé en micromole par seconde ($\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$). C'est la quantité de photons PAR émise par seconde dans le faisceau lumineux (Figure 5).

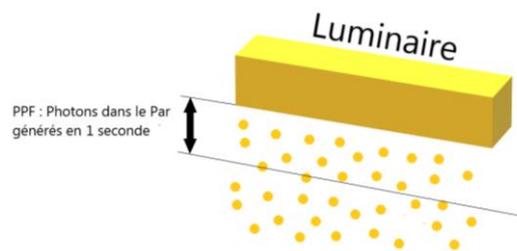


Figure 5. Flux de photons photosynthétiques (PPF)

Bien que cela ne nous indique pas combien de lumière atteint le végétal, le PPF est une information précieuse pour calculer l'efficacité énergétique d'un éclairage horticole.

Analogie directe aux lux, la densité de flux photonique photosynthétique (**PPFD**) est exprimé en micromole par seconde par m^2 ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). Elle permet de quantifier sur une surface donnée, à une distance donnée de l'éclairage, le nombre de photons PAR incidents par seconde Figure 6.

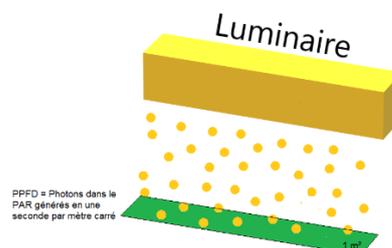


Figure 6. Densité de flux photonique photosynthétique (PPFD)

C'est une mesure primordiale car elle indique la quantité de lumière disponible à la plante pour sa photosynthèse. En général les mesures de PPFD prises à plusieurs endroits sur la surface éclairée sont cartographiées. L'objectif est d'avoir une homogénéité sur toute la surface de culture pour éviter des disparités dans la

croissance des végétaux selon leur placement. Il est crucial d'obtenir cette cartographie des PPFD car les mesures uniques de PPFD sont trompeuses. En effet, la plupart des éclairages présentent une très forte concentration de lumière au centre de la surface et cette intensité décroît rapidement en s'en éloignant.

3.2 L'éclairage naturel

Depuis toujours, l'Homme a vécu au rythme des saisons et de l'éclairage naturel. Ce n'est que depuis l'apparition des sources artificielles qu'il a étendu son rythme de vie et de travail. Néanmoins, l'éclairage naturel reste un choix prépondérant dans nombre de situations et de modes de vie. Il faut différencier deux types de sources de lumière naturelle : la lumière naturelle directe et la lumière naturelle diffuse. Ainsi, le soleil fournit un éclairage direct, puissant et changeant, alors que le ciel est une source de lumière plutôt diffuse et stable.

Pour l'Homme, l'éclairage naturel apporte de nombreux avantages tant physiologiques que psychologiques : elle rend la couleur des objets « réelle », elle ne consomme pas d'énergie et dans un certain cas elle peut être suffisante pour éclairer convenablement nos intérieurs, elle permet à notre corps de réguler notre horloge biologique et de générer de la vitamine D.

En revanche la lumière naturelle n'est cependant pas parfaite pour nos usages : elle change constamment d'intensité et de couleur, elle peut atteindre de très fortes valeurs de luminance et créer un certain éblouissement, elle peut entraîner une surchauffe dans certains bâtiments ou habitations, mais également des lésions aux cellules de la peau en cas d'exposition prolongée.

3.3 L'éclairage artificiel

Les usages de la lumière artificielle sont aujourd'hui multiples et elle nous accompagne au quotidien dans toutes nos activités personnelles ou professionnelles. Pour chacun de ses différents usages, la qualité et la quantité de lumière recherchée varie considérablement. On peut tout d'abord distinguer l'éclairage extérieur et l'éclairage intérieur, qu'il soit dans un cadre professionnel ou personnel.

3.3.1 L'éclairage extérieur

Parmi les applications de l'éclairage extérieur, on retrouve tout ce qui est relatif à l'éclairage routier à la fois pour assurer la bonne circulation des véhicules ainsi

que celle des piétons. En France, les normes NF EN 13201-2 et CIE 15.2 définissent les exigences de performances concernant les besoins visuels des usagers de la route et considèrent les aspects environnementaux liés à l'éclairage public. Elles intègrent également la réglementation concernant l'éclairage ornemental (bâtiment et monument) ou encore celle des parcs et jardins publics. Toutefois, ces normes ne se prononcent pas sur les critères qui justifient ou non l'éclairage d'une zone donnée.

En ce qui concerne les applications d'éclairage extérieurs sur les lieux de travail, c'est la norme NF EN 12464-2 [15] qui est en vigueur. Elle spécifie la quantité et la qualité d'éclairage nécessaire pour que les tâches visuelles soient assurées avec précisions et en toute sécurité sur les lieux de travail. Elle spécifie également des limites d'éclairement en fonction de la localisation (urbaine, rurale, etc...) en vue de limiter la pollution lumineuse afin de préserver les différents écosystèmes environnants tout en prenant en compte la diversité des usages et des populations.

L'éclairage des zones d'activités sportives et de loisir, sont un autre type d'application régi, elle, par la norme NF EN 12193. Elle définit les principes généraux pour assurer de bonnes conditions de visibilité aux sportifs, arbitres et spectateurs.

Enfin, le dernier type d'éclairage concerne l'éclairage commercial que ce soit des vitrines ou des enseignes lumineuses. Bien que l'installation des enseignes soit encadrée en terme de seuil maximal de luminance, ce n'est que depuis fin 2018 [16] que les enseignes et vitrines doivent être éteintes entre 1h et 6h du matin, ou au plus tard 1h après la fermeture (ou allumé au plus tôt 1h avant l'ouverture) en cas de travail de nuit. Cette nouvelle règle s'applique également pour les panneaux publicitaires dans les agglomérations et communes de moins de 800000 habitants. En revanche, c'est le règlement local de publicité qui entre en vigueur pour les agglomérations de plus de 800000 habitants. On constate toutefois que cette réglementation dans son ensemble n'est encore que très minoritairement respectée.

En France, la consommation d'électricité pour l'éclairage des collectivités représente environ 12% (56TWh) de la consommation totale d'électricité, dont 5.6 TWh pour l'éclairage public, ce qui représente environ 10.5 millions de points lumineux [17].

3.3.2 L'éclairage intérieur

Parmi les applications d'éclairages intérieurs on peut distinguer l'éclairage résidentiel et l'éclairage professionnel. Tout comme l'éclairage extérieur des zones de travail, l'éclairage intérieur professionnel est lui aussi réglementé notamment par le code du travail qui définit par exemple un seuil de 200 lux minimum mais ne dit rien sur la qualité de la lumière. D'autre part, les normes NF EN 12464-1 [18] et ISO 8995/CIE 8008 [19] recommandent différentes exigences auxquelles devrait satisfaire une installation d'éclairage pour qu'une tâche soit effectuée dans de bonnes conditions, mais ces normes ne représente pas aujourd'hui une obligation réglementaire :

- L'éclairement moyen à maintenir sur la surface de référence de la zone de travail,
- Une limite de l'éblouissement d'inconfort (UGR) [20]
- Une valeur minimale de l'indice de rendu de couleur (IRC) de 80

En ce qui concerne l'éclairage résidentiel, les normes en vigueur sont nombreuses et elles concernent essentiellement les producteurs d'ampoules [21]. La fabrication de lampes est strictement réglementée pour des raisons évidentes de sécurité mais également pour assurer l'interopérabilité ainsi que les performances (durée de vie et efficacité). Elles peuvent être générales à tous les systèmes ou bien spécifiques en fonction du type de lampes (incandescences, lampes à décharge, LED ou OLED). Enfin on peut distinguer différents types d'usage pour l'éclairage intérieur : général, direct, indirect, mixte, d'ambiance, directionnel ou encore fonctionnel ; chacun avec des types de lampes et luminaires bien spécifiques.

3.3.3 Des technologies et des usages en constante évolution

De nouvelles innovations et recherches ont finalement permis de voir naître de nouveaux types de lampes intelligentes (Smart lampes) et de nouvelles logiques dans la manière que nous avons de nous éclairer (Human Centric Lighting).

3.3.3.1 *Eclairage intelligent (Smart Lampes)*

L'éclairage intelligent repose sur des percées technologiques dans le domaine des communications sans fil et des LED. Les premières fonctionnalités étaient liées à l'éclairage : réglage des couleurs, gradation, programmation. S'y sont ajoutés le contrôle par des capteurs (occupation, lumière du jour, caméra, etc.), le traitement des données (enregistrement et analyse des données), les fonctions de réseau (renforcement et communication par WiFi) et l'intégration dans des systèmes

domotiques. Parmi les dernières évolutions, il y a les nouvelles versions de protocoles à faible consommation d'énergie, l'utilisation du concept de veille, les fonctions de non-éclairage, la communication/interopérabilité avec les systèmes d'éclairage câblés, l'utilisation du LiFi (réseaux sans fil qui utilise des LEDs pour transmettre des données) et le contrôle à partir d'un très grand nombre de systèmes/applications de domotique. L'éclairage intelligent et communicant joue un rôle de premier plan dans l'IoT (Internet of Thing) et le LiFi. Avec ce développement, le rôle principal d'un produit devient de plus en plus difficile à identifier.

On s'attendait alors à ce que l'utilisation de l'éclairage intelligent soit diffusée plus rapidement et largement que ce que l'on a connu jusqu'à présent. Cette évolution peut s'expliquer par un certain nombre de barrières commerciales telles que le coût, la complexité, le manque d'interopérabilité, le manque de systèmes ouverts, le manque de normes, le manque de systèmes cohérents, la convivialité limitée et l'absence de connexion aux systèmes câblés. De plus il a été mis en évidence que les premiers modèles de lampes intelligentes avait des efficacités variant de 9 à 51 lm/W ce qui est largement inférieurs aux lampes LEDs classiques disponibles sur le marché [22]. Plus récemment une étude en cours de publication de l'Agence International de l'Energie a évalué l'efficacité moyenne de 224 lampes intelligentes à 73lm/W, ce qui montre les progrès réalisés mais ce qui reste inférieure à la moyenne des lampes classiques (entre 80 et 100 lm/W en fonction des marchés). Finalement des travaux ont montré que dans un usage intérieur, les composants et l'énergie supplémentaire qu'elles consomment ne permettait pas de réaliser d'économie d'énergie pendant la durée de vie prévue du produit [23]. Il reste donc encore beaucoup d'obstacles à franchir avant que ce type de lampes ne soit réellement viable pour l'éclairage intérieur.

3.3.3.2 *Human Centric Lighting (HCL)*

Les solutions d'éclairage HCL sont en mesure de restituer les variations de la température de couleur de la lumière solaire afin de d'éviter de désynchroniser le cycle circadien de l'utilisateur. Cependant, la température de couleur ne décrit pas entièrement les particularités de la distribution spectrale de puissance d'une source lumineuse. En ce sens, en se basant uniquement sur ce paramètre, les solutions HCLs ne produisent pas une lumière dont le spectre ou la dynamique peut être assimilé à la lumière naturelle, même si elles cherchent à s'en rapprocher. Les teintes chaudes sont alors utilisées pour les moments de détente, les teintes plus froides pour les moments d'activation ou de concentration. La température de couleur et l'intensité lumineuse ont une influence directe sur notre humeur, notre

bien-être et nos performances. La combinaison d'une solution d'éclairage HCL et d'un système de gestion d'éclairage intelligent permet ainsi de suivre le cycle de la lumière naturelle et de soutenir le rythme circadien de l'utilisateur.

3.3.3.3 Autres applications

D'autres applications liées à l'éclairage artificiel émergent également dans le domaine médical (désinfection par UV notamment dans le cadre de l'épidémie de COVID-19) et du bien-être (luminothérapie). On retrouve également une utilisation croissante de l'éclairage artificiel dans l'horticulture en environnement contrôlé que ce soit en intérieur, dans le cadre de fermes verticales par exemple, ou en utilisation mixte sous serres, pour la production de différentes plantes et produits ornementaux, comestibles ou récréatifs, tout en optimisant le processus de photosynthèse.

4 Contexte : Les différents enjeux de l'Anthropocène

Tout d'abord afin d'introduire les différents travaux et études qui vont suivre, ainsi que ce qui les a motivé, il est nécessaire de présenter le contexte dans le lequel ils ont été réalisés. L'Anthropocène, l'Age où l'Homme devient la plus grande force de changement sur Terre, questionne nos modes de vie et nous invite à mieux prendre en compte les limites physiques de notre monde. Afin de mieux saisir les enjeux de l'Anthropocène, il est important de prendre conscience des interconnexions du triptyque économie-énergie-matériaux ainsi que des impacts des technologies sur les humains et leur environnement. Ceci pour au final mieux comprendre les problématiques et les différents impacts liés à l'éclairage dans toutes ses dimensions : environnementales, économiques, sanitaires ou sociales.

4.1 Un monde fini et des stocks de ressources limitées

L'Anthropocène est un terme de chronologie géologique signifiant littéralement « l'Age de l'Homme ». Même si le consensus est difficile à trouver, de nombreux scientifiques considèrent que la fin de l'Holocène a eu lieu entre 1850 (début de la révolution industrielle) et 1950 (profusion des essais nucléaires). C'est cependant en 2016, lors du congrès international de géologie au Cap en Afrique du Sud que le terme a été définitivement adopté par la communauté internationale [24]. La découverte du « plastiglomérat », une roche non naturelle issue de la fusion par la lave de conglomérat plastique sur l'île d'Hawaï, est souvent utilisée comme preuve géologique du passage à l'Anthropocène (Photo 1). Cette roche modifiera inéluctablement l'équilibre marin et environnemental de cette région, et ceci même après une extinction de l'espèce humaine.



Photo 1 : Plastiglomérat

En dehors de ces aspects purement géologiques, le passage à l'Anthropocène met au défi l'espèce humaine ainsi que ses capacités d'anticipation, de contrôle et de résilience sur les écosystèmes existants. Pour la première fois depuis l'histoire, l'Homme devient la principale force de changement de par son activité sur Terre [25]

et il est alors nécessaire de s'inscrire dans une nouvelle politique de la Terre, qui reste encore à définir [26]. En effet, le désordre généré par l'activité humaine se caractérise non seulement sur le climat, à travers notamment l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, mais ses multiples conséquences impacteront toutes les facettes de nos organisations et modes de vie : sécurité alimentaire, accès aux terres et aux ressources, migrations volontaires ou forcées, biodiversité ou encore l'accès à l'énergie [27]. Parmi les 9 limites planétaires admises, le taux d'extinction des espèces ainsi que la concentration en phosphore et en azote ont d'ores et déjà été dépassés [28], alors que celle concernant le changement climatique et la modification des écosystèmes terrestres sont en passe de l'être dans les 10 années à venir si aucune mesure forte n'est prise [25]. Le dépassement de ces limites est susceptible de provoquer des changements irréversibles, il est alors nécessaire de sortir de la dichotomie homme-environnement, de comprendre la complexité de nos interactions et des risques encourus, pour pouvoir développer les outils, méthodes et modes de pensées adéquats pour mieux appréhender les risques et y remédier de manière efficace [29]. En ce sens, l'Anthropocène, même s'il fait référence premièrement à une ère géologique (et n'est pas encore accepté par la totalité de la communauté scientifique en tant que tel), va impacter, et impacte déjà, toutes les sphères de nos sociétés modernes qu'elles soient scientifiques, politiques, économiques ou sociales.

4.1.1 Ressources énergétiques et matérielles

Un des aspects principaux à considérer dans la compréhension et l'analyse de ces problématiques est la finitude de notre planète et donc de la présence d'un stock de ressources et matériaux non renouvelables limités. Ces ressources sont aujourd'hui exploitées pour les développements humains, mais sont également responsables d'une grande partie des perturbations relevées sur nos écosystèmes.

Lorsque l'on parle de ressources on pense bien souvent en priorité aux ressources énergétiques telles que le gaz, le pétrole et le charbon, voire l'uranium pour l'énergie nucléaire. Pour chacune de ces ressources, des symptômes de tensions d'approvisionnement commencent à apparaître. On peut notamment citer la rentabilité de l'exploitation gazière maintenue sous perfusion grâce à l'exploitation du gaz non conventionnel (schistes et sables colmatés) [30], et l'exploitation pétrolière pour laquelle le pic pétrolier de plusieurs fournisseurs de l'Europe est envisagé à l'horizon 2030 [31], et à l'horizon 2040 au niveau mondial [32].

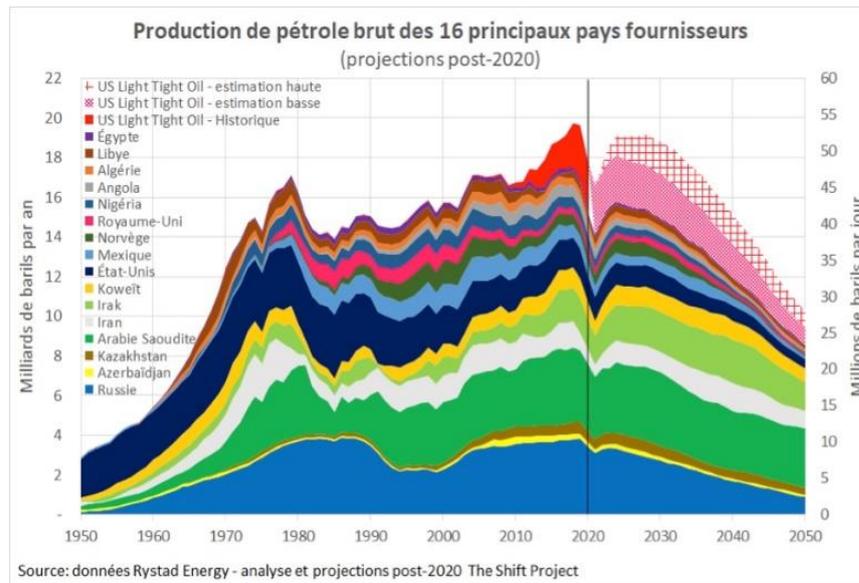


Figure 7 : Production de pétrole brut des 16 principaux pays fournisseurs et projections post-2020 (nombre de barils par an et par jour). Source : Rapport du Shift Project – « Approvisionnement pétrolier futur de l'Union Européenne » [31].

La quantité de stock disponible est bien sûr difficile à évaluer, car on découvre chaque jour de nouvelles réserves plus ou moins facilement exploitables (et rentables à exploiter car il s'agit souvent de la question principale), mais l'apparition de ce pic semble inéluctable à court-moyen terme. Même si elles sont aujourd'hui difficiles à évaluer, une réduction tendancielle de la production mondiale de pétrole et de gaz auront à la fois des conséquences en terme d'indépendance énergétique mais également sur nos possibilités de consommation d'énergie et de production industrielle. L'émergence des énergies renouvelables (éolien, solaire, géothermique, etc...) ainsi qu'une électrification de nos usages sont dans ce sens indispensables pour anticiper le maintien de nos capacités énergétiques. Cet ensemble de nouveaux modes de production d'énergie renouvelable ne sont toutefois pas parfaits puisqu'ils ont eux-mêmes besoin d'énergie et de ressources naturelles parfois rares pour leurs fabrications ainsi que pour la transition de nos infrastructures énergétiques (interconnexions et stockages) qui doivent leur être associées. Les énergies renouvelables vont cependant rapidement se présenter comme prioritaires dans l'attribution des ressources nécessaires à leur mise en place, car elles font partie des conditions sine qua non pour l'atteinte des objectifs de décarbonations de nos économies et d'atténuation de la crise climatique [25].

Toutefois, les ressources énergétiques ne sont pas les seules pour lesquelles une tension d'approvisionnement aura un impact significatif sur nos sociétés. Les métaux rares, le lithium et le cobalt sont également souvent cités comme ressources à risques en termes d'approvisionnement [33], et leur extraction et leur utilisation

démesurée pourrait également poser problème à l'avenir pour la production d'un ensemble de technologies notamment des batteries nécessaires au stockage de l'énergie électrique que ce soit pour les véhicules électriques ou le stockage des énergies renouvelables. Dans une moindre mesure, la crise de la COVID a déjà mis en évidence une certaine vulnérabilité de nos organisations face à une crise systémique, et a vu l'émergence de pénuries diverses, principalement de composants électroniques (semi-conducteur), mais aussi de matières premières (métaux, plastiques, peintures, ...), ou de produits de première nécessité (crise des masques en France), aggravées par des ruptures inédites de la chaîne logistique [34].

L'ensemble des matières premières « *qui présentent un risque particulièrement élevé de pénurie d'approvisionnement dans les dix prochaines années et qui jouent un rôle particulièrement important dans la chaîne de valeur* » [35] sont définies comme les matières premières critiques.

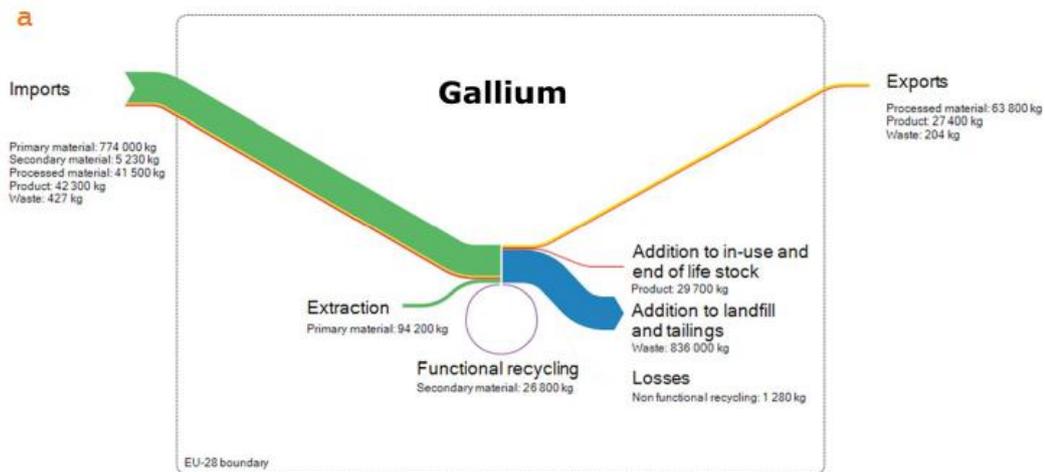
Tableau 1: Matières premières critiques en Europe en 2020 [35]
2020 critical raw materials (new as compared to 2017 in bold)

Antimony	Hafnium	Phosphorus
Baryte	Heavy Rare Earth Elements	Scandium
Beryllium	Light Rare Earth Elements	Silicon metal
Bismuth	Indium	Tantalum
Borate	Magnesium	Tungsten
Cobalt	Natural graphite	Vanadium
Coking coal	Natural rubber	Bauxite
Fluorspar	Niobium	Lithium
Gallium	Platinum Group Metals	Titanium
Germanium	Phosphate rock	Strontium

4.1.2 Les matériaux critiques pour l'éclairage

En s'intéressant plus particulièrement aux matériaux utilisés pour une application lumineuse, des terres rares comme l'Europium (Eu), le Terbium (Tb), l'Yttrium (Y) majoritairement utilisées pour les lampes fluorescentes mais également pour certaines LEDs ; ainsi que le gallium (Ga), le Germanium (Ge) et l'Indium (In) utilisés dans les applications des LEDs sont considérés comme des matériaux critiques [36]. On peut également citer le tantale et le palladium utilisés pour les condensateurs miniaturisés ou céramiques et les connecteurs. La forte pénétration

de la technologie LED actuelle et future pourrait alors être limitée par un accès contraint à ces ressources et il est nécessaire, dès aujourd'hui, d'anticiper ce risque en réfléchissant à des matériaux et des technologies de substitution. En ce qui concerne les lampes fluorescentes et compacts fluorescentes, les possibilités de substituer ces matériaux sont actuellement très limitées, ce qui, associé à la forte toxicité du mercure présent dans ce type de lampe et une efficacité énergétique moindre, continue de confirmer la nécessité de remplacer progressivement ces technologies par des lampes LEDs (elles nécessitent par exemple 15 à 20 fois moins de Eu et Y comparées aux lampes fluorescentes), tout en disposant de circuits de collecte et de recyclage adaptés et correctement dimensionnés, que ce soit pour les lampes fluorescentes ou les LEDs. Ceci est cependant dépendant de la prise en compte de cette problématique dès la conception des produits, afin de permettre et faciliter une récupération et valorisation de ces matières critiques en fin de vie. En ce qui concerne le Gallium, le Germanium et l'Indium (Figure 8), la masse fonctionnelle recyclée en Union Européenne est actuellement largement insuffisante voire dérisoire [37] :



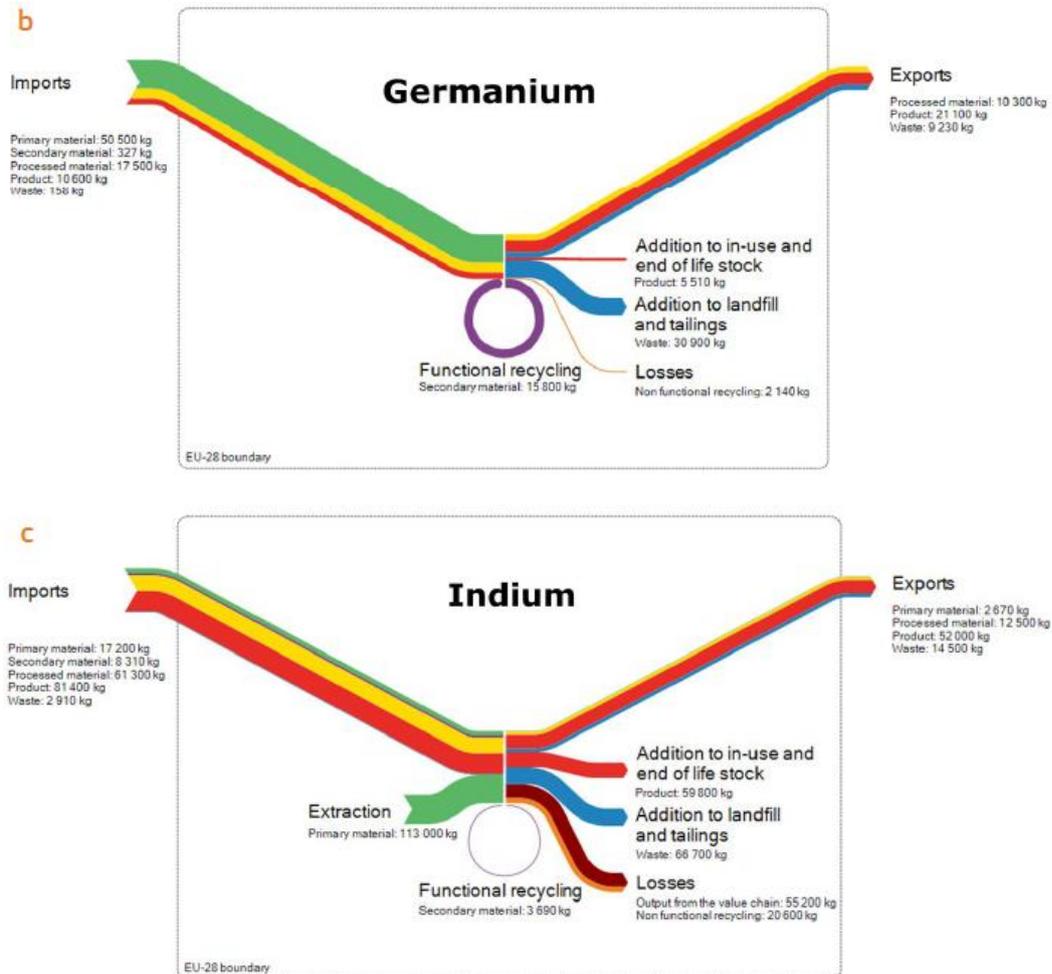
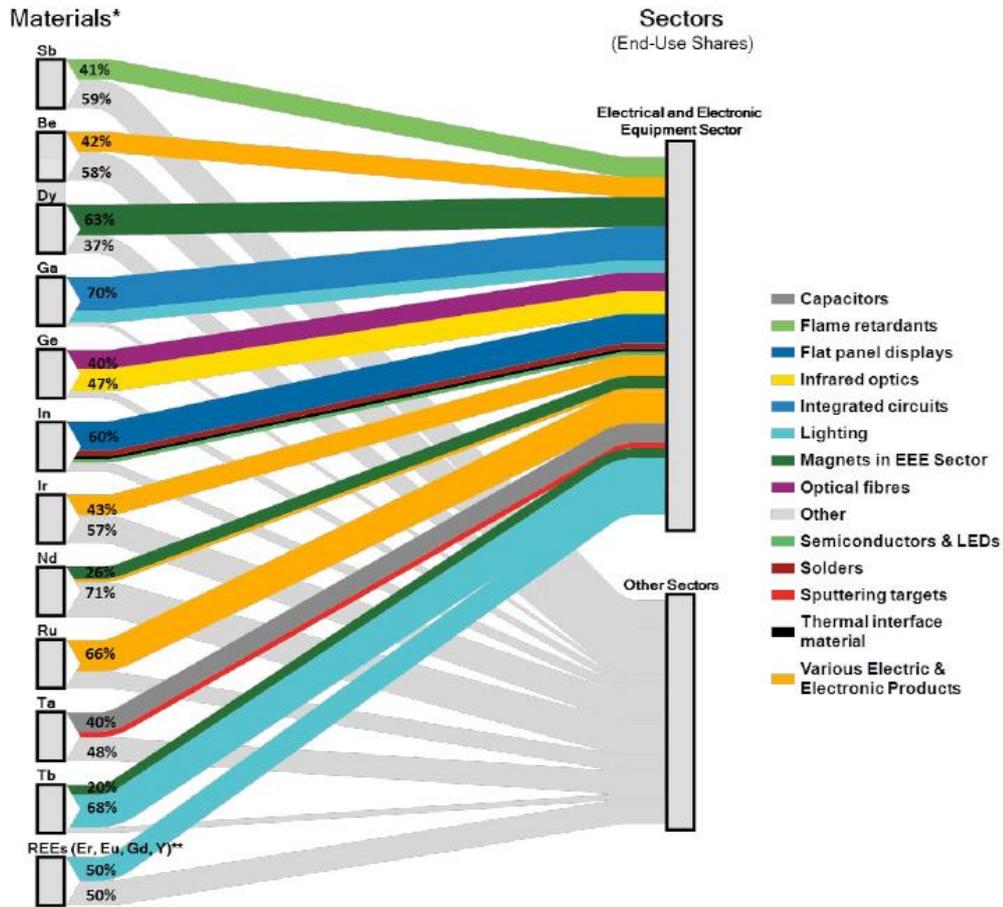


Figure 8 : Diagrammes de Sankey simplifiés pour les matériaux utilisés principalement dans le secteur des EEE: (a) Gallium (b) Germanium (c) Indium. Valeurs pour l'UE-28 exprimées en t/an pour l'année 2012 sur la base de l'étude MSA 2015. Source : "Report on critical raw materials and the circular economy" European Union, 2018 [37]. Reproduction autorisée.

Un des risques majeurs pour la technologies LEDs est l'approvisionnement de matériaux et de composants, qui entrent en compétition avec d'autres usages électriques et électroniques de manière générale (secteur qui mobilise dans son ensemble 6% du cuivre, plus de 10% de l'or et du palladium, 20% de l'argent, 35% de l'étain et du cobalt, 60% du tantale, 80% de l'indium et ruthénium et qui dans la plupart des cas seront très mal récupérés en fin de vie et irrémédiablement perdus pour les générations futures [38]), mais également avec diverses ensembles technologiques contribuant à l'atteinte des objectifs de transition énergétique définis aujourd'hui (voiture électrique, numérique, panneau photovoltaïque, ...). Dans son rapport de 2018 sur la criticité des matières premières et l'économie circulaire, la commission européenne présente la liste des différents matériaux utilisés pour l'équipement du secteur électrique et électronique [37]. A l'échelle européenne,

l'éclairage utilise 68% du Terbium (Tb), environ 20% du Gallium (Ga), 50% des terres rares (Er, Eu, Gd et Y), mais également une partie de l'Indium (In) nécessaire à la fabrication des semi-conducteurs, et une partie des 41% de l'Antimoine (Sb).



* Only a subset of CRMs used in the EEE sector are included. Additional CRMs linked to the EEE sectors include Ce, Co, Fluorspar, Hf, He, La, Mn, Natural rubber, Pd, Pt, Pr, Rh, Sm, Si, W, and V.

**Average share for Er, Eu, Gd, and Y

Figure 9 : Part de matériaux critiques utilisés par le secteur de l'équipement électrique et électronique. Source : "Report on critical raw materials and the circular economy" European Union, 2018 [37]. Reproduction autorisée.

Même si elles semblent plutôt liées au contexte socio-économique particulier de tentative de reprise post-Covid, des difficultés d'approvisionnement sont actuellement visibles avec notamment une pénurie de semi-conducteur qui touche particulièrement le secteur automobile, mais également l'électronique générale et donc l'éclairage LED, et qui devrait durer au moins jusqu'à mi-2022 selon les premières estimations [39].

4.1.3 Alternatives et matériaux de substitution

Les OLEDs, pour lesquelles, parmi ces matières critiques, seul de l'Indium est actuellement nécessaire dans le processus de fabrication, ont le potentiel de réduire la tension sur une partie des matériaux critiques pour l'éclairage. Bien que la technologie OLED soit déjà disponible pour certains écrans, leur pénétration sur le marché de l'éclairage général n'est envisageable que dans un horizon de 5 à 10 ans [40] notamment car leurs performances actuelles en termes de durée et de vie et de coût sont largement inférieures à celle des LEDs. Cependant, l'indium fait également partie des matières critiques. Les mines d'Indium n'existent pas en tant que telle, celui-ci est uniquement le coproduit notamment des mines de zinc (où il fut découvert en 1860), mais également de fer, de plomb et de cuivre. Alors que sa consommation et sa demande continuent de croître notamment pour la fabrication d'écrans plats (il faut environ 2g d'indium par écran), les gisements exploitables à un coût acceptable pourraient rapidement s'épuiser (son prix a été multiplié par 10 dans la première moitié des années 2000), et le coût des produits issus de son exploitation sera amené à augmenter. La notion de coproduits est ici fondamentale : pour produire une plus grande quantité de Ga ou In, il est nécessaire de produire plus de Fe, Zn, Pb ou Cu. Si dans le même temps la demande pour ces métaux ne suit pas, il y a un déséquilibre qui conduira inévitablement à une réduction des cours des métaux primaires. Ceci n'étant absolument pas dans l'intérêt des exploitants miniers, ils préféreront maintenir la contrainte sur les coproduits comme l'Indium pour faire augmenter leurs cours tout en cherchant à maintenir celui des métaux primaires. La Chine, premier producteur mondial d'Indium, a par exemple d'ores et déjà réduit l'exportation de cet élément. Les recherches se poursuivent pour y trouver des matériaux de remplacement tels que le graphène (cristal de carbone), les nanofils d'argent et de cuivre (issus de nanotechnologies) ou l'oxyde de zinc, mais aujourd'hui leurs performances notamment en termes de conductivité [40] ne leur permettent pas de remplacer tous les usages actuels de l'indium. De plus, dans le cas de l'argent ou du cuivre, ces matériaux sont déjà largement exploités par d'autres filières. A défaut de matériaux de substitution parfaits, il sera alors éventuellement nécessaire d'accepter un recul dans les performances des différents produits utilisant de l'Indium.

4.2 La réponse institutionnelle : les objectifs du développement soutenable

Face à ces multiples défis, une des réponses institutionnelles des Nations Unies a notamment été la définition des 17 objectifs du développement soutenable comme partie intégrante de l'agenda 2030 [41] :

« Objectif 1. Éliminer la pauvreté sous toutes ses formes et partout dans le monde

Objectif 2. Éliminer la faim, assurer la sécurité alimentaire, améliorer la nutrition et promouvoir l'agriculture soutenable

Objectif 3. Permettre à tous de vivre en bonne santé et promouvoir le bien-être de tous à tout âge

Objectif 4. Assurer à tous une éducation équitable, inclusive et de qualité et des possibilités d'apprentissage tout au long de la vie

Objectif 5. Parvenir à l'égalité des sexes et autonomiser toutes les femmes et les filles

Objectif 6. Garantir l'accès de tous à des services d'alimentation en eau et d'assainissement gérés de façon soutenable

Objectif 7. Garantir l'accès de tous à des services énergétiques fiables, soutenables et modernes, à un coût abordable

Objectif 8. Promouvoir une croissance économique soutenue, partagée et soutenable, le plein emploi productif et un travail décent pour tous

Objectif 9. Bâtir une infrastructure résiliente, promouvoir une industrialisation soutenable qui profite à tous et encourager l'innovation

Objectif 10. Réduire les inégalités dans les pays et d'un pays à l'autre

Objectif 11. Faire en sorte que les villes et les établissements humains soient ouverts à tous, sûrs, résilients et soutenables

Objectif 12. Établir des modes de consommation et de production soutenables

Objectif 13. Prendre d'urgence des mesures pour lutter contre les changements climatiques et leurs répercussions

Objectif 14. Conserver et exploiter de manière soutenable les océans, les mers et les ressources marines aux fins du développement soutenable

Objectif 15. Préserver et restaurer les écosystèmes terrestres, en veillant à les exploiter de façon soutenable, gérer de manière soutenable les forêts, lutter contre la désertification, enrayer et inverser le processus de dégradation des terres et mettre fin à l'appauvrissement de la biodiversité

Objectif 16. Promouvoir l'avènement de sociétés pacifiques et inclusives aux fins du développement soutenable, assurer l'accès de tous à la justice et mettre en place, à tous les niveaux, des institutions efficaces, responsables et ouvertes à tous

Objectif 17. Renforcer les moyens de mettre en œuvre le Partenariat mondial pour le développement soutenable et le revitaliser »



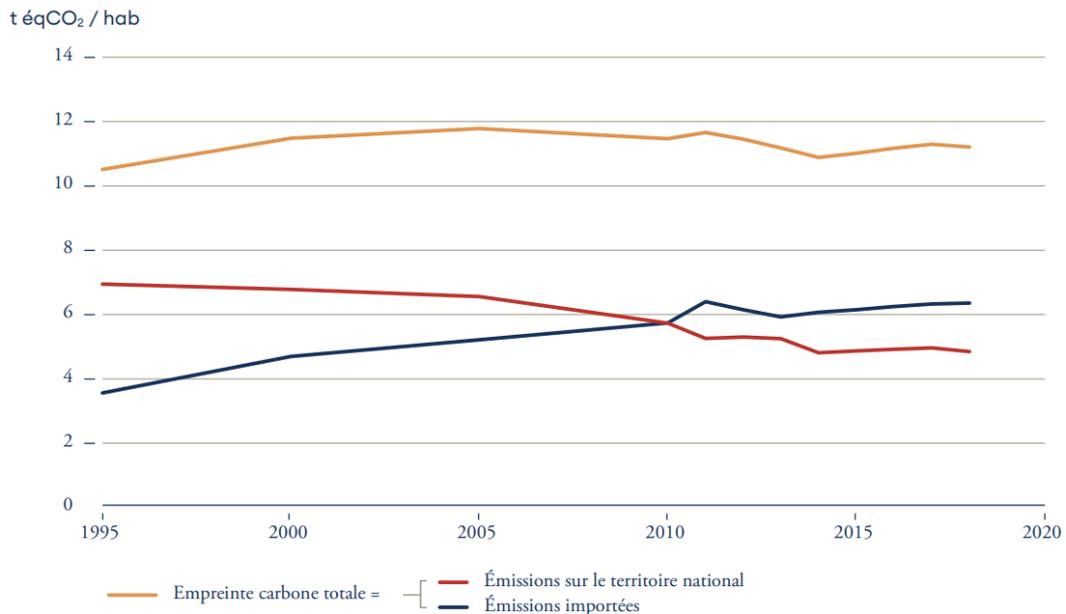
Figure 10 : Les 17 objectifs du développement soutenable [42]

La Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) a récemment proposé d'y ajouter un 18eme objectif relatif à la préservation de la nuit et l'accès à la lumière des étoiles (limitation et régulation autour de la pollution lumineuse) [43].

4.3 Vers un changement de paradigme ?

Cet enjeu du XXI^{ème} siècle est enfin une invitation au débat interdisciplinaire. En ce qui concerne les sciences économiques et sociales, ces questions se superposent bien souvent avec les débats sur la mondialisation et le développement soutenable avec une dimension politique fortement marquée. L'un des points les plus clivant reste la possibilité ou non d'un découplage relatif, partiel ou absolu entre notre économie (le PIB) et nos émissions de CO₂. Tout d'abord mis en évidence par le club Rome en 1972 [44], mais sans grand écho sur la scène politico-économique, les risques et limites de la croissance infinie dans un monde fini sont aujourd'hui devenus centraux pour la définition d'une nouvelle politique de la Terre.

A l'échelle de certains pays de l'Union Européenne un découplage relatif est actuellement visible [45], mais essentiellement grâce à l'externalisation d'une partie de notre industrie. C'est le cas en France, où les émissions sur le territoire national sont effectivement en baisse, mais l'empreinte carbone totale par habitant stagne entre 1995 et 2018 [46]. En effet, les émissions importées sont quant à elles actuellement en hausse. Une partie de nos produits finis émettent du CO₂ et diverses autres pollutions, en dehors de notre territoire, lors de leurs fabrications, avant que nous les importions, c'est ce qui est comptabilisé dans nos émissions importées (Figure 11).



Note : Entre 1995 et 2014, les données sont issues d'un calcul détaillé tandis que les dernières années (2015-2018) sont issues d'estimations
 Source : Traitement SDES 2019 d'après CITEPA (Inventaires NAMEA AIR 2017, SECTEN 2018), Eurostat, AIE, FAO, Insee, douanes

Figure 11 : Empreinte carbone totale de la France (émissions sur le territoire et importées).
 Source : Haut Conseil pour le Climat - « Maîtriser l'empreinte carbone de la France » [46].
 Reproduction autorisée.

L'empreinte carbone annuelle moyenne des Français actuellement s'élève en fonction des sources entre 9 et 12 tonnes de CO₂eq par habitant (en considérant les émissions importées). Elle doit donc baisser d'environ 80% d'ici 2050 pour parvenir aux 2 tonnes de CO₂ par an compatibles avec l'Accord de Paris. 2 tonnes étant l'objectif fixé pour un écosystème en bonne santé, la poursuite de la dégradation des services écosystémique nous invitera fort probablement à être encore plus ambitieux.

A l'échelle mondiale, il est actuellement terriblement difficile de confirmer la réalité du découplage relatif, partiel, ou absolu PIB/émissions de CO₂eq (Figure 12) tant les biais statistiques sont nombreux et cette question est toujours en proie à de rudes débats scientifiques mais également d'opinion, entre économistes, écologistes, politiques et spécialistes de l'énergie [47].

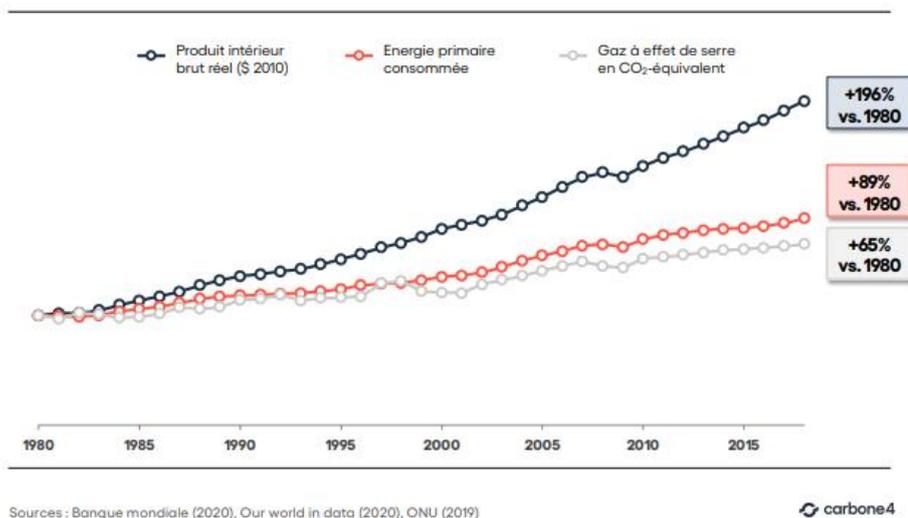


Figure 12 : Evolution de la consommation d'énergie primaire, des gaz à effet de serre et du PIB à l'échelle mondiale de 1980 à 2018 (base 100 en 1980, gaz à effet de serre y compris les émissions « Utilisation des Terres, Changement d'Affectation des Terres, Foresterie »)
Source : Carbone 4 - « Découplage et croissance verte » [45]

Le but de ce travail sur les impacts de l'éclairage n'étant pas de départager la parole des experts sur ces questions, il est cependant nécessaire de présenter le contexte général dans lequel il a été réalisé et de prendre conscience des interconnexions du triptyque économie-énergie-matériaux ainsi que des impacts des nouvelles technologies sur les humains et leur environnement pour mieux appréhender les enjeux de l'Anthropocène. Ceci pour mieux comprendre les problématiques **et les différents impacts liés à l'éclairage dans toutes ses dimensions : environnementales, économiques, sanitaires ou sociales.**

4.3.1 Sobriété énergétique et matérielle

Malgré les incertitudes sur les solutions aux problèmes environnementaux et climatiques, de nouvelles dynamiques apparaissent autour de la sobriété. En tant que telle la sobriété se caractérise par une diminution de la demande, ce qui peut être possible notamment grâce à des changements de pratiques (mutualisation, éviter les usages non-essentiels et le gaspillage, ...). Dans le cadre de ce travail le concept de sobriété se veut plus englobant en regroupant tous les effets permettant de réduire le volume d'énergie ou de matériaux nécessaire à la source. Ces concepts nous orientent en quelque sorte vers une des voies à suivre.

La sobriété énergétique se caractérise par exemple par une réduction des usages et/ou de la consommation d'énergie qui leur sont associées, ceci grâce à de meilleures pratiques (isolation, éco-industrie), grâce à la mise en place de différents labels [48] et campagnes de sensibilisation permettant aux usagers de faire des choix de consommation plus éclairés tout en incitant les industries à participer activement à ces transitions. Dans le domaine de l'éclairage elle se caractérise surtout par une recherche de l'amélioration de **l'efficacité énergétique**. La technologie LED est un des fers de lance dans le domaine de l'efficacité énergétique. Pour les pays qui ont entamé cette transition, c'est probablement un des secteurs dans lequel les plus grands progrès ont été réalisés cette dernière décennie, grâce à des performances bien meilleures que les précédentes technologies mais également grâce à un soutien fort des politiques publiques, ce qui a permis de nombreuses économies d'énergie pour les collectivités et les particuliers [49], [50], [51]. Il s'agit d'une vraie rupture technologique, peut-être la seule véritablement répandue depuis le début de ce siècle.

La sobriété matérielle quant à elle se caractérise plus particulièrement par une moindre consommation mais également par **la durabilité, le recyclage et la circularité**. Par la suite, la durabilité fait référence à la capacité d'un produit physique à rester fonctionnel, sans nécessiter de maintenance ou de réparation excessive, lorsqu'il est confronté aux défis d'un fonctionnement normal au cours de sa vie nominale. Il existe plusieurs mesures de durabilité en cours d'utilisation (la durée de vie, la durée d'utilisation et le nombre de cycles opérationnels). Le terme soutenabilité, qui englobe les concepts de sobriété matérielle et énergétique mais également les aspects environnementaux et socio-économiques, lui sera préféré, pour faire référence aux développements pérennes qui assurent les capacités des générations futures à répondre à leurs besoins. La sobriété matérielle est aujourd'hui

probablement l'axe pour lequel le plus d'effort reste à consentir, notamment de la part des industries, car la plupart de ces principes vont à contre-courant des principes de croissance et de consumérisme de nos sociétés actuelles. L'obsolescence programmée est un exemple de ces symptômes qu'il est nécessaire de combattre pour atteindre les objectifs de durabilité nécessaire à ce changement de paradigme. Il serait alors nécessaire de repenser l'innovation technologique pour mettre en avant des innovations peu gourmandes en matériaux critiques et en énergie, et en favorisant les innovations intégrant dès la conception les possibilités de réparation et de recyclage. C'est également l'un des axes d'amélioration majeurs des technologies de l'éclairage. En effet l'objectif de réparation et de recyclage ne fait actuellement pas partie du cahier des charges lors de la conception, au contraire des objectifs de collectes. Ceci fait retomber une partie de la charge de la responsabilité du recyclage et de la circularité, sur les utilisateurs, à travers l'Eco-participation pour la partie financière, et sur les Eco-organismes, lorsque ceux-ci existent, pour la partie technique.

4.3.2 Le cas de la transition numérique

Une des promesses de la transition numérique ce sont les économies de matériaux et d'énergie. S'intéresser à cette transition technologique permet d'entrevoir les différents aspects qui peuvent être impactés que ce soit localement ou globalement, d'une manière visible ou sous-jacente et de faire ensuite des parallèles avec les technologies d'éclairage. On se rend alors compte que les objectifs de sobriété d'une transition technologique peinent parfois à être tenus à une échelle globale et qu'il s'agit d'un sujet complexe, avec des résultats réels parfois mal anticipés, et pour lesquels chaque situation est particulière mais faisant partie d'un tout [23].

Par exemple le cas du papier que l'on n'aurait plus besoin d'imprimer. En fait cela n'est pas si évident, et au niveau mondial, malgré l'usage des nouvelles technologies (internet, numérisation, etc...) et la prise de conscience écologique, la consommation a continué de croître. Entre 2009 et 2017 la consommation de papier et de carton dans le monde a en effet augmenté d'environ 14% [52]. Sur la même période elle a stagné au niveau européen [53], alors qu'elle a chuté d'environ 10% en France [54]. Même si l'évolution de la consommation est multifactorielle et que l'on peut imputer l'augmentation mondiale au développement de pays émergents, à l'échelle européenne, ces chiffres ne semblent pas prouver l'efficacité des nouvelles technologies dans ce domaine ou alors bien moindre qu'espérée. En France, cette

baisse coïncide tout autant avec la prise de conscience écologique et la volonté de limiter le gaspillage et il est difficile d'attribuer cette baisse aux technologies informatiques ou numériques, à la vue de la tendance au niveau européen. En réalité certains usages du papier ont été réduits et/ou substitués (presse) alors que d'autres sont apparus (papiers intelligents et électronique imprimée par exemple).

A propos des économies de déplacement possible grâce aux outils de visioconférences, en réalité avant l'épidémie du COVID, nous n'avions jamais autant dépensé au niveau mondial comme au niveau européen pour les déplacements professionnels [55]. La mise en place de solutions numériques a en revanche permis la démocratisation du télétravail qui a été déterminant pour le maintien de l'activité pendant les périodes de confinement dues au COVID-19. C'est donc sous une certaine contrainte que ces outils ont vraiment montré leur potentiel en se substituant réellement aux échanges « matériels » et aux déplacements physiques. On se rend alors compte que les effets d'une technologie vont dépendre des usages que l'on en fait. Des usages inadaptés peuvent alors l'empêcher d'atteindre ses objectifs (notamment par l'apparition d'effet rebond) alors que des usages « utiles » vont prouver son efficacité. Pour juger de l'efficacité d'une technologie il est alors nécessaire de disposer d'outils pertinents pour évaluer correctement la balance coût/bénéfice à différentes échelles comme le propose le modèle STERM (Smart Technologies Energy Relevance Model), un modèle mathématique permettant aux entreprises d'atteindre leurs objectifs de sobriété numérique [23].

En ce qui concerne les coûts, ceux de la transition numérique ont été à la fois économiques (pour l'équipement en matériels informatiques et infrastructures réseaux sans cesse renouvelés - et non-renouvelable), mais également matériels (ressources et matières premières en grande partie critique quand il s'agit de numérique), énergétiques (extraction et transformation des matières premières) et environnementaux (liés à l'exploitation, l'usage et la fin de vie de ces ressources). **Ces externalités** matérielles, énergétiques, économiques ou environnementales ne sont pas toujours correctement comptabilisées dans la balance (Cf. §5.2.1), soit par omissions, soit par difficultés d'attribution (difficile de connaître la part exacte du numérique dédiée à limiter les déplacements professionnels ou les impressions par exemple), soit par manque de données [23]. Une partie de ces externalités se retrouve également dans les flux et plus particulièrement dans le trafic internet pour le numérique. Dans le monde, selon l'Agence Internationale de l'Energie (IEA), il a été multiplié par 100 entre 2000 et 2010. Toujours selon l'IEA le volume de données échangées a ensuite été multiplié 3 fois entre 2012 et 2017. Le volume de données

stockées a également explosé et était de l'ordre de 3.5 Zo (1Zo = 1 milliard de Mo) en 2013 [38]. Cette quantité astronomique de données devrait continuer d'augmenter avec l'avènement du Big Data, de l'intelligence artificielle et du « cloud computing » et ceci malgré l'émergence des démarches de Sustainable IT qui semble aujourd'hui bien dérisoire face à ce flot de données « dématérialisé » et des serveurs et centre de stockage toujours plus important, quant à eux, bien « matériels » et qui doivent être continuellement climatisés pour s'assurer de leur fonctionnement optimal. Dans un rapport de 2014 [56], l'IEA estimait que la consommation électrique annuelle mondiale du numérique se situe entre 1500 et 2000TWh, auxquels il faut ajouter 800TWh pour l'énergie supplémentaire nécessaire à sa fabrication. Ceci représente environ 4 fois la consommation électrique annuelle française et 10% de l'électricité mondiale, ce qui représente des émissions de CO₂eq supérieur à l'ensemble du trafic aérien. En fonction des différentes mesures qui seront mises en place pour limiter les émissions de CO₂eq, la part du numérique dans les émissions de gaz à effet de serres mondiales pourrait passer de 4% en 2019 à 7-8% en 2025 en l'absence de mesures, mais au contraire être limité à 5% dans un scénario de sobriété [23].

Localement, le tout numérique/connecté a pu permettre de réaliser des économies d'énergie mais nous avons assisté à une « délocalisation » d'une partie de la consommation matérielle et énergétique plutôt qu'à une « dématérialisation » totale, ainsi qu'à une multiplication des échanges, ce qui peut questionner quant à l'efficacité réelle des usages qui sont faits du numérique à l'échelle mondiale.

Se pose également la question du **rôle des mix électriques nationaux dans l'étude de l'efficacité des transitions technologiques** (Cf. §6.1). Comme le montre la transition numérique, elles peuvent avoir tendance à délocaliser une partie de leur consommation d'énergie et de matières premières. Pour le cas Français, dont l'électricité a l'une des intensités carbone les plus faibles au monde [57] (entre 50 et 70 gCO₂eq / KWh selon les sources et les périodes de l'année), la délocalisation d'une partie de la consommation d'énergie dans des pays où l'électricité est générée grâce à des énergies fossile va en réalité augmenter les émissions de CO₂ au niveau global. Autre tendance, la délocalisation des industries associées à ces technologies, dans des conditions pour les travailleurs et les populations locales pas toujours aussi favorables qu'elles peuvent l'être dans les pays occidentaux, ce qui pose un **questionnement d'ordre social** [58]. Enfin la tendance à augmenter l'intensité des flux matériels ou immatériels associés, par **effets rebonds** (Cf. §5.2.6).

4.4 Premier bilan pour l'éclairage artificiel

Il n'est pas question ici de renier les nouvelles technologies ou le numérique mais plutôt de questionner certains de leurs usages et de leurs utilisations parfois systématiques dans la recherche de l'efficacité. Si l'on se réfère à l'éclairage artificiel, elles peuvent être utilisées à bon escient comme c'est le cas pour les solutions de capteurs de proximité et des LEDs pour l'éclairage public, qui ont permis de réduire considérablement la consommation d'énergie de ces installations [49]. En revanche, elles semblent plus discutables pour les ampoules d'éclairage intérieur connectées dites « Smart », notamment à cause de leur consommation d'énergie en continue même lorsqu'elles sont éteintes, ce qui conduit à une moindre efficacité [22], ou à cause de l'énergie grise intégrée dans les systèmes connectés et leur infrastructure, qui ne permet pas de réaliser d'économie d'énergie pendant la durée de vie prévue du produit [23]. L'énergie grise regroupe toute l'énergie dépensée et consommée sur le cycle de vie (extraction des matières premières, fabrication, distribution, utilisation, entretien, recyclage et fin de vie). Le développement de ces nouveaux types de lampes d'intérieurs semble particulièrement motivé par des considérations économiques et une innovation incrémentale pouvant permettre au secteur de poursuivre sa progression face aux risques de la saturation de certains marchés. En effet, la durée de vie des lampes LED particulièrement longue comparée aux anciennes technologies va à terme réduire le rythme de renouvellement des produits. Il est donc important de pouvoir différencier les cadres d'usages dans lesquels ce type de lampes apporte une réelle avancée, que ce soit en termes de consommation d'énergie ou de confort d'utilisation [59], et de s'assurer que ces avancées ne se fassent pas au détriment d'une utilisation inconsidérée de matériaux critiques et/ou d'énergie dans le cadre d'usages « gadgets » ou par effet de mode. Enfin, il est nécessaire de s'assurer que ces risques de saturation, associés à une recherche d'optimisation des coûts de production et de vente, ne soient pas l'opportunité pour certaines industries peu regardantes d'adopter des processus de fabrication moins rigoureux [58]. Ceci aurait pour cause des disparités de fiabilités des lampes avec des risques accrus de défaillances critiques prématurées (assimilable à de l'obsolescence programmée) dans le but d'assurer une rotation plus intense des produits et le développement économique des industries concernées (Cf. §5.2.4). Dans ce sens, il est nécessaire de s'orienter vers une nouvelle normalisation des sources lumineuses et des alimentations, mais il est également indispensable que la fiabilité des lampes soit l'objet de contrôles et de normes rigoureuses ainsi qu'une labellisation pertinente afin de mieux orienter les

utilisateurs avec des indicateurs autres que le signal prix (Cf. § 6.2). Des solutions telles que le Light As a Service pourraient permettre à la fois de s'assurer d'un certain renouvellement des produits seulement lorsque cela est nécessaire et prouvé (amélioration significative d'efficacité lumineuse ou de confort d'utilisation [60]) tout en s'assurant d'une meilleure valorisation des produits remplacés soit par une réutilisation pour d'autres usages (re-lamping), soit par une réparation/upgrade du produit, soit par un recyclage, à la charge du prestataire, qui aurait de forts intérêts à optimiser ce processus. Ceci aurait également l'intérêt de limiter certains comportements non-adaptés liés aux perceptions des usagers mais également certains effets rebonds liés aux usages de produits high-tech qui ne sont pas toujours correctement maîtrisés ou compris par les usagers (Cf. §5.2.6).

Pour résumé, la transition vers les lampes LEDs a pour objectif d'augmenter l'efficacité d'un processus (la production de lumière). Elle permet une meilleure efficacité dans la réalisation de ce processus (réduction de la consommation d'énergie à production de lumière égale) mais au prix d'une utilisation plus intensive de certaines matières premières critiques à fort impact environnemental [58]. Ceci tout en étant à la merci d'effets rebonds parfois difficiles à évaluer (augmentation du volume ou/et des flux associés), et de particularités liées à la manière de produire l'énergie à la fois dans le pays de fabrication et celui d'utilisation. Il est alors nécessaire de s'assurer que les usages faits de cette technologie, en particulier lorsqu'elle est associée à des solutions connectées, ne vont pas à l'encontre de l'atteinte de ces objectifs, ou qu'elles ne font pas émerger de nouvelles problématiques dans différents contextes.

Pour finir, la recherche de sobriété nous incite à repenser la notion de l'offre et du besoin, et surtout à redonner au mot « besoin » son sens initial. En effet, il n'y pas de produit ou de service plus écologique, économe en ressources et recyclable que celui que l'on n'utilise pas (et donc que l'on ne fabrique pas). La première préoccupation ne devrait pas être de « comment remplir un besoin ou une envie de manière plus écologique », mais plutôt « pourrait-on vivre aussi bien sans ce besoin, et sous quelles conditions ? ». Il s'agit de repenser nos modes de consommations, pour se diriger vers une écologie de la demande plutôt qu'une écologie de l'offre, vers une société du nécessaire et de la sobriété plutôt qu'une société de l'excès [61]. Pour faire le parallèle avec l'éclairage, il ne s'agit pas de remettre en cause les besoins de l'éclairage domestique ou sur les lieux de travail, mais a-t-on par exemple vraiment besoin de conserver l'illumination de vitrines, d'enseignes, de panneaux et d'écrans publicitaires de nos rues commerçantes voire de certains monuments tout

au long de la nuit ou jusqu'à 1h du matin (ce n'est que depuis fin 2018 que l'état français a légiféré sur le sujet, mais c'est loin d'être le cas dans tous les pays et surtout la loi n'est que très rarement respectée pour pas ou peu de sanctions prononcées) ? Des technologies comme la LED permettent d'améliorer l'efficacité de ses usages, mais sont-ils réellement tous nécessaires et utiles ? Est-ce-que l'augmentation de l'efficacité n'a pas également cet effet pervers de démocratiser de mauvais usages qui vont à l'encontre des principes de sobriété ? Cet effet est également connu sous le nom de l'amnésie écologique, un concept développé en biologie de la conservation stipulant que chaque génération considère comme le point de référence initial d'un écosystème celui qu'il a connu depuis sa naissance, engendrant un syndrome de la référence changeante [62]. Au-delà de l'aspect énergétique, ce type d'usage amplifie également **la pollution de la lumière artificielle de nuit (ALAN)**, pour laquelle de nombreux efforts sont encore à fournir pour mieux comprendre, quantifier et limiter ses impacts sur l'Homme et la biodiversité (Cf. §5.2.3).

5 Les méthodes et outils pour l'analyse des impacts des technologies

5.1 Une palette d'outils pour l'analyse des impacts environnementaux et socio-économique...

L'analyse du cycle de vie (ACV) environnementale s'est développée au cours des cinq dernières décennies. Alors que l'ACV est passée d'une simple analyse énergétique à une analyse complète de la charge environnementale dans les années 1970, des modèles complets d'évaluation de l'impact du cycle de vie et de calcul du coût du cycle de vie (CCV) ont été introduits dans les années 1980 et 1990, et l'ACV sociale (ACV-S) et l'ACV conséquentielle ont gagné du terrain au cours de la première décennie du 21^e siècle. Bon nombre des développements les plus récents ont été initiés pour élargir l'ACV environnementale traditionnelle à une Analyse de Soutenabilité du Cycle de Vie (ASCV) plus complète. Un cadre pour l'ASCV a ensuite été proposé, reliant les questions de soutenabilité du cycle de vie aux connaissances nécessaires pour y répondre, identifiant les connaissances disponibles et les modèles associés, les lacunes dans les connaissances, et définissant des programmes de recherche pour combler ces lacunes. L'ACV évolue alors progressivement vers l'ASCV, qui est un cadre d'intégration transdisciplinaire de modèles plutôt qu'un modèle en soi. L'ASCV travaille avec une pléthore de modèles disciplinaires et guide la sélection des modèles appropriés, en fonction d'une question spécifique de soutenabilité. Structurer, sélectionner et rendre la pléthore de modèles disciplinaires disponibles en pratique pour différents types de questions de soutenabilité du cycle de vie est le principal défi de la période actuelle.

5.1.1 L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) ou l'ACV environnementale

5.1.1.1 Définition

"La prise de conscience accrue de l'importance de la protection de l'environnement et des impacts possibles associés aux produits, qu'ils soient fabriqués ou consommés, a renforcé l'intérêt pour le développement de méthodes permettant de mieux comprendre et traiter ces impacts. L'une des techniques développées à cette fin est l'analyse du cycle de vie (ACV)" (ISO 14040:2006) [63]. L'ACV est une méthodologie normalisée au niveau international pour identifier et évaluer non seulement les émissions de gaz à effet de serre (GES), mais aussi les impacts des produits et services sur l'environnement et les écosystèmes, y compris

le sol, l'air et l'eau, ainsi que les impacts sur la santé humaine (ISO 14040:2006 [63] et 14044:2006 [64]).

"L'ACV aborde les aspects environnementaux et les impacts environnementaux potentiels (par exemple, l'utilisation des ressources et les conséquences environnementales des rejets) tout au long du cycle de vie d'un produit, de l'acquisition des matières premières à la production, l'utilisation, le traitement en fin de vie, le recyclage et l'élimination finale (c'est-à-dire du berceau à la tombe)." [63]. Les flux de matières et d'énergie de chaque phase du cycle de vie d'un produit sont associés à des indicateurs d'impact, et permettent de déterminer les impacts potentiels sur notre environnement et notre santé.

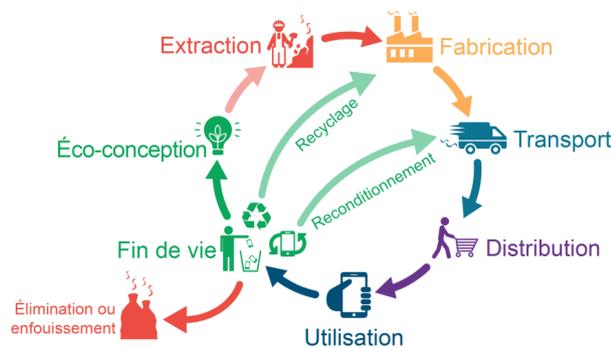


Figure 13 : Les phases du cycle de vie

5.1.1.2 Méthodologie

Le cadre méthodologique de l'ACV telle que définie par la norme ISO est présentée dans la Figure 14 ci-dessous :

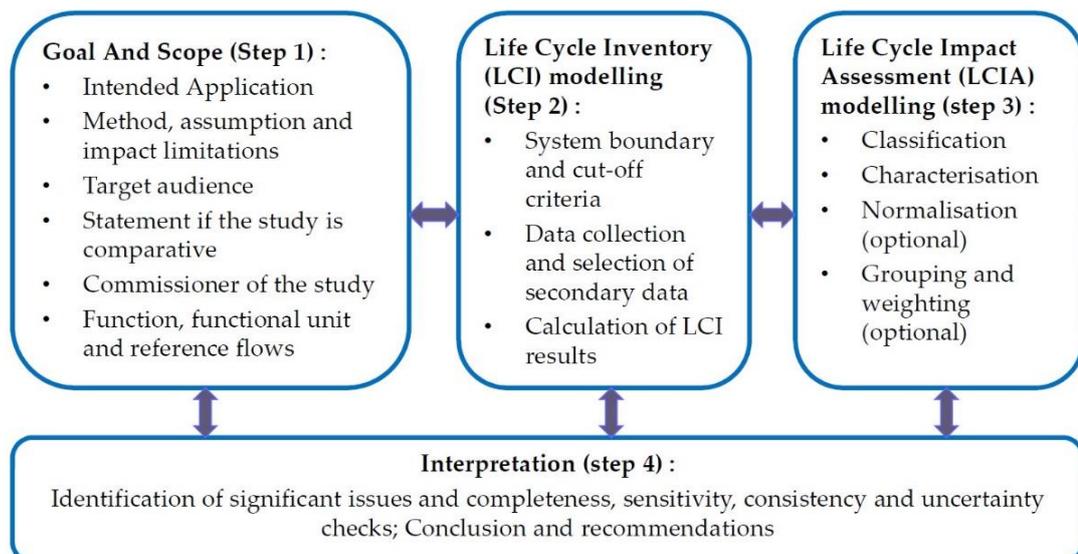


Figure 14 : Cadre d'analyse du cycle de vie (ACV) (adapté de la norme ISO 14040:2006 [63]).

La définition de l'objectif et du champ d'application doit décrire l'application et le public visé ; le système à étudier, y compris ses fonctions et ses limites ; l'unité fonctionnelle ; la méthodologie d'évaluation des impacts ; et les hypothèses et limites de l'étude. La phase d'Inventaire du Cycle de Vie (ICV) est *"un inventaire des données d'entrée/sortie concernant le système étudié. Elle implique la collecte des données nécessaires pour atteindre les objectifs de l'étude définie"* [63], [64]. L'évaluation de l'impact du cycle de vie (LCIA) vise à *"fournir des informations supplémentaires pour aider à évaluer les résultats de l'inventaire du cycle de vie d'un système de produit afin de mieux comprendre leur importance environnementale"* [63], [64]. L'interprétation du cycle de vie est la phase finale de la procédure ACV. Les résultats de l'évaluation de l'impact du cycle de vie sont *"résumés et discutés pour servir de base aux conclusions, aux recommandations et à la prise de décision, conformément à la définition de l'objectif et du champ d'application"* [63], [64]. En outre, des incertitudes sont introduites dans les résultats d'un ICV en raison des effets combinés des incertitudes liées aux entrées et de la variabilité des données. *"Une analyse de la sensibilité et de l'incertitude des résultats doit être effectuée pour les études destinées à être utilisées dans des assertions comparatives destinées à être divulguées au public"* [64]. Une approche consiste à caractériser l'incertitude des résultats par des fourchettes et/ou des distributions de probabilité. Dans la mesure du possible, une telle analyse doit être effectuée pour mieux expliquer et étayer les conclusions de l'ICV. Enfin, dans le cas d'ACV comparatives communiquée publiquement, la norme ISO demande la réalisation d'une revue critique réalisée par un tiers.

5.1.1.3 L'Unité Fonctionnelle (UF) et le flux de référence

L'unité fonctionnelle est définie comme les *« performances quantifiées d'un système de produits à utiliser comme unité de référence dans une étude d'évaluation du cycle de vie »* [63]. Elle permet de préciser les fonctions identifiées d'un produit et doit répondre aux questions *« Quoi ? Comment ? Combien de temps ? »*. Elle permet ensuite de déterminer le flux de référence pour chaque produit permettant de remplir la fonction prévue. Le flux de référence désigne donc la quantité de produits nécessaire pour remplir la fonction précisée par l'intermédiaire de l'unité fonctionnelle. C'est seulement grâce à l'utilisation des flux de références que des comparaisons entre systèmes peuvent être faites sur la base des mêmes fonctions et quantifiées en utilisant les mêmes unités fonctionnelles.

5.1.1.4 Evolution de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) au XXI^e siècle.

La première décennie du XXI^e siècle a été marquée par un intérêt croissant pour l'ACV. En 2002, le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE) et la Société de toxicologie et de chimie de l'environnement (SETAC) ont lancé un partenariat international sur le cycle de vie, connu sous le nom d'initiative sur le cycle de vie. Le principal objectif de l'initiative sur le cycle de vie est de mettre en pratique la réflexion sur le cycle de vie et améliorer les outils de soutien grâce à de meilleures données et de meilleurs indicateurs. La réflexion sur le cycle de vie a également continué à gagner en importance dans la politique européenne, comme le montre, par exemple, la communication de la Commission européenne sur la politique intégrée des produits [65]. En outre, la réflexion sur le cycle de vie a également été intégrée, par exemple, dans les stratégies thématiques sur l'utilisation soutenable des ressources [66] et sur la prévention et le recyclage des déchets [67]. La Plateforme européenne sur l'évaluation du cycle de vie [68] a ensuite été créée en 2005, avec l'objectif de promouvoir la disponibilité, l'échange et l'utilisation de données, de méthodes et d'études de qualité sur le cycle de vie pour une aide à la décision fiable dans les politiques publiques et dans les entreprises.

Alors que la période 2000-2010 a été une décennie d'élaboration et que la demande en matière d'ACV continue d'augmenter, la période actuelle est caractérisée par une divergence des méthodes. Comme l'ISO n'a jamais eu pour objectif de normaliser les méthodes d'ACV dans le détail et qu'il n'existe pas d'accord commun sur la manière d'interpréter certaines des exigences de l'ISO, des approches divergentes ont été développées en ce qui concerne les limites du système et les méthodes d'allocation [69], [70], ainsi que pour différents types d'ACV (dynamique, différenciée dans l'espace, basée sur le risque, basée sur les entrées-sorties environnementales ou hybride) [71]. En outre, les approches du coût du cycle de vie (CCV) [72] et de l'analyse du cycle de vie sociale (ACV-S) [73] ont été proposées et développées et peuvent présenter des problèmes de cohérence avec l'ACV environnementale en termes de limites du système, de perspectives temporelles, de procédures de calcul, etc.

Ces différentes approches ont en commun la base du cycle de vie, mais elles se différencient dans leur élaboration méthodologique et dans la ou les questions qu'elles abordent. Il est nécessaire de clarifier la façon dont les différentes approches diffèrent ou se chevauchent, mais surtout, de clarifier le lien entre les questions et les approches : quelle approche est utile pour quelle question. Cette question peut par exemple être prise en compte grâce à l'établissement d'une unité

fonctionnelle adéquate qui considère les conditions d'usages des produits plutôt que leur fonction uniquement (Cf. §6.1.6). Malgré la publication de nouveaux manuels sur l'ACV [74], il est encore nécessaire de structurer ce champ varié d'approches d'ACV. Il est également nécessaire de prendre en compte davantage de types d'externalités (impacts économiques et sociaux) et davantage de mécanismes (rebond, comportement, effets de prix, dynamique) pour répondre aux lacunes mentionnées des études ACV (Cf. §5.2) tout en répondant aux besoins spécifiques des utilisateurs, comme dans l'ACV simplifiée. Cette décennie 2010-2020 constitue donc une période d'extension de l'application de l'ACV qualifiée comme une décennie de consolidation [75].

5.1.1.5 ACV Conséquentielle et Attributionnelle

L'objectif d'une ACV Conséquentielle (ACV-C) est de modéliser l'ensemble des impacts environnementaux consécutifs à un changement survenant dans le cycle de vie d'un produit. L'objectif est donc sensiblement différent de celui d'une ACV- Attributionnelle (ACV-A) qui consiste à étudier le cycle de vie d'un produit. Alors que l'ACV-A est réalisée dans un état statique où le cycle de vie du produit n'évolue pas dans le temps, l'ACV-C repose sur l'évaluation des conséquences causées par le passage d'un état A à un état B du cycle de vie d'un produit. [76].

Concrètement, une ACV-C se réalise en suivant les mêmes phases que pour une ACV-A mais on note cependant quelques différences. En ACV-A, le système est composé des processus directement impliqués dans le cycle de vie du produit, alors qu'en ACV-C, le consensus méthodologique n'est pas encore établi, mais la communauté scientifique s'accorde à dire que le système doit inclure au moins les processus affectés par le changement étudié, ces processus pouvant appartenir ou pas au cycle de vie du produit étudié [77]. En effet, alors qu'en ACV-A tous les processus sont reliés entre eux par des flux de matière ou d'énergie, en ACV-C, les processus peuvent également être unis par des liens de causalité [78].

Ainsi, l'ACV-C est mieux adaptée pour évaluer les impacts environnementaux associés à un changement dans le cycle de vie d'un produit alors que l'ACV-A est plus efficace pour identifier les impacts sur l'environnement d'un produit déjà existant [79]. Le choix entre l'approche attributionnelle ou conséquentielle dépend des objectifs de l'étude. En effet, pour beaucoup d'auteurs [80], [81], si l'objectif est d'évaluer la partie des impacts attribuables à un produit, l'approche attributionnelle est parfaitement adaptée. Dans le cas où l'objectif est d'évaluer les conséquences d'une prise de décision, l'approche conséquentielle doit être favorisée. Certains

auteurs pointent des limites dans l'approche conséquentielle [69], alors que d'autres prônent son utilisation systématique [77].

5.1.1.6 Base de données et méthode de calculs

Afin de relier les données d'inventaire aux différents dommages environnementaux, de nombreuses bases de données et de méthodes d'analyse d'impacts ont été introduites. Une des bases de données les plus reconnues et utilisées aujourd'hui est probablement Ecoinvent [82]. Cette base de données a été développée par le « Centre Suisse pour les Inventaires des Cycles de Vie » afin de mettre à disposition un ensemble de données pertinentes, fiables, transparentes et accessibles et pour permettre l'analyse des impacts environnementaux et socio-économiques à travers l'application de la méthode d'ACV. Cette base de données couvre l'ensemble des activités économiques (industrielles, agricoles, etc...) en détaillant leurs émissions dans l'air, le sol et l'eau pour tout un ensemble de processus unitaires disponible au niveau régional ou global. Elle permet d'augmenter l'accessibilité, la crédibilité et l'acceptation des résultats de l'ACV afin d'en faire un outil fiable d'évaluation environnementale qui soutiendra la politique intégrée des produits (PIP). La qualité des données est assurée par un système rigoureux de validation et de révision et leur pertinence est maintenue par des mises à jour régulières pour refléter les évolutions les plus récentes des activités qu'elle décrit. Enfin elle peut être utilisée pour pallier à l'accessibilité de certaines données quant à la comptabilité des flux de matières. Dans sa version 3, elle met à disposition les systèmes de modélisations d'inventaire les plus courants : Attributionnelle, Conséquentielle (Cf. §5.1.1.5) et « cut-off ». La version « cut-off » correspond à une approche de stock, où le producteur est responsable des déchets qu'il produit et ne peut être crédité d'aucun bénéfice sur un éventuel recyclage. L'approche conséquentielle étant recommandée pour les études prospectives, c'est l'approche attributionnelle qui a été retenue dans la suite de ce travail. D'autres bases de données sont également disponibles mais elles sont généralement plus spécifiques à certains secteurs ou types d'impacts comme EIME (électrique et électronique), Agri-Balyse (Agriculture), World Food LCA Database (Alimentaire), et sont relativement moins utilisées par les pratiquants de l'ACV comparé à l'omniprésence d'Ecoinvent.

Afin d'exploiter les informations fournies par la base de données et de pouvoir interpréter les données d'inventaires de cycle de vie il est nécessaire de lui adjoindre des outils qui vont permettre de déduire les impacts potentiels sur les différentes sphères des écosystèmes (appelé catégories d'impacts), à partir des émissions de

polluants des processus unitaires fournis par la base de données. Ces méthodes d'analyse d'impacts sont nombreuses et elles utilisent toutes des hypothèses, des perspectives temporelles ainsi que des coefficients de normalisation ou de pondération des impacts différents. Elles peuvent toutefois être regroupés en deux catégories : les méthodes orientées « problèmes » (dites « mid-point ») et les méthodes orientées « dommages » (dites « end-point »). Certaines méthodes d'analyse d'impacts intègrent cependant la possibilité d'analyser les impacts à chacun des niveaux.

