



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



PROJET INCER-ACV

Incertitudes dans les méthodes
d'évaluation des impacts
environnementaux des filières de
production énergétique par ACV

Rapport final

EXPERTISES

Jan.
2021

En partenariat avec :



REMERCIEMENTS

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par :

Paula Pérez-López (Centre O.I.E. – Observation, Impacts, Energie)
Raphaël Jolivet (Centre O.I.E. – Observation, Impacts, Energie)
Isabelle Blanc (Centre O.I.E. – Observation, Impacts, Energie)
Romain Besseau (Centre O.I.E. – Observation, Impacts, Energie)
Mélanie Douziech (Centre O.I.E. – Observation, Impacts, Energie)
Benoit Gschwind (Centre O.I.E. – Observation, Impacts, Energie)
Scarlett Tannous (Centre O.I.E. – Observation, Impacts, Energie)
Joanna Schlesinger (Centre O.I.E. – Observation, Impacts, Energie/ARMINES)
Raphaël Brière (ENGIE Lab CRIGEN)
Anne Prieur-Vernat (ENGIE Lab CRIGEN)
Julie Clavreul (ENGIE Lab CRIGEN)

CITATION DE CE RAPPORT

Paula Pérez-López, Raphaël Jolivet, Isabelle Blanc, Romain Besseau, Mélanie Douziech, Benoit Gschwind, Scarlett Tannous, Joanna Schlesinger, Raphaël Brière, Anne Prieur-Vernat, Julie Clavreul. 2020. INCER-ACV : Incertitudes dans les méthodes d'évaluation des impacts environnementaux des filières de production énergétique par ACV. 65 pages.

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

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 1705C0045

Étude réalisée par (ARMINES-MINES ParisTech et ENGIE Lab CRIGEN) pour ce projet financé par l'ADEME

Projet de recherche coordonné par : ARMINES
Appel à projet de recherche : ENERGIE DURABLE (APR-ED)

Coordination technique - ADEME : SAUZE Marie
Direction/Service : DPED/SRER

SOMMAIRE

Résumé	5
Abstract.....	6
1. Contexte du projet INCER-ACV (2017-2020)	7
2. Objectifs du projet	8
3. Introduction à la problématique des incertitudes et de la variabilité en ACV	8
3.1. Caractérisation des incertitudes et de la variabilité	9
3.2. Méthodes d'analyse de sensibilité.....	10
4. Outil INCER-ACV : le protocole et la librairie de calcul.....	12
4.1. Protocole	12
4.1.1. Définition du cadre de l'étude.....	13
4.1.2. Construction du modèle paramétré d'ACV de référence	13
4.1.2.1. Identification des paramètres d'entrée.....	14
4.1.2.2. Implémentation du modèle d'ACV de référence	15
4.1.3. Caractérisation des incertitudes et de la variabilité des paramètres d'entrée	15
4.1.4. Analyses de sensibilité.....	17
4.1.4.1. Analyse locale <i>one-at-a-time</i> (OAT)	17
4.1.4.2. Analyse Globale de Sensibilité.....	17
5.1.5. Génération de modèles simplifiés	19
4.2. Librairie de calcul lca_algebraic	19
4.2.1. Description	19
4.2.2. Installation	20
5. Application du protocole INCER-ACV à l'ACV du photovoltaïque.....	21
5.1. Définition du cadre de l'étude pour le cas du PV	21
5.2. Construction du modèle paramétré d'ACV de référence pour le cas du PV.....	23
5.3. Caractérisation des incertitudes et de la variabilité des paramètres clés pour le cas du PV ...	25
5.4. Analyse Globale de Sensibilité pour le cas du PV	27
5.4.1. Distribution des résultats d'impacts	27
5.4.2. Analyse Globale de Sensibilité pour l'identification de paramètres clés à partir des indices de Sobol.....	36
5.5. Génération de modèles simplifiés pour le cas du PV	38
5.6. Outil web d'estimation des impacts environnementaux pour le PV en silicium cristallin	42
6. Application du protocole INCER-ACV à l'ACV de l'éolien flottant	43
6.1. Définition du cadre de l'étude pour l'éolien flottant.....	43
6.2. Construction du modèle paramétré d'ACV de référence pour l'éolien flottant.....	45
6.3. Caractérisation des incertitudes et de la variabilité des paramètres d'entrée pour l'éolien flottant	
46	

6.4.	Analyses de sensibilité pour l'éolien flottant	47
6.4.1.	Analyse locale OAT pour l'éolien flottant.....	47
6.4.2.	Analyse Globale de Sensibilité pour l'éolien flottant.....	49
6.5.	Génération de modèles paramétrés simplifiés pour l'éolien flottant.....	52
6.6.	Conclusion sur ce cas d'étude	54
7.	Conclusion et perspectives.....	54
	Références	56
	Index des tableaux et figures	60
	Sigles et acronymes	61
	ANNEXE 1 : Récapitulatif des livrables du projet INCER-ACV.....	62
	ANNEXE 2 : Liste des contributions à la dissémination du projet. Publications et conférences	63
	ANNEXE 3 : Journée INCER-ACV, un outil pour la prise en compte des incertitudes en ACV : Présentation et atelier - 29/09/2020	64

Résumé

En forte croissance depuis le début des années 2000, les filières d'énergie renouvelable devraient contribuer substantiellement au mix énergétique du futur. Ces filières n'ont généralement pas ou peu d'impacts environnementaux durant leurs phases d'opération, ceux-ci intervenant plus en amont dans la chaîne de production des systèmes notamment durant leur fabrication et installation, ou en aval durant leur fin de vie. L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) s'est répandue au cours des dernières décennies comme l'un des principaux outils de gestion des impacts au niveau des politiques publiques ainsi que des industriels. Les approches du type ACV sont largement acceptées et appliquées pour estimer les impacts environnementaux des filières énergétiques individuellement et du mix énergétique dans son ensemble. Néanmoins, la plupart des études reposent sur des inventaires moyens et sur des estimations avec des degrés de précision divers, donnant lieu à des incertitudes importantes sur les résultats d'ACV. Les nombreuses hypothèses, la grande variabilité et les incertitudes élevées dans les études d'ACV publiées rendent nécessaire d'évaluer cette variabilité et ces incertitudes pour contribuer au bon développement des secteurs énergétiques émergents et soutenir les décisions des parties prenantes. Les outils d'analyse d'incertitude disponibles dans les logiciels d'ACV classiques ne permettent pas de dissocier les effets de différentes sources d'incertitude et de variabilité ou d'appliquer des méthodes avancées telles qu'une analyse globale de sensibilité.

Le projet INCER-ACV (contrat 1705C0045), financé avec le soutien de l'ADEME dans le cadre de l'appel à projets « Energie Durable » (APR-ED 2017), visait à contribuer à la consolidation des méthodes de quantification d'impacts environnementaux de filières énergies tenant compte de la variabilité de scénarios par rapport à des scénarios moyens. Le but du projet a été de développer un protocole standard pour analyser les effets de la variabilité et des incertitudes des données d'entrée pour les paramètres opérationnels des chaînes de production d'énergie, utilisées lors d'une ACV sur les résultats de performance environnementale et de fournir aux acteurs industriels les outils pour une implémentation du protocole. Le protocole développé au cours du projet intègre une caractérisation des incertitudes qui repose sur la définition des fonctions de distribution statistique associées aux paramètres opérationnels (qui permettent de modéliser le comportement du système). Ces paramètres ont été intégrés dans des modèles paramétrés pour le calcul d'inventaires modulaires. De plus, l'application du protocole, défini sur la base de deux cas d'étude de filières énergétiques renouvelables, a permis d'une part d'identifier les paramètres les plus influents sur l'incertitude des résultats d'ACV et d'autre part d'exploiter ces paramètres clés pour générer des modèles mathématiques simplifiés qui donnent des estimations d'impacts environnementaux basées sur un nombre réduit de variables. Cette dernière fonctionnalité fait partie des avancées majeures en termes de développement méthodologique pour l'ACV à l'heure actuelle. Les méthodes et les outils développés au sein du projet peuvent être appliqués aux filières énergétiques renouvelables ainsi qu'à d'autres secteurs d'activité.

Pour aboutir à ces résultats, un premier cas d'étude a été développé par le partenaire scientifique du projet (ARMINES) pour identifier les éléments nécessaires pour la construction d'un modèle paramétré. Le développement de ce modèle a permis d'identifier les besoins pour la mise en œuvre d'une analyse de sensibilité et la prise en compte des incertitudes et de la variabilité dans les données liées aux procédés de premier plan. La généralisation de ce développement sous la forme d'un protocole et d'une librairie de calcul complémentaire (ARMINES) a été validée par le partenaire industriel (ENGIE) pour assurer la correcte prise en compte des besoins des décideurs industriels et le caractère opérationnel du protocole.

Ce document décrit le développement de l'outil INCER-ACV, présenté sous la forme d'une librairie de fonctions de calcul et d'un protocole standard pour guider les utilisateurs pas-à-pas dans l'implémentation des fonctions. Il présente également son application à deux cas d'étude de filières énergétiques : le photovoltaïque à base de silicium cristallin et l'éolien flottant.

Abstract

Renewable energy technologies, which are rapidly evolving since the beginning of 2000s, are expected to contribute significantly to the electricity mix in the future. Although renewable energy technologies have low environmental impacts during the operation phase, they may present non-negligible impacts in upstream and downstream processes related to manufacture and installation, or end-of-life. Life Cycle Assessment (LCA) has emerged in the last decades as one of the main environmental management methods for the support of both public decision makers and industrial stakeholders. LCA-based approaches are widely accepted and applied to estimate the environmental impacts of both individual renewable energy systems and electricity mixes as a whole. However, most of the available studies are based on average inventories and estimations with different levels of accuracy, which leads to significant uncertainties in the LCA results. The numerous assumptions impose high variability and uncertainties in published LCA studies, which makes it necessary to address them in order to ensure a successful development of the emerging energy sectors and support stakeholder decisions. Uncertainty analysis tools available in common LCA software do not allow identifying the individual effects of different uncertainty and variability sources, or applying advanced methods such as Global Sensitivity Analysis.

INCER-ACV project (contract 1705C0045), funded by ADEME in the framework of the call "Sustainable Energy" (APR-ED 2017), aimed to strengthen quantification methods to take into account the effects of possible parameters' variation on the environmental impact of energy production technologies compared to average scenarios. The goal of this project was to develop a standard protocol to analyze the effects of variability and uncertainties of input data, related to operational parameters of energy production pathways, used to conduct an LCA to estimate the environmental performance, and to provide industrial stakeholders with the tools to implement the protocol. The developed project included the characterization of uncertainties based on the definition of statistical distribution functions associated with operational parameters (which allow modeling a system's behavior). These parameters were integrated into parameterized models to obtain modular inventories. The application of the protocol, based on two case studies involving renewable energy production systems, allowed, on the one hand, identifying the most influencing parameters responsible for the uncertainty of the LCA results and, on the other hand, exploiting these parameters to generate simplified mathematical models which can be used to obtain estimations of environmental impacts based on a reduced number of variables. This application is among the main recent advances in terms of methodological developments in LCA. The methods and tools developed within this project can be applied to other renewable energy sectors as well as to other sectors.

In order to achieve these targets, a first case study was developed by the scientific partner of this project (ARMINES) to identify the required elements for the construction of a parameterized model. This model allowed identifying the needs for the practical implementation of a sensitivity analysis, so as to account for the effects of uncertainties and variability of data linked to foreground processes. The generalization of this development in the form of a protocol was validated by the industrial partner (ENGIE) with the use of a second case study to ensure the correct consideration of the needs of industrial decision-makers and the operational nature of the protocol.

This report describes the development of the INCER-ACV tool, presented in the form of a library of functions and a protocol to provide step-by-step guidance to users for their implementation. It also presents the results of application to two energy production case studies: a silicon-based photovoltaic and a floating offshore wind system.

1. Contexte du projet INCER-ACV (2017-2020)

L'utilisation des sources d'énergie fossile pour la production d'énergie électrique et thermique contribue à plus de 40% aux émissions mondiales de gaz à effet de serre dans le monde, ces derniers responsables du réchauffement climatique (IEA, 2019). Ce phénomène constitue l'un des problèmes les plus complexes que la société rencontre actuellement (Constantino et al., 2018). La nécessité d'orienter la transition énergétique vers une stratégie décarbonée est considérée comme un élément clé pour la lutte contre le réchauffement global. Cette transition énergétique, essentielle pour limiter des problèmes environnementaux, sociaux et économiques associés au changement climatique, nécessitera l'intégration et l'expansion de divers systèmes d'énergie renouvelable (SER).

L'évaluation des impacts environnementaux des systèmes énergétiques devient une étape cruciale afin d'orienter les décisions des parties prenantes. À ce niveau, la recherche et développement (R & D) joue un rôle clé dans l'orientation des choix des utilisateurs et des industriels vers la mise en œuvre de systèmes à faibles impacts environnementaux. Pour cela, l'utilisation de la méthodologie d'analyse de cycle de vie (ACV) s'est répandue aussi bien dans la recherche publique que dans l'industrie, en tant qu'outil standardisé pour l'évaluation globale des impacts environnementaux des produits et des procédés. L'ACV prend en compte les impacts environnementaux associés à chaque étape de cycle de vie du système, y compris l'extraction des matières premières, la fabrication du système, sa distribution et son utilisation, jusqu'aux scénarios de fin de vie (ISO 14040, 2006; ISO 14044, 2006). Les résultats d'ACV sont de plus en plus utilisés à des fins d'éco-conception, c'est-à-dire pour concevoir et fabriquer des produits ou services minimisant les impacts environnementaux, et de « reporting » environnemental, c'est-à-dire pour mesurer et connaître les impacts environnementaux d'un système. Depuis les années 1990, la procédure à suivre pour réaliser une ACV a fait l'objet d'une série de normes (ISO 14040, 2006; ISO 14044, 2006) qui fournit une base commune de travail. Des initiatives plus techniques comme le référentiel ILCD (European Commission - Joint Research Centre, 2010) ont été mises en place, notamment au niveau Européen, permettant ainsi de fixer un cadre méthodologique détaillé pour l'application de l'ACV à des systèmes spécifiques.

Cependant, les nombreuses hypothèses, la grande variabilité de certaines caractéristiques du système et les nombreuses incertitudes liées notamment à la modélisation de certains processus relevées dans les études d'ACV publiées rendent leur évaluation systématique essentielle¹ pour contribuer au bon développement des secteurs énergétiques émergents et soutenir les décisions des parties prenantes. Tous ces aspects ont contribué au lancement du projet INCER-ACV, visant à développer des outils pour prendre en compte les incertitudes et la variabilité des paramètres opérationnels des chaînes de production d'énergie lors de l'estimation de leurs impacts environnementaux par ACV.

Pour aboutir à ces résultats, un premier cas d'étude a été développé par le partenaire scientifique du projet (ARMINES). Ce cas d'étude a servi à identifier les éléments nécessaires à la construction d'un modèle paramétré, permettant l'estimation des impacts environnementaux à partir d'un ensemble de paramètres d'entrée propres au système considéré. Le développement de ce modèle a permis d'identifier les besoins pour la mise en œuvre d'une analyse de sensibilité pour la prise en compte des incertitudes et de la variabilité des données liées aux procédés de premier plan. La généralisation de ce développement sous la forme du protocole et de la librairie de calcul complémentaire constituant l'outil INCER-ACV (ARMINES) a été validée par le partenaire industriel (ENGIE) à l'aide d'un second cas d'étude pour assurer la correcte prise en compte des besoins des décideurs industriels et le caractère opérationnel du protocole.

¹ Le terme « incertitude » désigne les variations liées à un manque de connaissance du système ou de représentativité du modèle, alors que le terme variabilité fait référence aux variations inhérentes du système (plutôt que système il faudrait préciser « filière de production énergétique » car la dimension de la filière est plus générale et comporte un ensemble de systèmes au sein duquel on peut constater cette variabilité).

2. Objectifs du projet

Le projet INCER-ACV s'inscrit dans l'ensemble d'approches « éco-systémiques »² de la production, la gestion et l'utilisation de l'énergie et vise à contribuer à la consolidation des méthodes de quantification d'impacts environnementaux, compte-tenu des possibles variations des paramètres par rapport aux scénarios moyens. Les objectifs spécifiques du projet ont été de :

1. Mettre à disposition un protocole standard pour la généralisation de la prise en compte des incertitudes dans l'Analyse de Cycle de Vie (ACV).
2. Fournir aux industriels un manuel détaillé décrivant l'application du protocole d'un point de vue opérationnel.
3. Mettre à disposition des experts en ACV une librairie de fonctions de calcul pour la propagation des incertitudes et l'identification des paramètres les plus influents sur la variabilité des résultats d'ACV : https://github.com/oie-mines-paristech/lca_algebraic/.
4. Fournir une plateforme web ouverte permettant l'application de l'analyse d'incertitude au cas spécifique de la filière photovoltaïque (PV), compte-tenu des fonctions de distribution de paramètres d'entrée définies par l'utilisateur : <http://viewer.webservice-energy.org/incer-acv/app/>.

3. Introduction à la problématique des incertitudes et de la variabilité en ACV

Les études d'ACV ont traditionnellement été basées sur des modèles déterministes qui permettent d'estimer la performance environnementale de procédés complexes à partir d'un ensemble de valeurs des paramètres pour des scénarios spécifiques (Lloyd and Ries, 2008). La plupart de ces études, y compris celles des filières de production d'énergie, reposent sur des inventaires de cycle de vie existants basés sur des processus de production moyenne et sur des estimations issues des experts. Cette approche ne permet pas de tenir compte des incertitudes liées, au manque de connaissance des paramètres d'entrée, à l'incapacité du modèle de représenter correctement le comportement des systèmes réels complexes, et aux choix méthodologiques faits pour appliquer l'approche d'ACV (Huibregts, 1998). De plus, les paramètres d'entrée utilisés lors des ACV sont souvent issus d'estimations faites à partir de données disponibles de processus existants à l'échelle pilote ou à grande échelle, négligeant ainsi les potentielles implications de nouvelles décisions lors de la phase de conception. Cette phase détermine, pourtant, à hauteur de 80% les impacts environnementaux d'un processus (Hetherington et al., 2014).

Les estimations sur lesquelles reposent ces inventaires ayant des degrés de précision divers, et leurs incertitudes peuvent influencer grandement les résultats des études, et les processus de décision qui en découlent. En outre, les approches déterministes négligent les effets de la variabilité, causée, par exemple, par les variations spatiales, temporelles ou technologiques inhérentes aux systèmes (Lloyd and Ries, 2008; Steinmann et al., 2014). Par exemple, si nous prenons en compte les résultats de l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre (GES) par ACV pour des technologies de production d'énergie fournis par l'IPCC (2012), la performance environnementale obtenue varie entre les valeurs indiquées dans le

Tableau 1 en fonction de la source bibliographique.

² En référence aux approches qui tiennent compte de toutes les parties d'un écosystème, y compris les terres, l'eau et les ressources vivantes, ainsi que leurs interactions pour favoriser l'utilisation durable des ressources naturelles.

Tableau 1 : Performance environnementale en termes d'émissions de gaz à effet de serre (GES) estimées par ACV pour les différentes technologies de production d'électricité (IPCC, 2012)

Filière	GES moyen (g CO ₂ eq/kWh)	GES minimal (g CO ₂ eq/kWh)	GES maximal (g CO ₂ eq/kWh)
Photovoltaïque	46	5	217
Solaire thermodynamique à concentration	22	7	89
Géothermie	45	6	79
Éolienne	12	2	81
Nucléaire	16	1	220
Gaz naturel	469	290	930
Pétrole	840	510	1170
Charbon	1001	675	1689

En conséquence, les ACV de technologies émergentes ou de procédés affectés par une large variabilité spatio-temporelle ou technologique sont soumises à un niveau de variation conséquent qui doit être estimé pour contribuer à la fiabilité et à la crédibilité des résultats de l'ACV (Hetherington et al., 2014; Lacirignola et al., 2017). L'analyse de l'incertitude et de la variabilité constitue un élément essentiel pour assurer la robustesse de ces résultats et pour améliorer la compréhension de la structure des modèles, favorisant la contribution de l'ACV à l'aide à la décision par les acteurs publics et privés (Lacirignola et al., 2017).

3.1. Caractérisation des incertitudes et de la variabilité

Au cours des dernières années, différentes approches pour l'analyse d'incertitude et de variabilité ont été proposées dans la littérature. Les travaux de revue de la littérature d'Igos et al. (2019, 2015) dans le cadre de l'étude SCORELCA classent les sources d'incertitude et de variabilité et synthétisent les approches existantes pour adresser leurs effets sur les résultats d'ACV, ainsi que les outils disponibles dans les logiciels d'ACV classiques et leurs limitations.

Suivant le cadre conceptuel proposé par Walker et al. (2003), les travaux d'Igos et al. (2019, 2015) classent les sources de variation³ : la nature, la position dans le modèle et le niveau d'incertitude (i.e. la déviation par rapport à un scénario déterministe).

Pour la nature, nous pouvons distinguer deux groupes :

- Les sources d'**incertitudes épistémiques**, liées à un manque de connaissance du système ou un manque de représentativité dans la modélisation de la réalité. Ces incertitudes peuvent être réduites avec un travail de recherche additionnel, qui peut impliquer une acquisition de données plus exhaustive et/ou une modélisation mathématique plus complexe (Clavreul et al., 2013; Igos et al., 2019; Wei et al., 2015).
- Les sources **aléatoires ou stochastiques**, liées à la **variabilité inhérente** d'une filière ou catégorie de systèmes, qui ne peut pas être réduite à partir d'un modèle d'ACV commun. Ces sources sont désignées par le terme « variabilité » dans le protocole et les documents du projet INCER-ACV suivant la terminologie proposée par (Huijbregts, 1998). La variation liée à ces sources peut être réduite, en revanche, en divisant un seul modèle générique et hétérogène en plusieurs modèles de systèmes plus homogènes et suffisamment caractérisés (Wei et al., 2015).

Pour la position, nous pouvons distinguer :

³ Les travaux de Walker et al. (2003) et d'Igos et al. (2019, 2015) englobent toutes les sources de variation dans le terme « incertitude ». Le projet INCER-ACV utilise une terminologie basée sur (Huijbregts, 1998), qui groupe les sources de variations selon les notions « incertitudes » et « variabilité ».

- Les sources de variation liées aux données quantifiables, au niveau des paramètres d'entrée et de leurs valeurs (dites « incertitudes de quantité », dans les travaux d'Igos et al.(2019)). Ces incertitudes incluent les données d'entrée utilisées tant pour la construction des inventaires (par exemple, un paramètre pour estimer la masse d'un matériel) que pour le calcul des impacts (par exemple, un facteur de caractérisation d'une substance pour une catégorie d'impact spécifique).
- Les sources liées à la structure du modèle, qui correspondent à l'écart entre le phénomène réel et sa formalisation mathématique.
- Les sources liées au contexte, c'est-à-dire, aux choix méthodologiques nécessaires pour l'application de l'ACV. Par exemple: le choix de l'unité fonctionnelle, les règles de cut-off, l'imputation de charges (allocation) ou la pondération, parmi d'autres.

Dans les trois types de localisation, les variations peuvent être épistémiques mais aussi stochastiques (Igos et al., 2019).

Le niveau d'incertitude ou de variabilité dépend de l'information disponible pour valider les paramètres quantifiables, la structure du modèle et les choix méthodologiques. Si le niveau d'incertitude ou variabilité est faible, l'information disponible permet de quantifier les paramètres d'entrée et de valider les modèles avec précision. Dans l'autre extrême, un niveau d'incertitude ou variabilité très élevé implique que le développeur du modèle n'est même pas conscient des aspects ignorés du modèle et des valeurs de ses paramètres (Igos et al., 2019; Walker et al., 2003)

Igos et al. (2019, 2015) identifient ensuite les démarches pour la prise en compte des incertitudes et de la variabilité, incluant diverses approches pour :

- i) l'identification et la caractérisation des sources de variation, épistémiques ou stochastiques, affectant les données quantifiables, le modèle mathématique et le contexte
- ii) la propagation des incertitudes et de la variabilité à partir de méthodes d'échantillonnage basées sur des distributions de probabilité, des méthodes analytiques telles que le développement en séries de Taylor, ou des approches de logique floue
- iii) l'analyse de scénarios, pour les cas d'incertitudes affectant le modèle ou le contexte (i.e. les choix méthodologiques) et
- iv) l'analyse de sensibilité, pour mieux appréhender ces incertitudes et cette variabilité et pour identifier les éléments clés les plus influents au sein de systèmes et/ou de filières.

Dans le projet INCER-ACV, les démarches i), ii) et iv) sont considérées.

3.2. Méthodes d'analyse de sensibilité

Les techniques disponibles pour l'analyse de sensibilité varient en complexité et en champ d'application (Clavreul et al., 2013; Igos et al., 2019; Pianosi et al., 2016). Ainsi, les approches de type local explorent les effets des entrées autour d'une valeur précise, alors que les approches globales considèrent des variations sur tout le domaine de variation (Igos et al., 2019; Pianosi et al., 2016).

Les méthodes locales reposent généralement sur une approche de type « one-at-a-time » (OAT), où l'effet de chaque facteur (ou paramètre d'entrée variable) est évalué individuellement, en gardant tous les autres facteurs fixes avec des valeurs de référence.

Des techniques d'analyse de sensibilité globale (GSA) existent, avec des niveaux de complexité divers. Ces techniques peuvent reposer sur des approches de type OAT, déjà décrites, ou de type « all-at-a-time » (AAT), où l'influence est mesurée en variant tous les facteurs simultanément et, donc, tant l'influence directe de chaque paramètre variable que l'influence conjointe liée aux interactions entre paramètres sont prises en compte (Pianosi et al., 2016).

Les objectifs de l'application de méthodes globales peuvent aussi être divers. Les méthodes dites de « screening », telles que la méthode d'effets élémentaires (EE) proposée par Morris (1991), sont parfois utilisées dans une étape intermédiaire pour préparer l'application d'une méthode globale plus complexe (Igos et al., 2019; Mastrucci et al., 2017; Pannier et al., 2018). La méthode de Morris est une extension de l'approche OAT qui considère plusieurs perturbations à partir de points de départ différents, ce qui permet de couvrir tout le domaine de solutions possibles. A partir de l'écart moyen des réponses du modèle pour une perturbation de chaque paramètre variable individuel et de la déviation typique de ces réponses, nous pouvons identifier un nombre de facteurs ayant une influence faible ou négligeable. Cela permet de réduire le nombre de paramètres variables à évaluer dans un second temps en utilisant d'autres

approches plus coûteuses en nombre d'évaluations de la fonction et, donc, en temps de calcul (Pianosi et al., 2016). Les techniques d'analyse globale plus avancées donnent lieu à une évaluation quantitative basée sur des coefficients ou des indices de sensibilité représentant la contribution de chaque paramètre à la variation totale de la réponse du modèle. Ces méthodes nécessitent la caractérisation des incertitudes et de la variabilité à partir de distributions de probabilité pour les entrées du modèle, et leur propagation grâce à des méthodes d'échantillonnage telles que la méthode de Monte Carlo pour générer un nombre élevé de scénarios et évaluer le modèle dans chacun de ces scénarios (Igos et al., 2019; Pianosi et al., 2016).

Parmi les méthodes globales plus complexes, nous distinguons les méthodes de corrélation qui utilisent des coefficients tels que le coefficient de corrélation de Pearson, adapté aux relations linéaires, ou le coefficient de Spearman, pour des relations non-linéaires mais pouvant être décrites par une fonction monotone (Pianosi et al., 2016). Des méthodes d'analyse de régression sont aussi utilisées, appliquant souvent une régression linéaire multiple pour obtenir simultanément la sensibilité du modèle à chaque paramètre variable.

Un autre groupe de méthodes globales complexes de plus en plus utilisées sont les méthodes basées sur la décomposition de la variance, qui ont déjà été appliquées par plusieurs auteurs pour évaluer les incertitudes et la variabilité en ACV (Cucurachi et al., 2016; Lacirignola et al., 2017, 2014; Padey et al., 2013). Dans ce cas, la variance est considérée comme un indicateur pertinent de la dispersion de la réponse du modèle du système évalué. La sensibilité vis-à-vis de chaque paramètre d'entrée variable et des interactions entre paramètres est mesurée avec des indices qui quantifient leurs contributions à la variance totale. Les travaux de Cucurachi (2016), Lacirignola et al. (2017, 2014) et Padey et al. (2013), appliquent la méthode initialement proposée par Sobol' (1993) aux modèles d'ACV pour estimer les indices de premier ordre, S_i , décrivant la contribution directe et individuelle de chaque paramètre, et les indices totaux, $S_{T,i}$, correspondants à la définition suivante :

$$S_i = \frac{V_i}{V[y]} = \frac{V[E(Y|X_i)]}{V[y]} \quad [1]$$

$$S_{T,i} = \frac{E(V[Y|X_{\sim i}])}{V[y]} = 1 - \frac{V(E[Y|X_{\sim i}])}{V[y]} \quad [2]$$

$E(\cdot)$ étant l'espérance mathématique de la variable aléatoire entre parenthèse ;
 $V(\cdot)$ la variance de la variable aléatoire ;
 $E(Y|X_i)$ l'espérance de Y conditionnée par X_i , c'est-à-dire, l'espérance de la réponse du modèle quand seulement le paramètre i varie et les autres paramètres sont fixes ;
et $V[Y|X_{\sim i}]$, la variance de Y conditionnée par $X_{\sim i}$, c'est-à-dire, la variance quand tous les paramètres varient à l'exception du paramètre i .

Les indices de premier ordre sont souvent utilisés pour classer les paramètres variables par ordre d'importance. Les indices totaux peuvent servir à identifier des paramètres d'entrée avec une influence négligeable, si la valeur de ces indices est zéro (Pianosi et al., 2016). Si les interactions entre paramètres d'entrée sont importantes, il devient nécessaire d'obtenir des indices d'ordre deux, trois, etc. Il faut noter que cette approche n'est valable que pour les modèles où tous les paramètres variables sont indépendants entre eux. En présence de corrélations entre paramètres variables dans le modèle, un ajustement serait nécessaire avant d'appliquer la méthode. Le modèle devrait être reformulé pour exprimer les paramètres dépendants en fonction des paramètres corrélés.

Les travaux de Lacirignola et al. (2014) et Padey et al. (2013) sur les filières énergétiques montrent une application d'intérêt de la GSA basée sur les indices de Sobol' qui permet d'identifier les paramètres influents ou paramètres clés d'un modèle (de système) représentatif d'une filière pour ensuite proposer des équations simplifiées pour une estimation des impacts environnementaux à partir d'un nombre réduit de paramètres d'entrée, sans induire pour autant une perte significative de précision.

Bien que ces approches pour l'analyse des incertitudes et de la variabilité lors des ACV existent et que l'évaluation de leurs effets sur les résultats aide les décideurs à juger la pertinence de leurs ACV, la prise en compte de ces incertitudes et de cette variabilité n'est pas encore une pratique systématique (Igos et al., 2019). Les outils d'analyse de sensibilité disponibles dans les logiciels d'ACV classiques ne permettent pas, à notre connaissance, de dissocier les effets de différentes sources d'incertitude et de variabilité, et notamment de dissocier les variations liées aux procédés dits « background », ou procédés d'arrière-plan, de celles liées aux procédés « foreground », ou de premier plan. Ils ne sont pas non plus structurés pour appliquer des méthodes avancées telles qu'une analyse globale de sensibilité permettant d'identifier les

paramètres variables les plus influents sur les impacts. Ainsi, même si l'analyse d'incertitude issue des outils classiques permet d'appréhender la représentativité d'une ACV, la simulation du système afin d'optimiser ses paramètres en minimisant les impacts environnementaux n'est pas possible. L'absence de l'identification de paramètres clés empêche également des applications plus avancées telles que l'obtention d'équations simplifiées qui peuvent éviter aux industriels de réaliser une analyse de cycle de vie exhaustive spécifique pour chaque cas particulier (Padey et al., 2013). Cette dernière application se focalise sur l'étude des incertitudes et de la variabilité des procédés de premier plan, qui correspondent à l'ensemble des processus sur lesquels l'acteur correspondant dispose de leviers d'actions directs.

L'application de ces approches nécessite la construction de modèles paramétrés, permettant la propagation des incertitudes et de la variabilité. Les modèles sont construits à partir de l'utilisation de logiciels non-ACV, tels que Matlab, R ou Python, qui peuvent être combinés avec d'autres outils spécifiques comme openLCA ou Brightway2 (Igos et al., 2019), et le développement de compétences de programmation par l'utilisateur. Ces compétences ne sont pas généralisées dans la communauté d'ACV et peuvent constituer un frein à leur application systématique. Afin de systématiser et d'harmoniser ces analyses entre les différents acteurs impliqués dans les filières énergétiques, il est nécessaire d'identifier les points de blocage pour l'application des approches et d'établir un protocole méthodologique et des outils opérationnels pour la propagation des incertitudes/variabilité à travers les modèles d'ACV et pour l'analyse de leur influence sur les impacts environnementaux.

4. Outil INCER-ACV : le protocole et la librairie de calcul

Le protocole proposé par le projet INCER-ACV s'articule en 5 étapes illustrées dans la Figure 1, à savoir :

1. La définition du cadre d'étude et de catégories d'impact
2. La construction d'un modèle paramétrique de référence
3. La caractérisation des incertitudes et de la variabilité des paramètres d'entrée, avec la définition de la distribution pour chacun de ces paramètres
4. L'analyse de sensibilité par l'application de méthodes statistiques pour l'évaluation des incertitudes et de la variabilité, y compris l'identification de paramètres clés expliquant une majorité des variations
5. La construction de modèles simplifiés reposant sur les paramètres clés identifiés

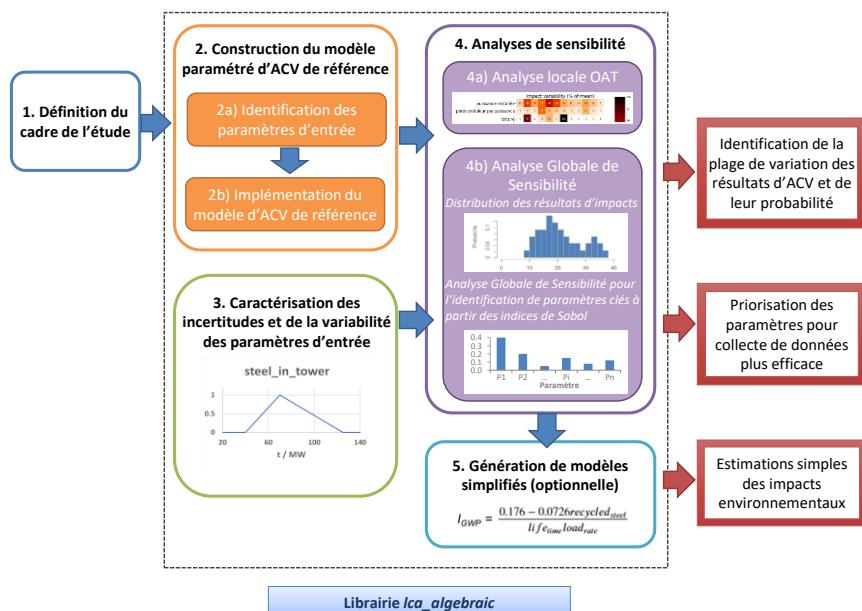


Figure 1 : Schéma de la méthode proposée par le projet INCER-ACV, composée d'un protocole et d'une librairie de calcul

Ce protocole et cette librairie ont été présentés à la journée INCER-ACV (annexe 3) et font l'objet de divers communications et articles scientifiques (annexe 2).

4.1. Protocole

Cette section explique la mise en œuvre des étapes présentées dans la Figure 1.

4.1.1. Définition du cadre de l'étude

Avant toute chose, il est nécessaire d'établir le cadre de l'étude et de définir les limites du modèle qui sera construit.

Unité fonctionnelle considérée

S'agissant de l'étude de systèmes énergétiques, nous recommandons de considérer l'une des deux unités fonctionnelles suivantes et d'exprimer les impacts rapportés à celle-ci :

- Puissance nominale installée, en kW. Cette unité fonctionnelle évalue le dimensionnement du système.
- Energie totale produite pendant la durée de vie du système, en kWh. Cette unité fonctionnelle intègre la durée de vie du système, son facteur de charge attendu, ainsi que les caractéristiques du lieu d'implantation (densité en énergie primaire). Elle permet une comparaison entre systèmes énergétiques de natures différentes.

Base de données des inventaires de cycle de vie

La construction du modèle repose sur un inventaire dépendant d'activités de *background*. Il est donc nécessaire de choisir une bibliothèque d'inventaires de références parmi les options existantes, telles que [ecoinvent](#) (ecoinvent, 2020), [Gabi](#) (GaBi Solutions, 2020), [ELCD](#) (openLCA nexus, 2020) ...

Les outils présentés dans ce document sont basés sur la librairie *Brightway2* qui intègre des routines d'import pour de [nombreux formats](#) (Mutel, 2016). Nous n'avons cependant testé que les imports depuis *ecoinvent* et en recommandons l'usage, avec la version la plus récente disponible.

Catégories d'impact environnemental considérées

Ce choix revient à l'auteur de l'étude. Nous conseillons de se limiter à des catégories d'impact standard, tel que [ILCD 2.0](#), disponibles nativement dans la plupart des bibliothèques d'inventaire.

Domaine d'application

Pour construire le modèle de référence, il faut au préalable avoir déterminé son domaine d'application :

- Les zones géographiques d'exploitation, qui peuvent conditionner le productible disponible
- Les pays de production, qui conditionnent l'impact de la phase de production
- Les technologies considérées, reflétant l'état actuel du marché ou des technologies émergentes prometteuses
- La taille de l'installation (qui peut varier de quelques kW à plusieurs MW)

Nous commençons par définir un modèle paramétrique ACV de référence pour le système énergétique considéré, l'objectif étant de définir un inventaire dépendant de plusieurs paramètres statistiquement indépendants et permettant de refléter au mieux la diversité des systèmes existants, dans le cadre défini plus haut.

Nous désignons par *paramètre*, toute grandeur physique utilisée dans l'inventaire et susceptible de varier afin de décrire l'ensemble des systèmes correspondant au cadre défini précédemment.

4.1.2. Construction du modèle paramétré d'ACV de référence

Le modèle peut être construit de deux manières distinctes :

- En partant d'un modèle ACV statique de référence et en paramétrant les grandeurs physiques variables

- En partant d'une installation spécifique, représentative du cadre choisi et en la modélisant en s'appuyant sur les activités d'arrière-plan (background) existantes.

Dans les deux cas, il est important de procéder par étapes et de considérer :

- Les différentes étapes de cycle de vie :
 - o Fabrication
 - o Transport
 - o Installation
 - o Opération & maintenance
 - o Démantèlement & recyclage
- Les sous-ensembles physiques du système.

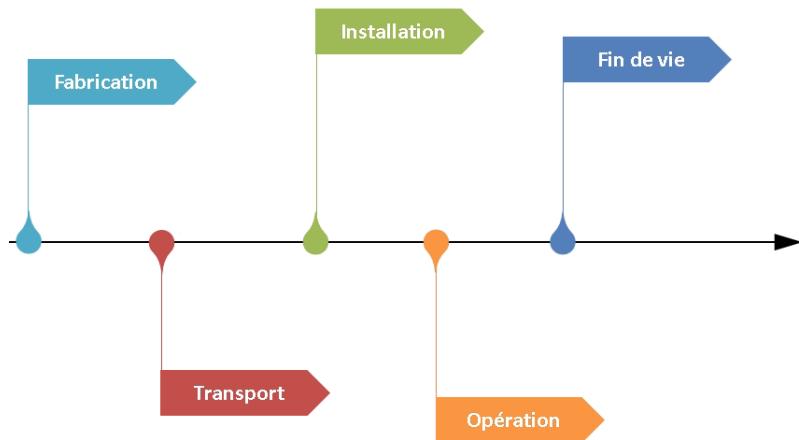


Figure 2 : Etapes du cycle de vie typiques d'un système de production d'énergie

4.1.2.1. Identification des paramètres d'entrée

Il peut être utile de réaliser une étude préliminaire en calculant les impacts considérés pour les différentes sous-parties du système. Dans un premier temps, on se concentrera sur la paramétrisation des sous parties les plus impactantes.

Nous avons identifié plusieurs paramètres récurrents dans l'élaboration des différents cas d'étude. Nous regroupons les plus fréquents par phase de cycle de vie :

Fabrication

- Choix technologiques: des paramètres de type booléens (vrai / faux) permettent de construire des inventaires intégrant plusieurs technologies concurrentes, tant pour le système final que pour les techniques de production de certaines pièces. Ces paramètres peuvent refléter des technologies existantes sur le marché, ou émergentes.
- Utilisation de matériaux recyclés dans la fabrication : L'utilisation de matériaux recyclés peut grandement réduire l'impact environnemental d'un système. Nous proposons d'intégrer, pour les pièces les plus importantes du dispositif, des paramètres quantifiant le taux de matériaux recyclés.
- Mix électrique de production : Le mix électrique utilisé pour la production d'un système ou d'un matériau influe grandement sur l'évaluation des impacts. Il est possible de modéliser ce mix soit par :
 - un choix discret de mix nationaux impliqués dans les étapes de production
 - une modélisation analytique d'un mix générique, par une paramétrisation globale de chaque type d'énergie primaire utilisée dans ce mix

Différentes parties du système peuvent être produites dans différents pays, avec des mix électriques différents. Afin de ne pas trop complexifier le modèle, nous conseillons de n'adapter le mix électrique

que pour les pièces les plus importantes et de choisir les mix des marchés dominants pour les autres pièces.

Transport

Ces paramètres quantifient le transport des différentes pièces du système, entre leur lieu de production et d'installation. Il peut être intéressant de distinguer les différents modes de transport : routier, maritime, ferré.

Installation

- Puissance installée : la taille du système et de ses éléments peut être ramenée à une fonction de la puissance installée. Nous conseillons d'exprimer l'inventaire en fonction de ce paramètre (plutôt que le poids ou la taille).

Opération

- Durée de vie du système complet (et de pièces importantes) : ces paramètres permettent de quantifier les besoins en éléments de recharge. Ils entrent aussi en jeu dans le calcul de l'énergie totale produite (si cette unité fonctionnelle est choisie).
- Productible : Si le productible total est choisi comme unité fonctionnelle, plusieurs facteurs (technologiques, géographiques) interviennent dans son évaluation. Ces paramètres doivent alors être intégrés au modèle (cf la section sur la normalisation).

Fin de vie

- Taux de recyclage, en aval : des paramètres spécifiques peuvent être introduits pour quantifier la quantité de matériaux recyclés, en aval. Ces paramètres diffèrent du taux de matériaux recyclés utilisés dans la fabrication.

4.1.2.2. Implémentation du modèle d'ACV de référence

Le modèle de référence est défini par un inventaire (ou activité) faisant référence :

- À des activités existantes, définies dans la base de données ACV, dites activités de *background* : matériaux ou éléments entiers
- À d'autres activités, définies ou adaptées spécifiquement pour la définition du système énergétique, dites activités de *foreground*

Les quantités associées à ces activités sont exprimées soit par des valeurs **numériques constantes**, soit par des **formules arithmétiques** faisant référence aux **paramètres** définis ci-dessus.

Les impacts doivent être rapportés à l'unité fonctionnelle choisie précédemment. Le modèle doit donc être normalisé (divisé) par :

- Soit l'énergie totale produite sur la durée de vie du système, calculée en fonction de différents paramètres : puissance installée, durée de vie, technologie, rendement, ressource énergétique locale,
- Soit la puissance installée, paramètre unique dont dépendent d'autres parties du modèle (dimensionnement des éléments).

Validation du modèle de référence

Une fois construit, le modèle de référence doit être validé.

La validation consiste à remplacer les paramètres par des valeurs correspondant à un scenario statique, utilisé comme base ou trouvé dans la littérature, puis de calculer et de comparer leurs impacts environnementaux.

En cas de valeurs aberrantes, il peut être nécessaire de calculer et de comparer les impacts environnementaux de sous-parties du système afin de corriger le modèle.

4.1.3. Caractérisation des incertitudes et de la variabilité des paramètres d'entrée

Une fois le modèle de référence construit, nous pouvons appliquer des méthodes statistiques d'analyse de sensibilité afin d'évaluer la variabilité des impacts environnementaux.

Nous distinguons :

- Les analyses de sensibilité locales, comme « one at a time » consistant à faire varier un seul paramètre à la fois. Ce type d'analyse nécessite uniquement la connaissance des bornes de chaque paramètre.
- Les analyses de sensibilité globales, reposant sur des tirages de Monte Carlo : ces analyses nécessitent de connaître et de modéliser la **distribution de probabilité des paramètres d'entrée**.

Pour cette étape, il est donc nécessaire de définir les incertitudes d'entrée et d'attacher une distribution à chaque paramètre, la plus représentative possible de la réalité du terrain.

Plusieurs références peuvent être utiles pour ce travail comme par exemple :

- Analyses de cycle de vie de différents systèmes entrant dans le cadre méthodologique défini
- Catalogue constructeur ou étude de marché, donnant un aperçu de l'importance relative de différentes technologies, sources d'approvisionnement en matériau, etc.
- Atlas de la ressource énergétique (solaire, éolien, etc...), permettant de quantifier la distribution du productible

Pour cette étape il peut être nécessaire d'adapter la définition du modèle :

- Les paramètres d'entrée doivent être statistiquement indépendants. Afin de décorrélérer deux paramètres liés, il peut être utile d'effectuer un changement de base, en exprimant l'un par rapport à l'autre, ou en introduisant un troisième paramètre dont découleront les deux autres.
- Les paramètres définis lors de la construction du modèle, adaptés à la définition d'un système unique, peuvent compliquer la définition de distributions de probabilité. Il peut alors être nécessaire de les substituer à d'autres paramètres

Nous recommandons, selon les informations disponibles, l'utilisation de différents types de distribution.

Pour chaque paramètre de type numérique, la distribution peut être précisée par l'argument *distrib* de type [DistributionType](#) (Jolivet, 2020). Selon le type de distribution choisi, des arguments supplémentaires, précisés par la suite, peuvent être nécessaires.

Paramètre fixe

Certains paramètres, identifiés dans la phase de modélisation, peuvent se révéler peu variables (grandeur uniforme parmi la plupart des systèmes considérés). Il peut être également nécessaire de ne pas faire varier certains paramètres, dans une première approche, afin de simplifier l'analyse.

Il est possible de fixer un paramètre à une valeur donnée, sans pour autant le supprimer du modèle, afin de mettre en exergue la possibilité ultérieure de faire varier ce paramètre.

Distribution uniforme

En l'absence d'information fiable ou de bibliographie, nous recommandons d'appliquer une distribution uniforme entre les bornes estimées du paramètre.

Distribution triangulaire

Pour la plupart des paramètres techniques numériques, la littérature et l'étude de catalogues constructeurs permettent de définir, en plus des bornes théoriques, des valeurs d'usages pratiques. Afin de donner davantage d'importance à ces valeurs usuelles, nous recommandons d'utiliser des distributions triangulaires centrées sur ces valeurs usuelles et bornées par les valeurs minimales et maximales.

Distribution normale / beta

Dans le cas où nous avons accès à une distribution réelle du paramètre d'entrée, celle-ci peut souvent être modélisée par une distribution *normale* ou une distribution *beta*.

Choix discrets

Les choix discrets peuvent être modélisés par l'utilisation de paramètres booléens, valant 0 ou 1. Ces paramètres peuvent ensuite être utilisés comme facteurs multiplicatifs dans les expressions arithmétiques, permettant ainsi d'activer ou de désactiver un choix de manière analytique.

Ce type de paramètre est particulièrement utile pour modéliser des choix technologiques, un choix de mix électrique ou un type d'installation.

4.1.4. Analyses de sensibilité

4.1.4.1. Analyse locale one-at-a-time (OAT)

Une fois le modèle de référence et les distributions des paramètres d'entrée définis, il est possible d'appliquer des méthodes statistiques pour évaluer les impacts environnementaux et leur variabilité.

L'analyse dite « one at a time » (OAT) est une analyse locale de sensibilité, consistant à calculer les impacts environnementaux en faisant varier chaque paramètre au sein de son domaine de validité tout en fixant les autres paramètres à leur valeur par défaut.

Les résultats numériques peuvent être représentés de plusieurs manières :

- Un graphe d'évolution par paramètre et par impact
- Un tableau (heatmap) unique associant, pour chaque couple paramètre-impact, une couleur en fonction du coefficient de variation correspondant ((max - min) / moyenne)

Cette méthode permet d'avoir un premier aperçu de l'étendue des impacts environnementaux (min, max) et de l'importance relative de chaque paramètre.

Cette méthode ne permet cependant pas de quantifier l'écart type réel de chaque impact. Par ailleurs, l'utilisation de valeurs par défaut présente aussi le risque de cacher l'influence croisée de plusieurs paramètres.

Afin de pallier ces limitations, nous recommandons de procéder à une analyse globale de sensibilité, présentée ci-dessous.

4.1.4.2. Analyse Globale de Sensibilité

L'analyse globale de sensibilité repose sur la méthode de Monte Carlo au cours de laquelle un très grand nombre de tirs aléatoires est réalisé. Le choix du nombre de tir est discuté plus bas.

Pour chaque tir :

- Nous produisons une valeur aléatoire pour chaque paramètre d'entrée, de manière indépendante et conformément aux distributions de probabilité assignées précédemment,
- Nous calculons les valeurs des impacts environnementaux de sortie.

L'ensemble des valeurs de sorties peut alors faire l'objet d'une analyse statistique afin de produire :

- Des indicateurs statistiques classiques
- Des indices de Sobol (Sobol', 2001)

a) Distribution des résultats d'impacts : Indicateurs statistiques

Les indicateurs statistiques classiques permettent d'évaluer la valeur et la variabilité de chaque catégorie d'impact. Nous recommandons l'utilisation des indicateurs statistiques suivants : moyenne, médiane, écart type, percentiles (1 et 99), et coefficient de variation : écart type / moyenne.

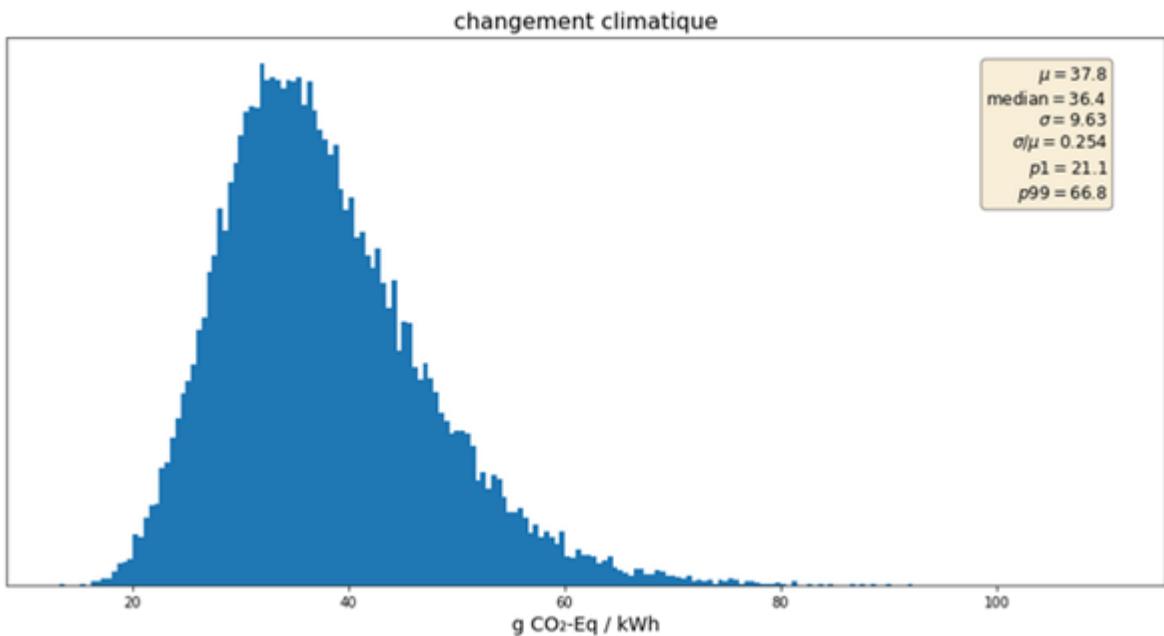


Figure 3 : Exemple de distribution des résultats d'impact et d'indicateurs statistiques fournis par l'outil INCER-ACV

b) Analyse Globale de Sensibilité pour l'identification des paramètres clés à partir des Indices de Sobol

Les indices de Sobol (Sobol', 2001), permettent de quantifier l'importance relative de chaque paramètre dans la variabilité finale observée. Ces indices reposent sur la décomposition de la variance d'une fonction en composantes indépendantes comme définis dans l'équation [3]. Ils quantifient la part de variance attribuable à chaque paramètre.

$$S_i = \frac{\mathbf{Var} [\mathbf{E} [Y|X_i]]}{\mathbf{Var} [Y]} \quad [3]$$

où S_i désigne l'indice de Sobol d'ordre 1 pour le paramètre X_i . Cet indice, entre 0 et 1, est calculé comme le rapport entre la variance de l'espérance de la fonction Y sachant X_i , et la variance totale de la fonction Y .

Ce calcul peut être étendu à des indices d'ordre supérieur, évaluant la contribution croisée de plusieurs paramètres. Les indices d'ordre supérieur ne sont pas considérés ici. Ils convergent en effet difficilement et nécessitent davantage de tirs de Monte Carlo, pour une contribution mineure.

La somme de tous les indices de Sobol tend vers 1, la variance totale étant la somme des variances décomposées.

Contrairement à l'analyse de sensibilité locale présentée dans la section précédente, cette analyse statistique ne fixe pas les autres paramètres à leur valeur par défaut, et permet d'évaluer l'impact d'un paramètre dans une grande variété de configurations.