Les méthodes orientées « problèmes » caractérisent les impacts au milieu de la chaîne de causalité en les regroupant en catégories intermédiaires auxquelles on associe un indicateur afin de comparer les différents flux des substances qui contribuent à la catégorie en cause. Les catégories d'impacts orienté « problèmes » les plus courantes sont généralement l'acidification et l'eutrophisation des milieux aquatiques, l'occupation des territoires, le réchauffement climatique, l'extraction de minerai, les rayonnements ionisants, l'appauvrissement de la couche d'ozone, la toxicité pour l'homme, ou encore l'écotoxicité terrestre et aquatique. Plusieurs méthodes d'analyse orientées « problèmes » sont disponibles (Impact 2002+, CML, TRACI, etc...). En fonction de la méthode d'analyse retenue les catégories d'impacts peuvent être différentes, et il est parfois nécessaire de se référer aux indicateurs pour les comparer entre elle. Cependant ce niveau d'analyse est en général plus précis, et il y a moins d'incertitude pour la quantification des indicateurs car elle est réalisée au début de la chaîne de causalité. Malgré une plus grande précision, ces indicateurs ne sont pas les plus utilisés, notamment dans les communications vers le public, car ils manquent de visibilité et leur compréhension est difficile pour les non-spécialistes. La plupart des méthodes d'évaluations des impacts font aujourd'hui consensus pour un grand nombre de catégories (effet de serre, acidification, eutrophisation, etc...), mais certaines d'entre elles font l'objet de débats. C'est notamment le cas en ce qui concerne la toxicité et l'écotoxicité [83].

Les méthodes orientées dommages, quant à elles, caractérisent les impacts à la fin de la chaîne de causalité. Elle estime les dommages potentiels qui pourraient résulter des différents impacts mis en avant par la méthode orientée problèmes. Pour cela elle pondère plusieurs catégories intermédiaires pour les regrouper en catégories supérieures. Ces catégories supérieures sont en général l'impact sur la santé humaine, la qualité des écosystèmes, l'impact sur les ressources et le changement climatique. Leur principal intérêt est qu'elles permettent de montrer plus clairement les impacts, par exemple en faisant référence directement au risque de

cancer pour la population, et ainsi d'être plus compréhensibles pour le grand public. Toutefois la chaîne de causalité complète n'est pas toujours très bien maîtrisée notamment dans le domaine biologique, ce qui induit forcément plus d'incertitude dans les résultats qu'elles proposent [70], [84]. Il est recommandé par la norme ISO [63], [64] que les résultats d'une étude réalisée au niveau « dommages » soit systématiquement accompagnés du descriptif des impacts au niveau « problèmes », notamment pour les ACV comparatives, et ceci par soucis de transparence. Plusieurs méthodes existent à ce niveau et les plus utilisées sont Eco Indicator 99, Impacts 2002+ et Recipe 2016. Dans le cadre de ce travail la méthode retenue est Recipe 2016 [85]. Alors qu'elle a progressivement remplacée Eco Indicator 99, elle permet de disposer des résultats pour chacun des niveaux d'analyses et c'est celle qui a été mise à jour le plus récemment. Elle permet également d'analyser les résultats des impacts selon différentes perspectives temporelles allant du court terme (perspective individualiste), au long terme (perspective égalitaire). La perspective que l'on retrouve le plus souvent dans les modèles scientifiques, et celle qui fait généralement consensus est la perspective intermédiaire à moyen terme (perspective hiérarchisée). La description des différentes catégories d'impacts orientés « problèmes » et « dommages » de Recipe 2016 ainsi que les relations permettant de passer de l'un à l'autre sont décrites dans la Figure 15 ci-dessous. L'ensemble des coefficients de normalisation, pondération ou de passage utilisés par cette méthode sont disponibles dans la documentation de Recipe 2016 [86].

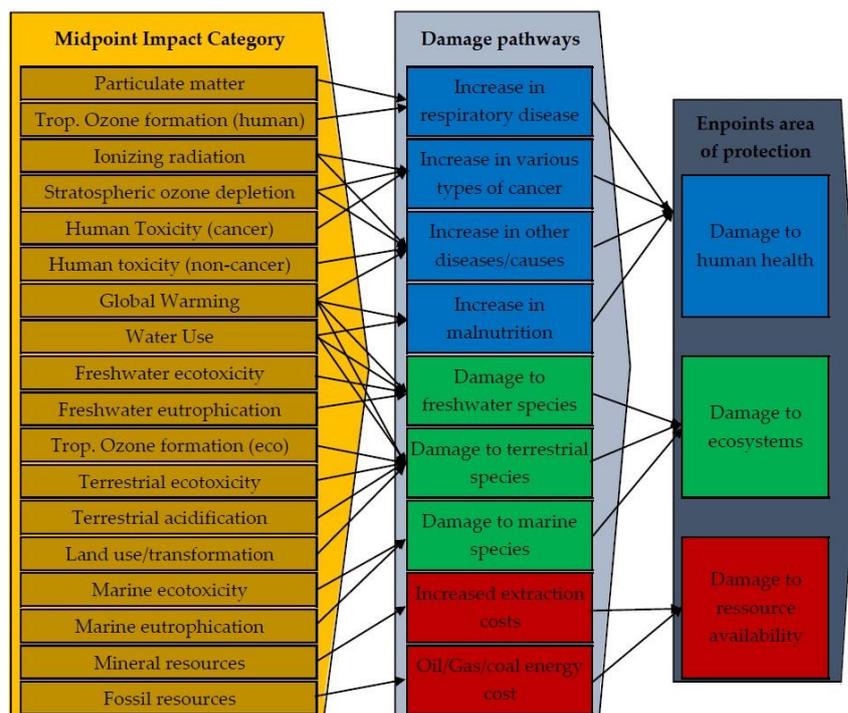


Figure 15. Représentation des relations entre les catégories d'impacts (orientés problèmes) et les zones de protection (orientés dommages) (Adapté de la documentation de Recipe 2016 [86]).

Face à cette diversité de bases de données, de méthodes de calculs, et des incertitudes y afférant, il est important que les études ACV soient réalisées en toute transparence. Il est important de présenter les résultats comme des impacts potentiels qui restent dépendants des choix méthodologiques réalisés au cours de l'étude. En ce sens les études ACV resteront constamment sujettes à interprétation et le choix par exemple du niveau de la méthode d'analyse est prédominant dans l'interprétation des résultats. C'est pourquoi dans la mesure du possible les deux niveaux d'analyse devraient être présentés conjointement pour améliorer la pertinence et la compréhension générale de l'étude [87] et présenter des analyses d'incertitudes et/ou de sensibilité.

5.1.2 L'empreinte carbone

Alors que la politique environnementale se fonde de plus en plus sur le cycle de vie dans le monde, plusieurs normes d'empreinte carbone basées sur le cycle de vie ont été établies. Cette normalisation pour la politique environnementale a permis de pouvoir évaluer dans un cadre commun une partie de l'impact de nos activités, mais a également soulevé des problèmes notamment dans l'uniformisation des règles de catégorisation de l'empreinte environnementale des produits et organisations [88], [89]. En outre, les calculs de l'empreinte carbone basée sur le cycle de vie peuvent constituer la base de l'octroi de subventions, il est donc de la plus haute importance que les résultats de l'indicateur soient robustes et comparables. Cela implique que la liberté des choix méthodologiques doit être réduite au minimum absolu avec les limitations et incertitudes associées. De plus, les études sur l'empreinte carbone se limitent généralement au réchauffement planétaire, alors que d'autres impacts environnementaux peuvent être plus importants (l'eutrophisation, l'acidification, l'écotoxicité et la toxicité humaine, l'impact sur la biodiversité, l'utilisation de l'eau, etc...). Enfin, la portée limitée de l'empreinte carbone, que ce soit géographiquement ou par rapport à la diversité des impacts réels, n'est pas suffisamment mise en avant lors de la présentation des résultats. Même si la démarche peut s'avérer utile pour des organisations ou des particuliers par son côté simplificateur, elle ne semble pas suffisante pour faire état de la diversité des impacts environnementaux générés par une activité.

5.1.3 Le Coût du Cycle de vie (CCV)

Le Coût du Cycle de Vie (CCV) fait référence au coût cumulé d'un produit tout au long de son cycle de vie allant de sa conception jusqu'à sa fin de vie. Le CCV a une structure similaire à l'ACV environnementale en quatre parties : définition de l'objectif et du champ d'application, inventaire des coûts du cycle de vie, agrégation des coûts par catégories et interprétation des résultats [72], [90]. De la même manière que l'ACV environnementale, le CCV peut se concentrer uniquement sur certaines étapes du cycle de vie, par exemple la fabrication, l'utilisation et l'entretien, et ignorer le reste, en fonction de la portée et de l'objectif de l'étude. Il se formalise de manière simplifiée par la somme des différents coûts actualisés engendrés par les différentes phases du cycle de vie considérées.

$$CCV = \sum_{i=1}^n C_i \quad (\text{Équation 2})$$

Avec :

- CCV : le coût du cycle de vie,
- C_i : le coût actualisé d'une opération,
- n : le nombre de coûts différents selon les phases du cycle de vie considérées.

Pour les producteurs et fabricants à un niveau industriel ou artisanal, elle va par exemple prendre en compte le coût des matières premières et de leurs acheminements, de l'énergie et du matériel nécessaire à leurs transformations, des salaires du personnel, des locaux etc., ainsi que les bénéfices engendrés par l'activité en question. Tandis que pour les communautés ou les utilisateurs finaux du produit, elle va prendre en compte les coûts liés à la fonction d'usage tels que les coûts d'acquisition, d'installation, de maintenance, de réparation, de protection, de consommation d'énergie, de fin de vie, etc. D'autre part, dans le cadre de l'immobilier, le coût global est souvent défini comme l'ensemble des montants de l'investissement initial, des coûts différés de fonctionnement et de gestion pendant la durée de vie du bâtiment (exploitation, remplacement, maintenance, réhabilitation) auxquelles on soustrait les coûts résiduels, qui correspondent à la valeur du bien au terme de la durée définie [91].

De nombreuses définitions et formules sont donc possibles pour le CCV, chacune permettant de décrire au mieux les coûts pertinents engendrés en fonction de l'acteur qui la pratique. La difficulté majeure que rencontre cette méthode se trouve dans la prise en compte des externalités générées par le produit ou l'activité

en question, qui ne sont pas toujours incluses dans les différentes analyses (Cf. §5.2.1). On distingue par exemple, le CCV « conventionnel » qui inclut uniquement les coûts et bénéfices privés, le CCV « environnemental » qui va aussi prendre en compte les coûts et bénéfices environnementaux externes qu'on anticipe de privatiser (tels qu'une taxe sur le CO₂), et enfin le CCV « sociétal » pour lequel tous les coûts et bénéfices externes (sur l'environnement, les humains et l'économie) sont monétisés [90].

Dans le cadre de ce travail, la définition du CCV retenue est celle fournie par le rapport de la commission européenne à propos de la méthodologie pour l'Eco-conception de produits relatifs à l'énergie (MEErP) [92], dont les systèmes d'éclairage font partie. Elle se concentre sur le CCV pour les utilisateurs finaux à partir de la description de l'annexe II de la directive Eco-design 2009/125/EC. La méthode du coût du cycle de vie s'appuie « *sur un taux d'actualisation réel fondé sur des données fournies par la Banque Centrale Européenne et une durée de vie réaliste du produit ; elle repose sur la somme des variations des prix d'achat (découlant des variations des coûts industriels) et des coûts d'exploitation, qui résultent des niveaux différents des possibilités d'amélioration technique, actualisés sur la durée de vie des modèles représentatifs des produits visés. Les coûts d'exploitation couvrent essentiellement la consommation d'énergie et les frais supplémentaires occasionnés par les autres ressources, telles que l'eau ou les détergents* » [92].

Sa formule est la suivante :

$$CCV = PP + PWF \cdot OE \pm EoL \quad (\text{Équation 3})$$

Avec :

- *CCV*: le coût du cycle de vie pour l'utilisateur finale en euros,
- *PP*: le prix d'achat (incluant les coûts d'installations) en euros,
- *OE*: le coût annuel d'exploitation en euros,
- *EoL*: les coûts (collecte, élimination, recyclage) ou bénéfice (revente, réutilisation) de fin de vie en euros,
- *PWF*: le facteur de valeur actuelle définit dans l'équation suivante :

$$PWF = \frac{1 - \frac{1}{(1+d)^N}}{d} \quad (\text{Équation 4})$$

Avec :

- *N*: la durée de vie du produit en année,

- d : le taux d'actualisation en % (généralement égal à 4% jusqu'à 30 ans en France puis dégressif jusqu'à 2% au-delà, tel que préconisé par le rapport Lebègue [93]).

Le PWF peut également être enrichi en y intégrant l'augmentation du prix du coût d'exploitation au fur à mesure du temps, qui peut jouer un grand rôle, notamment pour les produits disposant d'une longue durée de vie :

$$PWF = 1 - \left(\frac{1+e}{1+d}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{1+e}{1+d}\right)^N\right] \quad \text{avec } d \neq e \quad \text{Équation 5}$$

Avec :

- e : le taux de croissance annuel agrégé des coûts d'exploitation en euros,

Dans l'Union Européenne, pour de nombreux produits, comme c'est le cas pour les équipements électriques et électroniques (dont les systèmes d'éclairage font partie), les coûts de fin de vie sont inclus dans le prix d'achat (PP) à travers la Responsabilité Elargie des Producteurs (REP). Ce dispositif implique que les acteurs économiques sont responsables de l'ensemble du cycle de vie des produits qu'ils mettent sur le marché. Tous fabricants, distributeurs ou importateurs doivent prendre en charge la gestion des déchets générés par leurs produits, notamment financièrement. En pratique la REP se caractérise bien souvent par un partenariat avec un Eco-organisme, tel qu'Ecosystem (anciennement Recylum) en France, qui organise la collecte, la dépollution et le recyclage des équipements électriques, des ampoules à économies d'énergie et des petits extincteurs. Depuis le 1^{er} janvier 2021, le montant de l'Eco-participation est de 0.13€ pour les tubes fluorescents rectilignes, les lampes fluocompactes et les autres lampes à décharges, et de 0.10€ pour les lampes à LED et les tubes à LED rectilignes [94]. L'Eco-participation correspond à la contribution de l'acheteur d'un équipement neuf au financement de son élimination.

Dans le cas des systèmes d'éclairage pour un particulier, les coûts annuels d'exploitation (OE) se limitent aux coûts engendrés par la consommation d'électricité, la formule du CCV peut donc être simplifiée :

$$CCV = PP + PWF \cdot P_E \cdot CEA \quad (\text{Équation 6})$$

Avec :

- P_E : le coût de l'électricité en euros · kWh⁻¹,
- CEA : la consommation d'électricité annuelle du système en kWh.

5.1.4 L'Analyse de Cycle de Vie Sociale (ACV-S)

Paru en 2009, les « Lignes directrices pour l'Analyse Sociale du cycle de vie des produits » [95] est un des premiers rapports qui détaille le cadre d'application, les objectifs et la méthode pour conduire un ACV-S. Cette publication de l'UNEP a été motivée par un consensus sur le fait que *"l'utilisation de l'ACV est entravée dans les pays en développement en raison du manque d'expertise, de données, etc., mais aussi en raison de l'incapacité de l'ACV à s'engager dans les questions clés des pays en développement"* [95]. Des experts dans le domaine de la responsabilité sociale, de la soutenabilité et de l'ACV ont participé activement à l'élaboration de ce rapport.

L'analyse du cycle de vie sociale (ACV-S) y est décrit comme *« une technique d'évaluation de l'impact social (et de l'impact potentiel) qui vise à évaluer les aspects sociaux et socio-économiques des produits et leurs impacts positifs et négatifs potentiels tout au long de leur cycle de vie, qui comprend l'extraction et le traitement des matières premières, la fabrication, la distribution, l'utilisation, la réutilisation, l'entretien, le recyclage et l'élimination finale »* [95]. L'ACV-S a donc pour objectif de compléter l'ACV environnementale par des aspects sociaux et socio-économiques.

Les aspects sociaux et socio-économiques évalués dans l'ACV-S sont ceux qui peuvent affecter directement les parties prenantes d'une activité de manière positive ou négative au cours du cycle de vie complet d'un produit. Ils peuvent être liés aux comportements des entreprises, aux processus socio-économiques ou aux impacts sur le capital social. En fonction de la portée de l'étude, les impacts indirects sur les parties prenantes peuvent également être considérés. Parmi les parties prenantes, on retrouve les communautés locales, les acteurs de la chaîne de valeurs, les consommateurs, les travailleurs et la société dans son ensemble. Pour l'ensemble des parties prenantes, des catégories d'impacts ont été définies, tel que, les droits humains, les conditions de travail, la santé et la sécurité, l'héritage culturel, la gouvernance et les répercussions socio-économiques. Par la suite, ces catégories d'impacts ont été enrichies avec des sous-catégories (travail des enfants, égalité des sexes, libertés d'association, transparence, respect des droits indigènes, emplois locaux, corruption, respect de la propriété intellectuelle, etc...). L'ensemble des sous catégories ainsi que les moyens d'évaluer les impacts qui les concernent sont détaillés en 2011 dans « La fiche méthodologique pour les sous-catégories dans l'ACV-S » [96].

En dehors des particularités liées à la classification des parties prenantes et des catégories d'impacts, l'UNEP/SETAC propose que l'ACV-S se conforme au cadre et à la méthode défini dans l'ISO 14040 (définition de l'objectif et du champ d'application, inventaire, analyse des impacts et interprétation des résultats). L'ensemble de ces étapes doivent être réalisées en collaboration avec l'ensemble des parties prenantes et ceci pour chaque localisation géographique faisant partie de la chaîne de valeur du produit ou service étudié. Toutefois, ces documents fondateurs [95], [96] ne propose, ni ne recommande aucun modèle ou méthode d'analyse des impacts ou d'interprétation des résultats, ce qui limite pour l'instant son utilisation. En 2015, « The Social Hotspots Database » a par la suite été développé pour pallier à ce manque [97]. Malgré le relatif manque de maturité de cette base de données, on constate déjà grâce aux résultats d'études plus complètes qu'un produit ayant une bonne performance environnementale n'est pas nécessairement produit tout au long du cycle de vie de manière socialement responsable [98]. L'ACV classique entre parfois en contradiction avec l'ACV-S et il est encore nécessaire de développer des méthodes intégrées afin de pouvoir mieux appréhender l'interprétation des résultats de chacune des approches.

En théorie, l'ACV-S peut être menée sur n'importe quel produit, même ceux qui sont sciemment nuisibles à la société (drogues, armement, par exemple). Cependant l'ACV-S n'a pas pour objectif ni pour prétention de fournir des informations sur la question de savoir si un produit doit être produit ou non. La documentation de l'utilité du produit et l'évaluation de la phase d'utilisation du cycle de vie reflèteront généralement la nature non éthique ou nocive du produit mais n'a pas la capacité ni la fonction d'informer la prise de décision à ce niveau. Même s'il est vrai que les informations sur les conditions sociales de production, d'utilisation et d'élimination peuvent fournir des éléments de réflexion sur le sujet, elles seront rarement une base suffisante pour la décision.

L'ACV-S est donc une technique qui permet « *d'apporter des améliorations progressives, mais qui ne constitue pas en soi une solution révolutionnaire en matière de consommation et de mode de vie soutenables* ». Ces sujets vont bien au-delà de la portée de l'outil. L'ACV-S « *fournit des informations sur les aspects sociaux et socio-économiques pour la prise de décision, en suscitant un dialogue sur les aspects sociaux et socio-économiques de la production et de la consommation, dans la perspective d'améliorer les performances des organisations et, en définitive, le bien-être des parties prenantes* » [95].

En dehors de la base de données des points chauds sociaux dont nous ne disposons actuellement pas au sein du laboratoire LAPLACE, l'intérêt de conduire une ACV-S comparative pour ce travail n'a pas été reconnu, dans le cadre où elle est défini aujourd'hui [99]. En effet, lorsqu'il s'agit de comparer différents systèmes lumineux, les conditions de fabrications et d'utilisation de la plupart d'entre eux sont similaires (fabrication en Chine pour importations). On remarquera probablement quelques différences notamment liées à l'extraction de métaux rares plus nombreux pour les LEDs ou par exemple les impacts liés au mercure pour les lampes à décharges, mais in fine les points chauds identifiés par la méthode seraient globalement proches, et la majorité de ces types d'impact sont en partie couverts par l'ACV environnementale. Une approche intéressante, serait cependant de pouvoir comparer par exemple les impacts sociaux et socio-économiques d'une relocalisation de la production en Europe, qui pourrait améliorer des aspects concernant la santé et le bien être des travailleurs qui disposent probablement de meilleures conditions de travail, mais également des aspects liés à notre indépendance technologique, ou encore à la fiabilité des produits, pour lesquels, les exigences de qualité de fabrication pourraient être réévaluées. Enfin l'ACV-s pourrait également permettre de prendre en compte certains des impacts sur la santé pour les usagers. Certaines de ces thématiques sont sous-jacentes dans la suite de ce travail et sont liées en quelque sorte aux impacts d'usages non considérés par l'ACV environnementale (Cf. §5.2.), mais ce cas d'étude n'est pas traité en tant que tel.

5.1.5 L'Analyse de Soutenabilité des Cycles de Vie (ASCV)

Aujourd'hui au moins deux définitions de l'ASCV cohabitent. La première est celle proposée par Kloepffer [100] : « *Étant donné l'acceptation généralisée du modèle de [triple bilan], il est assez simple de proposer le schéma suivant pour l'évaluation de la soutenabilité du cycle de vie (ASCV) : $ASCV = ACV + CCV + ACV-S$, où l'ACV est l'analyse du cycle de vie environnemental SETAC/ISO, CCV est une évaluation du coût du cycle de vie environnemental et l'ACV-S est l'analyse du cycle de vie sociétal ou social* ». La seconde définition est celle proposée par Guinée et al [71] : « *Le cadre de l'ASVC élargit le champ d'application de l'ACV actuelle, qui ne porte plus uniquement sur les impacts environnementaux, mais sur les trois dimensions de la soutenabilité (personnes, planète et prospérité). Elle élargit également le champ d'application des questions principalement liées au produit (niveau du produit) à des questions liées au secteur (niveau du secteur) ou même à l'ensemble de l'économie (niveau de l'économie). En outre, elle approfondit l'ACV*

actuelle pour inclure d'autres relations que les seules relations technologiques, par exemple les relations physiques (y compris les limites des ressources et des terres disponibles), les relations économiques et comportementales, etc. [...]. L'ASCV est un cadre transdisciplinaire d'intégration de modèles plutôt qu'un modèle en soi. L'ASCV travaille avec une pléthore de modèles disciplinaires et guide la sélection des modèles appropriés, en fonction d'une question spécifique de soutenabilité ». La définition de Guinée et al. [71] reprend donc celle de Kloepffer [100] et ajoute deux dimensions à la dimension d'élargissement des impacts (environnementaux, économique et socio-économique). Ces deux dimensions sont :

- L'élargissement du niveau d'analyse au niveau « secteur » (par exemple en regroupant plusieurs produits ou technologies connexes) ou au niveau « de l'économie globale », que ce soit celle des Etats ou d'autres entités géopolitiques, voire celle du monde entier (par exemple sur des questions liées aux énergies renouvelables) ;
- L'approfondissement aux relations non-technologiques tels que les effets rebonds, le comportement des consommateurs, l'élaboration des politiques, ou les investissements stratégiques. Certains modèles comme Eco-Indicator 99 [101] et Recipe 2016 [85] incluent des scénarios d'adaptations humaines dans leurs modèles orientés dommages (« endpoint ») sur le changement climatique, même s'ils n'incluent pas les implications environnementales de ces scénarios d'adaptation.

L'analyse bibliographique proposée par Guinée [102] semble montrer qu'en pratique la plupart des publications et études sur le sujet se sont limitées à la dimension d'élargissement des impacts tel que défini par Kloepffer [100], ce qui montre tous les challenges qui restent à relever pour que l'ASCV arrive à maturité et exprime tout son potentiel. Parmi ces challenges, sont mis en avant la nécessité de :

- Disposer d'indicateurs quantitatifs et pratiques pour l'ACV-S ;
- Développer, mettre en œuvre et appliquer des approches basées sur le cycle de vie pour évaluer les scénarios pour un avenir soutenable ;
- Développer et mettre en œuvre des moyens de traiter les incertitudes et les effets rebonds de manière aussi complète et pratique que possible.

L'ensemble de ces points font parfaitement échos avec les limites mises en avant de l'ACV-S mais également avec le premier bilan pour l'éclairage réalisé dans le §4.4. De son côté Fauzi et al. [103], identifient 8 difficultés à résoudre pour le

développement de l'ASCV. Ces difficultés se trouvent au niveau des interactions entre l'ACV, le CCV et de l'ACV-S :

- Les différences dans la gestion de la temporalité entre l'ACV et le CCV par exemple lorsqu'on applique le taux d'actualisation dans le CCV ce qui n'est pas le cas dans l'ACV ;
- Les différences entre les participants concernés par le CCV et l'ACV-S : le CCV se focalise particulièrement sur le coût pour le producteur ou le consommateur uniquement, alors que l'ACV-S peut s'intéresser à tous les acteurs de la chaîne de valeur ;
- La prise en compte des impacts et des bénéfiques entre l'ACV et l'ACV-S : L'ACV ne prend en compte que les impacts négatifs alors que ceux de l'ACV-S peuvent être soit positifs soit négatifs et il est difficile de savoir réellement comment ils se compensent les uns et les autres ;
- La différence d'échelle à laquelle l'analyse est effectuée : les données pour l'ACV sont disponibles au niveau des processus pour différents pays, alors que pour l'ACV-S les données doivent se situer spécifiquement au niveau du site étudié pour refléter la réalité d'une situation ;
- La différence entre ce qui peut être perçu « positif et bon » ou « négatif et mauvais » en fonction du niveau d'analyse pour l'ACV-S. Par exemple à une échelle globale, le travail des enfants est considéré comme mauvais, mais à une échelle locale, il peut être considéré comme vital car il assure un revenu supplémentaire indispensable aux familles, il faudrait alors par exemple également augmenter la rémunération des adultes et assurer la scolarité des enfants pour compenser;
- À ces difficultés s'ajoute le manque de données et de connaissance par rapport à l'approche conséquentielle du CCV et de l'ACV-S.

L'ensemble des points précédents confirment qu'une harmonisation entre les trois méthodes (ACV, CCV et ACV-S) est nécessaire pour permettre une utilisation généralisée de l'ASCV telle que définie par Guinée et Kloepffer. A ce stade, cette méthodologie n'est pas encore assez mature et n'a pas encore été appliquée sur suffisamment de cas d'études pour enrichir les connaissances notamment à propos des différents arbitrages qui peuvent être faits dans l'interprétation des résultats, mais également pour évaluer les incertitudes générées par ces différents arbitrages [103]. La réalisation d'un ASCV demande non seulement la collaboration de toutes les parties prenantes, mais également une compréhension complète de toutes les dimensions des processus du système complexe qu'est notre monde globalisé (avec

ses inégalités et ses différences culturelles), ce qui rend l'ensemble de la démarche fastidieuse et chronophage (notamment l'obtention de données pertinentes). Les promesses de la méthodologie restent cependant très encourageantes pour permettre à notre génération, et aux suivantes, des prises de décisions éclairées face aux enjeux de l'Anthropocène. Toutefois, la complexité de la méthode ainsi que que le temps long pour la conduire, pourrait être un obstacle important face à l'urgence des crises climatiques.

5.2 ...avec leurs limites dans leur utilisation et dans la prise en compte des impacts d'usages.

C'est peut-être la question la plus difficile à traiter. Les effets secondaires tels que l'utilisation indirecte des terres, les effets rebonds, les mécanismes du marché, etc. ou les impacts d'usages, tels que l'usure, la pollution lumineuse, les comportements et les interactions avec les usagers jouent tous un rôle dans la manière dont un produit ou service peuvent affecter la structure sociale, l'utilisation des terres, la nature, la santé et d'autres éléments importants pour la société. Ces effets ne sont pas suffisamment pris en compte par les études ACV actuelles, comme par exemple sur le sujet du bio fuel [104], [105]. Bien que l'ACV conséquente soit très efficace pour cartographier les impacts des processus indirectement affectés par une décision, elle ne permet pas de prendre en compte et d'intégrer les impacts d'usages directs ou indirects du processus considéré. D'autre part il semble nécessaire de commencer à réfléchir à des moyens de transposer en scénarios ACV microscopiques, les scénarios macroscopiques prenant en compte les limites des ressources et les boucles de rétroaction pour l'utilisation des sols, de l'eau, des ressources, des matériaux, et de l'énergie, tels que ceux élaborés par le GIEC [25]. Les paragraphes suivants donnent un aperçu des impacts qui ne sont pas, ou qui ne peuvent pas être pris en compte actuellement dans les études ACV des systèmes d'éclairage. Certains sont quantifiables mais leur impacts réels sont difficiles à établir comme la pollution lumineuse ; certains sont encore mal maîtrisés mais sont l'objet de recherches actives comme les risques photo-biologiques, certains sont sous-estimés pour des raisons structurelles économiques et industrielles et pourraient être mieux considérés dans un paradigme axé sur la durabilité et la sobriété matérielle tel que l'usure, les risques de pannes et la fin de vie, enfin certains sont moins palpables et liés aux comportements et structures socio-économiques tels que les externalités et les effets rebonds.

5.2.1 Les incertitudes sur les externalités

La notion d'externalité a été introduite par Henry Sidgwick en 1887 [106] puis a été précisée par Alfred Marshall en 1990 [107] et Jacob Viner en 1932 [108]. Elle désigne une situation où l'activité de production ou de consommation d'un agent économique crée un avantage ou un désavantage à autrui, sans aucune contrepartie financière. Ces externalités résultent des interdépendances entre acteurs économiques d'un système de production. Elles sont également la caractérisation d'une des hypothèses de base des théories de l'économie néo-classique souvent méconnue qui stipule que « *les ressources naturelles sont inépuisables car sans cela nous ne les obtiendrions pas gratuitement. Ne pouvant ni être multipliées, ni épuisées elles ne sont pas l'objet des sciences économiques* [109] ». L'impact de l'exploitation des ressources naturelles par les différents agents économiques n'a donc par construction, pendant longtemps, pas été considérés comme pouvant être source d'externalités ce qui a clairement contraint l'efficacité des mesures de préservation de l'environnement. C'est seulement dans les années 1970, incité par le rapport du club de Rome [44], que l'environnement tend à devenir un bien économique à part entière, et plus tard, en 1999, que se construit le principe de capital naturel [110]. Ce concept est accompagné de deux paradigmes qui s'affrontent actuellement au sujet de la soutenabilité :

- La durabilité (plutôt soutenabilité) faible issue des économistes néoclassiques : il y a substitution entre capital artificiel et naturel [111], dont on peut douter de la pertinence actuellement, à la vue d'une de ces hypothèses de base [109].
- La durabilité (plutôt soutenabilité) forte : le capital naturel et artificiel sont complémentaires et non substituables et la soutenabilité dans le temps d'un système économique passe par la préservation du stock de capital naturel [112].

Le concept même d'externalités se retrouve alors contraint par l'affrontement de ces deux paradigmes qui ne peuvent pas coexister.

Les externalités peuvent être négatives ou positives. Parmi les externalités négatives on peut par exemple citer l'occupation des sols ou les pollutions engendrées par un site industriel ou un site d'extraction de ressources naturelles. En effet, ces activités vont engendrer des détériorations qui représentent des coûts négatifs socio-économiques qui seront supportés, non pas par leur responsable,

mais par la communauté concernée par les conséquences négatives, que ce soit les populations locales mais aussi parfois la population mondiale, comme c'est le cas pour l'émission de gaz à effets de serre ou pour la détérioration de la couche d'ozone. Les externalités peuvent également concerner plusieurs agents économiques quand l'activité de l'un va détériorer l'activité de l'autre par exemple le rejet de substances toxiques dans les milieux marins qui va impacter la faune marine et réduire les activités de pêches.

Les externalités peuvent également être positives. C'est le cas par exemple des infrastructures publiques de transport, du système éducatif ou encore de la vaccination contre les maladies contagieuses. Chacune de ces activités va avoir des effets positifs sur un ensemble de sphères et d'agents environnants ou sur la société dans son ensemble. Un certain nombre d'effets sociaux ou de mutualisation sont également sources d'externalités positives, comme les mises en synergie innovatrice, les parcs éco-industriels, les effets de mimétisme ou de diffusion rapide de l'information. L'ensemble de ces effets sont désignés comme des économies d'agglomération [107] et se retrouvent particulièrement dans les espaces urbains à forte concentration de population et d'activités.

Les externalités positives ou négatives sont en réalité nombreuses, mais restent parfois difficilement quantifiables, malgré leurs impacts non négligeables sur la structure socio-économique. Par exemple, le prix de l'émission d'une tonne de CO_{2eq} reste encore aujourd'hui source de débat [113]. Le principe de pollueur-payeur ou encore la mise en place d'un marché carbone a permis des avancées significatives dans la prise en compte d'un certain nombre d'externalités négatives, cependant il a aussi fait apparaître des dérives. La mise en place des éco-organismes est une des réponses aux principes de pollueur-payeur, cependant, elle fait retomber la charge de la collecte et du recyclage sur un agent différent, sans forcément contraindre le producteur à prendre des mesures pour faciliter ces opérations [114]. De plus, la charge financière de l'opération est souvent reportée sur le consommateur à travers une augmentation du prix. En ce qui concerne le marché carbone, il est également sujet à des dérives [115], avec l'apparition d'une certaine spéculation par l'intermédiaire de la revente de crédit entre différents agents économiques, mais également à des doutes sur son efficacité réelle [116].

La compréhension et la prise en compte de l'ensemble des externalités est aujourd'hui déterminante à la fois pour inciter les agents économiques au développement ou au maintien d'initiative engendrant des externalités positives en

les récompensant par exemple avec la mise en place de subventions, mais également pour motiver des interventions de l'état (régulation par les taxes ou les normes) pour limiter les activités qui sont sources d'externalités négatives trop importantes. Il est indispensable que l'ensemble des mesures prises soient adaptées la hauteur des enjeux et qu'elles puissent rapidement prouver leur efficacité en favorisant un changement profond de paradigme.

5.2.2 Les risques photo-biologiques.

Il est estimé que l'éclairage artificiel dans son ensemble rajoute 50% de la dose phototoxique reçue par l'éclairage naturel [117]. L'arrivée sur le marché des lampes à LEDs blanches représente un virage majeur pour l'exposition de l'être humain à la lumière artificielle et a soulevé de nombreux questionnements à propos des impacts que pourraient avoir l'exposition à cette lumière plus riche en bleu, en termes d'effets phototoxiques [118] (dommage à la rétine de l'œil) mais également mélanopiques [119] (relatif aux rythmes circadiens et au sommeil). En effet le spectre des LEDs blanches, lorsqu'il contient une large proportion de la composante bleue, a tendance à augmenter l'impact de la lumière sur le cycle circadien comparé aux précédentes technologies utilisées pour l'éclairage. Il est estimé que les lampes LEDs à température de couleur froide peuvent conduire à un doublement des doses phototoxiques et une augmentation significative des perturbations mélanopiques comparé au LEDs à température de couleur froide et aux autres types de technologies [117]. Ces effets sont également amplifiés par l'exposition aux écrans, particulièrement le soir. En dehors des aspects liés au spectre de la lumière, une forte luminance ponctuelle peut également créer un phénomène d'éblouissement. Enfin des variations de l'intensité lumineuse peuvent apparaître, effet connu sous le nom de modulation temporelle de la lumière (papillotement et effet stroboscopiques) et ces variations qu'elles soient perceptibles ou non visuellement peuvent également avoir un impact sur l'être humain [117]. Il est important de préciser que l'ensemble des risques photo-biologiques qui vont suivre ne sont pas spécifiques aux lampes à LEDs et qu'ils peuvent aussi être identifiés pour d'autres systèmes d'éclairage en fonction de leurs caractéristiques et leur utilisation, mais également sur d'autres systèmes tels que les écrans de smartphones, de télévisions ou d'ordinateurs, les phares de voiture, la signalisation ou encore le rayonnement solaire.

5.2.2.1 Effets de la lumière bleue sur les rythmes circadiens

Depuis toujours, l'alternance jour-nuit ainsi que les saisons, ont régulé les rythmes biologiques des êtres vivants. Ces rythmes constituent une propriété

fondamentale du vivant dont la lumière est l'entrée sensorielle la plus importante [120]. Son intensité, ainsi que son spectre perçu par la rétine permet, à travers la production de mélatonine, de transmettre au corps humain des informations sur le moment de la journée dans lequel il se trouve, et plus particulièrement les informations relatives à l'aube et au crépuscule [121]. C'est la transmission de l'ensemble de ces informations qui permettent ensuite une synchronisation des rythmes biologiques des organismes vivants, et qui permettent de réguler les rythmes de veille et de sommeil de l'ensemble des organes. Cette synchronisation est assurée par une exposition intense durant la journée et une obscurité totale pendant la nuit.

Nos modes de vie actuels, de part une grande partie de la journée passée à l'intérieur, et une soirée qui nous soumet à de nombreuses sollicitations lumineuses, tendent de plus en plus à perturber cette synchronisation naturelle. Alors que l'éclairage à lampes LEDs semble avoir les caractéristiques pour amplifier ce phénomène, la découverte d'un nouveau type de cellules photo-réceptrices dans la rétine a fourni la base physiologique permettant de l'expliquer [122]. Les cellules ganglionnaires rétinienne intrinsèquement photosensibles (ipRGCs) sont des cellules photosensibles avec un pic de sensibilité situé entre 450 et 500nm et l'excitation de ces cellules par de la lumière bleue décale la production de la mélatonine. De nombreuses études ont ensuite été réalisées pour mieux comprendre et quantifier ce phénomène chez l'être humain [119].

En 2005, Rea et al. développa un modèle pour quantifier l'efficacité circadienne d'une source d'éclairage [123], qu'il affina par la suite en 2021 [124]. Ce modèle permet d'estimer ou prédire le taux de suppression de la mélatonine en fonction de la durée d'exposition. Il introduit le facteur circadien (CS) qui représente l'irradiance circadienne spectrale [W/m^2] émise par une lampe et reçue par notre œil. En se basant sur plusieurs expérimentations organisées par différents physiciens, Rea a pu en déduire une courbe du taux de suppression de mélatonine en fonction de CS. Les résultats de ce modèle peuvent ensuite être traduits en un taux de suppression de mélatonine et donc quantifier la perturbation du rythme circadien. En 2012, il propose également un modèle non linéaire plus précis que le modèle de Gall [125] permettant de relier la température de couleur à la lumière circadienne (CL_A) [126].

Les résultats d'études expérimentales menées chez l'Homme convergent et indiquent que la sécrétion nocturne de mélatonine est retardée par une exposition à

de la lumière riche en bleu, même très faible (10-40 lux). Cette perturbation dépend de l'intensité, du moment et de la durée d'exposition mais également de l'historique de l'exposition de l'individu dans la journée. Face à ce constat l'ANSES alerte sur un risque avéré sur l'être humain en ce qui concerne la perturbation du sommeil mais également sur les fœtus à travers une exposition de la mère. Elle identifie parmi les personnes à risques, les nourrissons, les enfants et adolescents, les jeunes adultes, les femmes enceintes, les travailleurs de nuit, ainsi que les personnes souffrant de pathologie ou d'anomalies oculaires [117]. Enfin, elle précise également un effet potentiel de l'exposition à la lumière bleue sur l'amélioration des performances cognitives et de la vigilance à travers notamment une baisse de la somnolence ce qui pourrait réduire les risques d'accidents industriels ou routiers tout en améliorant les performances et la productivité.

5.2.2.2 Effets phototoxiques de la lumière bleue

La phototoxicité est un mécanisme d'altération cellulaire induit par la lumière qui peut conduire à la mort cellulaire et donc entraîner une baisse de l'acuité visuelle partielle, définitive ou totale, une dégénérescence maculaire ou des myopies. Ces effets peuvent se situer au niveau de la surface oculaire ou de la rétine. De nombreuses études ont été réalisées afin d'identifier les potentiels risques phototoxiques de la lumière bleue. Il est important de préciser que même si certains effets sont avérés sur différents animaux, notamment des rongeurs, ils ne caractérisent pas toujours un effet avéré sur l'être humain, les mécanismes de protections oculaires tel que le reflex pupillaire [118], étant différent entre les espèces.

En ce qui concerne les pathologies de la surface oculaire, il a été prouvé que l'éclairage LED augmente la fréquence du clignement chez l'homme, indépendamment de l'état initial de l'œil ou de la présence de climatisation (qui a été également identifié comme un facteur favorisant le « syndrome sec » [127]). Alors que le stress oxydatif et l'inflammation sont étroitement liés à la sécheresse oculaire, et qu'une étude a montré l'apparition de stress oxydatif sur les rongeurs après une exposition à l'éclairage LED à partir de 50J/cm² [128], les données chez l'homme ne sont pas suffisantes à ce jour pour relier les pathologies de la surface oculaire à l'exposition à des LEDs. L'ANSES conclut que les éléments de preuve chez l'homme et l'animal sont limités et la survenue du syndrome sec est possible mais non prouvée [117].

Les différentes études réalisées pour évaluer les effets sur la rétine, lorsqu'elles sont réalisées sur des rongeurs et ou primates, ne permettent pas d'extrapolation directe sur l'homme [118]. Elles confirment toutefois la phototoxicité de la lumière bleue et un rôle potentiellement protecteur de la composante rouge du spectre. Les études in vitro confirment une phototoxicité dont les mécanismes dépendent du type cellulaire et de la longueur d'onde. Les courtes longueurs d'onde sont identifiées comme les plus toxiques, qu'ils s'agissent de LED ou d'autres sources [120]. Les effets de la lumière riche en bleue sur la toxicité rétinienne de l'homme et l'animal à court terme sont avérés. Les études sur les effets à long terme se basant sur la lumière solaire (riche en bleue en journée) montre que les risques de dégénérescence maculaire sur l'homme sont avérés [117]. Dans le cas de l'éclairage général, ce sont les températures de couleur élevées qui augmentent l'exposition à la bande phototoxique et ceci quelle que soit la technologie d'éclairage. Même si les lampes à LEDs augmentent le déséquilibre des longueurs d'ondes en faveur du bleu, elles se distinguent seulement lorsque la température de couleur est très élevé (supérieur à 6500K), ce qui peut être le cas avec les petites LEDs décoratives nues émettant de la lumière bleue (guirlandes, éclairages d'ambiance...). Il a été possible de distinguer la partie spécifique du spectre d'une lampe qui peut causer une dégénérescence maculaire plus importante [129]. La distinction entre le « mauvais bleu » (415 nm-455 nm) et le « bon bleu » (456 nm-490nm) peut ainsi permettre d'adapter le spectre de certains systèmes d'éclairages et de limiter les risques d'impacts sur les photorécepteurs de l'œil [130]. En revanche, les risques de toxicité pour les lampes à usages domestiques à basse température de couleur est faible.

En ce qui concerne la myopie, l'exposition à la lumière du jour est un facteur protecteur sans qu'il n'ait encore été possible de savoir quel élément de la lumière artificielle fait défaut (manque de bleu, de rouge, d'UV, de rythmicité, ...) [131]. Une étude sur des poulets semble indiquer que les LEDs pauvres en rouge et riches en bleu avec une modulation temporelle seraient une potentielle cause de myopisation [132]. En ce qui concerne l'homme, il s'agit cependant d'un phénomène multifactoriel, génétique et environnemental, et les éléments de preuve d'impacts positifs ou négatifs de l'éclairage artificiel sur la myopisation sont aujourd'hui limités [117].

Les personnes à risques identifiés pour les effets phototoxiques sont les nourrissons, enfants, adolescents et jeunes adultes, les personnes souffrants de

pathologies oculaires ou de troubles moteurs ou cognitifs, les travailleurs de nuit et les professionnels fortement exposés aux éclairages à LEDs [118].

5.2.2.3 Eblouissement

L'éblouissement est défini par la CIE [20] comme « *les conditions de visions dans lesquelles on éprouve une gêne ou une réduction de l'aptitude à distinguer des détails ou des objets, par la suite d'une répartition défavorable des luminances ou d'un contraste excessif* ». Elle distingue l'éblouissement perturbateur qui diminue les capacités et performances visuelles de l'observateur, et l'éblouissement d'inconfort qui apporte une gêne sans provoquer de baisse de performance. Elle l'évalue grâce à l'introduction de l'UGR (Cf. §3.1). Plusieurs facteurs modulent l'éblouissement, comme la quantité de lumière envoyée dans l'œil, la distance de la source ainsi que l'âge de l'observateur [117].

Quel que soit le système lumineux, une source ponctuelle de luminance élevée présente dans un champ obscur provoque un éblouissement perturbateur. Différentes études précisent que le calcul de l'UGR, tel que défini par la CIE, sous-évalue l'éblouissement pour les sources non-uniformes (tel que les LEDs à nues) et qu'il doit être limité aux lampes à LEDs utilisant de large diffuseurs sans sources directement visible [120]. La possibilité d'ajuster l'intensité des LEDs reste toutefois un moyen efficace de limiter cet effet de nuit ; et de jour, l'évaluation de cet effet semble en faveur des lampes à LEDs [133], malgré de larges variabilités entre les observateurs.

En ce qui concerne l'éblouissement d'inconfort, les études s'accordent sur le fait que les sources non uniformes sont plus éblouissantes que les sources uniformes de même luminance ; sur le fait que la multiplicité des sources ponctuelles visibles dans les luminaires aggrave cet inconfort ainsi que sur le fait que l'inconfort est lié à l'augmentation du contraste [117]. La température de couleur de la source ne semble pas jouer un rôle dans l'éblouissement d'inconfort, au contraire de l'IRC, qui lorsqu'il est élevé réduit cet effet. L'ensemble des systèmes d'éclairage à forte luminance, tels que les lampes torches et les phares automobiles, ainsi que les spots à LEDs ou les matrices de LEDs peuvent conduire à un éblouissement d'inconfort important.

Les populations sensibles sont les personnes âgées ainsi que les sujets migraineux qui semblent sensibles à certains spectres lumineux (feux de freinages rouges et écran AMOLED) [117].

5.2.2.4 Modulation temporelle de la lumière

La modélisation temporelle d'un système d'éclairage est principalement caractérisée par sa fréquence de modulation et le taux de modulation associé exprimé en pourcentage de l'intensité lumineuse (compris en 0 et 100%). Selon la fréquence de modulation, l'effet peut être perceptible ou non par le système visuel humain. Lorsque cette modulation est perceptible elle est appelée papillotement [134]. Ces effets sont définis comme étant « *des changements de la perception visuelle, induits par un stimulus lumineux dont la luminance et le contenu spectral fluctue dans le temps, pour un observateur humain dans un environnement spécifique* » [135]. Trois effets visuels distincts sont présentés : le papillotement, l'effet stroboscopique et l'effet de réseaux fantômes qui dépendent notamment du contexte spatio-temporel et de la sensibilité du système visuel humain.

Le papillotement d'un système d'éclairage ne peut être déterminé qu'après l'installation de la lampe. Il s'agit de la perception d'une variation temporelle de la lumière dans le cas d'un observateur statique dans un environnement statique. Cet effet est observable à des fréquences de modulation atteignant typiquement 70 Hz [135]. Il est généralement dû aux fluctuations du courant électrique, aux dysfonctionnements des ballasts ou bien ceux des drivers/transformateurs. Cet effet parasite inclut des pertes d'énergie électrique, de flux lumineux et, implique souvent la dégradation des systèmes (vieillesse accéléré des lampes). Le papillotement peut être qualifié suivant plusieurs méthodes, les plus souvent utilisées étant le pourcentage de modulation (Équation 7) et l'indice de papillotement (Équation 8) [136].

$$\text{Pourcentage de Modulation} = 100 \cdot \frac{A-B}{A+B} \quad (\text{Équation 7})$$

$$\text{Indice de papillotement} = \frac{\text{Aire 1}}{\text{Aire 1} + \text{Aire 2}} \quad (\text{Équation 8})$$

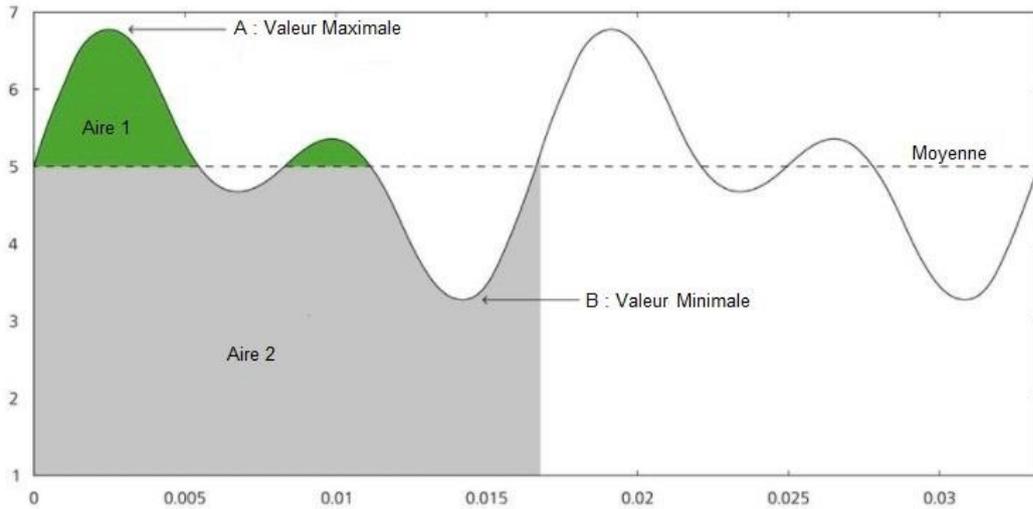


Figure 16. Le graphe représente une forme d'onde quelconque. L'axe des abscisses représente le temps (s). L'axe des ordonnées représente le niveau lumineux, en unité arbitraires. Les dimensions nécessaires au calcul de l'indice de papillotement et du pourcentage de modulation sont données (source : adaptée de la norme IEEE 1789 [137]).

Ces indices ne traduisent cependant pas la perception du papillotement qui, quant à elle, est quantifiable par « la sévérité à court-terme du papillotement (P_{st}^{LM}) » [134] et « l'indice de perception du papillotement (FPM) » [138].

L'effet stroboscopique est le changement perçu par un observateur statique du mouvement d'un objet éclairé par une lumière modulée. Cette situation correspond donc à un environnement non statique [135]. Lorsque l'objet en mouvement est une partie du corps humain (bras, main, doigt) passant devant l'œil, cet effet est typiquement observable pour des fréquences de modulation comprises entre 70 Hz et 2000 Hz [139] et sa perception pourrait dépendre du niveau d'éclairage [140]. Il est quantifiable grâce à l'indice de visibilité de l'effet stroboscopique (SVM) [134]. Il est normalisé pour que la valeur de 1 corresponde au seuil de visibilité de l'effet stroboscopique pour 50% des observateurs (Équation 9).

$$SVM = \frac{3.7 \sqrt{\sum_{i=1}^N (\leq 2kHz) \left(\frac{Ci}{Ti}\right)^{3.7}}}{1} \quad (\text{Équation 9})$$

Avec :

- Ci : l'amplitude relative de l'éclairage relatif.
- Ti : la fonction de seuil de contraste de l'effet stroboscopique.

L'effet de réseau fantôme est la perception d'images multiples de sources de lumière modulée, apparaissant lorsque l'observateur effectue une saccade oculaire

[135]. Il semble plus présent pour une lumière rouge et lorsque l'observateur effectue des saccades visuelles en présence d'une source de lumière modulée en mouvement [141]. Cet effet est détectable pour des fréquences de modulation allant jusqu'à 2500 Hz [142] mais la fréquence maximale de détection augmente linéairement avec la vitesse de la source jusqu'à 4000 Hz [141]. Il n'existe aucun indice publié dans des normes ou des recommandations qui permet de le quantifier.

Qu'ils soient perceptibles ou non, ils peuvent induire des crises d'épilepsie, des maux de tête, des migraines et de la fatigue visuelle, ainsi que des accidents de la route ou liés à l'utilisation de machines dans ces cadres d'utilisation spécifiques. Dans tous les cas, la modulation temporelle de la lumière est associée à un inconfort et à une diminution de l'ergonomie visuelle. Les personnes à risques identifiées concernant les maux de tête, les migraines et la fatigue visuelle sont les enfants, adolescents et jeunes adultes ainsi que les personnes souffrant de migraines; les opérateurs de machine et outils, les conducteurs de véhicules, les personnes souffrant de trouble moteurs ou cognitifs, ainsi que les enfants, adolescents et jeunes adultes, concernant les risques d'accidents; et enfin les personnes souffrant d'épilepsie [117].

Alors que l'interdiction des ballasts ferromagnétiques en Europe avait permis de faire disparaître ces phénomènes pour les lampes à décharges (vapeur de mercure, sodium haute pression, iodure métallique et ancien tube fluorescent), l'arrivée de l'éclairage à LED a changé cet état de fait. Les LEDs se distinguent cependant par une grande variabilité, avec certains modèles qui n'ont aucune modulation temporelle et d'autres qui ont des niveaux comparables aux anciens systèmes à ballast électromagnétique. En ce qui concerne l'éclairage résidentiel d'intérieur, des campagnes de mesures réalisées en France et au Royaume Uni ont montré que 40% des lampes à LEDs réservées à cet usage présente une modulation temporelle supérieure à celle des lampes fluocompactes et halogènes [117], en particulier lorsqu'elles sont utilisées avec un variateur de lumière avec lequel elles ne sont pas compatibles.

5.2.3 Pollution lumineuse

L'émission de lumière artificielle à l'extérieur pendant la nuit (ALAN), que ce soit dans le cadre bâti des zones urbanisées ou dans les zones naturelles, s'accompagne d'inconvénients que l'on désigne par le terme assez large de « pollution lumineuse » et de « nuisances lumineuses ».

Afin d'étendre ses périodes d'activités à la nuit, l'Homme a mis à contribution l'éclairage artificiel, qui s'est tout d'abord développé pour répondre à des besoins fonctionnels et de sécurité, comme sa propre vision et celle de son environnement lors de la circulation des individus et de différents véhicules en villes et en dehors (éclairage public de routes, de rues et de zones portuaires). Toutefois l'éclairage nocturne s'est ensuite rapidement développé à d'autres sites comme l'éclairage des zones résidentielles, touristiques et commerciales pour des usages qui se rapprochent de plus en plus d'usages agricoles et industriels (hangars, ateliers, usines, serres horticoles), esthétiques (éclairages des monuments), publicitaires (enseignes, vitrines, panneaux publicitaires) ou récréatifs (bars, restaurants, installations sportives). L'augmentation des surfaces extérieures éclairées a été mise en évidence dans une étude publiée en 2017 [143]. Des mesures satellitaires étalonnées ont montré que la surface terrestre éclairée a augmenté de 2,2 % par an entre 2012 et 2016, indiquant une augmentation globale de la pollution lumineuse. La Figure 17 montre l'évolution entre 2016 et 2020 de la pollution lumineuse sur la surface du globe.

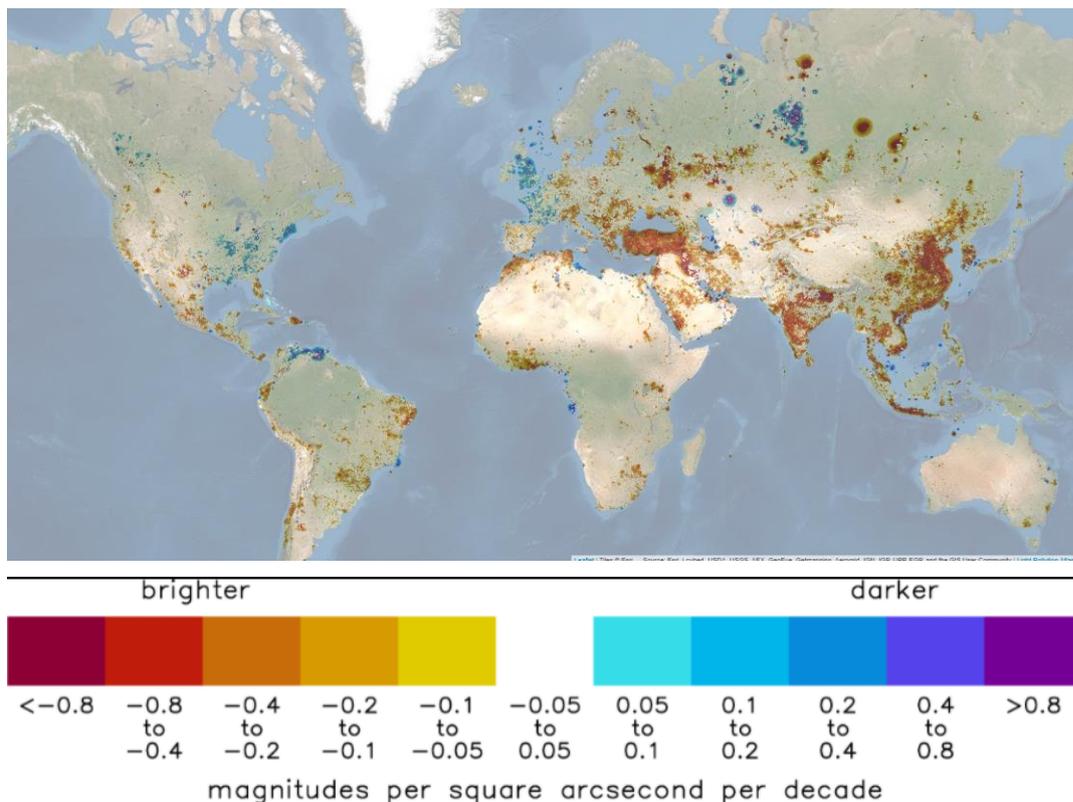


Figure 17. Evolution entre 2016 et 2020 des surfaces éclairées la nuit. Credit: P. Cinzano, F. Falchi (University of Padova), C. D. Elvidge (NOAA National Geophysical Data Center, Boulder). Source: (<https://djlorenz.github.io/astronomy/lp2020/>). Copyright Royal Astronomical Society. Reproduced from the Monthly Notices of the RAS by permission of Blackwell Science.

Alors que certains pays comme la France, le Royaume-Uni et la côte ouest des Etats-Unis, ont vu l'éclairage de nuit diminuer sur cette période, les pays avec un développement économique et démographique rapide (Chine, Inde, Indonésie, Turquie) ont quant à eux vu leurs nuisances lumineuses augmenter très nettement. Il est alors très difficile de corrélérer l'introduction de la technologie LED à l'augmentation globale des surfaces éclairées. Cependant, il semble raisonnable de suspecter que la production de lumière plus économique des LEDs ait pu faciliter l'installation ou augmenter la durée journalière d'utilisation de nombreux points lumineux par effet rebond, sans pouvoir toutefois le quantifier, l'étude de 2017 n'ayant réalisé que des mesures radiométriques dans un domaine spectral compris entre 500 nm et 900 nm, qui n'inclut pas les rayonnements de courtes longueurs d'onde, notamment la lumière bleue [143]. Il serait enfin surprenant que la technologie LED soit responsable de la diminution des pollutions lumineuses en Europe occidentale tant cette diminution semble coïncider avec la mise en place de nouvelles réglementations concernant la pollution lumineuse telles que l'interdiction des éclairages commerciaux après 1h du matin et la réglementation sur le rendement inférieur (DLOR) et supérieur (ULOR) des nouvelles installations de luminaires d'éclairage public [16].

Différents aspects de pollution lumineuse peuvent être considérés. Il y a tout d'abord la pollution lumineuse atmosphérique avec l'apparition d'un halo lumineux lié à la diffusion dans l'atmosphère de la lumière émise vers le ciel, dont une des conséquences les plus connues est la diminution de la visibilité des astres observables dans le ciel par l'Homme. Cependant la formation de ce halo lumineux a bien d'autres conséquences sur les écosystèmes, avec une multitudes d'effets potentiels [144]–[147], tels que la perturbation des trajectoires de migration [148], des relations proies prédateurs [149], [150] ou de recherche de nourriture [151]–[153], et de la vision ou de l'orientation de certaines espèces animales (y compris les pollinisateurs nocturnes) [154], [155]; l'expulsion d'espèces craignant la lumière et la concentration de celles qui sont attirées par elle [156], ce qui peut mener à une fragmentation des habitats [157]; mais également des impacts sur les végétaux dont les arbres [158]–[160]. De manière générale, l'ensemble de ces impacts sur la biodiversité a tendance à augmenter la mortalité des espèces ce qui contribue à son appauvrissement. Le second aspect à considérer est la nuisance sur le confort visuel et la santé de l'Homme liée notamment à la perception directe de la lumière la nuit, telles que la lumière intrusive, l'éblouissement d'inconfort ou d'incapacité, le sur-

éclairage et sous-éclairage provoquant des variations lumineuses trop grandes, ou la perturbation des rythmes circadiens [117].

Il a été identifié que les pollutions lumineuses dépendent essentiellement de quatre paramètres :

- Le flux de lumière globalement émis : puissance et nombre de sources lumineuses qui est directement liée au développement économique, à la démographie et à l'urbanisation des territoires mais également potentiellement à des effets rebonds ;
- La fraction indésirable du flux lumineux émis par chaque source de manière directe (émission vers le ciel, émission vers des zones non destinées à être éclairées) et indirecte (réflexion par le sol et les façades) qui dépend du matériel d'éclairage et d'affichage, mais aussi des conditions de leur installation ;
- Le spectre de la lumière émise : spectre étroit ou large, quantité de rayonnement de courte longueur d'onde (bleu et ultraviolet) qui dépend de la technologie d'éclairage (lampes halogène, différentes technologies de lampes à décharge, différents types de LED) ;
- Les durées et régimes de fonctionnement : les quantités cumulées de lumière artificielle dépendent des heures de fonctionnement des éclairages et de la variation d'intensité appliquée selon l'heure de la nuit qui dépendent des équipements périphériques permettant de contrôler l'éclairage et l'affichage extérieurs, que ce soit au sein des luminaires (capteurs, interrupteurs crépusculaires), des armoires électriques (horloges astronomiques, programmeurs et variateurs de puissance), ou de systèmes déportés permettant la supervision à distance d'une installation. Les systèmes d'éclairage pouvant être abaissés ou éteints contribuent moins longtemps à la pollution lumineuse que les éclairages fonctionnant toute la nuit à plein régime.

Pour conclure, il y a une multiplicité de facteurs à prendre en compte, qu'ils soient techniques (les différents moyens d'éclairage), qu'ils soient sociaux (les différentes stratégies humaines relatives au développement démographique et les interventions des états pour limiter les effets), qu'ils soient sanitaires (impacts sur la santé de l'Homme), ou enfin qu'ils soient environnementaux (les impacts sur les différents équilibres des écosystèmes). L'ensemble de ces facteurs s'ajoute aux nombreuses pressions anthropiques déjà existantes (pollution atmosphérique,

surexploitation, artificialisation des sols, etc...) et il est indispensable que la recherche se poursuive dans ces domaines avec une approche interdisciplinaire pour améliorer la compréhension de l'ensemble de ces facteurs.

L'usage et les techniques que l'Homme va mettre en place pour l'éclairage artificiel la nuit sont déterminantes, comme le montre la diminution des pollutions lumineuses en France et au Royaume-Uni [143]. Il convient cependant d'être prudent car l'introduction des lampes à LED peut avoir tendance à la multiplication des sources lumineuses dans certains usages déjà identifiés (éclairages des parkings, des zones commerciales, industrielles, agricoles et des serres horticoles Cf. §6.3) ; l'éclairage de mise en valeur architecturale et paysagère ; ainsi que les enseignes et affiches lumineuses [117]). D'autre part, les lampes à LEDs ont le potentiel de faire partie d'un ensemble de solution pertinente notamment en ce qui concerne l'éclairage des rues et des routes, ou encore l'éclairage intérieur des bâtiments s'échappant à l'extérieur. Associé aux fabricants de luminaires, il est d'ores et déjà possible de faire un usage plus utile de la lumière en limitant la lumière intrusive et à l'aide de détecteurs de présence (ou d'absence) dans les endroits adéquates. Il est toutefois nécessaire de disposer de plus amples informations sur les impacts des différents spectres lumineux relativement aux espèces et plantes environnantes pour s'assurer que le changement de spectre ne conduise pas à l'apparition de nouvelles perturbations sur les écosystèmes mal anticipées [161] ou une usure prématurée des lampes à travers des cycles d'allumage trop nombreux, et ceci de manière spécifique pour chaque environnement à éclairer considéré [162]. Chaque situation est unique, et il est nécessaire de l'étudier pour faire des choix adaptés en conséquence [163].

Il est enfin important d'être prudent lors de l'ajout de nouvelles fonctionnalités liées à l'éclairage public. En effet, alors que certaines solutions précédemment citées sont pertinentes et ont prouvé leur efficacité, l'ajout de fonctionnalités ne doit pas se faire au moyen d'une utilisation inconsidérée de matières critiques ou de flux de données, qui d'un point de vue ACV pourrait en réalité augmenter l'impact environnemental ou ne pas être adapté aux usages réels qui devraient être faits de l'éclairage public (Cf. §4.3.2). Une étude de cas en Autriche a par exemple montré une augmentation de 29 % de la consommation d'énergie pendant sa période de transformation de technologie d'éclairage [164]. C'est le cas également à Marseille où l'installation d'un ensemble de luminaires connectés a été réalisée, pour voir seulement un an après l'arrêt de l'exploitation des données fournies par ces

systèmes. La collecte et la transmission de données dans le vide a cependant été maintenue, ce qui a un coût environnemental non négligeable et qui de ce fait, se présente comme une solution moins performante que des systèmes moins complexes et non connectés [23]. L'ajout de fonctionnalité ne correspond pas toujours à un bénéfice et comme le veut l'adage parfois « le mieux est l'ennemi du bien ».

5.2.4 Usure et risques de panne

Comme mise en avant dans le §0, les principaux axes de développement s'orientent autour de l'efficacité et de la durabilité des systèmes. Lorsqu'on s'intéresse à la durabilité, il est indispensable de considérer toutes les conditions d'usages des systèmes éclairages qui peuvent mener à sa détérioration voire à une panne fatale. La littérature a déjà identifié un ensemble de facteurs et de pratiques qui ont un impact sur la durabilité des systèmes LEDs.

Il y a bien sûr tous les aspects liés aux pannes dites « catastrophiques ». Ils sont particulièrement liés à la qualité de la fabrication et la fiabilité des produits. Il existe de nombreuses techniques pour la fabrication des puces LEDs [165] qui vont impacter la qualité du système notamment à travers la gestion plus ou moins efficace des flux de chaleur au sein même de la lampe. La qualité des composants et de leur assemblage dans la partie électronique de puissance de la lampe est également déterminante [166], [167]. De bonnes pratiques vont conduire à un produit fiable qui atteindra la durée de vie prévue par le constructeur, alors que de mauvaises pratiques peuvent engendrer une défaillance prématurée du système. La manière de connecter l'ensemble des puces LEDs est par exemple déterminante. Lorsqu'elles sont toutes montées en série, elles ne peuvent parfois pas continuer de fonctionner lorsque l'une d'entre elle est défaillante. Lorsqu'elles sont montées en parallèle deux à deux il est nécessaire de s'assurer que le circuit va pouvoir limiter l'augmentation de l'intensité parcourant une LED lorsque sa voisine est défaillante, ceci pour éviter la panne fatale du système.

Les autres types de pannes dites « paramétriques » sont liés entre autre à l'usure des lampes, à la dépréciation lumineuse ou à la dégradation du spectre lumineux. De nombreuses études se sont penchées sur cette dépréciation afin de pouvoir prédire la durée de vie estimée du système, associée à des mesures thermiques [168], [169]. La durée de vie d'une lampe est généralement définie comme le L70B50 pour une température de jonction donnée. Il s'agit d'une

projection afin de déterminer le temps nécessaire pour que 50% (B50) d'un grand nombre de lampes atteignent 70% (L70) de leur flux initial. On constate une grande variation des résultats de dépréciation lumineuse en fonction des produits et des conditions de test. Le flux lumineux peut parfois chuter rapidement dès le début de l'utilisation, comme il peut se maintenir, voire légèrement augmenter, avant d'entamer sa chute. Ceci a un impact sur la précision de la définition de la durée de vie du produit et est grandement dépendant de la qualité du produit ainsi que de ses conditions d'usages réels. Enfin cette dépréciation lumineuse a également un impact sur les opérations de maintenance qui doivent être planifiées avec des informations pertinentes [170], [171].

Le nombre de commutations que va subir la lampe au long de sa durée de vie a également un impact sur l'usure et le risque de défaillance. Le nombre maximal de commutations que peut subir une lampe est en général précisé dans les spécifications des produits. Lorsque le système d'éclairage est associé à une détection de présence, par exemple dans les couloirs des bâtiments tertiaires, un nombre de commutations trop élevé peut réduire considérablement la durée de vie prévue du système.

L'ensemble des conditions d'usages peuvent ainsi entraîner une température élevée de la jonction des LEDs, qui dégrade les composants entourant la puce et conduit à une défaillance « paramétrique ». Elles peuvent également entraîner une contrainte thermique au niveau des interconnexions, qui entraîne des ruptures de connexion et conduit à une défaillance « catastrophique ». Dans son rapport sur les tests de durée de vie des lampes LEDs [172], l'Agence Internationale de l'Energie considère l'ensemble des aspects précédemment cités pour proposer une méthode de définition de la durée de vie des systèmes. Elle met en avant que la qualité de l'installation électrique et la présence d'humidité sont également déterminantes pour que les lampes LEDs atteignent la durée de vie prévue. Elle montre par exemple que dans les cas les plus extrêmes, la durée de vie pourrait être limitée à 5000h (84% de pannes étant dues à la rupture des joints de soudure entre la LED et le PCB et 16% dues à une panne du driver), alors qu'elle peut atteindre les 25000h prévues dans une utilisation dans de bonnes conditions avec un produit de qualité. Alors que la durée de vie des produits ne semble pas être le paramètre le plus important en terme d'ACV pour les pays disposant d'un mix électrique fortement carboné, cet état de fait semble changer avec un mix électrique moins impactant, et la sobriété matérielle (réparation et réutilisation par exemple) pourrait prendre de

plus en plus d'importance dans la pertinence environnementale des systèmes LEDs (Cf. §6.1).

5.2.5 La fin de vie

La gestion de la fin de vie des lampes est également cruciale. Comme montré dans le §4.1.2, les technologies d'éclairage et particulièrement la technologie LED utilise un certain nombre de matériaux critiques dont la rareté, associée à l'impact non négligeable qu'ils génèrent pour leur extraction et leur transformation, devraient nous inciter à les gérer de la manière la plus soutenable possible [58]. Les terres rares et matériaux critiques sont presque exclusivement extraits et produits en Chine, qui a imposé des restrictions à l'exportation de ces métaux. Ces restrictions ont augmenté chaque année entre 2005 et 2010. Au cours de cette période, les quotas d'exportation ont été réduits de plus de 50 %, passant de 65 000 tonnes à 30 000 tonnes en moyenne [173]. En conséquence, leurs prix ont augmenté de 500 à 2 000 % [36]. De plus, certaines technologies d'éclairage comme les lampes fluocompactes et les tubes fluorescents contiennent toujours une petite quantité de mercure, substance extrêmement toxique lorsqu'elle se retrouve dans l'environnement même à petite dose [174].

En réponse à ces problématiques, l'Europe a mis en place des exigences de collectes des lampes usagées et des déchets électriques et électroniques (DEEE) (Directive 2012/19/EU). A l'échelle mondiale, les DEEE ont dépassé les 53 millions de tonnes en 2019 avec une augmentation de 9.2 tonnes en 5 ans [175]. Les lampes représentent environ 1 million de tonnes de déchets. L'Europe génère environ 12 millions de tonnes de DEEE par an [176] et le taux de collecte et recyclage de ce type de déchets au niveau mondial, de l'ordre de 17% en 2019, est encore largement insuffisant [37], [177], [178]. Si l'on ramène le poids des DEEE au nombre d'habitants c'est l'Europe qui est en tête avec près de 16kg par an et par habitant [175]. L'enjeu est tout d'abord économique, avec environ 57 milliards de dollars d'or, d'argent, de cuivre ou d'autres matériaux récupérables, qui ont été mis en décharge ou brûlés [175]. Cela montre l'opportunité économique évidente qu'apporterait une valorisation efficace des matériaux contenus dans ces déchets [179]. Cependant l'enjeu est également environnemental. Lorsqu'ils ne sont pas correctement collectés, la plupart de ces déchets terminent dans des décharges à ciel ouvert comme c'est notamment le cas dans la tristement célèbre décharge d'Agbogbloshie au Ghana [180], [181], mais également aux Nigéria, en Inde ou au Pakistan [38]. Selon la Banque mondiale, il est estimé que 80% des DEEE sont envoyés

illégalement comme « matériel d'occasion » dans des pays en développement, dont bon nombre en Afrique, avec des conséquences socio-environnementales désastreuses [180]. Les circuits électroniques y sont brûlés à l'air libre, des acides sont utilisés pour nettoyer les métaux récupérés, les métaux lourds comme le plomb, le cadmium, l'arsenic, mais aussi des polluants organiques, se déversent et polluent durablement les sols, rivières et les nappes phréatiques, sans compter l'atteinte à la santé des populations et des travailleurs, dont des enfants. L'exportation et la concentration des impacts de la fin de vie de ce type d'équipement dans les pays en développement ne sont pas suffisamment prises en compte dans les études ACV (car les données sont manquantes et les trafiquants ne se soucient guère de les fournir).

Les mesures de l'Union Européenne pour limiter l'impact de ces déchets ont donné naissance aux Eco-Organismes, qui ont la charge de la collecte, de la valorisation et du recyclage, et qui sont financés grâce à l'Eco-participation (Cf. §5.1.3). Au niveau mondial, ce n'est malheureusement que la partie restante des DEEE qui ne sont ni exportés ni incinérés qui finissent par être valorisés par ce type d'organisme. Il est toutefois impossible d'atteindre 100% de matériaux récupérés, il y a des pertes au cours des processus, des limites techniques (métaux trop mélangés, dispersés ou en quantité infimes dans des produits trop complexes) et économiques (par exemple lorsque la ressource primaire est moins chère que la matière recyclée). C'est ainsi que de nombreux métaux, dont les fameuses terres rares, sont recyclés à moins de 1% [182], tout comme le Lithium, le Gallium ou l'Indium. Malgré les bonnes intentions, ces Eco-organisme sont largement dépendants de la manière dont les différents produits collectés sont conçus. La conception des produits électroniques n'est pas pensée pour faciliter la séparation et la valorisation des composants qui les composent, ce qui complique grandement la tâche, mais également la rentabilité économique des moyens qui seraient nécessaires pour atteindre des niveaux de récupération élevés de ces matériaux [58]. Il en est de la responsabilité des producteurs de biens et de services. En effet, les producteurs ont un rôle de prescripteur sur le comportement et ils limitent souvent la liberté d'action des consommateurs. Non seulement ils produisent l'offre disponible, mais ils mobilisent également des moyens importants pour orienter les préférences des consommateurs. Il est donc nécessaire de déployer les instruments de politique publique de régulation non seulement auprès des producteurs pour les inciter à revoir la conception de leur produit, sans quoi les opérations de collectes et de recyclages ne pourront pas

atteindre leur plein potentiel [183]. Des innovations disruptives telles qu'une augmentation de la modularité des composants pourrait permettre de grandes avancées dans ce domaine comme c'est le cas pour le Fairphone [114]. Une plus grande modularité pourrait également permettre d'envisager la réparation des produits défectueux en remplaçant les composants qui posent soucis, tout en conservant la partie fonctionnelle, pour donner une seconde vie aux équipements électriques et électroniques. Cela pourrait permettre la naissance de nouveaux métiers (ou la conservation d'anciens), liés à la réparation, et de réseaux de distribution de pièces ou modules détachés. Enfin, cela pourrait permettre une uniformisation des techniques de recyclage dont pourrait profiter les Eco-organismes [184], et ainsi limiter les impacts de la fin de vie des équipements électroniques sur l'environnement et la société [185].

5.2.6 Effets sociaux et sociétaux

Certains des effets sociaux qui peuvent affecter le cycle de vie des systèmes d'éclairage ont déjà été évoqués dans les paragraphes précédents, mais voici un aperçu de différents phénomènes mis en évidence par les sciences sociales et plus particulièrement la sociologie des techniques. Il semble que l'éclairage soit soumis à la majeure partie de ces phénomènes, avec des impacts soit positifs, soit négatifs, mais dont il faut avoir conscience lors de l'établissement de stratégies relatives aux transitions technologiques et techniques. Comme le disait si bien Madeleine Akrich : *« loin de ne représenter que des appendices sur un dispositif politique préexistant, les objets techniques ont un contenu politique au sens où ils constituent des éléments actifs d'organisation des relations des hommes entre eux et avec leur environnement »* [186], et les systèmes d'éclairage en sont un bon exemple tellement ils touchent toutes les sphères de la société et de l'environnement.

5.2.6.1 Les effets rebonds

Les conséquences ou sous-produits de l'amélioration technologique sont un sujet bien étudié et ont montré que l'augmentation de l'efficacité énergétique entraîne généralement une augmentation de la consommation, connue sous le nom d'"effets de rebond" [187]. Il existe deux types d'effet rebond : lorsque le pourcentage d'énergie supplémentaire consommée est encore inférieur aux économies globales (effet de rebond) et lorsque l'énergie supplémentaire utilisée est supérieure aux économies réalisées (effet de retour) [188]. Le concept d'augmentation de la consommation d'énergie résultant d'une efficacité accrue existe depuis plus d'un siècle. Dès 1866, les chercheurs ont commencé à explorer ces deux effets en

référence à l'efficacité des machines à charbon après avoir constaté que l'augmentation de leur efficacité avait engendré une plus grande consommation [189].