Le calcul des indices de Sobol permet, pour chaque catégorie d'impact, de sélectionner les paramètres les plus déterminants dans la variance finale, dans le cadre d'étude défini.

Nous commençons par fixer **un seuil de variance finale à expliquer**. Nous proposons d'utiliser un seuil entre 80% et 90% qui permet à la fois de limiter grandement le nombre de paramètres nécessaires, tout en produisant des modèles simplifiés fiables. La sélection du seuil dépendra d'un compromis entre la précision et la simplicité souhaitée pour le modèle simplifié.

Une fois ce seuil fixé, pour chaque catégorie d'impact, nous procédons comme suit :

- Tri des paramètres, suivant leur indice de Sobol S_1 , décroissant

- Sélection des paramètres P jusqu'à ce que la somme des S1 dépasse le seuil défini (par exemple 80%)

A l'issue de cette procédure, nous avons la certitude d'avoir une sélection de paramètres expliquant au minimum 80% de la variance de l'impact considéré. La liste de ces paramètres peut différer d'une catégorie d'impact à l'autre.

La liste de ces paramètres clés est utile de deux manières :

- Afin de réduire l'incertitude de l'impact d'un système en particulier, il est suffisant de connaître et de fixer les valeurs d'un ensemble limité de paramètres.
- Cette liste de paramètres permet de produire des modèles analytiques simplifiés de calcul d'impact, utilisables par des acteurs non spécialistes de l'ACV.

4.1.4.3. Génération de modèles simplifiés

Une fois les paramètres clés déterminés pour chaque catégorie d'impact, il est possible de produire des modèles analytiques simplifiés :

- En remplaçant, dans le modèle de référence, chaque activité de background par la valeur numérique de son impact pour cette catégorie
- En remplaçant chaque paramètre mineur (non prépondérant) par sa valeur moyenne (la valeur moyenne de sa distribution de probabilité peut différer de la valeur par défaut). Alternativement, la valeur médiane peut être utilisée comme valeur de remplacement. Il peut être utile d'essayer ces deux approches et de comparer la fiabilité des modèles simplifiés en résultant.
- En arrondissant les valeurs numériques à quelques chiffres significatifs (3 chiffres recommandés)
- En supprimant les termes statistiquement mineurs dans les sommes (< 1% de la somme totale)

Ces modèles simplifiés ne sont valides que:

- dans le cadre méthodologique pré défini et
- pour des valeurs de paramètres incluses dans les bornes définies en section 4.1.3.

Validation de modèles simplifiés

Les modèles simplifiés ainsi générés peuvent être comparés au modèle de référence, afin d'évaluer leur fidélité. Pour ceci, il convient d'utiliser les tirs de Monte Carlo générés pour l'analyse statistique précédente et de fournir les mêmes paramètres d'entrée au modèle de référence et aux modèles simplifiés.

Pour chaque catégorie d'impact, nous proposons de représenter sur un même graphe la distribution de probabilité et de calculer les indicateurs statistiques classiques : moyenne (μ), médiane, écart type (σ), coefficient de variation : σ / μ , percentiles 10 et 90.

Le calcul du coefficient R^2 (équation [4]) permet aussi de quantifier la fidélité du modèle simplifié par rapport au modèle complet :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad [4]$$

4.2. Librairie de calcul Ica_algebraic

4.2.1. Description

L'implémentation de ce protocole repose sur l'utilisation de librairies open source écrites en langage Python.

Brightway2 (Mutel, 2016) est une librairie de référence dans l'analyse de cycle de vie, pour la construction d'inventaires et le calcul d'impacts environnementaux. Elle a été développée principalement par Chris Mutel au sein [de l'ETH de Zurich](#)⁴.

[Ica_algebraic](#) (Jolivet, 2020) est une librairie développée spécifiquement dans le cadre du projet INCER-ACV. Elle constitue une surcouche à Brightway2 et fournit :

⁴ <https://ethz.ch/en.html>

- Des fonctions utilitaires permettant une définition compacte et lisible des inventaires
- Une abstraction permettant la paramétrisation des inventaires par l'utilisation de la librairie algébrique [Sympy](#)⁵
- Une implémentation optimisée permettant l'évaluation rapide des impacts, adaptée à l'application de la méthode de Monte Carlo (plusieurs centaines de milliers de calculs par seconde)
- Un ensemble de fonctions statistiques permettant l'évaluation et l'analyse des incertitudes de chaque impact
- Un algorithme de sélection des paramètres clés, permettant de produire des modèles simplifiés analytiques

Bien que *Brightway2* et donc *lca_algebraic* soient compatibles avec de nombreux formats d'inventaires, nous recommandons l'utilisation de la base de données d'inventaire ACV *ecoinvent*, que nous avons testée avec succès. Nous recommandons d'utiliser la dernière version disponible.

Nous recommandons l'utilisation de l'interface web [Jupyter](#),⁶ offrant un environnement de développement Python complet et interactif, intégré au navigateur. Cet environnement peut être installé aisément via la distribution [Anaconda](#)⁷.

4.2.2. Installation

Pour l'utilisation de la librairie *lca_algebraic* il est nécessaire d'installer un certain nombre de composants.

Librairies Brightway2 et lca_algebraic

Deux méthodes distinctes permettent d'installer ces librairies :

1. **Via conda**

Si vous disposez déjà d'un environnement **conda / anaconda** (avec Jupyter préinstallé) *lca_algebraic* et toutes ses dépendances (*Brightway2*, *Pandas*, *Sympy*, etc, ...) peuvent être installées via la commande suivante :

```
conda install -c oie-minesparistech lca_algebraic
```

2. **Installateur**

Alternativement, vous pouvez utiliser [cet installateur dédié](#) (Jolivet, 2020) qui installera sur votre machine un environnement *Python* complet, avec le logiciel *Jupyter* et les librairies *Brightway2* et *lca_algebraic*.

Base de données ecoinvent

Une fois les librairies *Brightway2* et *lca_algebraic* installées, vous devez importer la base de données *ecoinvent* dans votre environnement :

1. Téléchargez [le notebook d'exemple](#) de *lca_algebraic*
2. Ouvrez le dans *Jupyter*
3. Obtenez la [dernière version \(3.X\) de la base de donnée ecoinvent](#): téléchargez le fichier *ecoinvent 3.X_cutoff_ecoSpold02.7z* à partir du site *ecoinvent.org* (un compte est nécessaire) et décompressez ce fichier à côté du Notebook d'exemple, dans un répertoire nommé « *ecoinvent 3.X_cutoff_ecoSpold02* »
4. Exécutez les deux premières cellules du Notebook. La commande suivante importe l'ensemble des activités *ecoinvent* dans votre environnement personnel :
`importDb("ecoinvent 3.4", './ecoinvent3.4_cutoff_ecoSpold02/datasets')`

⁵ <https://www.sympy.org/en/index.html>

⁶ <https://jupyter.org/>

⁷ <https://www.anaconda.com/products/individual>

5. Application du protocole INCER-ACV à l'ACV du photovoltaïque

Cette section regroupe les résultats de la première application du protocole présenté dans la Figure 1 à un cas d'étude menée par O.I.E./ARMINES. Le cas d'étude se focalise sur la filière photovoltaïque (PV), et en particulier, sur les technologies du silicium mono-cristallin et multi-cristallin dans un contexte Européen. Le développement de ce cas d'étude fait l'objet des livrables du WP2.

5.1. Définition du cadre de l'étude pour le cas du PV

Le modèle PV INCER ACV de la filière PV a été développé selon les normes ISO 14040 (2006) et ISO 14044 (2006).

Unité fonctionnelle

Conformément aux règles 'Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCR)' (European Commission - Joint Research Centre, 2017), ainsi qu'à la plupart des études d'ACV disponibles (Bracquene et al., 2018; Gazbour et al., 2018; Gerbinet et al., 2014), l'unité fonctionnelle (UF) est le kilowattheure (kWh) d'électricité produit (en courant alternatif-AC-) par les modules PV. Toutefois, le modèle proposé fournit, dans un premier temps, les résultats par unité de puissance installée (exprimée en kWc) avant de les rapporter au kWh. Exprimer les impacts par unité de puissance installée permet d'éviter la variabilité géographique de la performance environnementale induite par les paramètres de production qui dépendent grandement de la localisation d'installation du système. Cette unité fonctionnelle peut faciliter, par exemple, la comparaison de deux panneaux de la même technologie produits par deux fournisseurs différents. Pour effectuer cette transition, les paramètres géographiques/de production sont donc utilisés pour calculer la production électrique en kWh (e.g. irradiation, orientation, taux de dégradation et ratio de performance) (Bracquene et al., 2018).

Catégories d'impact considérées

Le Tableau 2 résume les catégories d'impact choisies pour cette analyse ainsi que les méthodes de caractérisation associées. Le tout est détaillé dans le livrable 2.3.

En complément des catégories d'impacts, un indicateur additionnel est présenté : le taux de retour énergétique, calculé comme le rapport entre l'énergie nette produite par le système PV au cours de sa durée de vie, et l'énergie totale dépensée pour sa production et sa maintenance.

Tableau 2 : Sélection d'indicateurs d'impact environnemental pour l'ACV dans le cadre du projet INCER-ACV

Catégorie d'impact	Unité	Méthode	Version	Source
Changement climatique	kg CO ₂ eq	ILCD 2011 MidPoint +	V1.10	IPCC (2013)
Demande énergétique cumulée non-renouvelable (fossile, nucléaire, biomasse)	MJ eq	Cumulative Energy Demand	V2.2	Frischknecht et al. (2007) ; Hischier et al. (2010)
Epuisement de ressources minérales, fossiles et renouvelables (relatif aux activités minières)	kg Sb eq	ILCD 2011 MidPoint +	V1.10	Van Oers et al. (2002)
Qualité de l'air (particules)	kg PM2.5	ILCD 2011 MidPoint +	V1.10	Spadaro et Rabl (2004)
Utilisation d'eau	m ³	AWARE	V1.01	Boulay et al. (2018)
Demande énergétique cumulée renouvelable (biomasse, éolienne, solaire, géothermie, hydro)	MJ eq	Cumulative renewable Energy Demand	V2.2	Frischknecht et al. (2007) ; Hischier et al. (2010)
Écotoxicité aquatique (eau douce)	PAF m ³ .day.kg ⁻¹ (CTUe)	USEtox	V1.01	Rosenbaum et al. (2008)
Toxicité Humaine (effets non-cancérogènes)	PAF m ³ .day.kg ⁻¹ (CTUh)	USEtox	V1.01	Rosenbaum et al. (2008)
Toxicité Humaine (effets cancérogènes)	PAF m ³ .day.kg ⁻¹	USEtox	V1.01	Rosenbaum et al. (2008)
Acidification	mole H+ eq	Accumulated Exceedance (AE)	V1.09	Seppälä et al. (2006); Posch et al. (2008)
Land use	kg C déficit	Soil Organic Matter (SOM)	V1.2	Milà i Canals et al. (2007)
Déchets nucléaires	m ³ HAA eq	Indice de Radiotoxicité	V1.7	Frischknecht and Büscher Knöpfel (2014)

5.2. Construction du modèle paramétré d'ACV de référence pour le cas du PV

Identification des paramètres d'entrée

Le modèle paramétrique complet est détaillé dans le livrable 2.2. Ce modèle repose sur 30 paramètres décrivant les différentes phases du cycle de vie. Comme indiqué dans la Figure 4, les étapes incluses dans les limites du système comprennent : l'extraction des matières premières et la fabrication des composants, le transport, l'installation du système PV, l'opération et la fin de vie. Les 30 paramètres d'entrée (26 paramètres technologiques et 4 paramètres géographiques) sont classifiés selon les étapes du cycle de vie correspondantes. Cette approche, ici appliquée à la technologie silicium, pourrait être adaptée et appliquée à d'autres technologies en modifiant le modèle (et les inventaires correspondants) et en ajoutant des paramètres supplémentaires.

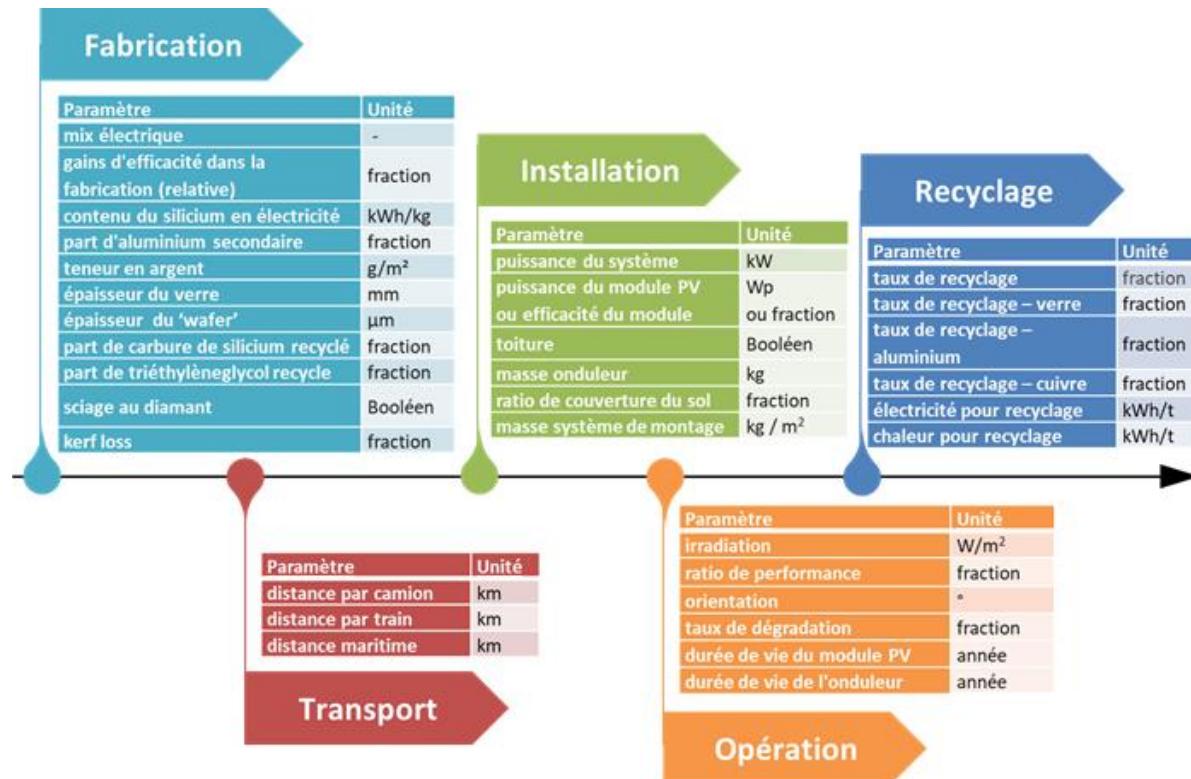


Figure 4 : Etapes du cycle de vie du système PV et paramètres d'entrée caractéristiques de chaque étape

Implémentation du modèle d'ACV de référence

Le modèle paramétré pour les systèmes PV en silicium cristallin a été construit à partir des jeux de données fournis par ecoinvent v3.6 (Wernet et al., 2016) et inclut les paramètres et les étapes présentés dans la section précédente. Des modifications et des ajustements importants ont été intégrés pour adapter les inventaires d'ecoinvent aux technologies et aux pratiques actuelles. Cela a été accompli en utilisant la librairie de fonctions *Brightway2* (Mutel, 2016), reposant sur le langage *Python*, et la librairie complémentaire *lca_algebraic*, développée dans le projet INCER-ACV, pour calculer les empreintes environnementales d'un grand nombre de systèmes PV et de scénarios variés.

jupyter algebraic-pv-model (modifié)

File Edit View Insert Cell Kernel Widgets Help

Non fiable Python 3

Logout

Aluminium

```

Entrée [71]: M alu=findTechAct('aluminium alloy production, AIMg3', 'RER')
alu_scrap=findTechAct('aluminium scrap, new, Recycled Content cut-off')
alu_cast_amount = alu.getAmount('aluminium, cast alloy')

Entrée [72]: M share_recycled_aluminium = newFloatParam(
    'share_recycled_aluminium',
    default=0.27, min=0, max=1,
    distrib=DistributionType.TRIANGLE,
    group='manufacturing',
    label='share of recycled aluminium',
    label_fr="part d'aluminium recyclé",
    unit="fraction")

Entrée [73]: M alu_adjusted = copyActivity(USER_DB, alu, "Alu adjusted")

alu_adjusted.updateExchanges(
    {'aluminium, cast alloy': alu_cast_amount * (1 - share_recycled_aluminium)})
alu_adjusted.addExchanges(
    {alu_scrap : alu_cast_amount * share_recycled_aluminium})

alu_adjusted.substituteWithDefault(
    'electricity, high voltage, aluminium industry',
    elec, elec_switch)

Entrée [74]: M printAct(alu, alu_adjusted, share_recycled_aluminium=0.3, elec_switch=None)
multilCA([alu, alu_adjusted], impacts, share_recycled_aluminium=0.3, elec_switch=None)

```

aluminium alloy production, AIMg3[RER] (1.000000 kilogram)				Alu adjusted[RER] (1.000000 kilogram)			
input	amount	unit	type	input	amount	unit	type
aluminium alloy, AIMg3[RER]	'aluminium alloy production, AIMg3' (kilogram, RER, None)	1.000000	kilogram	production	nan	nan	nan
aluminum alloy, AIMg3[RER] (user-db)	nan	nan	nan	nan	'Alu adjusted' (kilogram, RER, None)	1.000000	kilogram
aluminium scrap, new, Recycled Content cut-off	nan	nan	nan	nan	'aluminium scrap, new, Recycled Content cut-off' (kilogram, GLO, None)	0.2895000000000000	kilogram
aluminium, cast alloy	'market for aluminium, cast alloy' (kilogram, GLO, None)	0.965000	kilogram	technosphere	'market for aluminium, cast alloy' (kilogram, GLO, None)	0.6755000000000000	kilogram
cast iron	'market for cast iron' (kilogram, GLO, None)	0.004060	kilogram	technosphere	'market for cast iron' (kilogram, GLO, None)	0.004060	kilogram
chromium	'market for chromium' (kilogram, GLO, None)	0.003050	kilogram	technosphere	'market for chromium' (kilogram, GLO, None)	0.003050	kilogram
copper	'market for copper' (kilogram, GLO, None)	0.001020	kilogram	technosphere	'market for copper' (kilogram, GLO, None)	0.001020	kilogram
elec (user-db)	nan	nan	nan	nan	'elec' (kilowatt hour, GLO, None)	1.590000	kilowatt hour

Figure 5 : Extrait de code du modèle paramétré de référence pour l'ACV du PV – exemple de modélisation de l'aluminium utilisé dans le modèle

5.3. Caractérisation des incertitudes et de la variabilité des paramètres clés pour le cas du PV

Les distributions des paramètres d'entrée sont évaluées dans le livrable 2.4. Voici la liste exhaustive de ces distributions :

Tableau 3 : Paramètres de fabrication

nom	unité	distribution	valeur usuelle	min	Max	références
mix électrique¹	choix	marché	cn	-	-	(Frischknecht et al., 2015)
part alu recyclé	fraction	triangulaire	0.27	0	1	(Jensen, 2019; van Schaik and Reuter, 2014)
intensité élec silicium	kWh/kg	triangulaire	30	11	110	(Aselma and de Wild-Schloten, 2007; Bracquene et al., 2018; Frischknecht et al., 2015)
sciage diamant	booléen	équiprobable	faux	-	-	(ITRPV, 2018)
épaisseur wafer	µm	triangulaire	190	128	190	(Bredemeier et al., 2018; Frischknecht et al., 2015; ITRPV, 2018)
perte de découpe	fraction	triangulaire	0.44	0.4	0.5	(Tsai, 2009; Yang et al., 2019)
part de SiC recyclé	fraction	triangulaire	0.694	0.528	0.9	(ITRPV, 2018; Li and Chen, 2017)
part de TEG recyclé	fraction	triangulaire	0.899	0.6	0.9	(Biancari et al., 2003; Stolz et al., 2017)
gain d'efficacité wafer	fraction	triangulaire	0	0	1	(Frischknecht et al., 2015; Stolz et al., 2017)
teneur en argent	g/m ²	triangulaire	9.6	2	9.6	(Bracquene et al., 2018; Frischknecht et al., 2015)
épaisseur de verre	mm	triangulaire	4	2	4	(ITRPV, 2018)

¹ le mix électrique est modélisé comme un choix discret entre les principaux producteurs de panneaux pondérés par leur importance relative : Japon, 2.4% ; Corée, 7.4% ; Chine, 71.4% (valeur par défaut) ; Malaisie, 5.7% ; Inde, 2.1%.

Tableau 4 : Paramètres de transport

nom	unité	Distribution	moyenne	min	max
distance en camion	km	Uniforme	1020	40	2000
distance en train	km	Uniforme	350	100	600
distance en bateau	km	Uniforme	4000	2000	6000

Tableau 5 : Paramètres d'installation

nom	unité	distribution	valeur usuelle	min	max	références
toiture	booléen	équiprobable	1 (vrai)	0	1	
masse du système de montage	kg/m ²	triangulaire	3	3	11.5	(Centroplan, 2018; Mecosun, 2020; Yandalux, 2011)
puissance installée	kWc	uniforme	1500	3	3000	
efficacité module	kWc/m ²	triangulaire	0.175	0.15	0.22	(Fraunhofer ISE, 2020; Frischknecht et al., 2015)
poids onduleur par puissance	kg/kWc	triangulaire	2	1	6	(Cristóbal-Monreal and Dufo-López, 2016)
ratio de couverture au sol	Fraction	triangulaire	0.45	0.1	0.45	(Śliż-Szkliniarz, 2013)

Tableau 6 : Paramètres de production

nom	unité	distribution	valeur usuelle	écart type	min	max	références
durée de vie module	année	triangulaire	30		20	40	(Frischknecht et al., 2015)
durée de vie onduleur	année	triangulaire	15		10	30	(Frischknecht et al., 2016)
irradiation annuelle	kWh/kWc/an	normale	1050	150	500	1500	(Padey et al., 2013)
taux de dégradation	fraction/an	triangulaire	0.005		0.005	0.008	(Frischknecht et al., 2016; Jordan and Kurtz, 2013)

Tableau 7 : Paramètres de recyclage

nom	distribution	unité	valeur usuelle	min	max	références
taux de recyclage onduleur	uniforme	fraction	0.9	0.75	1	(Libby et al., 2018; Stolz et al., 2017)
taux de recyclage aluminium	triangulaire	fraction	0.96	0.56	1	(Chancerel and Marwede, 2016; Stolz et al., 2017)
taux de recyclage cuivre	triangulaire	fraction	0.75	0.44	0.96	(Horta Arduin et al., 2019; Latunussa et al., 2016b)
taux de recyclage verre	triangulaire	fraction	0.9	0.6	1	(Stolz et al., 2017)
électricité recyclage	uniforme	kWh/t	-	50	100	(Latunussa et al., 2016a; Libby et al., 2018)
chaleur recyclage	uniforme	MJ/t	-	75	250	(Latunussa et al., 2016a; Libby et al., 2018)

5.4. Analyse Globale de Sensibilité pour le cas du PV

Parmi les deux approches d'analyse de sensibilité disponibles dans le protocole et la librairie *lca_algebraic*, nous avons choisi de présenter ici l'analyse globale de sensibilité, s'agissant d'une méthode plus complète qui permet de surmonter les limitations de l'approche locale OAT.

5.4.1. Distribution des résultats d'impacts

La propagation des incertitudes d'entrée aux impacts est détaillée dans le livrable 2.5. Nous présentons ici les résultats essentiels : distribution des impacts et indicateurs statistiques.

Changement climatique

L'impact sur le changement climatique est évalué en grammes d'émission équivalent CO₂ par kilowattheure produit (kg CO₂ eq / kWh).

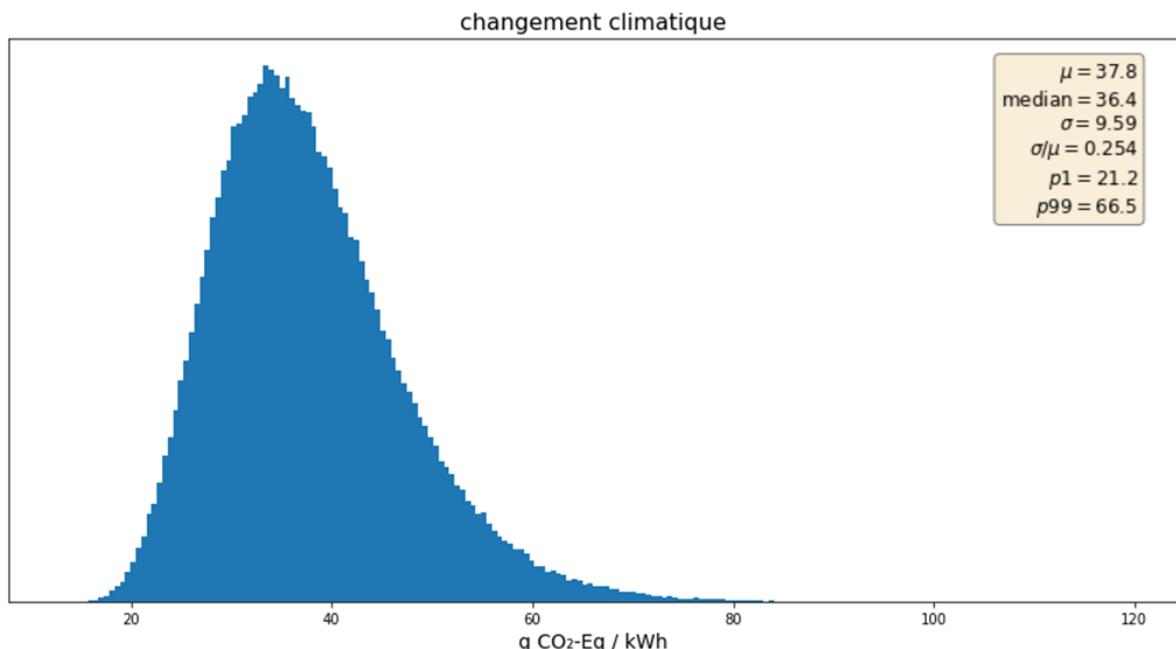


Figure 6 : Distribution de résultats d'ACV pour la catégorie de changement climatique

Nous obtenons une distribution proche d'une gaussienne, avec un impact moyen de 37.8 g CO₂ eq/ kWh pour un écart type de 9.6 g CO₂ eq / kWh soit 25% de coefficient de variation.

Epuisement des ressources

Cet indicateur mesure la consommation de ressources épuisables. Il est exprimé en grammes d'antimoine équivalent par kilowattheure produit (g Sb eq).

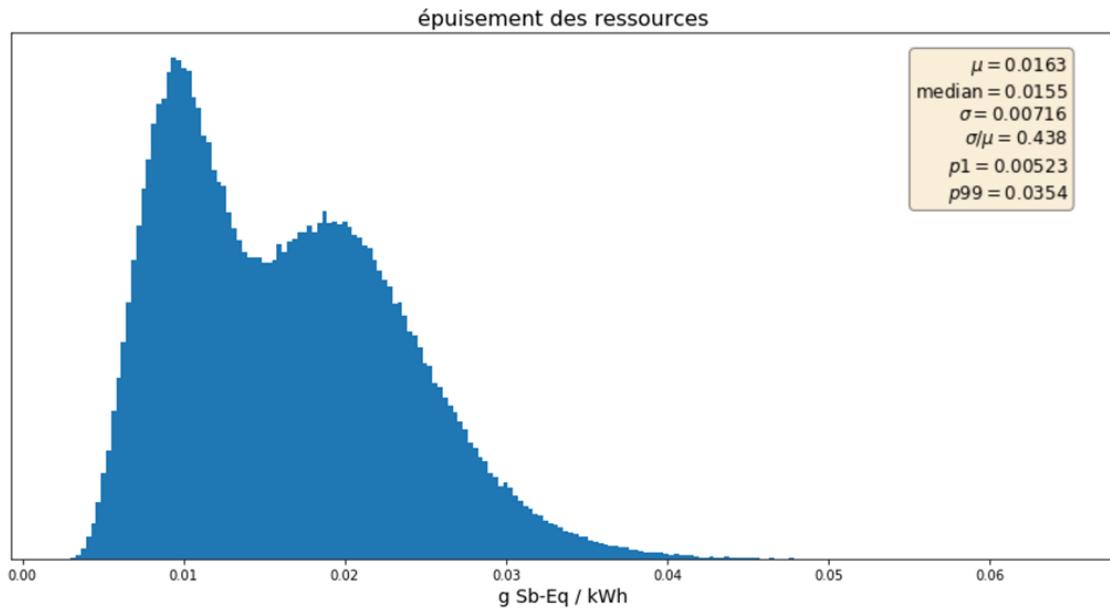


Figure 7 : Distribution de résultats d'ACV pour la catégorie d'épuisement des ressources

Cet indicateur présente une valeur moyenne de 0.016 g Sb-eq/kWh et une large variation (44%) et prend la forme de la somme de deux lois normales.

Ce profil particulier résulte de la prépondérance d'un paramètre booléen discret dans le calcul de cet impact : La consommation de matières premières est en effet bien supérieure dans le cas d'une installation au sol du fait des structures de soutien métalliques. Ces installations représentent 50% des cas dans notre étude (cf Livrable 2.4 – choix de distribution des paramètres d'entrée).

Qualité de l'air

Cet indicateur mesure la quantité de particules fines (< 2.5 μm) dégagées dans l'air, en milligrammes de PM2.5 par kilowattheure produit (mg PM2.5 / kWh)

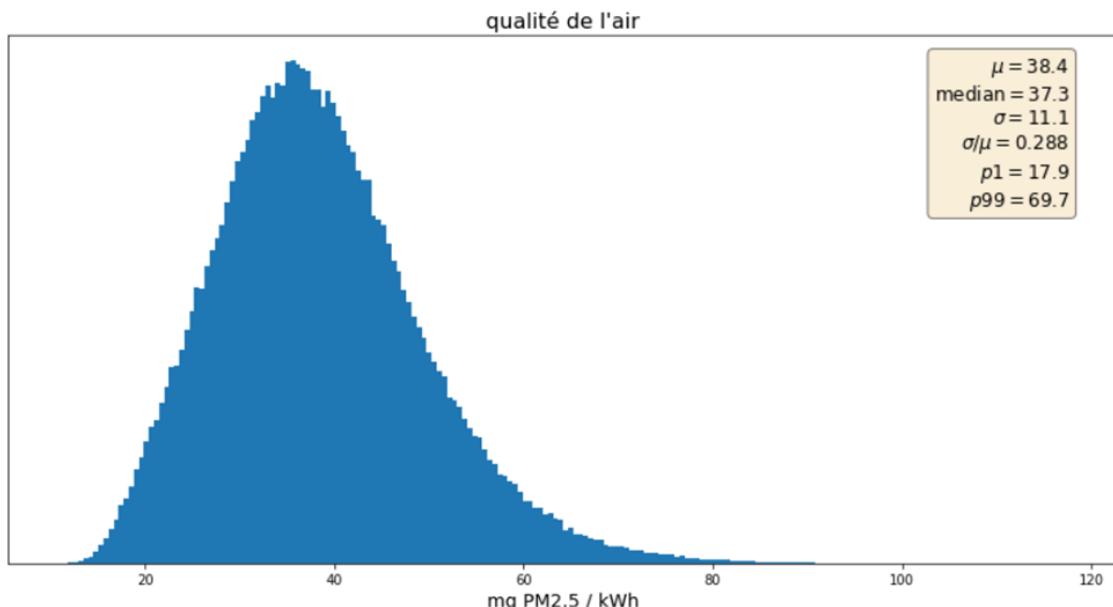


Figure 8 : Distribution de résultats d'ACV pour la catégorie de qualité de l'air

Nous obtenons une distribution proche d'une gaussienne, avec une moyenne de 38.4 mg de particules fines par kWh produit, avec un écart type de 11 mg, soit 29% de variation.

Ecotoxicité aquatique

Cet indicateur estime la fraction d'espèces potentiellement impactées pour un mètre cube pour une année. Il est exprimé en unité de toxicité comparative par kilowattheure produit (CTUe / kWh)

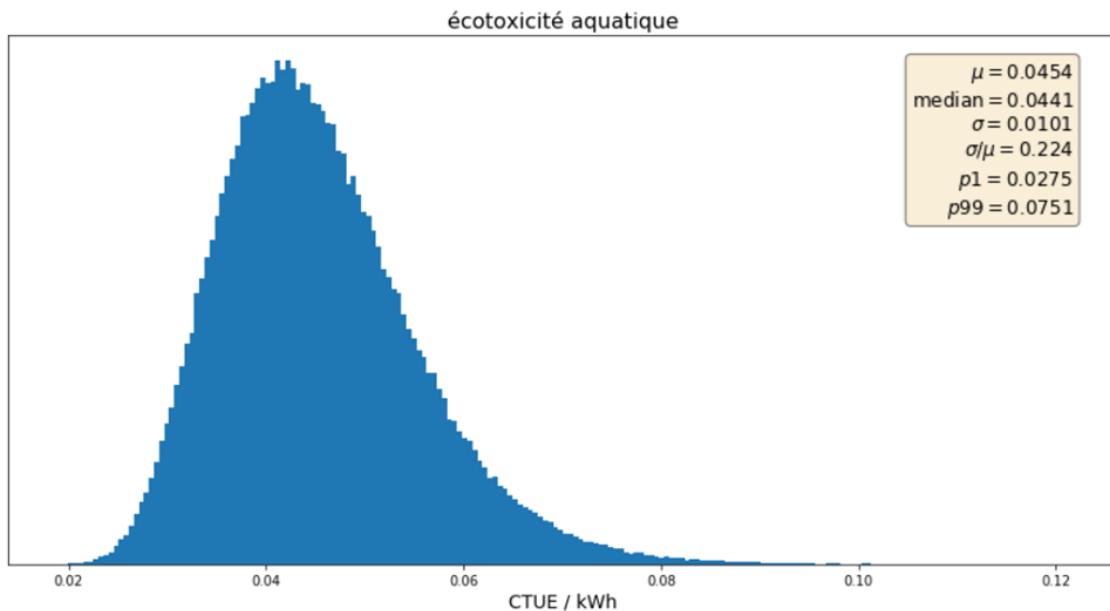


Figure 9 : Distribution de résultats d'ACV pour la catégorie d'écotoxicité aquatique

Nous obtenons une distribution proche d'une gaussienne, avec une moyenne de 0.045 CTUe / kWh et un écart type de 0.01 CTUe / kWh, soit 22% de coefficient de variation.

Toxicité humaine – effets cancérigènes

Cet indicateur mesure la toxicité ayant un effet cancérigène. Il est exprimé en CTUh (augmentation de morbidité) par kilowattheure produit (CTUh / kWh).

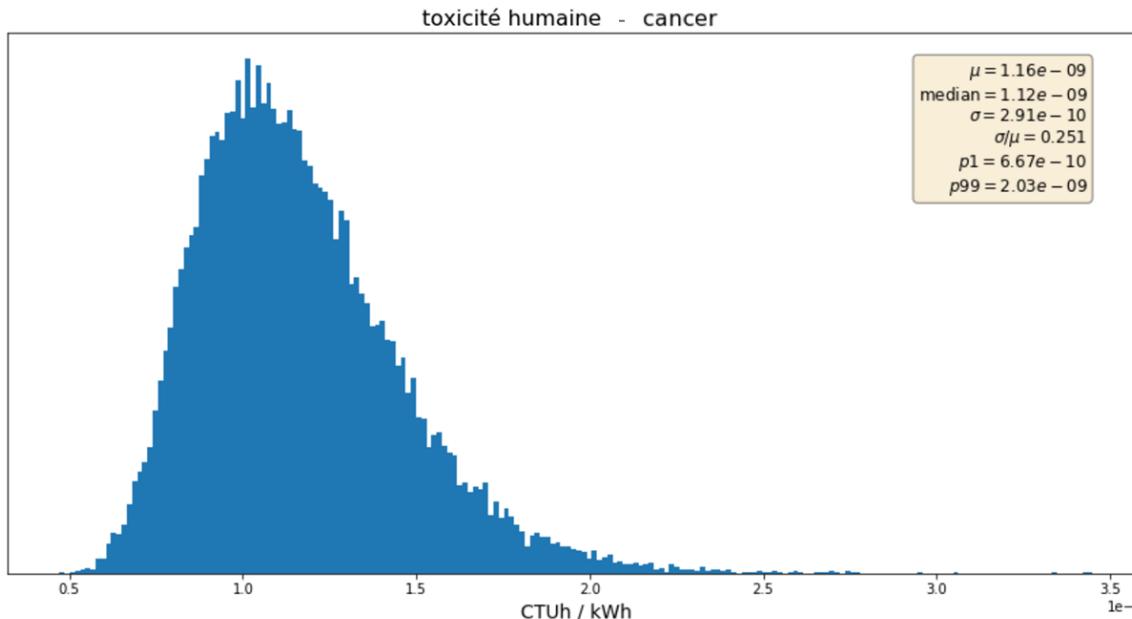


Figure 10 : Distribution de résultats d'ACV pour la catégorie de toxicité humaine avec des effets cancérigènes

Nous obtenons une distribution proche d'une gaussienne avec une moyenne à 1.16×10^{-9} CTUh / kWh et un écart type de 2.91×10^{-10} CTUh / kWh, soit un coefficient de variation de 25%.

Toxicité humaine – effets non-cancérigènes

Cet indicateur mesure la toxicité humaine avec des effets non-cancérogènes. Il est exprimé en CTUh (augmentation de morbidité) par kilowattheure produit (CTUh / kWh).

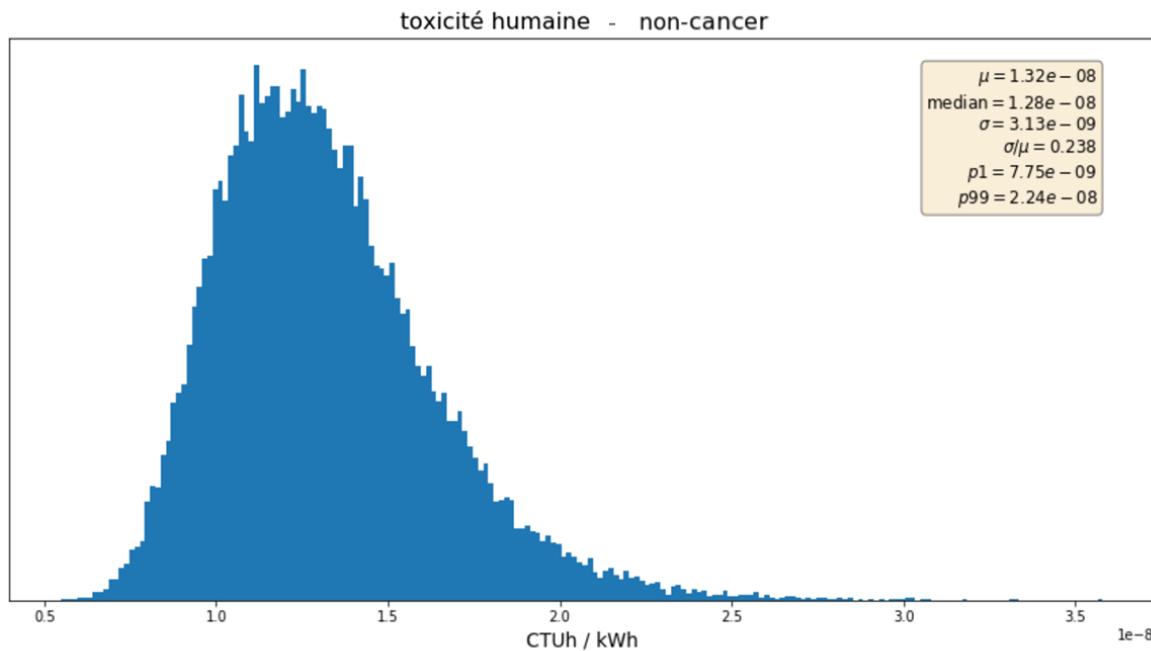


Figure 11 : Distribution de résultats d'ACV pour la catégorie de toxicité humaine avec des effets non-cancérogènes

Nous obtenons une distribution proche d'une gaussienne avec une moyenne à 1.32×10^{-8} CTUh / kWh et un écart type de 3.13×10^{-9} CTUh / kWh, soit un coefficient de variation de 24%.

Acidification

Cet indicateur mesure le potentiel acidifiant d'un procédé, exprimé en moles d'ions H+ équivalents par kWh produit (mol H+ eq / kWh).

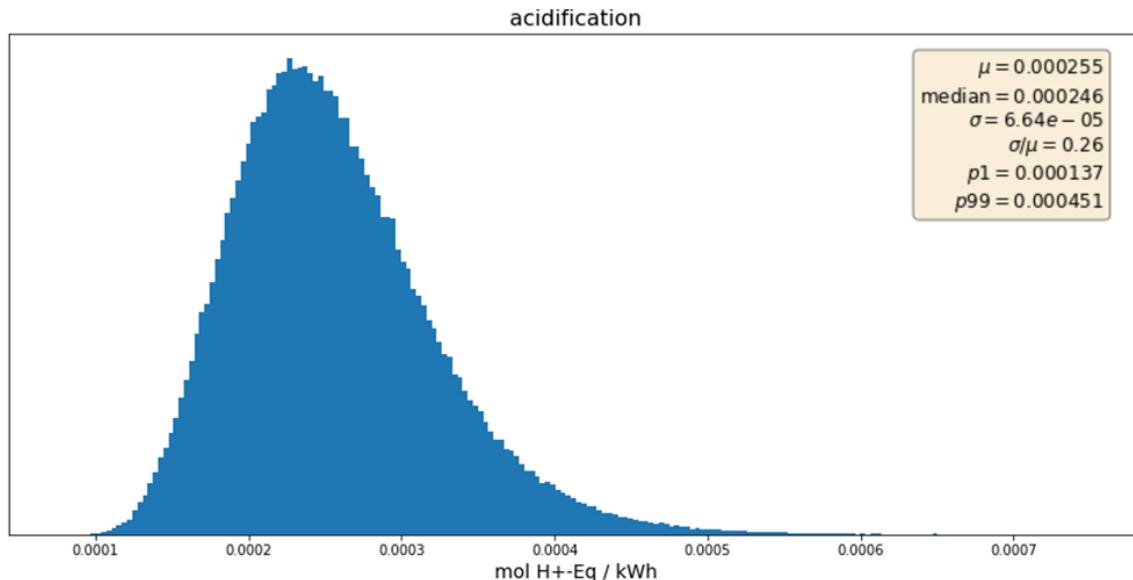


Figure 12 : Distribution de résultats d'ACV pour la catégorie d'acidification

Nous obtenons une distribution proche d'une gaussienne avec une moyenne de 2.55×10^{-4} mol H+ / kWh et un écart type de 6.64×10^{-5} mol H+ / kWh soit 26 % de coefficient de variation.

Occupation des terres

Cet indicateur mesure la perte en matière organique d'un sol vivant, exprimé en kg de sol par kWh produit (Kg Soil / kWh).

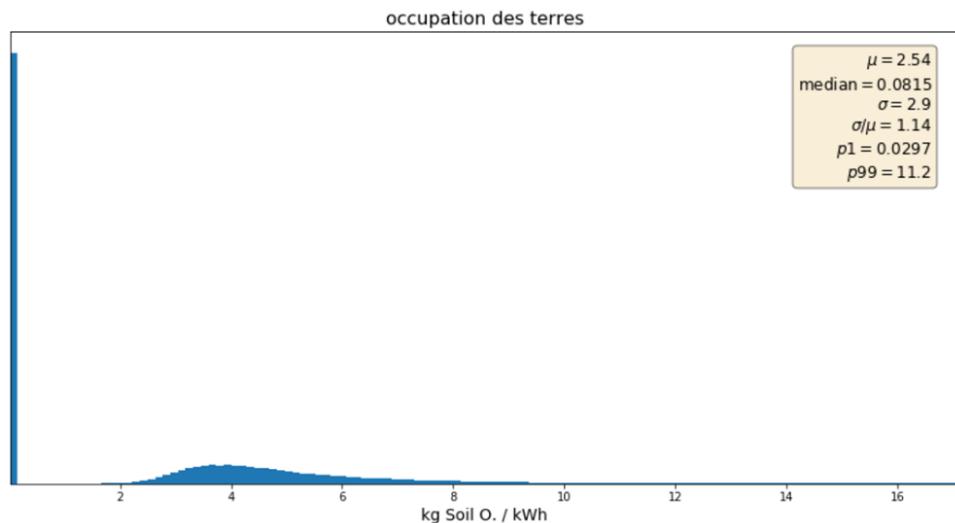


Figure 13 : Distribution de résultats d'ACV pour la catégorie d'occupation des terres

Cet indicateur présente une très grande variation de 114%. La distribution se décompose en deux composantes distinctes :

- une composante quasiment nulle, correspondant aux installations sur toit
- une distribution plus importante correspondant aux installations au sol

Déchets nucléaires

Cet indicateur quantifie les déchets nucléaires produits, rapporté à leur radioactivité. Il est exprimé en m^3 de déchets équivalents par kWh produits.

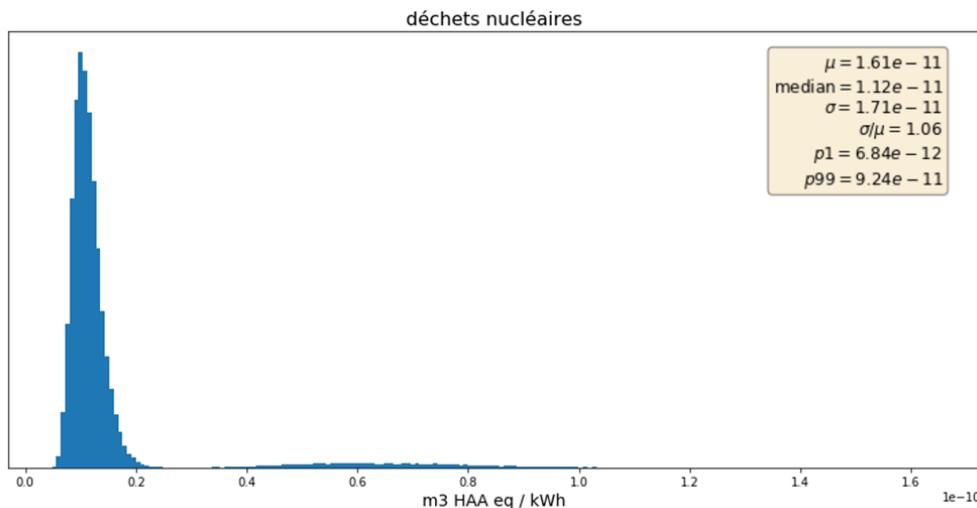


Figure 14. Distribution de résultats d'ACV pour la catégorie de déchets nucléaires

La distribution se présente comme la somme de deux lois normales distinctes. La distribution la plus importante en probabilité (sur la gauche) correspond à la production de panneaux avec le mix énergétique chinois, majoritaire sur le marché et comportant peu de nucléaire. Le reste correspond aux autres mix moins fréquents comportant davantage de nucléaire (comme le Japon).

Globalement, la moyenne s'établit à $1.61 \times 10^{-11} m^3 / kWh$ avec un écart type de $1.71 \times 10^{-11} m^3 / kWh$, soit 106% de coefficient de variation.

Utilisation en eau

Cet indicateur mesure l'utilisation en eau douce. Il est exprimé en litre par kilowattheure produit (l / kWh).

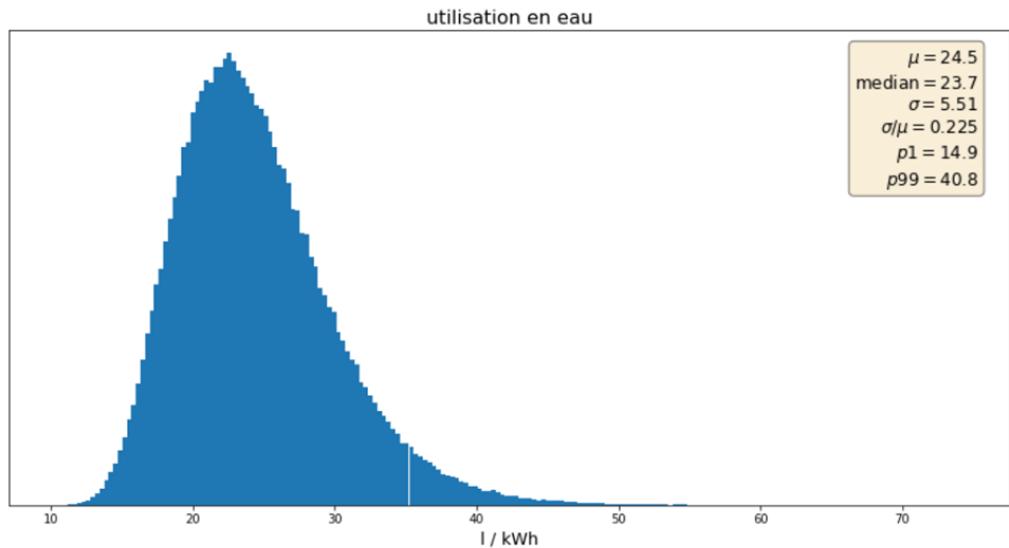


Figure 15 : Distribution de résultats d'ACV pour la catégorie d'utilisation en eau

La distribution approche une gaussienne de moyenne 24.5 l / kWh et d'écart type 5.5 l / kWh, soit 22% de coefficient de variation.

Demande énergétique non-renouvelable

La demande énergétique non renouvelable est exprimée en mégajoules d'énergie primaire par kilowattheure produit (MJ-eq / kWh)

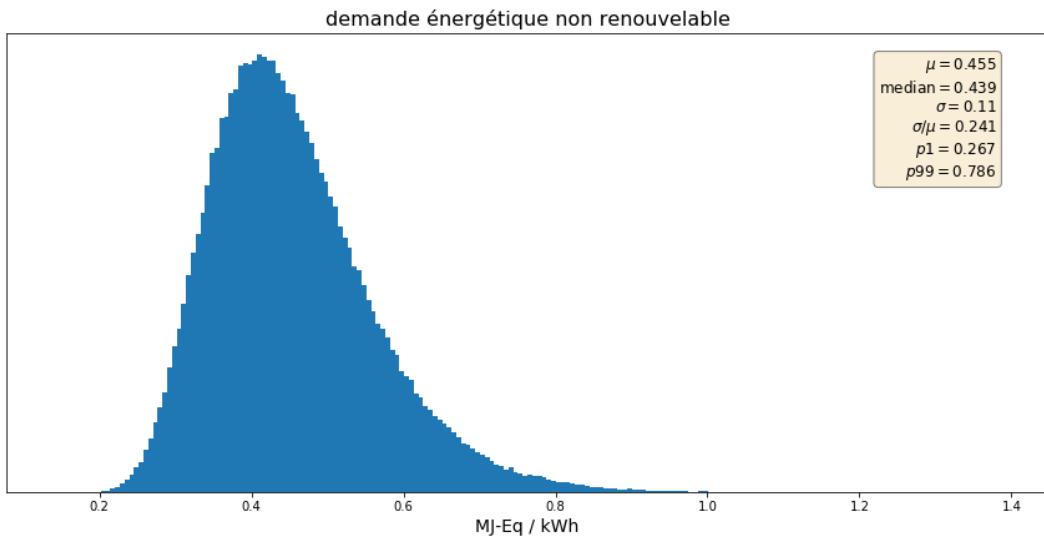


Figure 16 : Distribution de résultats d'ACV pour la catégorie de demande énergétique non renouvelable

Nous obtenons une distribution proche d'une gaussienne, avec une demande énergétique non renouvelable moyenne de 0.45 MJ-eq / kWh, soit 0.125 kWh d'énergie primaire par kWh produit. L'écart type est de 0.11 MJ-eq, soit 24% de coefficient de variation.

Demande énergétique renouvelable

Cet indicateur mesure la demande en énergie renouvelable, compte tenu de la distribution des mix énergétiques utilisés dans la production des panneaux, définis dans le livrable 2.4 (ADEME, 2019.3). Elle est exprimée en mégajoules d'énergie primaire par kWh produit.

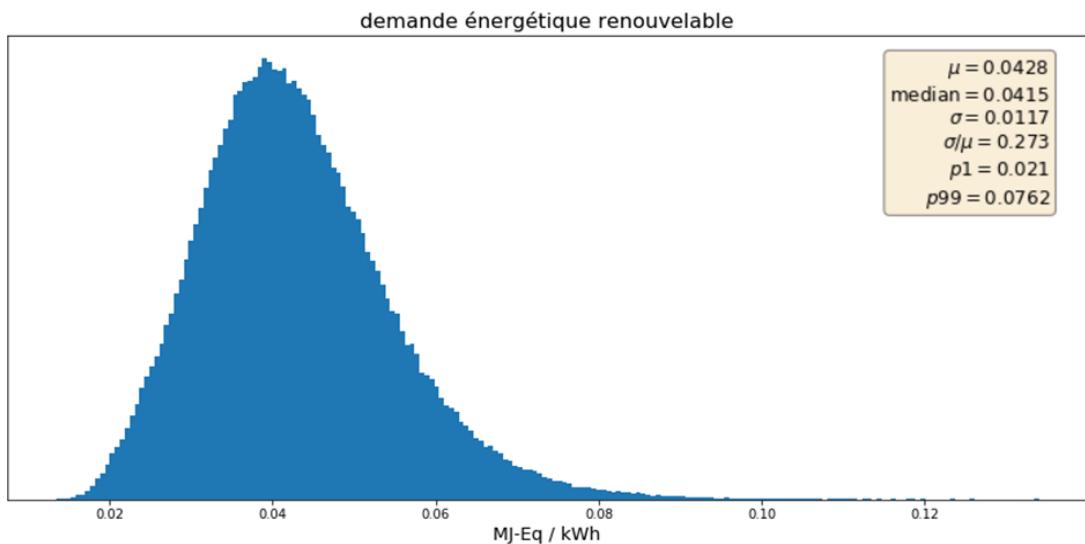


Figure 17 : Distribution de résultats d'ACV pour la catégorie de demande énergétique renouvelable

Nous obtenons une distribution proche d'une gaussienne, avec une moyenne de 0.042 MJ-eq consommé, soit 0.011 kWh-eq d'énergie renouvelable primaire par kWh produit. L'écart type est de 0.011 MJ-eq, soit 27% de coefficient de variation.