Les effets rebonds peuvent se manifester de deux manières différentes à l'échelle nationale : directe et indirecte. Si on prend l'exemple de la transition LED, l'effet rebond direct serait une utilisation accrue de la lumière en raison de son coût de fonctionnement moins élevé, ce qui entraînerait une augmentation de la consommation d'énergie. L'effet de rebond indirect pourrait être que l'argent économisé au fil du temps grâce à l'éclairage LED a été dépensé pour un billet d'avion pour des vacances qui n'auraient pas été prises autrement, ou encore lorsque l'impact environnemental de l'ajout de nouvelle fonctionnalité (notamment celle des matériaux) ne soit pas compensé par les gains en consommation d'énergie. Enfin, l'effet rebond économique est la somme de l'effet rebond direct et indirect.

Une étude menée sur l'effet rebond affirme que, malgré de nombreuses campagnes visant à réduire la consommation d'énergie sur 25 ans (1981-2006) dans les pays du Nord, la consommation d'énergie (rapportée en MWh et lumen par miles éclairés) n'a cessé d'augmenter [190]. Pour lutter contre ce phénomène, l'auteur ne suggère pas d'arrêter l'innovation, mais plutôt de mettre en place une législation (par exemple, des taxes sur le carbone) afin de découpler l'innovation de la consommation d'énergie supplémentaire. C'est le cas également en Autriche, avec une augmentation de 29 % de la consommation d'énergie pendant sa période de transformation des technologies d'éclairage [164]. D'autres études ont mis en évidence ce phénomène [191]. Une perspective historique sur les effets rebonds de l'éclairage est proposée par Fouquet et Pearson [192]. Ils présentent des données sur le prix et la consommation des services d'éclairage au Royaume-Uni sur une période de sept siècles (entre 1300 et 2000). Sur cette période, la consommation liée à l'éclairage a augmenté beaucoup plus rapidement que le PIB par habitant, en raison notamment des réductions continues du prix et de l'énergie mais aussi de l'amélioration continue de l'efficacité des technologies. Dans ce cas, les améliorations de la technologie d'éclairage ont été sensiblement plus importantes que la réduction du prix de l'énergie (180 pour 1 sur la période 1800-2000). La consommation d'éclairage par habitant a augmenté d'un facteur de 6566 entre 1800 et 2000, en grande partie en raison de la baisse du coût des services d'éclairage par rapport aux revenus, mais aussi en raison de l'augmentation du PIB par habitant. Comme l'efficacité de l'éclairage a été améliorée d'un facteur 1000, les données

suggèrent que la consommation d'énergie par habitant pour l'éclairage a augmenté d'un facteur 6. Dans la mesure où la demande d'éclairage est proche de la saturation dans les pays de l'OCDE, des effets de rebond plus faibles sont envisageables lors des améliorations futures de l'efficacité de l'éclairage. Néanmoins, cette perspective historique donne lieu à des inquiétudes quant au potentiel des technologies telles que les CFL et les LEDs pour réduire la consommation d'énergie dans les pays en développement.

5.2.6.2 *La dépendance au sentier*

Les contraintes engendrées par nos choix matériels et techniques à l'échelle de la société limitent également nos champs d'action. Pour les individus, la « dépendance au sentier » est la façon dont des décisions prises par le passé conditionnent ce qu'il est possible de faire aujourd'hui et comment les technologies se développent de façon contrainte [193], [194]. Cette dépendance au sentier limite drastiquement la marge de manœuvre des individus à un moment donné. C'est le cas par exemple pour la technologie LED qui a dû adopter le format des ampoules incandescence pour des raisons évidentes de compatibilité des installations électriques mais également d'acceptation sociale. Sans cette contrainte, personne n'est capable de savoir à quoi l'éclairage LED aurait pu ressembler et il aurait potentiellement pu être moins contraint dans son développement. Ils auraient par exemple été possible aux industriels de standardiser des platines pour permettre de remplacer seulement les lampes (sans driver), et ainsi éviter le modèle « système entièrement jetable ». Ce concept permet par exemple de comprendre que les premiers arrivés sur un marché sont en mesure de poser des standards qui perdurent, même s'ils ne sont pas optimaux. La planification urbaine ou les démarches d'écologie industrielle territoriale permettent d'agir sur les éléments physiques structuraux en prenant en compte ce phénomène.

5.2.6.3 *L'amnésie écologique*

En 2012, l'ornithologue et ingénieur écologue, Philippe Jacques Dubois évoque ce syndrome de l'amnésie écologique [195], également appelée syndrome de la référence changeante (ou « shifting baseline syndrome ») [62]. Ce concept stipule que chaque génération considère comme le point de référence initial d'un écosystème celui qu'il a connu depuis sa naissance. C'est en quelque sorte l'acclimatation des êtres humains à la dégradation de leur environnement au fil des générations. Nous finissons donc par considérer comme normal un état de dégradation environnementale avancé. Elle nous rend non seulement indifférents à la dégradation de nos relations avec le vivant, et donc de notre qualité de vie, mais

elle étouffe également toute possibilité de changement. On prend souvent l'exemple des nuages d'insectes que l'on avait l'habitude de heurter en voiture, mais qui n'existent plus aujourd'hui, pour illustrer ce phénomène. Dans le cas de l'éclairage, il s'agit plutôt de notre cadre de référence de l'illumination des zones urbaines qui n'ont jamais été autant éclairées qu'aujourd'hui, mais avec des usages de moins en moins fonctionnels et de plus en plus commerciaux qui deviennent pourtant la norme et qui sont des sources de pollutions lumineuses supplémentaires. On peut également citer les standards d'éclairage sur les lieux de travail qui sont passés progressivement de 200lux vers 500lux et s'impose comme une nouvelle norme sans forcément être liée à une réelle amélioration de la qualité de l'ambiance lumineuse (SPD et IRC).

6 Etudes

Trois études ont été réalisées dans le cadre de ce travail. Tout d'abord, une Analyse de Cycle de Vie des systèmes d'éclairage d'intérieurs vise à améliorer l'ACV en considérant les usages réels des lampes afin d'en déduire des impacts plus représentatifs. Elle propose la définition d'une nouvelle unité fonctionnelle et elle permet de discuter les différents aspects liés à l'efficacité, la durabilité et les matériaux des systèmes d'éclairage en fonction de différents mix électriques. Ensuite l'optimal économique de durée de vie est défini pour le marché français grâce à la méthode du Coût du Cycle de Vie le plus bas en considérant différents scénarios d'utilisation et taux d'actualisation. Enfin une analyse multicritère de différents systèmes d'éclairage horticole permet d'évaluer les impacts environnementaux potentiels, la pollution lumineuse et l'intérêt économique des serres commerciales. Cette dernière démarche permet de se rapprocher de l'Analyse de Soutenabilité du Cycle de Vie en intégrant les nuisances d'usages et l'aspect économique à l'ACV classique. Les résultats de ces différentes études sont ensuite discutés et quelques perspectives sont présentées. Ces 3 études sont détaillées ci-dessous.

Etude 1 : ACV des systèmes lumineux pour différents mix électriques

Au cours des prochaines années, la transition vers les modes d'éclairage les plus performants se poursuivra avec des lampes toujours plus efficaces et durables et il est nécessaire d'établir des stratégies cohérentes pour gérer leur remplacement. Cette première étude compare l'influence de différents mix électriques sur les résultats des ACV pour les systèmes d'éclairage intérieur, afin de discuter des aspects liés à l'efficacité et la durabilité. Pour cela l'ACV de lampes CLF, LED et T5 ont été conduites avec les mix électriques français (nucléaire et énergie renouvelable), européen (hybride), australien (fossiles) et néozélandais (énergies renouvelables). Cette étude met en avant les particularités des mix électriques faiblement carbonés face aux récentes améliorations des lampes à LED (efficacité, durée de vie, et procédés de fabrication) et discute des conséquences sur les stratégies de remplacement des lampes. Cette technologie évolue rapidement, et les modèles les plus récents réduisent considérablement les impacts environnementaux potentiels quelle que soit la zone géographique. En particulier ce travail met en évidence une sensibilité accrue à la durée de vie pour les lampes utilisées en France et en Nouvelle-Zélande et une sensibilité accrue à l'efficacité pour les lampes utilisées en Australie et à l'échelle européenne. De manière

générale il est important de permettre aux fabricants et aux consommateurs d'identifier plus facilement les lampes LEDs les plus performantes dans ces différents contextes (fiabilité et/ou efficacité lumineuse).

Etude 2 : Définition de l'optimal économique de durée de vie

Afin de poursuivre l'évaluation des aspects liés à la durabilité des lampes, et de valider la sensibilité à la durée de vie en France mise en évidence par l'ACV, la seconde étude propose de définir l'optimal de durée de vie économique pour les lampes à LEDs. Dans un premier temps, un robot d'indexation a permis de récolter les données relatives aux lampes disponibles sur le marché français. Ensuite la méthode du CCV le plus bas (« Least Life Cycle Cost ») fournie par la directive Eco-design 2009/125/EC a permis d'identifier une durée de vie optimale économiquement d'environ 35000 h soit deux fois plus que la moyenne des lampes disponibles sur le marché. En appliquant différents taux d'actualisation, cette étude montre comment ce taux peut influencer la définition de la durée de vie optimale économique pour les lampes à LEDs. Finalement, ces résultats confirment qu'il est également plus viable économiquement d'orienter les produits vers une plus grande durabilité lorsque cela tend à réduire les impacts environnementaux mis en avant par les études ACV.

Etude 3 : Analyse multicritère des serres horticoles (ACV, pollution lumineuse, économique)

L'analyse de la pollution lumineuse a mis en avant comment certains usages de l'éclairage avaient tendance à augmenter les nuisances nocturnes, alors que d'autres avait tendance à les réduire. Les serres horticoles font partie de la première catégorie. Alors qu'elles se sont multipliées lors de la dernière décennie et qu'aucune ACV ou quantification de la pollution lumineuse relative aux systèmes d'éclairages dans ce type d'installation n'est disponible dans la littérature, la troisième partie des études proposent de combler ce manque. Après avoir défini le cas d'étude et les caractéristiques de l'installation des systèmes d'éclairages (HPS, MH et LED), elle se concentre tout d'abord sur l'ACV d'une serre commerciale. Une unité fonctionnelle relative à l'atteinte d'un PPFD uniforme de $300 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ sur la surface de la serre et une unité fonctionnelle relative à l'irradiance des lampes selon différentes plages de longueur d'onde sont comparées. Les résultats montrent des impacts potentiels inférieurs des luminaires LEDs pour atteindre le PPFD cible. En revanche, on constate de meilleures performances globales pour les lampes MH lorsqu'on s'intéresse à l'irradiance.

Dans un second temps la méthode OSP est utilisée pour évaluer la pollution lumineuse engendrée par les différents types de lampes et ceci à deux niveaux. Tout d'abord en déterminant le « Glow » et le « Tresspass » sur les parois de la serre, pour évaluer la quantité de lumière qui sort de l'installation sans être utilisée. Ensuite, cette méthode est reproduite à l'extérieur de la serre dans les limites de la propriété. Elle permet de mesurer la distance de la serre à laquelle on atteint un seuil d'éclairement de 5 lux sur différents plans. Les résultats montrent que les luminaires LED génèrent des nuisances lumineuses en dehors des limites de la propriété ce qui n'est pas le cas des lampes HPS et MH. Les différentes solutions d'ombrages partiels testées ne semblent pas réduire significativement les nuisances extérieures au-delà d'une distance de 3m de la structure.

Dans un troisième temps, une étude de retour sur investissement pour une culture de tomate est réalisée. Elle prend en compte les coûts d'installation, d'exploitation et de main œuvre. Elle montre des retours sur investissement plus élevés pour les luminaires LED et HPS et une rentabilité économique plus limitée pour les lampes MH.

Enfin une analyse multicritère basée sur le processus d'analyse hiérarchique (AHP) a permis de déterminer quel système d'éclairage est le plus pertinent en fonction de tous les paramètres et résultats précédents. Les résultats indiquent que les lampes HPS et LED sont les plus performantes selon le point de vue de trois observateurs « environnement », « nuisances lumineuses » et « économie ».

6.1 ACV des systèmes d'éclairage en fonction de différents mix électriques

6.1.1 Introduction

Plusieurs ACV comparatives ainsi que des études de cas ont été publiées au cours de la dernière décennie à propos des systèmes d'éclairage. Manuela Franz et Franz P. Wenzl [196] présentent une revue de 12 ACV publiées. Ces études ont comparé les impacts environnementaux des lampes à LEDs avec les autres systèmes d'éclairage, notamment en évaluant les avantages et les inconvénients de l'ajout de composants électroniques (phase de fabrication) pour améliorer leur efficacité et leur durée de vie (phase d'utilisation). Ils soulignent que les différentes méthodes, sources de données, hypothèses ou simplifications conduisent à des résultats et des interprétations différentes. Par conséquent, il est presque impossible de faire une déclaration générale sur la performance environnementale des LEDs sans définir un cas d'utilisation précis : " *Il est recommandé [...] de réaliser des ACV comparatives des mêmes technologies de lampes. Ces études doivent prendre en compte les produits sans nom et les produits haut de gamme, ainsi que différents scénarios d'application*" [196] (pays d'utilisation, type d'utilisation, disponibilité du produit sur le marché, normes d'éclairage du pays et scénarios d'application).

La plupart de ces études ont été menées en considérant un pays d'utilisation où l'électricité est principalement produite grâce à des combustibles fossiles (par exemple, le Royaume-Uni [197], les États-Unis [198], l'Inde [199] et l'Italie [200]). Ils concluent que la phase d'utilisation est la phase la plus impactante tout au long du cycle de vie complet des lampes LEDs. L'Agence Internationale de l'Energie (2014) indique qu'en moyenne, 85% de l'impact environnemental est dû à la phase d'utilisation, tandis que les 15% restants se partagent principalement entre la fabrication et le traitement en fin de vie [201]. Néanmoins, la France présente la singularité d'utiliser l'énergie nucléaire pour produire de l'électricité faiblement carbonée et cette situation spécifique n'a pas encore été étudiée. Wang et al. [202] comparent l'ACV de la production d'énergie nucléaire, éolienne et hydroélectrique, et montrent que les centrales hydroélectriques et nucléaires sont les deux moyens de production d'électricité les moins impactants, suivis par l'énergie éolienne. Ces trois filières de production d'énergie représentent 88% du mix électrique français, auxquelles s'ajoute 2.5% pour le solaire, 1.9% pour les bioénergies et 7.5% pour le thermique fossile [203]. Par conséquent, l'utilisation du mix français devrait réduire

significativement les impacts potentiels de la phase d'utilisation comparée aux mix utilisés lors des précédentes études d'ACV. Tähkämö et al. [204] confirment cette intuition en comparant les mix électriques européens et français. Ils mettent en évidence qu'en passant du mix électrique européen au mix français, la part de la phase d'utilisation diminue de 93 % à 76 % des impacts potentiels pour un luminaire downlight à LED (efficacité de 62 lm/W et durée de vie de 25 000 h). Une étude plus récente met en évidence la réduction significative des impacts environnementaux des lampes à LED au fur et à mesure que leur performance augmente, comparé aux ACV réalisées en 2012 [205]. Les données de cette étude ont été ensuite reprises pour évaluer des stratégies de remplacement de lampes avant qu'elles atteignent leur fin de vie [206]. Elle met en évidence différents compromis entre l'augmentation de la durabilité et de l'efficacité et ceci en fonction de différents mix électriques. Ce travail confirme l'importance de l'efficacité pour les mix fortement carbonés. Il constate même une légère réduction des impacts environnementaux lorsqu'on remplace des lampes à LED par des modèles plus efficaces et ceci même avant la fin de vie prévue de la lampe. Il montre toutefois un transfert d'impact entre les impacts de la consommation d'énergie vers la raréfaction des métaux et la toxicité associés à leur extraction et transformation, ce qui peut poser des soucis dans un contexte de tension autour de la disponibilité et l'approvisionnement de ces matériaux. En revanche, ce constat s'étiole avec des mix faiblement carbonés et une durabilité accrue des lampes à LEDs semble plus bénéfique en termes d'impacts environnementaux, en limitant également les transferts d'impacts.

6.1.2 Objectifs et cadre de l'étude

L'objectif de cette étude est de comparer les impacts environnementaux potentiels de différentes technologies LED (en termes de durée de vie, d'efficacité et de processus de fabrication) avec les sources lumineuses les plus courantes (CFL et T5) pour le remplacement des lampes dans les lieux de travail intérieurs et ceci en utilisant différents mix électriques (France, Union Européenne, Australie et Nouvelle-Zélande).

Tout d'abord, les lampes à incandescence ne sont pas considérées car elles ont été définitivement interdites dans l'Union européenne en 2012. De plus, il a déjà été établi dans de nombreuses études que l'impact environnemental des lampes à incandescence est trop élevé pour considérer cette technologie comme viable pour l'éclairage [207]. D'autre part, depuis les années 2000, les lampes T5 remplacent progressivement les anciens modèles tels que les T8 et T12. En 2017, les lampes

fluorescentes compactes et les lampes fluorescentes tubulaires représentaient environ 80% des systèmes d'éclairage installés dans les lieux de travail intérieurs français [208]. Dans le même temps, grâce aux améliorations continues de l'efficacité et de la durée de vie, le marché des LEDs connaît une croissance rapide depuis une décennie. Le cabinet McKinsey a prévu un taux de pénétration de 67% à 80% pour l'éclairage LED en 2022 (pourcentage du chiffre d'affaires total de l'éclairage) [209]. Par conséquent, cette étude se concentre sur la comparaison de ces trois types de lampes (CFL, T5 et LED) afin d'évaluer les impacts environnementaux potentiels des systèmes d'éclairage pour les lieux de travail intérieurs.

Le public visé comprend les concepteurs d'éclairage, les décideurs politiques et, plus largement, les chercheurs et les experts techniques qui envisagent la technologie LED dans l'éclairage général.

6.1.3 Méthode d'analyse des impacts potentiels

Pour réaliser ces ACV, Simapro 9.0 a été utilisé pour définir tous les inventaires, paramètres et scénarios, et Ecoinvent a été utilisé en tant que base de données pour les calculs des impacts d'inventaires du cycle de vie. Cette étude est réalisée en utilisant des données réelles comme source de premier plan et la base de données Ecoinvent comme source de second plan. La méthode d'évaluation d'impact choisie est Recipe 2016 avec la perspective hiérarchisée (H). Il s'agit de la perspective que l'on retrouve le plus souvent dans les modèles scientifiques, et celle qui fait généralement consensus [210]. Elle permet de dériver des facteurs de caractérisation à la fois orientés « problèmes » (« midpoints ») et orientés « dommages » (« endpoints »). La Figure 18 montre les catégories d'impacts orientées « problème » et les voies d'endommagement jusqu'au niveau « dommage ». Les catégories d'impact sont regroupées en trois groupes de dommages finaux : la santé humaine, les écosystèmes et la disponibilité des ressources.

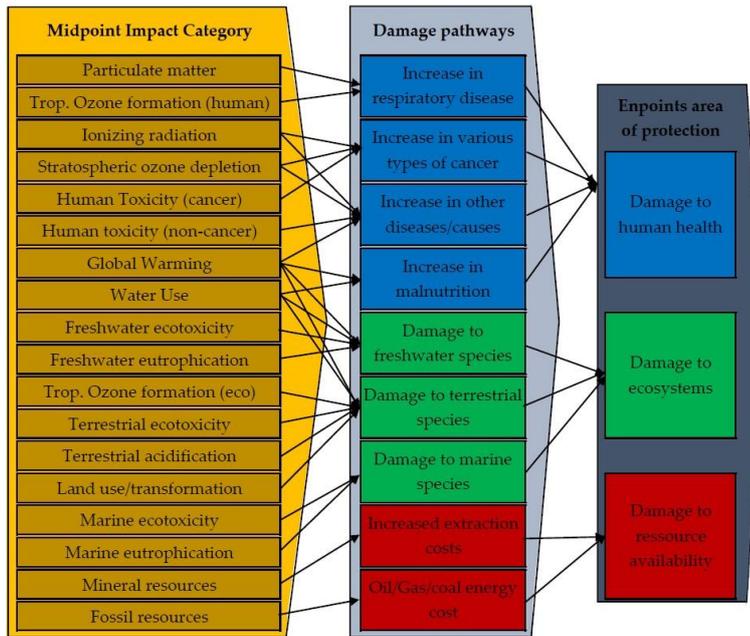


Figure 18. Représentation des relations entre les catégories d'impacts orientées « problèmes » et orientées « dommages » dans Recipe 2016 (Adapté du manuel des bases de données [210]).

6.1.4 Frontière de l'étude

Ce travail se base en grande partie sur les données d'inventaires réalisés par le Département de l'Energie américain (DOE) et Navigant UK [197], [198]. La même méthodologie a été utilisée pour étudier le cas français tout en se conformant à ces travaux antérieurs. L'analyse idéale du cycle de vie prend en compte les cinq phases suivantes : matière première, fabrication, transport, utilisation, et fin de vie. Pour simplifier le modèle, les phases de matière première et de fabrication ont été fusionnées en une seule et unique phase. Les frontières du système sont représentées dans la Figure 19.

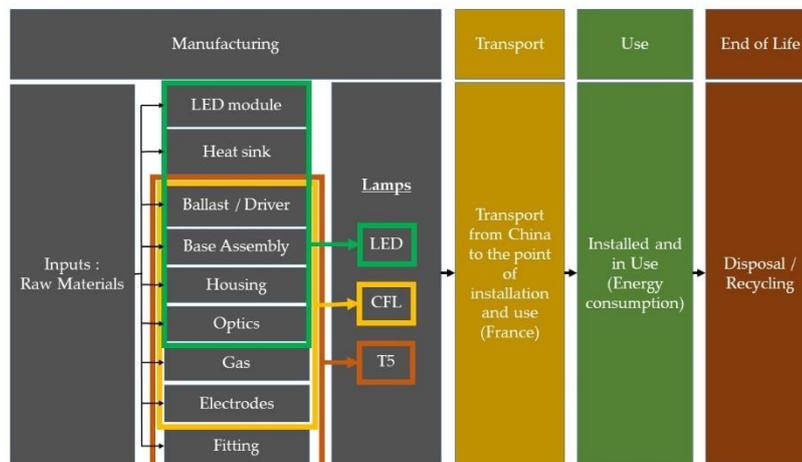


Figure 19. Frontières des systèmes (Adaptée à partir des travaux de Navigant UK [197] et du Département de l'Energie (DOE) US [198]).

6.1.5 Caractéristiques des lampes étudiées

Cinq modèles de lampes LEDs ont été étudiés afin de refléter l'évolution de cette technologie au fil des ans et de comparer leurs performances environnementales respectives avec les systèmes qu'ils visent à remplacer. Les paramètres des lampes ont été ajustés pour s'assurer que les lampes fourniront un rendement lumineux maintenu similaire pendant leur durée de vie respective, permettant ainsi de les inter-changer tout en gardant le même niveau d'éclairage dans la pièce. On s'assure ainsi qu'elles délivrent le même service et donc qu'elles sont comparables. Plusieurs lampes LEDs avec des durées de vie, des efficacités et des procédés de fabrication différents ont été considérées pour évaluer les impacts de ces paramètres sur la performance des LEDs. La LED O représente les lampes disponibles sur le marché en 2012. Les LEDs N1 et N2 représentent des lampes actuellement disponibles et qui sont de meilleure qualité que la LED O. Les lampes N3 et N4 représentent les lampes à très haute efficacité qui arriveront sur le marché dans les années à venir. Les caractéristiques de toutes les lampes étudiées sont présentées dans le Tableau 2.

Tableau 2. *Caractéristiques des lampes étudiées.*

Lampes	Puissance [W]	Flux lumineux [lm]	Efficacité [lm/W]	Durée de vie de la lampe [kilo heures]	Durée de vie du luminaire [kilo heures]
LED O	11	1045	95	15	N/A
LED N1	8	1072	134	15	N/A
LED N2	8	1072	134	25	N/A
LED N3	5.3	1060	200	15	N/A
LED N4	5.3	1060	200	25	N/A
T5	13	1001	77	24	48*
CFL	18	1224	68	10	N/A

* La durée de vie du luminaire T5 est de 48 000 h et il peut contenir un tube fluorescent.

6.1.6 Définition du flux lumineux maintenu (M-lmO)

L'un des paramètres clés qui guide les études ACV est l'unité fonctionnelle. Elle est définie comme la "performance quantifiée d'un système de produit pour être utilisée comme unité de référence" [63]. Diverses unités fonctionnelles ont été utilisées dans des études antérieures : méga lumen heure [197]–[199], [211]–[213], heure de lumière [211], [214] et lux heure [200]. Selon l'Agence internationale de l'énergie, l'unité fonctionnelle la plus cohérente applicable aux systèmes d'éclairage est le Mégalumen.heure (Mlm.h) [201]. Elle consiste à égaliser le flux lumineux pendant une période de temps définie avant de comparer les impacts environnementaux potentiels des lampes. Cependant, les études ACV sont généralement menées en considérant ce qu'un système d'éclairage parfait peut potentiellement réaliser (en utilisant les spécifications du fabricant), plutôt que la manière dont il est réellement utilisé. En utilisant le Mlm.h comme unité fonctionnelle, certains paramètres associés à la phase d'utilisation ne sont effectivement pas pris en compte :

- L'estimation de la durée de vie des LEDs peut varier d'un modèle à l'autre. De plus, la durée de vie telle que précisée par les fabricants ne spécifie pas la durée de vie réelle avant que la lampe ne cesse d'émettre de la lumière, mais plutôt le temps nécessaire pour atteindre un ratio spécifique de son rendement lumineux initial (c'est-à-dire 70 % pour une lampe LED L70) [170], [215], [216].
- Le flux lumineux initial est considéré comme constant pendant toute la durée de vie du produit. Seules quelques ACV [213], [197], [217] reconnaissent la dépréciation du flux lumineux, mais aucune ne fournit une méthode ou des résultats clairs à ce sujet.
- Ni le risque de défaillance, ni l'accumulation de saleté sur la lampe et le luminaire ne sont pris en compte lors de la définition de l'unité fonctionnelle.

Cela peut entraîner une confusion quant aux performances réelles de chaque système d'éclairage. Comme l'ont montré les chapitres précédents, l'usage qui est fait des lampes a une influence sur leurs performances et parfois les objectifs de réduction de consommation d'énergie [164] ou des impacts environnementaux ne sont pas atteints [22].

Dans le cas de l'éclairage des lieux de travail intérieurs, les normes françaises expliquent qu'il faut maintenir un éclairage minimal dans les espaces de travail, qui varie selon l'activité (par exemple, 500 lux pour le traitement des données ou

700 lx pour le dessin industriel) [18], [218]. Afin de respecter ces normes, le flux lumineux maintenu a été déterminé pour chaque lampe. Il définit la fonction et reflète l'utilisation de chaque lampe. Pour définir ce flux, il est nécessaire de prendre en compte différents aspects liés aux usages des lampes mais également les dégradations inhérentes à ces usages.

Tout d'abord, on utilise le coefficient de dépréciation de la saleté de la pièce (RDD) et de dépréciation de la saleté du luminaire (LDD) pour représenter la saleté et la poussière qui seront attirées et piégées dans la pièce et dans les luminaires. Pour définir la dépréciation de l'encrassement des pièces et des luminaires, on suppose qu'un entretien triennal est effectué. Sur cette période, la valeur $RDD \times LDD$ ne descendra pas en dessous de 0,96 [219]. La valeur médiane choisie est de 0,98. Ensuite le « LSF » décrit la défaillance des sources lumineuses pendant la durée d'utilisation, tandis que le « LImD » décrit la diminution du flux lumineux des lampes. Le LSF et le LImD ont été collectés à partir des spécifications de lampes similaires disponibles sur le marché français dans les catalogues d'éclairage Philips. Le facteur de perte de lumière (LLF) est défini dans l'équation 10, en multipliant la dépréciation de la saleté de la pièce (RDD), la dépréciation de la saleté du luminaire (LDD), le facteur de survie de la lampe (LSF), et la dépréciation du flux lumineux de la lampe (LImD). Le flux lumineux maintenu (M-lmO) est ensuite défini dans l'équation 11 et représenté dans la Figure 20 (ligne bleue):

$$LLF = RDD \cdot LDD \cdot LSF \cdot LImD \quad (\text{Équation 10})$$

$$M-lmO = \text{Flux Lumineux Initial} \cdot LLF \quad (\text{Équation 11})$$

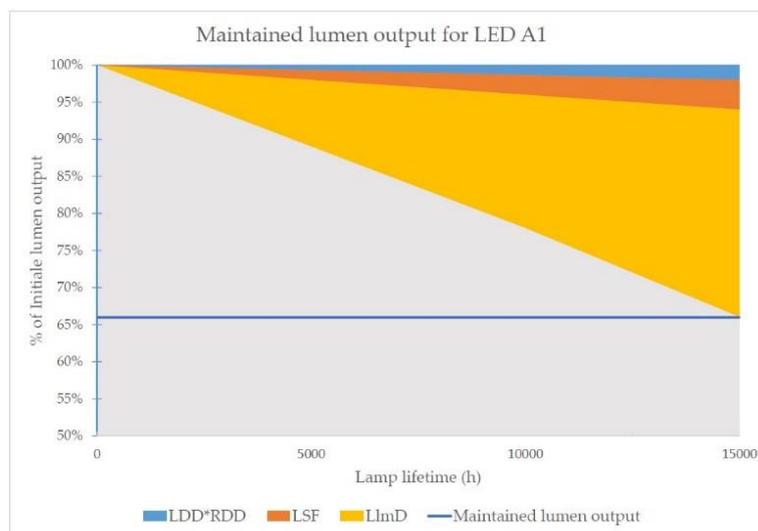


Figure 20. Exemple de flux lumineux maintenu pour une lampe LED

6.1.7 Unité fonctionnelle et flux de référence

Le facteur de perte de lumière (LLF) et le flux lumineux maintenu (M-ImO) pour chaque lampe sont présentés dans le Tableau 3.

Tableau 3. Paramètres de l'étude - coefficient de dépréciation de la saleté de la pièce (RDD), coefficient de dépréciation de la saleté du luminaire (LDD), coefficient de défaillance des sources lumineuses (LSF), coefficient de dépréciation lumineuse (LImD), facteur de perte de lumière de la lampe (LLF), flux lumineux maintenu (M-ImO), flux de référence (RF) Mégalumen.heure maintenus (M-Mlmh)

Lampes	RDD x LDD	LSF	LImD	LLF	M- ImO [lm]	M- Mlm.h	RF	Consommation Globale [kWh]
LED O	0,98	0,96	0,70	0,66	688	10,33	1,71	282,11
LED N1	0,98	0,96	0,70	0,66	706	10,59	1,67	200,0
LED N2	0,98	0,96	0,70	0,66	706	17,65	1	200,0
LED N3	0,98	0,96	0,70	0,66	698	10,47	1,69	134,0
LED N4	0,98	0,96	0,70	0,66	698	17,45	1,01	134,0
T5	0,98	0,84	0,89	0,73	733	17,60	1	312,86
CFL	0,98	0,84	0,65	0,54	655	6,55	2,69	485,07

L'unité fonctionnelle choisie est de 17,65 Mégalumen.heures maintenus (M-Mlmh). Elle correspond à la quantité de lumière émise pendant 25000h (environ 8 ans avec 8 h de lumière par jour) par les lampes LEDs N2. La lampe N2 est choisie comme référence car c'est la lampe qui a le plus de M-Mlmh. Le choix de la lampe de référence est arbitraire et ne modifie pas les résultats de l'ACV. Le flux de référence (RF) est calculé après s'être assuré que le flux lumineux maintenu est similaire pour chaque lampe (proche de 700 lm). Le flux de référence est défini comme "la mesure des sorties des processus d'un système de produits donné nécessaires pour remplir la fonction exprimée par l'unité fonctionnelle" [63]. Dans cette étude, il représente le nombre de lampes nécessaires pour atteindre 17.65 M-Mlmh sur environ 8 ans de vie du bâtiment.

6.1.8 Inventaire du Cycle de Vie

6.1.8.1 *Matières premières et fabrication.*

Cette première étape du cycle de vie tient compte des émissions associées à l'extraction, la transformation et le transport des diverses matières premières et produits intermédiaires qui entrent dans la fabrication du produit final. La phase de fabrication tient également compte des énergies utilisées et des émissions associées à la fabrication de la lampe. Tous les principaux éléments constitutifs des lampes sont mis en évidence dans la Figure 19.

Cette étude ACV se concentrera sur l'archétype suivant d'un système de lampe à LED défini par le DOE [198] :

- Substrat de saphir de trois pouces de diamètre.
- Nitrure d'indium et de gallium déposé sur le substrat de saphir.
- LEDs à haute luminosité (plus de 0,5 watt/module)
- LEDs bleues profond (qui pompent un phosphore à distance)

Les données d'inventaires pour le module LED de la LED O datent de 2012. Malgré l'absence de données précises de l'industrie ou de la littérature, le nombre de modules LEDs produit par tranche a été augmenté d'environ 33% pour les LEDs N1 à N4 par rapport à la LED O, afin de refléter les améliorations effectuées dans ce domaine. Cependant, les impacts potentiels de la fabrication des modules LEDs se révélant relativement faibles, ce paramètre n'a au final que très peu d'influence sur le résultat de l'étude, au contraire des autres composants (driver et dissipateur thermique notamment). Le nombre de modules LEDs incluses dans chaque lampe est déterminé en fonction de la puissance de chacune d'entre elles avec un ratio de 1 module/W. De plus, pour les lampes N1 à N4, les données d'inventaire des autres éléments de la lampe ont été mises à jour à partir des données de Dillon & al. [205]. Ils correspondent aux lampes disponibles sur le marché en 2018 (réduction de l'utilisation des terres rares et de la taille du dissipateur thermique notamment). Enfin les données d'inventaire pour les lampes CFLs ainsi que le tube T5 et son luminaire sont issues de Navigant UK [197] et sont toujours pertinentes aujourd'hui, ces technologies n'ayant que très peu évolué.

Les données d'inventaire pour chaque lampe sont disponibles en Annexe 1.

6.1.8.2 *Transport*

La phase de transport couvre la distribution du produit depuis son point de production jusqu'à son point d'installation et d'utilisation. Les hypothèses suivantes

ont été faites pour le transport et la distribution tout au long du cycle de vie des produits :

- toutes les lampes sont produites en Chine
- la distance entre la Chine et l'Europe est de 14 838 km par la mer et de 4000 km supplémentaires par la route.
- la distance entre la Chine et la France est de 14 838 km par la mer et de 2000 km supplémentaires par la route.
- la distance entre la Chine et Sydney est de 9658 km en mer et de 1000km par la route.
- la distance entre la Chine et la Nouvelle-Zélande est de 10000km par la mer et de 1000km par la route.

Les distances en mer ont été calculées avec <https://sea-distances.org/>.

6.1.8.3 Utilisation

Le scénario de la phase d'utilisation est celui des lieux de travail intérieurs tel que défini par la norme EN 12464-1 [18]. Cette norme européenne prescrit les exigences d'éclairage des lieux de travail intérieurs qui doivent répondre aux besoins de confort et de performance visuelle. Toutes les tâches visuelles courantes sont prises en compte, y compris le travail sur écran. Le tableau ci-dessous récapitule les caractéristiques des mix électriques en France, en Europe, en Australie et en Nouvelle Zélande.

Tableau 4. Mix électriques de la France, l'Europe, l'Australie et la Nouvelle-Zélande exprimé en % moyen de la production totale d'électricité.

Type d'énergie	France (2020)	Europe (2020)	Australie (2017)	Nouvelle-Zélande (2019)
Fossiles	7,5	32,9	87,3	17,51
Charbon noir			45,8	
Charbon brun	0,3	13,2	16,9	4,9
Gaz	6,9	19,7	19,6	12,6
Pétrole	0	0	2,0	0,01
Fioul	0,3	0	0	0
Energies Renouvelables	25,3	38,1	15,7	82,3
Hydro	13	12,7	6,3	58,5
Eolien	7,9	14,4	4,9	5,2
Bio Energie	1,9	5,6	1,4	1,4
Photovoltaïque	2,5	5,2	3,1	0,3
Géothermie	0	0,2	0	17,2
Nucléaires	67,1	24,8	0	0
Autres	0	4,2	0	0

La diversité des mix électriques est grande et ils peuvent eux-mêmes varier considérablement d'une période à l'autre notamment au niveau européen. Toutefois on distingue 4 profils différents : le profil nucléaire (France), le profil fossiles (Australie), le profil énergie renouvelable (Nouvelle-Zélande) et le profil mixte (Europe).

6.1.8.4 *Fin de Vie*

En ce qui concerne la récupération et le recyclage des matériaux, il y a un manque d'informations dans le domaine public notamment sur les matériaux des LEDs qui sont réellement réutilisés ou recyclés. Si ces matériaux étaient récupérés, traités et ensuite réutilisés, cela réduirait l'impact potentiel de la phase de fabrication. Cependant, dans cette version de l'étude, nous supposons que seuls des matériaux neufs sont utilisés à toutes les étapes du processus d'ACV, fournissant ainsi une estimation prudente des impacts. En d'autres termes, si une partie des matériaux utilisés pour la fabrication est issue du recyclage, les impacts environnementaux seront inférieurs à ceux rapportés dans cette étude.

Les matériaux pris en compte pour le recyclage et/ou le traitement des lampes sont le verre, le plastique, les déchets d'équipements électroniques et le mercure pour les T5 et CFL. Tous les autres matériaux sont considérés comme mis en décharge ou brûlés. Les matériaux pris en compte pour le recyclage des emballages sont les papiers, les cartons et les films plastiques.

Pour les scénarios français et européen il est estimé que 40% des emballages sont mis en décharge et 60% sont recyclés. Pour la lampe LED O le taux de recyclage est de 20 % et le taux de mise en décharge de 80 % [37], alors que pour les LEDs N il est de 30 %, pour 70 % de mise en décharge. Pour les T5 et les CFL, on considère que 50% des lampes sont recyclés et 50% terminent en décharge ou brûlées, cependant on considère que 90% d'entre elles sont collectées et traitées avant la mise en décharge.

Pour l'Australie et la Nouvelle-Zélande, le ratio de mise en décharge/recyclage des emballages provient du National Waste Report 2018, élaboré par le gouvernement australien et néo-zélandais [220]. Il est estimé que 60% des emballages sont recyclés et 40% terminent en décharge. Seulement 40% des lampes CFL et T5 sont correctement collectées et traitées et 60% terminent en décharge. Il est enfin estimé que 95 % des lampes LEDs sont mises en décharge, car les programmes de collecte et de recyclage ne ciblent actuellement pas ces produits.

6.1.9 Résultats

Pour chaque pays ou région les résultats sont d'abord présentés au niveau « problèmes » (midpoint) pour l'ensemble des catégories d'impacts disponibles grâce à Recipe 2016. Ils sont présentés sous forme de radar et ils sont normalisés pour chaque catégorie par rapport à la lampe la moins performante dans la dite catégorie. Ceci permet de visualiser les lampes les moins performantes vers l'extérieur du cercle et les lampes les plus performantes vers l'intérieur. La caractérisation des impacts par lampes et par phase du cycle de vie est mise à disposition en Annexe 2 pour chaque lampe. Dans un second temps les résultats sont présentés au niveau « dommages » (endpoint). Ils sont exprimés en Point (Pt). Un point (Pt) représente la charge environnementale annuelle (c'est-à-dire l'ensemble des activités de production/consommation dans l'économie) aux États-Unis, divisée par la part d'un Américain. Il est important de comprendre qu'un point ne représente pas l'impact environnemental propre à un individu. Il représente la part annuelle de l'individu, qu'il ait participé directement ou indirectement aux impacts environnementaux de l'économie. La répartition des impacts potentiels par phase du cycle de vie est ensuite mise en évidence afin d'évaluer la part d'impacts potentiels générés par la phase d'utilisation de chaque lampe. Pour finir, une analyse d'incertitudes réalisée grâce à la méthode Monte-Carlo (10000 simulations par lampe), afin d'évaluer la précision des résultats présentés auparavant. Cette analyse prend en compte toutes les incertitudes liées aux données d'impacts fournies par Ecoinvent ainsi que celle générées par les opérations de normalisations, de pondérations et d'agrégations nécessaires pour passer du niveau « problèmes » au niveau « dommages ». Les premiers résultats présentés concernent la France, puis l'Union Européenne, l'Australie et enfin la Nouvelle-Zélande.

6.1.9.1 France

6.1.9.1.1 Midpoint

La caractérisation des impacts potentiels orientés « problèmes » pour la France sont présentés dans la Figure 21. Ils sont exprimés en pourcentage des impacts potentiels normalisés pour chaque catégorie.

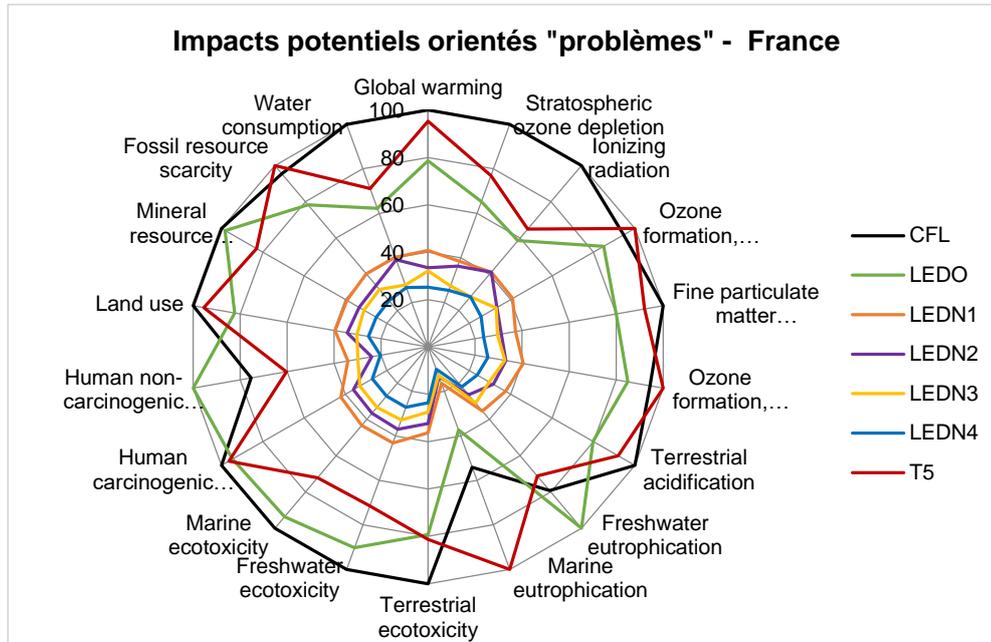


Figure 21. Caractérisation des impacts potentiels orientés "problèmes" pour la France.

On constate assez rapidement que la lampe CFL est celle qui génère les impacts potentiels les plus importants pour 12 des catégories d'impacts parmi les 18 disponibles. Le tube T5 domine les catégories d'impacts qui concernent la formation d'ozone (impacts sur la santé humaine et les écosystèmes), l'eutrophisation marine, et la disponibilité des ressources fossiles. La LED O domine les deux catégories restantes : l'eutrophisation des eaux douces et la toxicité humaine non cancérigène. On peut ainsi estimer que globalement la lampe CFL est la moins performante suivie du tube T5 et de la LED O juste derrière. Il n'est pas surprenant de voir la lampe CFL comme la moins performante parmi toutes les lampes testées, cette technologie étant en perte de vitesse sur le territoire français. De plus, tout comme les tubes T5, elles contiennent une petite quantité de mercure, ce qui est reconnu pour avoir un impact environnemental considérable. Il est en revanche plus surprenant de voir que la lampe LED O ne présente pas de meilleurs résultats. Il s'agit des premières lampes LEDs disponibles sur le marché, elles ont remplacé les lampes CFL progressivement, notamment grâce à une efficacité environ 30% supérieure, mais la réduction des impacts potentiels a été en réalité marginale en France.

En ce qui concerne les autres lampes testées, il est plus difficile de les départager. La LED N1 semble légèrement moins performante, alors que le LED N4 semble être celle qui génère le moins d'impacts potentiels parmi toutes les catégories. Les LEDs N2 et N3 sont en revanche assez proches.

6.1.9.1.2 Endpoint

Les résultats de l'analyse d'impacts orientés "dommages" sont présentés dans la Figure 22. Ils sont exprimés en Points. Un point (Pt) représente la charge environnementale annuelle (c'est-à-dire l'ensemble des activités de production/consommation dans l'économie) aux États-Unis, divisée par la part d'un Américain. Il est important de comprendre qu'un point ne représente pas l'impact environnemental propre à un individu. Il représente la part annuelle de l'individu, qu'il ait participé directement ou indirectement aux impacts environnementaux de l'économie. Cela permet de présenter les impacts potentiels sous la forme d'un score unique qui prend en compte la criticité des différentes catégories d'impacts orientés « problèmes », mais cela introduit également un certain nombre d'incertitudes.

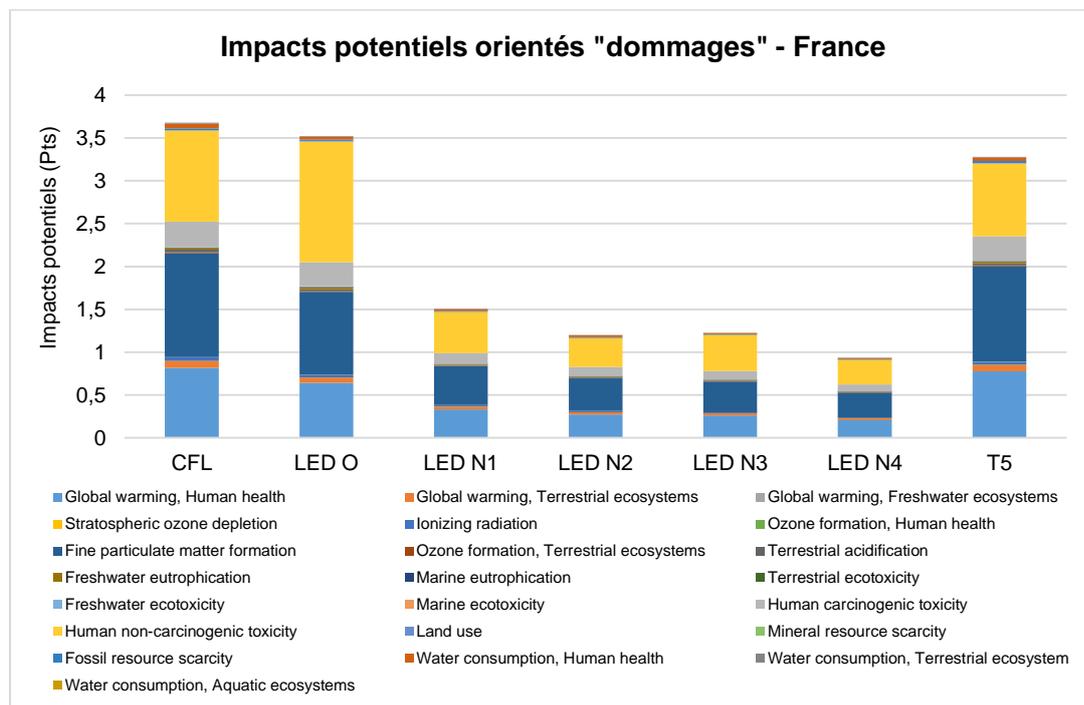


Figure 22. Impacts potentiels orientés "dommages" en France.

Tout comme lors de la caractérisation orientée « problèmes », la lampe CFL est celle qui génère le plus d'impacts potentiels. En revanche elle est suivie, non pas par le tube T5, mais par la lampe LED O. A ce niveau, les résultats sont très proches, ce qui semble confirmer les gains marginaux entrevus au niveau précédent. Malgré une consommation d'énergie sur le cycle de vie largement inférieure (282 contre

485 kWh pour la CFL), les impacts potentiels restent globalement identiques. En revanche, on constate une très nette amélioration pour les lampes LEDs N1 à 4. Non seulement elles disposent d'une plus grande efficacité et durée de vie mais leur processus de fabrication a également été grandement amélioré (Cf. Figure 23). A la vue de ces premiers résultats il semble indispensable que les consommateurs soient orientés vers des lampes LED type N1 à N4 sans quoi les gains se limiteraient à une consommation d'énergie et donc une facture réduite, sans toutefois réduire concrètement les impacts environnementaux de leur système d'éclairage comparé aux lampes CFL. Cela confirme également que les tubes T5 sont surpassés par la technologie LED et qu'il est important de poursuivre leur remplacement.

D'autre part, lorsqu'on s'intéresse aux résultats pour les lampes N1 à N4, on remarque que les impacts potentiels de la LED N3 (meilleure efficacité) sont légèrement supérieurs à ceux de la LED N2 (plus grande durée de vie). Il semble donc, hors considération sur la facture d'électricité, que par rapport à la LED N1, il est au moins autant, si ce n'est plus, bénéfique d'augmenter la durée de vie (de 15000h à 25000h) plutôt que d'augmenter l'efficacité de la lampe (de 134 à 200lm/W). Ce constat semble lié à l'électricité française faiblement carbonée, qui lorsqu'on l'économise, réduit les impacts potentiels de manière moins importante que lorsque l'électricité est fortement carbonée. Il est cependant important de rappeler que l'ACV attributionnelle ne prend pas en compte les conséquences qu'aurait une consommation d'électricité réduite sur l'organisation du réseau que ce soit en termes de moyens de production ou de distribution, et qu'elles seraient bien trop compliquées à modéliser à l'échelle d'un pays avec une ACV conséquentielle. Ce constat semble toutefois réhabiliter un certain impératif de durabilité pour les systèmes d'éclairage en France afin de s'assurer d'une réduction efficace de leurs impacts potentiels sur l'environnement.

La Figure 23 ainsi que le Tableau 5 présente la répartition des impacts orientés « dommages » en fonction des phases de cycle de vie. La phase de fabrication est décomposée en fonction des éléments de différentes lampes pour indiquer ceux qui contribuent le plus aux impacts potentiels.

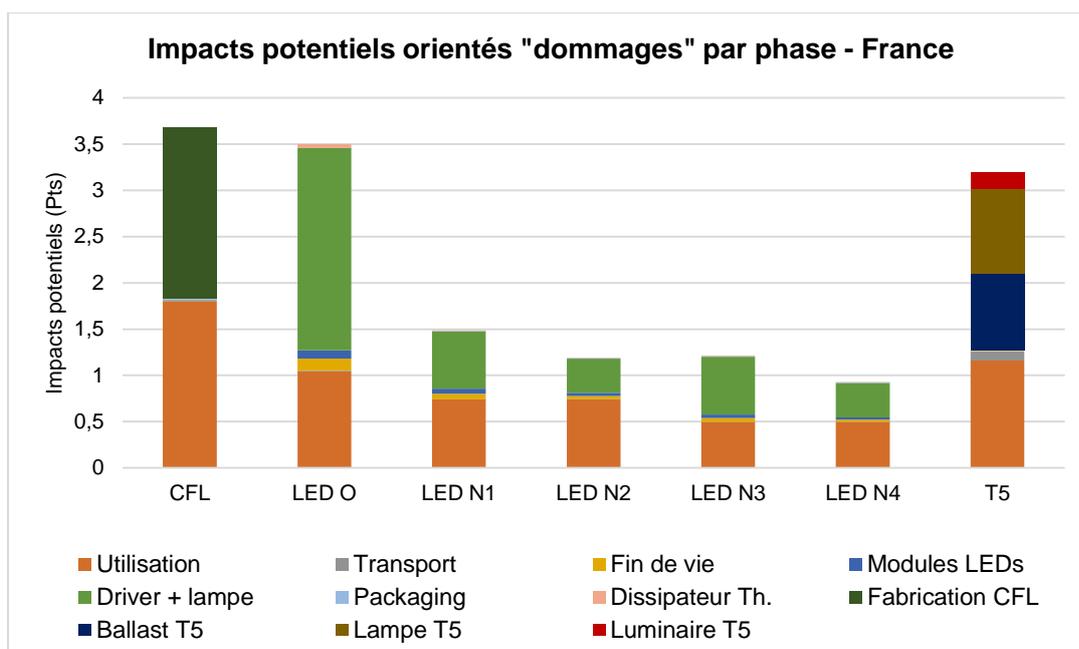


Figure 23. Répartition des impacts potentiels orientés "dommages" par phase du cycle de vie en France.

Tableau 5. Répartition des impacts potentiels orientés "dommages" par phase du cycle de vie en France. Exprimé en % des impacts totaux de la lampe.

Phases	CFL	LED O	LED N1	LED N2	LED N3	LED N4	T5
Utilisation	48,9	29,9	49,8	62,3	40,9	53,6	36,3
Transport	0,4	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	3,0
Fin de vie	0,1	3,6	3,8	2,9	3,2	2,5	0,2
Modules LEDs	na	2,5	3,8	2,8	3,1	2,4	na
Driver + lampe	na	62,5	41,6	31,2	51,5	40,5	na
Packaging	0,2	0,1	0,5	0,3	0,6	0,4	0,1
Dissipateur Th.	na	1,2	0,4	0,3	0,5	0,4	na
Fabrication CFL	50,3	na	na	na	na	na	na
Ballast T5	na	na	na	na	na	na	26,2
Lampe T5	na	na	na	na	na	na	28,5
Luminaire T5	na	na	na	na	na	na	5,7

. En ce qui concerne le T5, la lampe et le ballast sont les plus grands contributeurs de la phase de fabrication (28,5 et 26,2% respectivement), alors que le luminaire supplémentaire par rapport aux autres lampes analysées ne contribue qu'à hauteur de 5.7%.

On remarque ensuite assez rapidement que contrairement à ce qui est affirmé dans de nombreuses études d'ACV des systèmes d'éclairage, que la phase d'utilisation de la lampe n'est pas toujours la phase la plus impactante. Non seulement ce n'est pas le cas pour la CFL (48,9%) et le T5 (36,3%), mais ce n'est pas le cas non plus pour les LEDs O (29,9%) et N3 (40,9%), voire N1 qui présentent des impacts à peu près équitablement répartis (49,8%). Le point commun à toutes

ces lampes LEDs est qu'elles ont une durée de vie de 15000h. Lorsqu'elles disposent d'une durée de vie de 25000h (LED N2 et N4) la phase d'utilisation des LEDs redevient prédominante (62,3% et 53,6% respectivement). Nous sommes en réalité proches d'un point de bascule :

- Lorsque l'efficacité énergétique des lampes augmente, cela tend à réduire les contributions de la phase d'utilisation. Si elle est prédominante, ces impacts potentiels sont plus fortement réduits et inversement, si elle n'est pas prédominante, les impacts potentiels sont plus faiblement réduits.
- Lorsque la durée de vie augmente, cela tend à réduire les contributions de la phase de fabrication. Si celle-ci prédomine, ces impacts potentiels sont plus fortement réduits et inversement, si elle n'est pas prédominante, les impacts potentiels sont plus faiblement réduits.

Ceci permet de comprendre le constat effectué précédemment sur les impacts potentiels proches des LEDs N2 et N3. D'autre part, les résultats de la Figure 23 et du Tableau 5 montrent très clairement les efforts consentis pour réduire l'impact de la phase de fabrication entre la LED O et les LEDs N. En effet le driver de la LED O contribue pour environ 2 Pts d'impacts sur les 3.5 totaux de la lampe, représentant 62.1% de ses impacts sur toute sa durée de vie, ce qui explique ses performances relativement faibles comparé à la CFL et au T5. Les impacts potentiels générés par le driver des lampes LEDs ont par la suite été considérablement réduits même s'il reste largement le plus grand contributeur de la phase de fabrication de ce type de lampes. Les impacts du dissipateur thermique ont été divisés par 10 en valeur absolue entre la LED O et les LEDs N et contribuent pour moins de 0.5% actuellement. Les modules LEDs quant à eux, ne représentent seulement qu'entre 2.5 et 3.8% des impacts potentiels, en fonction des lampes. Ces chiffres permettent d'être rassurants quant à la relative ancienneté des données de fabrication des modules LEDs (2012). Cette ACV présente probablement des impacts potentiels conservateurs des modules LEDs par rapport aux optimisations technologiques et industrielles récentes, mais ces avancées n'ont pas le potentiel de modifier significativement les résultats et conclusions de cette analyse.

Pour finir, la phase de transport est minoritaire (entre 0,1% et 3%) et la phase de fin de vie représente tout de même entre 0,2 et 3,8%. Alors que la plupart des CFL et T5 sont collectées et traitées en France, ce sont les lampes LEDs qui présentent les impacts potentiels les plus élevés dans cette catégorie (entre 0,03 et 0,12 Pts pour les LEDs contre 0,005 Pts pour les CFL et T5). Ces chiffres confirment

les efforts qui restent à consentir pour améliorer cet aspect de l'éclairage LED et de la gestion des DEEEs (sans oublier que les mauvaises pratiques telles que l'exportation des déchets DEEEs dans les pays en développement et les impacts socio-environnementaux qu'elles génèrent ne sont pas pris en compte dans l'étude ACV).

6.1.9.1.3 Analyse d'incertitudes

La Figure 24 présente l'analyse d'incertitude réalisée au niveau « dommages ». Elle montre les différentes incertitudes générées à la fois par les données d'inventaire issues d'Ecoinvent, mais également par les opérations de normalisations, de pondérations et d'agrégations nécessaires pour passer du niveau « problèmes » au niveau « dommages ». Les résultats ont été générés grâce à la méthode Monte-Carlo et les impacts potentiels de chaque lampe ont été simulés 10000 fois.

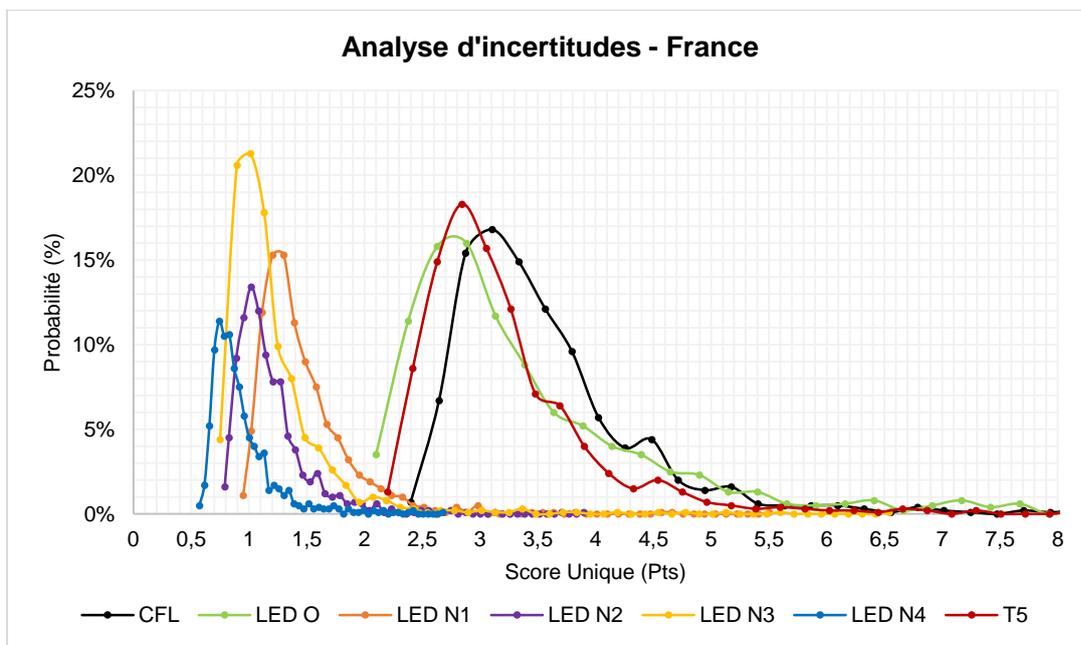


Figure 24. Analyse d'incertitude pour la France réalisée avec la méthode Monte-Carlo (10000 simulations). En abscisse les impacts potentiels exprimés en Pts et en ordonnée la probabilité associée à ces impacts potentiels exprimée en %.

L'analyse d'incertitudes confirme globalement la pertinence des résultats des analyses précédentes. On constate que les incertitudes sont plus élevées pour la LED O, la CFL et le T5. La LED O semble ici légèrement moins impactante que le T5. En ce qui concerne les LEDs N, les incertitudes sont globalement plus faibles. La LED N4 semble être la plus performante, suivi par les LEDs N2 et 3 qui restent très proches, avec cependant plus de certitude sur les résultats pour la LED N3. Suit ensuite la LED N1, comme le suggéraient les résultats orientés « dommages ».

6.1.9.2 EU

6.1.9.2.1 Midpoints

La caractérisation des impacts potentiels orientés « problèmes » pour l'Union Européenne sont présentés dans la Figure 25. Ils sont exprimés en pourcentage des impacts potentiels normalisés pour chaque catégorie.

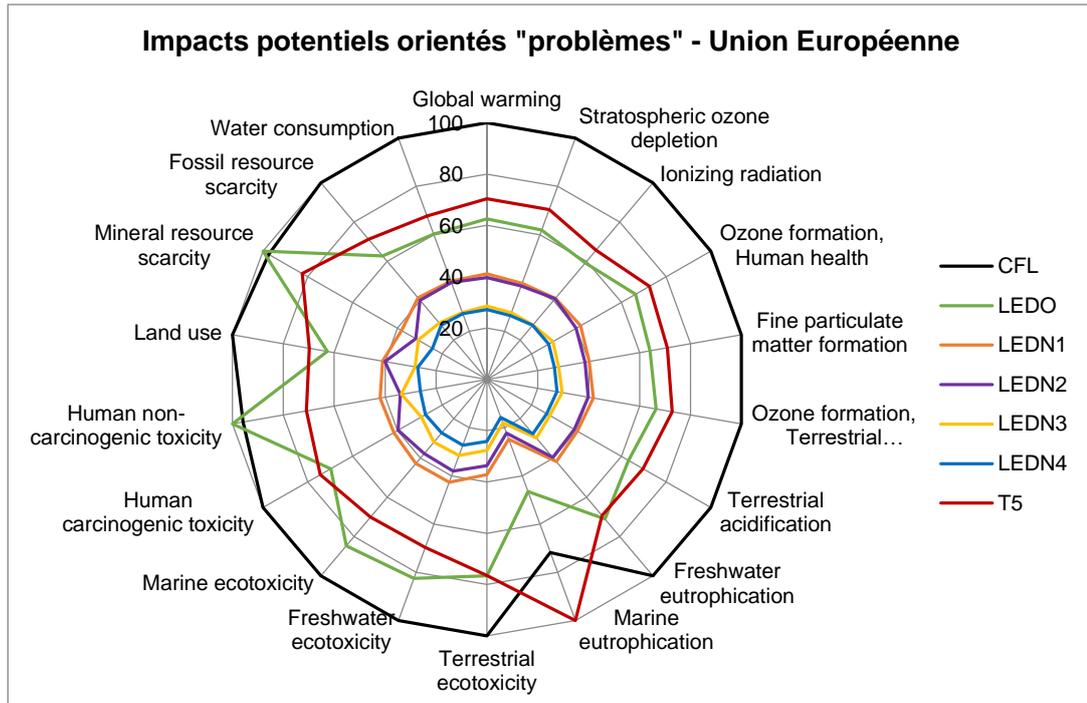


Figure 25. Caractérisation des impacts potentiels orientés "problèmes" pour l'Union Européenne.

Comme pour la France, on constate tout d'abord que la lampe CFL est celle qui génère les impacts potentiels les plus importants pour 15 des catégories d'impacts parmi les 18 disponibles. Le tube T5 domine la catégorie qui concerne l'eutrophisation marine. La LED O domine les deux catégories restantes : la disponibilité des ressources minérales et la toxicité humaine non cancérogène. La lampe CFL est donc une nouvelle fois la moins performante. Elle est suivie du tube T5 et de la LED O qui sont difficiles à départager. Contrairement à la France, la diminution des impacts potentiels grâce à des efficacités plus élevées pour le T5 et de la LED O est plus perceptible à l'échelle européenne.

En ce qui concerne les autres lampes testées, elles sont plus difficiles à départager. On constate cependant que les impacts potentiels des LEDs N1 et N2 sont très proches et qu'ensuite les LEDs N3 et N4 génèrent légèrement moins d'impacts potentiels, avec un léger avantage pour la LED N4, mais leurs performances restent globalement similaires.

6.1.9.2.2 Endpoint

Les résultats de l'analyse d'impacts orientés "dommages" sont présentés dans la Figure 26. Ils sont exprimés en Points. Cela permet de présenter les impacts potentiels sous la forme d'un score unique qui prend en compte la criticité des différentes catégories d'impacts orientés « problèmes », mais cela introduit également un certain nombre d'incertitudes.

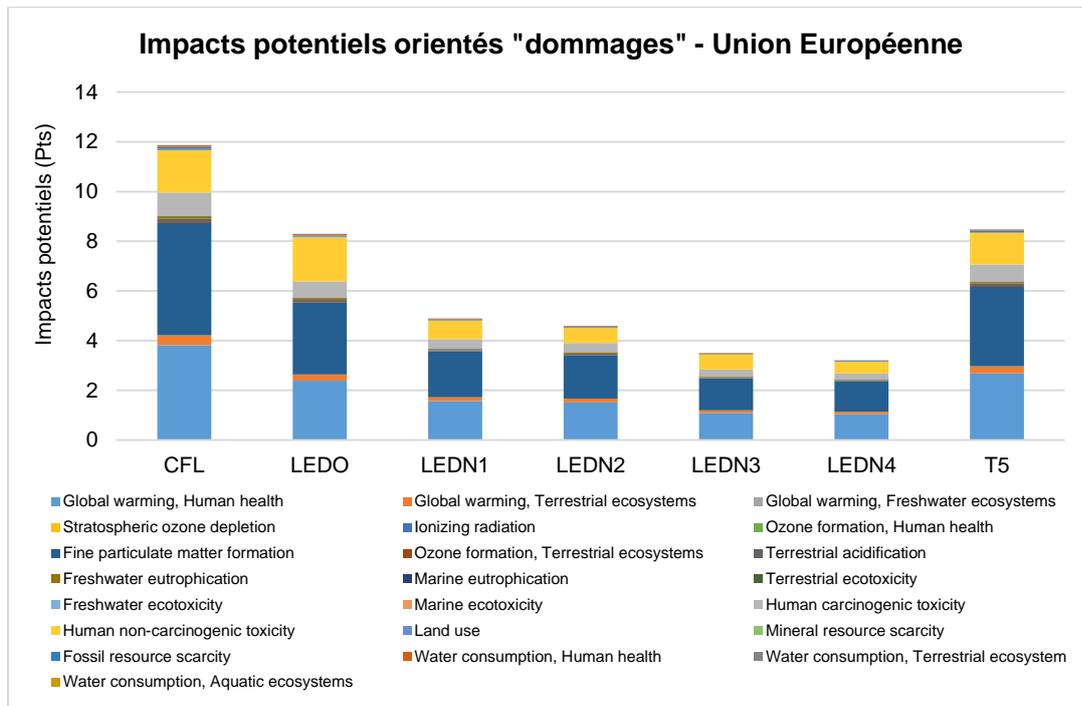


Figure 26. Impacts potentiels orientés "dommages" en Union Européenne.

Pour l'ensemble des lampes, les catégories d'impacts qui se démarquent sont l'impact du changement climatique sur l'homme, la formation de particules fines et la toxicité non cancérigène pour l'humain. Proportionnellement, et en comparant avec la situation française, cette dernière catégorie recule au profit de celles concernant les impacts du changement climatique et de la formation de particules fines. Tout comme lors de la caractérisation orientée « problèmes », la lampe CFL est celle qui génère le plus d'impacts potentiels avec environ 12 Pts d'impacts. Si on compare avec la France les lampes génèrent 3 à 4 fois plus d'impacts potentiels au niveau européen. La CFL est suivie du tube T5 et de la LED O avec une réduction des impacts de l'ordre de 30% pour chacune d'entre elles, ce qui était également le cas au niveau « dommages ». On constate à nouveau une très nette réduction des impacts potentiels (de l'ordre de 50%) pour les LEDs N1 à 4 comparé à la LED O. Non seulement elles disposent d'une plus grande efficacité et durée de vie mais leur processus de fabrication a également été grandement amélioré (Cf. Figure 27). Les tubes T5 sont encore surpassés par la technologie LED et il est important de

poursuivre leur remplacement. Enfin, il semble une nouvelle fois cohérent d'orienter les consommateurs vers des lampes LEDs type N1 à N4 tant la réduction des impacts potentiels est considérable.

D'autre part, on remarque que les impacts potentiels des LEDs N1 et N2, mais également N3 et N4 entre elles, sont relativement proches. Pour chacune de ces paires il y a une différence importante de durée de vie (de 15000h à 25000h) mais cela ne se traduit pas vraiment par une réduction des impacts potentiels. Contrairement à la France, la réduction des impacts semble ici provoquée par une amélioration de l'efficacité lumineuse. C'est le mix électrique mixte plus carboné de l'Union Européenne qui en est responsable. Ce constat confirme la pertinence des objectifs d'amélioration de l'efficacité des appareils consommant de l'énergie pour limiter les émissions de gaz à effets de serre et lutter contre le réchauffement climatique. Cette amélioration permet également d'avoir une influence directe sur les frais de consommation d'énergie des usagers. De plus, et c'est particulièrement important à l'échelle européenne, la limitation de la demande globale en électricité peut permettre de faciliter la transition vers des moyens de production d'énergie plus propre. En effet le dimensionnement du réseau (et donc de la consommation future) est déterminant dans les scénarios de perspectives pour la transition énergétique.

La Figure 27 ainsi que le Tableau 6 présente la répartition des impacts orientés « dommages » en fonction des phases de cycle de vie. La phase de fabrication est décomposée en fonction des éléments de différentes lampes pour indiquer ceux qui contribuent le plus aux impacts potentiels.

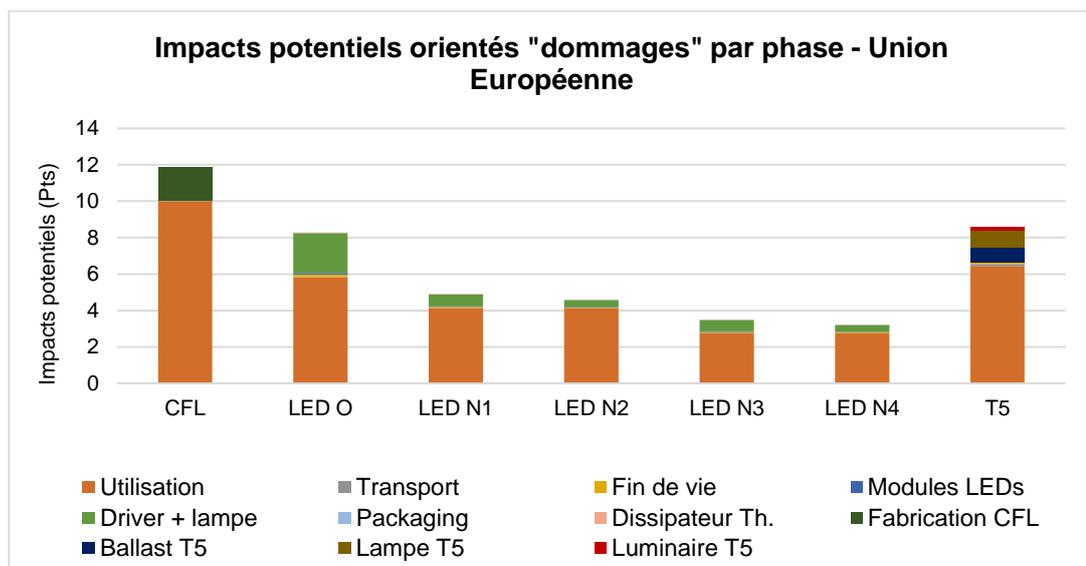


Figure 27. Répartition des impacts potentiels orientés "dommages" par phase du cycle de vie en Union Européenne.

Tableau 6. Répartition des impacts potentiels orientés "dommages" par phase du cycle de vie en Union Européenne. Exprimé en % des impacts potentiels totaux de la lampe.

Phases	CFL	LED O	LED N1	LED N2	LED N3	LED N4	T5
Utilisation	84,2	70,3	84,7	90,2	79,4	86,5	76,0
Transport	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	1,1
Fin de vie	0,0	1,5	1,2	0,7	1,1	0,7	0,1
Modules LEDs	na	1,1	1,2	0,7	1,1	0,7	na
Driver + lampe	na	26,5	12,7	8,1	18,0	11,8	na
Packaging	0,1	0,0	0,1	0,1	0,2	0,1	0,0
Dissipateur Th.	na	0,5	0,1	0,1	0,2	0,1	na
Fabrication CFL	15,6	na	na	na	na	na	na
Ballast T5	na	na	na	na	na	na	9,9
Lampe T5	na	na	na	na	na	na	10,7
Luminaire T5	na	na	na	na	na	na	2,2

A l'échelle européenne, la tendance indiquée par de précédentes études d'ACV est respectée. Pour l'ensemble des lampes c'est la phase d'utilisation qui contribue le plus aux impacts potentiels de manière très nette (entre 70.3% pour la LED O jusqu'à 90.2% pour la LED N2). Ceci permet de comprendre le constat effectué sur les impacts potentiels proches des LEDs N1 et N2 d'une part et des LEDs N2 et N3. Comme montré précédemment, si la phase d'utilisation prédomine, l'extension de la durée de vie des lampes ne se concrétise que par une réduction marginale des impacts potentiels, au contraire de l'amélioration de l'efficacité. Malgré la prédominance de la phase d'utilisation, la réduction des impacts potentiels liée aux améliorations de la phase de fabrication du driver entre la LED O et les LEDs N est clairement visible (de 2,2 Pts à 0,6 Pt pour les LEDs N1 et N3, et à 0,4 Pt pour les LEDs N2 et N3). Le driver des lampes LEDs N continue cependant à contribuer de manière non négligeable dans les impacts potentiels totaux (entre 8,1% pour la LED N2 jusqu'à 18% pour la LED N3), ce qui montre malgré tout l'importance de la collecte et du recyclage pour améliorer la circularité des matériaux qui les composent. Les impacts potentiels du dissipateur thermique et des modules LEDs sont quant à eux relativement faibles. Une nouvelle fois, ces chiffres permettent d'être rassurants quant à la pertinence des résultats face à la relative ancienneté des données de fabrication des modules LEDs (2012).

Pour finir, la phase de transport est minoritaire (environ 0,1%) et la phase de fin de vie représente tout de même entre 0,1 et 1,5%. Proportionnellement, cela est nettement moins que pour la France, mais les composants des lampes étant identiques, l'impact de la fin de vie est proche en valeur absolue et il est toujours nécessaire d'inciter les pratiques vertueuses pour améliorer la gestion des DEEEs.

6.1.9.2.3 Analyse d'incertitudes

La Figure 28 présente l'analyse d'incertitude réalisée au niveau « dommages » pour l'Union Européenne. Elle montre les différentes incertitudes générées à la fois par les données d'inventaire issues d'Ecoinvent, mais également par les opérations de normalisations, de pondérations et d'agrégations nécessaires pour passer du niveau « problèmes » au niveau « dommages ». Les résultats ont été générés grâce à la méthode Monte-Carlo et les impacts potentiels de chaque lampe ont été simulés 10000 fois.

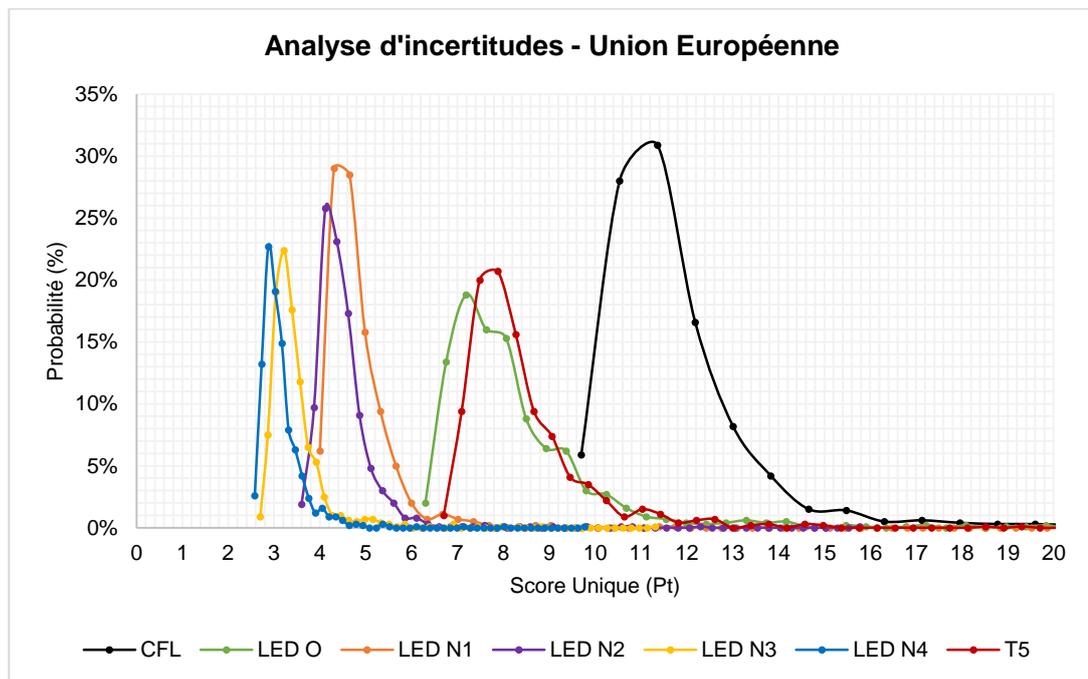


Figure 28. Analyse d'incertitudes pour l'Union Européenne réalisée avec la méthode Monte-Carlo (10000 simulations). En abscisse les impacts potentiels exprimés en Pts et en ordonnée la probabilité associée à ces impacts potentiels exprimée en %.