Indicateurs environnementaux complémentaires : Taux de retour énergétique

Le taux de retour énergétique est le rapport entre l'énergie nette produite par le système PV au cours de sa durée de vie, et l'énergie totale dépensée pour sa production et sa maintenance. Il est exprimé en kWh utile / kWh dépensé.

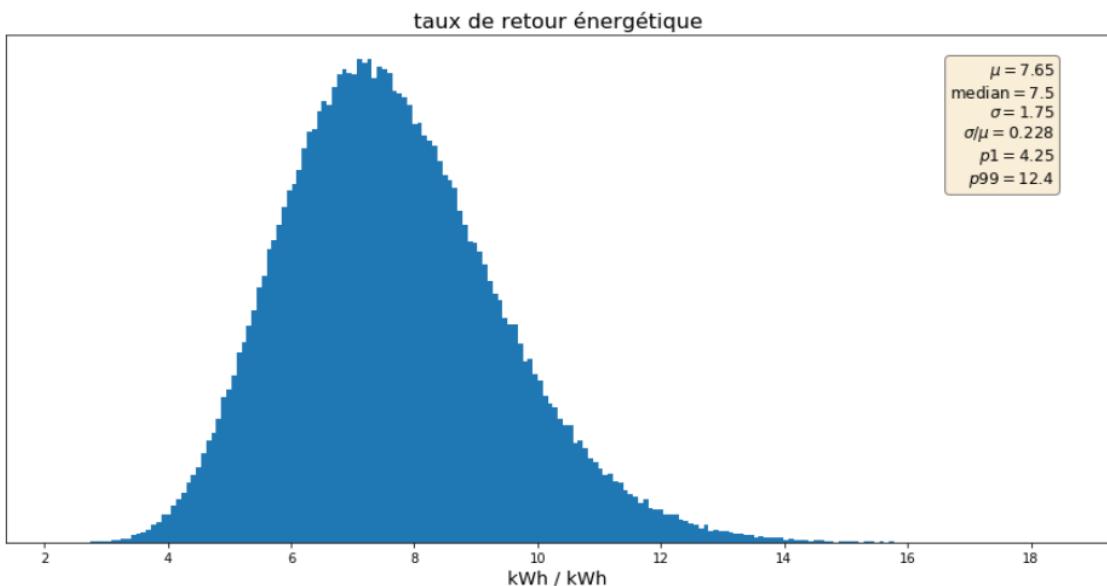


Figure 18 : Distribution de du taux de retour énergétique

Nous obtenons une distribution proche d'une gaussienne, avec un EROEI de 7.6 en moyenne, pour un écart type de 1.76, soit 23% de coefficient de variation.

Récapitulatif

Nous présentons ici un récapitulatif des différents indicateurs statistiques pour chaque catégorie d'impact sous forme de boîte de Tukey (Guen, 1999) suivi d'un tableau des résultats.

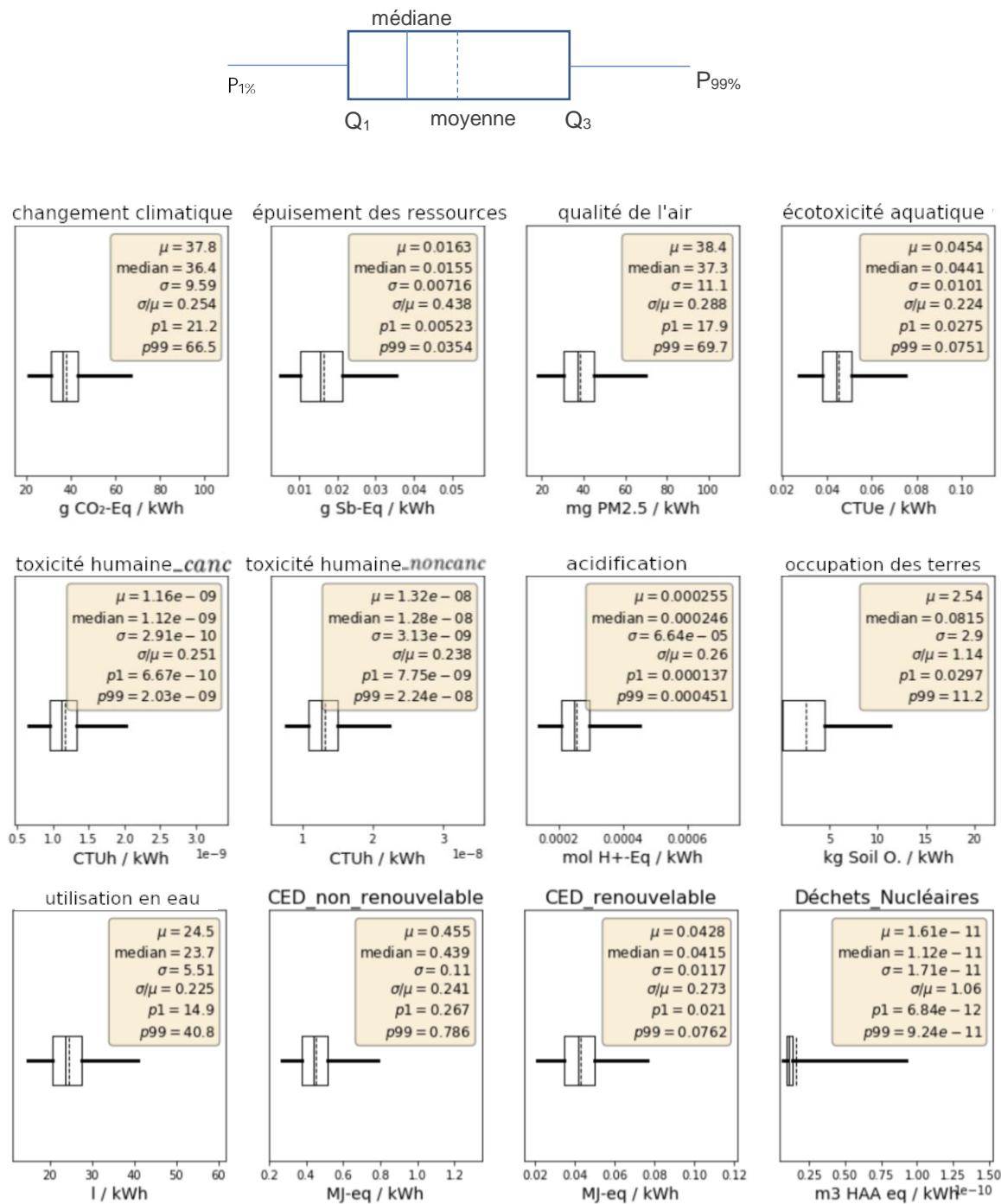


Figure 19 : Récapitulatif des indicateurs statistiques pour chaque catégorie d'impact considérée.

Tableau 8 : Récapitulatif des indicateurs statistiques pour chaque catégorie d'impact considérée

	moyenne	médiane	écart type	variabilité (σ/μ)
changement climatique [g CO ₂ -Eq]	37.8	36.4	9.59	0.254
épuisement des ressources [g Sb-Eq]	0.0163	0.0155	0.00716	0.438
qualité de l'air [mg PM2.5]	38.4	37.3	11.1	0.288
écotoxicité aquatique [CTUe]	0.0454	0.0441	0.0101	0.224
Toxicité humaine – effets cancérogènes [CTUh]	1.16e-09	1.12e-09	2.91e-10	0.251
toxicité humaine – effets non-cancérogènes [CTUh]	1.32e-08	1.28e-08	3.13e-09	0.238
acidification [mol H+-Eq]	0.000255	0.000246	6.64e-05	0.26
occupation des terres [kg Soil O.]	2.54	0.0815	2.9	1.14
utilisation en eau [l]	24.5	23.7	5.51	0.225
demande énerg. non renouvelable [MJ-Eq]	0.455	0.439	0.11	0.241
demande énerg. renouvelable [MJ-Eq]	0.0428	0.0415	0.0117	0.273
déchets nucléaires [m ³ HAA eq]	1.61e-11	1.12e-11	1.71e-11	1.06
taux de retour énergétique [kWh / kWh]	7.65	7.52	1.75	0.228

* Les cellules en jaune indiquent les catégories d'impact ayant la plus grande dispersion

La variabilité des résultats dans la plupart des catégories d'impact est contenue autour de 25%. Seuls trois indicateurs présentent une variabilité plus élevée :

- Epuisement des ressources : 44%
- Occupation des terres : 114%
- Déchets nucléaires : 106%

Cette variabilité importante est liée à une forte dépendance de ces indicateurs environnementaux à des paramètres discrets : mix énergétique et type d'installation (sur toit ou sur sol).

Les variabilités obtenues ici sont à interpréter comme une image actuelle de la filière. Les distributions des paramètres d'entrée ont en effet été choisies pour refléter au mieux l'utilisation actuelle des différentes technologies et la réalité du marché.

5.4.2. Analyse Globale de Sensibilité pour l'identification de paramètres clés à partir des indices de Sobol

Nous produisons ici les résultats du livrable 2.6 sous la forme d'un tableau des indices de Sobol d'ordre 1.

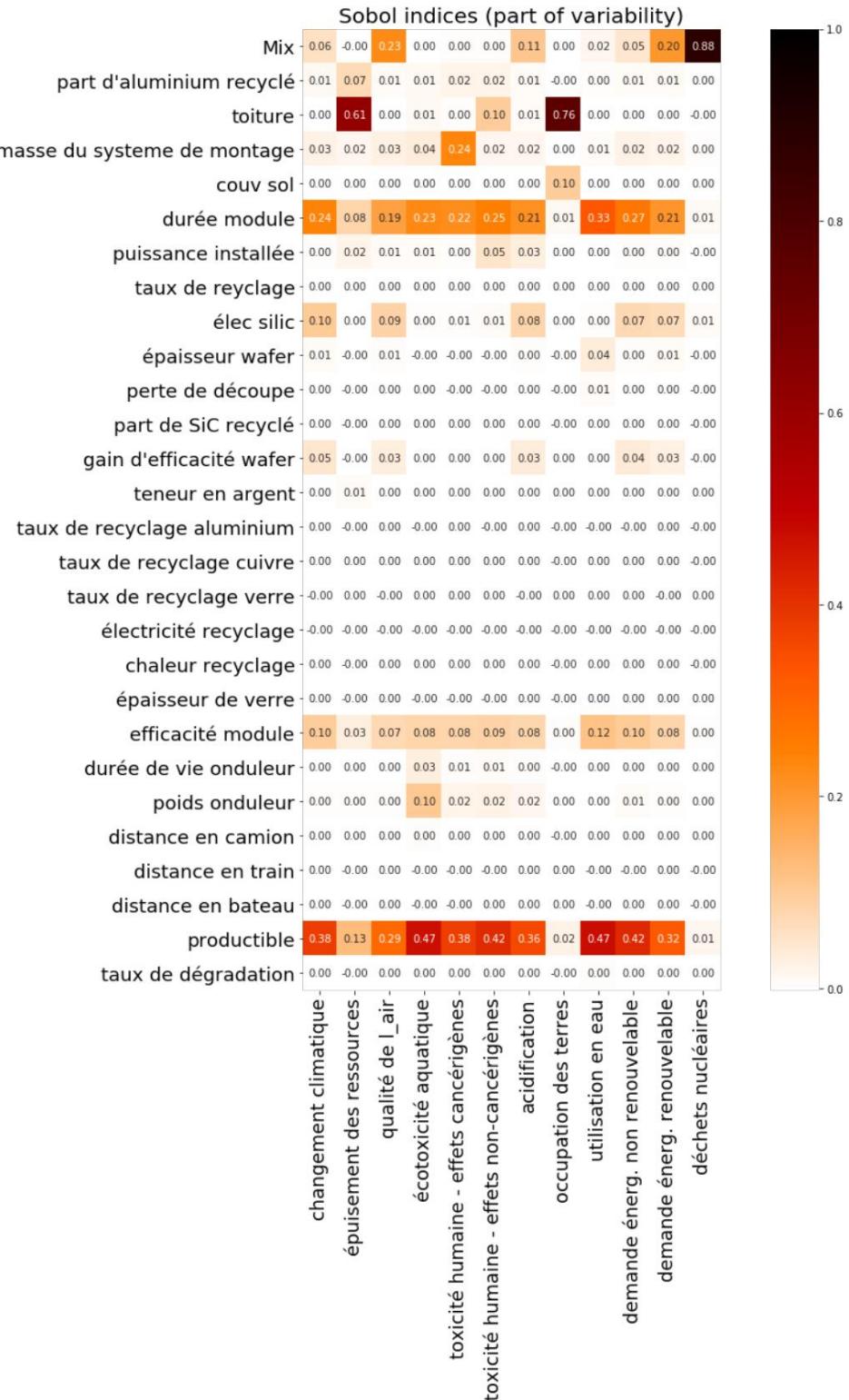


Figure 20 : Indices de Sobol (S1)

En nous appuyant sur ces indices de sensibilité, nous sélectionnons les paramètres prépondérants dans la variance des impacts : nous sélectionnons les paramètres permettant d'expliquer à minima 80% de la variance finale.

Tableau 9 : Identification des paramètres clés (marqués avec un X) pour le cas d'étude du PV

	productible par an	durée de vie module	intensité électrique pour silicium	efficacité module	mix électrique	masse du système de montage	toiture	poids onduleur par puissance	ratio de couverture au sol
changement climatique	X	X	X	X	X				
épuisement des ressources	X	X					X		
qualité de l'air	X	X	X	X	X				
écotoxicité aquatique	X	X			X			X	
toxicité humaine – cancer	X	X				X			
toxicité humaine – non-cancer	X	X			X			X	
acidification	X	X	X	X	X				
occupation des terres							X		X
utilisation en eau	X	X			X				
demande énerg. non renouvelable	X	X	X	X					
demande énerg. renouvelable	X	X	X	X	X				
déchets nucléaires						X			
taux de retour énergétique	X	X	X	X					

9 paramètres suffisent à expliquer plus de 80% de la variance des 12 catégories d'impact. Chaque catégorie d'impact nécessite de 1 à 5 paramètres pour atteindre ce seuil.

5.5. Génération de modèles simplifiés pour le cas du PV

La construction des modèles arithmétiques simplifiés est détaillée dans le livrable 2.7. Nous présentons ici les résultats pour les impacts environnementaux choisis. Tous les modèles sont grandement simplifiés : ils sont fonction au maximum de 5 paramètres, sur les 30 paramètres initiaux.

Changement climatique

L'impact sur le changement climatique est évalué en grammes d'émission équivalent CO₂ par kilowattheure produit (kg CO₂ eq / kWh).

Nous obtenons l'expression paramétrique simplifiée suivante :

$$I_{RC} = \frac{A+B+C+0.567}{Efficacité_{Module} Productible(1-0.994^{Durée_{Module}})}$$

avec :

$$A = 3.95 \cdot 10^{-6} Efficacité_{Module} (1.42 \cdot 10^3 Durée_{Module} + 8.57 \cdot 10^3)$$

$$B = 0.00375 ÉlecSilic (1.05 Mix_{Cn} + 1.51 Mix_{In} + 0.754 Mix_{Jp} + 0.634 Mix_{Kr} + 0.834 Mix_{Ml})$$

$$C = 0.294 Mix_{Cn} + 0.422 Mix_{In} + 0.211 Mix_{Jp} + 0.178 Mix_{Kr} + 0.233 Mix_{Ml}$$

Epuisement des ressources

Cet indicateur mesure la consommation de ressources épuisables. Il est exprimé en grammes d'antimoine équivalent par kilowattheure produit (g Sb eq).

Nous obtenons l'expression paramétrique simplifiée suivante :

$$I_{Epuisement} = \frac{2.06 \cdot 10^{-6} Durée_{Module} - 0.00184 Toiture + 0.00348}{Productible(1-0.994^{Durée_{Module}})}$$

Qualité de l'air

Cet indicateur mesure la quantité de particules fines (< 2.5 µm) dégagées dans l'air, en milligrammes de PM2.5 par kilowattheure produit (mg PM2.5 / kWh)

Nous obtenons l'expression paramétrique simplifiée suivante :

$$I_{QualitéAir} = \frac{A+B+C+0.000553}{Efficacité_{Module} Productible(1-0.994^{Durée_{Module}})}$$

Avec

$$A = 0.00373 ÉlecSilic (0.0012 Mix_{Cn} + 0.00102 Mix_{In} + 0.000234 Mix_{Jp} + 0.000206 Mix_{Kr} + 0.000554 Mix_{Ml})$$

$$B = 0.000324 Mix_{Cn} + 0.000275 Mix_{In} + 6.32 \cdot 10^{-5} Mix_{Jp} + 5.58 \cdot 10^{-5} Mix_{Kr} + 0.00015 Mix_{Ml}$$

$$C = 4.03 \cdot 10^{-6} Efficacité_{Module} (1.82 Durée_{Module} + 21.7)$$

Ecotoxicité aquatique

Cet indicateur estime la fraction d'espèces potentiellement impactées pour un mètre cube pour une année. Il est exprimé en unité de toxicité comparative par kilowattheure produit (CTUe / kWh). Nous obtenons l'expression paramétrique simplifiée suivante :

$$I_{ToxiAqua} = \frac{3.96 \cdot 10^{-6} Efficacité_{Module} (2.96 \cdot 10^3 Durée_{Module} Poids_{Onduleur} + 4.42 \cdot 10^4) + 1.07}{Efficacité_{Module} Productible (1 - 0.994^{Durée_{Module}})}$$

Toxicité humaine – effets cancérigènes

Cet indicateur estime la toxicité humaine avec des effets cancérigènes. Il est exprimé en CTUh (augmentation de morbidité) par kilowattheure produit (CTUh / kWh).

Nous obtenons l'expression paramétrique simplifiée suivante :

$$I_{ToxHumaine_canc} = -\frac{4.768 \cdot 10^{-10} Durée_{Module} + 1.195 \cdot 10^{-8} Masse_{DuSystèmeDeMontage} + 1.055 \cdot 10^{-7}}{Productible (0.994^{Durée_{Module}} - 1)}$$

Toxicité humaine – effets non-cancérigènes

Cet indicateur estime la toxicité humaine avec des effets non-cancérigènes. Il est exprimé en CTUh (augmentation de morbidité) par kilowattheure produit (CTUh / kWh).

Nous obtenons l'expression paramétrique simplifiée suivante :

$$I_{ToxHumaine_noncanc} = \frac{-3.933 \cdot 10^{-6} Efficacité_{Module} (0.0013 Durée_{Module} + 0.020) + 5.893 \cdot 10^{-8} Toiture - 3.695 \cdot 10^{-7}}{Efficacité_{Module} Productible (0.994^{Durée_{Module}} - 1)}$$

Acidification

Cet indicateur mesure le potentiel acidifiant d'un procédé, exprimé en moles d'ions H+ équivalents par kWh produit (mol H+ eq / kWh).

Nous obtenons l'expression paramétrique simplifiée suivante :

$$I_{acidification} = \frac{A+B+C+0.00368}{Efficacité_{Module} Productible (1 - 0.994^{Durée_{Module}})}$$

Avec :

$$A = 0.00375 Élec_{Silic} (0.00673 Mix_{Cn} + 0.00661 Mix_{In} + 0.00374 Mix_{Jp} + 0.00238 Mix_{Kr} + 0.00371 Mix_{Ml})$$

$$B = 0.00188 Mix_{Cn} + 0.00184 Mix_{In} + 0.00104 Mix_{Jp} + 0.000662 Mix_{Kr} + 0.00103 Mix_{Ml}$$

$$C = 4.04 \cdot 10^{-6} Efficacité_{Module} (21.7 Durée_{Module} + 327.0)$$

Occupation des terres

Cet indicateur mesure la perte en matière organique d'un sol vivant, exprimé en kg de sol par kWh produit (Kg Soil / kWh).

Nous obtenons l'expression paramétrique simplifiée suivante :

$$I_{OccupationTerres} = 0.0433 - 0.000659Toiture + \frac{1.48(1-Toiture)}{CouvSol}$$

Déchets nucléaires

Cet indicateur quantifie les déchets nucléaires produits, rapporté à leur radioactivité. Il est exprimé en m3 de déchets équivalents par kWh produits.

Nous obtenons l'expression paramétrique simplifiée suivante :

$$I_{DéchetsNucléaires} = 3.15 \cdot 10^{-12} Mix_{In} + 5.18 \cdot 10^{-11} Mix_{Kr} + 9.22 \cdot 10^{-12}$$

Utilisation en eau

Cet indicateur mesure l'utilisation en eau douce. Il est exprimé en litre par kilowattheure produit (l / kWh)

Nous obtenons l'expression paramétrique simplifiée suivante :

$$I_{eau} = \frac{3.93 \cdot 10^{-6} Efficacité_{Module} (537.0 Durée_{Module} + 3.68 \cdot 10^3) + 0.663}{Efficacité_{Module} Productible (1 - 0.994^{Durée_{Module}})}$$

Demande énergétique non-renouvelable

La demande énergétique non renouvelable est exprimée en mégajoules d'énergie primaire par kilowattheure produit (MJ-eq / kWh).

Nous obtenons l'expression paramétrique simplifiée suivante :

$$I_E = \frac{3.96 \cdot 10^{-6} Efficacité_{Module} (2.15 \cdot 10^4 Durée_{Module} + 1.26 \cdot 10^5) + 0.0359 Élec_{Silic} + 10.1}{Efficacité_{Module} Productible (1 - 0.994^{Durée_{Module}})}$$

Demande énergétique renouvelable

Cet indicateur mesure la demande en énergie renouvelable, compte tenu de la distribution des mix énergétiques utilisés dans la production des panneaux, définis dans le livrable 2.4 (ADEME R. J.-L.-V., 2019.3). Elle est exprimée en mégajoules d'énergie primaire par kWh produit.

Nous obtenons l'expression paramétrique simplifiée suivante :

$$I_{ENR} = \frac{A+B+C+0.691}{Efficacité_{Module} Productible(1-0.994^{Durée_{Module}})}$$

Avec :

$$A = 0.00371 \bar{Elec}_{Silic} (1.15 Mix_{Cn} + 0.794 Mix_{In} + 0.551 Mix_{Jp} + 0.0884 Mix_{Kr} + 0.496 Mix_{Ml})$$

$$B = 0.319 Mix_{Cn} + 0.221 Mix_{In} + 0.153 Mix_{Jp} + 0.0246 Mix_{Kr} + 0.138 Mix_{Ml}$$

$$C = 4.03 \cdot 10^{-6} Efficacité_{Module} (1.84 \cdot 10^3 Durée_{Module} + 9.58 \cdot 10^3)$$

Taux de retour énergétique

Le taux de retour énergétique est le rapport entre l'énergie nette produite par le système PV au cours de sa durée de vie, et l'énergie totale dépensée pour sa production et sa maintenance. Il est exprimé en kWh utile / kWh dépensé.

Nous obtenons l'expression paramétrique simplifiée suivante :

$$EROIE = \frac{Efficacité_{Module} Productible(1-0.994^{Durée_{Module}})}{4.09 \cdot 10^{-6} Efficacité_{Module} (6.22 \cdot 10^3 Durée_{Module} + 3.75 \cdot 10^4) + 0.0112 \bar{Elec}_{Silic} + 3.14}$$

Validation des modèles simplifiés

Ces modèles simplifiés sont comparés en détail au modèle paramétrique de référence dans le livrable 2.7. En résumé, ces modèles sont fiables : ils présentent des distributions et des indicateurs statistiques similaires avec un R² proche de 1 (de 0.72 à 0.92).

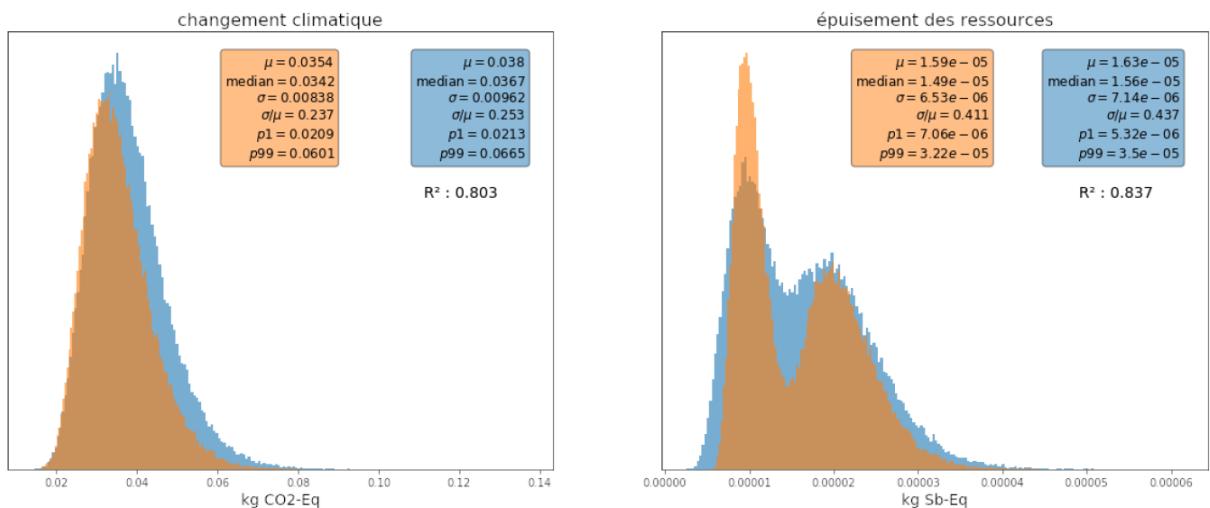


Figure 21 : Exemple de validation des modèles simplifiés pour les catégories de changement climatique et d'épuisement de ressources

5.6. Outil web d'estimation des impacts environnementaux pour le PV en silicium cristallin

Le travail précédent a donné lieu à la conception d'un outil web interactif, permettant une évaluation rapide des impacts environnementaux.