L'analyse d'incertitudes confirme globalement la pertinence des résultats des analyses précédentes. La CFL est la moins performante. Suivent la LED O et le T5 qui sont très proches en termes d'impacts potentiels et d'incertitudes, avec un léger avantage pour la LED O malgré tout. En ce qui concerne les LEDs N, les incertitudes sont similaires. La LED N4 et N3 semblent être les plus performantes, suivies par les LEDs N2 et N1 qui restent très proches. Les résultats de l'analyse d'incertitudes nous permettent d'être confiants par rapport à la pertinence de l'analyse et des impacts potentiels à l'échelle européenne.

6.1.9.3 AU

6.1.9.3.1 Midpoint

La caractérisation des impacts potentiels orientés « problèmes » pour l'Australie sont présentés dans la Figure 29. Ils sont exprimés en pourcentage des impacts potentiels normalisés pour chaque catégorie.

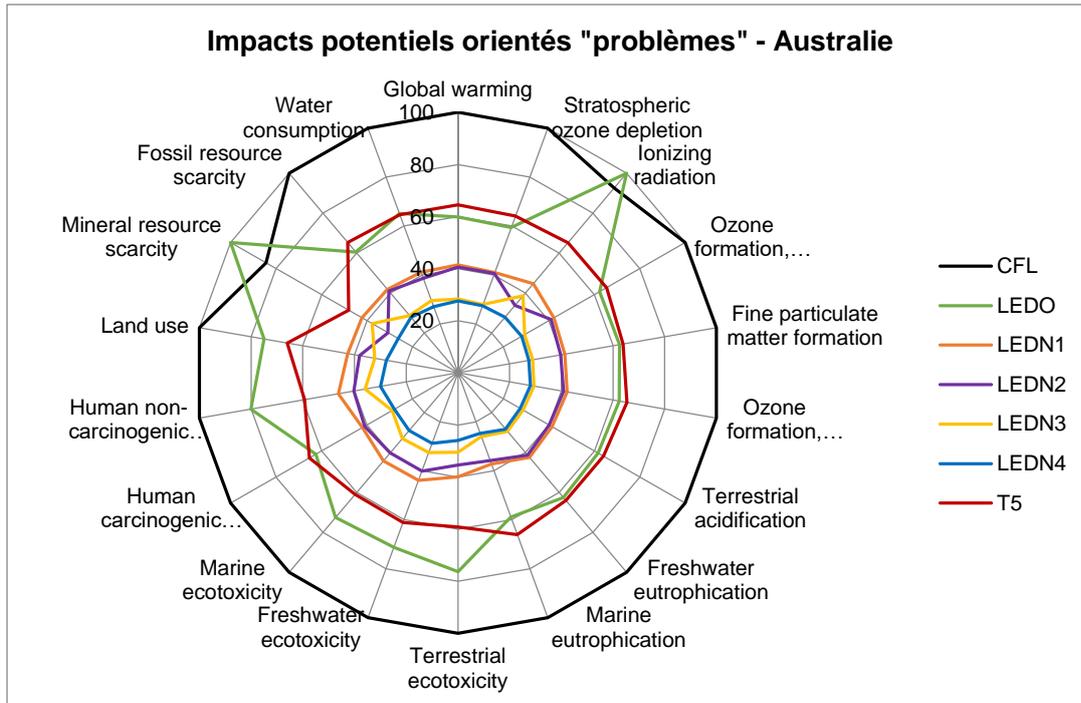


Figure 29. Caractérisation des impacts potentiels orientés "dommages" pour l'Australie.

Comme pour la France et l'Union Européenne, on constate tout d'abord que la lampe CFL est celle qui génère les impacts potentiels les plus importants et ceci pour 16 des catégories d'impacts parmi les 18 disponibles. La LED O domine les deux catégories restantes : la disponibilité des ressources minérales et les radiations ionisantes. La lampe CFL est donc une nouvelle fois très largement la moins performante. Elle est suivie du tube T5 et de la LED O avec un léger avantage pour le tube T5. Comme en Union Européenne, la diminution des impacts potentiels grâce à des efficacités plus élevées pour le T5 et de la LED O est plus perceptible en Australie.

De manière générale la caractérisation des impacts potentiels orientés « problèmes » montre un profil similaire à celle de l'Union européenne. C'est notamment le cas pour les LEDs N. Les impacts potentiels des LEDs N1 et N2 sont très proches tout comme ceux des LEDs N3 et N4 qui génèrent moins d'impacts potentiels.

6.1.9.3.2 Endpoint

Les résultats de l'analyse d'impacts orientés "dommages" sont présentés dans la Figure 30. Ils sont exprimés en Points. Cela permet de présenter les impacts potentiels sous la forme d'un score unique qui prend en compte la criticité des différentes catégories d'impacts orientés « problèmes », mais cela introduit également un certain nombre d'incertitudes.

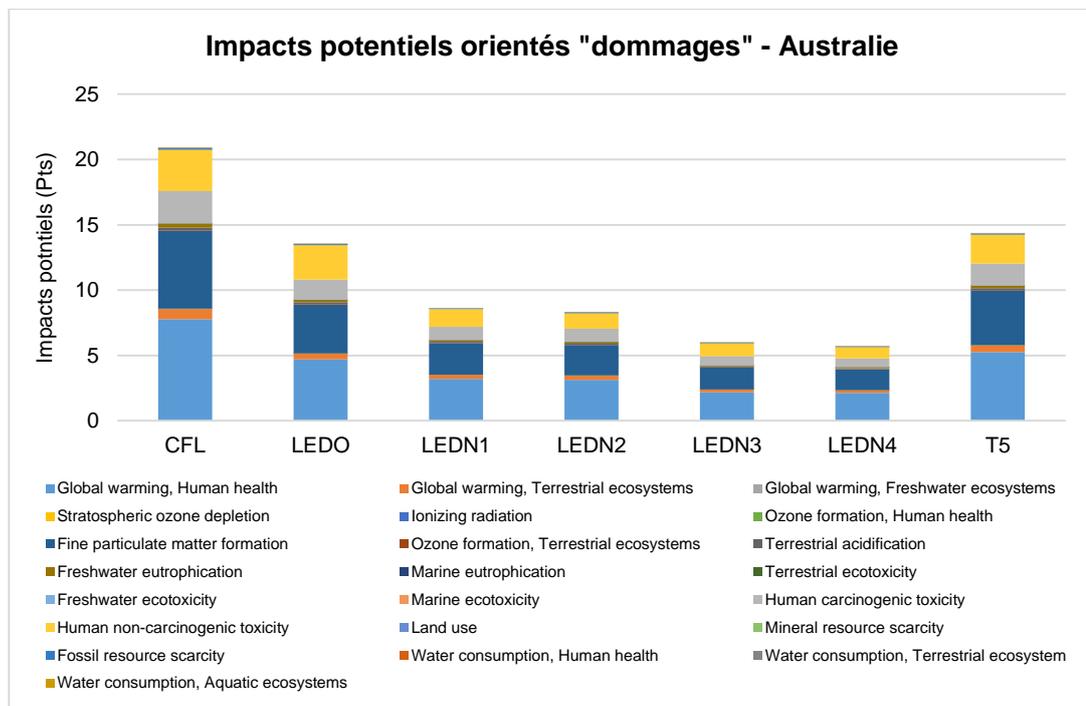


Figure 30. Impacts potentiels orientés "dommages" en Australie.

Pour l'ensemble des lampes, les catégories d'impacts qui contribuent le plus sont les impacts du changement climatique sur l'Homme, la formation de particules fines, la toxicité cancérigène et non cancérigène pour l'humain. En comparant avec la situation française et européenne, la catégorie liée à la toxicité cancérigène sur l'homme prend plus d'importance ce qui est dû à l'utilisation considérable du charbon et du gaz pour la production d'électricité en Australie (environ 85% du mix électrique). Globalement, les lampes génèrent 4 à 7 fois plus d'impacts potentiels comparé à la situation en France et environ 2 fois plus qu'à l'échelle européenne.

Tout comme lors de la caractérisation orientée « problèmes », la lampe CFL est celle qui génère le plus d'impacts potentiels avec environ 21 Pts d'impacts. La CFL est suivie du tube T5 et de la LED O avec une réduction des impacts potentiels de l'ordre de 30% pour chacune d'entre elles, ce qui était également le cas au niveau « dommages ». On constate à nouveau une très nette amélioration pour les LEDs N1 à 4 comparé à la LED O, grâce à une plus grande efficacité et durée de vie mais

également grâce à des processus de fabrication moins impactants (Cf. Figure 31). Les tubes T5 restent surpassés par la technologie LED et il est important de poursuivre leur remplacement. Enfin, il semble cohérent d'orienter les consommateurs vers des lampes à très haute efficacité tel que les LEDs N3 et N4 tant la réduction des impacts potentiels est considérable.

On retrouve en effet un profil similaire à l'Union Européenne, avec des impacts potentiels pour les LEDs N1 et 2, mais également N3 et N4 entre elles, qui sont relativement proches. Pour chacune de ces paires, il y a une différence importante de durée de vie (de 15000h à 25000h) mais cela ne se traduit pas vraiment par une réduction des impacts potentiels. La réduction des impacts est essentiellement provoquée par une amélioration de l'efficacité lumineuse. C'est le mix électrique fortement carboné de l'Australie qui en est responsable. Ce constat confirme la pertinence des objectifs d'amélioration de l'efficacité des appareils consommant de l'énergie pour limiter les émissions de gaz à effets de serre et lutter contre le réchauffement climatique. Cette amélioration permet également d'avoir une influence directe sur les frais de consommation d'énergie des usagers. De plus, la limitation de la demande globale en électricité peut permettre de faciliter la transition vers des moyens de production d'énergie plus propre.

La Figure 31 ainsi que le Tableau 7 présente la répartition des impacts orientés « dommages » en fonction des phases de cycle de vie. La phase de fabrication est décomposée en fonction des éléments de différentes lampes pour indiquer ceux qui contribuent le plus aux impacts potentiels.

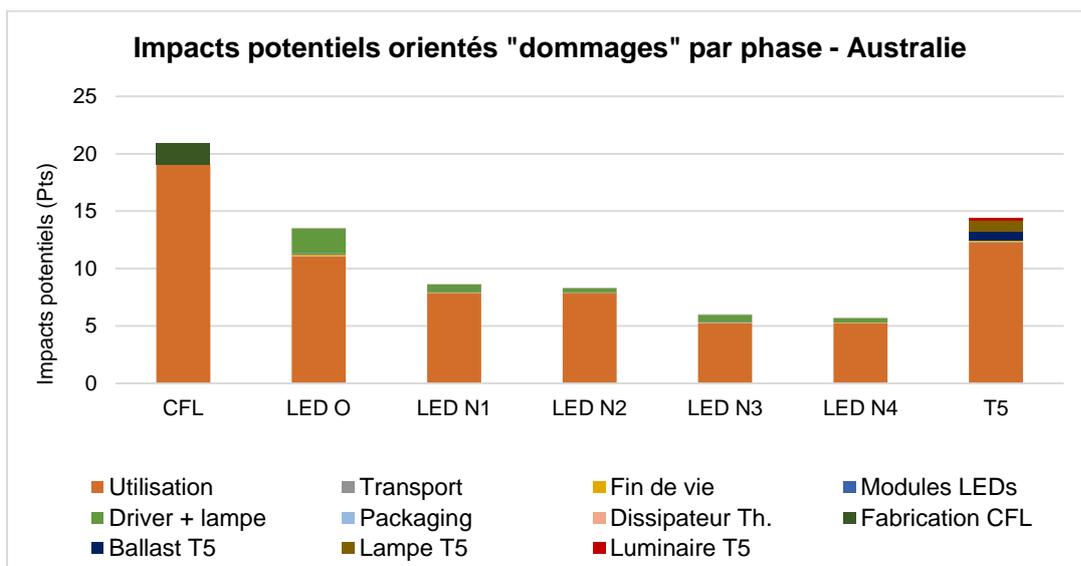


Figure 31. Répartition des impacts potentiels orientés "dommages" par phase du cycle de vie en Australie.

Tableau 7. Répartition des impacts potentiels orientés "dommages" par phase du cycle de vie en Australie. Exprimé en % des impacts potentiels totaux de la lampe.

Phases	CFL	LED O	LED N1	LED N2	LED N3	LED N4	T5
Utilisation	91,0	81,7	91,1	94,5	87,8	92,3	85,7
Transport	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,4
Fin de vie	0,1	1,1	0,9	0,5	0,9	0,5	0,4
Modules LEDs	na	0,6	0,7	0,4	0,6	0,4	Na
Driver + lampe	na	16,2	7,2	4,5	10,5	6,6	Na
Packaging	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0
Dissipateur Th.	na	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	Na
Fabrication CFL	8,8	na	na	na	na	na	Na
Ballast T5	na	na	na	na	na	na	5,9
Lampe T5	na	na	na	na	na	na	6,4
Luminaire T5	na	na	na	na	na	na	1,3

En Australie, la prédominance de la phase d'utilisation est encore plus marquée qu'en Europe (entre 85,5% pour le T5 jusqu'à 94,5% pour la LED N2). C'est probablement pourquoi la réduction des impacts potentiels liée aux améliorations de la phase de fabrication du driver entre la LED O et les LEDs N est ici moins perceptible. Les améliorations liées aux processus industriels ainsi que l'extension de la durée des lampes ne se concrétisent que par une réduction marginales des impacts potentiels, au contraire de l'amélioration de l'efficacité. Le driver des lampes LEDs continue cependant à contribuer de manière non négligeable dans les impacts potentiels totaux (entre 4,5% pour la LED N2 jusqu'à 16,2% pour la LED O), ce qui montre malgré tout l'importance de la collecte et du recyclage pour améliorer la circularité des matériaux qui les composent. Les impacts potentiels du dissipateur thermique et des modules LEDs sont quant à eux relativement faibles (<1%). Une nouvelle fois ces chiffres permettent d'être rassurants quant à la pertinence des résultats face à la relative ancienneté des données de fabrication des modules LEDs (2012).

Pour finir, la phase de transport est minoritaire et la phase de fin de vie représente tout de même entre 0,1 et 1,1%. En valeur absolue, c'est par exemple 7 fois plus d'impacts potentiels pour la fin de vie des lampes T5, de l'ordre de 30% d'impacts supplémentaires pour les autres lampes. Même si proportionnellement la contribution de la phase de fin de vie est faible, il est toujours nécessaire de mettre en place des circuits de collecte et traitement, particulièrement pour les T5, mais également pour les lampes LEDs afin d'éviter les mauvaises pratiques liées à l'exportation des DEEEs.

6.1.9.3.3 Analyse d'incertitudes

La Figure 32 présente l'analyse d'incertitude réalisée au niveau « dommages » pour l'Union Européenne. Elle montre les différentes incertitudes générées à la fois par les données d'inventaire issues d'Ecoinvent, mais également par les opérations de normalisations, de pondérations et d'agrégations nécessaires pour passer du niveau « problèmes » au niveau « dommages ». Les résultats ont été générés grâce à la méthode Monte-Carlo et les impacts potentiels de chaque lampe ont été simulés 10000 fois.

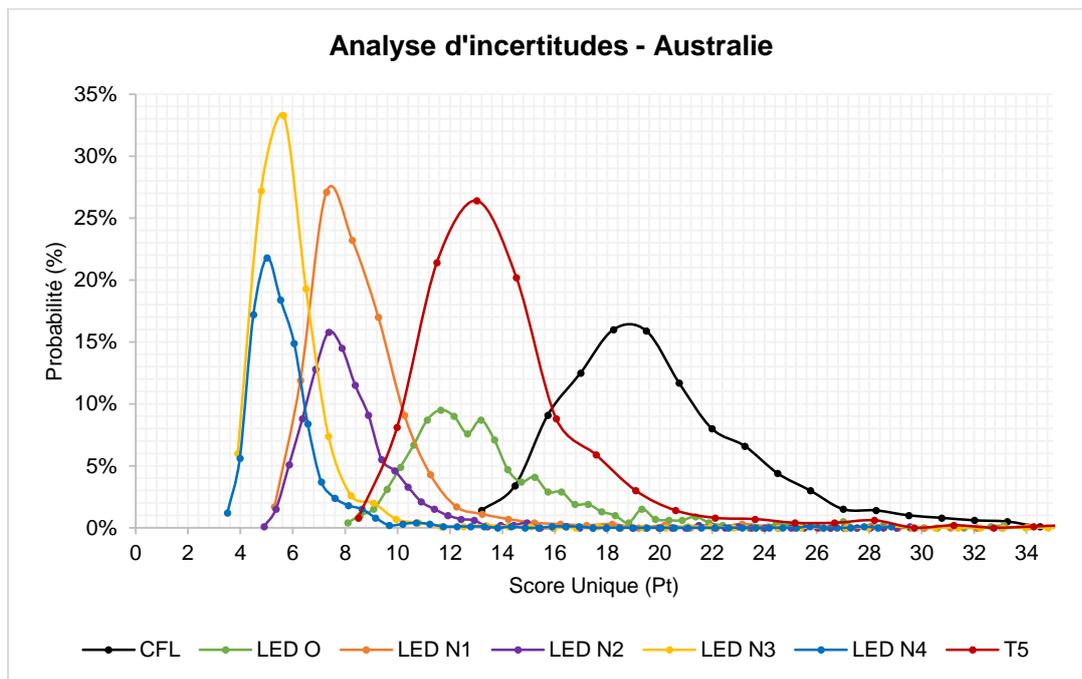


Figure 32. Analyse d'incertitudes pour l'Australie réalisée avec la méthode Monte-Carlo (10000 simulations). En abscisse les impacts potentiels exprimés en Pts et en ordonnée la probabilité associée à ces impacts potentiels exprimée en %.

L'analyse d'incertitudes confirme globalement la pertinence des résultats des analyses précédentes. La CFL est la lampe la moins performante. Suivent la LED O et le T5 qui sont proches en termes d'impacts potentiels mais avec beaucoup moins d'incertitudes pour le T5. Les LEDs N4 et N3 semblent être les plus performantes, suivies par les LEDs N2 et N1 qui restent très proches. Les incertitudes des lampes N1 et N3 sont plus faibles en particulier car elles ont une durée de vie plus faible. Les résultats de l'analyse d'incertitudes nous permettent d'être confiants par rapport à la pertinence de l'analyse et des impacts potentiels en Australie.

6.1.9.4 Nouvelle-Zélande

6.1.9.4.1 Midpoint

La caractérisation des impacts potentiels orientés « problèmes » pour la Nouvelle-Zélande sont présentés dans la Figure 33. Ils sont exprimés en pourcentage des impacts potentiels normalisés pour chaque catégorie.

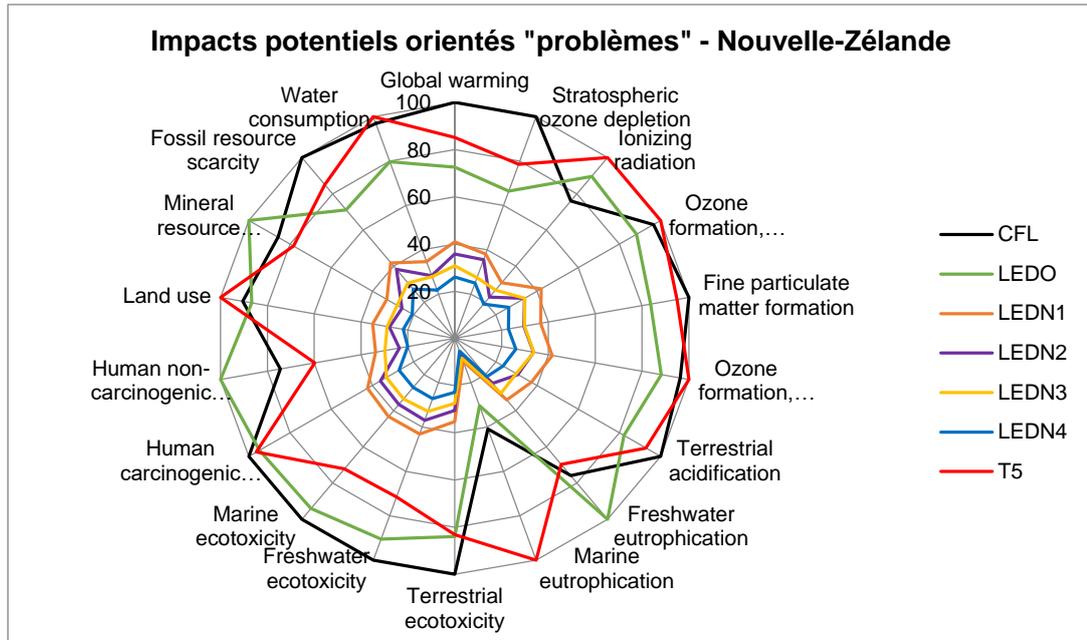


Figure 33. Caractérisation des impacts potentiels orientés "problèmes" pour la Nouvelle-Zélande.

Contrairement aux pays ou zone géographique étudiés précédemment, la lampe la moins performante est moins évidente à déterminer. La lampe CFL génère les impacts potentiels les plus importants pour 9 catégories d'impacts parmi les 18 disponibles. Le T5 quant à lui domine 6 catégories (la formation d'ozone, l'eutrophisation marine, l'occupation des territoires, la consommation d'eau et les radiations ionisantes) alors que la LED O domine les 3 catégories restantes : l'eutrophisation des eaux douces, la toxicité humaine non cancérigène et la disponibilité des ressources minérales. La lampe CFL semble donc une nouvelle fois la moins performante mais beaucoup moins nettement. Elle est suivie du tube T5 et de la LED O sans qu'on puisse réellement les départager au niveau « dommages ». De manière générale, la caractérisation des impacts potentiels montre un profil similaire à celui de la France. En effet, il est une nouvelle fois surprenant de constater que la lampe LED O ne présente pas de meilleurs résultats. De plus, les impacts potentiels des LEDs N sont largement inférieurs à ceux des autres lampes analysées avec les LEDs N2 et N3 qui présentent des résultats très proches, et avec la LED N4 qui est la plus performante.

6.1.9.4.2 Endpoint

Les résultats de l'analyse d'impacts orientés "dommages" sont présentés dans la Figure 34. Ils sont exprimés en Points. Cela permet de présenter les impacts potentiels sous la forme d'un score unique qui prend en compte la criticité des différentes catégories d'impacts orientés « problèmes », mais cela introduit également un certain nombre d'incertitudes.

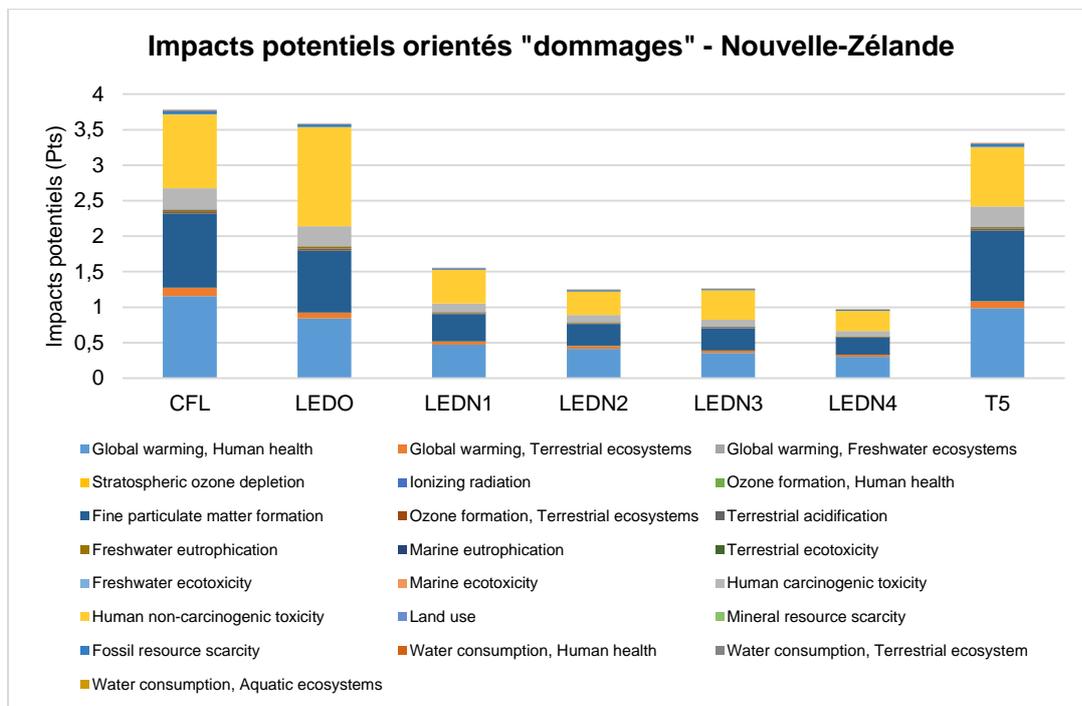


Figure 34. Impacts potentiels orientés "dommages" en Nouvelle-Zélande.

Comme mis en évidence lors de la caractérisation orientée « problèmes », les impacts potentiels générés par la lampe CFL, la LED O et le T5 sont très proches. Il sera nécessaire de distinguer les performances des lampes à l'aide de l'analyse d'incertitude. Même si la LED O a une consommation d'énergie sur le cycle de vie largement inférieure (282 contre 485 kWh pour la CFL), les impacts potentiels restent globalement identiques. En revanche, on constate une très nette amélioration pour les lampes LEDs N1 à 4. Non seulement elles disposent d'une plus grande efficacité et durée de vie mais leur processus de fabrication a également été grandement amélioré (Cf. Figure 35). Il est indispensable que les consommateurs soient orientés vers des lampes LEDs type N1 à N4 sans quoi les gains se limiteraient à une consommation d'énergie et donc une facture réduite, sans toutefois réduire concrètement les impacts environnementaux de leur système d'éclairage comparé aux lampes CFL. Cela confirme également que les tubes T5 sont surpassés par la technologie LED et qu'il est important de poursuivre leur remplacement.

Comme en France, lorsqu'on s'intéresse aux résultats pour les lampes N1 à N4, on remarque que les impacts potentiels de la LED N3 (meilleure efficacité) sont légèrement supérieurs à ceux de la LED N2 (plus grande durée de vie). L'électricité néozélandaise étant générée par des énergies renouvelables, elle est faiblement carbonée. Lorsque les systèmes d'éclairage disposent d'une meilleure efficacité les gains sur les impacts potentiels sont alors inférieurs par rapport au cas où l'électricité est fortement carbonée. Il est donc important de considérer les aspects liés à la durabilité au moins comme aussi importants que l'efficacité. Il est cependant important de rappeler que l'ACV attributionnelle ne prend pas en compte les conséquences qu'aurait une consommation d'électricité réduite sur l'organisation du réseau que ce soit en termes de moyens de production ou en termes de distribution. Le caractère insulaire de la Nouvelle-Zélande conjugué à la prédominance des énergies renouvelables rend ce paramètre particulièrement important, le pays n'ayant pas la possibilité d'importer de l'énergie électrique. En revanche la pilotabilité des systèmes hydro-électrique (58,5% du mix) permet à la Nouvelle-Zélande d'être moins sujette aux problèmes des pics de consommations journaliers, contrairement à des mix basés essentiellement sur l'énergie solaire et éolienne.

La Figure 35 ainsi que le Tableau 8 présente la répartition des impacts orientés « dommages » en fonction des phases de cycle de vie. La phase de fabrication est décomposée en fonction des éléments de différentes lampes pour indiquer ceux qui contribuent le plus aux impacts potentiels.

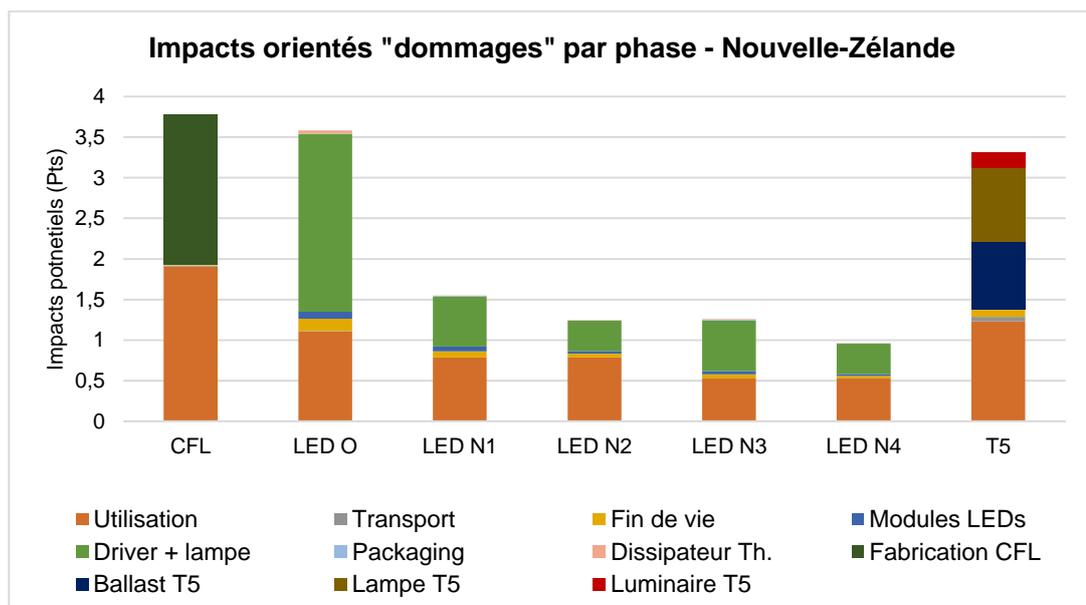


Figure 35. Répartition des impacts potentiels orientés "dommages" par phase du cycle de vie en Nouvelle-Zélande.

Tableau 8. Répartition des impacts potentiels orientés "dommages" par phase du cycle de vie en Nouvelle-Zélande. Exprimé en % des impacts potentiels totaux de la lampe.

Phases	CFL	LED O	LED N1	LED N2	LED N3	LED N4	T5
Utilisation	50,5	31,0	50,7	63,1	41,9	54,6	37,2
Transport	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	1,7
Fin de vie	0,2	4,2	4,9	3,6	4,1	3,2	2,6
Modules LEDs	na	2,5	3,6	2,7	3,0	2,3	na
Driver + lampe	na	61,1	39,9	29,8	49,8	38,9	na
Packaging	0,2	0,1	0,4	0,3	0,6	0,4	0,1
Dissipateur Th.	na	1,1	0,4	0,3	0,5	0,4	na
Fabrication CFL	48,9	na	na	na	na	na	na
Ballast T5	na	na	na	na	na	na	25,3
Lampe T5	na	na	na	na	na	na	27,6
Luminaire T5	na	na	na	na	na	na	5,6

Comme pour la France ce n'est pas la phase d'utilisation qui prédomine systématiquement. Nous sommes en réalité proches du point de bascule en fonction des lampes. C'est la phase de fabrication qui est la plus impactante pour le T5 (58,5%) ainsi que pour les LEDs O (64,7%), et N3 (53,5%). La CFL et la LED N1 ont des impacts potentiels répartis équitablement entre la phase d'utilisation et celle de fabrication. En revanche lorsque les LEDs disposent d'une durée de vie de 25000h (LED N2 et N4), leur phase d'utilisation redevient prédominante (63,1% et 54,6% respectivement).

D'autre part, la Figure 35 et le Tableau 8 montrent très clairement les efforts consentis pour réduire l'impact de la phase de fabrication entre la LED O et les LEDs N. En effet le driver de la LED O représente 61,1% de ses impacts sur toute sa durée de vie, ce qui explique ses performances relativement faibles comparé à la CFL et au T5, alors que celui de la LED N1 ne contribue que pour 39,9%. Les impacts potentiels du dissipateur thermique ont été divisés par 6 en valeur absolue entre la LED O et les LEDs N et contribuent pour moins de 0,5% actuellement. Les modules LEDs quant à eux, ne représentent qu'entre 2,5 et 3,6% des impacts potentiels, en fonction des lampes. En ce qui concerne le T5, la lampe et le ballast sont les plus grands contributeurs de la phase de fabrication (27,6 et 25,3% respectivement), alors que le luminaire supplémentaire par rapport aux autres lampes analysées ne contribue qu'à hauteur de 5,6%.

Pour finir, la phase de transport est minoritaire (entre 0,1% et 1,7%) et la phase de fin de vie représente tout de même entre 0,2 et 4,9%. Proportionnellement, il s'agit du niveau le plus élevé parmi tous les mix électriques testés. L'absence de dispositif de collecte pour les lampes LEDs, ou de traitement du mercure pour les

T5 est ici clairement visible. Ces chiffres confirment les efforts qui restent à consentir pour améliorer la gestion de la fin de vie des LEDs et des lampes fluorescentes.

6.1.9.4.3 Analyse d'incertitudes

La Figure 36 présente l'analyse d'incertitude réalisé au niveau « dommages » pour la Nouvelle-Zélande. Elle montre les différentes incertitudes générées à la fois par les données d'inventaire issues d'Ecoinvent, mais également par les opérations de normalisations, de pondérations et d'agrégations nécessaires pour passer du niveau « problèmes » au niveau « dommages ». Les résultats ont été générés grâce à la méthode Monte-Carlo et les impacts potentiels de chaque lampe ont été simulés 10000 fois.

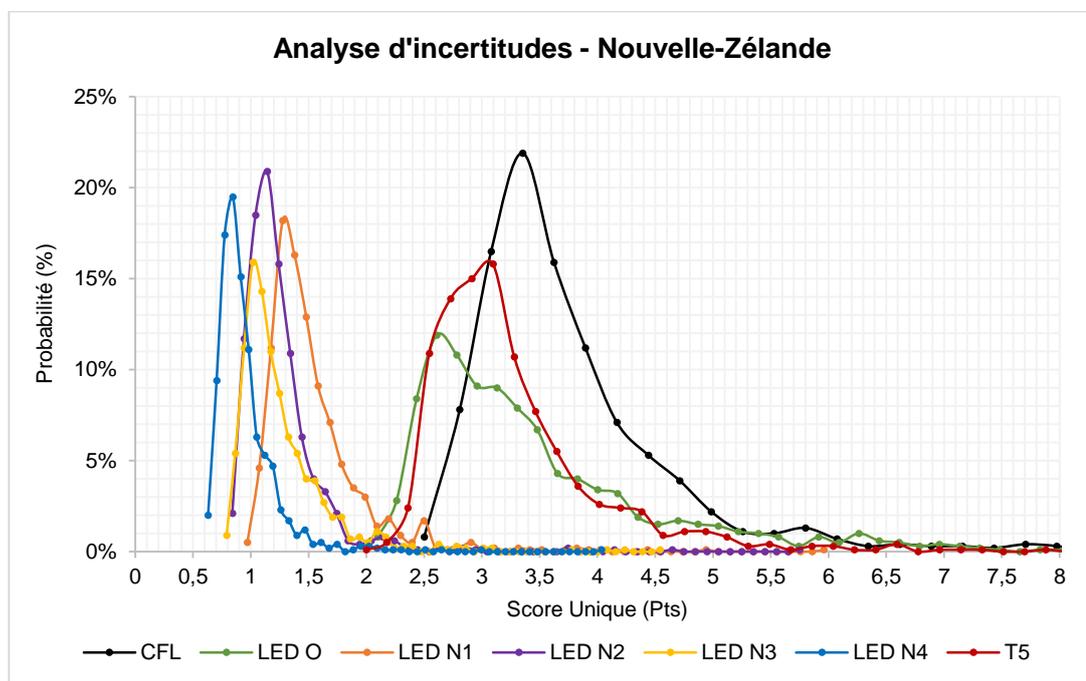


Figure 36. Analyse d'incertitudes pour la Nouvelle-Zélande réalisée avec la méthode Monte-Carlo (10000 simulations). En abscisse les impacts potentiels exprimés en Pts et en ordonnée la probabilité associée à ces impacts potentiels exprimée en %.

L'analyse d'incertitudes confirme globalement la pertinence des résultats des analyses précédentes. On constate que les incertitudes sont plus élevées pour la LED O, la CFL et le T5. La lampe CFL est la moins performante et la LED O semble ici légèrement moins impactante que le T5. En ce qui concerne les LEDs N, les incertitudes sont globalement plus faibles. La LED N4 semble être la plus performante, suivie par les LEDs N2 et N3 qui restent très proches. Suit ensuite la LED N1, comme le suggéraient les résultats orientés « dommages ».

6.1.10 Discussion

Les analyses des résultats d'impacts du cycle de vie en fonction des différents mix électriques ont mis en évidence une sensibilité, soit à la durabilité pour les mix faiblement carbonés de France et Nouvelle-Zélande, soit à l'efficacité pour les mix plus fortement carbonés de l'Union Européenne et de l'Australie. Afin de discuter de cette différence, un scénario de panne prématurée et un scénario d'économie de consommation d'énergie grâce à la fonctionnalité « Constant Lumen Output » (CLO) sont présentés dans les paragraphes suivants.

6.1.10.1 *Risques de panne prématurée*

Le nombre important de lampes LEDs disponibles sur le marché à des prix variables a mis en évidence des disparités importantes, que ce soit dans les caractéristiques des lampes (durée de vie, efficacité, température de couleur, flux lumineux) mais également en termes de fiabilité. En effet, en fonction de la qualité de la lampe, notamment en ce qui concerne la gestion de la dissipation de chaleur ou la présence d'humidité, ou encore en fonction de la qualité de l'installation électrique, des pannes catastrophiques peuvent intervenir durant les 10000 premières heures de la durée de vie de la lampe [172]. Afin de différencier ce type de panne d'un défaut de conception de la lampe qui conduirait à une panne fatale de la lampe dès le début de son utilisation (<500 h), une analyse de sensibilité sur la durée de vie des lampes N3 et N4 a été réalisée en utilisant une distribution normale de la durée de vie avec une médiane de 7500 h et une variance de 2500 h. Cette distribution représente ainsi une panne prématurée de la lampe due à une mauvaise fiabilité comparée à une lampe de bonne qualité (c'est à dire qui atteindrait la durée de vie initiale prévue). Cette analyse a été réalisée grâce à la méthode Monte-Carlo (10000 simulations). Les résultats sont présentés dans la Figure 37 pour la France et la Nouvelle-Zélande et dans la Figure 38 pour l'Australie et l'Union-Européenne. Les incertitudes sur les impacts potentiels pour l'ensemble des lampes sont également représentées afin d'évaluer l'influence du risque de panne prématurée face aux incertitudes déjà existantes et calculées auparavant.

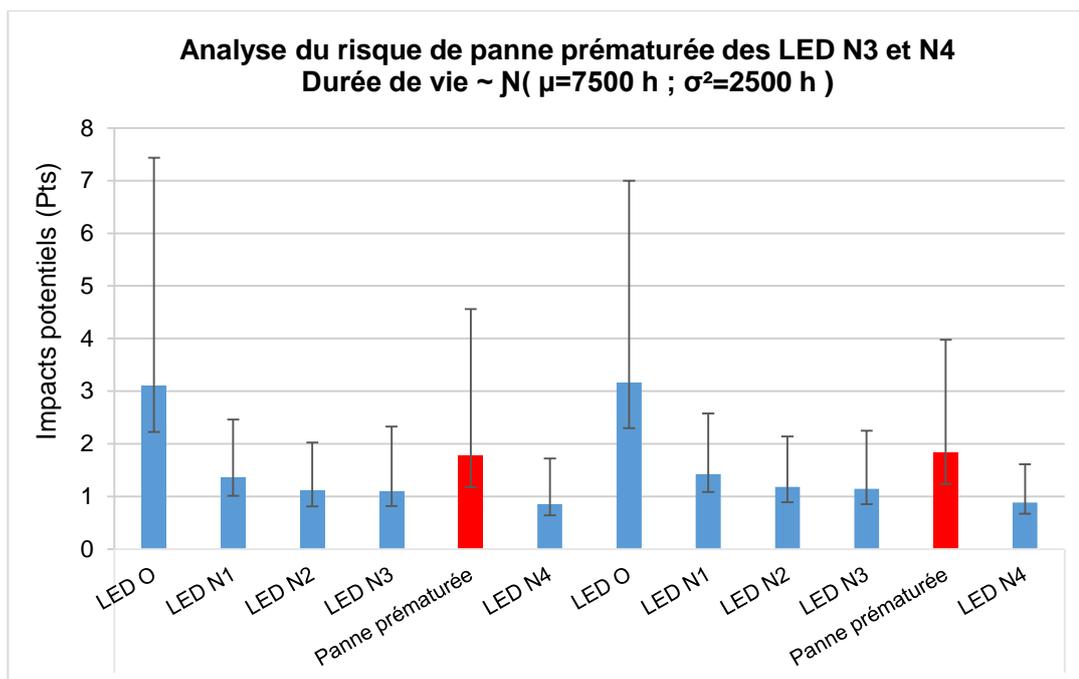


Figure 37. Analyse du risque de panne prématurée des lampes N3 et N4 en France (FR) et en Nouvelle-Zélande (NZ).

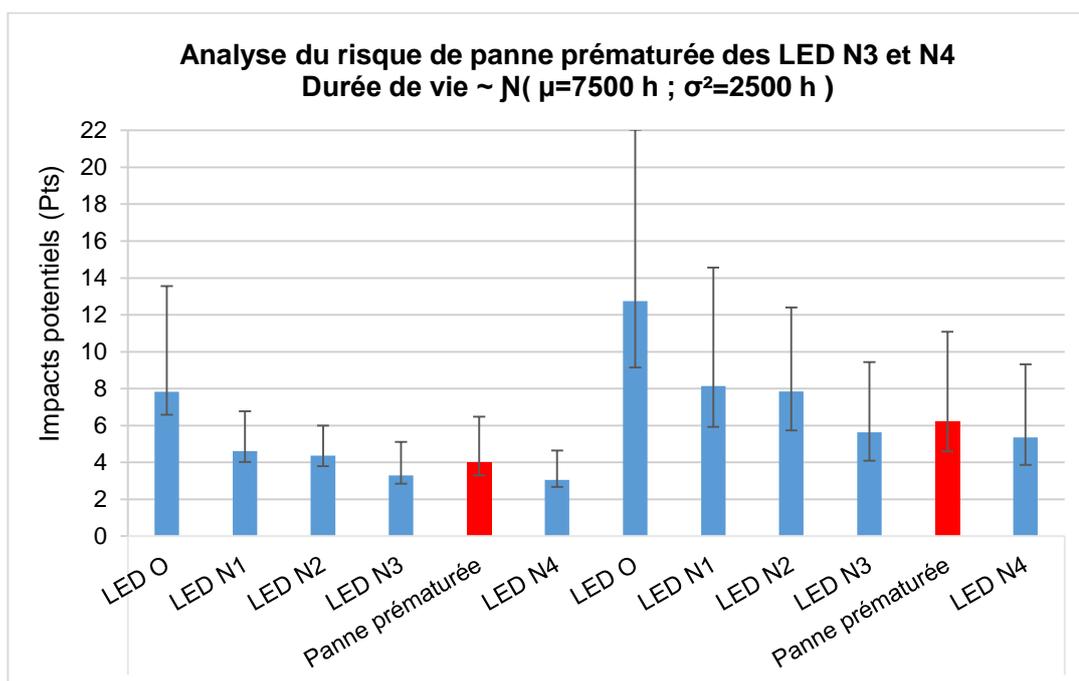


Figure 38. Analyse du risque de panne prématurée des lampes N3 et N4 en Union Européenne (EU) et en Australie (AU).

En France et en Nouvelle-Zélande, l'analyse de sensibilité montre une augmentation considérable des impacts potentiels. En France, la médiane des impacts potentiels passe de 1,03 Pts (LED N3), ou de 0,85 Pts (LED N4), à 1,77 Pts pour le scénario de panne prématurée. Ceci représente une augmentation des impacts potentiels de 72% par rapport à la LED N3 et de 108% par rapport à la LED

N4. En Nouvelle-Zélande, les résultats sont similaires. On constate une augmentation des impacts potentiels de 59 % pour la LED N3 (de 1,15 Pts à 1,83 Pts) et une augmentation de 108 % pour la LED N4 (de 0,88 Pts à 1,83 Pts). La sensibilité élevée par rapport à la durée de vie des lampes est alors confirmée pour ces deux pays et leurs profils de mix électrique (nucléaire et renouvelable). Les résultats sont même préoccupants tant ils annihilent les gains réalisés grâce à l'amélioration de l'efficacité des lampes. En effet les impacts potentiels du scénario de panne prématurée, sont alors supérieurs à ceux des LEDs N1 et N2, même s'il reste heureusement inférieur à ceux des LEDs O, les moins performantes qui ont été analysées dans ces scénarios. On remarque cependant une augmentation considérable des incertitudes pour le scénario de panne prématurée qui pourrait dans certains cas élever les impacts potentiels à des niveaux supérieurs à ceux de la LED O. Ces résultats montrent à quel point la fiabilité des lampes LEDs est importante dans des pays comme la France et la Nouvelle-Zélande. Il est primordial que les consommateurs soient orientés vers des lampes de bonne qualité, et pour ceci il est nécessaire que le processus de fabrication des lampes soit soumis à des suivis de qualité rigoureux et que les fabricants ou importateurs puissent se justifier de la fiabilité de leur produit (ou que ce soit vérifié de manière indépendante). Du point de vue des consommateurs, et même s'il est particulièrement difficile de corréliser le prix de vente à la fiabilité de la lampe, il semble évident que lorsque le prix d'acquisition du produit est particulièrement bas (utilisation de matériaux moins coûteux et de moins bonne qualité), la fiabilité de la lampe s'en ressent. En revanche, un prix d'acquisition élevé, ne peut pas être la seule garantie d'un produit fiable. Un standard de qualité, qui reste à définir, mais dont le but serait d'assurer aux consommateurs la fiabilité des lampes permettrait de limiter grandement les risques de panne catastrophique, et pourrait éviter une augmentation considérable des impacts potentiels des systèmes LEDs. La tendance, allant vers une décarbonation de nos économies, va continuer d'exacerber la sensibilité des lampes LEDs à la durée de vie, et il paraît judicieux de s'en prémunir dès que possible.

En revanche, en Australie et en Europe, l'analyse de sensibilité montre que les impacts potentiels des lampes ne sont que faiblement augmentés, et que même une panne prématurée ne remet pas en cause la performance des LEDs N3 et N4 par rapport aux LEDs N1 et N2. En Australie la médiane des impacts potentiels passe respectivement de 5,63 Pts et de 5,36 Pts pour les lampes N3 et N4 à 6,24 Pts pour le scénario de panne prématurée. Ceci représente une augmentation des impacts potentiels de 11% pour la LED N3 et de 16% pour la LED N4. A l'échelle

européenne, on constate une augmentation des impacts potentiels de 21% pour la LED N3 (de 3,30 Pts à 4,01 Pts) et une augmentation de 31% pour la LED N4 (de 3,05 Pts à 4,01 Pts). Ces résultats confirment une sensibilité plus faible aux aspects de durabilité pour des pays avec des mix fortement carbonés (Australie) ou mixtes (Union Européenne). Non seulement l'augmentation des impacts potentiels en valeur absolue est plus faible que pour la France et la Nouvelle-Zélande, mais, hors incertitudes, cette augmentation ne change pas le fait que les lampes N3 et N4 même peu fiables soient plus performantes que les LEDs N1 et N2. Même dans le pire des scénarios, elles restent largement plus performantes que la LED O. On constate cependant que cette augmentation est proportionnellement bien plus importante à l'échelle Européenne qu'en Australie, ce qui confirme la dynamique d'augmentation de sensibilité à la durée de vie quand le mix électrique se décarbonise. Toutefois, ce constat peut être également vu comme une opportunité de proposer des lampes LEDs avec une durée de vie réduite dans les régions avec des mix électriques fortement carbonés. Ceci aurait deux intérêts majeurs : permettre un renouvellement des produits plus rapide, ce qui garantit un certain maintien de l'activité pour les fabricants de lampes, mais également permettre aux consommateurs de disposer de lampes à un prix réduit et de pouvoir profiter plus régulièrement des innovations et améliorations liées à l'efficacité des lampes qui se répercute directement sur la réduction des impacts potentiels. Ce constat avait déjà été mis en évidence [206] et est ici confirmé. Il est cependant indispensable, qu'en cas de distribution de lampes LEDs avec des durées de vie réduites, que de nombreux efforts soit consentis pour améliorer le processus de fin de vie (collecte, recyclage, circularité) et éviter le gaspillage de ressource minérale précieuse. Il semble ainsi nécessaire de disposer de deux types de marchés qui devraient cibler les pays notamment en fonction de leur mix électrique, mais également d'informer correctement les consommateurs, pour s'assurer d'une lutte efficace en limitant les impacts potentiels des systèmes d'éclairage à LED. En revanche, quel que soient les pays et les mix électriques, ces différentes sensibilités à la durée de vie peuvent également être une opportunité pour innover dans la direction des lampes modulaires. On pourrait imaginer upgrader progressivement les lampes en fonction des derniers progrès de l'efficacité tout en limitant l'utilisation de ressource minérale précieuse, mais également faire apparaître des métiers et des circuits axés sur la modularité, la réparation et la circularité. Ceci aurait pour effet de prolonger la durée de vie d'une partie des composants ce qui permettrait d'être gagnant sur tous les tableaux quel que soit la typologie des mix électriques.

6.1.10.2 Constant Lumen Output (CLO)

Après avoir testé l'hypothèse de sensibilité à la durée de vie, les paragraphes suivants testent l'hypothèse de sensibilité à l'efficacité lumineuse grâce à une étude de la fonctionnalité « Constant Lumen Output » (CLO) qui peut permettre d'économiser 15% d'énergie pour un service rendu par la lampe identique.

Le CLO est une fonctionnalité qui doit encore être perfectionnée et qui n'est pour l'instant disponible que sur très peu de produits, mais qui gagne en popularité auprès des professionnels de l'éclairage en raison de sa capacité à économiser de l'énergie tout en maintenant un flux lumineux constant pendant toute la durée de vie des lampes LEDs. Pour une lampe LED L70, le CLO compense la dépréciation lumineuse en ajustant la consommation électrique. L'alimentation est ajustée à 70% au début de la durée de vie de la lampe, et augmentera progressivement jusqu'à 100% à la fin de la durée de vie prévue. Le flux lumineux est maintenu à un niveau constant à 70 % de sa valeur initiale et ceci pendant toute la durée de vie de la lampe. Le CLO maintient le même rendement lumineux qu'une LED équivalente sans CLO mais avec une réduction globale de 15% de la consommation d'énergie (Figure 39).

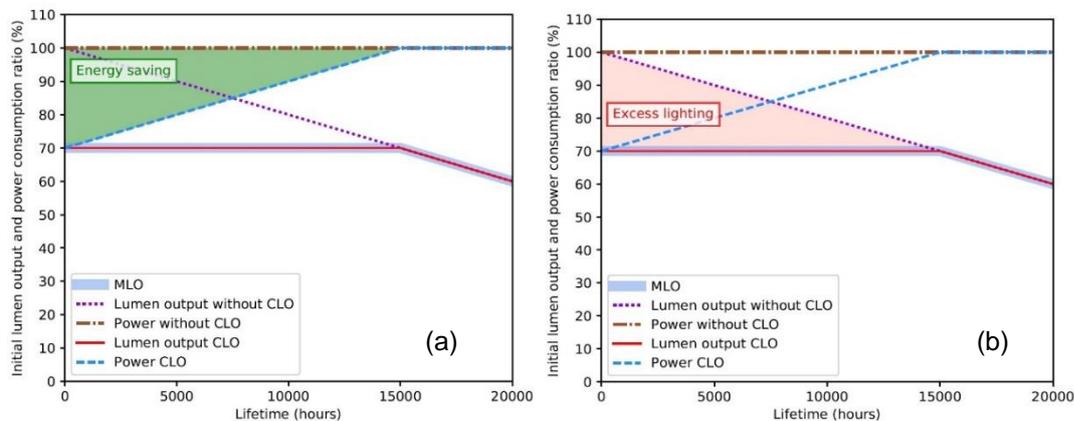


Figure 39. Flux lumineux et consommation d'énergie pour une lampe LED L70 avec une durée de vie de 15000h avec et sans la fonctionnalité CLO (a) Economie d'énergie avec le CLO (b) Excès de flux lumineux sans le CLO.

La dégradation du flux lumineux a été considérée comme linéaire et une réduction de la consommation électrique globale de 15% a tout d'abord été appliquée (Tableau 9).

Tableau 9. Réduction de la consommation d'énergie grâce à la fonctionnalité CLO.

	LED O	LED N1	LED N2	LED N3	LED N4
Sans CLO	282,1	200,0	200,0	134,0	134,0
Avec CLO	239,8	170,0	170,0	113,9	113,9

La meilleure manière d'intégrer techniquement cette fonctionnalité aux lampes n'est pas encore figée (en se basant sur les prédictions de dépréciation lumineuse des fabricants, ou bien grâce à un système de mesure intégré directement dans la lampe) et d'autres problématiques comme la gestion thermique de ce genre de dispositif doivent être encore résolues avant de voir apparaître le CLO sur des ampoules pour un usage résidentiel ou tertiaire [221]. La pertinence de cette solution a donc été évaluée en conservant les inventaires de chaque lampe inchangés. Dans un premier temps, ces inventaires ont été utilisés comme une base de comparaison pour estimer la réduction relative des impacts potentiels induits par les économies d'énergie réalisées grâce au CLO (Tableau 10). Cette réduction est exprimée en % selon l'équation suivante :

$$Gain(N_i) = 1 - \frac{\text{Impacts lampe } N_i \text{ avec CLO}}{\text{Impacts lampe } N_i \text{ sans CLO}} \quad (\text{Équation 12})$$

Tableau 10. Réduction des impacts potentiels avec la fonctionnalité CLO. Exprimé en % des impacts potentiels de la même lampe sans la fonctionnalité CLO.

	Australie	Union Européenne	France	Nouvelle-Zélande
LED O CLO	12,3	10,9	4,4	4,6
LED N1 CLO	13,7	13,2	7,4	7,6
LED N2 CLO	14,2	14,1	9,3	9,5
LED N3 CLO	13,2	12,4	6,1	6,3
LED N4 CLO	13,9	13,5	8,0	8,2

Dans un second temps, les inventaires références ont été utilisés pour estimer l'augmentation maximale envisageable des impacts de la phase de fabrication (Tableau 11). Cette valeur est exprimée en % et représente le seuil de l'augmentation relative des impacts de fabrication à ne pas dépasser, afin de garantir que les impacts des composants ajoutés au système (que ce soit des capteurs de mesure en temps réels ou une programmation de compensation intégrée dans la lampe) soient compensés par les économies d'énergie (Équation 13).

$$Seuil(N_i) = \frac{\text{Impacts lampe } N_i \text{ sans CLO} - \text{Impacts lampe } N_i \text{ avec CLO}}{\text{Impacts de fabrication lampe } N_i \text{ sans CLO}} \quad (\text{Équation 13})$$

Tableau 11. Augmentation maximale envisageable de la contribution de la phase de fabrication compensée par la réduction de la consommation d'énergie. Exprimé en Pts et en % (Equation 13).

	AU		UE		FR		NZ	
	Pts	%	Pts	%	Pts	%	Pts	%
LED O	1,66	71,6	0,91	39,1	0,16	6,8	0,16	7,2
LED N1	1,18	172,8	0,64	94,6	0,11	16,3	0,12	17,3
LED N2	1,18	287,9	0,64	157,6	0,11	27,2	0,12	28,9
LED N3	0,79	117,7	0,43	64,4	0,07	11,1	0,08	11,8
LED N4	0,79	196,2	0,43	107,4	0,07	18,6	0,08	19,7

Le Tableau 10 et le Tableau 11 permettent ainsi d'évaluer l'efficacité de cette solution mais également les contraintes matérielles pour qu'elle soit pertinente en fonction des différents mix électriques. La réduction des impacts potentiels est comprise entre 12,3% et 14,2% en Australie, entre 10,9 et 14,1% en Union Européenne, entre 4,4 et 9,3% en France et entre 4,6 et 9,5% en Nouvelle-Zélande. On constate donc que l'effet de la réduction de la consommation d'énergie de 15% sur la diminution des impacts potentiels des lampes est plus important pour l'Australie et l'Union Européenne ce qui confirme la sensibilité accrue à l'efficacité pour ces deux typologies de mix électrique. Le CLO reste tout de même digne d'intérêt pour les mix faiblement carbonés tellement toute économie d'énergie est bonne à prendre dans le cadre notamment de l'électrification de nombreux usages aujourd'hui réservés aux énergies fossiles.

Cependant ces économies d'énergie ne peuvent pas être réalisées à n'importe quel prix. Le Tableau 11 montre en effet que le seuil d'augmentation des impacts de la phase de fabrication varie grandement en fonction des typologies de mix électriques. Alors qu'il varie de 71,6% à 287,9% pour l'Australie, et de 39,1% à 157,6% pour l'Union Européenne, ce qui laisse une marge considérable pour l'utilisation de composants supplémentaires intégrés à la lampe, les contraintes matérielles pour la France (entre 6,8% et 27,2%) et la Nouvelle-Zélande (entre 7,2% et 28,9%) sont beaucoup moins permissives (de l'ordre de 10 fois moins que pour l'Australie). On retrouve ici un des symptômes déjà évoqués auparavant qui concernaient les usages du numérique ou des Smart lampes pour un usage résidentiel (Cf. §4.4). De plus les seuils présentés sont ceux qui, lorsqu'ils sont atteints, ramèneraient les impacts potentiels à un niveau identique aux lampes sans la fonctionnalité CLO. Ceci n'aurait alors pour effet que de déplacer les impacts environnementaux de ceux de la consommation d'énergie, vers ceux de l'exploitation et la transformation des matières premières, sans réduire les impacts totaux générés. Il est donc primordial que le choix des techniques et des composants nécessaires au CLO permettent de rester largement en dessous de ces seuils pour présenter un réel avantage en termes d'impacts environnementaux. Cela semble facilement réalisable pour les mix électriques fossiles et mixtes, mais plus difficile pour les mix nucléaires et renouvelables.

Enfin il est important de considérer d'autres aspects positifs du CLO qui ne sont pas visibles à travers l'analyse des impacts environnementaux. Les avantages d'un flux lumineux constant sur la perception, le confort et le bien-être des personnes

ne sont par exemple pas pris en compte. D'autres aspects liés au comportement des usagers sont également à considérer. Par exemple, un produit à longue durée de vie peut être remplacé avant sa fin de vie pour plusieurs raisons : les locaux arrivent en fin de vie ou sont rénovés, le produit devient obsolète ou démodé, ou des innovations permettent de plus grandes économies d'énergies [201]. La dépréciation du flux lumineux et la mauvaise définition du flux lumineux maintenu peut également inciter les gens à sous-utiliser les lampes à LED : les utilisateurs remplacent leurs lampes à LED lorsqu'ils remarquent une diminution de l'éclairage en dessous de leurs attentes. Bien que ce comportement puisse être considéré comme normal, le problème réside dans le fait que le moment où les utilisateurs changent leurs lampes ne coïncide pas nécessairement avec la fin de vie théorique (L70, c'est-à-dire le temps nécessaire pour que le rendement lumineux diminue à 70 % de sa valeur initiale [215], [216]). Le CLO permet d'atténuer ce comportement en indiquant plus précisément le moment où la durée de vie nominale d'une LED est atteinte (c'est-à-dire le moment où la dépréciation du flux lumineux sera réellement perceptible), et pourrait garantir une utilisation optimale des LEDs. Alors que l'intérêt du CLO semble évident pour des mix électriques carbonés, il est important de considérer tous ces aspects pour déterminer l'efficacité réelle de cette fonctionnalité face à la décarbonation progressive des moyens de production d'électricité.

6.1.10.3 *Comparaison entre les impacts potentiels totaux.*

Les ACV réalisées pour chaque mix énergétique ont mis en évidence différentes typologies de répartition des impacts potentiels et différentes sensibilités soit à l'efficacité soit à la durée de vie. Toutefois, il est également nécessaire de prendre un peu de recul pour évaluer les différences en termes d'impacts potentiels totaux générés par les différents systèmes d'éclairage dans les différents pays. En effet, les résultats présentés par pays et avec des échelles différentes pour chacun ne nous permet pas de visualiser et de comparer correctement comment une même lampe va être plus ou moins impactante en fonction du pays d'utilisation. Ceci pour permettre de mieux réaliser les enjeux environnementaux autour de l'adoption de différents systèmes.

La Figure 40 ci-dessous met en évidence ces différences en présentant les impacts totaux potentiels pour chaque zone géographique en utilisant la même échelle.

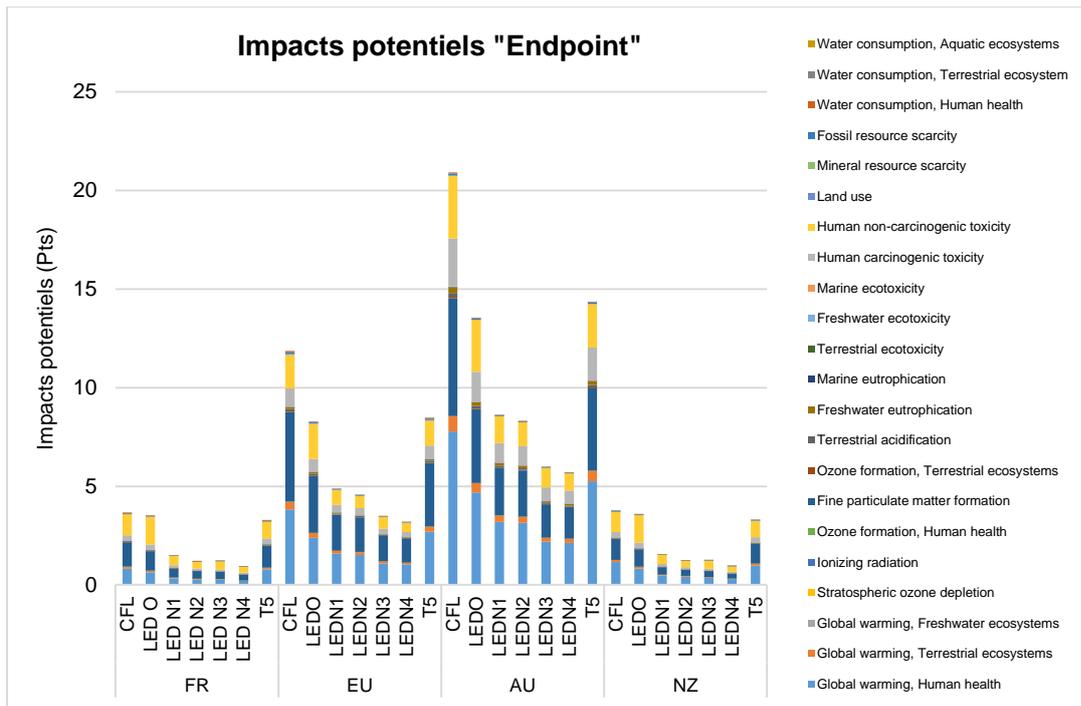


Figure 40. Impacts potentiels totaux pour toutes les zones géographiques étudiées.

On se rend alors compte de différences considérables en fonction de mix électriques considérés. Les lampes CFL les moins performantes en France et en Nouvelle-Zélande sont par exemple aussi performantes que les LEDs N4 à l'échelle européenne, et plus performante que n'importe quelle autre lampe en Australie. Alors qu'en France et en Nouvelle-Zélande, les impacts potentiels totaux sont du même ordre de grandeur, grâce à leur mix respectivement essentiellement nucléaire et renouvelable, on retrouve ensuite l'Union Européenne avec des impacts potentiels environ 3 fois supérieurs et l'Australie avec des impacts potentiels 4 à 6 fois supérieurs. Alors qu'il est toujours intéressant d'optimiser la situation quelle que soit la zone géographique, les enjeux autour de l'adoption des lampes les plus efficaces sont d'autant plus importants pour des mix électriques hybrides et fortement carbonés. Pour donner une échelle de grandeur, le passage d'une LED type O à une LED type N1 en Europe, est équivalent à la suppression de 2 sources lumineuses type LED N1 en France ou en Nouvelle-Zélande. Le même changement en Australie serait équivalent à la suppression de 3,5 sources lumineuses. A l'échelle d'un pays avec plusieurs milliards de sources, on imagine assez aisément à quel point le choix un système d'éclairage adéquat peut contribuer à la lutte contre le dérèglement climatique ainsi que contre les perturbations et les dégradations des écosystèmes.

6.1.11 Conclusion

La méthodologie d'analyse du cycle de vie a été utilisée pour évaluer la performance des systèmes d'éclairage pour un usage résidentiel ou tertiaire pour quatre mix électriques différents (charbon, nucléaire, renouvelable et mixte). Le facteur de perte de lumière a été introduit pour prendre en compte l'usage réel du produit et pour être conforme aux normes et pratiques de l'éclairage intérieur. Grâce au facteur de perte de lumière, le flux lumineux maintenu a été défini pour chaque système d'éclairage et une analyse du cycle de vie a été réalisée en utilisant le Mégalumen.heure maintenu comme unité fonctionnelle.

Tout d'abord, l'évaluation de l'impact du cycle de vie montre que quel que soit le mix considéré la CFL est le système le plus impactant. Elle est suivie par le T5 et la LED O (durée de vie de 15000 h et efficacité de 94 lm/W) qui génèrent des impacts potentiels assez proches. Pour réduire significativement les impacts environnementaux par rapport à ces trois lampes, il est préférable de s'orienter vers des lampes LEDs avec une efficacité lumineuse d'au moins 134 lm/W (LED N1 à 4). Une meilleure information pour les consommateurs, par exemple en rendant obligatoire l'affichage de l'efficacité des lampes sur leur emballage, pourrait permettre de les orienter plus facilement vers les lampes les plus performantes.

Ensuite l'étude a mis en évidence un point de bascule relatif à la répartition des impacts potentiels des phases d'utilisation et de fabrication, qui dépend principalement des mix électriques utilisés. La présence de ce point de bascule a ensuite permis de déterminer une sensibilité accrue à l'efficacité pour les mix carbonés et une sensibilité plutôt orientée sur la durabilité pour les mix plus propres. Cette différence a été confirmée grâce au scénario de panne prématurée pour la France et la Nouvelle-Zélande puis par le scénario prenant en compte l'intégration de la fonctionnalité CLO pour l'Union européenne et l'Australie.

Ces différents scénarios permettent finalement d'orienter l'innovation autour des systèmes d'éclairage dans différentes directions. Tout d'abord il est nécessaire de mettre en place des processus (normes, réglementation, suivie de qualité) qui permettent de certifier la fiabilité des lampes et de limiter le phénomène de panne critique, qui selon les conditions peut potentiellement conduire à des impacts environnementaux supérieurs, comparables à ceux des lampes de génération précédente (LED O, CFL et T5). Ensuite une fonctionnalité comme le CLO présente un intérêt certain quel que soit le mix électrique car elle permet de réduire la consommation d'énergie pour un service fourni par la lampe similaire. Toutefois, il

est important que cette fonctionnalité soit intégrée en prenant en compte le seuil d'augmentation des impacts de la phase de fabrication qui est compensable par les économies d'énergies. Alors que ce seuil est relativement permissif pour les mix carbonés, il est beaucoup plus contraignant pour des pays comme la France et la Nouvelle-Zélande. La situation la plus contraignante doit donc être considérée pour les futurs développements de cette fonctionnalité, sans quoi la décarbonisation progressive des moyens de production d'énergie pourrait la rendre inefficace dans un nombre croissant de pays. La réduction de la consommation globale d'énergie et l'amélioration de l'efficacité de nos usages, sont deux composantes essentielles de la transition énergétique et sociétale qui doit répondre aux enjeux de l'Anthropocène, cependant, il est également nécessaire de limiter l'utilisation des matières premières critiques, pour lesquelles des tensions pourraient rapidement apparaître. L'ensemble de ces aspects peuvent également être l'opportunité pour des lampes LEDs avec des durées de vie réduite tant que l'efficacité continue d'augmenter rapidement, ou encore pour des innovations plus disruptives qui cherchent à développer la modularité et la réparabilité, qui présenteraient des avantages environnementaux et socio-économiques conséquents.

6.2 Optimum de durabilité économique

6.2.1 Méthodes

Alors que l'ACV des systèmes d'éclairage a mis en évidence des sensibilités différentes à la durabilité et à l'efficacité en fonction des différents pays, il est intéressant de vérifier si la tendance de réduction des impacts environnementaux en France grâce à une plus grande durabilité des lampes est également valable d'un point de vue économique. La méthodologie du CCV et plus particulièrement celle du CCV le plus bas (« Least Life Cycle Cost ») défini par la directive Eco-design 2009/125/EC [92] et mise en pratique par Richter et al. [222] permet de définir l'optimum économique pour la durée de vie en cherchant à minimiser le coût total annuel à la charge du consommateur. Les équations présentées dans le §5.1.3 (Équation 4 et Équation 6) permettent de définir l'équation 14 et ainsi d'exprimer le rapport $\frac{CCV}{PWF}$ en fonction du prix d'acquisition et de la durée de vie (inclus dans le PWF) :

$$PWF = \frac{1 - \frac{1}{(1+d)^N}}{d} \quad (\text{Équation 4})$$

$$CCV = PP + PWF \cdot P_E \cdot CEA \quad (\text{Équation 6})$$

$$\frac{CCV}{PWF} = \frac{PP}{PWF} + P_E \cdot CEA \quad (\text{Équation 14})$$

Le rapport $\frac{CCV}{PWF}$ correspond au coût total annuel de la lampe en prenant en compte que celui-ci n'est pas linéaire et évolue au fur et à mesure du temps, grâce au taux d'actualisation. Afin d'optimiser ce rapport au minimum il est nécessaire de minimiser chacun de ses termes. En ce qui concerne le coût annuel d'alimentation ($P_E \cdot CEA$) il est dépendant du coût de l'électricité et de l'efficacité de la lampe. Dans tous les cas, plus elle est efficace plus ce rapport sera faible. L'équation 5 qui intègre la variation des coûts d'exploitation n'a pas été retenue car elle ne permet pas d'appliquer la démarche pour définir l'optimum de durée de vie.

La méthode du CCV le plus bas se concentre sur l'optimisation du rapport $\frac{PP}{PWF}$ qui permet de déterminer la durée de vie qui réduit au minimum le coût total annuel de la lampe indépendamment de la consommation d'énergie et de l'efficacité.

6.2.2 Données

Tout d'abord, les données relatives à la durée de vie, au prix, à l'efficacité, à la température de couleur (CCT) et au flux lumineux des différents modèles de lampes disponibles sur le marché français ont été récupérées, grâce à un robot d'indexation (« Web crawling ») qui permet d'explorer le web. Les données ont été récoltées en juillet 2021 en filtrant les lampes les plus communes pour l'éclairage d'intérieur (E27, E25 et B22). Le Tableau 12 récapitule les données de 701 lampes qui ont pu être récoltées par le robot d'indexation ainsi que la manière dont elles ont été regroupées. Pour chaque paramètre, la moyenne, le minimum et le maximum sont précisés.

Tableau 12. Regroupement des données du « web crawling »

Durée de vie (h)		≤ 10000	15000	20000	25000	≥ 30000
Nombre		n = 3	n = 564	n = 7	n = 83	n = 44
Prix TTC (€)	Moy.	4,64	8,14	15,02	13,79	56,03
	[Min-Max]	[4,56-4,68]	[1,55-79,9]	[3,3-22,2]	[3,14-48,9]	[6,3-132,8]
Efficacité (lm/W)	Moy.	82,7	105,6	82,7	93,0	136
	[Min-Max]	[70-89]	[22-156]	[58-70]	[55-166]	[75-222]
Flux lumineux (lm)	Moy.	283,3	763,3	283,3	1162	3068
	[Min-Max]	[250-350]	[50-5000]	[210-410]	[250-6000]	[2200-4000]
CCT (K)	Moy.	4600	2917	2700	2715	3181
	[Min-Max]	[2700-6500]	[1800-6500]	[2700-2700]	[2200-4000]	[2200-4000]

On remarque que la majorité des lampes ont une durée de vie de 15000h. La moyenne de durée de vie pour l'ensemble des lampes est de 17150 h. La moyenne des flux lumineux est de 938 lm et celle des efficacités est de 104,9 lm/W. On remarque une tendance à l'augmentation du prix, du flux lumineux et de l'efficacité en fonction de la durée de vie. Pour vérifier cette tendance, une analyse du coefficient de corrélation de Pearson a été réalisée avec l'ensemble des données en considérant un niveau de signification de 0,05 (Figure 41).

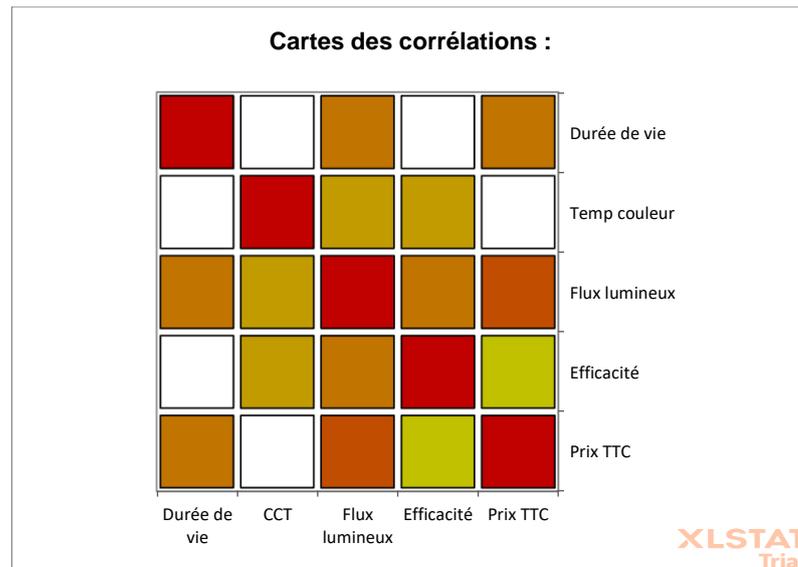


Figure 41. Carte des corrélations avec un niveau de signification $\alpha=0.05$

La carte de corrélation s'appuie sur une échelle de couleurs allant du bleu au rouge (échelle froid-chaud) pour l'affichage des corrélations. La couleur bleue correspond à une corrélation négative proche de -1 et la couleur rouge correspond à une corrélation positive proche de 1. Une certaine corrélation entre la durée de vie et le flux lumineux semble ici confirmée (0,430). Lorsqu'on s'intéresse en particulier aux corrélations avec le prix TTC, on remarque une corrélation relativement forte avec le flux lumineux (0,627), et une corrélation plus faible avec la durée de vie (0,487). En revanche, il n'y a pas de corrélation avec l'efficacité lumineuse (0,159) ou la température de couleur (0,029). Il est surprenant de constater que l'efficacité ne soit pas corrélée au prix TTC alors qu'il s'agit d'un des paramètres les plus importants pour juger des performances d'une lampe LED.

Les coefficients de régression des prix TTC en fonction de la durée de vie ont ensuite été déterminés pour chaque groupement de lampe à l'aide d'une analyse de la variance (ANOVA). L'ensemble des coefficients et des informations relatives à l'analyse de variance sont détaillés dans le Tableau 13.

Tableau 13. Coefficients de régression des prix

Durée de vie	Valeur	Erreur standard	t	Pr > t	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)
≤10000	1,535	0,429	3,574	0,000	0,691	2,378
15000	0,107	0,198	0,542	0,588	-0,281	0,496
20000	0,121	0,059	2,051	0,041	0,005	0,237
25000	0,308	0,164	1,881	0,060	-0,013	0,629
≥30000	0,543	0,125	4,355	<0,0001	0,298	0,788

6.2.3 Résultats

Les coefficients de régression des prix ont ensuite été utilisés pour calculer le rapport $\frac{PP}{PWF}$ en fonction de différents niveaux d'utilisation annuel des lampes. En effet le PWF dépend de N, la durée de vie en année de la lampe, qui dépend elle-même du nombre d'heures d'utilisation par an. Trois différents profils correspondant à des utilisations de 1000, 2000 et 4000 h par an ont ainsi été testés. Le taux d'actualisation « d » a tout d'abord été fixé à 4% tel que préconisé par la directive Eco-design 2009/125/EC [92] et le rapport Lebègue [93]. Les variations de $\frac{PP}{PWF}$ en fonction de la durée de vie et des différents profils d'utilisation sont représentées dans le Figure 42 ci-dessous.

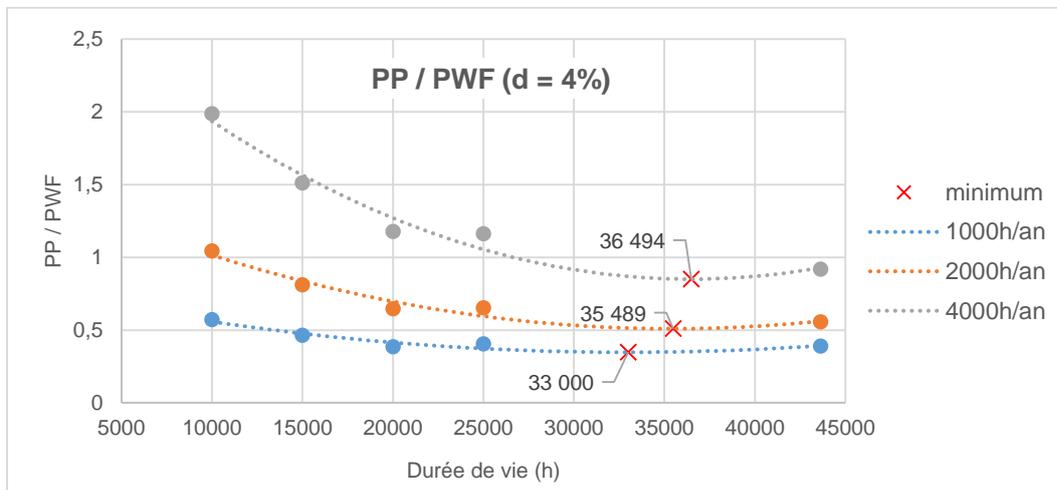


Figure 42. Optimisation du coût annuel en fonction de la durée de vie.