Cet outil est disponible à l'adresse suivante : <http://viewer.webservice-energy.org/incer-acv/app/>

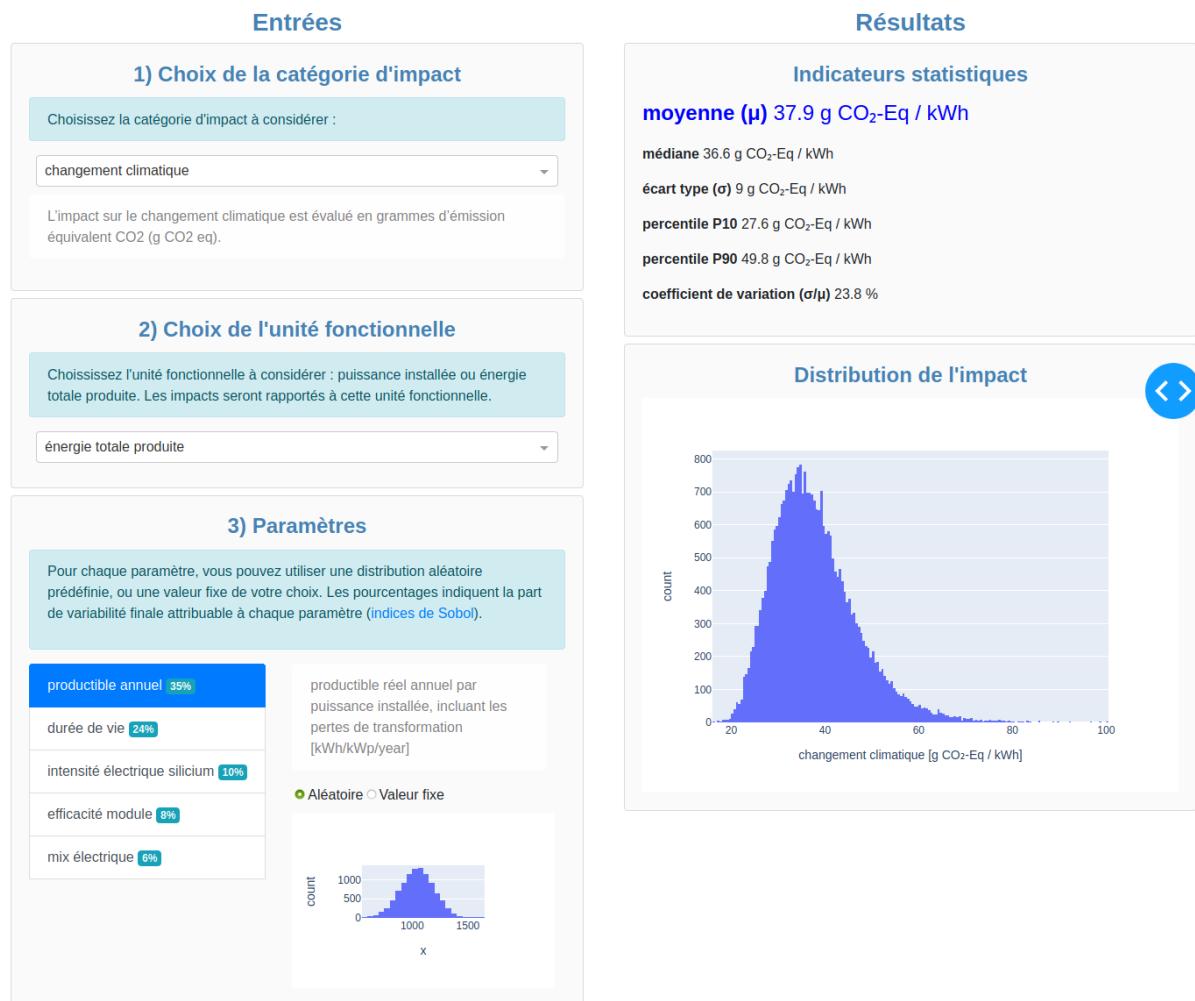


Figure 22 : Interface de l'outil en ligne pour la prise en compte des incertitudes et de la variabilité dans les résultats environnementaux du PV

Cette interface permet à l'utilisateur de :

- choisir la catégorie d'impact
- choisir l'unité fonctionnelle considérée
- préciser une valeur particulière pour chaque paramètre du modèle simplifié, en lieu et place de la distribution de probabilité initiale

Les impacts environnementaux sont alors recalculés en direct et sont présentés sous la forme :

- D'une distribution
- D'indicateurs statistiques

6. Application du protocole INCER-ACV à l'ACV de l'éolien flottant

Le second cas d'étude est mené par le partenaire industriel du projet (ENGIE). L'objet de ce cas d'étude est l'évaluation des impacts environnementaux liés à la production d'électricité par des installations d'éolien flottant. Le choix de cet objet d'étude a été motivé par le fort potentiel de cette nouvelle filière, aux récents projets lancés sur cette filière, et à l'implication du partenaire ENGIE dans un projet de développement appelé Eoliennes Flottantes du Golfe du Lion (EFGL). Le livrable 4.1 présente plus de détails sur le contexte de développement de cette filière et sur les raisons du choix de ce cas d'étude.

6.1. Définition du cadre de l'étude pour l'éolien flottant

L'objectif de ce cas d'étude est de construire un modèle paramétré calculant les impacts environnementaux des installations d'éolien flottant et de l'appliquer pour simuler facilement et d'une manière flexible plusieurs scénarios avec différents ensembles de paramètres d'entrée variables. Les résultats serviront le centre Observation, Impact, et Energie (O.I.E.) Mines ParisTech et Engie Lab CRIGEN afin de tester les outils développés dans le cadre du projet INCER-ACV.

Il existe différents types d'éoliennes flottantes (voir Figure 23). Le modèle s'applique en priorité aux éoliennes de type semi-submersible installées en France Métropolitaine, à une distance maximale de 50 km de la côte car il est construit à partir du projet initial de ferme des Eoliennes Flottantes du Golfe du Lyon (EFGL). Le modèle couvre les installations d'éoliennes flottantes de puissance nominale comprise entre 6 et 10 MW et les fermes éoliennes d'une puissance totale installée comprise entre 20 et 30 MW, ce qui correspond aux fermes pilotes actuellement en cours de mise en œuvre en France. Son étendue à d'autres cas (par exemple aux fermes de plus grandes puissances, à un plus grand éloignement de la côte et/ou impliquant des éoliennes de plus grande puissance) pourra être envisagée en fonction des informations disponibles dans le futur. Il est à noter que dans le cas d'une ferme de taille plus importante, l'installation d'une sous-station électrique en mer sera nécessaire, ce qui n'est pas le cas dans le modèle développé ici.



Figure 23 : Les différents types d'éoliennes flottantes (source : WindPower, 2019)

Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle choisie est la fourniture d'1 kWh produit en courant alternatif livré au réseau de transport de l'électricité. Il est à noter que la transmission et la distribution de l'électricité vers l'utilisateur par le réseau sont exclues du champ de l'étude.

Le modèle d'ACV développé dans ce cas d'étude suit une approche attributionnelle de l'amont à l'aval, c'est-à-dire que l'on ne s'intéresse pas aux conséquences d'un changement de taille considérable dans le système énergétique mais que l'on souhaite avoir une photographie des impacts environnementaux d'un système de production énergétique.

Champ de l'étude

Le champ de l'étude comprend les phases et les sous-systèmes suivants :

- A – Extraction et transformation des matières premières : la production des matériaux pour chacun des composants de la ferme (en dehors des matériaux liés à la connexion de la ferme au réseau qui sont comptés dans le module D), c'est-à-dire pour chaque éolienne :
 - o L'éolienne à proprement parler (tour, pales, nacelle, générateur, système électrique),
 - o Le flotteur,
 - o Le système d'amarrage,
 - o Le câble d'interconnexion entre les éoliennes,
 - o Un i-tube,
- B – Fabrication des éléments et transport : la construction des différents éléments de la ferme et leur transport,
- C – Installation : leur installation et assemblage sur site,
- D – Connexion : la connexion de la ferme éolienne au réseau électrique,
- E – Maintenance : la phase de maintenance du système,
- F – Fin de vie : la fin de vie du système.

La Figure 24 montre les différentes parties de l'installation telles qu'utilisées dans le modèle. On désigne par flotteur l'ensemble de la structure maintenant l'éolienne hors de l'eau.

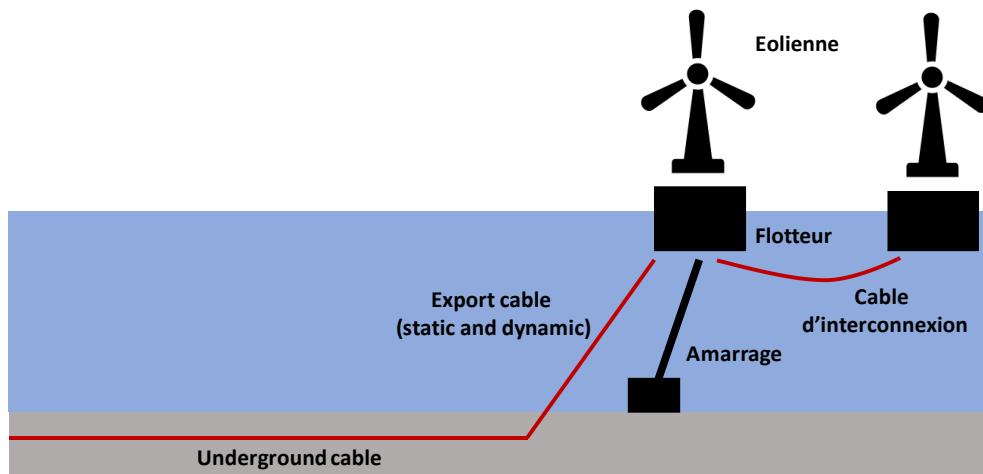


Figure 24 : Schéma simplifié d'une installation d'éoliennes flottantes

Le modèle comprend la modélisation des impacts environnementaux du système dans son ensemble et l'estimation de la production d'électricité pendant la durée de vie totale de l'installation. Les impacts moyens par kWh d'électricité produite sont obtenus en divisant l'un par l'autre.

Catégories d'impact considérées

Les catégories d'impact considérées dans l'étude sont les suivantes :

- Réchauffement climatique (méthode ILCD 2.0 2018 midpoint, climate change total),
- Demande cumulative en énergie (méthode ILCD 2.0 2018 midpoint, resources, fossils),
- Epuisement des ressources (méthode ILCD 2.0 2018 midpoint, resources, minerals and metals),
- Consommation en eau (méthode ILCD 2.0 2018 midpoint, resources, dissipated water),
- Eutrophisation marine (méthode ILCD 2.0 2018 midpoint, ecosystem quality, marine eutrophication),
- Qualité de l'air (méthode ILCD 2.0 2018 midpoint, human health, respiratory effects, inorganics).

La méthode employée est la méthode recommandée par le JRC (European Commission - Joint Research Centre, 2011)

6.2. Construction du modèle paramétré d'ACV de référence pour l'éolien flottant

Identification des paramètres d'entrée

Les paramètres importants du système ont été déterminés par l'analyse des résultats de l'étude de Poujol et al. (2020), l'objectif étant de détailler au maximum les phases de cycle de vie qui ont une influence importante sur les résultats d'impact des différentes catégories considérées. Ensuite la littérature, et en particulier les travaux de Weinzettel et al. (2009) et de Tsai et al. (2016), a été revue afin de vérifier si les systèmes décrits dans ces travaux pouvaient être modélisés dans le système proposé. Les détails des choix de modélisation du système et d'implémentation du modèle sont présentés dans le livrable 4.2 du projet.

Le critère utilisé pour déterminer les phases et paramètres les plus importants dans l'étude de Poujol et al. (2020) a été que le procédé représente au moins 10% de l'impact dans une des catégories d'impact choisies. Les éléments les plus importants au sein de ces phases ont ensuite été identifiés avec le même critère, ainsi que les paramètres les plus influents et permettant de couvrir le champ d'application prévu.

Un certain nombre de paramètres variables a été retenu, qui sont listés dans le Tableau 10. Ces paramètres finaux ont été définis de manière à ce qu'ils soient les plus indépendants possible entre eux afin de permettre la généralisation du modèle. Par exemple le choix a été fait d'avoir des paramètres de quantités de matériaux exprimés par MW éolienne plutôt que par éolienne.

Implémentation du modèle d'ACV de référence

Le modèle paramétré a été développé avec la librairie fournie par le projet INCER-ACV. Les données primaires employées proviennent des travaux par Poujol et al. (2020) qui portaient sur un design initial du projet EFGL (4 éoliennes de 6MW), design qui a par la suite évolué. Suite à des échanges avec des experts du domaine de l'éolien flottant et à la lecture d'articles scientifiques par Besseau et al. (2019) et Sacchi et al. (2019), le modèle d'ACV a été paramétré de la façon décrite dans la Figure 25.

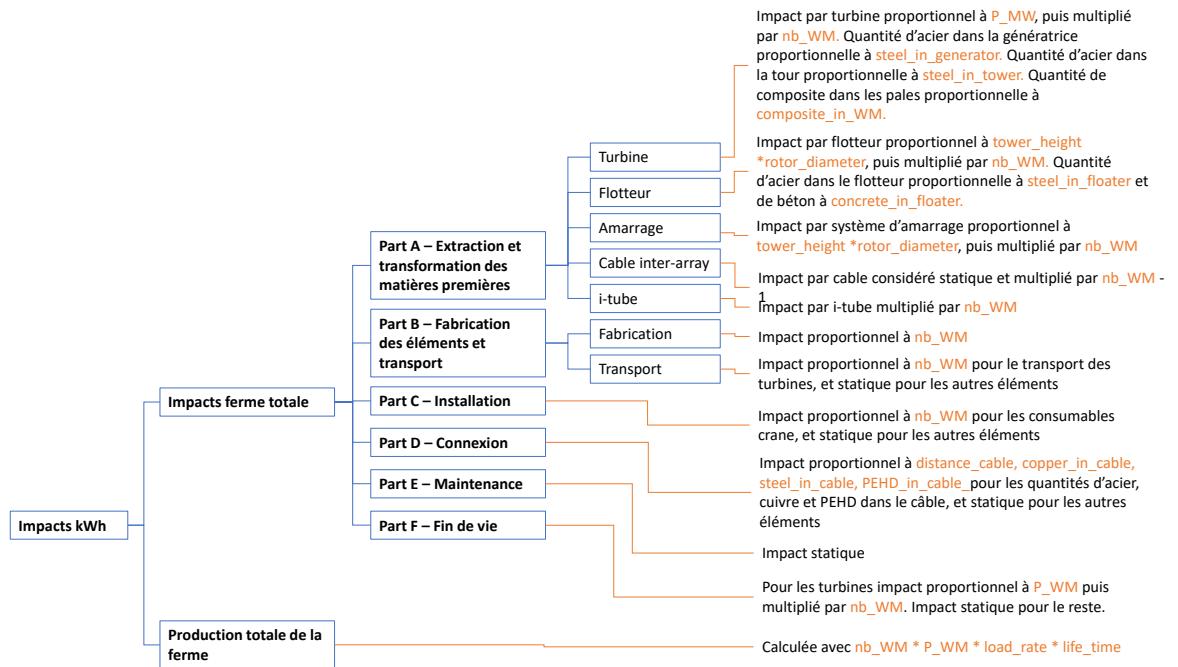


Figure 25 : Schéma conceptuel du modèle paramétré développé pour le cas d'étude de l'éolien flottant

Le livrable 4.2 présente l'ensemble du modèle développé avec la librairie Python *Ica-algebraic*, ainsi que les procédés d'arrière-plan utilisés provenant de la base de données ecoinvent v3.4 (cut-off) et la validation du modèle paramétré.

6.3. Caractérisation des incertitudes et de la variabilité des paramètres d'entrée pour l'éolien flottant

Les distributions ont été estimées pour chacun des paramètres du système à l'aide d'une revue de littérature portant sur les ACV de fermes éoliennes flottantes. La sélection s'est focalisée sur des installations présentant des caractéristiques similaires notamment en termes de puissance. Ainsi, les éoliennes de puissance inférieure à 5 MW ont été écartées afin d'éviter d'entraîner trop de variabilité dans les résultats.

Les distributions définies sont présentées dans le Tableau 10. La plupart des paramètres disposent de valeurs usuelles et sont donc modélisés par des distributions triangulaires. La seule exception est la durée de vie des installations pour laquelle une probabilité uniforme comprise entre 20 et 25 ans a été considérée.

Tableau 10 : Distributions définies pour les différents paramètres variables du modèle pour la filière éolienne flottante

Catégorie	Nom du paramètre	Description	Unité	Distribution	Valeur usuelle	Min	Max
A - Matériaux	steel_in_generator	Quantité d'acier dans le générateur d'une éolienne	t / MW éolienne	triangulaire	12	3	20
	steel_in_tower	Quantité d'acier dans la tour d'une éolienne	t / MW	triangulaire	70	40	120
	tower_height	Hauteur de la tour	m	triangulaire	100	90	110
	rotor_diameter	Diamètre du rotor	m	triangulaire	140	120	160
	composite_in_W_M	Quantité de résine polyester renforcée de fibre dans une éolienne	t / MW éolienne	triangulaire	20	10	50
D - Connexion	steel_in_floater	Quantité d'acier dans le(s) flotteur(s) d'une éolienne	t / MW éolienne	triangulaire	274	200	300
	distance_cable	Longueur du câble d'export (static + dynamic)	km	triangulaire	35	20	50
	copper_in_cable	Cuivre dans le câble d'export	t / km	triangulaire	8	2	13
	steel_in_cable	Acier dans le câble d'export	t / km	triangulaire	8	0	14
Toutes phases	pehd_in_cable	PEHD dans le câble d'export	t / km	triangulaire	6	3	16
Production électrique et données générales	recycled_steel	Acier recyclé utilisé (en %)	-	triangulaire	0.4	0	1
	P_WM	Puissance nominale de chaque éolienne	MW	triangulaire	8	6	10
	nb_WM	Nombre d'éoliennes dans la ferme	-	triangulaire	4	3	5
	life_time	Durée de vie de la ferme dans son ensemble	ans	uniforme	20	20	25
	load_rate	Facteur de charge (en %), avant pertes liées à l'export	-	triangulaire	0.45	0.3	0.55

6.4. Analyses de sensibilité pour l'éolien flottant

6.4.1. Analyse locale OAT pour l'éolien flottant

Une analyse locale de sensibilité a d'abord été menée. La contribution de chaque paramètre d'entrée aux impacts environnementaux considérés y est calculée en les faisant varier un à la fois dans leur plage de définition, tout en fixant les autres paramètres à leur valeur par défaut.

Les résultats sont présentés en Figure 26. On observe que cinq paramètres sont particulièrement prépondérants dans la détermination des résultats sur les six catégories d'impact :

- la puissance nominale des éoliennes (qui entraîne une variation de 11% à 39% des impacts),
- la durée de vie de l'installation (qui entraîne une variation de 22% des impacts),
- le facteur de charge (qui entraîne une variation de 64% des impacts).
- le nombre d'éoliennes (qui entraîne une variation de 6% à 29% des impacts),
- le taux d'acier recyclé utilisé (qui entraîne une variation de 23% à 53% des impacts).

De plus les paramètres quantité de cuivre dans le câble et longueur du câble apparaissent prépondérants pour la catégorie d'impact « ressources minérales et métalliques ».

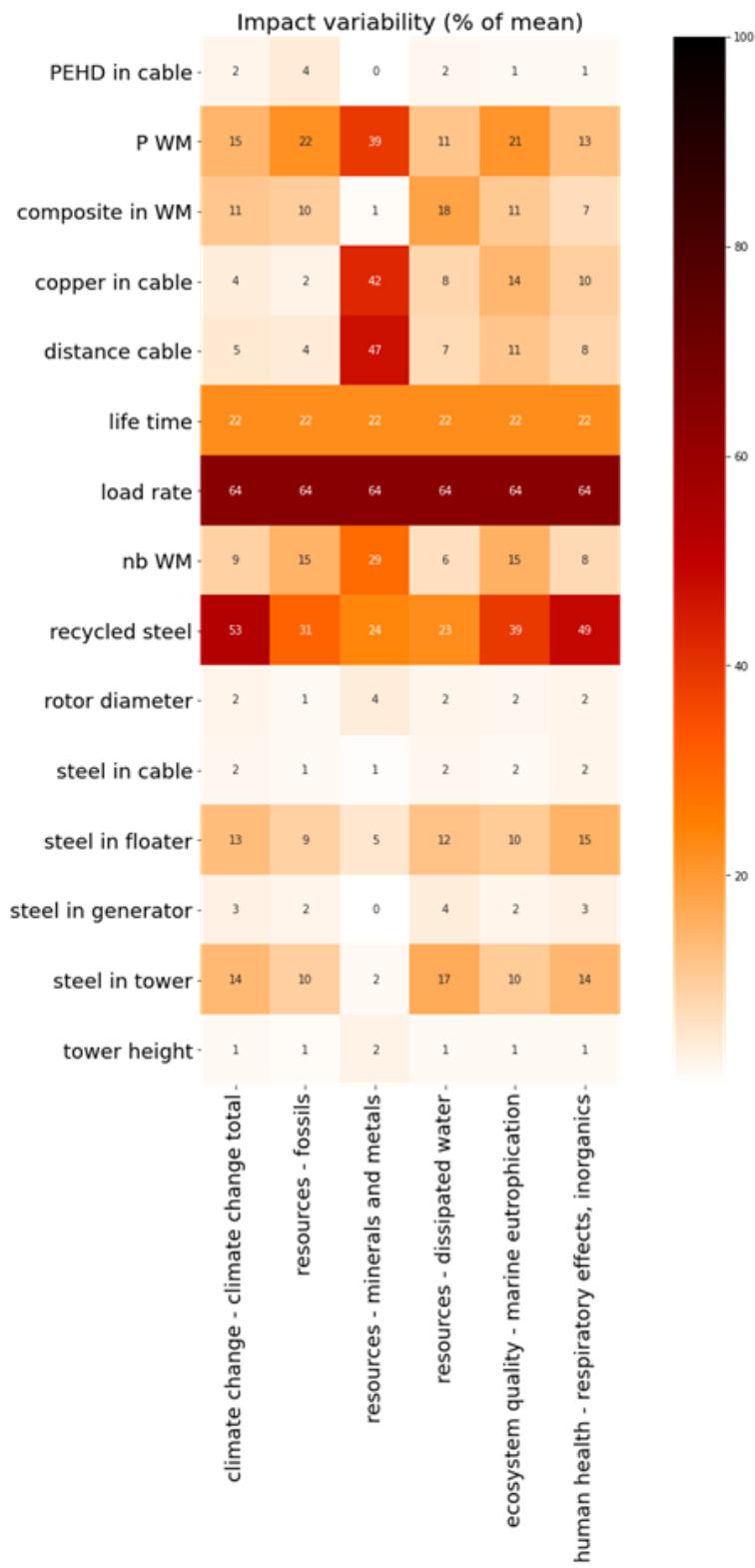


Figure 26 : Résultats de l'analyse de sensibilité locale sur les impacts environnementaux d'un kWh d'électricité produit par éolien flottant

6.4.2. Analyse Globale de Sensibilité pour l'éolien flottant

Ensuite une analyse globale de sensibilité a été menée. Une analyse Monte Carlo a été lancée sur les six catégories d'impact. Les résultats des simulations ont servi à caractériser la distribution des résultats et à identifier les paramètres clés à partir des indices de Sobol.

a) Distribution des résultats d'impacts : Indicateurs statistiques

Les résultats sont présentés dans la Figure 27.

On observe une variation de 17% à 23% selon la catégorie d'impact considérée. Ces coefficients de variation sont légèrement moins élevés que ceux observés dans le cas d'étude sur le PV, par exemple on obtient ici un coefficient de variation de 19% pour l'indicateur réchauffement climatique alors que l'on obtient 25% dans le cas d'étude PV. Il faut cependant se rappeler que les domaines d'application des deux cas d'étude sont très différents, le modèle PV couvrant un domaine beaucoup plus large que le modèle éolien flottant dont le domaine d'application est réduit aux fermes de taille pilote, d'un certain type de flotteur et d'une distance limitée des côtes.

Les émissions de gaz à effet de serre sont en moyenne de 16 g CO₂-eq / kWh avec une variance de 18%. Ils sont compris entre 11 et 20 g CO₂ eq / kWh (p5-p95). Ces résultats sont cohérents vis-à-vis de résultats antérieurs tels que ceux de Poujol et al. (2020) qui étaient de 22 g CO₂ eq / kWh avec une variation de 12 à 30 g CO₂ eq / kWh, ainsi que ceux de Weinzettel et al. (2009) qui étaient de 12 g CO₂ eq / kWh.

L'épuisement des ressources fossiles est de 0.29 MJ/kWh c'est à dire 0.081 MJ / MJ avec une variance de 17%. L'épuisement des ressources métalliques et minérales est de 5.7 10⁻⁷ kg Sb-eq / kWh avec une variance de 22%, tandis que l'impact sur les ressources en eau est de 4.7 L / kWh avec une variance de 16%.

L'impact sur l'eutrophisation marine est de 1.76 10⁻⁵ kg N-eq / kWh avec une variance de 18%, et les effets respiratoires sont de 1.13 10⁻⁹ disease incidence / kWh avec une variance de 18%.

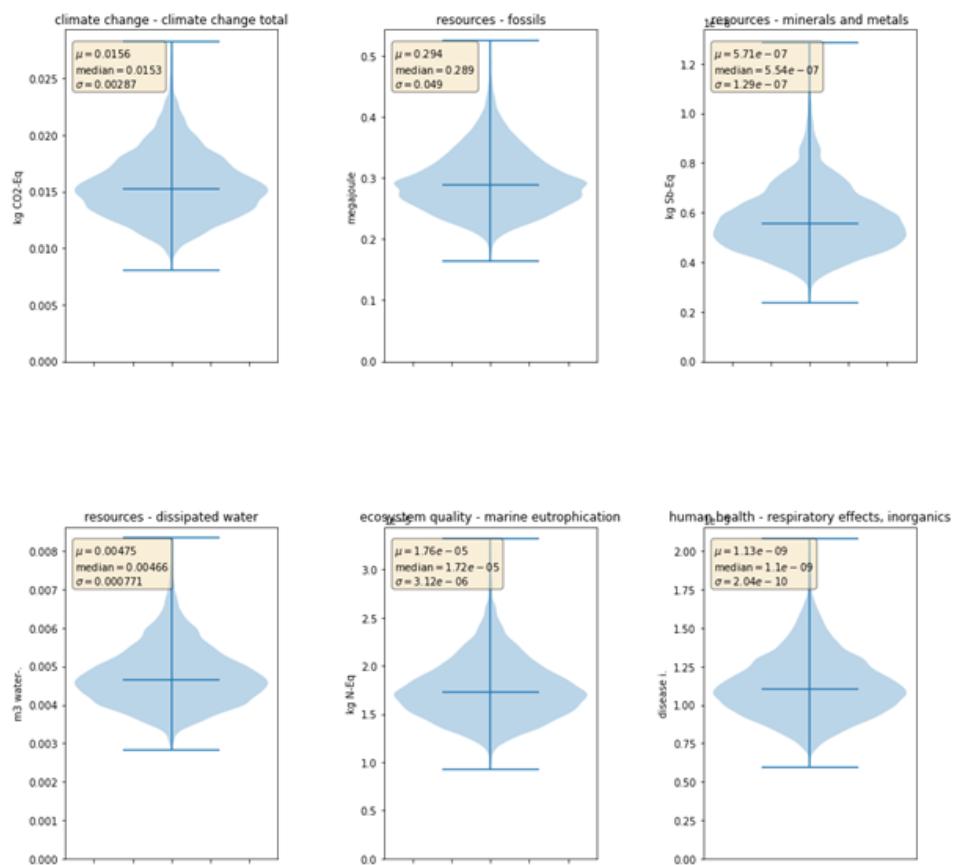


Figure 27 : Impacts environnementaux d'un kWh d'électricité produite par éolien flottant

b) Analyse Globale de Sensibilité pour l'identification des paramètres clés à partir des Indices de Sobol

La contribution de la variation de chaque paramètre d'entrée à la variabilité de chaque indicateur d'impact environnemental est quantifiée grâce au calcul des indices de Sobol. Les résultats sont présentés dans la Figure 28.