Le minimum de chaque courbe, qui correspond alors à la durée de vie optimale pour chaque scénario d'utilisation annuelle, est indiqué sur la Figure 42. En supposant que l'autre facteur du CCV lié à la consommation d'énergie soit également optimisé, ces durées de vie donneraient à leur tour les valeurs optimisées pour le CCV le plus bas. L'erreur statistique des régressions polynomiales ne permet pas de calculer les optimums avec précision, mais on peut tout de même l'approximer de manière indicative. Cette approximation montre que la durée de vie optimale pour l'ensemble des LEDs analysées se situe entre 33000 et 36000 heures. Cette durée de vie optimale s'allonge légèrement lorsque les lampes sont utilisées plus intensément. À titre de comparaison, la durée de vie moyenne des données collectées dans l'échantillon est d'environ deux fois moins (17150 heures). Ceci montre que les consommateurs en France auraient un intérêt économique, en plus de l'intérêt environnemental démontré grâce à l'ACV, à ce que les fabricants de lampes LEDs proposent des produits avec des durées de vie plus longues.

6.2.4 Discussions

Afin de discuter de l'influence du taux d'actualisation sur la définition de l'optimum de durée de vie, deux scénarios supplémentaires ont été analysés avec un taux d'actualisation de 2% et de 8%. Le taux d'actualisation est utilisé pour escompter un flux futur et calculer sa valeur actuelle équivalente. Il permet de calculer la valeur actuelle d'un actif en reflétant le niveau de risque des flux futurs qu'il génère. Retenir un taux d'actualisation permet d'évaluer les coûts et bénéfices d'un projet lorsqu'ils ne se produisent pas au même moment, de la même manière qu'un taux de change permet de comparer les coûts et bénéfices d'un projet exprimés dans des monnaies différentes.

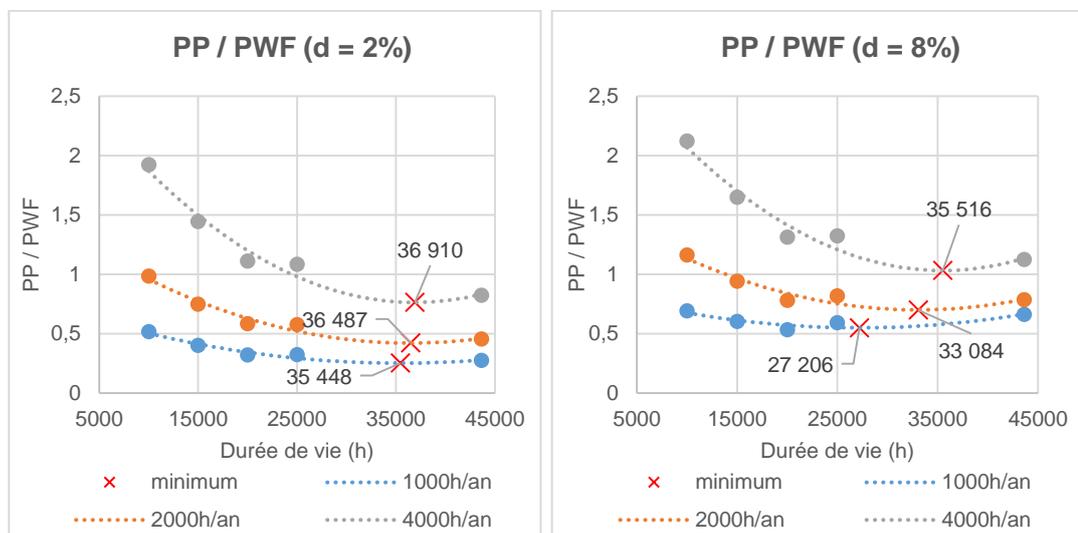


Figure 43. Optimisation du coût annuel en fonction de la durée de vie pour un taux d'actualisation égale à 2% ou 8%.

Dans une étude précédente en Suède et au Danemark [222], il a été mis en évidence qu'une augmentation du taux d'actualisation réduisait l'optimum de durée de vie et inversement. Avec un taux d'actualisation égal à 2%, on constate que la durée de vie optimale approximative augmente légèrement pour tous les scénarios. Toutefois cette augmentation est très faible, ce qui, compte tenu des incertitudes et des marges d'erreur de la méthode, ne semble pas confirmer que la réduction du taux d'actualisation ait un effet important sur l'optimum de durée de vie en France. En revanche, on constate une réduction significative avec un taux d'actualisation de 8% pour le scénario d'utilisation à 1000 heures par année (de 33000 h à 27206 h). Pour les deux autres scénarios, on constate une réduction de l'optimum de durée de vie mais dans des proportions moindres. Dans l'ensemble, le taux d'actualisation ne semble avoir qu'un effet modéré lorsque qu'il augmente ou diminue. Une augmentation de ce taux pourrait toutefois rapprocher l'optimum de durée de vie

vers des standards plus proches de 25000 h et donc des lampes actuellement disponibles sur le marché français.

Cette méthode est cependant grandement dépendante de l'uniformité des données récoltées. Alors que la grande majorité des lampes de l'échantillon dispose d'une durée de vie de 15000 h et que l'on constate une forte augmentation du flux lumineux pour les lampes avec une durée de vie supérieure à 30000 h, ces particularités pourraient avoir une influence sur la définition de l'optimum de durée de vie. De plus, de nombreuses lampes ont dû être retirées de l'échantillon de départ, car bien que présentes sur les sites de ventes en ligne balayés, elles n'étaient plus disponibles en stock et les informations concernant leur prix de vente n'étaient pas disponibles.

6.2.5 Conclusion

La méthode d'optimisation du CCV le plus bas a été utilisée pour évaluer l'optimum de durée de vie sur le marché français. L'analyse de variance (ANOVA) a permis de déterminer les coefficients de régression de la variable prix et d'exprimer le coût annualisé en fonction de la durée de vie. Cet optimum se trouve proche de 35000 h pour un taux d'actualisation de 2%, ce qui représente le double de la durée de vie moyenne des lampes de l'échantillon. Alors qu'en France la répartition des impacts environnementaux entre la phase de fabrication et d'utilisation navigue autour d'un point de bascule, il est intéressant de constater que le taux d'actualisation ne permet pas vraiment d'orienter le marché dans une direction ou une autre. Le seul effet réellement prouvé est celui d'une réduction de l'optimum pour les scénarios de faible utilisation annuelle (1000 h/an). Une réduction de l'optimum de durée de vie pourrait présenter un intérêt dans le cas d'une augmentation rapide et continue de l'efficacité des lampes afin de permettre au consommateur de pouvoir se rééquiper plus régulièrement avec les lampes les plus performantes. Toutefois, ce profil ressemble plus aux pays avec des mix électriques fortement carbonés ou des pays en développement qui n'ont pas encore adopté la technologie LED aussi fortement que c'est le cas en France. Les efficacités des derniers modèles de LEDs commerciales se sont récemment rapprochées des prévisions d'efficacité maximale prévues (autour de 250 lm/W), et le consommateur n'aura bientôt plus d'intérêt à renouveler ses systèmes d'éclairage rapidement pour gagner en efficacité. L'optimum approximatif démontré par le CCV le plus bas semble confirmer cette tendance. De plus ces résultats sont appuyés par l'ACV qui montre qu'en France les impacts environnementaux sont plus sensibles à une

augmentation de la durée de vie qu'à une augmentation d'efficacité. Ces résultats doivent inciter les fabricants de lampes à cibler certains marchés en proposant des lampes plus durables (qui sont de nature à durer) pour permettre une optimisation économique et environnementale de l'éclairage à LEDs. Le rôle des gouvernements est également à mettre en avant à travers par exemple la création de normes de qualité qui favoriserait la durabilité, mais également une information mieux relayée aux consommateurs sur ces aspects.

6.3 Analyse Multicritère des systèmes d'éclairage horticoles.

Cette troisième étude propose une analyse multicritère des systèmes d'éclairage horticole (HPS, MH et LED). Le cas d'étude correspondant à une serre commerciale est tout d'abord présenté et les paramètres pour définir les configurations d'installations des différents systèmes d'éclairage sont calculés. Les différents critères qui sont ensuite évalués sont :

- L'Analyse de Cycle de Vie qui considère deux unités fonctionnelles différentes, le PPFD et l'irradiance en fonction de différentes plages de longueur d'onde.
- La pollution lumineuse, qui a été évaluée en appliquant la méthode OSP au niveau des parois et à l'extérieur de la serre. On cherche alors à déterminer la distance de la serre à laquelle le seuil de 5 lux est atteint dans différents plans verticaux, horizontaux et latéraux.
- L'intérêt est économique, avec une étude de retour sur investissement

Note : Les travaux sur l'ACV et la pollution lumineuse de l'éclairage horticole ont été réalisés dans le cadre d'une collaboration avec Ceravision Unlimited et l'Institut pour la Conception et l'Ingénierie Environnementales de Londres.

Une analyse multicritère basée sur le processus d'analyse hiérarchique (AHP) permettra finalement de confronter l'avis de trois observateurs par rapport à ces critères pour définir lequel des trois systèmes d'éclairage est préférable en considérant les impacts environnementaux, les nuisances d'usages et l'intérêt économique simultanément.

6.3.1 Description du cas d'étude et données

6.3.1.1 Configuration de la serre commerciale

La superficie de la serre étudiée est de 50m x 81m. La hauteur totale de la serre est de 4m et la hauteur d'installation des luminaires est de 2m. Les propriétés des matériaux utilisés pour les murs, le toit et le sol sont détaillées dans le Tableau 14. Comme le conseillent les professionnels de l'éclairage horticole [223], toutes les parois latérales et le plafond sont constitués de matériaux transparents avec une transmittance de 100%. Il n'y a pas d'inter-réflexion de la lumière entre les différentes parois de la serre. Les parties métalliques de la serre ont été négligées pour ces calculs.

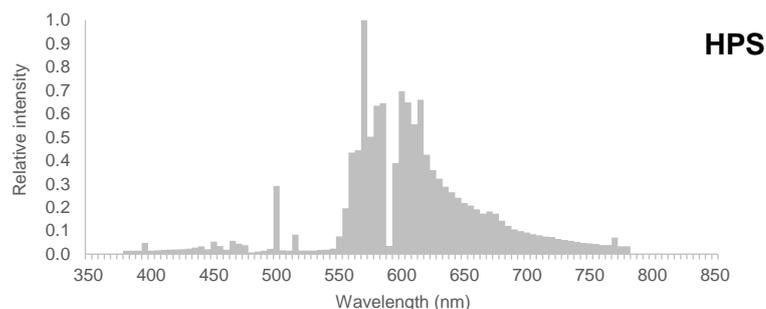
	Taille (m)	Matériaux	Transmittance	Réflectance
Toit	50 x 81	Verre	100%	0%
Murs latéraux (Largeur)	50 x 4	Verre	100%	0%
Murs latéraux (Longueur)	81 x 4	Verre	100%	0%
Sol	50 x 81	Feuille	0%	11 %

Tableau 14. Caractéristiques des parois et du sol de la serre commerciale

6.3.1.2 Les types de lampes étudiés : HPS, MH et LED

Pour cette étude, trois types de lampes communément utilisées pour l'éclairage horticole ont été retenues. Une lampe Sodium à Haute Pression (HPS) de 1000 W, une lampe à Halogénure Métallique (MH) de 1000 W et un luminaire LED de 285 W. Les lampes HPS et MH sont associées à un luminaire classique composé d'un réflecteur et d'un système de contrôle électronique.

La distribution de puissance spectrale de chaque lampe est présentée dans la Figure 44.



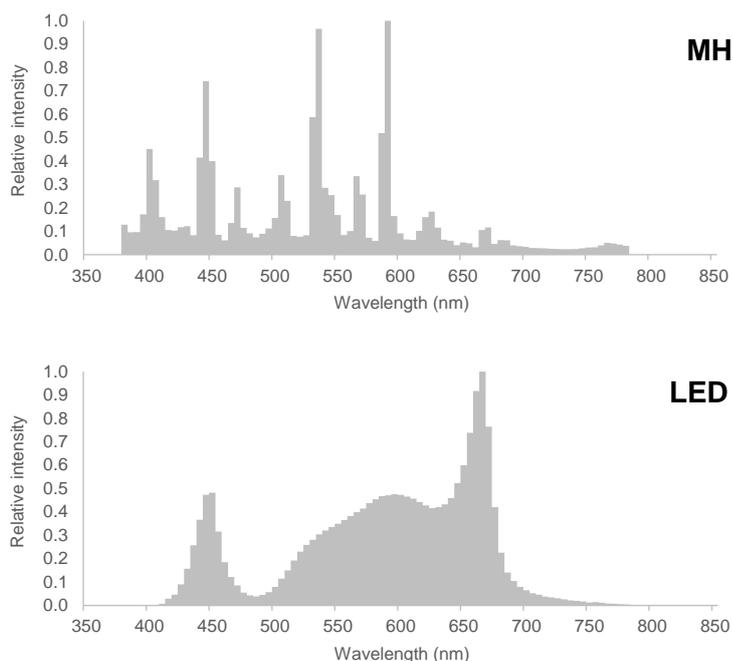


Figure 44. Distribution de puissance spectrale des lampes HPS, MH et LED.

Les distributions spectrales des lampes HPS et MH montrent une série de pics plutôt qu'une courbe lisse. Une grande proportion de la lumière est émise dans le vert et le rouge pour ces deux lampes, avec toutefois quelques pics dans le bleu pour la lampe MH. Ces deux lampes produisent donc de la lumière dans les longueurs d'onde où les plantes n'en font pas une utilisation optimale, ce qui conduit à un gaspillage d'une large quantité de lumière et d'énergie. En revanche, le luminaire LED montre une distribution spectrale plus lisse avec deux pics dans le bleu et le rouge tout en produisant moins de vert. Cette distribution spectrale semble mieux correspondre au spectre d'action photosynthétique et devrait permettre aux plantes de faire un meilleur usage de la lumière dont elle dispose.

L'irradiance (exprimée en $W.m^2$) de chaque lampe et pour différentes plages de longueur d'onde a ensuite été calculée puis fournie par Ceravision Unlimited et sont présentées dans le Tableau 15.

Tableau 15. Irradiance des différentes lampes par plage de longueur d'onde ($W.m^2$)

	HPS 1000W	LED 285W	MH 1000W
Densité énergétique	221,87	185,78	273,74
UV-A (315-400 nm)	0,5319	0	4,8861
Bleu (400-500 nm)	3,5310	9,3898	26,645
Vert (500-600 nm)	27,175	21,646	39,325
Rouge (600-700 nm)	30,937	30,147	10,318
Infrarouge (700-780 nm)	5,0005	1,2447	3,5034
PAR (400-700 nm)	61,643	61,183	76,288

Les irradiances calculées confirment l'importance de l'émission lumineuse dans le vert pour les lampes HPS et MH. Malgré le pic dans le bleu qui semblait plus important à partir de la représentation des distributions spectrales, l'irradiance du luminaire LED est plus faible que celle de la lampe MH. Dans le rouge les lampes HPS et LED sont les plus puissantes. Les lampes HPS et MH produisent des UV-A ce qui n'est pas le cas pour le luminaire LED. De même, dans la région infrarouge les lampes HPS et MH sont plus puissantes que le luminaire LED. Enfin lorsqu'on s'intéresse au PAR au complet (400-700nm) la MH est la lampe qui fournit le plus de puissance au mètre carré. Ces valeurs d'irradiance doivent cependant être mises en perspective avec la courbe d'absorption de la lumière de la plante que l'on cherche à cultiver. En effet, une plus grande irradiance montre que la plante va recevoir une plus grande quantité de lumière dans la longueur d'onde considérée, mais elle n'est pas forcément totalement absorbée, ce qui peut conduire à une baisse de l'efficacité globale de l'installation et un gaspillage d'énergie.

Les distributions photométriques sont présentées dans la Figure 45

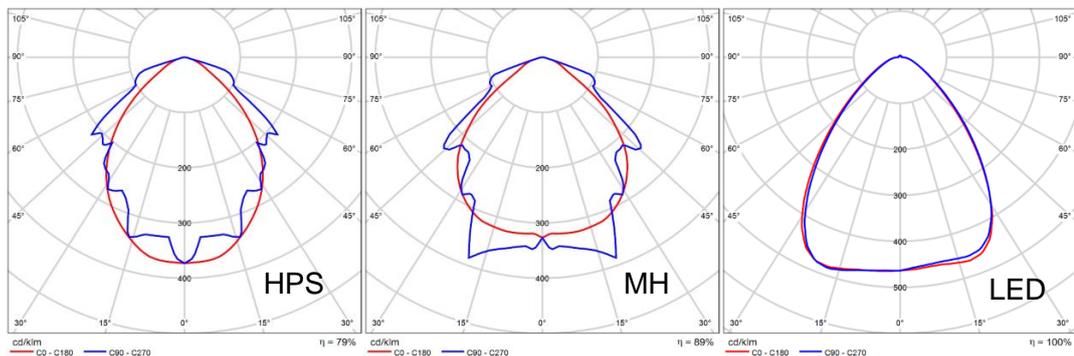


Figure 45. Distributions photométriques des luminaires HPS, MH et LED

6.3.1.3 Calculs et simulation de l'installation des systèmes d'éclairages

Les calculs suivants ont été réalisés par l'Institut pour la Conception et l'Ingénierie Environnementales de Londres. Pour calculer le nombre de luminaires nécessaires pour chaque type de luminaire, un processus basé sur une extension des méthodes de la CIE 40 [224] et de la CIE 52 [225] a été utilisé. Le processus a commencé par l'évaluation du rapport maximum entre l'espacement et la hauteur (SHR) des sources lumineuses qui permettaient une uniformité de 0,7 minimum en moyenne sur la culture en utilisant la méthode du Code SLL [226] et ceci pour un PPFD cible de $300 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$. Le SHR a été utilisé pour déterminer le nombre de luminaires nécessaires sur la longueur et la largeur de la serre afin que l'uniformité puisse être maintenue. En supposant un espacement régulier des luminaires avec

un demi-espacement sur les bords, il a été possible de déterminer l'emplacement des luminaires. Pour chaque emplacement de luminaire, les multiplicateurs géométriques, ainsi que la moyenne des résultats, ont été calculés pour l'ensemble de l'installation. Les flux cumulés pour les 4 zones, 0 - 41,4°, 0 - 60°, 0 - 75,5° et 0 - 90° ont ensuite été déduits. Les résultats ont ensuite été multipliés par les multiplicateurs géométriques et additionnés pour donner le facteur de distribution des luminaires aux plantes. Ces résultats sont résumés dans le Tableau 16.

Tableau 16. Paramètres calculés et modélisation Dialux de l'installation d'éclairage.

	Unité	HPS	MH	LED
Flux lumineux	<i>lm</i>	150000	107000	31000
Puissance de lampe	<i>W</i>	1000	1000	285*
Puissance électronique de contrôle	<i>W</i>	40	40	
Durée de vie utile*	<i>h</i>	7000	3600	20000
LOR	%	0,79	0,89	1,00
PPFD cible	$\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$	300	300	300
Espacement des luminaires	<i>m</i>	2,25	2,0	1,25
Hauteur de montage	<i>m</i>	2	2	2
Nombre de luminaires		864	1 066	2 640
Flux lumineux total	<i>Mlm</i>	101,95	102,08	82,34
PPFD calculé	$\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$	335,43	341,88	325,57
Eclairage calculé	<i>lux</i>	24515	24504	18192
Uniformité calculée	<i>Min/Moy.</i>	0,56	0,74	0,95
Puissance totale installée	<i>kW</i>	864	1066	752,4
Eclairage (Dialux)	<i>lux</i>	24122	24143	18910
Uniformité (Dialux)	<i>Moy./Max</i>	0,88	0,85	0,96

* La durée de vie utile est définie comme la durée de fonctionnement pour que le produit du facteur de survie de la lampe (LSF) et du facteur de maintenance de la source (SMF) atteigne 0,85.

On a supposé que les murs et le plafond de la serre ne réfléchissaient pas la lumière et que la culture absorbait 80% de la lumière qui tombait sur elle. Après ces calculs, les paramètres pertinents nécessaires ont été utilisés pour modéliser la serre ainsi que l'installation d'éclairage dans Dialux. Le flux lumineux total a été défini comme le produit du flux de la source lumineuse, du LOR et du nombre de luminaires. Il correspond à la lumière utile totale émise par l'ensemble des luminaires. L'uniformité au sol, calculée à partir de Dialux, a été réalisée en faisant le rapport entre l'éclairage moyen et l'éclairage maximal comme recommandé dans les applications horticoles [223]. L'éclairage moyen au sol a ensuite été vérifié pour valider la cohérence avec l'éclairage et le PPFD calculés selon la

méthode expliquée précédemment. La carte d'éclairage au sol pour chaque luminaire est représentée dans la Figure 46.

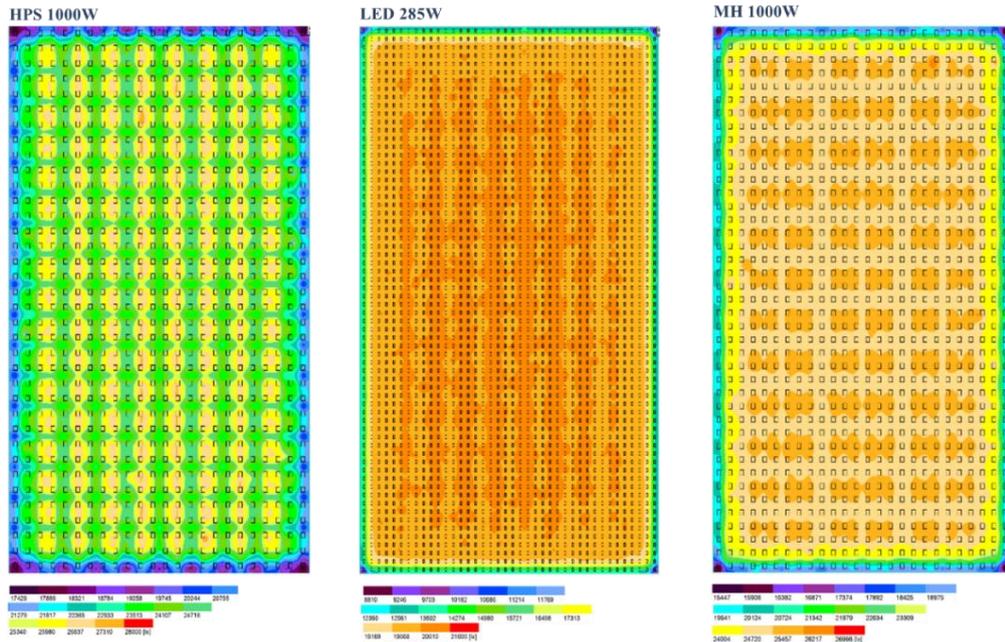


Figure 46. Eclairage au sol pour les lampes HPS, LED et MH

Globalement les éclairagements aux sols issus de la modélisation sous Dialux sont très proches des valeurs calculées prévues, avec toutefois une plus grande différence pour les luminaires LEDs (environ 4%) par rapport aux luminaires HPS et MH (environ 1.5%). Cette différence ne remet cependant pas en cause la pertinence des calculs et de la modélisation qui sera utilisée dans l'étude suivante pour quantifier la pollution lumineuse de l'installation. Enfin, les luminaires LEDs montrent une meilleure uniformité que les lampes HPS et MH comme prévu par les calculs.

6.3.2 ACV des systèmes d'éclairage horticoles

Suite à l'émergence de différentes installations horticoles à travers le monde, de nombreuses interrogations quant aux impacts environnementaux qu'elles génèrent se sont posées. Une nouvelle approche pour quantifier l'impact environnemental est proposée dans les paragraphes suivants.

6.3.2.1 Introduction

L'ACV des systèmes d'éclairage horticole est basée sur deux unités fonctionnelles différentes : l'une est exprimée comme le produit de la densité de flux photonique photosynthétique (PPFD) ($\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$) et du temps et l'autre est exprimée comme le produit de l'irradiance ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) et du temps. L'unité fonctionnelle traditionnelle utilisée pour évaluer les sources lumineuses, $1 \times 10^6 \text{ lm}\cdot\text{h}$, n'est pas appropriée pour les applications horticoles car le lumen est une quantité basée sur la réponse de l'œil humain dans la gamme de 380 à 780 nm. Plutôt qu'être basées uniquement sur le flux lumineux sortant des lampes en fonction des luminaires et de l'équipement de contrôle électronique, cette nouvelle approche considère l'éclairage et l'uniformité fournis par l'installation d'éclairage sur une surface pendant 1000 h. Une surface plane a été utilisée car l'éclairage réel reçu par la plante varie au fur et à mesure de sa croissance et de la formation de nouvelles feuilles qui font de l'ombre à d'autres parties de la plante. Cette approche reflète l'importance de la conception de l'éclairage ainsi que les caractéristiques de la source lumineuse, du dispositif et du luminaire. Il est largement admis que l'uniformité est un facteur important dans l'éclairage pour l'horticulture et diverses conceptions peuvent être utilisées pour illustrer les compromis entre l'irradiance moyenne et l'uniformité. Comme la distribution spectrale de puissance sur les longueurs d'onde de 280 à 1200 nm joue un rôle essentiel dans les réponses des plantes aux rayonnements, nous avons défini des unités fonctionnelles pour plusieurs gammes de longueurs d'onde. Des mesures ont été développées pour les UV-A (315 à 400 nm), le PAR (400 à 700 nm) et le rouge lointain (700 à 780 nm). Les principes définis dans le "Code for Lighting" de la Society of Light & Lighting [226], c'est-à-dire la bonne quantité de lumière, au bon endroit, au bon moment et avec le bon équipement d'éclairage, s'appliquent aussi bien aux serres commerciales qu'à l'éclairage intérieur.

6.3.2.2 Objectifs et cadre de l'étude

L'objectif de cette étude est l'ACV de l'installation de lampes HPS, MH et LED dans le cadre d'une serre commerciale qui permet de fournir un PPFD de 300

$\mu\text{mol.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$. Les lampes analysées, leur installation et la serre commerciale sont celles décrites précédemment. Le public visé comprend les concepteurs d'éclairage et les décideurs politiques et plus largement les professionnels, chercheurs et experts techniques qui travaillent dans le champ de l'éclairage horticole.

6.3.2.3 Méthodes et flux de référence

L'ACV a été réalisé grâce à Simapro 9.0 et la base de données Ecoinvent 3.5. La méthode de calcul est la même que pour l'ACV précédente (Recipe 2016 avec la perspective hiérarchisée). L'ACV a été réalisé pour deux unités fonctionnelles différentes. Tout d'abord l'ensemble de l'installation nécessaire pour atteindre un PPFd de $300 \mu\text{mol.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$ pendant 1000 h a été considérée. Pour les lampes MH et HPS, les flux de référence RF_1 diffèrent en fonction des composants des luminaires (lampes, luminaires, ballast) car ils n'ont pas tous la même durée de vie. Ils sont définis selon l'équation 15):

$$RF_1 (\text{Composant}_i) = \frac{\text{Nombre de lampes} \cdot 1000}{\text{Durée de vie} (\text{Composant}_i)} \quad (\text{Équation 15})$$

Les flux de référence calculés sont présentés dans le Tableau 17 :

Tableau 17. Flux de référence RF_1 pour l'unité fonctionnelle $300 \mu\text{mol.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$ pendant 1000h.

Type et nombre de lampes		Durée de vie (h)	Puissance (W)	RF_1
HPS (n=864)	Lampe	7000	1000	123
	Luminaire	40000	X	21.6
	Ballast	80000	40	10.8
MH (n=1066)	Lampe	3600	1000	296
	Luminaire	40000	X	26.7
	Ballast	80000	40	13.3
LED (n=2640)	Luminaire	20000	285	132
	Driver	50000		52.8

Dans un second temps, le nombre d'heures de fonctionnement pour atteindre une irradiance de 1 W.m^{-2} pendant 1000 h (1000 Wh.m^{-2}) sur différentes plages de longueur d'onde (UV, bleu, vert, rouge, infrarouge et PAR) a été étudié afin de déterminer les impacts potentiels des lampes en fonction des besoins spécifiques des plantes. Le flux de référence RF_2 est ainsi déterminé grâce à l'équation 16 :

$$RF_2 = \frac{RF_1 (\text{Composant}_i)}{\text{Irradiance} (\lambda)} \quad (\text{Équation 16})$$

Les calculs des flux de référence RF_2 sont présentés dans le Tableau 18.

Tableau 18. Flux de référence RF_2 pour l'unité fonctionnelle 1000 Wh.m⁻².

Type de lampe		UV-A 315 - 400 nm	Bleu 400 - 500 nm	Vert 500 - 600 nm	Rouge 600 - 700 nm	Infrarouge 700 - 780 nm	PAR 400 - 700 nm
	Lampe	232.1	34,96	4.54	3.99	24.68	2.00
HPS	Luminaire	40,61	6,12	0,79	0,70	4,32	0,35
	Ballast	20.3	3.06	0.4	0.35	2.16	0.18
	Lampe	60.6	11.11	7.53	28.70	84.52	3.88
MH	Luminaire	5,46	1,00	0,68	2,59	7,62	0,35
	Ballast	2.72	0.50	0.34	1.29	3.80	0.17
LED	Luminaire	0	14.06	6.10	4.38	106.0	2.16
	Driver	0	5,62	2,44	1,75	42,42	0,86

6.3.2.4 Inventaire du cycle de vie

L'inventaire des matériaux des lampes a été réalisé à partir du démontage et du pesage des différents composants. Lorsque le démontage n'était pas possible les inventaires ont été dérivés des fiches produits des fabricants de luminaires et de la littérature. Les inventaires de chaque lampe et luminaire sont disponibles en Annexe 3.

La phase d'utilisation se déroule au Royaume-Uni dont le mix électrique a été considéré pour cette étude. En 2019, ce mix était hybride avec 45% de l'électricité produite grâce à des combustibles fossiles (41% pour le gaz naturel), 17% grâce au nucléaire et 37% grâce aux énergies renouvelables.

En ce qui concerne la phase de transport, les lampes sont fabriquées en Chine et ensuite envoyées au Royaume-Uni par bateau.

Pour la phase de fin de vie, les mêmes hypothèses qu'au niveau européen sont conservées : 60% des emballages sont recyclés et 70 % des lampes sont mises en décharge ou brûlées.

6.3.2.5 Résultats pour 300 $\mu\text{mol.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$ pendant 1000h.

Les résultats sont d'abord présentés au niveau « problèmes » (midpoint) pour l'ensemble des catégories d'impacts disponibles grâce à Recipe 2016. Ils sont présentés sous forme de radar et ils sont normalisés pour chaque catégorie par rapport à la lampe la moins performante dans la dite catégorie. Ceci permet de visualiser les lampes les moins performantes vers l'extérieur du cercle et les lampes les plus performantes vers l'intérieur. Dans un second temps les résultats sont présentés au niveau « dommages » (endpoint). La répartition des impacts potentiels

par phase du cycle de vie est ensuite mise en évidence afin d'évaluer la part d'impacts potentiels générés par la phase d'utilisation de chaque lampe. Pour finir, une analyse d'incertitudes réalisée grâce à la méthode Monte-Carlo (10000 simulations par configuration), afin d'évaluer la précision des résultats présentés auparavant. Cette analyse prend en compte toutes les incertitudes liées aux données d'impacts fournies par Ecoinvent ainsi que celle générées par les opérations de normalisations, de pondérations et d'agrégations nécessaires pour passer du niveau « problèmes » au niveau « dommages ».

6.3.2.5.1 Midpoint

La caractérisation des impacts potentiels orientés « problèmes » pour atteindre $300 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ pendant 1000h sont présentés dans la Figure 47. Ils sont exprimés en pourcentage des impacts potentiels normalisés pour chaque catégorie.

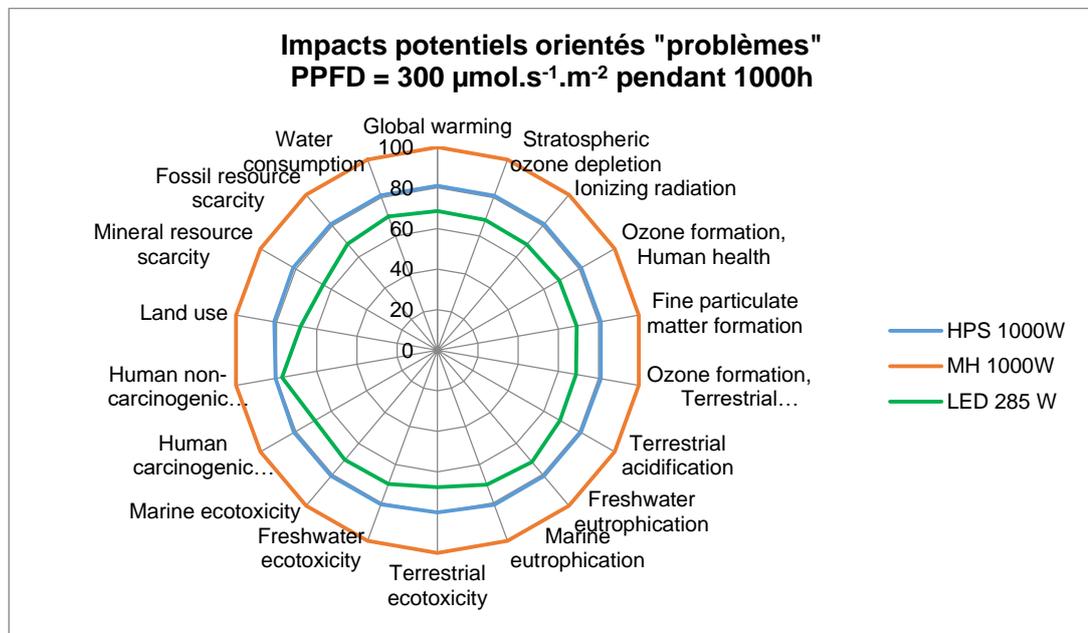


Figure 47. Impacts potentiels orientés « problèmes » ($300 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ pendant 1000h).

De manière assez évidente, la caractérisation orientée « problèmes » montre que la lampe MH 1000 W génère le plus d'impacts potentiels dans toutes les catégories d'impacts considérées. Une durée de vie plus faible, ainsi qu'un plus grand nombre de lampes que la lampe HPS (donc une plus grande consommation d'énergie) sont principalement responsables de ces impacts. Elle est suivie de la lampe HPS 1000 W puis de la LED 285 W. La LED malgré 2 à 3 fois plus de luminaires installés dans la serre reste la lampe la plus performante sans doute grâce à une puissance installée, et donc une consommation d'énergie, largement inférieure.

6.3.2.5.2 Endpoint

Les résultats de l'analyse d'impacts orientés "dommages" sont présentés dans la Figure 48. Ils sont exprimés en Points. Un point (Pt) représente la charge environnementale annuelle (c'est-à-dire l'ensemble des activités de production/consommation dans l'économie) aux États-Unis, divisée par la part d'un Américain. Il est important de comprendre qu'un point ne représente pas l'impact environnemental propre à un individu. Il représente la part annuelle de l'individu, qu'il ait participé directement ou indirectement aux impacts environnementaux de l'économie. Cela permet de présenter les impacts potentiels sous la forme d'un score unique qui prend en compte la criticité des différentes catégories d'impacts orientés « problèmes », mais cela introduit également un certain nombre d'incertitudes.

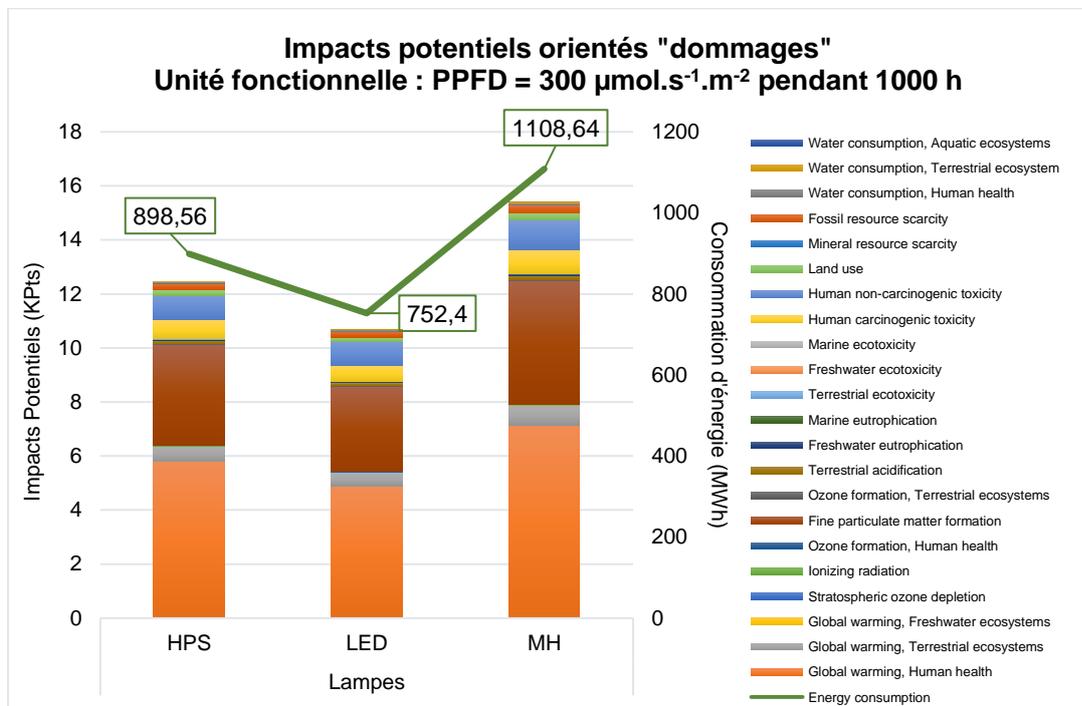


Figure 48. Impacts potentiels orientés "dommages" ($PPFD = 300\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ pendant 1000h) en KPts et consommation d'énergie globale en MWh.

Les résultats orientés « dommages » sont totalement en ligne avec ceux orientés « problèmes ». Les lampes MH sont les plus impactantes, suivies par les lampes HPS et enfin les luminaires LEDs. Les catégories d'impacts les plus représentées sont les impacts du réchauffement climatique sur les êtres humains ainsi que la formation de particules fines, et dans une moindre mesure, la toxicité cancérigène pour l'être humain et la disponibilité des ressources fossiles. La grande majorité de l'électricité du Royaume-Uni est générée grâce à du gaz naturel (environ 41%) ce qui explique que ces catégories d'impacts soient les plus représentées. Lorsqu'on superpose la courbe de consommation d'énergie, on s'aperçoit que les

impacts potentiels sont fortement liés à celle-ci. Le Tableau 19 détaille la répartition des impacts potentiels en fonction des différentes phases du cycle vie et pour chacune des configurations.

Tableau 19. Répartition des impacts potentiels en fonction des phases du cycle de vie (exprimé en % des impacts potentiels totaux).

Phase du cycle de vie	HPS	LED	MH
Matériaux et Fabrication	2,4	5	2,6
Utilisation (consommation d'énergie)	97,6	95	97,4
Autres (Transport et Fin de Vie)	<0,1	<0,1	<0,1

On constate qu'effectivement la quasi-totalité des impacts potentiels sont générés par la phase d'utilisation et ceci pour toutes les configurations testées. Même si l'ACV permet de quantifier les impacts potentiels, les professionnels semblent pouvoir se fier à la consommation d'énergie globale de chacune des configurations pour estimer laquelle d'entre elles est la plus bénéfique d'un point de vue environnemental et financier. Il y a toutefois des spécificités liées au spectre de la lampe et le besoin des plantes qui peut inciter à s'orienter vers un type de lampe particulier.

6.3.2.5.3 Analyse d'incertitudes

La Figure 49 présente l'analyse d'incertitudes réalisée au niveau « dommages ». Elle montre les différentes incertitudes générées à la fois par les données d'inventaire issues d'Ecoinvent, mais également par les opérations de normalisations, de pondérations et d'agrégations nécessaires pour passer du niveau « problèmes » au niveau « dommages ». Les résultats ont été générés grâce à la méthode Monte-Carlo et les impacts potentiels de chaque configuration de lampes ont été simulés 10000 fois.

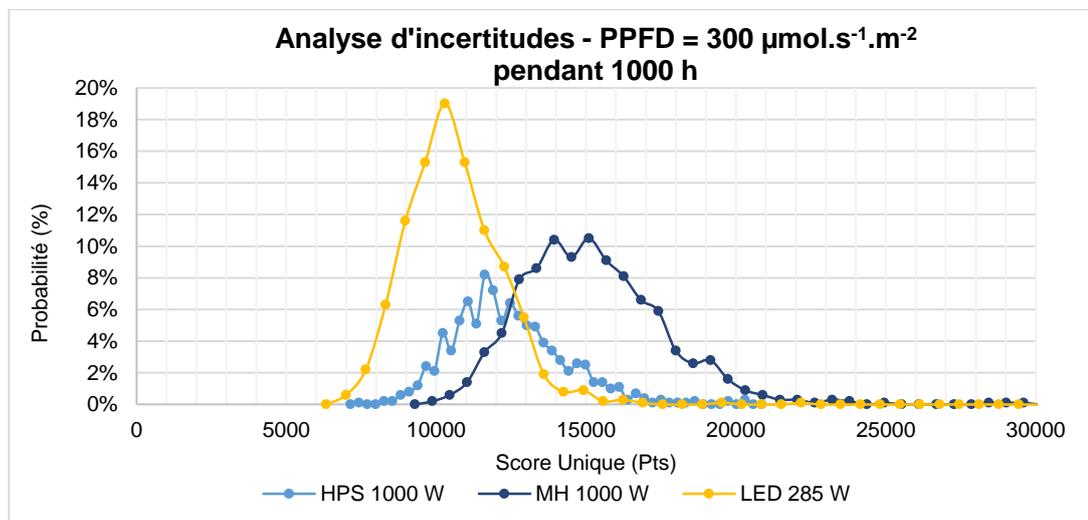


Figure 49. Analyse d'incertitudes pour un PPFD = 300 $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ pendant 1000 h.

L'analyse d'incertitudes confirme les résultats précédents et montre moins d'incertitudes pour la configuration avec les luminaires LEDs. Les incertitudes sont les plus élevées pour la configuration avec les lampes HPS mais sans remettre en cause le fait qu'elle génèrera probablement moins impacts que celle avec les lampes MH.

6.3.2.6 Résultats pour 1000 Wh.m⁻².

Le changement d'unité fonctionnelle ne va pas remettre en cause la prédominance de la phase d'utilisation dans la répartition des impacts, c'est pourquoi seul les impacts potentiels orientés « dommages » sont présentés par la suite. De même l'analyse d'incertitudes montrera des résultats similaires donc elle n'a pas été reproduite pour cette nouvelle unité fonctionnelle. Les résultats de l'analyse des impacts orientés « dommages » sont présentés dans les Figure 50 et Figure 51.

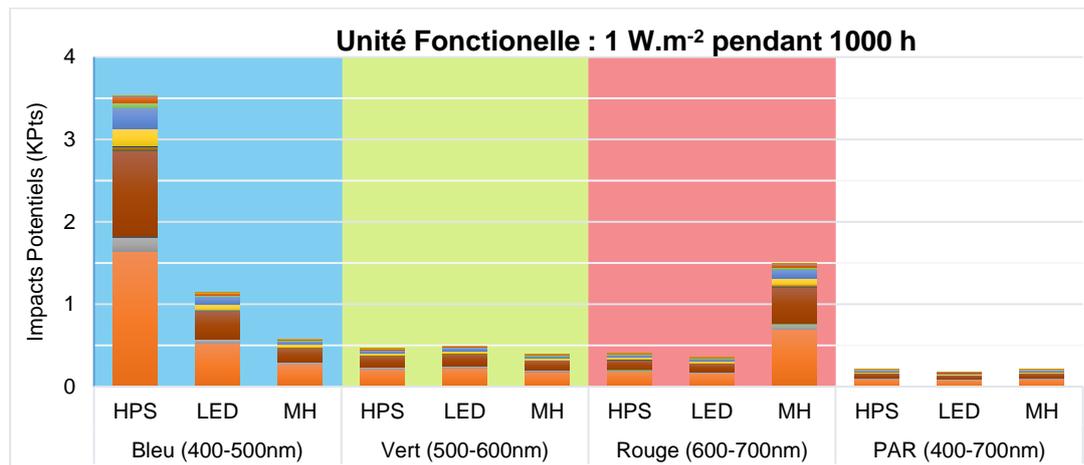


Figure 50. Impacts potentiels orientés "dommages" pour 1000 Wh.m⁻² (Bleu, vert, rouge et PAR). Exprimé en KPts.

Lorsqu'on s'intéresse au domaine du PAR et de ces composantes bleu, vert et rouge, on peut orienter le choix des lampes en fonction des besoins des plantes et des lampes qui génèrent le moins d'impacts potentiels pour fournir la lumière dans cette plage. Pour le bleu et le vert, la lampe MH est la moins impactante, alors que l'ACV précédente la montrait comme la lampe la moins performante pour atteindre le PPFD cible. En revanche, elle est effectivement la moins performante pour fournir la composante rouge de la lumière. La lampe HPS doit être évitée dans le cas de plantes qui font grand usage de la composante bleue avec des impacts potentiels environ 3 fois supérieurs à ceux des lampes LEDs et environ 7 fois supérieurs à ceux des lampes MHs. Enfin si l'on considère le PAR dans son ensemble, les

luminaires LEDs présentent des impacts potentiels légèrement inférieurs (-15%) à ceux des deux autres configurations qui sont très proches.

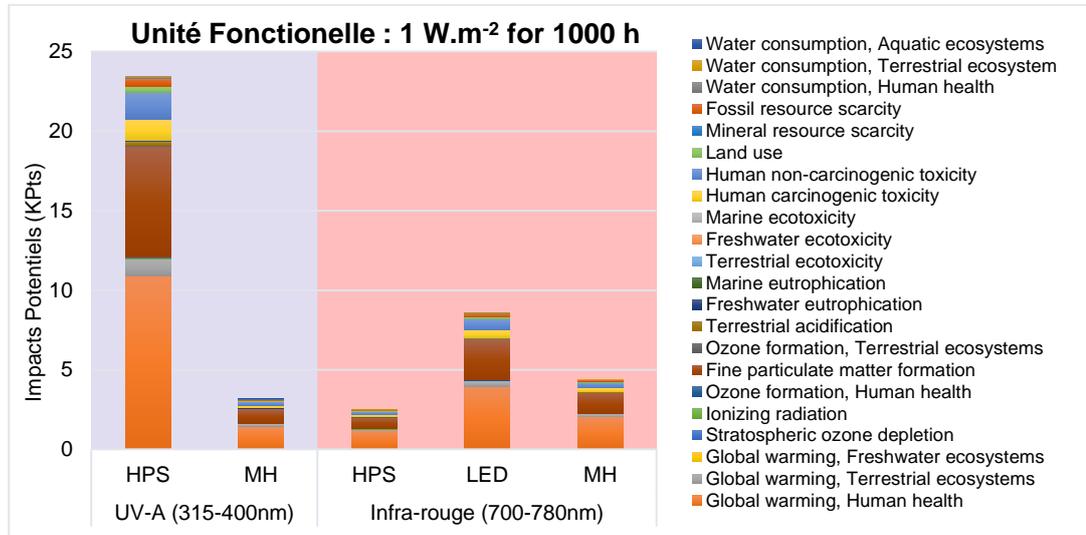


Figure 51. Impacts potentiels orientés "dommages" pour 1000 Wh.m² (UV-A et Infra-rouge). Exprimés en KPts.

Lorsqu'on s'intéresse au rayonnement dans le domaine des UV-A et Infra-rouge le luminaire LED testé ne permet pas de répondre au besoin des plantes. En effet, il ne produit pas d'UV-A et il est le moins performant pour fournir des infra-rouge. Alors que l'intérêt pour les plantes de ces bandes lumineuses est de plus en plus reconnu, notamment afin de se rapprocher au plus près des conditions naturelles de croissance et floraison fournies par la lumière du soleil, la lampe MH testée semble être la plus à même de répondre à ce besoin comparé à la lampe HPS pour qui la production d'UV-A a un impact environnemental considérable.

6.3.2.7 Conclusion

L'ACV d'une serre horticole a été réalisé pour trois systèmes d'éclairage différents (HPS, MH et LED), chacun disposant de particularité en termes de distribution spectrale, de consommation d'énergie et de nombre de luminaires à installer pour produire un PPFd similaire. Les deux unités fonctionnelles proposées permettent d'évaluer l'aspect quantitatif (PPFD) et l'aspect qualitatif (irradiance). Lorsqu'il s'agit de l'aspect quantitatif, les luminaires LEDs sont ceux qui génèrent le moins d'impacts potentiels. Ces résultats découlent essentiellement des différences de consommation d'énergie entre les différentes configurations. Malgré un nombre de luminaire à installer largement supérieur, les impacts potentiels des luminaires LEDs sont compensés par une moindre consommation d'énergie. Au-delà de l'aspect environnemental, la consommation d'énergie intense des serres horticoles fait des systèmes les moins gourmands les plus avantageux d'un point de vue

économique, ce qui explique l'adoption rapide des luminaires LEDs pour ce type d'utilisation. En revanche, il reste très difficile d'estimer les bénéfices pour le rendement de production et la qualité des plantes en fonction du choix du luminaire, et cet intérêt économique se limite ici à une diminution des coûts liés à la consommation d'énergie. Il est également important de noter que l'intensité carbone de l'alimentation électrique est variable et l'impact de la consommation d'énergie peut varier jusqu'à 20 % en fonction de l'utilisation. Actuellement, l'intensité varie d'environ 180 à 250 gCO₂eq.kWh⁻¹ sur un cycle diurne et tombe en dessous de 100 pendant le week-end. La tendance est à la réduction de l'intensité de carbone, mais l'adoption continue des voitures électriques pourrait augmenter le coût et l'utilisation de carbone de l'électricité nocturne, ce qui pourrait avoir un impact sur l'impact futur de ce type d'application.

Lorsqu'on s'intéresse à l'aspect qualitatif, l'ACV montre qu'en fonction des besoins de plantes, le choix du luminaire LED testé n'est pas forcément le plus adéquat. En effet, ces performances sont faibles quand il s'agit de la production de lumière en dehors du PAR (UV-A et infra-rouge). Il en est de même pour la composante bleue et verte pour qui les lampes MHs sont moins impactantes. La seule composante pour laquelle les luminaires LEDs se distinguent est le rouge. Globalement, les luminaires MHs semblent plus performants quand il s'agit de l'aspect qualitatif. Ceci conduit à un dilemme pour le choix des luminaires entre les aspects environnementaux et économique, et la qualité de la production. La qualité des plantes, fruits ou légumes produits dans la serre n'a pas été prise en compte dans cette étude, mais lorsque le luminaire est optimisé pour remplir les besoins lumineux, les conséquences pour la quantité produite mais également pour la qualité nutritionnelle ont également des avantages économiques et sanitaires qui pourraient en partie compenser les impacts environnementaux mis en évidence dans l'étude quantitative.

Enfin, le luminaire LED testé ici représente un cas particulier. En effet, la diversité des distributions spectrales associées aux luminaires LEDs horticoles n'est pas ici représentée, contrairement aux spectres des lampes MH et HPS qui sont figés. D'autres luminaires pourraient être plus performants dans l'approche qualitative, et il revient au professionnel de s'orienter vers les systèmes les plus adaptés pour les besoins de leur production. La méthode d'analyse proposée ici permet d'évaluer chacun des aspects des impacts des luminaires horticoles et des arbitrages devront être réalisés afin de faire des choix économiques, environnementaux ou accès sur la qualité et le rendement de la production.

6.3.3 Etude de la pollution lumineuse des serres

Suite à l'émergence de différentes installations horticoles à travers le monde, de nombreuses interrogations quant aux impacts environnementaux qu'elles génèrent se sont posées. Ces installations ont également été récemment identifiées comme une source accrue de pollution lumineuse la nuit. Une nouvelle approche pour quantifier la pollution lumineuse des systèmes d'éclairage horticoles est proposée dans les paragraphes suivants.

6.3.3.1 Introduction

Les systèmes d'éclairage pour les serres et les chambres de culture commerciales sont souvent spécifiés en termes de densité de flux de photons photo synthétiquement actifs (PPFD avec des unités de $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$), sur la plage d'action photosynthétique (PAR) de 400 nm à 700 nm. Toutefois, cette approche ne tient pas compte de l'influence du rendement spectral de la source lumineuse. Ces spécifications négligent l'importance des rayonnements situés au-delà de la gamme PAR, malgré les nombreuses preuves qui montrent que les contributions des rayonnements rouge, rouge lointain, UV-A et UV-B sont essentielles pour garantir que les cultures développent les mêmes caractéristiques que si elles étaient cultivées dans des conditions d'éclairage naturel. De plus, la distribution spectrale de puissance (SPD) de l'éclairage des serres n'a pas seulement un impact sur la santé et la productivité des plantes cultivées, mais aussi sur les pollinisateurs et le bio-contrôle des espèces présentes dans l'installation. De même, les effets de toute lumière parasite émanant de la structure seront une combinaison de SPD, d'intensité et de distribution.

Outre le fait que toute lumière artificielle traversant les limites de la structure constitue une perte directe de productivité pour les cultivateurs, ce qui signifie qu'ils ont intérêt à limiter ces pertes, cela devient encore plus problématique lorsque cela se produit la nuit. En fait, il est souvent nécessaire de laisser l'éclairage allumé après le coucher du soleil pour atteindre l'objectif de l'Intégral de Lumière Journalière (DLI), ce qui fait que les serres commerciales deviennent un grand contributeur à la Lumière Artificielle de Nuit (ALAN). Un effet bien connu de l'ALAN est la lueur du ciel qui interfère avec l'observation astronomique. Cependant, l'augmentation du nombre de sources lumineuses en milieu urbain et l'évolution des SPD (notamment la lumière riche en bleu des LEDs) ont mis en évidence d'autres effets potentiels de l'ALAN sur la faune et les rythmes humains [227], [228].

Il est en effet très difficile de comprendre la complexité des interactions et des équilibres dans les interactions faune-flore et lumière-plante-insecte [229], [230] mais il est prouvé que l'ALAN a un impact sur les pollinisateurs nocturnes et diurnes [231]. De nombreux insectes nocturnes, y compris les pollinisateurs comme les papillons de nuit, utilisent le clair de lune pour naviguer et seront désorientés par l'ALAN, ce qui pourrait perturber leur activité de pollinisation [155], [156]. Cela devient également problématique à l'intérieur des serres où la lumière parasite de la nuit peut provoquer l'attraction d'espèces indésirables. L'introduction involontaire en Europe du frelon asiatique (*Vespa velutina*), qui s'attaque aux abeilles domestiques et qui est attiré par la lumière la nuit, en est un exemple [232].

Cette étude donne un aperçu des impacts potentiels de la lumière parasite provenant des serres commerciales. Le travail se concentre sur la perturbation potentielle de la faune plutôt que sur l'impact sur les résidents locaux. Il devrait aider les cultivateurs professionnels à comprendre les effets négatifs de l'ALAN et les aider à s'adapter afin d'atténuer ces effets négatifs, par exemple avec des écrans horizontaux et verticaux limitant la lumière, tout en renforçant les effets bénéfiques.

6.3.3.2 Objectifs

L'objectif de ce travail est de quantifier et de comparer la pollution lumineuse générée par différents types d'éclairage utilisés dans les installations horticoles. Plusieurs méthodologies ont été proposées pour limiter la pollution lumineuse des installations extérieures [233], [234]. Dans ce contexte, la définition et la réglementation du rapport lumineux ascendant (ULR) et/ou du niveau d'éclairement maximal ont permis de limiter les perturbations lumineuses mais aucune n'avait considéré le cas spécifique de l'éclairage horticole et des serres.

La méthode Outdoor Site-Lighting Performance (OSP) [235] propose de définir une boîte parallélépipédique virtuelle à la limite de la propriété de l'installation à étudier, et semble plus appropriée pour étudier un cas tel que les serres. Cette méthode permet alors de définir :

- le Glow : éclairement moyen global sur les plans latéraux et supérieurs de la boîte en lux
- le Trespass : éclairement maximal sur l'un des plans latéraux en lux,
- le Glare : combinaison des trois valeurs d'éclairement en limite de propriété.

Le « glow » permet de quantifier la densité de lumière quittant l'installation tandis que le « trespass » est présenté comme le pire scénario possible. Le « glare » n'a pas été considéré dans ce travail car il concerne la perturbation sur les personnes ou les riverains, plutôt que sur la nature. Cette méthode a été utilisée plus récemment pour évaluer le risque de pollution lumineuse nocturne dans un bureau vitré et l'effet des solutions d'ombrage [236].

Dans un premier temps, la boîte parallélépipédique virtuelle est définie comme l'espace de 4 m de hauteur délimité par la surface de la culture au sol (81 m x 50 m). Nous considérons toute la lumière sortant de cet espace comme une pollution potentielle. La serre a été modélisée sur Dialux, et les « glow » et « trespass » ont été mesurés sur les différentes parois latérales de la serre. Les valeurs de « glow » ascendantes ont été définies sur un plan parallèle au sol au-dessus des luminaires, qui fait également office de plafond. Bien que ce ne soit pas le cas pour la majorité des serres professionnelles, le plafond est considéré comme plat pour simplifier l'application de la méthode OSP.

Dans un second temps la méthode est reproduite à l'extérieur de la serre et dans les limites de la propriété pour évaluer la répartition de la lumière dans cet espace. Différents plans de mesure d'éclairement verticaux, horizontaux et latéraux sont disposés dans les limites de la propriété pour identifier la distance de la serre pour laquelle le seuil de 5 lux est atteint. L'efficacité de panneaux d'ombrages partiels est également évaluée.

La configuration de la serre et de l'installation des systèmes d'éclairage est similaire à l'étude précédente sur l'ACV. On cherche donc à comparer les performances de différents types de lampes sur la base d'un PPFd de $300 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ qui correspond à une valeur fréquemment recherchée par les professionnels. Pour chaque type de lampe, le nombre de luminaires, leur hauteur de montage et leur espacement ont été définis selon la méthode présentée dans le paragraphe 6.3.1.3. Les propriétés de la serre et des différentes sources lumineuses sont présentées dans le paragraphe 6.3.1.

6.3.3.3 Etude des parois de la serre

6.3.3.3.1 Description des différentes surfaces

Pour cette étude, les murs de la serre ont été divisés en 9 zones différentes (Figure 52) :

- 4 zones correspondant aux parois latérales inférieures de 2 m de hauteur : surface 1, 2, 3 et 4 (LLL et LLW).
- 4 zones correspondant aux parois latérales supérieures (au-dessus du plan d'installation des luminaires) de 2 à 4 m : surface 5, 6, 7 et 8 (ULL et ULW).
- 1 zone correspondant au plafond de la serre couvrant toute la surface à une hauteur de 4 m : surface 9.

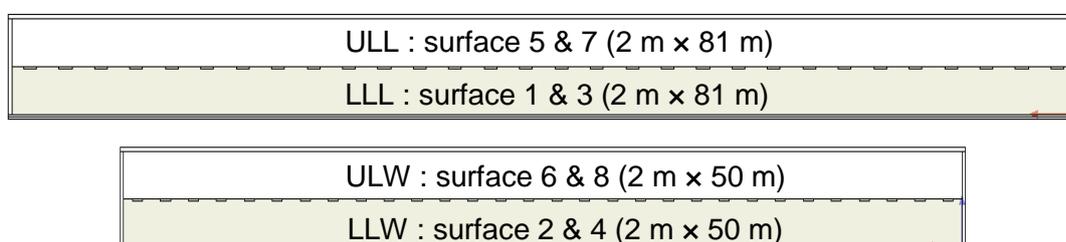


Figure 52. Vue latérale de la serre et numérotation des surfaces

Cette division permettra ensuite de différencier les nuisances latérales (surfaces 1 à 4) des nuisances lumineuses ascendantes (surfaces 5 à 9). Les différentes installations ont été simulées dans Dialux. Pour les surfaces 1 à 8, chaque point de mesure d'éclairage est espacé de 0,33 m. Pour la surface 9, chaque point de mesure est espacé de 1 m. Le Tableau 20 ci-dessous récapitule les informations sur les différentes surfaces et leur grille de mesure.

Tableau 20. Détails des surfaces

Parois	Surface n°	Hauteur (m)	Aire (m ²)	Grille de mesure (m)
Latérale Inférieure Longueur (LLL)	1 and 3	0-2	162	0,33
Latérale Inférieure Largeur (LLW)	2 and 4	0-2	100	0,33
Latérale Supérieure Longueur (ULL)	5 and 7	2-4	162	0,33
Latérale Supérieure Largeur (ULW)	6 and 8	2-4	100	0,33
Plafond	9	4	4 050	1

6.3.3.3.2 Résultats

a) "Glow" et "Trespass"

Les résultats des mesures de « glow » et « trespass », tels que définis par la méthode OSP, et réalisées grâce à la modélisation Dialux sont présentés dans la Figure 53. Les détails des valeurs sont présentés dans le Tableau 21.

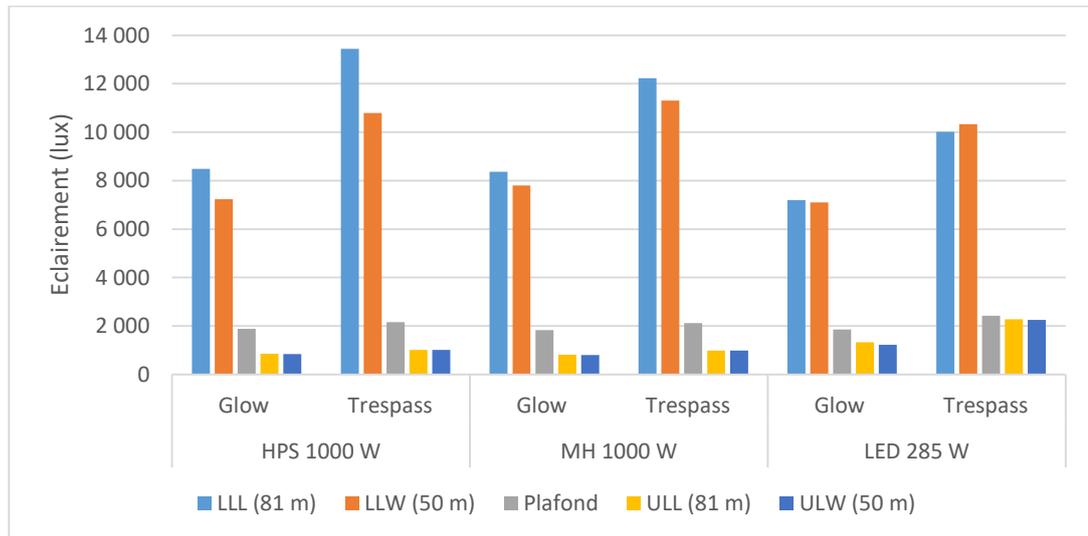


Figure 53 et Tableau 21. "Glow" et "Trespass"

Parois	HPS 1 000 W		MH 1 000 W		LED 285 W	
	Glow (lux)	Trespass (lux)	Glow (lux)	Trespass (lux)	Glow (lux)	Trespass (lux)
LLL (81 m)	8 491	13 441	8 371	12 226	7 196	10 019
LLW (50 m)	7 233	10 788	7 798	11 304	7 102	10 334
Plafond	1 885	2 168	1 832	2 116	1 863	2 422
ULL (81 m)	857	1010	821	989	1 326	2 275
ULW (50 m)	843	1018	806	990	1 231	2 252

Les lampes HPS génèrent le plus grand « trespass » (13 441 lux), suivies par les lampes MH (12 226 lux) et les lampes LED (10 334 lux).

Le « trespass » est atteint pour chaque lampe sur les parois latérales inférieures, cependant, pour les lampes HPS et MH elle est atteinte sur la longueur de la serre (LLL) alors que pour les lampes LED elle est atteinte sur la largeur (LLW). En ce qui concerne le « glow », il est également plus faible pour les lampes LEDs que pour les lampes HPS et MH sur les parois latérales inférieures.

En revanche, si l'on s'intéresse uniquement aux parois latérales supérieures, on constate un « trespass » beaucoup plus importante pour les LEDs (2 275 lux) par rapport aux lampes HPS et MH, qui présentent des résultats similaires (1 018 lux et

990 lux respectivement). De même, le « glow » sur le mur latéral supérieur et le plafond est également plus élevé pour les lampes LED (environ 1 200 lux - 1 300 lux contre environ 800 lux - 850 lux pour les lampes HPS et MH).

b) ULR et LLR de l'installation

Le rapport du flux lumineux ascendant (ULR) de l'installation a été défini comme le rapport entre le flux lumineux total atteignant la surface 5 à 9 et le flux lumineux total émis par les lampes. De la même manière, le rapport du flux lumineux latéral (LLR) de l'installation a été défini comme le rapport entre le flux lumineux total atteignant la surface 1 à 4 et le flux lumineux total émis par les lampes. Les valeurs de l'ULR et du LLR sont présentées dans le Tableau 22.

Tableau 22. ULR et LLR de l'installation

	HPS 1 000 W	MH 1 000 W	LED 285 W
ULR	7,93%	7,79%	9,97%
LLR	4,12%	4,19%	4,35%

Alors que les valeurs de « glow » et « trespass » sont plus élevées pour les lampes HPS et MH sur les murs latéraux inférieurs, le LLR est légèrement plus élevé pour les lampes LEDs. Ces calculs de rapport lumineux représentent la performance relative de chaque ensemble de lampes en fonction du flux utile total émis par l'ensemble des luminaires. En ce sens, la performance relative des luminaires à LED est inférieure à celle des luminaires HPS et MH. Cependant, grâce à un flux lumineux plus uniforme et directionnel, les LEDs sont capables de fournir un PPFd équivalent aux luminaires HPS et MH avec un flux utile total émis plus faible (82,4 Mlm pour les LEDs et environ 102 Mlm pour les HPS et MH). Par conséquent, on obtient en valeur absolue un « trespass » et un « glow » plus faibles pour les luminaires à LED.

D'autre part, le calcul de l'ULR, semble confirmer une performance inférieure pour les lumières LEDs (9,97%) par rapport aux HPS (7,93%) et MH (7,79%). Ces résultats montrent qu'il n'est pas suffisant de considérer uniquement l'ULR et/ou le LLR pour évaluer les nuisances lumineuses potentielles générées par les différents types de luminaires.

c) Panneaux d'ombrage

Dans un deuxième temps, il est possible de localiser plus précisément les zones concernées par le « trespass » afin d'évaluer les moyens de limiter les nuisances grâce à l'utilisation de panneaux d'ombrage. Afin d'évaluer le potentiel de ces solutions, chaque surface a été divisée en sous-zones, et le « glow » et le « trespass » sur chacune d'entre elles ont été mesurées grâce à la modélisation

sous Dialux (Tableau 7). Le « trespass » pour les lampes HPS et MH étant atteint sur les surfaces 1 et 3 (par symétrie), nous nous intéressons alors particulièrement aux sous-surfaces 54 et 55 définies sur Figure 54. La hauteur de la surface 54 est de 1 m, à partir du sol et sur toute la longueur de la serre. La surface 55 est située juste au-dessus de la surface 54, sa hauteur est de 0,4 m, à partir de 1 m du sol et également sur la longueur de la serre.

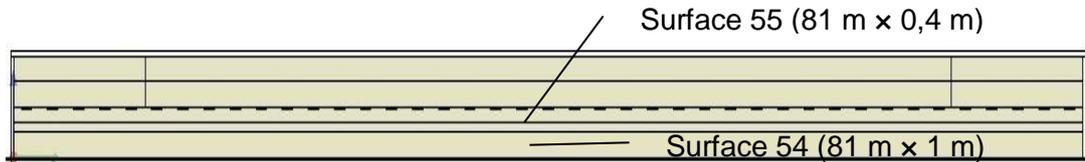


Figure 54. Sous-sections des surfaces 1 et 3 (longueur)

Pour les lampes à LED, le dépassement est atteint sur les surfaces 2 et 4. Nous sommes donc intéressés par les sous-surfaces 66 et 67 définies dans la Figure 55. Les surfaces 66 et 67 sont définies de manière similaire aux surfaces 54 et 55 mais sur la largeur de la serre.

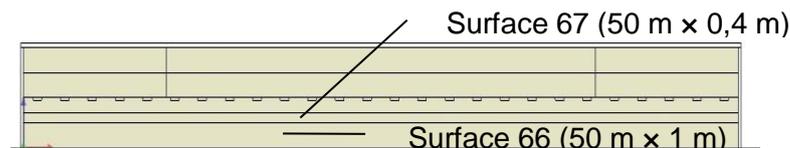


Figure 55. Sous-sections des surfaces 2 et 4 (Largeur)

Pour chacun des différents systèmes d'éclairage, le tableau 23 indique les valeurs de « trespass » pour les sous-surfaces isolées 54, 55, 66 et 67.

Tableau 23. « Trespass » des sous-sections 54, 55, 66 et 67 (lux)

	Surface 54	Surface 55	Surface 66	Surface 67
HPS	13 240	13 441	10788	8671
MH	11 771	12 226	11304	10864
LED	9 452	10 019	9147	10334

Sur la longueur (surface 1 et 3), on constate que le « trespass » est atteint sur la sous-surface 55 (entre 1 m et 1,4 m) quel que soit le type de luminaire utilisé. En revanche, sur la largeur, pour les lampes HPS et MH il est atteint sur la sous-surface 66 (entre 0 m et 1 m) alors que pour les lampes LED il est atteint sur la surface 67 entre 1 m et 1,4 m.

Afin de limiter la nuisance lumineuse due au « trespass », il serait nécessaire d'utiliser des panneaux d'ombrage d'une hauteur comprise entre 1 m et 1,4 m. Le Tableau 24 montre les valeurs ajustées du « glow » et du « trespass » sur les surfaces 1 à 4 en cas d'utilisation de panneaux d'ombrage (transmission = 0%) de 1 m ou 1,4 m sur la longueur et la largeur de la serre.

Tableau 24. Mesure de «glow» et «trespass» ajustée avec des panneaux d'ombrages

Panneaux Ombrages	Wall	HPS 1 000 W		MH 1 000 W		LED 285 W	
		Glow (lux)	Trespass (lux)	Glow (lux)	Trespass (lux)	Glow (lux)	Trespass (lux)
Aucun	LLL (81 m)	8491	13441	8371	12226	7196	10019
	LLW (50 m)	7233	10788	7798	11304	7102	10334
1 m	LLL (81 m)	3525	13441	3174	12226	3220	10019
	LLW (50 m)	2710	9108	2956	10864	3387	10334
1,4 m	LLL (81 m)	1980	9080	1597	8340	1827	7498
	LLW (50 m)	1510	3826	1529	5114	2083	8620

L'utilisation de panneaux d'ombrage d'une hauteur de 1m n'a aucun effet sur le « trespass » de la serre car l'éclairement maximal est repéré dans la zone comprise entre 1 m et 1,4 m.

D'autre part, le « glow » est réduit de 4966 lux (58%), 5197 lux (62%) et 3976 lux (55%) respectivement pour les luminaires HPS, MH et LED sur la longueur. De même, le « glow » est réduit de 4523 lux (62%), 4842 lux (62%), 3715 lux (52%) respectivement sur la largeur. On peut constater que cette solution est légèrement plus efficace pour les luminaires HPS et MH que pour les luminaires LED, ce qui leur permet d'afficher un « glow » plus faible.

Lorsque des panneaux d'ombrage sont utilisés sur une hauteur de 1,4 m, le « trespass » est considérablement réduit pour tous les types de luminaires. La réduction est de 4 361 lux (32%) pour les luminaires HPS, 3 886 lux (32%) pour les luminaires MH et 1 714 lux (17%) pour les luminaires LED. Les luminaires MH présentent les meilleurs résultats en termes de « trespass » devant les LEDs et les HPS, même si les résultats restent proches pour les trois systèmes.

Enfin, en ce qui concerne le « glow » sur la paroi latérale inférieure, la réduction est nettement plus importante qu'avec les panneaux de 1 m de haut, même pour les LEDs. Sur la longueur, on constate une réduction de 6511 lux pour les HPS (77%), 6774 lux pour les MH (81%) et 5369 lux pour les LED (75%). Le glow est alors le plus élevé pour les lampes HPS et le plus faible pour les lampes MH. Sur la largeur, nous voyons une réduction de 5723 lux pour les HPS (79%), 6269 lux pour les MH (80%) et 5019 lux (71%) pour les LED. On constate que le « glow » est le plus élevé pour les LEDs et le plus faible pour les lampes HPS et MH.

6.3.3.3.3 Conclusions

Dans ce travail, on a cherché à quantifier les dommages potentiels de la lumière générés par différents systèmes d'éclairage typiques utilisés dans les serres. En appliquant la méthode OSP, la structure de la serre est assimilée à une boîte parallélépipédique sur laquelle sont calculées les valeurs de « glow » (éclairage moyen) et de « trespass » (éclairage global maximum). Il est important de préciser que ces métriques ne sont pas suffisantes pour caractériser l'impact réel sur la faune et la flore environnante, car celui-ci dépend également de la distribution spectrale de la lumière sortant de l'espace de la serre. En fonction des pics sur différentes longueurs d'onde, différents types d'espèces (insectes, oiseaux, chauves-souris, etc...) seront impactés plus ou moins fortement sur leurs routines de chasse, de reproduction ou de recherche de nourriture [155], [156]. Chaque espèce a des réponses différentes au spectre lumineux, et il serait nécessaire d'avoir des informations précises sur l'écosystème environnant pour les évaluer [227].

La définition du « glow » et du « trespass », en revanche, permet d'évaluer l'importance de la pollution lumineuse et de la comparer avec d'autres types d'installations comme l'éclairage routier ou les installations sportives. Les seuils de 5 lux applicables pour les lieux de travail extérieurs après le couvre-feu [15] sont largement dépassés dans le cadre de l'éclairage horticole, et en ce sens la méthode OSP permet de définir un nouveau cadre qui à terme peut permettre de définir des normes encadrant la pollution lumineuse de l'éclairage horticole tout en incitant les professionnels à mettre en place des moyens afin de la limiter.

Tout d'abord, on a constaté que les LEDs présentaient le plus faible risque de nuisance latérale avec des valeurs de « glow » et de « trespass » inférieures aux lampes HPS et MH. En revanche, l'ULR de l'ensemble de la serre ainsi que le « glow » et le « trespass » supérieur (au-dessus du plan d'installation des luminaires) sont plus élevés pour les lampes LED, ce qui suggère une contribution plus importante au skyglow.

Dans un deuxième temps, les auteurs ont constaté que pour réduire le « trespass », il est nécessaire d'installer des panneaux d'ombrage d'au moins 1,4 m de hauteur. Ces panneaux sont particulièrement efficaces pour l'éclairage HPS et MH (jusqu'à 32 % de réduction du « trespass »,) par rapport à l'éclairage LED (jusqu'à 17 % de réduction). En ce qui concerne « le glow », même si l'utilisation de panneaux de 1 m de haut le réduit considérablement, ils sont moins efficaces que les panneaux de 1,4 m.

6.3.3.4 Etude à l'extérieur de la serre

Afin de valider les résultats présentés grâce à la méthode OSP réalisés par rapport aux parois de la serre, une seconde étude a cherché à reproduire cette méthode mais cette fois-ci à l'extérieur de la serre dans les limites de la propriété.

6.3.3.4.1 Méthodes

Cette méthode a pour but d'identifier s'il y a un impact sur la biodiversité locale en déterminant les niveaux d'éclairage extérieur de la serre. Les systèmes de zonage environnemental sont une approche qualitative qui a été utilisée pour contrôler et gérer les installations d'éclairage extérieur et limiter les éclairages gênants dans diverses zones urbaines/rurales. Comme décrit précédemment, la norme NF EN 12464-2 parties 2 : Lieux de travail extérieurs n'est pas adaptée, cependant, pour la présente étude, une zone rurale/ agricole (E2) est définie et la limite d'éclairement admissible est de 5 lux à la limite de la propriété [15]. Un coefficient de réflectivité de l'herbe à l'extérieur de la serre de 15% a été utilisé.

Pour quantifier la lumière provenant de la serre, des plans horizontaux, verticaux et latéraux ont été placés sur le côté extérieur de la serre (longueur et largeur). La disposition des différents plans est présentée dans la Figure 56.

En fonction de la dimension de la façade (longueur ou largeur), les plans verticaux parallèles à la façade (VP) sont de dix types. Les types ont été définis en termes de distance par rapport à la paroi latérale comme suit : 10 m (VP10), 20 m (VP20), 30 m (VP30), 40 m (VP40), 50 m (VP50), 60 m (VP60), 70 m (VP70), 80 m (VP80), 90 m (VP90) et 100 m (VP100) (Figure 56). La mise en place des dix VP vise à mesurer la diffusion de la lumière avec une distance croissante de la façade. La distance de 100 m correspond ainsi à la limite de la propriété, et il s'agit de la distance maximale pour laquelle le seuil de 5 lux doit être atteint.

D'autre part, des plans horizontaux couvrant l'ensemble des dix plans verticaux VP à différentes hauteurs (0m et 4m) ont été disposés sur la largeur et la longueur de la serre. Enfin, deux plans latéraux ont été définis pour couvrir les côtés de ces "boîtes virtuelles" (Figure 56). Deux trames de point de mesures ont été utilisées (1 x 1 m pour les plans horizontaux et 0,5 x 0,5 m pour les plans verticaux et latéraux). Les plans verticaux et la façade divisent ensuite les plans horizontaux et latéraux en dix zones (Z1 à Z10). La transmittance de chacun de ces plans de mesure est de 100% pour éviter les inter-réflexions de la lumière entre ces surfaces.

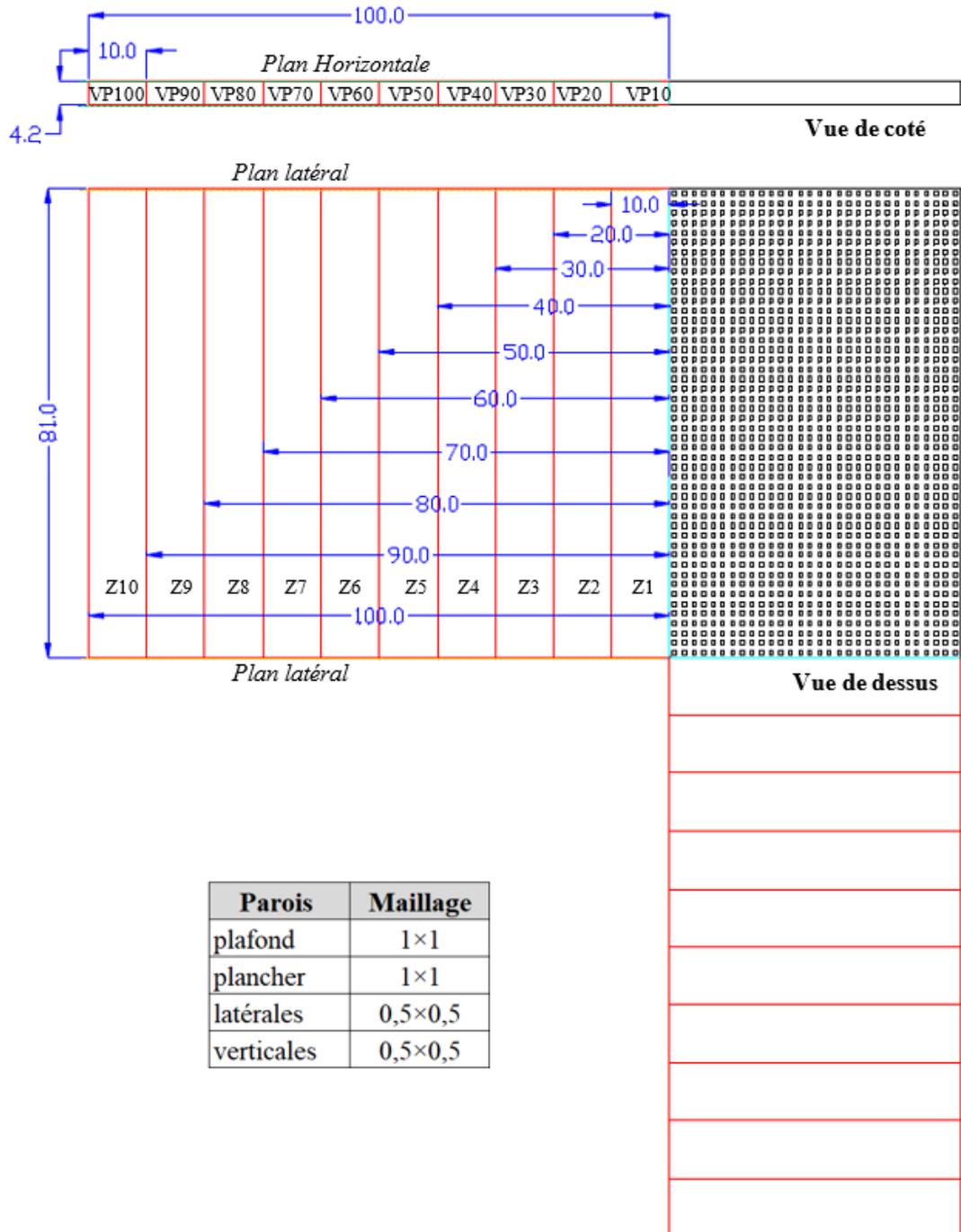


Figure 56. Positions (m), dimensions (m) et trame de mesure (m) des plans verticaux, horizontaux et latéraux.

6.3.3.4.2 Résultats

Pour chaque plan, un scénario sans panneau d'ombrage, puis des scénarios avec des panneaux d'ombrage de 1 m et 1,4 m tels que définis dans l'étude sur les parois de la serre sont évalués.

a) Éclaircements moyens sur les plans verticaux

Les Figure 57 et 58 présentent les valeurs de l'éclaircissement vertical moyen sur les 10 plans verticaux (VP) à l'extérieur de la serre pour les luminaires HPS, MH et LED sur la longueur et la largeur de la serre.

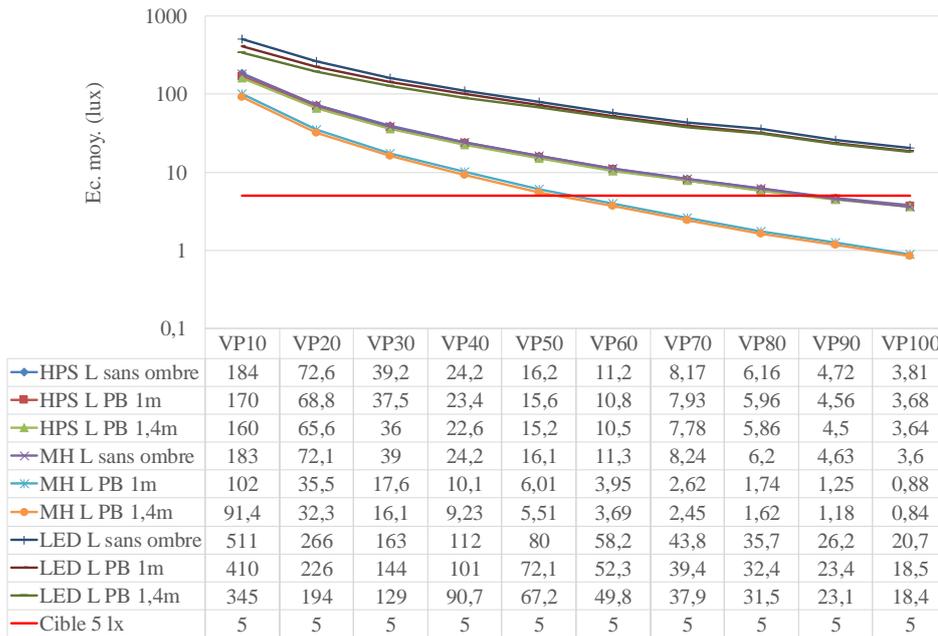


Figure 57. Eclaircissement moyen des plans verticaux sur la longueur (lux)

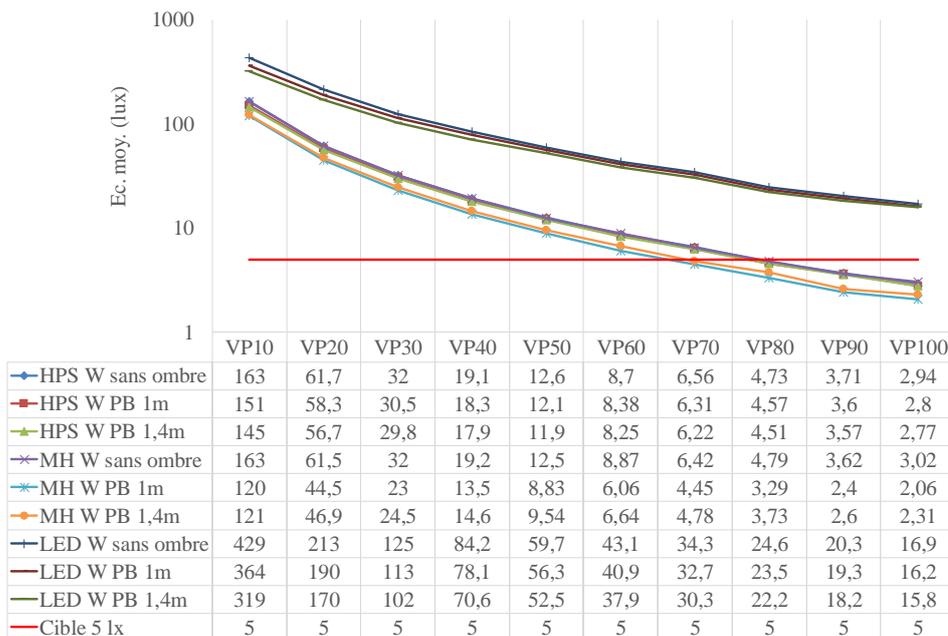


Figure 58. Eclaircissement moyen des plans verticaux sur la largeur (lux).

Longueur de la serre :

- Les deux scénarios avec panneaux d'ombrage pour les lampes MH atteignent le seuil de 5 lux à une distance de 60 mètres.
- L'ensemble des scénarios avec et sans panneaux d'ombrage pour les lampes HPS, ainsi que le scénario MH sans panneau atteignent le critère de 5 lux à une distance de 90 mètres.
- Les scénarios avec et sans effet d'ombrage des luminaires à LED ne respectent pas le critère des 5 lux. A une distance de 100 mètres du mur longitudinal, des valeurs d'environ 18,5 à 20 lux sont observées.

Largeur de la serre

- Les deux scénarios avec panneaux d'ombrage pour les lampes MH atteignent le seuil de 5 lux à une distance de 70 mètres.
- L'ensemble des scénarios avec et sans panneaux d'ombrage pour les lampes HPS, ainsi que le scénario MH sans panneau atteignent le critère de 5 lux à une distance de 80 mètres.
- Pour les luminaires à LED, le seuil de 5 lux est toujours dépassé à une distance de 100m de la serre.

Ces résultats montrent que les panneaux d'ombrage pour les lampes HPS ne réduisent pas significativement l'éclairage moyen sur les plans verticaux à l'extérieur de la serre, que ce soit sur la longueur ou sur la largeur. En revanche, ils permettent de raccourcir cette zone d'impact dans la limite de 5 lux, de 30 m pour les lampes MH sur la longueur et de 10m sur la largeur. Enfin dans tous les scénarios considérés, les lampes LED ne respectent pas le seuil de 5 lux dans les limites de la propriété.

b) Eclairage moyens sur les plans horizontaux

Les Figure 59 à 62 présentent les résultats de l'éclairage horizontal moyen à l'extérieur de la serre. Les résultats sont présentés pour le plan horizontal à une hauteur de 0 m (Figure 59 et 60) et une hauteur de 4 m (Figure 61 et 62), sur la largeur et sur la longueur de la serre.

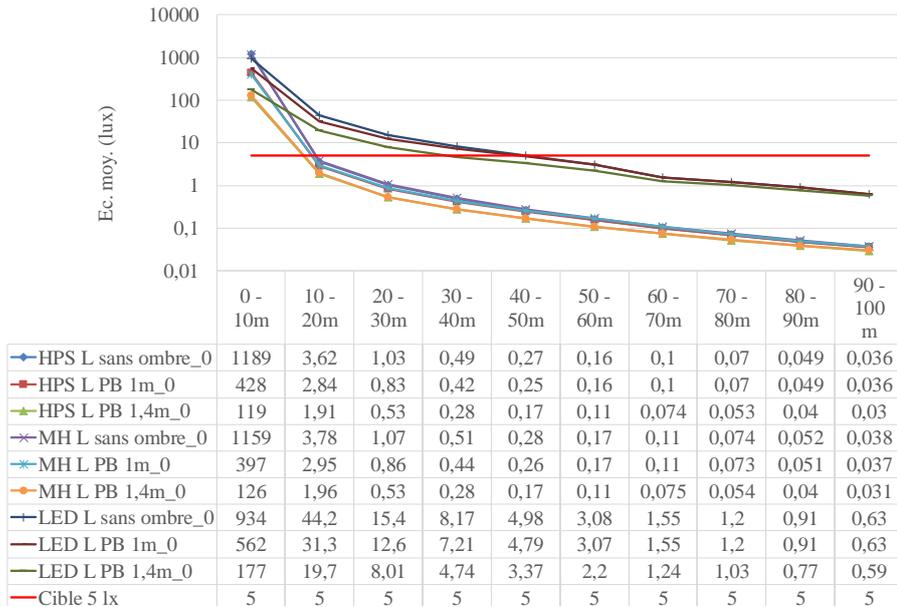


Figure 59. Eclairage moyen sur le plan horizontal (h=0 m) sur la longueur (lux)

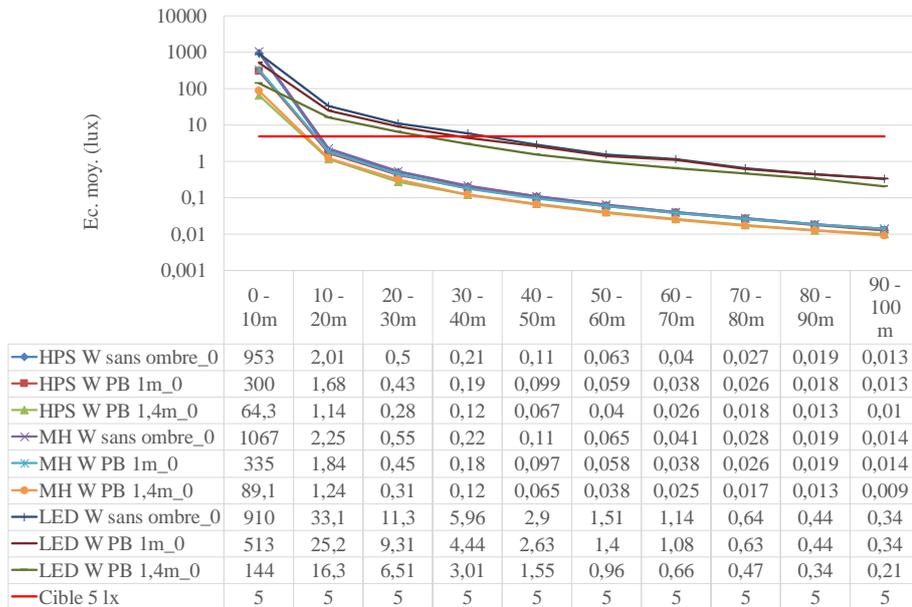


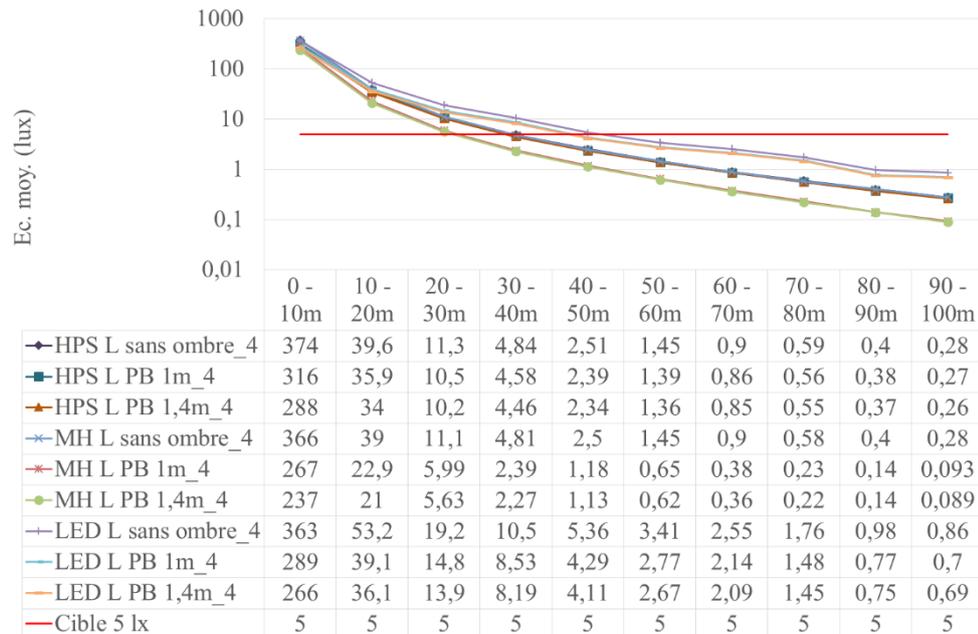
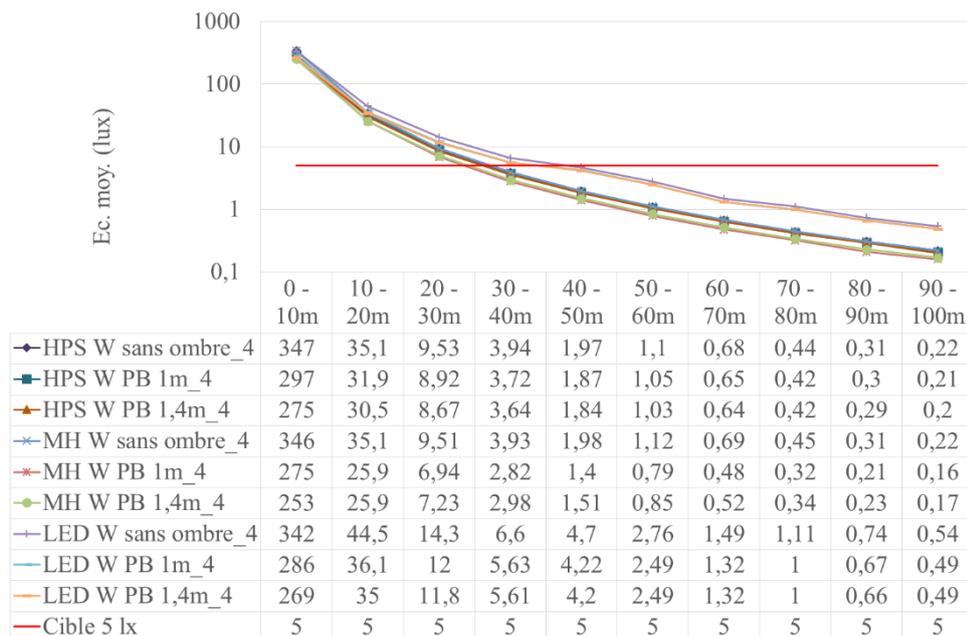
Figure 60. Eclairage moyen sur le plan horizontal (h=0 m) sur la largeur (lux)

Longueur de la Serre (h=0m)

- Tous les scénarios pour les lampes MH et HPS avec ou sans panneau d'ombrage montrent que le seuil de 5 lux est atteint entre 10 et 20 m.
- Pour les lampes LEDs le seuil est atteint à une distance comprise entre 30 et 40m pour le scénario avec panneau d'ombrage de 1,4m de haut et entre 40 et 50 m pour les deux autres scénarios.

Largeur de la serre (h=0m)

- Tous les scénarios pour les lampes MH et HPS avec ou sans panneau d'ombrage montrent que le seuil de 5 lux est atteint entre 10 et 20 m.
- Pour les lampes LEDs le seuil est atteint à une distance comprise entre 30 et 40m pour les deux scénarios avec panneaux d'ombrage et entre 40 et 50 m pour le scénario sans panneaux.

**Figure 61.** Eclairage moyen sur le plan horizontal (h=4 m) sur la longueur (lux)**Figure 62.** Eclairage moyen sur le plan horizontal (h=4 m) sur la largeur (lux)

Longueur de la serre (h=4m)

- Tous les scénarios pour les lampes MH et HPS avec ou sans panneau d'ombrage montrent que le seuil de 5 lux est atteint entre 30 et 40 m.
- Pour les lampes LEDs, le seuil est atteint à une distance comprise entre 40 et 50m pour les deux scénarios avec panneau d'ombrage et entre 50 et 60 m pour le scénario sans panneau.

Largeur de la serre (h=4m)

- Tous les scénarios pour les lampes MH et HPS avec ou sans panneau d'ombrage montrent que le seuil de 5 lux est atteint entre 30 et 40 m.
- Pour les lampes LEDs, le seuil est atteint à une distance comprise entre 40 et 50m pour tous les scénarios.

Afin d'évaluer l'effet des panneaux ombrant proches de la serre, c'est-à-dire dans la zone où potentiellement on retrouve les niveaux d'éclairage les plus élevés, les 10 premiers mètres sur la longueur de la serre ont été étudiés, en détail (Figure 63).

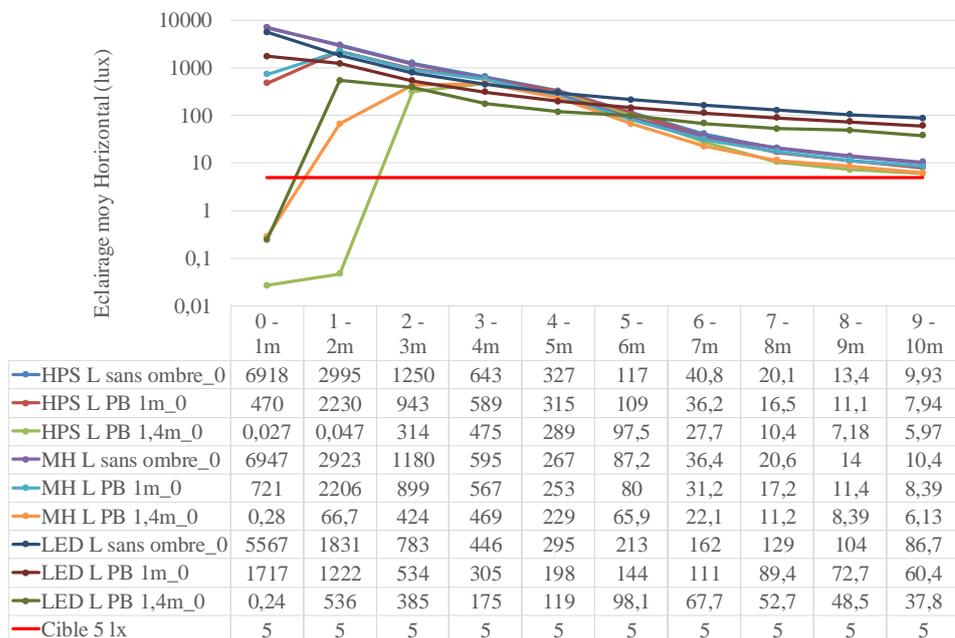


Figure 63. Eclairage moyen au sol entre 0 et 10 m sur la longueur de la serre (lux)

Sans panneaux d'ombrages, les niveaux d'éclairage horizontal au niveau du sol à une distance de 1m sur le côté de la serre sont d'environ 7 000 lux pour les lampes MH et HPS et d'environ 5500 lux pour les luminaires LED. C'est ici que les perturbations pour les écosystèmes environnants seraient les plus élevées. En revanche, elles sont considérablement réduites avec les panneaux de 1m de

hauteur (470 lux pour les lampes HPS, 721 lux pour les lampes MH et 1717 lux pour les luminaires LED) et totalement annulées avec les panneaux de 1.4m. Les niveaux d'éclairage augmentent à nouveau progressivement entre 1m et 3m avant d'être atténués à nouveau au fur et à mesure que l'on s'éloigne.

Sur les plans horizontaux au niveau du sol et à une hauteur de 4 m tous les scénarios répondent au critère des 5 lux dans la limite de la propriété. Il faut cependant souligner que les luminaires LED ont toujours besoin d'une plus grande distance pour atteindre ce seuil. Le halo lumineux au niveau du sol pour les luminaires LED est atténué à une distance de 40 à 50 mètres de la paroi, alors que celui des luminaires HPS et MH sont atténués à partir de 10 à 20 mètres. Cela indique que les luminaires LED génèrent des nuisances lumineuses plus élevées. (Annexe 4).

c) *Eclairages moyens sur les plans latéraux*

Les Figure 64 et 65 présentent les résultats de l'éclairage vertical moyen sur les plans latéraux à l'extérieur de la serre, sur la largeur et la longueur.

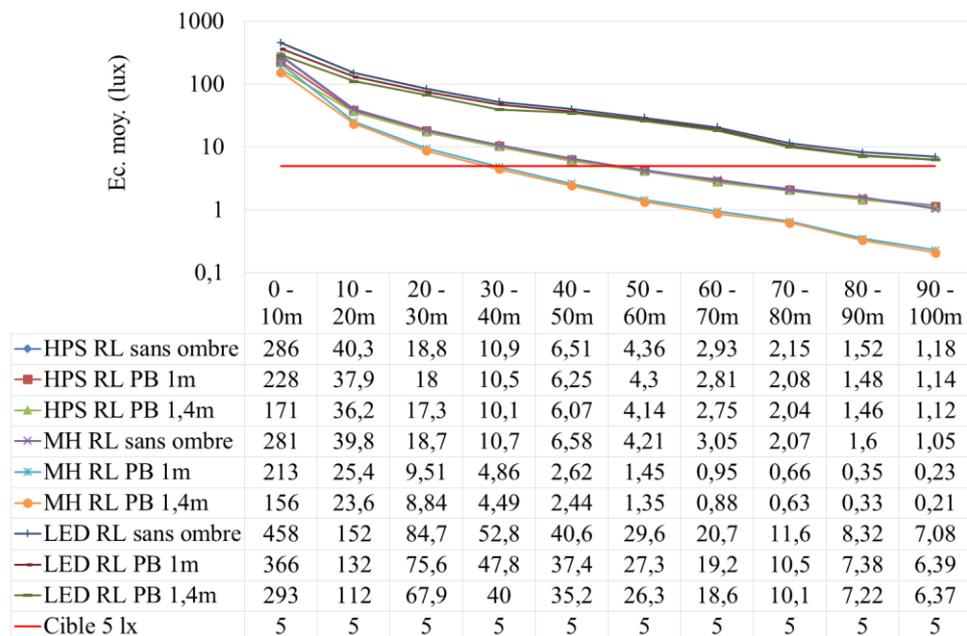


Figure 64. Eclairage moyen sur le plan latéral sur la longueur (lux)

Longueur de la serre :

- Les scénarios MH avec panneaux d'ombrages atteignent le seuil de 5 lux à une distance comprise entre 30 et 40 m.
- L'ensemble des scénarios HPS avec et sans panneaux d'ombrage atteignent le seuil de 5 lux entre 50 et 60 m tout comme le scénario MH sans panneau d'ombrage

- Les scénarios avec et sans panneau d'ombrage des luminaires à LED ne respectent pas le critère des 5 lux dans les limites de la propriété.

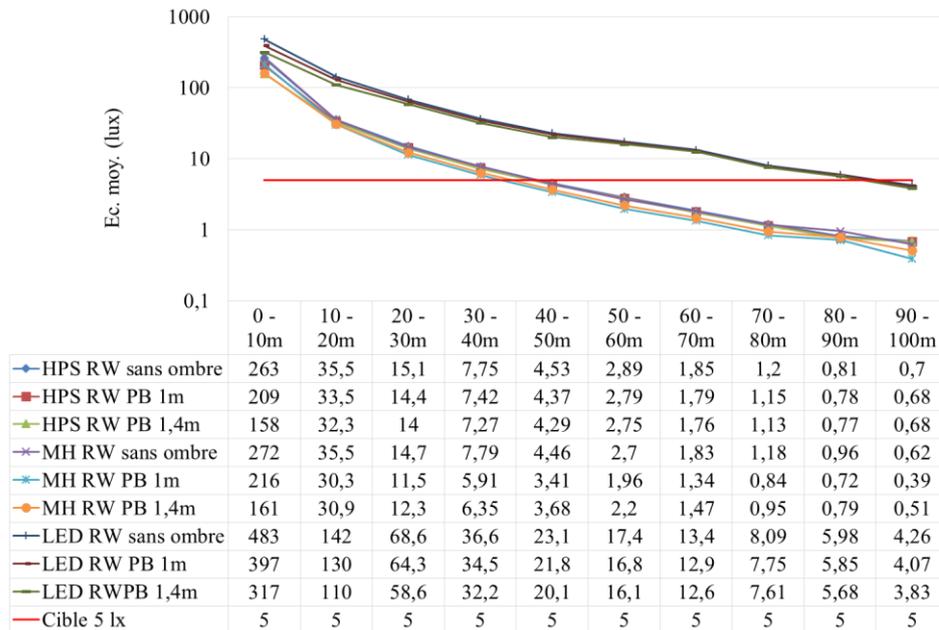


Figure 65. Eclairage moyen sur le plan latéral sur la largeur (lux)

Largeur de la serre :

- L'ensemble des scénarios MH et HPS avec et sans panneaux d'ombrage atteignent le seuil de 5 lux à une distance comprise entre 40 et 50m
- Tous les scénarios pour les luminaires LEDs commencent à respecter le seuil à partir d'une distance de 90 à 100m de la serre.

Alors que tous les scénarios avec les lampes HPS et MH atteignent le seuil de 5 lux à des distances raisonnables de la serre, ceux avec les luminaires LED l'atteignent aux limites sur la largeur de la serre et ne le respectent pas sur la longueur. Une nouvelle fois, ces résultats montrent très clairement des nuisances lumineuses plus importantes pour les luminaires LEDs que pour les autres systèmes testés.

6.3.3.4.3 Conclusion

Le Tableau 25 ci-dessous récapitule les distances moyennes de la serre pour lesquelles le seuil de 5 lux est atteint en fonction des différents scénarios testés. Alors que l'ensemble des scénarios pour les lampes MH et HPS respectent le seuil de 5 lux dans les limites de la propriété ce n'est pas le cas pour les luminaires LED sur les plans verticaux et sur le plan latéral de la longueur de la serre. Globalement ce sont les lampes MH qui génèrent le moins de nuisance lumineuse notamment

lorsqu'elles sont accompagnées de panneaux d'ombrages de 1 ou 1,4 m. Elles sont suivies par les lampes HPS, pour qui les panneaux d'ombrages ne permettent pas de réduire la distance d'atteinte du seuil quel que soit le plan considéré

Tableau 25. Distance moyenne de la serre en m pour respecter le seuil de 5 lux sur la Longueur (L) et sur la largeur (I) en fonction des différents plans et scénarios.

	Vertical		Horizontal (0m)		Horizontal (4m)		Lateral	
	L	I	L	I	L	I	L	I
MH	90	80	15	15	35	35	55	45
MH-1m	60	70	15	15	35	35	35	45
MH-1,4m	60	70	15	15	35	35	35	45
HPS	90	80	15	15	35	35	55	45
HPS-1m	90	80	15	15	35	35	55	45
HPS-1,4m	90	80	15	15	35	35	55	45
LED	x	x	45	45	55	45	x	95
LED-1m	x	x	45	35	45	45	x	95
LED-1,4m	x	x	35	35	45	45	x	95

Bien que les panneaux d'ombrages semblaient montrer un intérêt au niveau des parois en réduisant considérablement le « glow » et le « trespass », lorsqu'on s'intéresse à l'extérieur de la serre leurs effets semblent se limiter à une atténuation des niveaux d'éclairement dans une zone proche de la serre (0-3m). Au-delà de cette distance ils permettent seulement de réduire l'éclairement moyen des lampes MH sur les plans verticaux et latéraux.

La méthode OSP appliquée à l'extérieur de la serre est finalement beaucoup plus précise pour définir la pollution lumineuse émise par l'installation, notamment grâce à une meilleure description de la diffusion de la lumière à l'extérieur dans les limites de la propriété.

6.3.3.5 Discussion

Les résultats en dehors de la serre ne sont pas totalement en ligne avec ceux de l'étude au niveau des parois. Alors que la méthode OSP est présentée comme un moyen simplifié d'évaluer la pollution lumineuse, lorsqu'elle est appliquée au niveau des parois de la serre, les résultats ne sont pas représentatifs de la façon dont la lumière se propage à l'extérieur.

Les résultats de la méthode au niveau des parois indiquent que les luminaires LED produisent des « Glow » et « trespass » latéraux inférieurs aux autres lampes. De plus, l'ULR de l'ensemble de la serre ainsi que le « glow » et le « trespass » supérieur (au-dessus du plan d'installation des luminaires) sont plus élevés pour les lampes LED, ce qui suggère une contribution plus importante au halo lumineux dans le ciel (« skyglow »). Des panneaux d'ombrages de 1,4m permettent de réduire considérablement le « trespass » et le « glow » des différentes lampes.

A l'extérieur de la serre, l'ensemble des scénarios pour les lampes MH et HPS respectent le seuil de 5 lux dans les limites de la propriété ce qui n'est pas le cas pour les luminaires LED sur les plans verticaux et sur le plan latéral de la longueur de la serre. Globalement ce sont les lampes MH qui génèrent le moins de nuisance lumineuse et elles sont suivies par les lampes HPS. L'effet des panneaux d'ombrages se limite à une atténuation des hauts niveaux d'éclairement dans une zone proche de la serre (0-3m). Au-delà de cette distance ils permettent seulement de réduire légèrement l'éclairement moyen des lampes MH sur les plans verticaux et latéraux, et sont inefficaces pour les luminaires LED et HPS.

Lorsqu'on compare les deux méthodes, on confirme tout d'abord des nuisances supérieures vers le haut pour les luminaires LED. En revanche, l'analyse en dehors de la serre contredit les valeurs de « glow » et « trespass » latéraux plus élevés de lampes MH et HPS. En effet les valeurs d'éclairement sur les différents plans verticaux, latéraux et horizontal au niveau du sol sont plus faibles pour les lampes HPS et MH avec ou sans panneaux.

La définition du « glow » et « trespass » au niveau des parois ne semble donc pas suffisante pour décrire comment se diffuse la lumière en dehors de l'installation. Il est nécessaire de prendre en compte également la distribution photométrique des luminaires. La Figure 66 ci-dessous montre les iso-lignes sur la paroi latérale entre 0 et 2 m pour chacun des configurations.

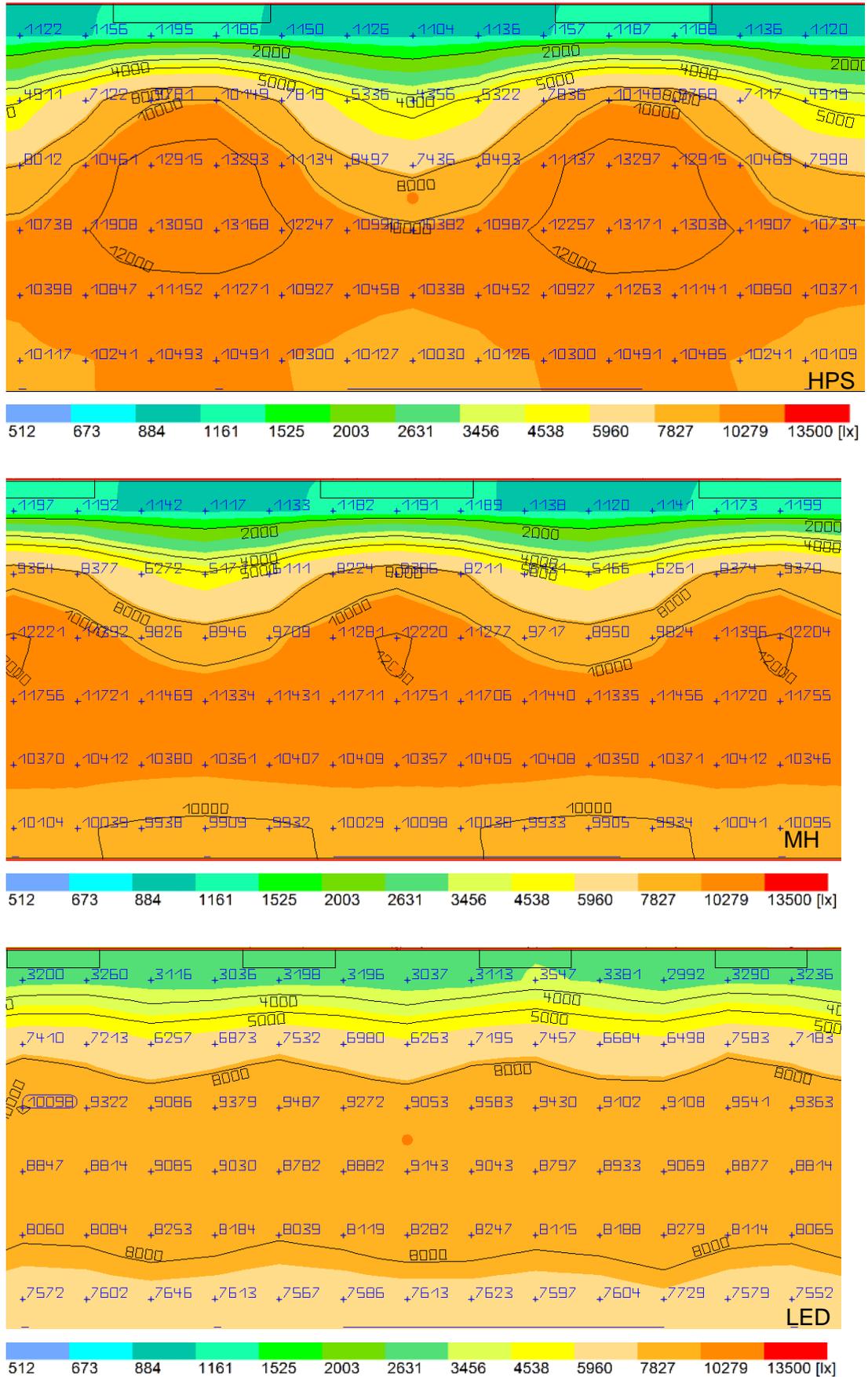


Figure 66. Iso lignes sur la paroi latérale de la serre pour les lampes HPS, MH et LED.

Alors que les lampes HPS et MH présentent des éclairagements plus élevés dans la zone centrale de la paroi, cette lumière ne se propage pas en dehors de la propriété car elle se diffuse dans la direction du sol proche (ce qui explique également l'efficacité des panneaux d'ombrages pour réduire l'éclairage à une distance de 0 à 3 m de la paroi). En revanche on remarque que sur la trame de mesure la plus haute, les niveaux d'éclairage sont plus élevés pour les luminaires LEDs (environ 3000 lux contre 1100 pour les lampes MH et HPS). C'est ceci qui contribue aux nuisances lumineuses qui se propage plus et qui peuvent sortir des limites de la propriété pour les luminaires LEDs.

Ces résultats montrent que pour évaluer correctement la pollution lumineuse latérale de la serre, la méthode OSP appliquée aux parois n'est pas suffisante tout comme la définition du Latéral Light Ratio (LLR). Pour avoir une vue plus précise de la manière dont la lumière se propage à l'extérieur de la serre, il est nécessaire de s'intéresser également à la distribution photométrique latéralement par exemple en considérant les iso-lignes sur les parois ou bien en appliquant la méthode à l'extérieur, ce qui est plus fastidieux.

6.3.3.6 Conclusion sur la pollution lumineuse des serres

La méthode OSP a été utilisée au niveau des parois et à l'extérieur pour évaluer la pollution lumineuse d'une serre commerciale produisant un PPFd de 300 $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$. Alors qu'au niveau des parois, elle est relativement rapide et simple à appliquer, les résultats du « glow » et du « trespass » ne se montrent pas assez précis pour décrire correctement la diffusion de la lumière à l'extérieur.

L'utilité de panneaux d'ombrage allant jusqu'à 1.4m de haut a également été évaluée. Alors qu'ils permettent de réduire considérablement les hauts éclaircissements au sol à une distance de 0 à 3 m de la serre, ils ne permettent pas en revanche de les limiter à des distances plus éloignées que pour les lampes MH et sont inefficaces pour les lampes HPS et LED.

L'ensemble des résultats indique que malgré un flux total émis plus faible, les luminaires LEDs sont responsables de nuisances lumineuses plus importantes que les autres systèmes que ce soit vers le haut ou latéralement, en parti dû à leur distribution photométrique mais également du fait qu'ils soient beaucoup plus nombreux. Alors que les panneaux d'ombrages partiels ne sont pas suffisants pour empêcher l'intrusion de la lumière des luminaires LEDs en dehors de la propriété, le seul moyen vraiment efficace pour que ce type de solution puisse limiter la pollution lumineuse latérale serait qu'ils couvrent l'ensemble de la surface des parois (par exemple en utilisant des rideaux qui l'on tirera à la tombée de la nuit). Il est important que les avantages des luminaires LED mis en avant par l'ACV ne soient pas contrebalancés par la génération de plus grandes nuisances lumineuses.

De nombreuses serres utilisent déjà des matériaux non transparents pour la partie inférieure des parois latérales. Certaines d'entre elles utilisent également des panneaux d'ombrage ajustables au plafond. Dans ce cas, nous étions particulièrement intéressés par les surfaces latérales, et dans quelle mesure il était possible de réduire la pollution lumineuse. En effet, toute la lumière qui sort de la serre est non seulement une source potentielle de pollution mais aussi une perte de revenus pour les cultivateurs professionnels. De plus, tout en réduisant la quantité de pertes de lumière, il est également possible d'optimiser l'installation en réduisant, par exemple, le nombre de luminaires nécessaires pour atteindre le PPFd visé.

Enfin, il est évident que les valeurs des nuisances lumineuses potentielles restent secondaires dans le choix des lampes horticoles que les professionnels souhaiteront utiliser. Le spectre lumineux associé aux types de cultures, ainsi que la consommation énergétique globale de la serre resteront les paramètres

déterminants. En ce qui concerne la consommation d'énergie, les lampes à LED, malgré un nombre plus élevé de luminaires et une obstruction accrue à la lumière naturelle, sont souvent le meilleur choix. Ce sont les besoins spécifiques en termes de répartition spectrale ou un intérêt économique qui pourraient conduire aux lampes HPS et MH. De plus, dans leurs analyses coûts-avantages, les cultivateurs commerciaux devront également prendre en compte le coût initial de l'installation de l'éclairage ainsi que les coûts d'exploitation qui dépendront du nombre de luminaires et du coût de chaque unité. La partie suivante propose d'évaluer ces différents coûts à l'aide d'une étude de retour sur investissement.

6.3.4 Etude de retour sur investissement

Afin de disposer d'un éclairage sur les aspects économiques, un calcul de retour sur investissement simplifié est présenté dans le Tableau 26.

Tableau 26. Tableau de retour sur investissement pour une culture de tomates.

CIBLE PPFD DE 300 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$		UNITE	HPS	MH	LED
Nb. Luminaire		-	864	1 066	2 640
Durée de vie du luminaire		heures	9 900	3 100	50 000
Coût du luminaire		€/luminaire	413,1	447,3	535,5
Coût d'installation initial		€	416534	550376	1595880
Coût d'installation surfacique initial		€/m ²	103	136	394
Énergie annuelle (3 000 heures/an)		kWh/an	2695680	3325920	2257200
Énergie annuelle/surface		kWh/an/m ²	666	821	557
Coût énergétique annuel par surface		€/m ² /an	69	85	58
Coût énergétique annuel		€/an	279542	344898	234072
Rendement de tomates		kg/m ²	80		
Prix de tomate/surface		€/m ²	120		
Revenu de production		€/an	1458000		
RETOUR SUR INVESTISSEMENT (ROI)					
ANS	DESCRIPTION	UNITE	HPS	MH	LED
5	Coût de remplacement des lampes	€/an	356 918	1907287	-
	Investissements (5 ans)	€	2171163	4182153	2766238
	ROI à 5 ans	%	236%	74%	160%
10	Remplacement des lampes	€/an	1070755	4291396	-
	Investissements (10 ans)	€	4282710	8290751	3936596
	ROI à 10 ans	%	240%	76%	270%
15	Remplacement des lampes	€/an	1427674	6675505	-
	Investissements (15 ans)	€	6037338	12399350	5106955
	ROI à 15 ans	%	262%	76%	328%
20	Remplacement des lampes	€/an	2141510	9059614	1413720
	Investissements (20 ans)	€	8148885	16507948	7691033
	ROI à 20 ans	%	258%	77%	279%

Les hypothèses retenues pour ce calcul sont les suivantes :

- Le tarif de la main d'œuvre pour l'installation d'un luminaire est de 69 €/luminaire
- Le taux d'utilisation des lampes est de 3000 h /an
- Le coût de l'électricité est de 0,1037 €/kWh
- Le rendement de production de tomates est de 80 kg/m²
- Le prix de revente des tomates est de 1,5 €/kg.
- L'utilisation des systèmes d'éclairage permet 3 récoltes supplémentaires par an.
- Les coûts de maintenance et de distribution de la production ne sont pas pris en compte.

- L'augmentation du rendement grâce à un spectre lumineux spécifique n'est pas prise en compte.

Le Tableau 26 montre que les systèmes d'éclairage HPS ont le meilleur retour sur investissement sur 5 ans. A partir de 10 ans d'exploitation, ce sont les luminaires LED qui présentent les meilleurs résultats. Le retour sur investissement des lampes MH est largement inférieur aux deux autres systèmes notamment en raison de leur faible durée de vie (3100 h) et du coût de remplacement des lampes. Parmi les échelles de temps considérées, le retour sur investissement le plus élevé pour les lampes HPS est sur 5 ans, celui pour les lampes MH est sur 20 ans et celui pour les lampes LED est sur 15 ans (avant la fin de la durée de vie des luminaires). L'investissement à consentir sur 5 ans est le plus faible pour les lampes HPS, puis pour les lampes LED à partir de 10 ans.

Les investissements à consentir ainsi que les retours sur investissement pour sont légèrement favorables pour les LEDs par rapport aux luminaires HPS et LED, mais le choix final du meilleur système devrait probablement se faire en fonction de la qualité du spectre produit par les lampes afin d'optimiser les rendements de productions. Ce paramètre particulier n'a pas été considéré dans cette étude simplifiée car il dépend notamment des variétés de tomates que l'on cherche à produire. De plus, le plus grand nombre de luminaires LED nécessaires pour atteindre le PPFD cible va bloquer une plus grande portion de l'éclairage naturel comparé aux lampes HPS, ce qui peut réduire les rendements de production et conduire à une plus grande consommation d'énergie pour remplir les besoins lumineux des plantes.

6.3.5 Analyse Multicritère

Différents aspects de l'éclairage horticole ont été évalués. Tout d'abord les impacts environnementaux potentiels des systèmes d'éclairage horticole ont été calculés pour deux unités fonctionnelles différentes liées au PPFd et à l'irradiance. Ensuite, grâce à la modélisation de l'installation dans Dialux et la méthode OSP la pollution lumineuse de la serre a été quantifiée au niveau des parois et dans les limites de la propriété. Enfin une étude économique de retour sur investissement a permis de mettre en avant les lampes qui permettent le meilleur chiffre d'affaire dans le cadre de la culture de tomates. Afin de déterminer quel système d'éclairage est le plus pertinent en fonction de tous les paramètres et résultats précédents une analyse multicritère basée sur le processus d'analyse hiérarchique (AHP) a été réalisée. Il s'agit d'une méthode d'aide à la décision pour résoudre des problèmes de décisions multicritères se basant sur la hiérarchisation des critères. Elle permet de comparer les solutions d'un problème décisionnel sur un ensemble de critères afin d'en déduire la meilleure.

Pour réaliser cette analyse, il est nécessaire de déterminer quels sont les critères et sous-critères à évaluer, les alternatives et enfin les différents évaluateurs. Les alternatives sont les systèmes d'éclairage HPS, MH et LED tandis que les critères et sous-critères retenus sont :

- l'ACV dont les sous-critères sont le PPFd, et les différents domaines de longueur analysé (UV-A, Bleu, Vert, Rouge, PAR et Infra-rouge)
- la pollution lumineuse, dont les sous critères sont le « glow », le « trespass », et les éclairagements sur les différents plans (verticaux, horizontal au sol, horizontal à 4 m et latéraux)
- le coût d'investissement
- le retour sur investissement, dont les sous-critères sont 5, 10, 15 et 20 ans

En ce qui concerne les évaluateurs, ils sont au nombre de 3. Le premier, l'évaluateur « environnemental » est celui pour qui les résultats de l'ACV sont ceux qui pèsent le plus pour la prise de décision. Le second, l'évaluateur « nuisances lumineuses », donne plus d'importance aux calculs de pollution lumineuse. Enfin le troisième, l'évaluateur « économique », considère que les aspects de rentabilité seront ceux qui guideront majoritairement sa décision. Pour chacun des évaluateurs, il est nécessaire de remplir une matrice de comparaison des critères. Les coefficients de Saaty qui vont de 1 à 9 permettent de juger de l'importance d'un

critère par rapport à un autre. Les significations de chacun des coefficients sont décrites dans le Tableau 27 :

Tableau 27. Coefficients de Saaty

Valeur	Définition	Commentaires
1	Importance égale	Deux éléments contribuent également à l'objectif
3	Importance modérée	Le jugement favorise légèrement un élément sur un autre
5	Importance forte	Le jugement favorise fortement un élément sur un autre
7	Importance très forte	Le jugement favorise très fortement un élément sur un autre, sa dominance est démontrée par expérience
9	Importance extrême	La dominance d'un élément par rapport à un autre est démontrée et absolue
2, 4, 6, 8	peuvent être utilisés pour exprimer des valeurs intermédiaires	

Les matrices de comparaison de chaque évaluateur sont présentées dans les Tableaux 28 à 30.

Tableau 28. Matrice de comparaison pour l'évaluateur "environnement".

Critères	ACV	Pollution lumineuse	investissement	ROI
ACV	1,00	3,00	6,00	5,00
Pollution lumineuse	0,33	1,00	4,00	3,00
Investissement	0,17	0,25	1,00	0,20
Retour sur investissement	0,20	0,33	5,00	1,00

L'évaluateur "environnement" donne une importance modérée aux résultats de l'ACV face à ceux de la pollution lumineuse, et une importance forte par rapport aux résultats économiques. La pollution lumineuse a une importance modérée face aux résultats économiques et enfin le retour sur investissement a une importance forte face à l'investissement.

Tableau 29. Matrice de comparaison pour l'évaluateur "nuisances lumineuses".

Critères	ACV	Pollution lumineuse	investissement	ROI
ACV	1,00	0,33	4,00	3,00
Pollution lumineuse	3,00	1,00	6,00	5,00
Investissement	0,25	0,17	1,00	0,20
Retour sur investissement	0,33	0,20	5,00	1,00

L'évaluateur "nuisance lumineuse" donne une importance modérée aux chiffres de pollution lumineuse face à ceux de l'ACV, et une importance forte par

rapport aux résultats économiques. L'ACV a une importance modérée face aux résultats économiques et enfin le retour sur investissement a une importance forte face à l'investissement.

Tableau 30. Matrice de comparaison pour l'évaluateur "économique".

Critères	ACV	Pollution lumineuse	Investissement	ROI
ACV	1,00	3,00	0,17	0,16
Pollution lumineuse	0,33	1,00	0,12	0,11
Investissement	5,88	8,33	1,00	0,20
Retour sur investissement	6,67	9,09	5,00	1,00

L'évaluateur "économique" donne une importance forte de l'investissement et retour sur investissement face aux résultats de l'ACV et une importance extrême face au chiffre de la pollution lumineuse. L'importance du retour sur investissement est forte face à l'investissement. Enfin l'importance de l'ACV est modérée face aux chiffres de pollution lumineuse.

L'ensemble des autres matrices utilisées pour la comparaison des sous-critères sont disponibles en Annexe 5. Voici un résumé des choix importants fait lors de l'élaboration de ces matrices :

- Le PPFD a une importance forte à très forte sur les différents domaines de longueur d'onde.
- Le bleu et le rouge ont des importances modérées face aux UV-A, Infra-rouge et PAR et une importance forte face au vert.
- Les éclairages verticaux, horizontaux et latéraux ont des importances égales entre eux et des importances fortes face au « trespass » et « glow ».
- Le retour sur investissement à 5 ans a une importance modérée face au retour sur 10 et 15 ans, et une importance égale face au retour sur 20 ans.

Les résultats de l'étude multicritère basés sur le processus d'analyse hiérarchique (AHP) selon le point de vue de chaque évaluateur sont disponibles en Annexe 6. Selon les observateurs « environnement » et « économique » les luminaires LEDs sont le meilleur choix, tandis que selon l'observateur « nuisances lumineuses » le meilleur choix est le luminaire MH.

Les priorités moyennes par critère sont représentées dans la Figure 67. Elle indique le poids moyen de chaque critère dans le cas général. Les critères d'ACV,

de pollution lumineuse et de retour sur investissement ont un poids à peu près équivalent et deux fois plus important que le critère d'investissement.

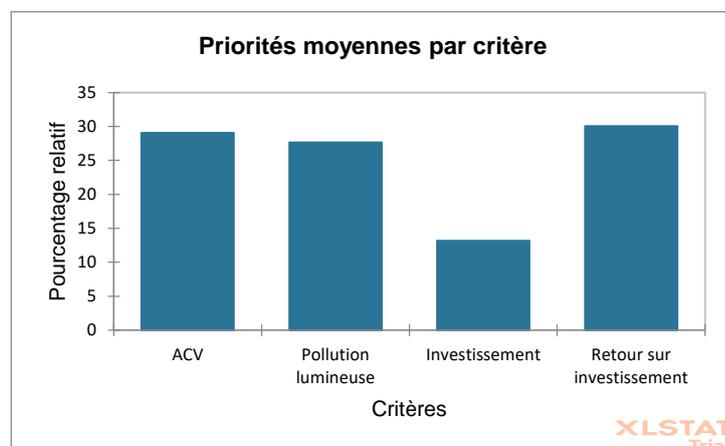


Figure 67. Priorités moyennes par critère en %.

Les résultats du point de vue général qui considère le point de vue de tous les observateurs, sont présentés dans Tableau 31. Le point de vue général permet alors de déterminer quel est le meilleur choix de lampe pour l'éclairage horticole, parmi celles testées dans cette étude.

Tableau 31. Priorités moyennes par alternative du point de vue général.

Critères/Alternatives	HPS	MH	LED
ACV	8,43	8,06	12,60
PPFD	2,93	0,92	6,21
UV-A	0,27	0,90	0,08
IR	0,90	0,24	0,10
Bleu	0,48	4,14	1,18
Vert	0,30	0,42	0,57
Rouge	2,64	0,53	2,64
PAR	0,91	0,91	1,82
Pollution lumineuse	9,99	13,89	3,78
« Glow »	0,31	0,31	0,64
« Trespass »	0,19	0,34	0,73
Eclairage Vertical	1,73	4,04	0,52
Eclairage Horizontal 0 m	2,86	2,86	0,57
Eclairage Horizontal 4 m	2,69	2,69	0,90
Eclairage Latéral	2,21	3,65	0,43
Investissement	4,66	1,19	7,33
Retour sur investissement	12,41	3,92	13,74
Retour sur investissement 5 ans	6,70	2,66	1,28
Retour sur investissement 10 ans	1,19	0,24	2,29
Retour sur investissement 15 ans	1,23	0,32	3,69
Retour sur investissement 20 ans	3,29	0,69	6,48
Total	66,33	52,92	67,56

L'alternative qui présente le score total le plus élevé et celle que l'analyse multicritères indique comme étant la plus pertinente selon le point de vue des différents observateurs. Le système d'éclairage à LED est donc le meilleur choix. Alors que les performances des lampes MH sont largement inférieures, celle des lampes HPS sont en réalité très proches lorsqu'on prend en compte tous les avis et critères. Le spectre d'action photosynthétique et la courbe de McCree ont été utilisés pour déterminer l'importance des domaines de longueur d'onde les uns par rapport aux autres. Ces courbes représentant des spectres d'absorption moyens, le choix final doit probablement prendre en compte le type de culture pour déterminer laquelle des lampes HPS ou LED est plus à même de remplir les besoins lumineux. Les moindres performances de luminaires LED en ce qui concerne la pollution lumineuse sont visibles mais selon elles sont compensées par des meilleures performances par rapport aux critères ACV et économiques.

Pour finir, les choix de coefficients de Saaty ont une grande importance dans les résultats finaux. Ils ont été choisis pour représenter les profils de différents évaluateurs représentatifs de différents acteurs de la société mais ils restent arbitraires, et des pondérations différentes pourraient conduire à des préconisations différentes. Les niveaux d'importance entre les sous-critères sont quant à eux issus des résultats précédents et des différentes connaissances dans le domaine de l'horticulture. Ils sont donc plus robustes, mais ils restent dépendants de la configuration et des choix de lampes qui ont été faits auparavant. En ce sens, ces résultats ne peuvent pas être catégoriques quant aux meilleurs systèmes d'éclairage à utiliser de manière générale pour l'horticulture en environnement contrôlé, mais ils indiquent le choix optimal dans les conditions de cette étude.

6.3.6 Conclusion

Cette étude avait pour but de réaliser une analyse multicritère des systèmes d'éclairage horticole afin d'évaluer les impacts environnementaux, les nuisances d'usages (pollution lumineuse) et l'intérêt économique et déterminer le choix optimal parmi différentes lampes HPS, MH et LED, chacune d'entre elles disposant de particularités en termes de distribution spectrale, de consommation d'énergie et de nombre de luminaires à installer pour produire un PPFD similaire.

Après avoir défini le cas d'étude et les caractéristiques de l'installation des systèmes d'éclairage, l'ACV d'une serre horticole a été réalisée pour les trois systèmes d'éclairage différents. Les deux unités fonctionnelles proposées permettent d'évaluer l'aspect quantitatif (PPFD) et l'aspect qualitatif (irradiance). Lorsqu'il s'agit de l'aspect quantitatif, les luminaires LEDs sont ceux qui génèrent le moins d'impacts potentiels grâce notamment à une plus faible consommation d'énergie qui compense un nombre de luminaires à installer plus important. La consommation d'énergie intense des serres horticoles fait des systèmes les moins gourmands, les plus avantageux d'un point de vue économique, mais également en terme d'impacts environnementaux, ce qui explique l'adoption rapide des luminaires LED pour ce type d'utilisation. Lorsqu'on s'intéresse à l'aspect qualitatif, l'ACV montre qu'en fonction des besoins des plantes, le choix du luminaire LED testé n'est pas forcément le plus adéquate. En effet, ces performances sont faibles quand il s'agit de la production de lumière en dehors du PAR (UV-A et infra-rouge). Il en est de même pour la composante bleue et verte pour qui les lampes MH sont moins impactantes. La seule composante pour laquelle les luminaires LEDs se distinguent est le rouge. Globalement, les luminaires MH semblent plus performants quand il s'agit de l'aspect qualitatif.

Dans un second temps, la méthode OSP a été utilisée au niveau des parois et à l'extérieur pour évaluer la pollution lumineuse. Alors qu'au niveau des parois, elle est relativement rapide et simple à appliquer, les résultats du « glow » et du « trespass » ne se montrent pas assez précis pour décrire correctement la diffusion de la lumière à l'extérieur. L'ensemble des résultats indique que malgré un flux total émis plus faible, les luminaires LEDs sont responsables de nuisances lumineuses plus importantes que les autres systèmes que ce soit vers le haut ou latéralement, en parti dues à leur distribution photométrique mais également du fait qu'ils soient beaucoup plus nombreux. Ce travail a finalement mis en évidence la nécessité de mettre en place des mesures pour limiter la pollution lumineuse conséquente des

serres commerciales utilisant des systèmes d'éclairage et ceci quelles que soient les lampes choisies. En effet, toute la lumière qui sort de la serre est non seulement une source potentielle de pollution mais aussi une perte de revenus pour les cultivateurs professionnels. De plus, tout en réduisant la quantité de pertes de lumière, il est également possible d'optimiser l'installation en réduisant, par exemple, le nombre de luminaires nécessaires pour atteindre le PPFD visé. Alors que les panneaux d'ombrages partiels ne sont pas suffisants pour empêcher l'intrusion de la lumière des luminaires LEDs en dehors de la propriété, le seul moyen vraiment efficace pour que ce type de solution puisse limiter la pollution lumineuse latérale serait qu'ils couvrent l'ensemble de la surface des parois (par exemple en utilisant des rideaux que l'on tirera à la tombée de la nuit).

Ensuite, une étude de retour sur investissement a montré que les systèmes d'éclairage HPS ont le meilleur retour sur investissement sur 5 ans. A partir de 10 ans d'exploitation se sont les luminaires LED qui présentent les meilleurs résultats. Le retour sur investissement des lampes MH est largement inférieur aux deux autres systèmes notamment en raison de leur faible durée de vie (3100 h) et du coût de remplacement des lampes. Parmi les échelles de temps considérées, le retour sur investissement le plus élevé pour les lampes HPS est sur 5 ans, celui pour les lampes MH est sur 20 ans et celui pour les lampes LED est sur 15 ans (avant la fin de la durée de vie des luminaires). L'investissement à consentir sur 5 ans est le plus faible pour les lampes HPS, puis pour les lampes LED à partir de 10 ans.

Enfin, une analyse multicritère basée sur le processus d'analyse hiérarchique (AHP) a permis de déterminer quel système d'éclairage est le plus pertinent en fonction de tous les paramètres et résultats précédents. Il s'agit d'une méthode d'aide à la décision se basant sur la hiérarchisation des critères pour résoudre des problèmes de décision multicritères. Elle permet de comparer les solutions d'un problème décisionnel sur un ensemble de critères afin d'en déduire la meilleure. L'alternative qui présente le score total le plus élevé et celle que l'analyse multicritère indique comme étant la plus pertinente selon le point de vue des différents observateurs est le système d'éclairage à LED. Alors que les performances des lampes MH sont largement inférieures, celles des lampes HPS sont en réalité très proches lorsqu'on prend en compte tous les avis et critères. Les moindres performances de luminaires LED en ce qui concerne la pollution lumineuse sont visibles mais elles sont compensées par des meilleures performances par rapport aux critères ACV et économiques.

Finalement, les résultats ne peuvent pas être catégoriques quant aux meilleurs systèmes d'éclairage à utiliser de manière générale pour l'horticulture en environnement contrôlé, mais ils indiquent le choix optimal dans les conditions de cette étude. Contrairement aux lampes HPS, les spectres proposés par les luminaires LEDs sont multiples et d'autres luminaires pourraient présenter des résultats différents. Le choix final doit prendre en compte le type de culture pour déterminer laquelle des lampes HPS ou LED est plus à même de remplir les besoins lumineux. La qualité des plantes, fruits ou légumes produits dans la serre n'a pas été prise en compte dans cette étude, mais lorsque le luminaire est optimisé pour remplir les besoins lumineux, la quantité produite mais également la qualité nutritionnelle et gustative a des avantages économiques et sanitaires certains qui pourraient faire l'objet eux aussi d'une évaluation multicritère sur un cas spécifique.

7 Discussion

Une large étude bibliographique a d'abord permis de mettre en avant les enjeux liés à la lutte contre les dérèglements climatiques ainsi que la diversité des impacts des systèmes d'éclairages et des méthodes pour les analyser. L'évolution rapide des technologies, des usages et des contextes nous invite à prendre en compte l'écologie de l'action dont le premier principe est que « *sitôt initiée dans un milieu donnée, toute action entre dans un jeu d'inter-rétroactions qui en modifient, détournent, voire inverse le cours : elle échappe ainsi à la volonté de son auteur* » [29]. Grâce à une vision systémique, l'un des objectifs de ce travail était de développer des méthodes s'inscrivant dans cette écologie de l'action et qui permettent l'analyse des impacts de l'éclairage et le développement de stratégies visant à les limiter. Les multiples usages de l'éclairage représentent chacun des problématiques différentes, nécessitant des métriques et méthodes particulières pour être analysées et résolues. L'Analyse et le Coût du Cycle de Vie ainsi que l'analyse multicritère sont certaines de ces méthodes.

Trois études s'appuyant sur l'ACV et le CCV ont été réalisées dans ce travail. L'ACV des systèmes d'éclairages intérieurs a permis de mettre en évidence l'intérêt des ampoules LEDs plus récentes pour réduire les impacts environnementaux. Elle a également montré comment différents profils d'usagers pourraient avoir des intérêts pour plus de durabilité et /ou d'efficacité. En effet, un des résultats essentiels est que, lorsqu'on se trouve dans des pays avec une électricité faiblement carbonée, la phase d'utilisation des lampes n'est plus nécessairement celle qui contribue le plus aux impacts du cycle de vie. Alors que ce constat est probablement amené à devenir de plus en plus prégnant avec la décarbonation de nos systèmes de production d'électricité, il est primordial de prendre en compte cette particularité pour pouvoir proposer des lampes adéquates. Actuellement, la course à l'efficacité reste malgré tout l'objectif numéro un de nombreux pays, et devant la grande diversité des ampoules LEDs disponibles, il est important de pouvoir orienter les consommateurs vers les produits les plus efficaces, par exemple, en mettant en avant très clairement l'efficacité des lampes sur les emballages. Cependant, il est également nécessaire de considérer les autres aspects de la soutenabilité (fiabilité, durabilité, réutilisabilité, réparabilité...) pour anticiper des tensions autour de l'approvisionnement sur des métaux ou matériaux critiques, mais également pour continuer de progresser efficacement vers la diminution des impacts de l'éclairage. L'industrie de l'éclairage a déjà réalisé des progrès considérables en diminuant les impacts de fabrication des ampoules LEDs, la prochaine étape est maintenant d'en améliorer tous les

processus de la fin de vie, voire de la nouvelle vie. L'analyse de sensibilité a montré comment une mauvaise fiabilité des lampes pouvait complètement annihiler les progrès permis par l'amélioration de l'efficacité dans des pays comme la France et la Nouvelle-Zélande. L'analyse de CCV le plus bas a également montré un intérêt économique pour plus de durabilité des lampes en France. Mettre en place des processus stricts (normes, réglementation, suivie de qualité) peut ainsi permettre de certifier la fiabilité des lampes et de limiter le phénomène de panne prématurée.

D'autre part, ce regain d'intérêt pour la fiabilité peut également être l'opportunité de développer la réparabilité. En effet, les pannes prématurées peuvent être causées par divers sous-ensembles de la lampe (driver, connectiques ou modules LEDs) et aujourd'hui une lampe devient totalement obsolète dès la défaillance de l'un d'entre eux. Le driver de la lampe contribue à la majeure partie (> 95 %) des impacts de la phase de fabrication et le fait de ne pas pouvoir le réutiliser lorsqu'il est encore fonctionnel relève du gaspillage de ressources précieuses. Une plus grande standardisation et modularité du système lampe pourrait permettre de limiter ce gaspillage mais également de faciliter les opérations de valorisation et de recyclage en fin de vie.

Enfin ce travail a également montré comment l'ajout de fonctionnalités peut être différemment contraint en fonction du contexte. Qu'elles soient incluses pour améliorer les performances ou le confort, l'ajout de fonctionnalités a pour effet d'augmenter les impacts de la phase de fabrication pour réduire ceux de l'utilisation. Les transferts d'impacts sont alors nombreux et il est nécessaire de s'assurer que le rapport coût-bénéfice est positif. Lorsqu'il s'agit de fonctionnalités visant à améliorer les performances, l'Analyse de Cycle Vie permet de le faire. La démarche proposée pour l'analyse du CLO doit être généralisée dès la conception des fonctionnalités pour s'assurer de la pertinence de son ajout en fonction des typologies et contextes des usagers. La difficulté majeure concerne les fonctionnalités de confort. Alors que certains risques ont déjà fait l'objet de recherche pour permettre de les quantifier et les réguler (Eblouissement, Modulation temporelle de la lumière), d'autres comme les effets de la lumière bleue sont encore difficiles à quantifier. Alors que l'industrie se saisit de ces problématiques avec l'Human Centric Lighting et les Smart lampes, leurs impacts d'usages restent difficiles à comparer avec les autres impacts énergétiques et/ou matériels qu'elles peuvent générer, et ces transferts d'impacts devront être l'objet d'études plus approfondies pour valider ces nouvelles fonctionnalités

Dans l'optique de la prise en compte des nouveaux usages et des impacts qui y sont associés, une troisième étude a proposé une analyse multicritère de l'éclairage horticole commercial. Elle a permis d'évaluer : les critères environnementaux grâce à l'ACV et l'utilisation d'unité fonctionnelle quantitative et qualitative ; les critères de nuisances d'usage grâce à une quantification de la pollution lumineuse ; et le critère économique grâce à une étude de retour sur investissement. Du point de vue des impacts environnementaux, la phase d'utilisation est largement dominante ce qui fait de la consommation globale de l'installation un des paramètres déterminants qui poussent à l'adoption des luminaires LEDs dans ce secteur. L'approche qualitative a cependant mis en avant que la définition de l'unité fonctionnelle peut apporter des résultats différents de l'approche quantitative, avec des luminaires LED qui sont seulement plus performants dans les longueurs d'onde entre 600 et 700nm. Les résultats de ces deux approches ont permis d'alimenter les sous-critères environnementaux de l'analyse multicritère.

Par la suite la méthode OSP a également été appliquée selon deux approches afin d'évaluer la pollution lumineuse de l'installation. Tout d'abord, elle a permis de quantifier les « glow » et le « trespass » au niveau des parois de la serre, puis elle a permis d'identifier les distances à partir desquelles un seuil admissible d'éclairement de 5 lux est atteint. Une nouvelle fois, ces deux approches ont montré des résultats qui pouvaient différer mais elles confirment toutes les deux à quel point il est nécessaire de limiter la pollution lumineuse conséquente des serres commerciales utilisant des systèmes d'éclairage. Ce constat est d'autant plus vrai pour l'éclairage à LED qui, en termes d'éclairement, contribue plus à la pollution lumineuse dans toutes les directions par rapport aux lampes HPS et MH. Il s'agit ici d'un bon exemple de transfert d'impact engendré par l'utilisation d'une nouvelle technologie. Il reste finalement d'autres aspects à explorer, notamment celui de la distribution spectrale de puissance qui a des impacts différents en fonction des plantes et des espèces, et dont cette approche quantitative ne révèle pas les subtilités. Les chaînes de cause à effet ont encore besoin d'être totalement comprises avant de pouvoir faire des liens plus évidents entre la quantification de la pollution lumineuse et la caractérisation des impacts qu'elles génèrent réellement.

Enfin une dernière étude économique a permis de montrer de meilleures performances pour les luminaires LEDs et HPS dans ce domaine. Tous ces résultats ont pu ensuite alimenter les paramètres d'une analyse multicritère réalisée grâce à la méthode AHP (processus d'analyse hiérarchique). Cette méthode permet de

comparer les différents aspects de l'éclairage horticole même si ils sont quantifiés avec des métriques différentes. L'alternative qui présente le score total le plus élevé est le système d'éclairage à LEDs, suivi de près par les lampes HPS. Les moindres performances de luminaires LEDs en ce qui concerne la pollution lumineuse sont visibles mais elles sont compensées par des meilleures performances par rapport aux critères « ACV » et « économiques ». Les transferts d'impacts sont encore ici au centre de la problématique et de sa résolution. L'analyse multicritère est aujourd'hui une des seules méthodes qui permettent de réaliser cet exercice. Elle se base sur le point de vue de différents acteurs qui cherchent à optimiser l'un des aspects considérés (impacts environnementaux, pollution lumineuse et économie), mais elle intègre également l'importance relative des différents sous critères à partir des résultats des études précédentes. Toutefois, les résultats de l'analyse dépendent toujours de certains choix arbitraires dans les coefficients de pondération et ils sont uniquement représentatifs du contexte et des conditions analysées. En ce sens, les résultats ne peuvent pas être catégoriques quant aux meilleurs systèmes d'éclairage à utiliser de manière générale pour l'horticulture en environnement contrôlé, mais ils indiquent le choix optimal dans les conditions de cette étude. Une étude plus approfondie sur les spectres des différentes lampes, que ce soit dans le cadre de l'amélioration des rendements ou des qualités nutritives ou gustatives de la production mais également dans le cadre de la caractérisation des impacts de la pollution lumineuse sur les écosystèmes environnants, peut permettre à terme de continuer d'enrichir cette analyse multicritère.

Pour finir, l'usage des serres commerciales doit lui-même être discuté. Il s'agit ici d'une problématique qui dépasse largement le cadre des systèmes d'éclairages puisqu'elle fait notamment référence à la qualité des sols, à l'autonomie alimentaire, à nos modes de vies. Les serres commerciales permettent par exemple de préserver les sols en limitant les ajouts d'intrants chimiques de l'agriculture traditionnelle. Elles permettent également de fournir des fruits et légumes qui seraient seulement accessibles par le biais de l'importation. Cependant, alors que leur intérêt économique est prouvé, les systèmes d'éclairages des serres commerciales engendrent une consommation considérable en énergie et matériaux par rapport à l'agriculture traditionnelle. De plus, ils contribuent activement à l'augmentation de la pollution lumineuse et des perturbations sur les équilibres écosystémiques que nous avons intérêt à préserver. Il serait alors nécessaire de s'assurer que ce type d'installation ne se développe pas seulement par intérêts économiques, mais lorsque le contexte l'impose réellement et qu'elles répondent à un besoin avéré

plutôt qu'à des dérives consuméristes ou encore lorsque l'alternative est plus impactante.

8 Conclusion

L'un des objectifs de ce travail était de proposer une méthode pour prendre en compte les différents impacts de l'éclairage qui ne peuvent pas être considérés par l'ACV classique. Pour répondre à cet objectif, une analyse multicritère a permis d'intégrer la pollution lumineuse et les résultats économiques dans le processus d'aide à la décision autour du choix des systèmes d'éclairages pour les serres commerciales. Ce travail a montré que chaque lampe avait des performances différentes en fonction des différents critères auxquels on s'intéresse. Déjà, lorsqu'on s'intéresse uniquement à l'ACV, le choix de l'unité fonctionnelle amène à des conclusions différentes. Même si les luminaires LEDs génèrent moins d'impacts sur le cycle de vie, en fournissant une quantité de lumière donnée, ils sont moins performants lorsqu'on s'intéresse à des domaines de longueur d'onde précis. Ensuite, la méthode d'évaluation de la pollution lumineuse a mis en avant une contribution plus importante pour les luminaires LEDs. Ce constat nous invite à mettre en place des mesures pour éviter que la transition vers les luminaires LEDs soit la source de nuisances lumineuses accrues. Le rôle des concepteurs de luminaire mais également de la structure de la serre est ici déterminant pour remplir cette mission. Enfin, l'étude de retour sur investissement a permis de montrer que la rentabilité des lampes HPS et LED était supérieure à celle des lampes MH. L'analyse multicritère a finalement conduit à l'agrégation de ces différents résultats pour identifier des performances supérieures pour les luminaires LEDs et HPS. Grâce à un cadre d'étude commun et un élargissement des impacts hors du champ de l'ACV, l'analyse multicritère se rapproche du cadre défini par l'Analyse de Soutenabilité du Cycle de Vie sans toutefois parvenir à y intégrer la dimension sociale. Cette méthode a cependant le mérite de pouvoir être enrichie et reproduite pour d'autres usages de l'éclairage.

Ce travail ouvre ainsi de nouvelles perspectives pour la poursuite de l'intégration des impacts d'usages grâce à l'analyse multicritère. Ce type de méthode doit être reproduit en y intégrant des aspects liés à la santé et l'humeur notamment. Pour cela, il sera nécessaire de différencier les catégories d'usagers qui ne sont pas tous aussi sensibles aux variations du spectre lumineux et de disposer d'un cadre commun pour l'évaluation des impacts de la lumière sur la santé.

L'autre objectif de ce travail était de mettre en place différentes méthodes qui permettent de réévaluer les impacts des systèmes d'éclairage à la vue des développements récents et d'identifier de nouvelles pratiques pour qu'ils continuent

de contribuer efficacement à diminuer les impacts des activités humaines. Le contexte de l'Anthropocène a mis en évidence les concepts de sobriété énergétique et matérielle, qui se matérialisent dans le cadre des systèmes d'éclairage comme l'efficacité et la durabilité. L'ACV des systèmes d'éclairages d'intérieurs a montré comment chacun de ces concepts peut contribuer de manière plus ou moins efficace en fonction des moyens de production de l'électricité. Cet exercice nous invite à prendre en compte le contexte pour pouvoir orienter correctement le développement des solutions technologiques (dont les systèmes d'éclairage font partie). L'amélioration de l'efficacité permet de contribuer aux objectifs de réduction de notre consommation d'énergie et elle se montre d'autant plus efficace pour réduire les impacts environnementaux quand la production d'énergie est polluante. Toutefois on assiste à de nombreux transferts d'impacts entre, d'une part, la fabrication, la consommation d'énergie, et, d'autre part, les impacts directs et indirects sur l'Homme et son environnement. Alors que les transferts d'impacts mis en évidence dans ce travail sont symptomatiques des transitions technologiques dans un monde en constante évolution, les futurs développements autour des technologies d'éclairage ne devront pas seulement se concentrer sur l'ajout de fonctionnalité ou l'amélioration de l'efficacité. Au-delà de certains seuils qui sont parfois difficiles à définir, l'efficacité des technologies n'est plus le meilleur moyen pour réduire les impacts de nos activités. Il est donc important dès aujourd'hui de penser la sobriété matérielle. Les aspects de fiabilité, de réparabilité ou de circularité mais également les effets rebonds qui ont tendance à augmenter le nombre de sources lumineuses doivent également être mieux pris en compte. Cette sobriété matérielle va s'imposer progressivement comme le prochain défi à relever pour l'éclairage mais également pour tous les autres produits électroniques ou numériques.

Ce travail ouvre finalement des perspectives pour l'innovation autour de la conception des systèmes d'éclairages. Les futurs systèmes lampes devront être fiables mais également facilement démontables, réparables, réutilisables et recyclables. La collecte et le traitement des ampoules doit continuer de se développer et les Eco organismes et fabricants doivent travailler de concert pour faciliter ces opérations. Les futures lampes devront être toujours plus efficaces, mais pas au détriment d'une utilisation inconsidérée de matières premières. Des innovations qui vont au-delà de l'ajout de fonctionnalités ou de connectivité et qui devront faire de l'ampoule de demain un produit soutenable qui éclaire comme il faut là où il faut, c'est-à-dire au juste nécessaire, avec une lumière de qualité uniquement sur les zones souhaitées.