Les tendances sont similaires à ce que l'analyse OAT présentée en section 6.4.1 a donné. Cependant l'importance de certains paramètres a changé :

- La puissance nominale et le nombre d'éoliennes qui ressortaient clairement de l'analyse OAT ont ici une importance un peu moindre sur l'ensemble des impacts
- L'indicateur ressources minérales et métaux est finalement peu affecté par le taux d'acier recyclé utilisé

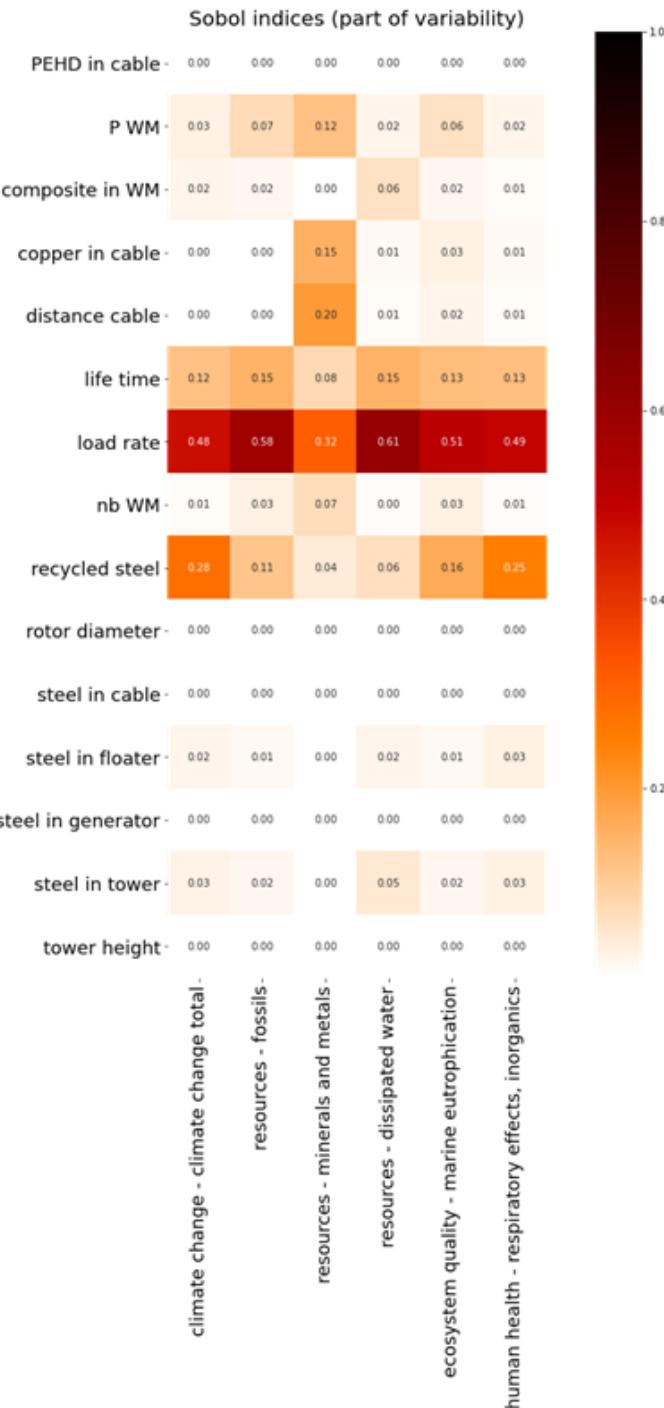
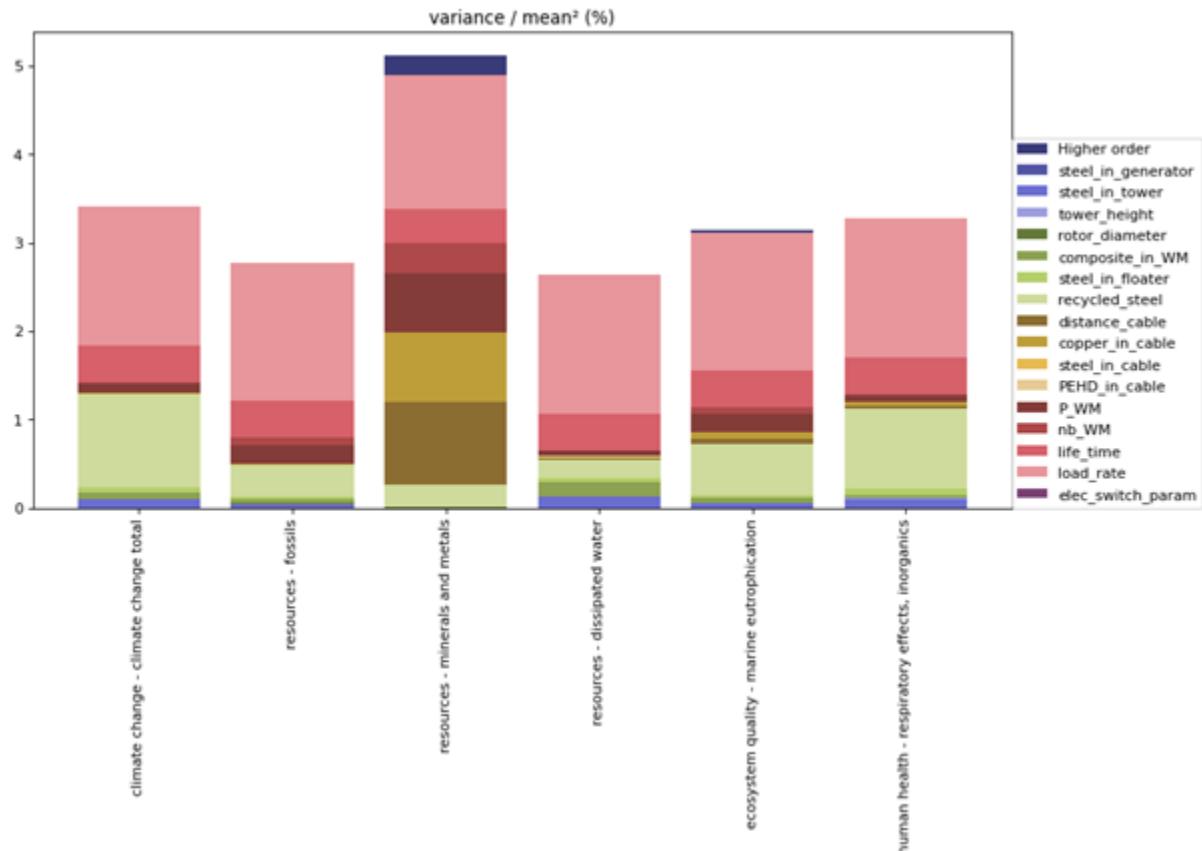


Figure 28 : Résultats de l'analyse de sensibilité globale (indices de Sobol) sur les impacts environnementaux d'un kWh d'électricité produit par éolien flottant

La Figure 29 présente la variance de chacun des six indicateurs d'impacts environnementaux ainsi que la contribution de chacun des paramètres à cette variance. Cette représentation est complémentaire de celle présentée en Figure 28 puisque non seulement les contributions des paramètres sont visibles mais en plus on y voit la variance absolue de chaque indicateur. Cela permet notamment de se rendre compte que l'indicateur ressources minérales et minières est bien plus variable que les autres indicateurs.

On constate ici aussi la prépondérance du paramètre facteur de charge, qui est en quelques sortes le taux de production de l'installation, et de la durée de vie dans une moindre mesure, sur tous les indicateurs d'impacts puisqu'ils définissent la quantité d'électricité produite au cours de la vie de l'installation.

On retrouve aussi ici que le paramètre part d'acier recyclé est plus ou moins prépondérant selon la catégorie d'impact considérée, et que le paramètre puissance nominale est finalement assez peu impactant sur l'ensemble des indicateurs.



6.5. Génération de modèles paramétrés simplifiés pour l'éolien flottant

Sur la base de l'étude de sensibilité globale, des modèles paramétriques simplifiés ont été développés qui permettent d'estimer les impacts environnementaux de façon plus rapide et plus aisée que le recours à un modèle ACV complet.

Ces modèles ont été obtenus en fixant à 90% le niveau de précision, c'est-à-dire que les modèles simplifiés doivent expliquer au minimum 90% de la variabilité du modèle ACV.

Les modèles simplifiés sont présentés ci-dessous sous la forme d'équations relativement simples et qui ne requièrent que l'utilisation de 4 à 6 paramètres (sur les 15 paramètres totaux du modèle).

Changement climatique

$$(-0.0627 * P_WM * recycled_steel + 0.136 * P_WM - 0.0839 * recycled_steel + 0.366) / (P_WM * life_time * load_rate)$$

Ressources fossiles

$$(-0.683 * P_WM * recycled_steel + 1.96 * P_WM - 0.908 * recycled_steel + 9.57) / (P_WM * life_time * load_rate)$$

Ressources minérales

$$1.14e-7 * (12.2 * P_WM * nb_WM + 1.78 * copper_in_cable * distance_cable + 0.809 * copper_in_cable + 9.78 * distance_cable + 70.2 * nb_WM - 12.9) / (P_WM * life_time * load_rate * nb_WM)$$

Ressources en eau

$$(0.000212 * composite_in_WM - 0.00949 * recycled_steel + 9.4e-5 * steel_in_tower + 0.0371) / (life_time * load_rate)$$

Eutrophisation marine

$$(-5.2e-5 * P_WM * nb_WM * recycled_steel + 0.000126 * P_WM * nb_WM + 7.53e-5 * copper_in_cable - 5.72e-5 * nb_WM * recycled_steel + 0.00016 * nb_WM - 4.87e-5 * recycled_steel + 0.000988) / (P_WM * life_time * load_rate * nb_WM)$$

Qualité de l'air (respiratory, inorganics)

$$(-4.87e-9 * recycled_steel + 2.03e-11 * steel_in_tower + 1.15e-8) / (life_time * load_rate)$$

Validation des modèles simplifiés

En Figure 30 sont présentés les résultats obtenus avec ces modèles simplifiés ainsi que les résultats obtenus avec le modèle initial. On peut y vérifier la fidélité des modèles simplifiés par rapport au modèle de base.

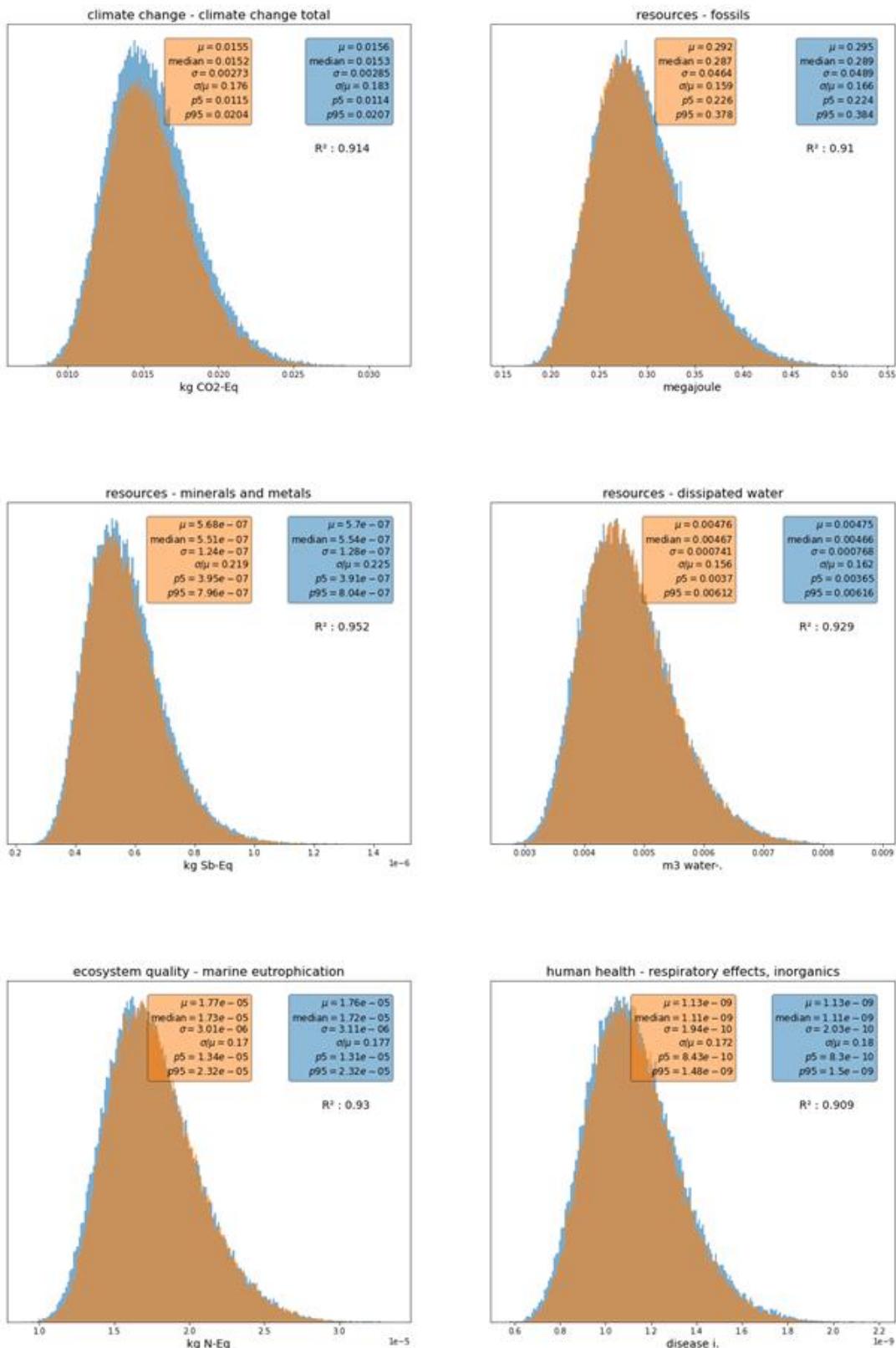


Figure 30 : Comparaison des résultats obtenus avec le modèle initial et avec les modèles simplifiés pour le bas d'éolen flottant

6.6. Conclusion sur ce cas d'étude

Ce cas d'étude a permis de tester le protocole et les outils développés dans le cadre de ce projet non seulement sur un autre objet d'étude mais aussi par un autre type d'utilisateur : un industriel du secteur de l'énergie. L'étude a permis de s'assurer que les outils sont utilisables par des experts en ACV. La partie du travail la plus compliquée s'est avérée être la définition du modèle paramétré puisqu'il requiert un certain nombre de données et/ ou d'expertise dans le domaine afin de justifier par exemple qu'un quantitatif de matériaux soit relié à un paramètre plutôt qu'à un autre, ou à une combinaison de plusieurs. De plus le cas d'étude étant basé sur une technologie encore à l'état de pilote il n'a pas été possible, dans cette première application, de généraliser à des domaines d'application plus larges que les cas proches du cas de la ferme EFGL. Cependant, une fois le modèle paramétré défini, le protocole a pu être appliqué de façon relativement aisée grâce aux fonctions fournies par la librairie de calcul `lca_algebraic`. L'application à ce second cas a permis d'améliorer certains aspects de cette librairie ainsi que du notebook qui en permet l'application.

7. Conclusion et perspectives

Les nombreuses hypothèses, la grande variabilité de certaines caractéristiques du système et les nombreuses incertitudes liées notamment à la modélisation de certains processus relevées dans les études d'ACV publiées rendent leur évaluation systématique essentielle pour contribuer au bon développement des secteurs énergétiques émergents et soutenir les décisions des parties prenantes.

Le projet INCER-ACV a produit à la fois un protocole pour la prise en compte des incertitudes et de la variabilité en ACV et son implémentation sous forme d'une librairie de calcul en langage Python. Ces outils ont été améliorés et validés grâce à deux cas d'étude menés sur des systèmes de production énergétique renouvelables : le photovoltaïque à base de silicium cristallin et l'éolien flottant.

Les outils issus du projet ont été développés avec la volonté qu'ils soient simples d'utilisation pour des acteurs académiques et industriels. Ils faciliteront aux utilisateurs de la méthode d'Analyse de Cycle de Vie (ACV) l'application de méthodes statistiques avancées pour l'analyse des effets des incertitudes et de la variabilité des paramètres d'entrée sur les résultats environnementaux des modèles d'ACV, grâce aux caractéristiques suivantes :

- un package « pédagogique » (protocole détaillé d'utilisation) ;
- des sorties très visuelles (e.g. matrices avec jeux de couleurs) ;
- l'accessibilité (librairie `lca_algebraic`, fournie en open source).

L'approche proposée permet d'évaluer la robustesse des résultats en appliquant des méthodes d'analyse de sensibilité locales, de type « one-at-time », et globales (GSA), reposant sur le calcul des indices de Sobol. L'implémentation dans la librairie `lca_algebraic` permet également d'identifier un nombre limité de paramètres clés en fonction de critères définis par l'utilisateur du protocole, compte-tenu des recommandations fournies dans le projet. Grâce à ces paramètres clés, on peut obtenir des modèles simplifiés qui permettent des estimations aisées et rapides des impacts environnementaux d'une technologie reposant sur un nombre limité de données d'entrée.

Cet outil a été co-développé par un centre de recherche académique (centre OIE) et un partenaire industriel (ENGIE). Cette approche de co-construction nous a permis de développer une solution qui répond à un problème réel identifié par l'industriel et de développer une solution adaptée à cet utilisateur. Cependant, le profil très expert des représentants d'ENGIE dans le projet n'est pas forcément représentatif de tous les utilisateurs et nous avons identifié des pistes pour rendre l'outil plus accessible et plus facile d'utilisation notamment pour d'autres types d'utilisateurs. Parmi les aspects critiques de l'application du protocole et de la librairie qui pourront être abordés dans nos recherches futures se trouvent :

- L'étape de construction du modèle, qui a été identifiée comme l'étape critique du protocole (étape longue et technique mais indispensable et déterminante pour les résultats). Nous souhaiterions donc proposer des solutions pour faciliter cette étape.
- La caractérisation des incertitudes et de la variabilité des paramètres d'entrée, qui nécessite une connaissance approfondie des systèmes analyses et une révision bibliographique exhaustive.

- Le focus du protocole sur les incertitudes et la variabilité des paramètres d'entrée liés aux procédés dits de premier plan. Il serait important dans le futur d'explorer l'application des outils développés afin de pouvoir adresser aussi les incertitudes des procédés d'arrière-plan, par exemple, pour étudier les effets des évolutions ou des choix de mix électriques différents.
- La séparation des variations liées aux incertitudes (manque de connaissances ou de représentativité du modèle) de celles liées à la variabilité (inhérente aux phénomènes affectant le système).
- L'application à d'autres filières énergétiques et d'autres secteurs industriels.

Enfin, l'utilisation de modèles d'ACV paramétrés et l'analyse de la distribution des résultats d'impact mettent en lumière l'importance des hypothèses dans l'obtention d'estimations précises. Ces hypothèses doivent tenir compte des spécificités des systèmes analysés et des évolutions technologiques, qui jouent un rôle prépondérant dans l'estimation des performances environnementales.

Références

- Alsema, E. A., & de Wild-Schoten, M. J. (2007). Reduction of the environmental impacts in crystalline silicon module manufacturing. In 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference (pp. 829-836). WIP-Renewable Energies.
- Besseau, R., Sacchi, R., Blanc, I., Pérez-López, P., 2019. Past, present and future environmental footprint of the Danish wind turbine fleet with LCA_WIND_DK, an online interactive platform. Renewable and Sustainable Energy Reviews 108, 274–288. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.030>
- Biancari, A., Palma, L.D., Ferrantelli, P., Merli, C., 2003. Ethylene Glycol Recovery from Dilute Aqueous Solution. Environmental Engineering Science 20, 103–110. <https://doi.org/10.1089/109287503763336539>
- Boulay, A.-M., Bare, J., Benini, L., Berger, M., Lathuillière, M.J., Manzardo, A., Margni, M., Motohashita, M., Núñez, M., Pastor, A.V., Ridoutt, B., Oki, T., Worbe, S., Pfister, S., 2018. The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE). Int J Life Cycle Assess 23, 368–378. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1333-8>
- Bracquene, E., Peeters, J.R., Dewulf, W., Duflou, J.R., 2018. Taking Evolution into Account in a Parametric LCA Model for PV Panels. Procedia CIRP 69, 389–394. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.103>
- Bredemeier, D., Walter, D.C., Schmidt, J., 2018. Possible Candidates for Impurities in mc-Si Wafers Responsible for Light-Induced Lifetime Degradation and Regeneration. Sol. RRL 2, 1700159. <https://doi.org/10.1002/solr.201700159>
- Centroplan, 2018. CENIQ smart flat roof mounting system [WWW Document]. URL <https://centroplan.com/en/products/mounting-system-ceniq/> (accessed 11.19.20).
- Chancerel, P., Marwede, M., 2016. Feasibility study for setting-up reference values to support the calculation of recyclability / recoverability rates of electr(on)ic products. Mathieu F, Talens Peiró, L. European Commission. Joint Research Centre. Publications Office, Luxembourg.
- Clavreul, J., Guyonnet, D., Tonini, D., Christensen, T.H., 2013. Stochastic and epistemic uncertainty propagation in LCA. Int J Life Cycle Assess 18, 1393–1403. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0572-6>
- Constantino, G., Freitas, M., Fidelis, N., Pereira, M., 2018. Adoption of Photovoltaic Systems Along a Sure Path: A Life-Cycle Assessment (LCA) Study Applied to the Analysis of GHG Emission Impacts. Energies 11, 2806. <https://doi.org/10.3390/en11102806>
- Cristóbal-Monreal, I.R., Dufo-López, R., 2016. Optimisation of photovoltaic-diesel-battery stand-alone systems minimising system weight. Energy Conversion and Management 119, 279–288. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.050>
- Cucurachi, S., Borgonovo, E., Heijungs, R., 2016. A Protocol for the Global Sensitivity Analysis of Impact Assessment Models in Life Cycle Assessment: A Protocol for the Global Sensitivity Analysis. Risk Analysis 36, 357–377. <https://doi.org/10.1111/risa.12443>
- ecoinvent, 2020. ecoinvent Database [WWW Document]. URL <https://www.ecoinvent.org/>
- European Commission - Joint Research Centre, 2017. PEFCR Guidance document - Guidance for the 14 development of Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCRs), version 6.3.
- European Commission - Joint Research Centre, 2011. ILCD Handbook-Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context. International Reference Life Cycle Data System. Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- European Commission - Joint Research Centre, 2010. ILCD handbook: general guide for life cycle assessment : detailed guidance. Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Fraunhofer ISE, 2020. Photovoltaics Report. [WWW Document]. URL <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf> (accessed 11.19.20).
- Frischknecht, R., Büsser Knöpfel, S., 2014. Ecological scarcity 2013—new features and its application in industry and administration—54th LCA forum, Ittigen/Berne, Switzerland, December 5, 2013. Int J Life Cycle Assess 19, 1361–1366. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0744-z>

Frischknecht, R., Heath, G., Raugei, M., Sinha, P., de Wild-Schloten, M., Fthenakis, V., Kim, H.C., Alsema, E., Held, M., 2016. Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity, 3rd edition. ed. IEA PVPS Task 12, International Energy Agency Power Systems Programme, Report IEA-PVPS T12-06:2016.

Frischknecht, R., Itten, R., Sinha, P., de Wild-Schloten, M., Zhang, J., Fthenakis, V., Kim, H.C., Raugei, M., Stucki, M., 2015. Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of photovoltaic systems. IEA PVPS Task 12, International Energy Agency Power Systems Programme, Report IEA-PVPS T12-04:2015.

Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H.J., Bauer, C., Doka, G., Dones, R., Hischier, R., Hellweg, S., Humbert, S., Köllner, T., Loerincik, Y., Margni, M., Nemecek, T., 2007. Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. ecoinvent report No. 3, v2.0. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Switzerland.

GaBi Solutions, 2020. GaBi [WWW Document]. URL <http://www.gabi-software.com/international/index/>

Gazbour, N., Razongles, G., Monnier, E., Joanny, M., Charbuillet, C., Burgun, F., Schaeffer, C., 2018. A path to reduce variability of the environmental footprint results of photovoltaic systems. Journal of Cleaner Production 197, 1607–1618. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.276>

Gerbinet, S., Belboom, S., Léonard, A., 2014. Life Cycle Analysis (LCA) of photovoltaic panels: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 38, 747–753. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.043>

Hetherington, A.C., Borrión, A.L., Griffiths, O.G., McManus, M.C., 2014. Use of LCA as a development tool within early research: challenges and issues across different sectors. Int J Life Cycle Assess 19, 130–143. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0627-8>

Hischier, R., Weidema, B., Althaus, H.J., Bauer, C., Doka, G., Dones, R., Frischknecht, R., Hellweg, S., Humbert, S., Jungbluth, N., Köllner, T., Loerincik, Y., Margni, M., Nemecek, T., 2010. Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. Ecoinvent report No. 3, v2.2. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Switzerland.

Horta Arduin, R., Grimaud, G., Martínez Leal, J., Pompidou, S., Charbuillet, C., Laratte, B., Alix, T., Perry, N., 2019. Influence of scope definition in recycling rate calculation for European e-waste extended producer responsibility. Waste Management 84, 256–268. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.12.002>

Huijbregts, M.A.J., 1998. Application of uncertainty and variability in LCA. Int. J. LCA 3, 273. <https://doi.org/10.1007/BF02979835>

IEA, 2019. CO₂ emissions from fuel combustion 2019. International Energy Agency.

Igos, E., Benetto, E., Meyer, R., Baustert, P., Othoniel, B., 2019. How to treat uncertainties in life cycle assessment studies? Int J Life Cycle Assess 24, 794–807. <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1477-1>

Igos, E., Benetto, E., Querini, F., 2015. Etude N° 2014-03: Les différentes sources d'incertitudes en ACV, leurs modes de calcul et impacts sur l'interprétation.

IPCC, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC, 2012. Renewable energy sources and climate change mitigation: special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, New York.

ISO 14040, 2006. ISO 14040: Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework. International Organization for Standardization. Geneva.

ISO 14044, 2006. ISO 14044: Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines. International Organization for Standardization. Geneva.

ITRPV, 2018. International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV). 9th edition. September 2018.