9 REFERENCES

- [1] N. DuVall, *Domestic technology: a chronology of developments*, vol. 26, no. 09. Boston Mass.: G.K. Hall, 1989.
- [2] F. H. Garrison, "The history of heating, ventilation and lighting," *Bull. N. Y. Acad. Med.*, vol. 3, no. 2, p. 56, Feb. 1927.
- [3] R. S. Yates, "The History of Lighting," *SAIEE Journals Mag.*, 1983.
- [4] P. Telesco, *Exploring candle magick: candle spells, charms, rituals, and divinations*. New Page Books, 2001.
- [5] "History of Candles - Who Invented Candle?" [Online]. Available: <http://www.historyoflighting.net/lighting-history/history-of-candles/>. [Accessed: 18-Oct-2021].
- [6] D. DiLaura, "A Brief History of Lighting | Optics & Photonics News," *Optics and Photonics News*, pp. 1–28, 2008.
- [7] B. Brown, "the History of Lighting," *Motion Picture and Video Lighting*, 2020. [Online]. Available: <https://www.traditionalbuilding.com/product-report/history-lighting>. [Accessed: 18-Oct-2021].
- [8] The Editors of Encyclopaedia Britannica, "Lamp | lighting | Britannica," *Britnanica*. [Online]. Available: <https://www.britannica.com/technology/lamp>. [Accessed: 18-Oct-2021].
- [9] M. Bellis, "The History of Fluorescent Lights," *ThoughtCo.*, 2019. [Online]. Available: thoughtco.com/history-of-fluorescent-lights-4072017. [Accessed: 18-Oct-2021].
- [10] International Energy Agency, "Barriers to technology diffusion: the case of compact fluorescent lamps," 2006.
- [11] U.S. Department of Energy, "Multi-Year Program Plan," 2016.
- [12] Commission Internationale de l'Energie, "Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources," *J. Illum. Eng. Inst. JAPAN*, vol. 49, no. 10, pp. 585–604, 1965, doi: 10.2150/jieij1917.49.10_585.
- [13] "TM 30-18 - le guide de l'éclairage." [Online]. Available: <https://leclairage.fr/tm-30-15/>. [Accessed: 18-Oct-2021].
- [14] K. J. McCree, "The action spectrum, absorptance and quantum yield of

- photosynthesis in crop plants,” *Agric. Meteorol.*, vol. 9, no. C, pp. 191–216, Jan. 1971, doi: 10.1016/0002-1571(71)90022-7.
- [15] AFNOR, “NF EN 12464-1. Éclairage des lieux de travail. Partie 1 : Lieux de travail intérieurs.” 2011.
- [16] “Arrêté du 27 décembre 2018 relatif à la prévention, à la réduction et à la limitation des nuisances lumineuses,” *Journal officiel de la République française*, p. 8, 2018.
- [17] Association Française de L'éclairage, “Fiches Pratiques Eclairage dans les collectivités (2019/2020),” 2019.
- [18] “CEN/TC 169 Light and lighting — Lighting of work places — Part 1: Indoor work places,” 2010.
- [19] ISO, “ISO 8995-1:2002 - Éclairage des lieux de travail — Partie 1: Intérieur.” [Online]. Available: <https://www.iso.org/fr/standard/28857.html>. [Accessed: 08-Nov-2021].
- [20] CIE 17, “CIE 17. Discomfort glare in interior lighting,” 1995.
- [21] “Source et lampe : normes et règlements - le guide de l'éclairage.” [Online]. Available: <https://leclairage.fr/sources-et-lampes-normes-et-reglements/>. [Accessed: 19-Oct-2021].
- [22] International Energy Agency - 4E, “Solid State Lighting Annex Task 7: Smart Lighting – New Features Impacting Energy Consumption,” pp. 1–41, 2016.
- [23] The Shift Project, “Déployer la sobriété numérique,” 2020.
- [24] P. Pech, “Anthropocène - HYPERGEO.” [Online]. Available: <http://www.hypergeo.eu/spip.php?article658>. [Accessed: 18-Oct-2021].
- [25] IPCC *et al.*, “Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,” 2021.
- [26] B. Latour, *Où atterrir ? La découverte*, 2017.
- [27] J. Le Gall, O. Hamant, and J.-B. Bouron, “Notion en débat : Anthropocène,” *Géoconfluences*, 2017. [Online]. Available: <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/informations-scientifiques/a-la-une/notion-a-la-une/anthropocene>. [Accessed: 18-Oct-2021].

- [28] W. Steffen *et al.*, “Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet,” *Science* (80-.), vol. 347, no. 6223, Feb. 2015, doi: 10.1126/SCIENCE.1259855.
- [29] E. Morin, *La Méthode*. Paris: Seuil, 2008.
- [30] J.-M. Jancovici, “A quand le pic de production mondial pour le pétrole ?,” 2014. [Online]. Available: <https://jancovici.com/transition-energetique/gaz/a-quand-le-pic-de-production-mondial-pour-le-gaz/>. [Accessed: 18-Oct-2021].
- [31] The Shift Project, “Approvisionnement pétrolier futur de l’union européenne : état des réserves et perspectives de production des principaux pays fournisseurs,” 2021.
- [32] IEA, “World Energy Outlook 2018 – Analysis,” *Flagship report*, 2018. [Online]. Available: www.iea.org/weo. [Accessed: 18-Oct-2021].
- [33] P. Bihouix and B. De Guillebon, *Quel Futur pour les Métaux ? - Raréfaction des Métaux : Un Nouveau Défi pour la Société*, EDP Scienc. 2010.
- [34] Syndicat de l’éclairage, “Communiqué : Pourquoi la pénurie de semi-conducteurs menace votre éclairage,” 2021. [Online]. Available: <https://www.syndicat-eclairage.com/communiqué-pourquoi-la-pénurie-de-semi-conducteurs-menace-votre-eclairage/>. [Accessed: 18-Oct-2021].
- [35] European Commission, “Critical raw materials | Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs,” 2020.
- [36] C. C. Pavel *et al.*, “Critical raw materials in lighting applications: Substitution opportunities and implication on their demand,” *Phys. Status Solidi Appl. Mater. Sci.*, vol. 213, no. 11, pp. 2937–2946, 2016, doi: 10.1002/pssa.201600594.
- [37] European Commission, “Report on critical raw materials and the circular economy,” 2018.
- [38] P. Bihouix and K. Mauvilly, *Le Désastre de l’école numérique*, Seuil. 2016.
- [39] “Actualités - L’industrie de l’éclairage LED est touchée par la pénurie mondiale de puces.” [Online]. Available: <https://www.liperlighting.com/fr/news/led-lights-industry-is-being-hit-by-the-global-chip-shortage/>. [Accessed: 18-Oct-2021].
- [40] P. Gaffuri *et al.*, “Potential substitutes for critical materials in white LEDs:

- Technological challenges and market opportunities,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 143. Elsevier Ltd, 01-Jun-2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.110869.
- [41] European Commission, “Prochaines étapes pour un avenir européen durable : action européenne en faveur de la durabilité,” 2016.
- [42] “L’UNESCO et les objectifs de développement durable.” [Online]. Available: <https://fr.unesco.org/sdgs>. [Accessed: 18-Oct-2021].
- [43] A. Jägerbrand and C. Bouroussis, “Measures for reducing the adverse effects of artificial light at night: inter-disciplinary development and progress,” in *CIE Midterm meeting*, 2021.
- [44] D. H. Meadows, D. L. Meadows, J. Randers, A. El Kaïm, J.-M. Jancovici, and B. Lhoste, *Les limites à la croissance (dans un monde fini) le rapport Meadows, 30 ans après*. Rue de l’échiquier, 2012.
- [45] C. Ramos and J. Mossé, “Découplage et croissance verte,” *Carbone 4*. 2021.
- [46] Haut Conseil pour le Climat, “Maîtriser l’empreinte carbone de la France,” 2020.
- [47] P. Bihouix, *Le Bonheur Était Pour Demain : Les Rêveries d’un Ingénieur Solitaire*, Anthropocène. Seuil, 2019.
- [48] Ademe, “L’étiquette énergie pour l’équipement de la maison,” 2020.
- [49] M. Beccali *et al.*, “Energy saving and user satisfaction for a new advanced public lighting system,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 195, pp. 943–957, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.05.070.
- [50] M. A. Nelson, B. P. Anderson, and H. Cai, “Selection Methods and Procedure for Evaluation of LED Roadway Luminaires,” *LEUKOS - J. Illum. Eng. Soc. North Am.*, vol. 13, no. 3, pp. 159–175, 2017, doi: 10.1080/15502724.2016.1256782.
- [51] Y. Jiang, S. Li, B. Guan, and G. Zhao, “Cost effectiveness of new roadway lighting systems,” *J. Traffic Transp. Eng. (English Ed.)*, vol. 2, no. 3, pp. 158–166, 2015, doi: 10.1016/j.jtte.2015.03.004.
- [52] “Papiers et cartons : consommation mondiale apparente 2017,” *Statista*, 2021. [Online]. Available: <https://fr.statista.com/statistiques/561149/consommation-mondiale-papiers->

- cartons/. [Accessed: 21-Oct-2021].
- [53] CEPI, "Key Statistics 2012 - Confederation European Pulp and Paper Industry," 2012.
- [54] COPACEL, "Perspectives de l'industrie papetière française à l'heure de l'élaboration du plan de relance," 2020.
- [55] "Business travel spending worldwide 2020," *Statista*, 2021. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/1093295/business-travel-spending-worldwide/>. [Accessed: 18-Oct-2021].
- [56] IEA, "More Data, Less Energy: Making Network Standby More Efficient in Billions of Connected Devices," p. 175, 2014.
- [57] ElectricityMap, "electricityMap | Emissions CO2 de la consommation électrique en temps réel," 2020. [Online]. Available: <https://app.electricitymap.org/map>. [Accessed: 18-Oct-2021].
- [58] International Institute for Industrial Environmental Economics [IIIEE], *Circle of Light. The impact of the LED Lifecycle*, no. December. 2016.
- [59] Association Française de l'éclairage, "GUIDE AFE -SBA HUMAN CENTRIC LIGHTING," 2020.
- [60] R. Dzombak, E. Kasikaralar, and H. E. Dillon, "Exploring Cost and Environmental Implications of Optimal Technology Management Strategies in the Street Lighting Industry," *Resour. Conserv. Recycl. X*, vol. 6, p. 100022, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.rcrx.2019.100022.
- [61] P. Bihoux, *L'âge des low tech. Vers une civilisation techniquement soutenable*, Anthropocène. Seuil, 2014.
- [62] M. Soga and K. J. Gaston, "Shifting baseline syndrome: causes, consequences, and implications," *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 16, no. 4. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 222–230, 01-May-2018, doi: 10.1002/fee.1794.
- [63] ISO, "Analyse du cycle de vie - Principes et cadre - NF EN ISO 14040." Geneva, Switzerland, p. 33, 2006.
- [64] ISO, "Analyse du cycle de vie - Exigences et lignes directrices - NF EN ISO 14044." Geneva, Switzerland, p. 59, 2006.

- [65] Commission des Communautés Européennes, "Politique intégrée des produits Développement d'une réflexion environnementale axée sur le cycle de vie," 2003.
- [66] Commission des Communautés Européennes, "Stratégie thématique sur l'utilisation durable des ressources naturelles," 2005.
- [67] Commission des Communautés Européennes, "Mise en œuvre de l'utilisation durable des ressources: Une stratégie thématique pour la prévention et le recyclage des déchets," 2005.
- [68] Commission Européenne, "Plate forme Européenne sur l'Analyse de Cycle de Vie." [Online]. Available: <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/>. [Accessed: 18-Oct-2021].
- [69] A. Zamagni, J. Guinée, R. Heijungs, P. Masoni, and A. Raggi, "Lights and shadows in consequential LCA," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 17, no. 7, pp. 904–918, 2012, doi: 10.1007/s11367-012-0423-x.
- [70] V. Prado, B. A. Wender, and T. P. Seager, "Interpretation of comparative LCAs: external normalization and a method of mutual differences," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 22, no. 12, pp. 2018–2029, Dec. 2017, doi: 10.1007/s11367-017-1281-3.
- [71] J. B. Guinée *et al.*, "Life cycle assessment: Past, present, and future," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 45, no. 1, pp. 90–96, Jan. 2011, doi: 10.1021/es101316v.
- [72] T. E. Swarr *et al.*, "Environmental life-cycle costing: A code of practice," *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 16, no. 5, pp. 389–391, Jun-2011, doi: 10.1007/s11367-011-0287-5.
- [73] C. Benoît *et al.*, "The guidelines for social life cycle assessment of products: Just in time!," *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 15, no. 2, pp. 156–163, Feb-2010, doi: 10.1007/s11367-009-0147-8.
- [74] JRC, "ILCD Handbook: General guide for Life Cycle Assessment - Provisions and action steps," *Eur. Comm. Jt. Res. Cent. Inst. Environ. Sustain.*, 2010, doi: 10.2788/94987.
- [75] M. Zimek, A. Schober, C. Mair, R. J. Baumgartner, T. Stern, and M. Füllsack, "The Third Wave of LCA as the 'Decade of Consolidation,'" *Sustainability*, vol. 11, no. 12, p. 3283, Jun. 2019, doi: 10.3390/su11123283.

- [76] N. Haoues, "Analyse du Cycle de Vie Conséquentielle," 2012. [Online]. Available: <https://www.eco-conception.fr/data/sources/users/8/analyse-du-cycle-de-vie-consequentielle-haoues.pdf>. [Accessed: 20-Oct-2021].
- [77] B. P. Weidema, "Market information in life cycle assessment. Environmental Project No 863.," Danish Environmental Protection Agency, 2003.
- [78] T. Dandres, "Développement d'une méthode d'analyse du cycle de vie conséquentielle prospective macroscopique : Évaluation d'une politique de bioénergie dans L'Union Européenne à l'horizon 2025," Ecole Polytechnique de Montréal, 2012.
- [79] T. Ekvall, A. M. Tillman, and S. Molander, "Normative ethics and methodology for life cycle assessment," *J. Clean. Prod.*, vol. 13, no. 13–14, pp. 1225–1234, Nov. 2005, doi: 10.1016/j.jclepro.2005.05.010.
- [80] B. A. Sandén and M. Karlström, "Positive and negative feedback in consequential life-cycle assessment," *J. Clean. Prod.*, vol. 15, no. 15, pp. 1469–1481, Oct. 2007, doi: 10.1016/j.jclepro.2006.03.005.
- [81] J. H. Schmidt, P. Christensen, and T. S. Christensen, "Assessing the land use implications of biodiesel use from an LCA perspective," in *Journal of Land Use Science*, 2009, vol. 4, no. 1–2, pp. 35–52, doi: 10.1080/17474230802645790.
- [82] B. P. Weidema *et al.*, "Swiss Centre for Life Cycle Inventories Overview and methodology (final) v3," 2013.
- [83] A. W. Sleeswijk, L. F. C. M. van Oers, J. B. Guinée, J. Struijs, and M. A. J. Huijbregts, "Normalisation in product life cycle assessment: An LCA of the global and European economic systems in the year 2000," *Sci. Total Environ.*, vol. 390, no. 1, pp. 227–240, 2008, doi: 10.1016/j.scitotenv.2007.09.040.
- [84] M. Pizzol, A. Laurent, S. Sala, B. Weidema, F. Verones, and C. Koffler, "Normalisation and weighting in life cycle assessment: quo vadis?," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 22, no. 6, pp. 853–866, 2017, doi: 10.1007/s11367-016-1199-1.
- [85] M. A. J. Huijbregts *et al.*, "ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 22, no. 2, pp. 138–147, 2017, doi: 10.1007/s11367-016-1246-y.
- [86] National Institute for Public Health and the Environment, "ReCiPe 2016 v1.1

A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization,” 2016.

- [87] J. C. Bare, P. Hofstetter, D. W. Pennington, and H. A. Udo de Haes, “Life cycle impact assessment workshop summary. Midpoints versus endpoints: The sacrifices and benefits,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 5, no. 6, pp. 319–326, Nov. 2000, doi: 10.1007/BF02978665.
- [88] L. Zampori and R. Pant, “Suggestions for updating the Organisation Environmental Footprint (OEF) method, EUR 29681 EN, Publications Office of the European Union,” 2019, doi: 10.2760/255104, JRC115960.
- [89] L. Zampori and R. Pant, “Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method, EUR 29682 EN, Publications Office of the European Union,” 2019, doi: 10.2760/265244, JRC115959.
- [90] United Nations Environmental Program (UNEP), *Towards a Life Cycle Sustainability Assessment: Making informed choices on products*. 2011.
- [91] ISO, “Bâtiments et biens immobiliers construits — Prévion de la durée de vie — Partie 5: Approche en coût global ISO 15686-5.,” vol. 66. pp. 37–39, 2017.
- [92] European Commission, “Methodology for ecodesign of energy-related products. Report Part 1 : Methods (MEErP 2011).” pp. 132–137, 2011.
- [93] Rapport Lebègue, “Révision du taux d’actualisation des investissements publics,” 2005.
- [94] “Barème ecosystem Montants d’éco-participation applicables à partir du 1 er janvier 2021,” 2021. [Online]. Available: <https://www.ecosystem.eco/upload/media/download/0001/02/bb84a582bc0c1483ea689b8fbc9a701889092863.pdf>. [Accessed: 18-Oct-2021].
- [95] UNEP/SETAC, “Guidelines For Social Life Cycle Assessment of Products,” 2009.
- [96] UNEP/SETAC, “The Methodological Sheets for Sub - Categories in Social Life Cycle Assessment (S-LCA),” 2013.
- [97] C. Benoit-Norris and G. A. Norris, “Chapter 8: The Social Hotspots Database,” *Sustain. Pract. Guid. to Soc. Anal. Assess.*, no. November, pp. 52–73, 2015.

- [98] J. Franze and A. Ciroth, "A comparison of cut roses from Ecuador and the Netherlands," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 16, no. 4, pp. 366–379, May 2011, doi: 10.1007/s11367-011-0266-x.
- [99] C. Benoît Norris, "Data for social LCA," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 19, no. 2, pp. 261–265, 2014, doi: 10.1007/s11367-013-0644-7.
- [100] W. Kloepffer, "Life cycle sustainability assessment of products," in *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2008, vol. 13, no. 2, pp. 89–95, doi: 10.1065/lca2008.02.376.
- [101] M. Goedkoop and R. Spriensma, "The Eco-indicator 99 - A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment," *Pre Consultants*, p. 144, 2001.
- [102] J. Guinée, "Life cycle sustainability assessment: What is it and what are its challenges?," in *Taking Stock of Industrial Ecology*, Springer, Cham, 2015, pp. 45–68.
- [103] R. T. Fauzi, P. Lavoie, L. Sorelli, M. D. Heidari, and B. Amor, "Exploring the current challenges and opportunities of Life Cycle Sustainability Assessment," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 11, no. 3. MDPI AG, 25-Jan-2019, doi: 10.3390/su11030636.
- [104] J. J. Sheehan, "Biofuels and the conundrum of sustainability," *Current Opinion in Biotechnology*, vol. 20, no. 3. Elsevier Current Trends, pp. 318–324, 01-Jun-2009, doi: 10.1016/j.copbio.2009.05.010.
- [105] E. Van Der Voet, R. J. Lifset, and L. Luo, "Life-cycle assessment of biofuels, convergence and divergence," *Biofuels*, vol. 1, no. 3. pp. 435–449, May-2010, doi: 10.4155/bfs.10.19.
- [106] J. S. Mill, "The Principles of Political Economy," in *The Two Narratives of Political Economy*, 2011, pp. 295–344.
- [107] F. Y. Edgeworth and A. Marshall, "Principles of Economics.," *Econ. J.*, vol. 5, no. 20, p. 585, 1895, doi: 10.2307/2956644.
- [108] J. Viner, "Cost Curves and Supply Curves," in *Cost Curves and Supply Curves*, Springer Berlin Heidelberg, 1932, pp. 23–46.
- [109] J.-B. Say, *Cours Complet d'Economie Politique. Pratique. Tome II*. 1966.
- [110] E. Schatzberg, "Natural Capitalism: Creating the Next Industrial Revolution (review)," *Technol. Cult.*, vol. 43, no. 1, pp. 218–221, 2002, doi:

10.1353/tech.2002.0039.

- [111] J. M. Hartwick, "Intergenerational equity and the investing of rents from exhaustible resources," in *The Economics of Sustainability*, vol. 67, no. 5, American Economic Association, 2017, pp. 63–65.
- [112] H. E. Daly, "Toward some operational principles of sustainable development," *Ecol. Econ.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–6, Apr. 1990, doi: 10.1016/0921-8009(90)90010-R.
- [113] "Quel juste prix pour le carbone ? - Le Cercle des économistes." [Online]. Available: <https://lecercledeconomieconomistes.fr/quel-juste-prix-pour-le-carbone/>. [Accessed: 21-Oct-2021].
- [114] F. Verrax, "L'ampoule sous tension," *Tech. Cult.*, no. 65–66, pp. 150–153, Oct. 2016, doi: 10.4000/tc.7840.
- [115] "Les dysfonctionnements du marché carbone européen." [Online]. Available: <https://www.actu-environnement.com/ae/news/dysfonctionnement-marche-carbone-europe-emissions-18685.php4>. [Accessed: 21-Oct-2021].
- [116] "Il est temps de mettre fin au marché du carbone européen - Attac France." [Online]. Available: <https://france.attac.org/actus-et-medias/le-flux/articles/il-est-temps-de-mettre-fin-au-marche-du-carbone-europeen>. [Accessed: 21-Oct-2021].
- [117] Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation (Anses), "Effets sur la santé humaine et sur l'environnement (faune et flore) des diodes électroluminescentes (LED)," pp. 1–458, 2019.
- [118] F. Behar-Cohen *et al.*, "Light-emitting diodes (LED) for domestic lighting: Any risks for the eye?," *Prog. Retin. Eye Res.*, vol. 30, no. 4, pp. 239–257, 2011, doi: 10.1016/j.preteyeres.2011.04.002.
- [119] L. Tähkämö, T. Partonen, and A.-K. Pesonen, "Systematic review of light exposure impact on human circadian rhythm," *Chronobiol. Int.*, vol. 00, no. 00, pp. 1–20, 2018, doi: 10.1080/07420528.2018.1527773.
- [120] Solid State Lighting Annex, "Potential Health Issues of SSL," 2014.
- [121] A. Khullar, "The role of melatonin in the circadian rhythm sleep-wake cycle," *Psychiatric Times*, vol. 29, no. 7. 2012.
- [122] D. M. Berson, F. A. Dunn, and M. Takao, "Phototransduction by retinal

- ganglion cells that set the circadian clock,” *Science* (80-.), vol. 295, no. 5557, pp. 1070–1073, Feb. 2002, doi: 10.1126/science.1067262.
- [123] M. S. Rea, M. G. Figueiro, J. D. Bullough, and A. Bierman, “A model of phototransduction by the human circadian system,” *Brain Res. Rev.*, vol. 50, no. 2, pp. 213–228, 2005, doi: 10.1016/j.brainresrev.2005.07.002.
- [124] M. S. Rea, R. Nagare, and M. G. Figueiro, “Modeling Circadian Phototransduction: Quantitative Predictions of Psychophysical Data,” *Front. Neurosci.*, vol. 15, Feb. 2021, doi: 10.3389/fnins.2021.615322.
- [125] D. Gall, “Die Messung circadianer Strahlungsgrößen,” *Licht und Gesundh.*, pp. 114–132, 2004.
- [126] M. S. Rea, M. G. Figueiro, A. Bierman, and R. Hamner, “Modelling the spectral sensitivity of the human circadian system,” *Light. Res. Technol.*, vol. 44, no. 4, pp. 386–396, 2012, doi: 10.1177/1477153511430474.
- [127] D. L. Miura, R. M. Hazarbassanov, C. K. N. Yamasato, F. B. E Silva, C. J. Godinho, and J. Á. P. Gomes, “Effect of a light-emitting timer device on the blink rate of non-dry eye individuals and dry eye patients,” *Br. J. Ophthalmol.*, vol. 97, no. 8, pp. 965–967, Aug. 2013, doi: 10.1136/bjophthalmol-2012-302695.
- [128] H. S. Lee *et al.*, “Influence of light emitting diode-derived blue light overexposure on mouse ocular surface,” *PLoS One*, vol. 11, no. 8, p. e0161041, Aug. 2016, doi: 10.1371/journal.pone.0161041.
- [129] E. Arnault *et al.*, “Phototoxic Action Spectrum on a Retinal Pigment Epithelium Model of Age-Related Macular Degeneration Exposed to Sunlight Normalized Conditions,” *PLoS One*, vol. 8, no. 8, p. e71398, Aug. 2013, doi: 10.1371/journal.pone.0071398.
- [130] K. Smick *et al.*, “Blue Light Hazard : New Knowledge, New approaches to Maintaining Ocular health,” pp. 1–12, 2013.
- [131] P. C. Wu, C. L. Tsai, H. L. Wu, Y. H. Yang, and H. K. Kuo, “Outdoor activity during class recess reduces myopia onset and progression in school children,” *Ophthalmology*, vol. 120, no. 5, pp. 1080–1085, May 2013, doi: 10.1016/j.optha.2012.11.009.
- [132] D. L. Nickla and K. Totonelly, “Brief light exposure at night disrupts the

- circadian rhythms in eye growth and choroidal thickness in chicks,” *Exp. Eye Res.*, vol. 146, pp. 189–195, May 2016, doi: 10.1016/j.exer.2016.03.003.
- [133] W. R. Ryckaert, K. A. G. Smet, I. A. A. Roelandts, M. Van Gils, and P. Hanselaer, “Linear LED tubes versus fluorescent lamps: An evaluation,” *Energy Build.*, vol. 49, pp. 429–436, Jun. 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.02.042.
- [134] Commission Internationale de l’Eclairage, “TR 61547-1:2020 - Equipment for general lighting purposes - EMC immunity requirements - Part 1: Objective light flickermeter and voltage fluctuation immunity test method.” 2020.
- [135] International Commission On Illumination, “Visual Aspects of Time-Modulated Lighting Systems – Definitions and Measurement Models - CIE TN 006:2016,” *CIE Tech. Rep.*, p. 19, 2016.
- [136] IESNA, “Lighting handbook: Reference & application,” *Illum. Eng. Soc. North Am. New York, USA*, vol. 7, no. 2, p. 1037, 2000.
- [137] IEEE Power Electronics Society, *IEEE Recommended Practices for Modulating Current in High-Brightness LEDs for Mitigating Health Risks to Viewers*. 2015.
- [138] Alliance for Solid-State Illumination Systems and Technologies (ASSIST), “ASSIST recommends... Recommended metric for assessing the direct perception of light source flicker,” *Light. Res. Cent.*, vol. 11, no. 3, 2015.
- [139] J. Gaines, “Temporal Light Artifacts (Flicker + Stroboscopic Effect),” 2015.
- [140] M. Perz, D. Sekulovski, I. Vogels, and I. Heynderickx, “Stroboscopic effect : contrast threshold function and dependence on illumination level,” vol. 35, no. 2, pp. 309–319, 2018, doi: 10.1364/JOSAA.35.000309.
- [141] C. S. Lee, J. H. Lee, H. Pak, S. W. Park, and D. W. Song, “Phantom array and stroboscopic effects of a time-modulated moving light source during saccadic eye movement,” *Light. Res. Technol.*, vol. 50, no. 5, pp. 772–786, Feb. 2018, doi: 10.1177/1477153517693468.
- [142] J. E. Roberts and A. J. Wilkins, “Flicker can be perceived during saccades at frequencies in excess of 1 kHz,” *Light. Res. Technol.*, vol. 45, no. 1, pp. 124–132, Feb. 2013, doi: 10.1177/1477153512436367.
- [143] C. C. M. Kyba *et al.*, “Artificially lit surface of Earth at night increasing in

- radiance and extent,” *Sci. Adv.*, vol. 3, no. 11, p. e1701528, Nov. 2017, doi: 10.1126/sciadv.1701528.
- [144] K. J. Gaston, M. E. Visser, and F. Hölker, “The biological impacts of artificial light at night: The research challenge,” *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.*, vol. 370, no. 1667, May 2015, doi: 10.1098/rstb.2014.0133.
- [145] K. J. Gaston, J. Bennie, T. W. Davies, and J. Hopkins, “The ecological impacts of nighttime light pollution: A mechanistic appraisal,” *Biol. Rev.*, vol. 88, no. 4, pp. 912–927, Nov. 2013, doi: 10.1111/brv.12036.
- [146] K. Piselli, “Ecological Consequences of Artificial Night Lighting,” *Electron. Green J.*, vol. 1, no. 23, p. 458, 2006, doi: 10.5070/g312310666.
- [147] E. K. Perkin, F. Hölker, J. S. Richardson, J. P. Sadler, C. Wolter, and K. Tockner, “The influence of artificial light on stream and riparian ecosystems: Questions, challenges, and perspectives,” *Ecosphere*, vol. 2, no. 11, pp. 1–16, Nov. 2011, doi: 10.1890/ES11-00241.1.
- [148] W. R. Evans, Y. Akashi, N. S. Altman, and A. M. Manville, “Response of night-migrating songbirds in cloud to colored and flashing light,” *North Am. Birds*, vol. 60, no. 4, pp. 476–488, 2007.
- [149] B. W. Buchanan, “Effects of enhanced lighting on the behaviour of nocturnal frogs,” *Anim. Behav.*, vol. 45, no. 5, pp. 893–899, 1993, doi: 10.1006/anbe.1993.1109.
- [150] A. M. Heiling, “Why do nocturnal orb-web spiders (Araneidae) search for light?,” *Behav. Ecol. Sociobiol.*, vol. 46, no. 1, pp. 43–49, Jun. 1999, doi: 10.1007/s002650050590.
- [151] C. D. Santos, A. C. Miranda, J. P. Granadeiro, P. M. Lourenço, S. Saraiva, and J. M. Palmeirim, “Effects of artificial illumination on the nocturnal foraging of waders,” *Acta Oecologica*, vol. 36, no. 2, pp. 166–172, Mar. 2010, doi: 10.1016/j.actao.2009.11.008.
- [152] A. Becker, A. K. Whitfield, P. D. Cowley, J. Järnegren, and T. F. Næsje, “Potential effects of artificial light associated with anthropogenic infrastructure on the abundance and foraging behaviour of estuary-associated fishes,” *J. Appl. Ecol.*, vol. 50, no. 1, pp. 43–50, Feb. 2013, doi: 10.1111/1365-2664.12024.

- [153] B. L. Bird, L. C. Branch, and D. L. Miller, "Effects of coastal lighting on foraging behavior of beach mice," *Conserv. Biol.*, vol. 18, no. 5, pp. 1435–1439, Oct. 2004, doi: 10.1111/j.1523-1739.2004.00349.x.
- [154] E. Knop, L. Zoller, R. Ryser, C. Gerpe, M. Hörler, and C. Fontaine, "Artificial light at night as a new threat to pollination," *Nature*, vol. 548, no. 7666, pp. 206–209, 2017, doi: 10.1038/nature23288.
- [155] D. H. Boyes, D. M. Evans, R. Fox, M. S. Parsons, and M. J. O. Pocock, "Is light pollution driving moth population declines? A review of causal mechanisms across the life cycle," *Insect Conservation and Diversity*, vol. 14, no. 2. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 167–187, 01-Mar-2021, doi: 10.1111/icad.12447.
- [156] A. C. S. Owens and S. M. Lewis, "The impact of artificial light at night on nocturnal insects: A review and synthesis," *Ecol. Evol.*, vol. 8, no. 22, pp. 11337–11358, 2018, doi: 10.1002/ece3.4557.
- [157] H. M. Whitney and W. Federle, "Biomechanics of plant-insect interactions," *Curr. Opin. Plant Biol.*, vol. 16, no. 1, pp. 105–111, 2013, doi: 10.1016/j.pbi.2012.11.008.
- [158] J. Bennie, T. W. Davies, D. Cruse, and K. J. Gaston, "Ecological effects of artificial light at night on wild plants," *J. Ecol.*, vol. 104, no. 3, pp. 611–620, 2016, doi: 10.1111/1365-2745.12551.
- [159] J. Škvareninová *et al.*, "Effects of light pollution on tree phenology in the urban environment," *Morav. Geogr. Reports*, vol. 25, no. 4, pp. 282–290, 2017, doi: 10.1515/mgr-2017-0024.
- [160] R. Supronowicz and I. Fryc, "Urban park lighting as a source of botanical light pollution," *Photonics Lett. Pol.*, vol. 11, no. 3, pp. 90–92, 2019, doi: 10.4302/plp.v11i3.935.
- [161] V. Barták, Z. Krátký, and S. Popelka ml, "LED lighting increases the ecological impact of light pollution irrespective of color temperature," *Acta Chir. Orthop. Traumatol. Cech.*, vol. 81, no. 2, pp. 152–154, 2014.
- [162] A. K. Jägerbrand, "New framework of sustainable indicators for outdoor LED (light emitting diodes) lighting and SSL (solid state lighting)," *Sustain.*, vol. 7, no. 1, pp. 1028–1063, 2015, doi: 10.3390/su7011028.

- [163] P. Pracki and K. Skarzyński, "A multi-criteria assessment procedure for outdoor lighting at the design stage," *Sustain.*, vol. 12, no. 4, p. 1330, Feb. 2020, doi: 10.3390/su12041330.
- [164] M. Franz and J. Nicolics, "Environmental aspects of white LED lighting systems: Energy statistics, study parameters, rare earths," in *Proceedings of the International Spring Seminar on Electronics Technology*, 2015, vol. 2015-Septe, pp. 396–401, doi: 10.1109/ISSE.2015.7248029.
- [165] X. Luo, R. Hu, S. Liu, and K. Wang, "Heat and fluid flow in high-power LED packaging and applications," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 56. Elsevier Ltd, pp. 1–32, 01-Sep-2016, doi: 10.1016/j.pecs.2016.05.003.
- [166] S. Li, S. C. Tan, C. K. Lee, E. Waffenschmidt, S. Y. R. Hui, and C. K. Tse, "A Survey, Classification, and Critical Review of Light-Emitting Diode Drivers," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 2. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 1503–1516, 01-Feb-2016, doi: 10.1109/TPEL.2015.2417563.
- [167] M. Cai *et al.*, "Effects of stress-loading test methods on the degradation of light-emitting diode modules," *Microelectron. Reliab.*, vol. 64, pp. 635–639, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.microrel.2016.07.009.
- [168] M. Cai *et al.*, "A hybrid prediction method on luminous flux maintenance of high-power LED lamps," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 95, pp. 482–490, 2016, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.11.034.
- [169] X. P. Li, L. Chen, and M. Chen, "An approach of LED lamp system lifetime prediction," in *2011 IEEE International Conference on Quality and Reliability, ICQR 2011*, 2011, doi: 10.1109/ICQR.2011.6031691.
- [170] M. Royer, "Lumen maintenance and Light loss factors: Consequences of current design practices for LEDs," *LEUKOS - J. Illum. Eng. Soc. North Am.*, vol. 10, no. 2, pp. 77–86, 2014, doi: 10.1080/15502724.2013.855613.
- [171] International Commission on Illumination, "the Maintenance of Outdoor Lighting Systems," 2003.
- [172] International Energy Agency, "Literature Summary of Lifetime Testing of Light Emitting Diodes and LED Products," Prepared by the Lighting Research Center, 2021.

- [173] D. Guyonnet *et al.*, "Material flow analysis applied to rare earth elements in Europe," *J. Clean. Prod.*, vol. 107, pp. 215–228, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.04.123.
- [174] C. J. Grigoropoulos, L. T. Doulos, S. C. Zerefos, A. Tsangrassoulis, and P. Bhusal, "Estimating the benefits of increasing the recycling rate of lamps from the domestic sector: Methodology, opportunities and case study," *Waste Manag.*, vol. 101, pp. 188–199, 2020, doi: 10.1016/j.wasman.2019.10.010.
- [175] V. Forti, C. P. Balde, R. Kuehr, and G. Bel, "The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential," Bonn/Geneva/roterdam, 2020.
- [176] A. Tsamis and M. Coyne, "Recovery of Rare Earths from Electronic wastes: An opportunity for High-Tech SMEs," 2015.
- [177] T. E. Graedel *et al.*, "UNEP (2011) Commissioned by the North Rhine-Westphalia State Agency for Nature, Environment and Consumer Protection," 2011.
- [178] M. Buchert and A. Manhart, "Recycling critical raw materials from waste electronic equipment," *Freibg. Öko-Institut*, vol. 49, no. 0, pp. 30–40, 2012.
- [179] Y. Qiu and S. Suh, "Economic feasibility of recycling rare earth oxides from end-of-life lighting technologies," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 150, no. April, p. 104432, 2019, doi: 10.1016/j.resconrec.2019.104432.
- [180] "La décharge de déchets électroniques d'Agbogbloshie, véritable défi économique et environnemental pour le Ghana." [Online]. Available: https://www.francetvinfo.fr/monde/afrique/societe-africaine/la-decharge-de-dechets-electroniques-dagbogbloshie-veritable-defi-economique-et-environnemental-pour-le-ghana_3863287.html. [Accessed: 24-Oct-2021].
- [181] S. Mandard, "Un « tsunami de déchets électroniques » menace la santé de millions d'enfants, alerte l'OMS," *Le Monde*, p. 8, 2021.
- [182] UNEP, "Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure," p. 316, 2013.
- [183] C. T. Hendrickson, D. H. Matthews, M. Ashe, P. Jaramillo, and F. C. McMichael, "Reducing environmental burdens of solid-state lighting through end-of-life design," *Environ. Res. Lett.*, vol. 5, no. 1, 2010, doi: 10.1088/1748-9326/5/1/014016.

- [184] M. Aerts, J. Felix, J. Huisman, and A. R. Balkenende, "Lamp Redesign : Shredding Before Selling," in *Proceedings of Going Green – CARE Innovation 2014: Towards a Resource Efficient Economy*, 2014, pp. 4–7.
- [185] M. A. Reuter and A. van Schaik, "Product-Centric Simulation-Based Design for Recycling: Case of LED Lamp Recycling," *J. Sustain. Metall.*, vol. 1, no. 1, pp. 4–28, 2015, doi: 10.1007/s40831-014-0006-0.
- [186] M. Akrich, "Comment décrire les objets techniques ?," *Tech. Cult.*, no. 54–55, pp. 205–219, Jun. 2010, doi: 10.4000/tc.4999.
- [187] R. Galvin, "The ICT/electronics question: Structural change and the rebound effect," *Ecol. Econ.*, vol. 120, pp. 23–31, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.ecolecon.2015.08.020.
- [188] B. Alcott, "Jevons' paradox," *Ecol. Econ.*, vol. 54, no. 1, pp. 9–21, Jul. 2005, doi: 10.1016/j.ecolecon.2005.03.020.
- [189] M. Robine, "La question charbonnière de William Stanley Jevons," *Rev. économique*, vol. 41, no. 2, p. 369, Mar. 1990, doi: 10.2307/3501807.
- [190] H. Herring, "Energy efficiency - A critical view," *Energy*, vol. 31, no. 1 SPEC. ISS., pp. 10–20, Jan. 2006, doi: 10.1016/j.energy.2004.04.055.
- [191] S. Sorrell, *The rebound effect: an assessment of the evidence for economy-wide energy savings from improved energy efficiency*, vol. 42, no. 4. Londres: Uk Energy Research Centre, 2007.
- [192] R. Fouquet and P. J. G. Pearson, "Seven centuries of energy services: The price and use of light in the United Kingdom (1300-2000)," *Energy J.*, vol. 27, no. 1, pp. 139–177, 2006, doi: 10.5547/ISSN0195-6574-EJ-Vol27-No1-8.
- [193] J. B. Barney, R. R. Nelson, and S. G. Winter, "An Evolutionary Theory of Economic Change.," *Adm. Sci. Q.*, vol. 32, no. 2, p. 315, 1987, doi: 10.2307/2393143.
- [194] W. Arthur, *Increasing Returns and Path Dependence in the Economy*. Ann Arbor: University of Michigan Press, 2016.
- [195] P. J. Dubois, *La grande amnésie écologique*. Delachaux et Niestlé, 2012.
- [196] M. Franz and F. P. Wenzl, "Critical review on life cycle inventories and environmental assessments of led-lamps," *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, vol. 47, no. 21, pp. 2017–2078, 2017, doi: 10.1080/10643389.2017.1370989.

- [197] Navigant Consulting Europe, "Life Cycle Assessment of Ultra-Efficient Lamps," no. May. p. 101, 2009.
- [198] U.S. Department of Energy, "Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED Lighting Products Part 2: LED Manufacturing and Performance," Washington, DC, USA, 2012.
- [199] K. S. Sangwan, V. Bhakar, S. Naik, and S. N. Andrat, "Life cycle assessment of incandescent, fluorescent, compact fluorescent and light emitting diode lamps in an Indian scenario," in *Procedia CIRP*, 2014, vol. 15, pp. 467–472, doi: 10.1016/j.procir.2014.06.017.
- [200] P. Principi and R. Fioretti, "A comparative life cycle assessment of luminaires for general lighting for the office - Compact fluorescent (CFL) vs Light Emitting Diode (LED) - A case study," *J. Clean. Prod.*, vol. 83, pp. 96–107, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.07.031.
- [201] L. Tähkämö, C. Martinsons, P. Ravel, F. Grannec, G. Zizzis, and F. Report, "Solid State Lighting Annex: Life Cycle Assessment of Solid State Lighting," Toulouse, France, 2014.
- [202] L. Wang *et al.*, "A comparative life-cycle assessment of hydro-, nuclear and wind power: A China study," *Appl. Energy*, vol. 249, pp. 37–45, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.04.099.
- [203] "Production – Production totale: RTE Bilan électrique 2020." [Online]. Available: <https://bilan-electrique-2020.rte-france.com/production-production-totale/>. [Accessed: 25-Oct-2021].
- [204] L. Tähkämö, "Life cycle assessment of light sources – Case studies and review of the analyses," Aalto University, 2013.
- [205] H. E. Dillon, C. Ross, and R. Dzombak, "Environmental and Energy Improvements of LED Lamps over Time: A Comparative Life Cycle Assessment," *Leukos*, pp. 1–9, 2019, doi: 10.1080/15502724.2018.1541748.
- [206] J. L. Richter, L. Tähkämö, and C. Dalhammar, "Trade-offs with longer lifetimes? The case of LED lamps considering product development and energy contexts," *J. Clean. Prod.*, vol. 226, pp. 195–209, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.03.331.
- [207] A. Vandevoorde, G. Zizzis, and M. Mequignon, "Evaluation de l'impact

- environnemental du cycle de vie de systèmes d'éclairage," 2016.
- [208] Syndicat de l'éclairage, "CEB17 Conférence éclairage des bureaux 2017," 2017. [Online]. Available: <https://www.syndicat-eclairage.com/ceb17-enquete-eclairage-bureaux/>. [Accessed: 25-Oct-2021].
- [209] G. Zissis and P. Bertoldi, "Status of LED-Lighting world market in 2017," *Jt. Res. Cent.*, p. 76, 2018.
- [210] Pré, "Simapro Database Manual: Methods Library. Version 2.5," vol. October. pp. 3–48, 2013.
- [211] L. Tähkämö, M. Bazzana, P. Ravel, F. Grannec, C. Martinsons, and G. Zissis, "Life cycle assessment of light-emitting diode downlight luminaire - A case study," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 18, no. 5, pp. 1009–1018, 2013, doi: 10.1007/s11367-012-0542-4.
- [212] L. Tähkämö and L. Halonen, "Life cycle assessment of road lighting luminaires - Comparison of light-emitting diode and high-pressure sodium technologies," *J. Clean. Prod.*, vol. 93, pp. 234–242, 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.01.025.
- [213] OSRAM, "Life Cycle Assessment of Illuminants: A Comparison of Light Bulbs, Compact Fluorescent Lamps and LED Lamps," pp. 1–26, 2009, doi: 10.1002/j.1556-6678.2005.tb00596.x.
- [214] T. Welz, R. Hischer, and L. M. Hilty, "Environmental impacts of lighting technologies - Life cycle assessment and sensitivity analysis," *Environ. Impact Assess. Rev.*, vol. 31, no. 3, pp. 334–343, 2011, doi: 10.1016/j.eiar.2010.08.004.
- [215] J. Anderson, D. Bradley, M. Bremser, and J. Brodrick, "LED LUMINAIRE LIFETIME : Recommendations for Testing and Reporting," *Next Gener. Light. Ind. alliance*, no. June, 2010.
- [216] ASSIST, "ASSIST recommends... LED Life for General Lighting: Definition of Life," vol. 1, no. 1–7, pp. 1–34, 2005.
- [217] S. Amanda, "A Technology Assessment of Light Emitting Diode (LED) Solid-State Lighting for General Illumination," *Natl. Centre Environ. Economics*, pp. 1–85, 2005.
- [218] CIE, "Lighting of Work Places - Part 1: Indoor." [Online]. Available:

- <https://cie.co.at/publications/lighting-work-places-part-1-indoor>. [Accessed: 25-Oct-2021].
- [219] "Maintenance Factor." [Online]. Available: <https://www.trilux.com/en/lighting-practice/indoor-lighting/general-requirements/maintenance-factor/>. [Accessed: 25-Oct-2021].
- [220] S. D. Joe Pickin, Christine Wardle, Kyle O'Farrell, Piya Nyunt, "National Waste Report 2018," Australie, 2020.
- [221] M. Stelian, "Balanced Light Output (BLO), method and circuit for maintaining constant light output for LED luminaires," *LED Professional Review*, p. 80, Apr-2018.
- [222] J. L. Richter, R. Van Buskirk, C. Dalhammar, and P. Bennich, "Optimal durability in least life cycle cost methods: the case of LED lamps," *Energy Effic.*, vol. 12, no. 1, pp. 107–121, 2019, doi: 10.1007/s12053-018-9662-4.
- [223] "5 Things to check when comparing LED grow lights | Philips lighting." [Online]. Available: <https://www.lighting.philips.com/main/products/horticulture/grow-with-pros/5-things-to-check-when-comparing-lighting-designs-for-led-grow-lights>. [Accessed: 05-Nov-2021].
- [224] CIE, *Calculations for interior lighting: basic method*. Commission internationale de l'éclairage, 1978.
- [225] CIE Committee TC-1.5, "Calculations for interior lighting- Applied Method Publication 52." Commission Internationale de l'Eclairage, Paris, p. 164, 1982.
- [226] SLL CIBSE, *The SLL Code for Lighting The Society of Light and Lighting*. 2012.
- [227] T. W. Davies, J. Bennie, R. Inger, N. H. de Ibarra, and K. J. Gaston, "Artificial light pollution: Are shifting spectral signatures changing the balance of species interactions?," *Glob. Chang. Biol.*, vol. 19, no. 5, pp. 1417–1423, May 2013, doi: 10.1111/gcb.12166.
- [228] N. Schulte-Römer, J. Meier, M. Söding, and E. Dannemann, "The LED Paradox: How light pollution challenges experts to reconsider sustainable lighting," *Sustain.*, vol. 11, no. 21, p. 6160, Nov. 2019, doi: 10.3390/su11216160.

- [229] H. M. Whitney and W. Federle, "Biomechanics of plant-insect interactions," *Current Opinion in Plant Biology*, vol. 16, no. 1. Curr Opin Plant Biol, pp. 105–111, Feb-2013, doi: 10.1016/j.pbi.2012.11.008.
- [230] M. Grubisic, R. H. A. van Grunsven, A. Manfrin, M. T. Monaghan, and F. Hölker, "A transition to white LED increases ecological impacts of nocturnal illumination on aquatic primary producers in a lowland agricultural drainage ditch," *Environ. Pollut.*, vol. 240, pp. 630–638, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.envpol.2018.04.146.
- [231] E. Knop, L. Zoller, R. Ryser, C. Gerpe, M. Hörler, and C. Fontaine, "Artificial light at night as a new threat to pollination," *Nature*, vol. 548, no. 7666, pp. 206–209, Aug. 2017, doi: 10.1038/nature23288.
- [232] M. J. Keeling, D. N. Franklin, S. Datta, M. A. Brown, and G. E. Budge, "Predicting the spread of the Asian hornet (*Vespa velutina*) following its incursion into Great Britain," *Sci. Rep.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–7, Jul. 2017, doi: 10.1038/s41598-017-06212-0.
- [233] CIE, "Technical Report: Guide on the Limitation of the Effects of Obtrusive Light from Outdoor Lighting Applications," Vienna, Dec. 2003.
- [234] I. Auricoste, J.-F. Landel, and M. Simoné, "À la reconquête de la nuit - La pollution lumineuse : état des lieux et propositions," 2018.
- [235] J. A. Brons, J. D. Bullough, and M. S. Rea, "Outdoor site-lighting performance: A comprehensive and quantitative framework for assessing light pollution," *Light. Res. Technol.*, vol. 40, no. 3, pp. 201–220, Sep. 2008, doi: 10.1177/1477153508094059.
- [236] J. Du, X. Zhang, and D. King, "An investigation into the risk of night light pollution in a glazed office building: The effect of shading solutions," *Build. Environ.*, vol. 145, no. 51778322, pp. 243–259, 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.09.029.

10 ANNEXES

10.1 Données d'inventaire

10.1.1 CFL

CFL	1	p
<i>Materials/assemblies</i>		
Argon, liquid {RoW} production APOS, U	0,004	g
Nitrogen, liquid {RoW} air separation, cryogenic APOS, U	0,119	g
Oxygen, liquid {RoW} air separation, cryogenic APOS, U	0,159	g
Hydrogen, liquid {RoW} market for APOS, U	0,002	g
Krypton, gaseous {RoW} air separation, xenon krypton purification APOS, U	0,0004	g
Rare earth concentrate, 70% REO, from bastnasite {CN} production APOS, U	0,001	g
Rare earth concentrate, 70% REO, from bastnasite {CN} production APOS, U	1,37	g
Ammonia, liquid {RoW} market for APOS, U	0,13	g
Nitric acid, without water, in 50% solution state {RoW} nitric acid production, product in 50% solution state APOS, U	7,9	g
Sulfuric acid {RoW} production APOS, U	1,67	g
Aluminium oxide {CN} aluminium oxide production APOS, U	0,008	g
Lead {GLO} market for APOS, U	0,19	g
Copper {RAS} production, primary APOS, U	0,402	g
Nickel, 99.5% {GLO} nickel mine operation, sulfidic ore APOS, U	0,003	g
Brass {CH} production APOS, U	1,65	g
Cast iron {RoW} production APOS, U	0,029	g
Steel, chromium steel 18/8, hot rolled {RoW} production APOS, U	0,0002	g
Mercury {GLO} production APOS, U	0,004	g
Capacitor, for surface-mounting {GLO} production APOS, U	3,44	g
Inductor, miniature radio frequency chip {GLO} production APOS,U	0,0504	g
Printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb free {GLO} market for APOS, U	3,7	g
Resistor, surface-mounted {GLO} production APOS, U	0,392	g
Resistor, surface-mounted {GLO} production APOS, U	0,19	g
Transistor, wired, big size, through-hole mounting {GLO} production APOS, U	3,7	g
Epoxy resin, liquid {RoW} production APOS, U	4,5	g
Flux, for wave soldering {GLO} production APOS, U	0,3	g
Glass tube, borosilicate {RoW} production APOS, U	1,2	g
Polyethylene terephthalate, granulate, amorphous {RoW} production APOS, U	2,39	g
<i>Processes</i>		
Diode, glass-, for surface-mounting {GLO} production APOS, U	1,28	g
Energy and auxilliary inputs, metal working factory {RoW} with heating from natural gas APOS, U	10,7	kg
Electricity, medium voltage {CN} market group for APOS, U	0,87014	kWh

Assembly of liquid crystal display, auxiliaries and energy use {GLO} market for APOS, U	153	g
CFL : Utilisation	1	p
<i>Processes</i>		
Electricity, low voltage {NO} market for APOS, U	180	kWh
CFL : Emballages	1	p
<i>Materials/assemblies</i>		
Corrugated board box {RoW} market for corrugated board box APOS, U	81	g

10.1.2 LED O

LED O : Fabrication du Wafer (Modules LED)	11/2438	p
<i>Materials/assemblies</i>		
Aluminium oxide {GLO} market for APOS, U	16,6	g
Ethoxylated alcohol (AE7) {RoW} ethoxylated alcohol (AE7) production, petrochemical APOS, U	3,5	kg
Zeolite, slurry, without water, in 50% solution state {RER} production APOS, U	830	g
Water, ultrapure {GLO} market for APOS, U	105,3	kg
<i>Processes</i>		
Electricity, medium voltage {CN} market group for APOS, U	18,3	kWh
LED O : Fabrication de la puce (Modules LED)	11/2438	p
<i>Materials/assemblies</i>		
Acetone, liquid {RER} production APOS, U	467	g
Gold {SE} gold-silver-zinc-lead-copper mine operation and refining APOS, U	0,29	g
Chemical, inorganic {GLO} market for chemicals, inorganic APOS, U	115	g
Hydrogen fluoride {RoW} market for hydrogen fluoride APOS, U	282	g
Hydrogen, liquid {RER} market for APOS, U	136	g
Nitrogen, liquid {RER} market for APOS, U	5527	g
Ammonia, liquid {RER} market for APOS, U	447	g
Oxygen, liquid {RER} market for APOS, U	2,3	kg
Chemical, inorganic {GLO} market for chemicals, inorganic APOS, U	19	g
Sulfur hexafluoride, liquid {RER} production APOS, U	13	g
Silicon carbide {GLO} market for APOS, U	0,242	g
Zeolite, slurry, without water, in 50% solution state {RER} production APOS, U	2,3	kg
Silver {GLO} market for APOS, U	0,005	g
Aluminium, cast alloy {GLO} market for APOS, U	0,003	g

Nickel, 99.5% {GLO} market for APOS, U	0,004	g
Titanium dioxide {RER} market for APOS, U	0,002	g
Palladium {GLO} market for APOS, U	0,06	g
Gallium, semiconductor-grade {GLO} production APOS, U	1,47	g
Indium {RER} production APOS, U	0,01	g
Water, ultrapure {GLO} market for APOS, U	240	kg
<i>Processes</i>		
Electricity, medium voltage {CN} market group for APOS, U	42,57	kWh

LED O : Assemblage du module LED	11	p
<i>Materials/assemblies</i>		
Aluminium oxide {GLO} market for APOS, U	0,0135	g
Gold {GLO} market for APOS, U	0,00006	g
Silicone product {RoW} market for silicone product APOS, U	0,0196	g
Epoxy resin, liquid {RoW} market for epoxy resin, liquid APOS, U	0,00006	g
Rare earth concentrate, 70% REO, from bastnasite {GLO} market for APOS, U	0,00004	g
<i>Processes</i>		
Electricity, medium voltage {CN} market group for APOS, U	0,03	kWh
Diode, auxiliaries and energy use {GLO} production APOS, U	0,055	g

LED O : Assemblage de lampe	1	p
<i>Materials/assemblies</i>		
Rare earth concentrate, 70% REO, from bastnasite {GLO} market for APOS, U	1	g
Polycarbonate {GLO} market for APOS, U	11,1	g
Copper {GLO} market for APOS, U	5	g
Nickel, 99.5% {GLO} market for APOS, U	0,003	g
Brass {RoW} market for brass APOS, U	1,65	g
Cast iron {RoW} production APOS, U	4	g
Steel, chromium steel 18/8, hot rolled {GLO} market for APOS, U	0,0002	g
Copper concentrate, sulfide ore {GLO} market for copper concentrate, sulfide ore APOS, U	4,8	g
Integrated circuit, logic type {GLO} market for APOS, U	0,158	g
Capacitor, for surface-mounting {GLO} market for APOS, U	0,993	g
Capacitor, electrolyte type, < 2cm height {GLO} market for APOS, U	24,73	g
Printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb free {GLO} market for APOS, U	15	g
Resistor, surface-mounted {GLO} market for APOS, U	0,993	g
Resistor, wirewound, through-hole mounting {GLO} market for APOS, U	1,568	g
Transistor, wired, big size, through-hole mounting {GLO} market for APOS, U	1,387	g
Transformer, low voltage use {GLO} market for APOS, U	30,15	g
Epoxy resin, liquid {RoW} market for epoxy resin, liquid APOS, U	4,5	g
Flux, for wave soldering {GLO} market for APOS, U	0,3	g
<i>Processes</i>		

Diode, glass-, for surface-mounting {GLO} market for APOS, U	1,091	g
Electricity, medium voltage {CN} market group for APOS, U	1,389	kWh
Assembly of liquid crystal display, auxiliaries and energy use {GLO} market for APOS, U	176	g
LED O : Dissipateur thermique		
1 p		
<i>Materials/assemblies</i>		
Aluminium, cast alloy {GLO} market for APOS, U	68,2	g
LED O : Utilisation		
1 p		
<i>Processes</i>		
Electricity, low voltage {XX} market for APOS, U	165	kWh
LED O : Emballages		
1 p		
<i>Materials/assemblies</i>		
Corrugated board box {RoW} market for corrugated board box APOS, U	37	g

10.1.3 LED N1 à 4

LED N1 et N2 : Fabrication du Wafer (Modules LED)	8/3250	p
LED N3 et N4	5,3/3250	p
<i>Materials/assemblies</i>		
Aluminium oxide {GLO} market for APOS, U	16,6	g
Ethoxylated alcohol (AE7) {RoW} ethoxylated alcohol (AE7) production, petrochemical APOS, U	3,5	kg
Zeolite, slurry, without water, in 50% solution state {RER} production APOS, U	830	g
Water, ultrapure {GLO} market for APOS, U	105,3	kg
<i>Processes</i>		
Electricity, medium voltage {CN} market group for APOS, U	18,3	kWh
LED N1 et N2 : Fabrication de la puce (Modules LED)		
8/3250 p		
LED N3 et N4		
5,3/3250 p		
<i>Materials/assemblies</i>		
Acetone, liquid {RER} production APOS, U	467	g
Gold {SE} gold-silver-zinc-lead-copper mine operation and refining APOS, U	0,29	g
Chemical, inorganic {GLO} market for chemicals, inorganic APOS, U	115	g
Hydrogen fluoride {RoW} market for hydrogen fluoride APOS, U	282	g
Hydrogen, liquid {RER} market for APOS, U	136	g
Nitrogen, liquid {RER} market for APOS, U	5527	g
Ammonia, liquid {RER} market for APOS, U	447	g

Oxygen, liquid {RER} market for APOS, U	2,3	kg
Chemical, inorganic {GLO} market for chemicals, inorganic APOS, U	19	g
Sulfur hexafluoride, liquid {RER} production APOS, U	13	g
Silicon carbide {GLO} market for APOS, U	0,242	g
Zeolite, slurry, without water, in 50% solution state {RER} production APOS, U	2,3	kg
Silver {GLO} market for APOS, U	0,005	g
Aluminium, cast alloy {GLO} market for APOS, U	0,003	g
Nickel, 99.5% {GLO} market for APOS, U	0,004	g
Titanium dioxide {RER} market for APOS, U	0,002	g
Palladium {GLO} market for APOS, U	0,06	g
Gallium, semiconductor-grade {GLO} production APOS, U	1,47	g
Indium {RER} production APOS, U	0,01	g
Water, ultrapure {GLO} market for APOS, U	240	kg
<i>Processes</i>		
Electricity, medium voltage {CN} market group for APOS, U	42,57	kWh

LED N1 et N2 : Assemblage du module LED	8	p
LED N3 et N4	5,3	p
<i>Materials/assemblies</i>		
Aluminium oxide {GLO} market for APOS, U	0,0135	g
Gold {GLO} market for APOS, U	0,00006	g
Silicone product {RoW} market for silicone product APOS, U	0,0196	g
Epoxy resin, liquid {RoW} market for epoxy resin, liquid APOS, U	0,00006	g
Rare earth concentrate, 70% REO, from bastnasite {GLO} market for APOS, U	0,00004	g
<i>Processes</i>		
Electricity, medium voltage {CN} market group for APOS, U	0,03	kWh
Diode, auxiliaries and energy use {GLO} production APOS, U	0,055	g

LED N1 à 4 : Assemblage de lampe	1	p
<i>Materials/assemblies</i>		
Zinc concentrate {GLO} market for APOS, U	0,04	g
Steel, low-alloyed {GLO} market for APOS, U	1,909	g
Polymethyl methacrylate, sheet {GLO} market for APOS, U	12,49	g
Polycarbonate {GLO} market for APOS, U	6,772	g
Printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb free {GLO} market for APOS, U	1,734	g
Printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb free {GLO} market for APOS, U	3,466	g
Inductor, ring core choke type {GLO} market for APOS, U	0,668	g
Integrated circuit, logic type {GLO} market for APOS, U	0	g
Capacitor, for surface-mounting {GLO} market for APOS, U	0,023	g
Capacitor, electrolyte type, < 2cm height {GLO} market for APOS, U	1,747	g
Resistor, surface-mounted {GLO} market for APOS, U	0,136	g
Resistor, metal film type, through-hole mounting {GLO} market for APOS, U	0,221	g
Transistor, wired, small size, through-hole mounting {GLO} market for APOS, U	0,085	g

Transformer, low voltage use {GLO} market for APOS, U	4,956	g
Epoxy resin, liquid {RoW} market for epoxy resin, liquid APOS, U	0	g
Flux, for wave soldering {GLO} market for APOS, U	0,3	g
<i>Processes</i>		
Diode, glass-, for surface-mounting {GLO} market for APOS, U	0,139	g
Electricity, medium voltage {CN} market group for APOS, U	5	MJ
Assembly of liquid crystal display, auxiliaries and energy use {GLO} market for APOS, U	45,66	g

LED N1 à 4 : Dissipateur thermique	1	p
---	----------	----------

Materials/assemblies

Aluminium, cast alloy {GLO} market for APOS, U	11,03	g
---	-------	---

LED	LED N : Utilisation	1	p
N1		120	kWh
N2		200	kWh
N3	Electricity, low voltage {XX} market for APOS, U	79,5	kWh
N4		133	kWh

LED N1 à 4 : Packaging	1	p
-------------------------------	----------	----------

Materials/assemblies

Corrugated board box{RoW} market for corrugated board box APOS, U	17,99	g
Polymethyl methacrylate, sheet {GLO} market for APOS, U	11,77	g

10.1.4 T5

T5 : Lampe	1	p
-------------------	----------	----------

Materials/assemblies

Glass tube, borosilicate {GLO} market for APOS, U	0,38858	kg
Aluminium, primary, ingot {RoW} market for APOS, U	0,0126	kg
Rare earth concentrate, 70% REO, from bastnasite {GLO} market for APOS, U	0,0084	kg
Argon, liquid {RoW} market for argon, liquid APOS, U	0,0042	kg
Krypton, gaseous {GLO} market for APOS, U	0,0042	kg
Mercury {GLO} market for APOS, U	0,00002	kg
Liquid crystal display, minor components, auxiliaries and assembly effort {GLO} production APOS, U	0,418	kg
<i>Processes</i>		
Sheet rolling, aluminium {RoW} processing APOS, U	0,0126	kg

T5 : Ballast	1	p
---------------------	----------	----------

<i>Materials/assemblies</i>		
Printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb free {GLO} market for APOS, U	0,0155	kg
Steel, chromium steel 18/8 {GLO} market for APOS, U	0,07905	kg
Polyethylene terephthalate, granulate, amorphous {GLO} market for APOS, U	0,0031	kg
Solder, paste, Sn95.5Ag3.9Cu0.6, for electronics industry {GLO} market for APOS, U	0,00155	kg
Aluminium, primary, ingot {RoW} market for APOS, U	0,0434	kg
Aluminium, primary, ingot {RoW} market for APOS, U	0,00465	kg
Aluminium, primary, ingot {RoW} market for APOS, U	0,0031	kg
Polypropylene, granulate {GLO} market for APOS, U	0,002325	kg
Steel, chromium steel 18/8 {GLO} market for APOS, U	0,002325	kg
<i>Processes</i>		
Sheet rolling, chromium steel {RoW} processing APOS, U	0,07905	kg
Extrusion, plastic film {GLO} market for APOS, U	0,0031	kg
Metal working, average for aluminium product manufacturing {RoW} processing APOS, U	0,0434	kg
Sheet rolling, aluminium {RoW} processing APOS, U	0,00465	kg
Sheet rolling, aluminium {RoW} processing APOS, U	0,0031	kg
Injection moulding {RoW} processing APOS, U	0,002325	kg
Sheet rolling, chromium steel {RoW} processing APOS, U	0,002325	kg

T5 : Luminaire	1	p
<i>Materials/assemblies</i>		
Steel, low-alloyed {GLO} market for APOS, U	0,25	kg
Copper {GLO} market for APOS, U	0,0002787	kg
Polypropylene, granulate {GLO} market for APOS, U	0,0025	kg
Polyethylene terephthalate, granulate, bottle grade {GLO} market for APOS, U	0,505	kg
<i>Processes</i>		
Metal working, average for steel product manufacturing {RoW} processing APOS, U	0,25	kg
Wire drawing, copper {RoW} processing APOS, U	0,0002787	kg
Injection moulding {RoW} processing APOS, U	0,0025	kg
Injection moulding {RoW} processing APOS, U	0,505	kg

T5 : Emballage	1	p
<i>Materials/assemblies</i>		
Corrugated board box {RoW} market for corrugated board box APOS, U	0,0082253	kg
Polyethylene, low density, granulate {RoW} production APOS, U	0,02	kg
<i>Processes</i>		
Extrusion, plastic film {RoW} extrusion, plastic film APOS, U	0,02	kg

T5 : Utilisation	1	p
-------------------------	----------	----------

*Processes*Electricity, low voltage {XX}| market for |
APOS, U

312 kWh

10.1.5 Transport

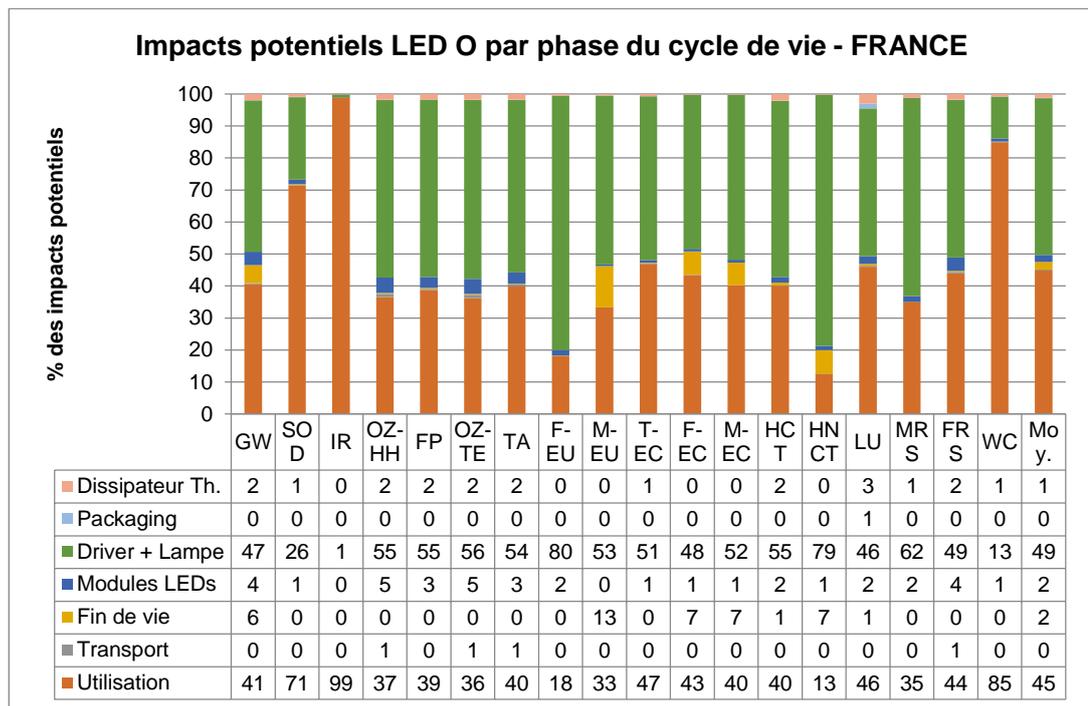
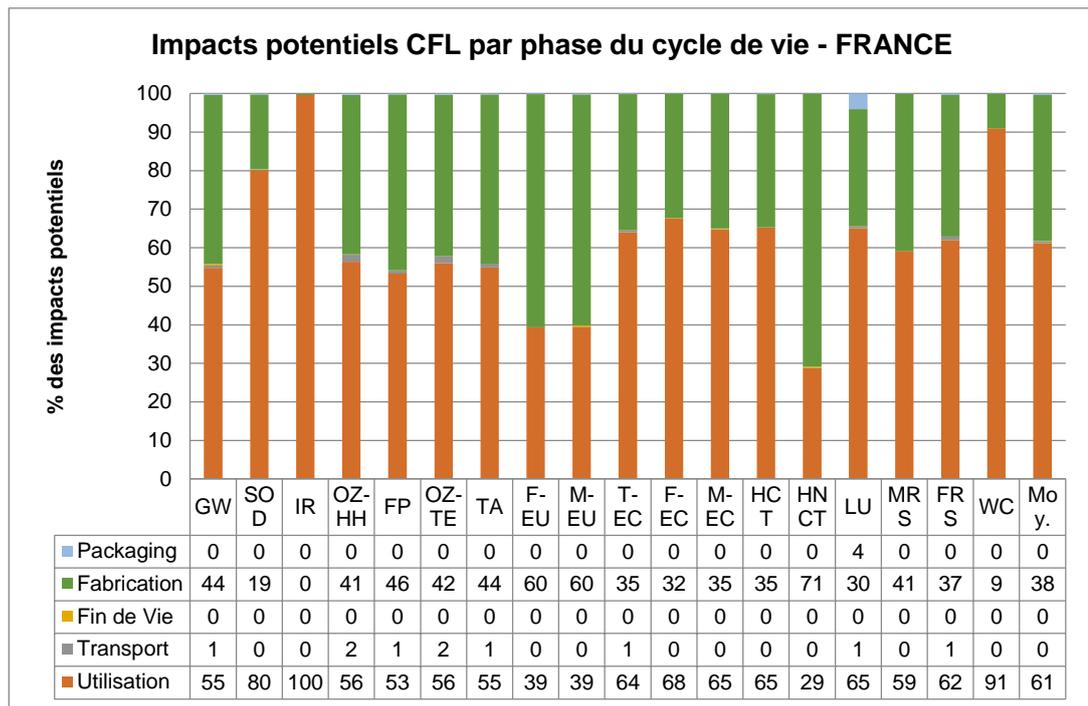
Transport (tkm)		CFL	LED O	LED N	T5
<i>Processes</i>					
Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO} market for APOS, U	EU/FR	3.47	2.61	0.699	56,1
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro4 {RER} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 APOS, U	EU/FR	0.468	0.352	0.0942	7.56
Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO} market for APOS, U	AU	2.26	1.7	0.455	36.5
	NZ	2.34	1.76	0.471	37.8
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro4 {RoW} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 APOS, U	NZ/AU	0.234	0.176	0.0471	3.78

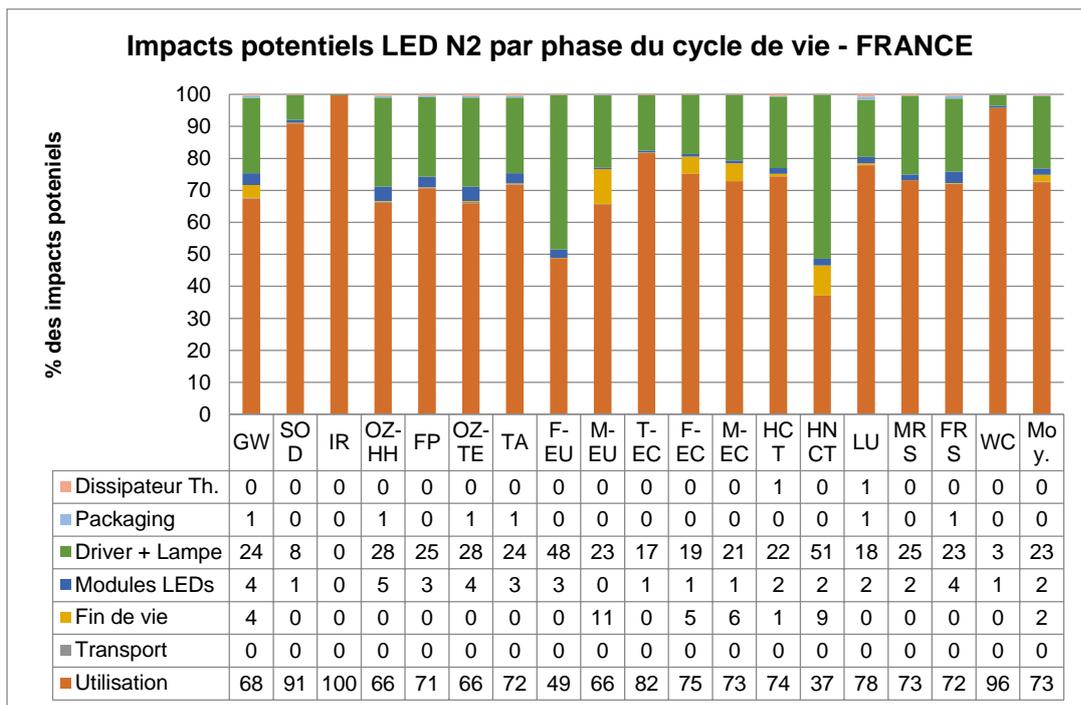
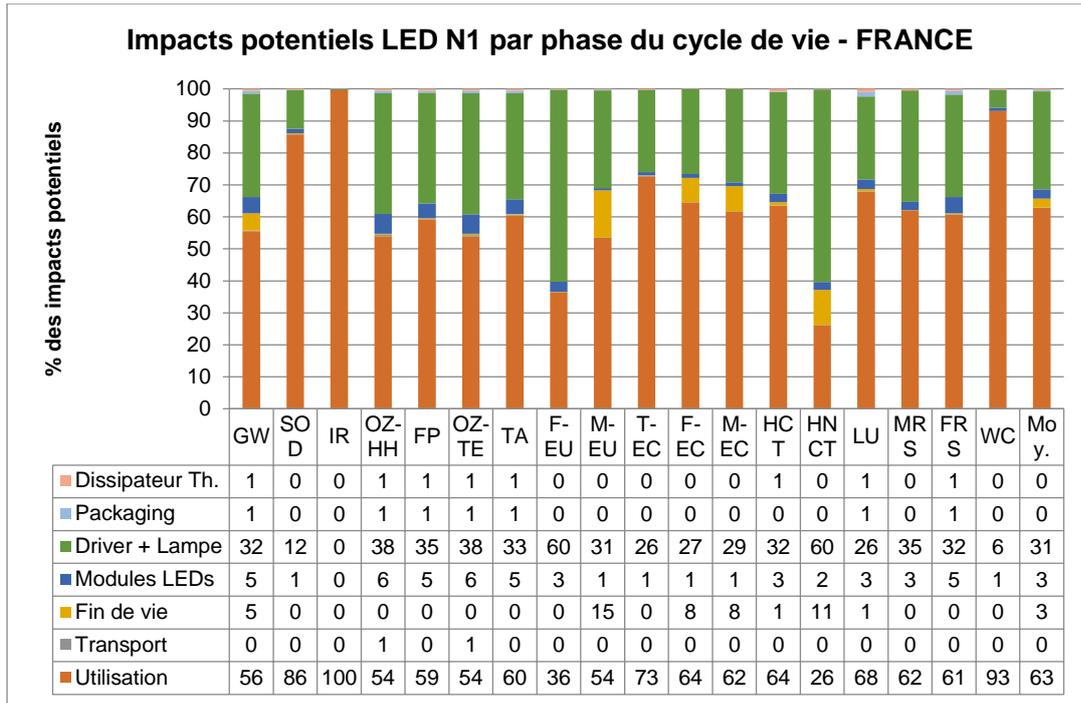
10.2 Caractérisation des impacts par phase du cycle de vie

Liste des abréviations des catégories d'impacts :

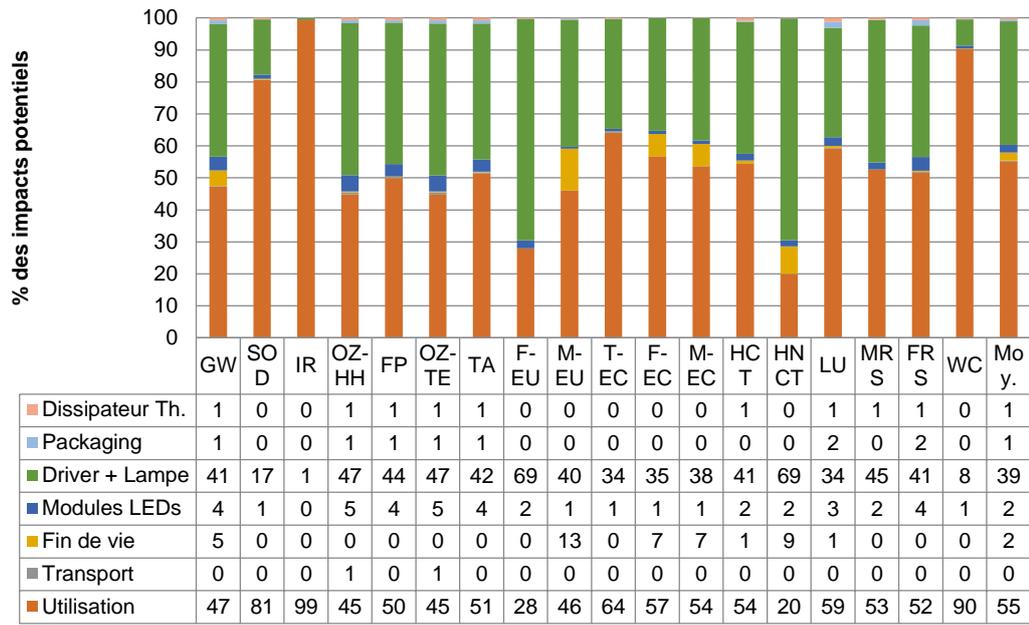
GW	Global Warming
SOD	Stratospheric ozone depletion
IR	Ionizing radiation
OZ-HH	Ozone Formation, Human Health
FP	Fine particule matter formation
OZ-TE	Ozone Formation, Terrestrial Ecosystem
TA	Terrestrial acidification
F-EU	Freshwater eutrophication
M-EU	Marine eutrophication
T-EC	Terrestrial Ecotoxicity
F-EC	Freshwater Ecotoxicity
M-EC	Marine Ecotoxicity
HCT	Human carcinogenic toxicity
HNCT	Human non-carcinogenic toxicity
LU	Land Use
MRS	Mineral Ressource Scarcity
FRS	Fossil Ressource Scarcity
WC	Water Consumption
Moy.	Moyenne

10.2.1 France

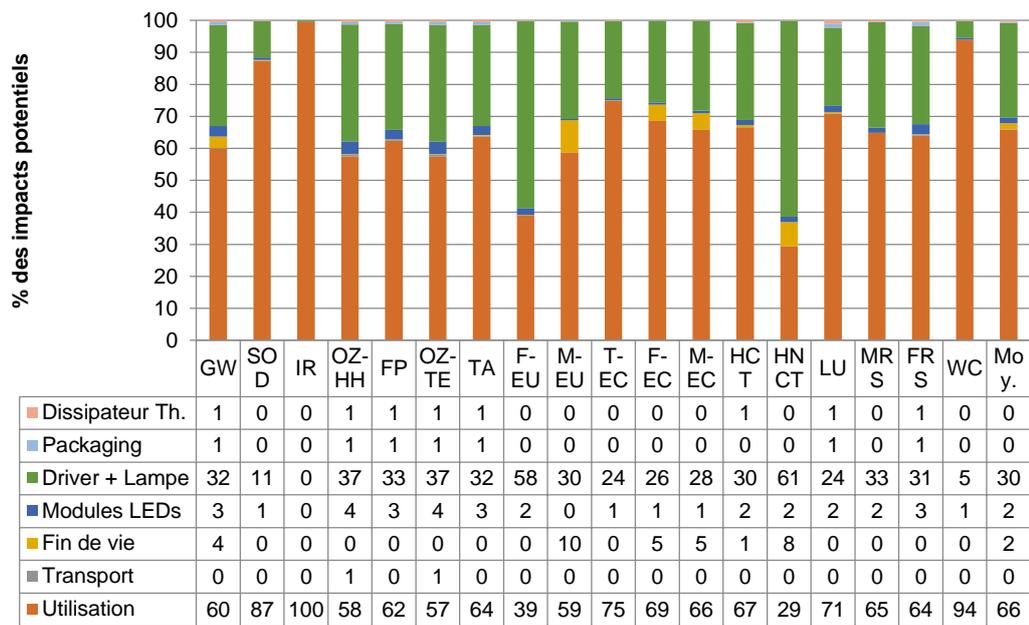


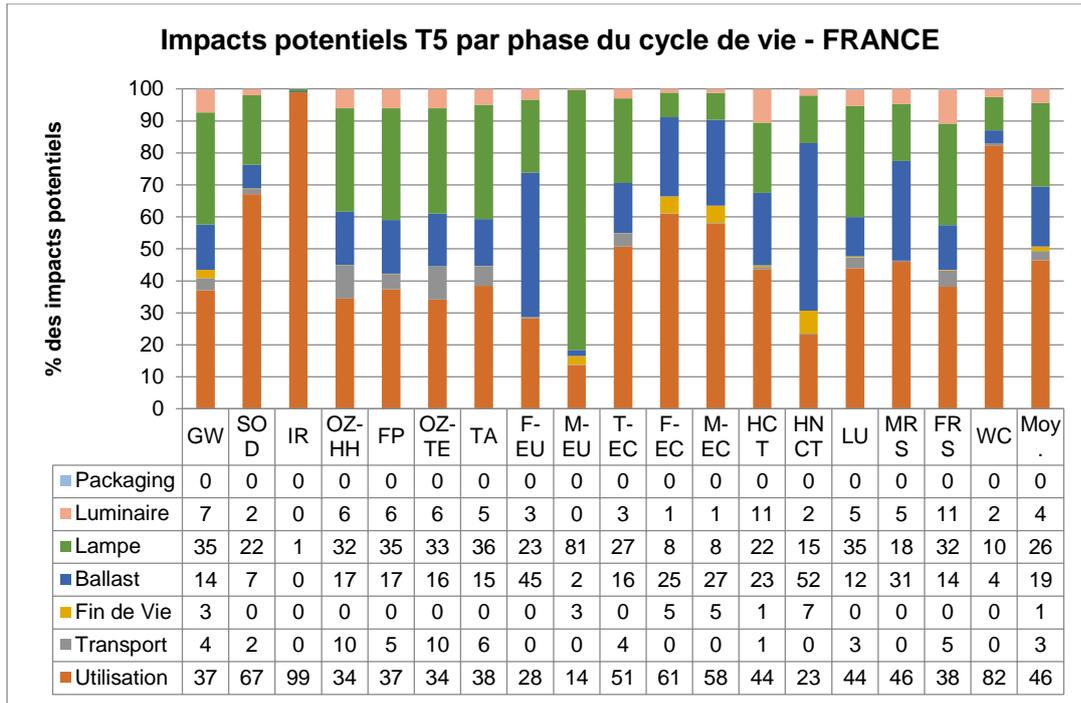


Impacts potentiels LED N3 par phase du cycle de vie - FRANCE

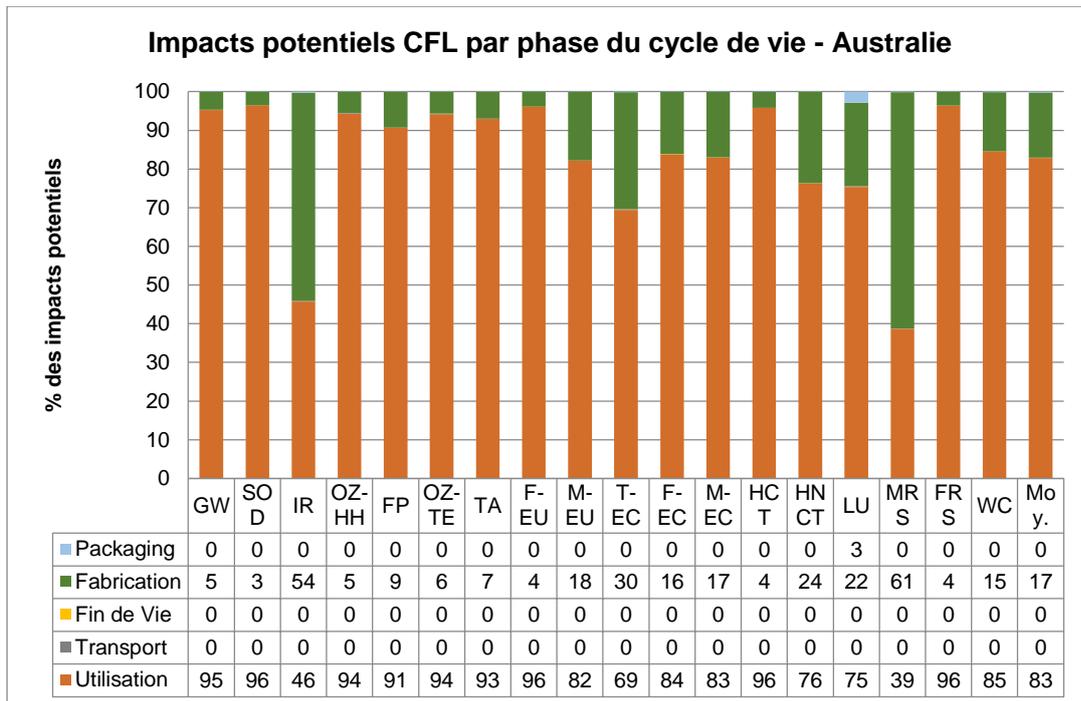


Impacts potentiels LED N4 par phase du cycle de vie - FRANCE

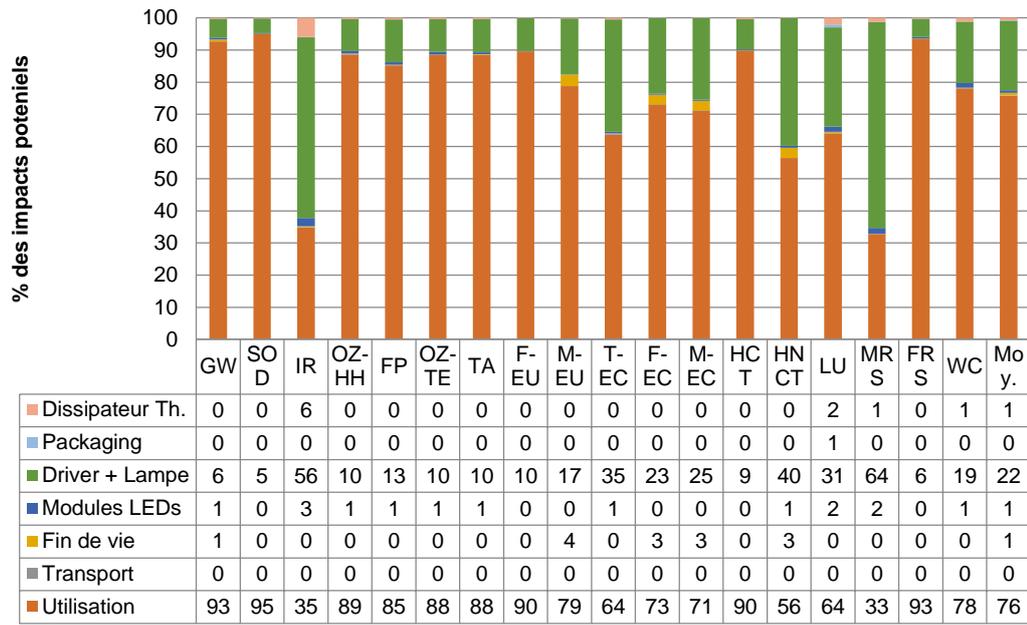




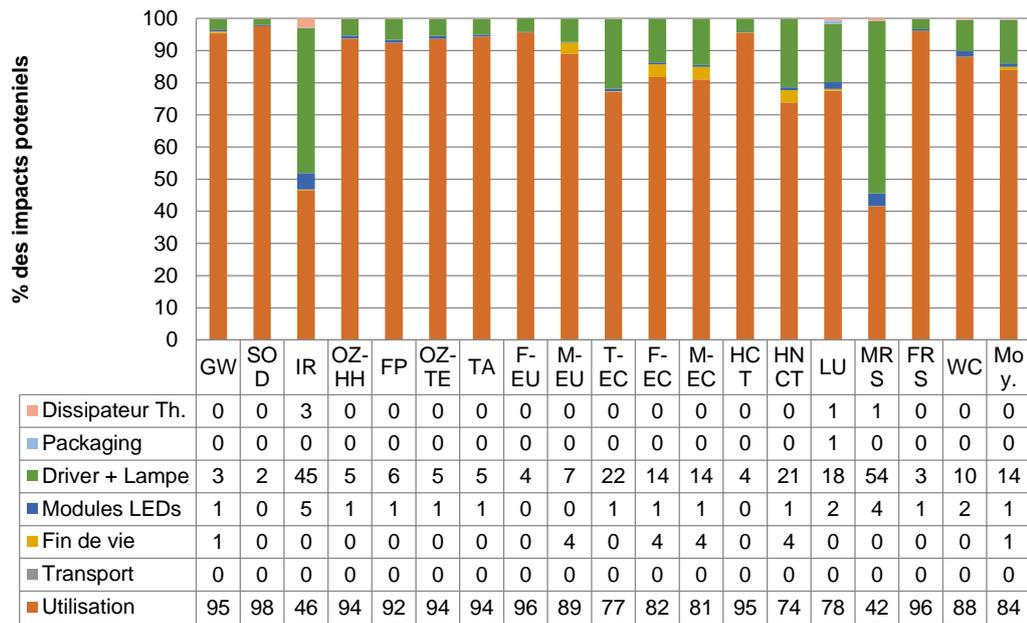
10.2.2 Australie

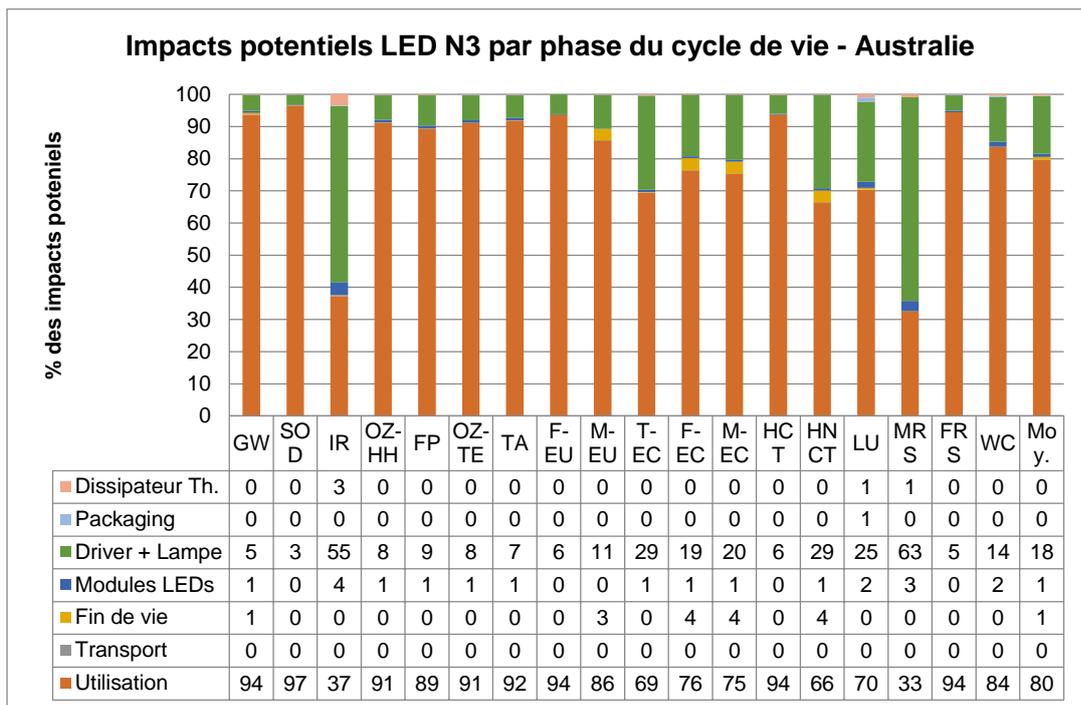
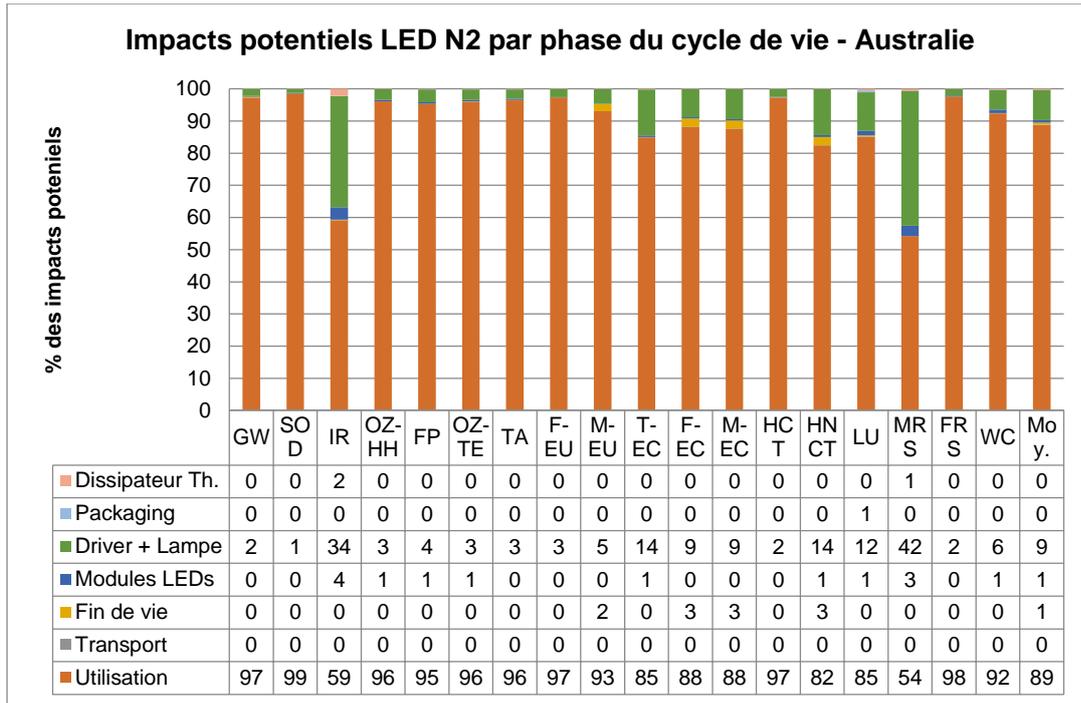


Impacts potentiels LED O par phase du cycle de vie - Australie

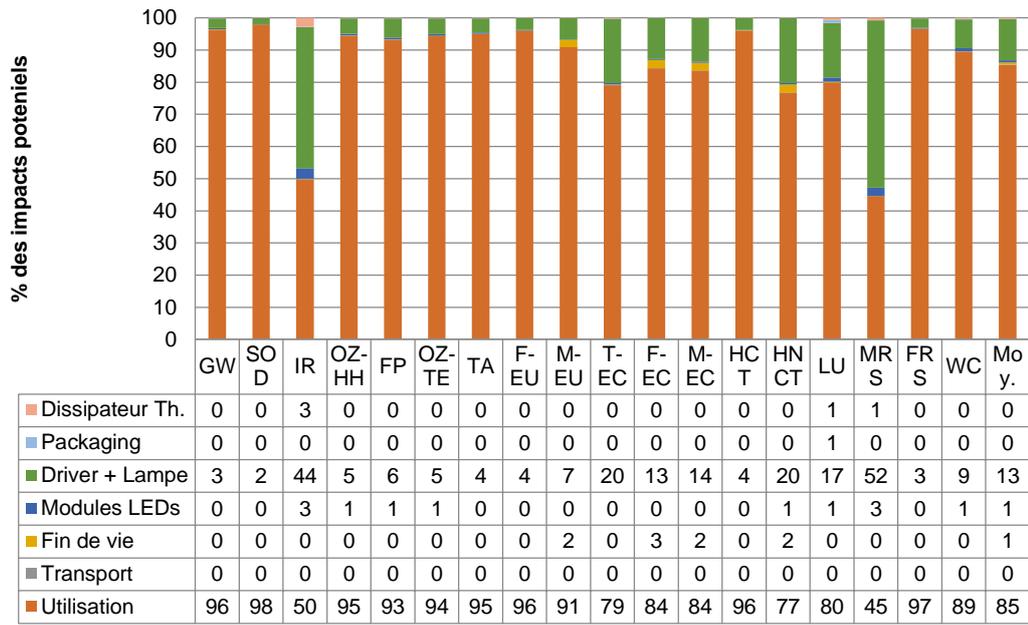


Impacts potentiels LED N1 par phase du cycle de vie - Australie

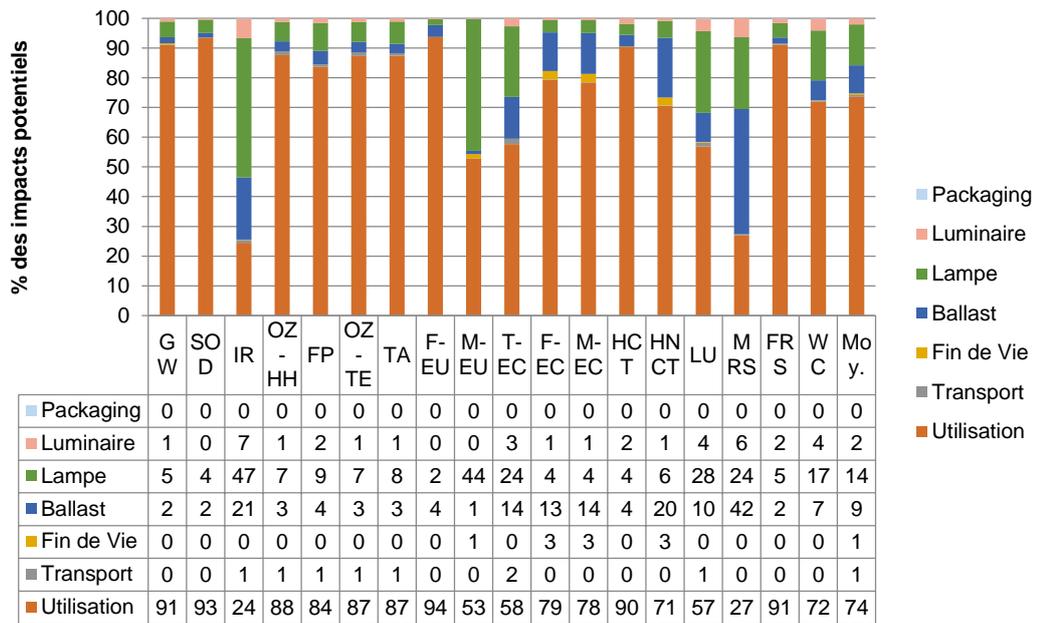




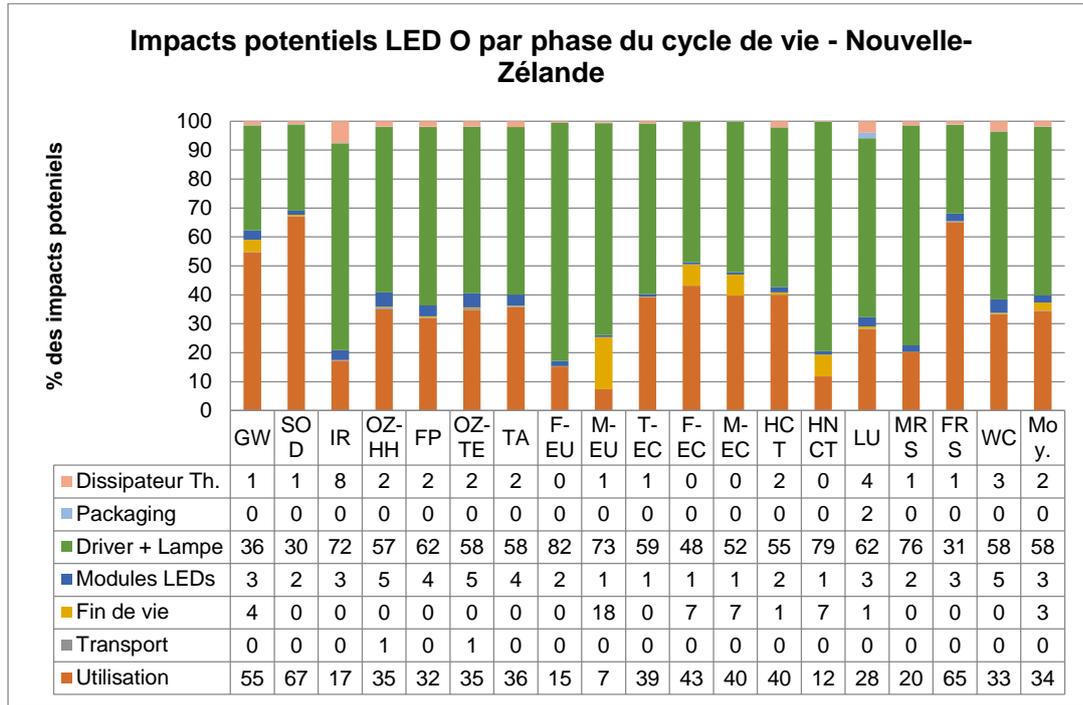
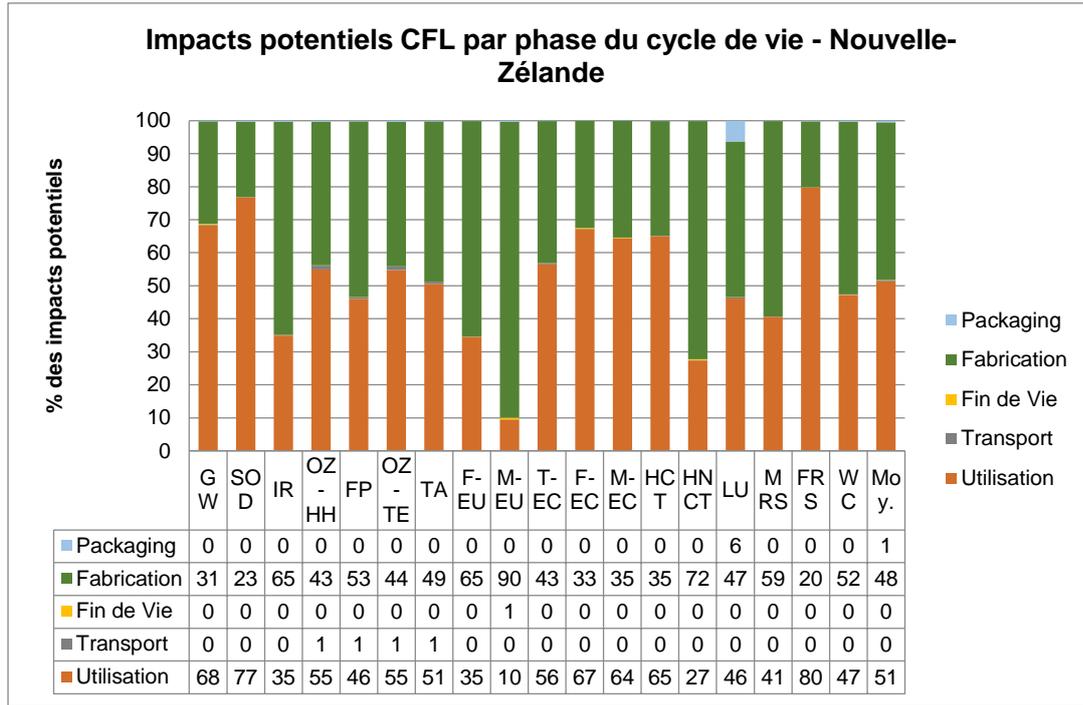
Impacts potentiels LED N4 par phase du cycle de vie - Australie



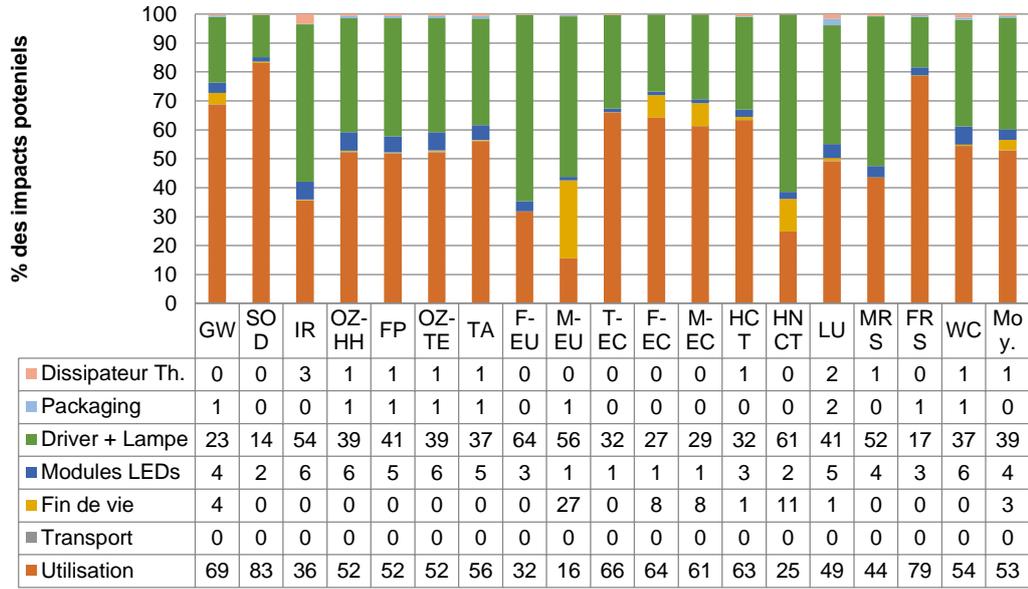
Impacts potentiels T5 par phase du cycle de vie - Australie



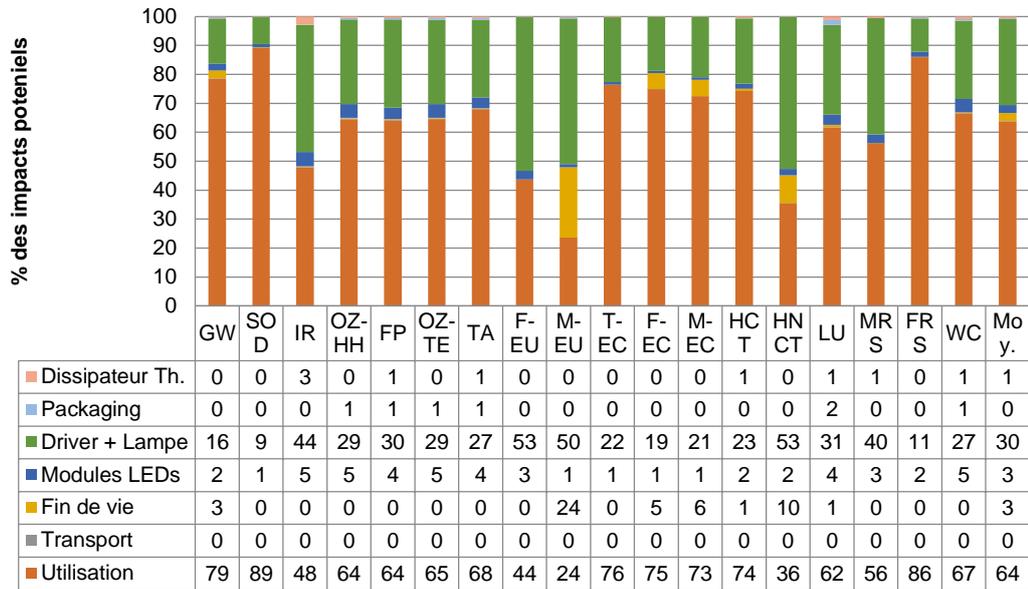
10.2.3 Nouvelle-Zélande



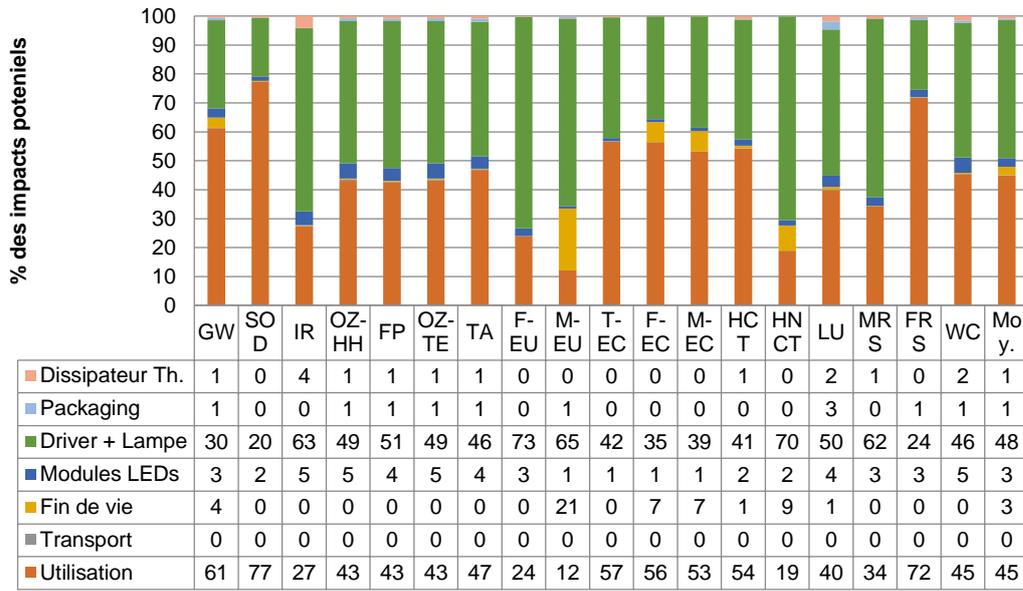
Impacts potentiels LED N1 par phase du cycle de vie - Nouvelle-Zélande



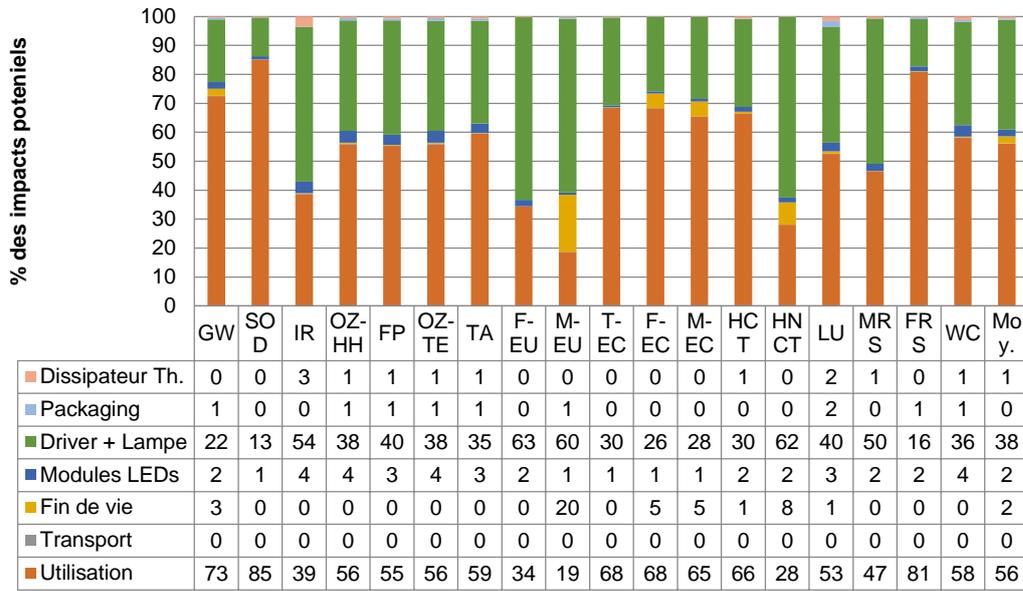
Impacts potentiels LED N2 par phase du cycle de vie - Nouvelle-Zélande

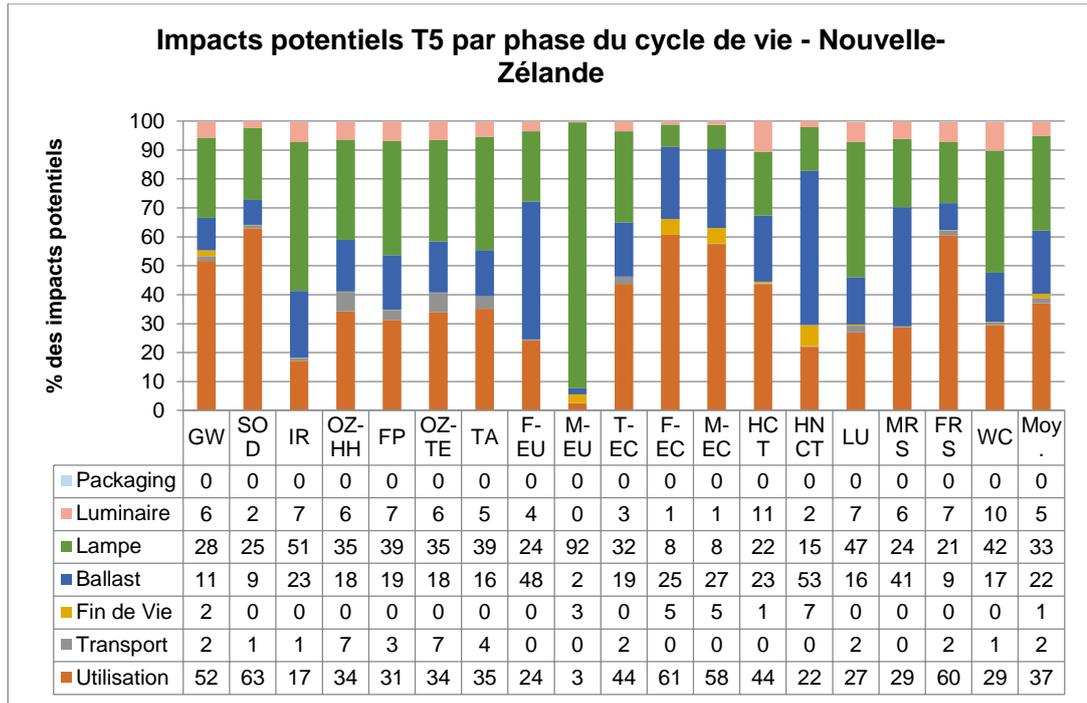


Impacts potentiels LED N3 par phase du cycle de vie - Nouvelle-Zélande

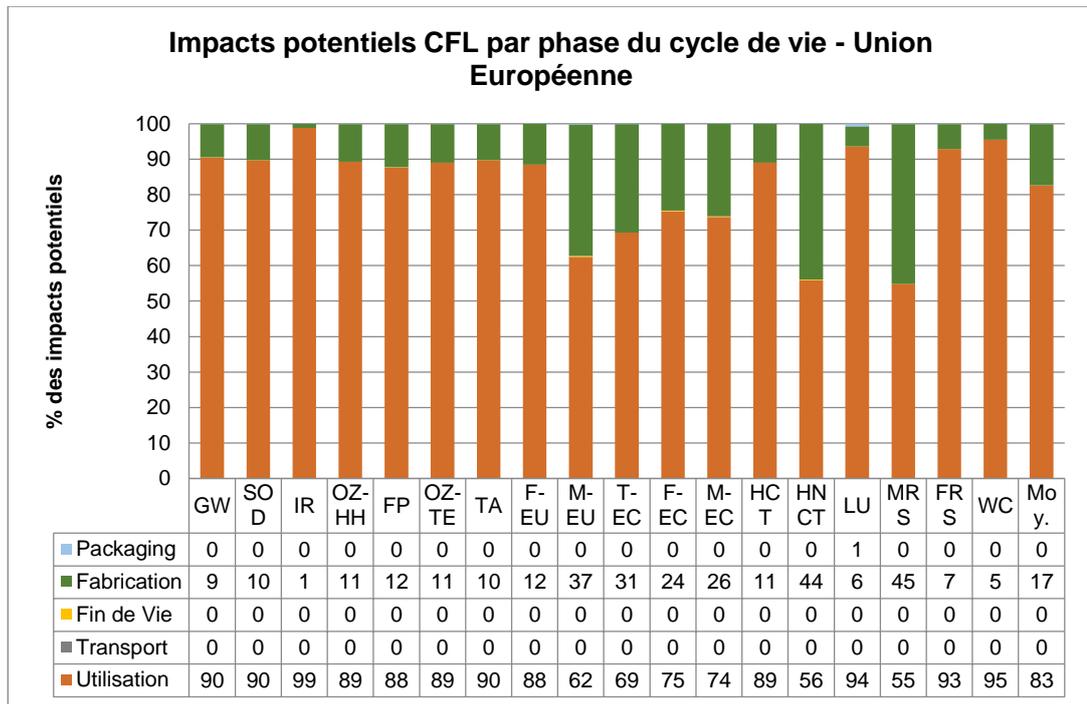


Impacts potentiels LED N4 par phase du cycle de vie - Nouvelle-Zélande

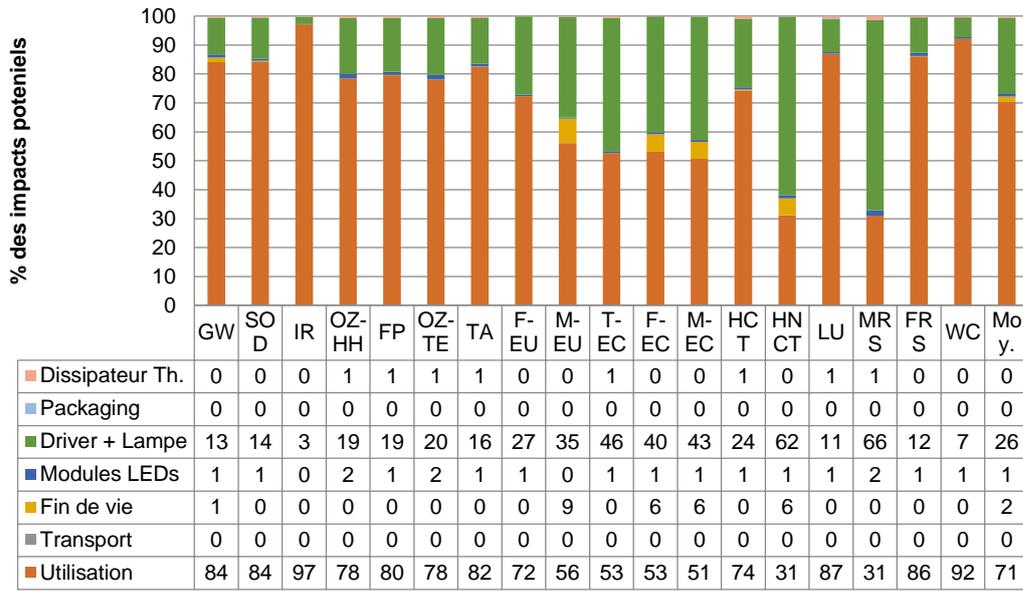




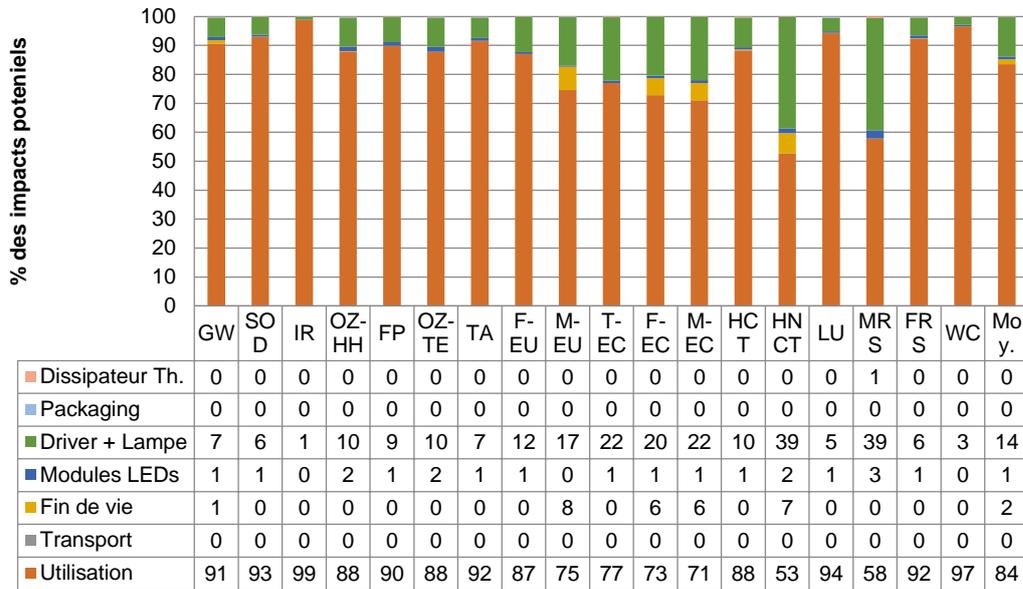
10.2.4 Union Européenne



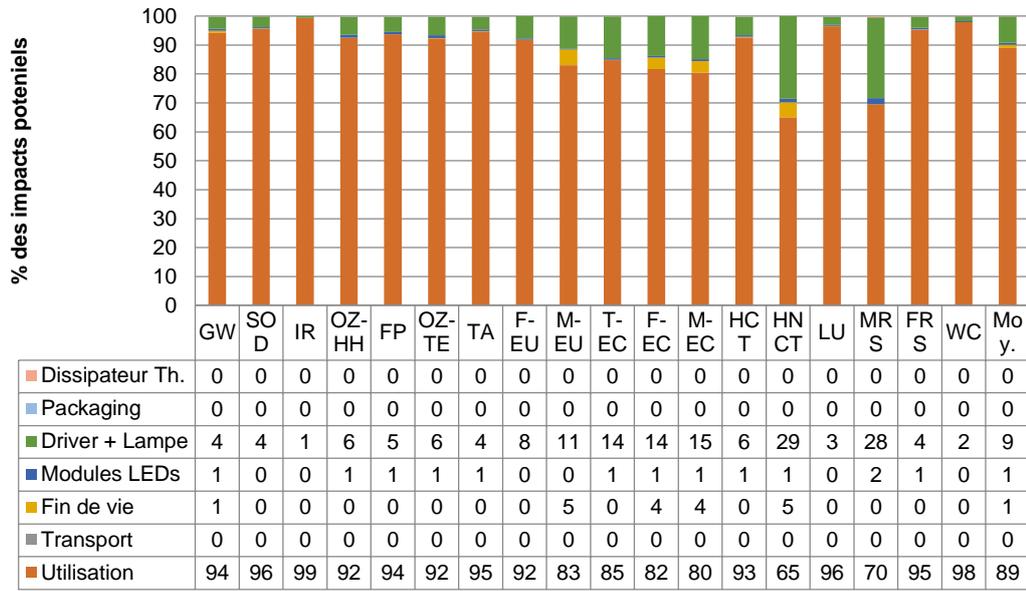
Impacts potentiels LED O par phase du cycle de vie - Union Européenne



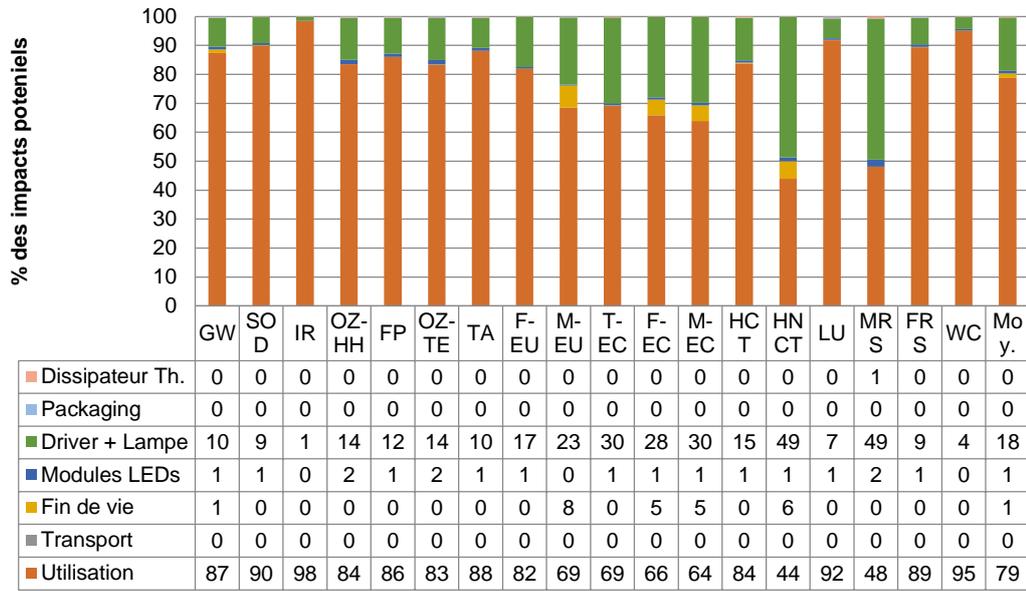
Impacts potentiels LED N1 par phase du cycle de vie - Union Européenne



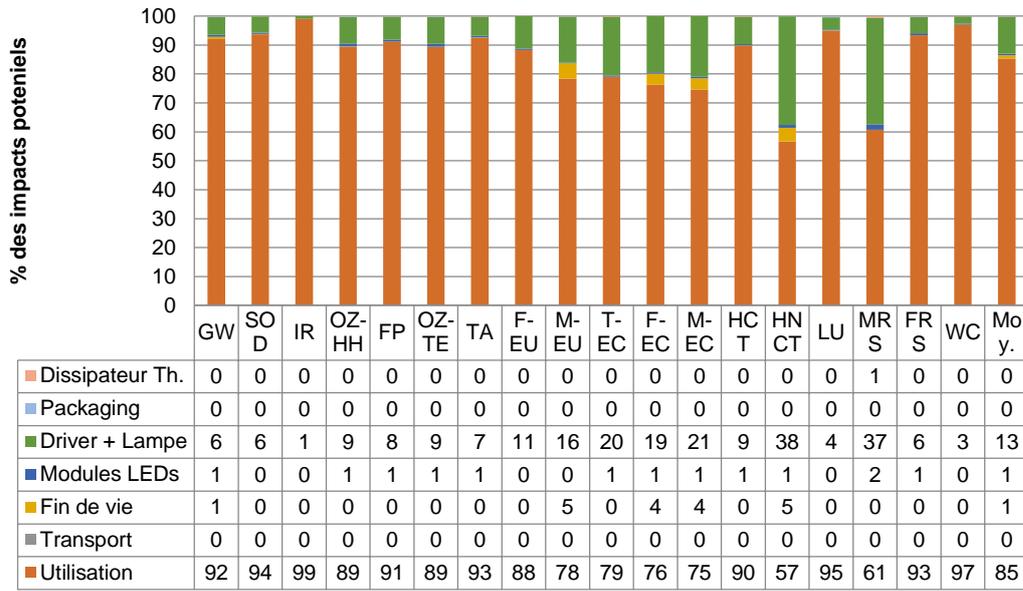
Impacts potentiels LED N2 par phase du cycle de vie - Union Européenne



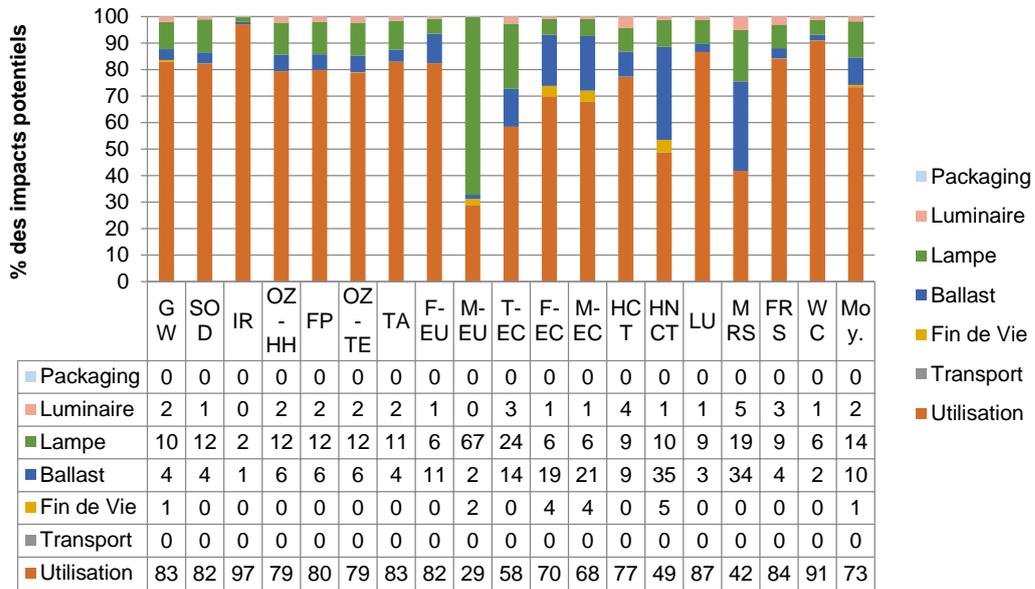
Impacts potentiels LED N3 par phase du cycle de vie - Union Européenne



Impacts potentiels LED N4 par phase du cycle de vie - Union Européenne



Impacts potentiels T5 par phase du cycle de vie - Union Européenne



10.3 Données inventaires lampes horticoles

10.3.1 HPS

HPS : Lampe	1	p
<i>Materials/assemblies</i>		
Glass tube, borosilicate {GLO} market for APOS, U	318	g
Brass {RoW} market for brass APOS, U	21,9	g
Steel, chromium steel 18/8 {GLO} market for APOS, U	4,11	g
Copper {GLO} market for APOS, U	8,2	g
Solder, paste, Sn95.5Ag3.9Cu0.6, for electronics industry {GLO} market for APOS, U	5,47	g
Aluminium oxide {GLO} market for APOS, U	28	g
Mercury {GLO} market for APOS, U	0,023	g
Xenon, gaseous {RoW} market for xenon, gaseous APOS, U	0,002	g
Sodium {GLO} market for APOS, U	0,0105	g
Barium oxide {GLO} market for barium oxide APOS, U	0,1558	g
Calcium borates {GLO} market for APOS, U	0,1873	g
Xenon, gaseous {RER} market for xenon, gaseous APOS, U	0,0176	g
<i>Processes</i>		
Wire drawing, copper {GLO} market for APOS, U	8,2	g
Electricity, low voltage {CN} market group for APOS, U	0,833	kWh
Metal working, average for metal product manufacturing {GLO} market for APOS, U	39,7	g

HPS : Ballast	1	p
<i>Materials/assemblies</i>		
Nylon 6-6 {GLO} market for APOS, U	54,742	g
Polyester resin, unsaturated {RER} market for polyester resin, unsaturated APOS, U	0,07474	g
Brass {RoW} market for brass APOS, U	6,2216	g
Tetrafluoroethylene film, on glass {GLO} market for APOS, U	9,9586	g
Copper {GLO} market for APOS, U	500,96	g
Steel, chromium steel 18/8 {GLO} market for APOS, U	3555,2	g
Capacitor, electrolyte type, > 2cm height {GLO} market for APOS, U	276,74	g
Aluminium, cast alloy {GLO} market for APOS, U	20,2	g
<i>Processes</i>		
Metal working, average for metal product manufacturing {GLO} market for APOS, U	6,2216	g
Wire drawing, copper {GLO} market for APOS, U	500,96	g
Sheet rolling, chromium steel {GLO} market for APOS, U	626,2	g
Zinc coat, pieces {RER} zinc coating, pieces APOS, U	0,0109888	m2
Metal working, average for chromium steel product manufacturing {GLO} market for APOS, U	2929	g
Sheet rolling, aluminium {GLO} market for APOS, U	20,2	g
Electricity, low voltage {CN} market group for APOS, U	1,79376	kWh

HPS : Capacitor	1	p
<i>Materials/assemblies</i>		
Capacitor, film type, for through-hole mounting {GLO} market for APOS, U	0,0868	kg
HPS : Luminaire	1	p
<i>Materials/assemblies</i>		
Steel, chromium steel 18/8 {GLO} market for APOS, U	8,18	kg
Aluminium, cast alloy {GLO} market for APOS, U	0,827	kg
Flat glass, uncoated {GLO} market for APOS, U	3,86	kg
Silicone product {RoW} market for silicone product APOS, U	0,064	kg
Coating powder {RER} market for coating powder APOS, U	0,309	kg
Epoxy resin insulator, Al ₂ O ₃ {GLO} market for APOS, U	0,2	kg
Brass {RoW} market for brass APOS, U	0,05	kg
<i>Processes</i>		
Metal working, average for steel product manufacturing {GLO} market for APOS, U	8,18	kg
Metal working, average for aluminium product manufacturing {GLO} market for APOS, U	0,827	kg
Tempering, flat glass {GLO} market for APOS, U	3,86	kg
Powder coat, steel {RER} powder coating, steel APOS, U	25780	cm ²
Casting, brass {GLO} market for APOS, U	0,05	kg
HPS : Utilisation (1000h)	1	p
<i>Processes</i>		
Electricity, low voltage {GB} market for APOS, U	899	MWh

10.3.2 MH

MH : Lampe	1	p
<i>Materials/assemblies</i>		
Glass tube, borosilicate {GLO} market for APOS, U	338	g
Brass {RoW} market for brass APOS, U	21,9	g
Steel, chromium steel 18/8 {GLO} market for APOS, U	4,11	g
Copper {GLO} market for APOS, U	8,2	g
Solder, paste, Sn95.5Ag3.9Cu0.6, for electronics industry {GLO} market for APOS, U	5,47	g
Glass tube, borosilicate {GLO} market for APOS, U	26,5	g
Mercury {GLO} market for APOS, U	0,151	g
Sodium chloride, powder {RoW} production APOS, U	0,035	g
Inert gas for discharge lamps {GLO} argon to generic market for APOS, U	0,009	g

Molybdenum {GLO} market for APOS, U	0,019	g
Molybdenum {GLO} market for APOS, U	0,484	g
Inert gas for discharge lamps {GLO} argon to generic market for APOS, U	0,078	g
<i>Processes</i>		
Wire drawing, copper {GLO} market for APOS, U	8,2	g
Electricity, low voltage {CN} market group for APOS, U	0,833	kWh
Metal working, average for metal product manufacturing {GLO} market for APOS, U	26,3	g

MH : Ballast	1	p
<i>Materials/assemblies</i>		
Nylon 6-6 {GLO} market for APOS, U	54,742	g
Polyester resin, unsaturated {RER} market for polyester resin, unsaturated APOS, U	0,07474	g
Brass {RoW} market for brass APOS, U	6,2216	g
Tetrafluoroethylene film, on glass {GLO} market for APOS, U	9,9586	g
Copper {GLO} market for APOS, U	500,96	g
Steel, chromium steel 18/8 {GLO} market for APOS, U	3555,2	g
Capacitor, electrolyte type, > 2cm height {GLO} market for APOS, U	276,74	g
Aluminium, cast alloy {GLO} market for APOS, U	20,2	g
<i>Processes</i>		
Metal working, average for metal product manufacturing {GLO} market for APOS, U	6,2216	g
Wire drawing, copper {GLO} market for APOS, U	500,96	g
Sheet rolling, chromium steel {GLO} market for APOS, U	626,2	g
Zinc coat, pieces {RER} zinc coating, pieces APOS, U	0,0109888	m2
Metal working, average for chromium steel product manufacturing {GLO} market for APOS, U	2929	g
Sheet rolling, aluminium {GLO} market for APOS, U	20,2	g
Electricity, low voltage {CN} market group for APOS, U	1,79376	kWh

MH : Luminaire	1	p
<i>Materials/assemblies</i>		
Steel, chromium steel 18/8 {GLO} market for APOS, U	8,18	kg
Aluminium, cast alloy {GLO} market for APOS, U	0,827	kg
Flat glass, uncoated {GLO} market for APOS, U	3,86	kg
Silicone product {RoW} market for silicone product APOS, U	0,064	kg
Coating powder {RER} market for coating powder APOS, U	0,309	kg
Epoxy resin insulator, Al2O3 {GLO} market for APOS, U	0,2	kg
Brass {RoW} market for brass APOS, U	0,05	kg
<i>Processes</i>		
Metal working, average for steel product manufacturing {GLO} market for APOS, U	8,18	kg
Metal working, average for aluminium product manufacturing {GLO} market for APOS, U	0,827	kg
Tempering, flat glass {GLO} market for APOS, U	3,86	kg

Powder coat, steel {RER} powder coating, steel APOS, U	25780	cm2
Casting, brass {GLO} market for APOS, U	0,05	kg

MH : Utilisation (1000h)	1	p
<i>Processes</i>		
Electricity, low voltage {GB} market for APOS, U	1100	MWh

10.3.3 LED

LED : Modules LED	12 x 0.35	p
<i>Materials/assemblies</i>		
Light emitting diode {GLO} production APOS, U	1	g
<i>Processes</i>		
Diode, glass-, for through-hole mounting {GLO} production APOS, U	1	g

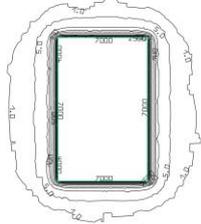
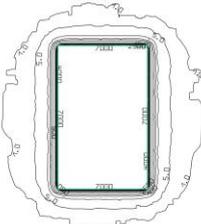
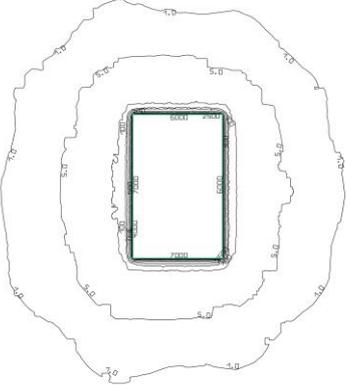
LED : Driver	1	p
<i>Materials/assemblies</i>		
Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer {GLO} market for APOS, U	0,552	kg
Printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb free {GLO} market for APOS, U	63,2766	g
Printed wiring board, through-hole mounted, unspecified, Pb free {GLO} market for APOS, U	63,2766	g
Capacitor, film type, for through-hole mounting {GLO} market for APOS, U	0,02481	kg
Capacitor, auxiliaries and energy use {GLO} market for APOS, U	0,00546	kg
Capacitor, electrolyte type, < 2cm height {GLO} market for APOS, U	0,00339	kg
Capacitor, electrolyte type, > 2cm height{GLO} market for APOS, U	0,0411	kg
Resistor, metal film type, through-hole mounting {GLO} market for APOS, U	0,00351	kg
Transformer, low voltage use {GLO} market for APOS, U	0,2034	kg
Electronic component, passive, unspecified {GLO} market for APOS, U	0,00294	kg
Resistor, auxiliaries and energy use {GLO} market for APOS, U	0,00453	kg
Resistor, surface-mounted {GLO} market for APOS, U	0,0012	kg
Integrated circuit, logic type {GLO} market for APOS, U	0,00039	kg
Capacitor, for surface-mounting {GLO} market for APOS, U	0,00156	kg
Electronic component, passive, unspecified {GLO} market for APOS, U	0,0000771	kg
Transistor, surface-mounted {GLO} market for APOS, U	0,00129	kg
Electronic component, active, unspecified {GLO} market for APOS, U	0,0000513	kg
Nylon 6-6 {GLO} market for APOS, U	0,579	kg
Steel, chromium steel 18/8 {GLO} market for APOS, U	0,02223	kg
Copper {AU} production, primary APOS, U	0,02115	kg
Tin {GLO} market for APOS, U	0,00078	kg

Copper {GLO} market for APOS, U <i>Processes</i>	0,1275	kg
Injection moulding {GLO} market for APOS, U	0,552	kg
Diode, glass-, for through-hole mounting {GLO} market for APOS,U	0,00165	kg
Diode, glass-, for surface-mounting {GLO} market for APOS, U	0,00051	kg
Diode, auxiliaries and energy use {GLO} market for APOS, U	0,00039	kg
Metal working, average for chromium steel product manufacturing {GLO} market for APOS, U	0,02223	kg
Mounting, surface mount technology, Pb-free solder {GLO} market for APOS, U	0,0387	m2
Mounting, through-hole technology, Pb-free solder {GLO} market for APOS, U	0,0387	m2
Wire drawing, copper {GLO} market for APOS, U	0,1275	kg

Luminaire LED	1	p
<i>Materials/assemblies</i>		
Silicone product {RoW} market for silicone product APOS, U	600	g
Polymethyl methacrylate, sheet {GLO} market for APOS, U	1500	g
Silicone product {RoW} market for silicone product APOS, U	500	g
Steel, low-alloyed {GLO} market for APOS, U	1000	g
Aluminium, cast alloy {GLO} market for APOS, U	3900	g
Aluminium, cast alloy {GLO} market for APOS, U	400	g
<i>Processes</i>		
Metal working, average for steel product manufacturing {GLO} market for APOS, U	1000	g
Metal working, average for aluminium product manufacturing {GLO} market for APOS, U	3900	g
Powder coat, steel {GLO} market for APOS, U	500	cm2
Metal working, average for aluminium product manufacturing {GLO} market for APOS, U	400	g

LED : Utilisation (1000h)	1	p
<i>Processes</i>		
Electricity, low voltage {GB} market for APOS, U	752	MWh

10.4 Halo Lumineux au sol au seuil de 5 lux et 1 lux

	<p>HPS1000</p> <p>AHE longueur h=0 m sur le plan horizontal (Lux) Scénario Base (sans ombre)</p> <p>Eclairage moyen : 3,62 lux (zone 2) Cible @ 5 lux : distance 10 – 20 m</p> <p>Zone 4 : 0,49 lux (moyen) Cible @ 1 lux : distance 30 – 40 m</p> <p>(Côté latéral longueur) Limite de la propriété 300 x 300 m²</p>
	<p>MH1000</p> <p>AHE longueur h=0 m sur le plan horizontal (Lux) Scénario Base (sans ombre)</p> <p>Eclairage moyen : 3,78 lux (zone 2) Cible @ 5 lux : distance 10 – 20 m</p> <p>Zone 4 : 0,51 lux (moyen) Cible @ 1 lux : distance 30 – 40 m</p> <p>(Côté latéral longueur) Limite de la propriété 300 x 300 m²</p>
 	<p>LED285</p> <p>AHE longueur h=0 m sur le plan horizontal (Lux) Scénario Base (sans ombre)</p> <p>Eclairage moyen : 4,98 lux (zone 5) Cible @ 5 lux : distance 40 – 50 m</p> <p>Zone 9 : 0,91 lux (moyen) Cible @ 1 lux : distance 80 – 90 m</p> <p>(Côté latéral longueur) Limite de la propriété 300 x 300 m²</p> <p>Note : Les figures ont une échelle proportionnelle pour comparer leurs halos lumineux.</p>

10.5 Matrice Multicritère

Sur les sous-critères du critère ACV :

Sous-critères	PPFD	UVA	IR	Bleu	Vert	Rouge	PAR
PPFD	1,00	5,00	5,00	3,00	5,00	3,00	4,00
UVA	0,20	1,00	1,00	0,20	1,00	0,20	0,20
IR	0,20	1,00	1,00	0,20	1,00	0,20	0,20
Bleu	0,33	5,00	5,00	1,00	5,00	1,00	3,00
Vert	0,20	1,00	1,00	0,20	1,00	0,20	0,33
Rouge	0,33	5,00	5,00	1,00	5,00	1,00	3,00
PAR	0,25	5,00	5,00	0,33	3,03	0,33	1,00

Sur les sous-critères du critère Pollution lumineuse :

Sous-critères	Glow	Trespass	Vertical	Horizontal 0m	Horizontal 4m	Latéral
Glow	1,00	1,00	0,20	0,20	0,20	0,20
Trespass	1,00	1,00	0,20	0,20	0,20	0,20
Vertical	5,00	5,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Horizontal 0m	5,00	5,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Horizontal 4m	5,00	5,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Latéral	5,00	5,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Sur les sous-critères du critère Retour sur Investissement

Sous-critères	5	10	15	20
5 ans	1,00	2,00	3,00	1,00
10 ans	0,50	1,00	0,50	0,33
15 ans	0,33	2,00	1,00	0,50
20 ans	1,00	3,03	2,00	1,00

Des alternatives sur le sous-critère PPFD :

Alternatives	HPS	MH	LED
HPS	1,00	3,00	0,50
MH	0,33	1,00	0,14
LED	2,00	7,14	1,00

Des alternatives sur le sous-critère UVA :

Alternatives	HPS	MH	LED
HPS	1,00	0,20	5,00
MH	5,00	1,00	9,00
LED	0,20	0,11	1,00

Des alternatives sur le sous-critère IR :

Alternatives	HPS	MH	LED
HPS	1,00	5,00	7,00
MH	0,20	1,00	3,00
LED	0,14	0,33	1,00

Des alternatives sur le sous-critère Bleu :

Alternatives	HPS	MH	LED
HPS	1,00	0,15	0,30
MH	6,67	1,00	5,00
LED	3,33	0,20	1,00

Des alternatives sur le sous-critère Vert :

Alternatives	HPS	MH	LED
HPS	1,00	0,33	1,00
MH	3,03	1,00	0,33
LED	1,00	3,03	1,00

Des alternatives sur le sous-critère Rouge :

Alternatives	HPS	MH	LED
HPS	1,00	5,00	1,00
MH	0,20	1,00	0,20
LED	1,00	5,00	1,00

Des alternatives sur le sous-critère PAR :

Alternatives	HPS	MH	LED
HPS	1,00	1,00	0,50
MH	1,00	1,00	0,50
LED	2,00	2,00	1,00

Des alternatives sur le sous-critère Glow :

Alternatives	HPS	MH	LED
HPS	1,00	1,00	0,50
MH	1,00	1,00	0,50
LED	2,00	2,00	1,00

Des alternatives sur le sous-critère Trespass :

Alternatives	HPS	MH	LED
HPS	1,00	0,50	0,30
MH	2,00	1,00	0,40
LED	3,33	2,50	1,00

Des alternatives sur le sous-critère Vertical :

Alternatives	HPS	MH	LED
HPS	1,00	0,33	5,00
MH	3,03	1,00	7,00
LED	0,20	0,14	1,00

Des alternatives sur le sous-critère Horizontal 0m :

Alternatives	HPS	MH	LED
HPS	1,00	1,00	5,00
MH	1,00	1,00	5,00
LED	0,20	0,20	1,00

Des alternatives sur le sous-critère Horizontal 4m :

Alternatives	HPS	MH	LED
HPS	1,00	1,00	3,00
MH	1,00	1,00	3,00
LED	0,33	0,33	1,00

Des alternatives sur le sous-critère
Latéral :

Alternatives	HPS	MH	LED
HPS	1,00	0,50	7,00
MH	2,00	1,00	8,00
LED	0,14	0,13	1,00

Des alternatives sur le critère
Investissement :

Alternatives	HPS	MH	LED
HPS	1,00	5,00	0,50
MH	0,20	1,00	0,20
LED	2,00	5,00	1,00

Des alternatives sur le sous-critère 5
ans :

Alternatives	HPS	MH	LED
HPS	1,00	8,00	3,00
MH	0,13	1,00	5,00
LED	0,33	0,20	1,00

Des alternatives sur le sous-critère
10ans :

Alternatives	HPS	MH	LED
HPS	1,00	7,00	0,50
MH	0,14	1,00	0,14
LED	2,00	7,14	1,00

Des alternatives sur le sous-critère 15
ans :

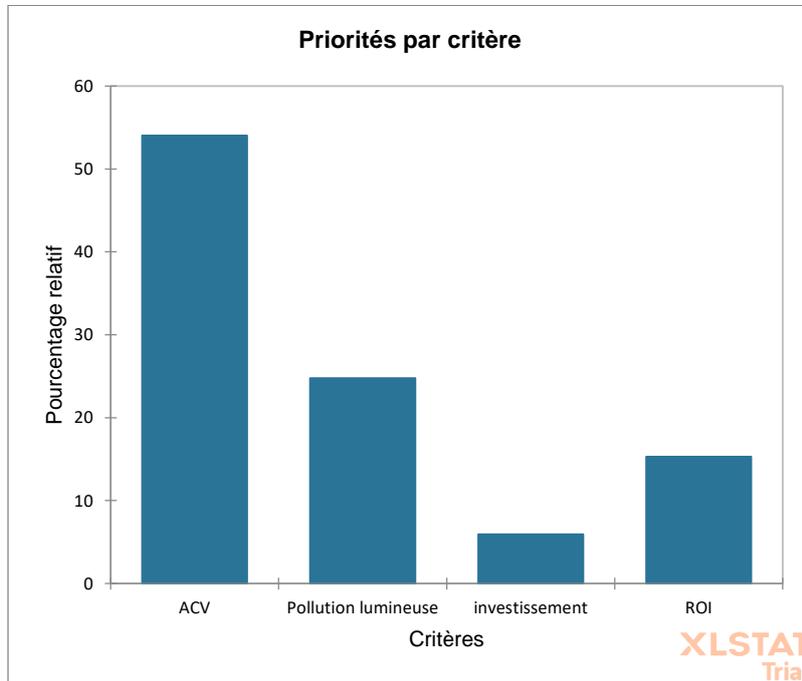
Alternatives	HPS	MH	LED
HPS	1,00	6,00	0,20
MH	0,17	1,00	0,12
LED	5,00	8,33	1,00

Des alternatives sur le sous-critère 20
ans :

Alternatives	HPS	MH	LED
HPS	1,00	6,00	0,50
MH	0,17	1,00	0,13
LED	2,00	7,69	1,00

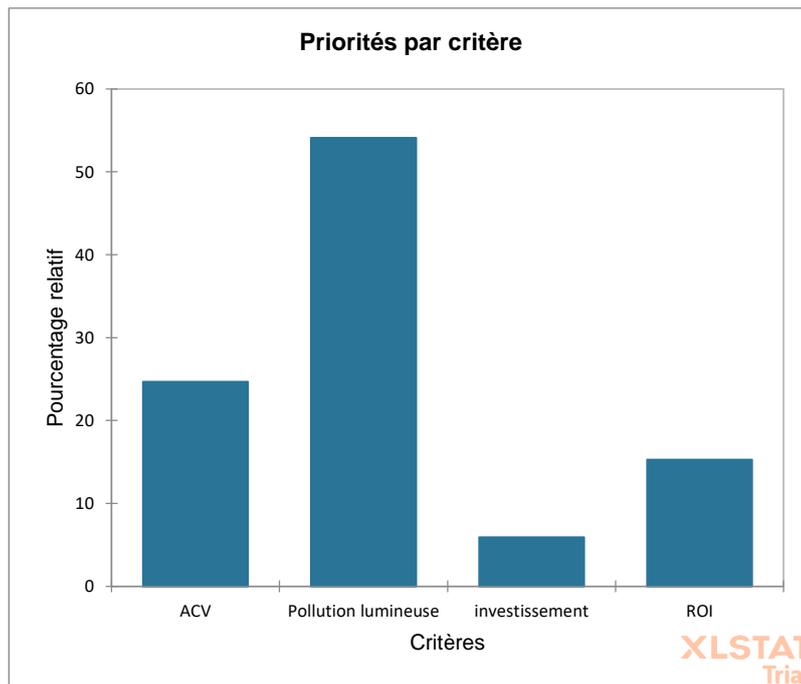
10.6 Analyse Multicritère selon les observateurs

10.6.1 Environnement



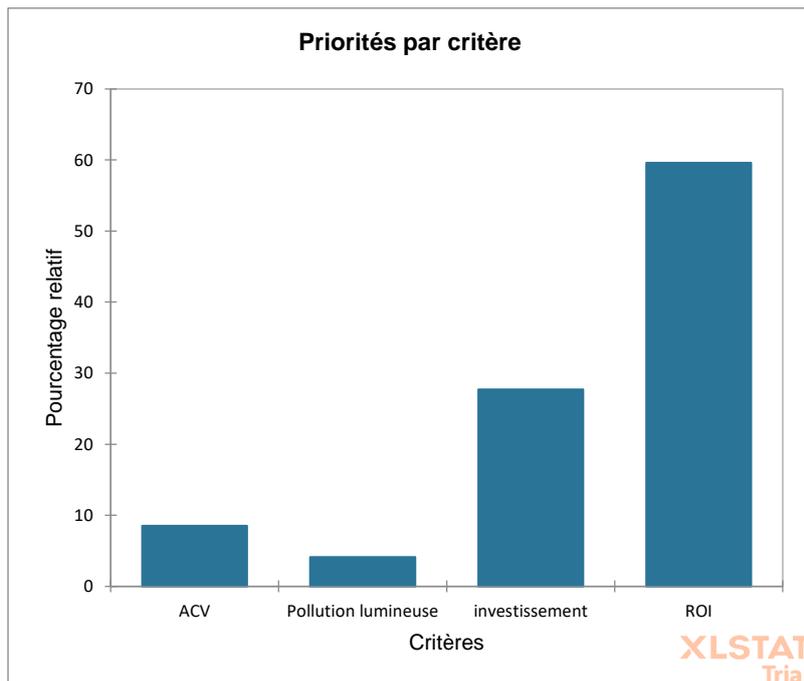
Crit./Alt.	HPS	MH	LED
ACV	15,66	14,97	23,40
PPFD	5,45	1,71	11,53
UVA	0,50	1,67	0,14
IR	1,67	0,45	0,19
Bleu	0,90	7,70	2,19
Vert	0,56	0,78	1,05
Rouge	4,90	0,98	4,90
PAR	1,69	1,69	3,38
Pollution lumineuse	9,00	12,46	3,29
Glow	0,28	0,28	0,56
Trespass	0,17	0,30	0,65
Vertical	1,59	3,63	0,41
Horizontal 0m	2,56	2,56	0,51
Horizontal 4m	2,41	2,41	0,80
Lateral	1,99	3,29	0,35
Investissement	2,09	0,53	3,29
Retour sur Investissement	6,39	1,99	6,91
5 ans	3,41	1,35	0,65
10 ans	0,68	0,12	1,08
15 ans	0,63	0,16	1,88
20 ans	1,67	0,35	3,30
Total	64,21	59,39	70,49

10.6.2 Nuisances Lumineuse



Crit./Alt.	HPS	MH	LED
ACV	7,16	6,84	10,69
PPFD	2,49	0,78	5,27
UVA	0,23	0,76	0,06
IR	0,76	0,20	0,09
Bleu	0,41	3,52	1,00
Vert	0,26	0,35	0,48
Rouge	2,24	0,45	2,24
PAR	0,77	0,77	1,54
Pollution lumineuse	19,51	27,15	7,47
Glow	0,61	0,61	1,23
Trespass	0,38	0,66	1,43
Vertical	3,35	7,88	1,07
Horizontal 0m	5,59	5,59	1,12
Horizontal 4m	5,27	5,27	1,76
Lateral	4,30	7,13	0,87
Investissement	2,09	0,53	3,29
Retour sur Investissement	6,39	1,99	6,90
5 ans	3,41	1,35	0,65
10 ans	0,68	0,12	1,08
15 ans	0,63	0,16	1,88
20 ans	1,67	0,35	3,29
Total	68,19	72,49	53,41

10.6.3 Economie



Crit./Alt.	HPS	MH	LED
ACV	2,48	2,37	3,70
PPFD	0,86	0,27	1,82
UVA	0,08	0,26	0,02
IR	0,26	0,07	0,03
Bleu	0,14	1,22	0,35
Vert	0,09	0,12	0,17
Rouge	0,78	0,16	0,78
PAR	0,27	0,27	0,53
Pollution lumineuse	1,48	2,06	0,59
Glow	0,04	0,04	0,12
Trespas	0,03	0,05	0,11
Vertical	0,26	0,60	0,08
Horizontal 0m	0,43	0,43	0,09
Horizontal 4m	0,40	0,40	0,13
Lateral	0,33	0,54	0,07
Investissement	9,80	2,50	15,41
Retour sur Investissement	24,45	7,76	27,40
5 ans	13,29	5,28	2,54
10 ans	2,20	0,48	4,69
15 ans	2,44	0,63	7,31
20 ans	6,51	1,37	12,85
Total	66,60	26,89	78,80