Jensen, J.P., 2019. Evaluating the environmental impacts of recycling wind turbines. Wind Energy 22, 316–326. <https://doi.org/10.1002/we.2287>

Jolivet, R., 2020. lca_algebraic [WWW Document]. URL https://github.com/oie-mines-paristech/lca_algebraic/

Jordan, D.C., Kurtz, S.R., 2013. Photovoltaic Degradation Rates-an Analytical Review: Photovoltaic degradation rates. Prog. Photovolt: Res. Appl. 21, 12–29. <https://doi.org/10.1002/pip.1182>

Lacirignola, M., Blanc, P., Girard, R., Pérez-López, P., Blanc, I., 2017. LCA of emerging technologies: addressing high uncertainty on inputs' variability when performing global sensitivity analysis. *Science of The Total Environment* 578, 268–280. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.066>

Lacirignola, M., Meany, B.H., Padey, P., Blanc, I., 2014. A simplified model for the estimation of life-cycle greenhouse gas emissions of enhanced geothermal systems. *Geotherm Energy* 2, 8. <https://doi.org/10.1186/s40517-014-0008-y>

Latunussa, C.E.L., Ardente, F., Blengini, G.A., Mancini, L., 2016a. Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 156, 101–111. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.03.020>

Latunussa, C.E.L., Mancini, L., Blengini, G.A., Ardente, F., Pennington, D., 2016b. Analysis of material recovery from photovoltaic panels. European Commission. Joint Research Centre. Publications Office, Luxembourg.

Li, H.-C., Chen, W.-S., 2017. Recovery of silicon carbide from waste silicon slurry by using flotation. *Energy Procedia* 136, 53–59. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.281>

Libby, C., Shaw, S., Heath, G., Wambach, K., 2018. Photovoltaic Recycling Processes, in: 2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC) (A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC). Presented at the 2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC) (A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC), IEEE, Waikoloa Village, HI, pp. 2594–2599. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2018.8547376>

Lloyd, S.M., Ries, R., 2008. Characterizing, Propagating, and Analyzing Uncertainty in Life-Cycle Assessment: A Survey of Quantitative Approaches. *Journal of Industrial Ecology* 11, 161–179. <https://doi.org/10.1162/jiec.2007.1136>

Mastrucci, A., Pérez-López, P., Benetto, E., Leopold, U., Blanc, I., 2017. Global sensitivity analysis as a support for the generation of simplified building stock energy models. *Energy and Buildings* 149, 368–383. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.022>

Mecosun, 2020. Système MV3 La solution d'intégration photovoltaïque pour le bâtiment industriel, agricole et collectif [WWW Document]. URL <http://www.mecosun.fr/fr/produits-solutions/systeme-mv3> (accessed 11.19.20).

Milà i Canals, L., Romanyà, J., Cowell, S.J., 2007. Method for assessing impacts on life support functions (LSF) related to the use of 'fertile land' in Life Cycle Assessment (LCA). *Journal of Cleaner Production* 15, 1426–1440. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.05.005>

Morris, M.D., 1991. Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments. *Technometrics* 33, 161–174. <https://doi.org/10.1080/00401706.1991.10484804>

Mutel, C., 2016. Brightway2 life cycle assessment framework.

openLCA nexus, 2020. ELCD Database [WWW Document]. URL <https://nexus.openlca.org/database/ELCD>

Padey, P., Girard, R., le Boulch, D., Blanc, I., 2013. From LCAs to Simplified Models: A Generic Methodology Applied to Wind Power Electricity. *Environ. Sci. Technol.* 47, 1231–1238. <https://doi.org/10.1021/es303435e>

Pannier, M.-L., Schalbart, P., Peuportier, B., 2018. Comprehensive assessment of sensitivity analysis methods for the identification of influential factors in building life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production* 199, 466–480. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.070>

Pianosi, F., Beven, K., Freer, J., Hall, J.W., Rougier, J., Stephenson, D.B., Wagener, T., 2016. Sensitivity analysis of environmental models: A systematic review with practical workflow. *Environmental Modelling & Software* 79, 214–232. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.008>

Posch, M., Seppälä, J., Hettelingh, J.-P., Johansson, M., Margni, M., Jolliet, O., 2008. The role of atmospheric dispersion models and ecosystem sensitivity in the determination of characterisation factors for acidifying and eutrophying emissions in LCIA. *Int J Life Cycle Assess* 13, 477–486. <https://doi.org/10.1007/s11367-008-0025-9>

Poujol, B., Prieur-Vernat, A., Dubranna, J., Besseau, R., Blanc, I., Pérez-López, P., 2020. Site-specific life cycle assessment of a pilot floating offshore wind farm based on suppliers' data and geo-located wind data. *Journal of Industrial Ecology* 24, 248–262. <https://doi.org/10.1111/jiec.12989>

Rosenbaum, R.K., Bachmann, T.M., Gold, L.S., Huijbregts, M.A.J., Jolliet, O., Juraske, R., Koehler, A., Larsen, H.F., MacLeod, M., Margni, M., McKone, T.E., Payet, J., Schuhmacher, M., van de Meent, D., Hauschild, M.Z., 2008. USEtox—the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. *Int J Life Cycle Assess* 13, 532–546. <https://doi.org/10.1007/s11367-008-0038-4>

Sacchi, R., Besseau, R., Pérez-López, P., Blanc, I., 2019. Exploring technologically, temporally and geographically-sensitive life cycle inventories for wind turbines: A parameterized model for Denmark. *Renewable Energy* 132, 1238–1250. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.020>

Seppälä, J., Posch, M., Johansson, M., Hettelingh, J.-P., 2006. Country-dependent Characterisation Factors for Acidification and Terrestrial Eutrophication Based on Accumulated Exceedance as an Impact Category Indicator (14 pp). *Int J Life Cycle Assessment* 11, 403–416. <https://doi.org/10.1065/lca2005.06.215>

Śliż-Szkliniarz, B., 2013. Energy planning in selected European regions: methods for evaluating the potential of renewable energy sources, *Regionalwissenschaftliche Forschungen*. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe.

Sobol', I.M., 2001. Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates. *Mathematics and Computers in Simulation* 55, 270–280. [https://doi.org/10.1016/S0378-4754\(00\)00270-6](https://doi.org/10.1016/S0378-4754(00)00270-6)

Sobol', I.M., 1993. Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models. *Mathematical Modelling and Computational Experiment* 1 407–414.

Spadaro, J.V., Rabl, A., 2004. Pathway Analysis for Population-Total Health Impacts of Toxic Metal Emissions. *Risk Analysis* 24, 1121–1141. <https://doi.org/10.1111/j.0272-4332.2004.00514.x>

Steinmann, Z.J.N., Hauck, M., Karuppiah, R., Laurenzi, I.J., Huijbregts, M.A.J., 2014. A methodology for separating uncertainty and variability in the life cycle greenhouse gas emissions of coal-fueled power generation in the USA. *Int J Life Cycle Assess* 19, 1146–1155. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0717-2>

Stoltz, P., Frischknecht, R., Wambach, K., Sinha, P., Heath, G., 2017. Life Cycle Assessment of current photovoltaic module recycling. IEA PVPS Task 12, International Energy Agency Power Systems Programme, Report IEA-PVPS T12-13:2018.

Tsai, L., Kelly, J.C., Simon, B.S., Chalat, R.M., Keoleian, G.A., 2016. Life Cycle Assessment of Offshore Wind Farm Siting: Effects of Locational Factors, Lake Depth, and Distance from Shore: LCA of Offshore Wind Farm Siting. *Journal of Industrial Ecology* 20, 1370–1383. <https://doi.org/10.1111/jiec.12400>

Tsai, T.-H., 2009. Pretreatment of recycling wiresaw slurries—Iron removal using acid treatment and electrokinetic separation. *Separation and Purification Technology* 68, 24–29. <https://doi.org/10.1016/j.sepur.2009.04.004>

Van Oers, L., De Koning, A., Guinée, J.B., Huppens, G., 2002. . Abiotic resource depletion in LCA. Improving characterisation factors for abiotic resource depletion as recommended in the new Dutch LCA handbook. Delft.

van Schaik, A., Reuter, M.A., 2014. Material-Centric (Aluminum and Copper) and Product-Centric (Cars, WEEE, TV, Lamps, Batteries, Catalysts) Recycling and DfR Rules, in: *Handbook of Recycling*. Elsevier, pp. 307–378. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396459-5.00022-2>

Walker, W.E., Harremoës, P., Rotmans, J., van der Sluijs, J.P., van Asselt, M.B.A., Janssen, P., Krayer von Krauss, M.P., 2003. Defining Uncertainty: A Conceptual Basis for Uncertainty Management in Model-Based Decision Support. *Integrated Assessment* 4, 5–17. <https://doi.org/10.1076/iaij.4.1.5.16466>

Wei, W., Larrey-Lassalle, P., Faure, T., Dumoulin, N., Roux, P., Mathias, J.-D., 2015. How to Conduct a Proper Sensitivity Analysis in Life Cycle Assessment: Taking into Account Correlations within LCI Data and Interactions within the LCA Calculation Model. *Environ. Sci. Technol.* 49, 377–385. <https://doi.org/10.1021/es502128k>

Weinzettel, J., Reenaas, M., Solli, C., Hertwich, E.G., 2009. Life cycle assessment of a floating offshore wind turbine. *Renewable Energy* 34, 742–747. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.04.004>

Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., Weidema, B., 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *Int J Life Cycle Assess* 21, 1218–1230. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>

Yandalux, 2011. PV-TEC Système d'intégration de générateurs photovoltaïques pour toits inclinés [WWW Document]. URL http://www.quenea.com/files/PDF-fiches/Yandalux/Yandalux_Brochure.pdf (accessed 11.19.20).

Yang, H.L., Liu, I.T., Liu, C.E., Hsu, H.P., Lan, C.W., 2019. Recycling and reuse of kerf-loss silicon from diamond wire sawing for photovoltaic industry. *Waste Management* 84, 204–210. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.11.045>

Index des tableaux et figures

Tableaux⁽ⁱ⁾

Tableau 1 : Performance environnementale en termes d'émissions de gaz à effet de serre (GES) estimées par ACV pour les différentes technologies de production d'électricité (IPCC, 2012)	8
Tableau 2 : Sélection d'indicateurs d'impact environnemental pour l'ACV dans le cadre du projet INCER-ACV.....	22
Tableau 3 : Paramètres de fabrication	25
Tableau 4 : Paramètres de transport	25
Tableau 5 : Paramètres d'installation.....	26
Tableau 6 : Paramètres de production.....	26
Tableau 7 : Paramètres de recyclage.....	27
Tableau 8 : Récapitulatif des indicateurs statistiques pour chaque catégorie d'impact considérée.....	35
Tableau 9 : Identification des paramètres clés (marqués avec un X) pour le cas d'étude du PV.....	37
Tableau 10 : Distributions définies pour les différents paramètres variables du modèle pour la filière éolienne flottante	47

Figures⁽ⁱ⁾

Figure 1 : Schéma de la méthode proposée par le projet INCER-ACV, composée d'un protocole et d'une librairie de calcul	12
Figure 2 : Etapes du cycle de vie typiques d'un système de production d'énergie	14
Figure 3 : Exemple de distribution des résultats d'impact et d'indicateurs statistiques fournis par l'outil INCER-ACV.....	18
Figure 4 : Etapes du cycle de vie du système PV et paramètres d'entrée caractéristiques de chaque étape	23
Figure 5 : Extrait de code du modèle paramétré de référence pour l'ACV du PV – exemple de modélisation de l'aluminium utilisé dans le modèle.....	24
Figure 6 : Distribution de résultats d'ACV pour la catégorie de changement climatique.....	27
Figure 7 : Distribution de résultats d'ACV pour la catégorie d'épuisement des ressources	28
Figure 8 : Distribution de résultats d'ACV pour la catégorie de qualité de l'air	28
Figure 9 : Distribution de résultats d'ACV pour la catégorie d'écotoxicité aquatique	29
Figure 10 : Distribution de résultats d'ACV pour la catégorie de toxicité humaine avec des effets cancérogènes	29
Figure 11 : Distribution de résultats d'ACV pour la catégorie de toxicité humaine avec des effets non-cancérogènes	30
Figure 12 : Distribution de résultats d'ACV pour la catégorie d'acidification.....	30
Figure 13 : Distribution de résultats d'ACV pour la catégorie d'occupation des terres.....	31
Figure 14. Distribution de résultats d'ACV pour la catégorie de déchets nucléaires	31
Figure 15: Distribution de résultats d'ACV pour la catégorie d'utilisation en eau.....	32
Figure 16 : Distribution de résultats d'ACV pour la catégorie de demande énergétique non renouvelable	32
Figure 17 : Distribution de résultats d'ACV pour la catégorie de demande énergétique renouvelable....	33
Figure 18 : Distribution de du taux de retour énergétique	33
Figure 19 : Récapitulatif des indicateurs statistiques pour chaque catégorie d'impact considérée.....	34
Figure 20 : Indices de Sobol (S1)	36
Figure 21: Exemple de validation des modèles simplifiés pour les catégories de changement climatique et d'épuisement de ressources	41
Figure 22 : Interface de l'outil en ligne pour la prise en compte des incertitudes et de la variabilité dans les résultats environnementaux du PV.....	42
Figure 23 : Les différents types d'éoliennes flottantes (source : WindPower, 2019).....	43
Figure 24: Schéma simplifié d'une installation d'éoliennes flottantes	44
Figure 25 : Schéma conceptuel du modèle paramétré développé pour le cas d'étude de l'éolien flottant	46
Figure 26: Résultats de l'analyse de sensibilité locale sur les impacts environnementaux d'un kWh d'électricité produit par éolien flottant.....	48
Figure 27 : Impacts environnementaux d'un kWh d'électricité produit par éolien flottant.....	49
Figure 28 : Résultats de l'analyse de sensibilité globale (indices de Sobol) sur les impacts environnementaux d'un kWh d'électricité produit par éolien flottant	50

Figure 29: Résultats de l'analyse de sensibilité globale (contribution à la variance) sur les impacts environnementaux d'un kWh d'électricité produit par éolien flottant.....	51
Figure 30: Comparaison des résultats obtenus avec le modèle initial et avec les modèles simplifiés pour le bas d'éolien flottant.....	53

Sigles et acronymes

ACV	Analyse de Cycle de Vie
Ag	Argent
ASG	Analyse de Sensibilité Globale
BOS	Balance of System - système d'équilibrage des systèmes
CAMS	Copernicus Atmosphere Monitoring Service
CdTe	Cadmium Telluride - tellurure de cadmium
CO2	Dioxyde de carbone
Cu	Cuivre
DW	Diamond Wiring - Sciage à diamant
FBR	Fluidized Bed Reactor
GES	Gaz à effet de serre
GWc	Gigawatts crêtes
IEA PVPS	Agence internationale de l'énergie
ITRPV	International Technology Roadmap of Photovoltaic
kWc	Kilowatt crête
kWh	Kilowattheure
LCA	Life Cycle Assessment
m2	Mètre carré
MERRA - 2	Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2
mono-Si	Monocristallin
mulit-Si	Multi-cristallin
MW	Mégawatt
NREL	National Renewable Laboratory
O.I.E	Observation, Impacts, Energie
PEFCR	Product Environmental Footprint Category Rules
PV	Photovoltaïque
R&D	Recherche et Développement
RER	Europe
RoW	Reste du monde - Rest of the world
RP	Ratio de Performance
SER	Système Energie Renouvelable
SiC	Silicon Carbide
TEG	Triethylene glycol
tkm	tonne kilomètre
UE	Union Européen
UF	Unité Fonctionnelle

ANNEXE 1 : Récapitulatif des livrables du projet INCER-ACV

Lot	Titre du livrable	Date de finalisation
Lot 1	1.1. Accord de consortium entre ARMINES et ENGIE	Octobre 2018
	1.2. Compte-rendu des réunions biennuelles entre les partenaires	Décembre 2020
	1.3. Organisation d'un séminaire de dissémination auprès d'un groupe d'industriels (de type SCORELCA par exemple) permettant l'appropriation de cette approche (O.I.E. + ENGIE)	Septembre 2020
	1.4. Article scientifique sur le protocole soumis dans une revue (O.I.E. + ENGIE)	Décembre 2020
	1.5. Participation à une conférence internationale avec une contribution sur l'application du protocole à une nouvelle filière ENR	Décembre 2020
Lot 2	2.1. Ensemble des inventaires pour la modélisation de la filière photovoltaïque	Août 2019
	2.2. Identification des paramètres opérationnels du PV et de leurs relations mathématiques avec les inventaires	Août 2019
	2.3. Sélection d'indicateurs environnementaux	Mars 2019
	2.4. Caractérisation des distributions des paramètres d'entrée du PV	Mai 2020
	2.5. Quantification des incertitudes pour le cas d'étude sur les impacts environnementaux sélectionnés	Mai 2020
	2.6. Identification de paramètres clés de la filière	Mai 2020
	2.7. Mise au point des modèles paramétriques simplifiés pour l'estimation de la performance environnementale à partir des paramètres clés	Juillet 2020
	2.8. Outil ENVI-PV INCER accessible en ligne	Septembre 2020
Lot 3	3.1. Cahier des charges permettant l'identification des besoins des utilisateurs	Novembre 2020
	3.2. Protocole pour l'analyse des incertitudes et la variabilité	Octobre 2020
	3.3. Librairie de fonctions de calcul	Septembre 2020
Lot 4	4.1. Définition du cas d'application à l'éolien flottant	Octobre 2020
	4.2. Implémentation des relations mathématiques additionnelles pour appliquer la librairie de fonctions de calcul du Lot 3 au cas proposé par ENGIE	Octobre 2020
	4.3. Analyse d'incertitude pour le cas d'application	Novembre 2020
	4.4. Outil pour l'estimation d'impacts environnementaux à partir des modèles simplifiés	Décembre 2020

ANNEXE 2 : Liste des contributions à la dissémination du projet. Publications et conférences

Type d'activité	Titre	Revue/Conférence	Contributeurs	Public cible* *Communauté scientifique; Industriels; Société Civile; Media	Date de réalisation
<u>Articles scientifiques</u>	Site-specific life cycle assessment of a pilot floating offshore wind farm based on suppliers' data and geo-located wind data	Journal of Industrial Ecology	Poujol B, Prieur-Vernat A, Dubrana J, Besseau R, Blanc I, Pérez-López P	Communauté scientifique internationale	06/02/20
	How far can Life Cycle Assessment be simplified? A protocol to generate simple and accurate models for the assessment of energy systems applied to geothermal energy	Environmental Science & Technology	Douziech M, Ravier G, Jolivet R, Pérez-López P, Blanc I	Communauté scientifique internationale	Soumis le 07/10/20
	Accounting for technological advancements in the life cycle assessment of photovoltaics through parameterized models	Renewable and Sustainable Energy Reviews	Besseau R, Tannous S, Clavreul J, Jolivet R, Prieur-Vernat A, Payeur M, Blanc I, Pérez-López P	Communauté scientifique internationale	En rédaction
	<i>lca_algebraic</i> : A new library to address uncertainties and variability in LCA	International Journal of Life Cycle Assessment	Jolivet R, Clavreul J, Brière R, Prieur-Vernat A, Sauze M, Blanc I, Douziech M, Pérez-López P	Communauté scientifique internationale	En rédaction
<u>Événements organisés</u>	Journée INCER-ACV: Présentation et atelier		Blanc I, Clavreul J, Douziech M, Jolivet R, Louillat S, Pérez-López P, Prieur-Vernat A, Sauze M, Schlesinger J	Industriels, communauté scientifique française/ francophone	29/09/20
<u>Conférences</u>	Geolocated life cycle assessment models to evaluate the environmental performance of emerging renewable energy technologies: Application to floating offshore wind farms	SETAC Europe Réunion Annuelle 2019, Helsinki	Pérez-López P, Poujol B, Dubrana J, Prieur-Vernat A, Besseau R, Blanc I	Communauté scientifique internationale	29/05/19
	A parameterized model for the estimation of life-cycle environmental impacts of crystalline PV systems	EU PVSEC 2019, Marseille	Tannous S, Besseau R, Prieur-Vernat A, Clavreul J, Payeur M, Blanc I, Pérez-López P	Communauté scientifique internationale	11/09/19
	Site-specific life cycle assessment of a pilot floating offshore wind farm based on suppliers' data and geo-located wind data	Webinaire: Emerging technologies in LCA	Pérez-López P	Communauté scientifique internationale	01/07/20
	Presenting <i>lca_algebraic</i> : Bringing symbolic calculus to Brightway2 for parametric inventories, global sensitivity analysis and generation of simplified models.	Brightcon	Jolivet R	Communauté scientifique internationale	20/10/20
<u>Revues de divulgation</u>	Avec Incer-ACV, les incertitudes font leur entrée dans l'analyse de cycle de vie	Industrie & Technologies: https://www.industrie-techno.com/article/avec-incer-acv-les-incertitudes-fonctionnent-dans-l-analyse-de-cycle-de-vie.61884	Clavreul J, Jolivet R, Pérez-López P, Schlesinger J	Industriels français	01/10/20

ANNEXE 3 : Journée INCER-ACV, un outil pour la prise en compte des incertitudes en ACV : Présentation et atelier - 29/09/2020

Une journée technique sur l'outil INCER-ACV a été organisée le 29 Septembre 2020. Cet événement a été organisé à l'initiative des partenaires du projet INCER-ACV :

- [MINES ParisTech & ARMINES](#), Centre de recherche Observation, Impacts, Energie ([O.I.E.](#))
- [ENGIE Lab Crigen](#), Lab Environnement et Société

avec le soutien de l'[ADEME](#) et en partenariat avec les deux réseaux [EcoSD](#) et [SCORELCA](#).

Cet événement, initialement prévu en présentiel, a été entièrement dématérialisé compte tenu du contexte sanitaire.

Déroulé de la journée et cibles

La journée a été scindée en deux parties :

- Une matinée avec des présentations et échanges sur :
 - Les enjeux des incertitudes des ACV pour l'industrie et les pratiques actuelles pour la prise en compte de ces incertitudes dans les ACV
 - L'outil INCER-ACV avec deux cas d'applications à une centrale photovoltaïque et un parc éolien flottant avec le retour d'expérience d'ENGIE en tant qu'utilisateur de l'outil
- Une après-midi avec un atelier pratique pour prendre en main l'outil à partir d'un cas d'étude simple (via un outil notebook).

Le contenu de la journée étant assez technique, les cibles visées pour cet atelier étaient en priorité des professionnels de l'ACV, qui sont les potentiels utilisateurs de l'outil, à savoir :

- Des entreprises industrielles ;
- Des bureaux d'études ;
- Des acteurs académiques.

Participant.e.s et leurs retours

Participant.e.s à la matinée :

- Nombre : 50 à 60 participant.e.s connecté.e.s tout au long de la matinée (sans compter les organisateurs),
- Profil : 50% d'industriels/bureaux d'études et 50% d'acteurs académiques.

Participant.e.s à l'après-midi :

- Nombre: 14 participant.e.s,
- Profil : 3 industriels, 2 bureaux d'études, 9 académiques.

Retour des participant.e.s :

Nous avons fait un questionnaire de satisfaction diffusé après l'atelier avec un relativement bon taux de réponse (50%) :

- 29 réponses sur la matinée avec 60% de retours « très satisfait » et 40% de retours « Plutôt satisfait »,
- 8 réponses pour l'atelier de l'après-midi avec 6 retours « très satisfait », 1 retour « plutôt satisfait » et un retour « peu satisfait ».

L'organisation de la journée en partenariat avec deux réseaux professionnels de l'ACV (EcoSD et scoreLCA) nous a permis de diffuser cet événement auprès d'un grand nombre d'acteurs socio-économiques (industriels, bureaux d'études...) et académiques qui utilisent l'ACV.

Indicateurs de succès de l'événement :

- nombre de participants élevé (plus de 50 à la matinée) ;
- événement assez interactif avec des questions posées par les participants tout au long de la journée ;
- retours très positifs des participants dans le questionnaire de satisfaction.

Nous aurions souhaité avoir plus de participants industriels ou bureaux d'études à l'atelier de l'après-midi. Le format (sur une journée complète) était sûrement moins adapté aux acteurs industriels et bureaux d'études. Nous étudions la possibilité d'organiser un atelier additionnel de formation à l'outil INCER-ACV.

Impacts de cette journée

- Transfert de connaissance des académiques vers les acteurs socio-économiques : sensibilisation sur la problématique de la prise en compte des incertitudes en ACV, diffusion de l'outil INCER-ACV auprès d'utilisateurs potentiels, formation de 14 acteurs à l'utilisation de l'outil.
- Amélioration de l'outil INCER-ACV : meilleure identification des utilisateurs et obtention de retours utilisateurs sur l'utilisation de l'outil développé par OIE pour le faire évoluer (démarche innovation qui prend en compte les retours des utilisateurs).
- Mise en visibilité des partenaires (centre OIE, ENGIE) et du financeur (ADEME) : Mise en avant d'un projet d'innovation développé en collaboration entre un acteur académique et un acteur industriel avec le soutien financier d'une institution. Cette mise en visibilité a été faite :
 - o Auprès des professionnels de l'ACV invités à l'événement et présents à la journée,
 - o Sur les réseaux sociaux (posts sur twitter et LinkedIn),
 - o Dans la presse : via la publication d'un [article](#) dans la revue Industrie & Technologie (<https://www.industrie-techno.com/article/avec-incer-acv-les-incertitudes-font-leur-entree-dans-l-analyse-de-cycle-de-vie.61884>).
- Développement de partenariats entre le centre OIE/ENGIE et les acteurs socio-économiques : mise en visibilité de l'expertise du centre OIE auprès des acteurs socio-économiques et renforcement de la présence du centre OIE et d'ENGIE auprès des réseaux EcoSD et ScoreLCA.

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique -, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions. À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME

FAITS ET CHIFFRES



L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.

CLÉS POUR AGIR



L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.

ILS L'ONT FAIT



L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.

EXPERTISES



L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard

HORIZONS



L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.

PROJET INCER-ACV RAPPORT FINAL

Résumé Le projet INCER-ACV, soutenu par l'ADEME dans le cadre de l'appel « Energie Durable », vise à contribuer à la consolidation des méthodes de quantification d'impacts environnementaux compte-tenu des possibles variations des paramètres d'entrée par rapport à des scénarios moyens.

Ce projet, porté par un consortium composé du centre O.I.E., commun à MINES ParisTech et ARMINES, et du centre Engie Lab CRIGEN du Groupe ENGIE, a pour but de développer un protocole standard pour analyser les effets de la variabilité et les incertitudes des données d'entrée utilisées dans une ACV sur les résultats de performance environnementale et de fournir aux acteurs industriels les outils pour une implémentation du protocole. L'approche proposée vise à obtenir un protocole méthodologique et opérationnel qui n'existe pas actuellement. Les méthodes et les outils développés au sein du projet pourront être appliqués aux filières énergétiques ainsi qu'à d'autres secteurs d'activité.

Ce document décrit le développement de l'outil INCER-ACV, présenté sous la forme d'une librairie de fonctions de calcul et d'un protocole standard pour guider les utilisateurs pas-à-pas dans l'implémentation des algorithmes, ainsi que son application à deux cas d'étude de filières énergétiques, à savoir, le photovoltaïque et l'éolien flottant.

Rapport final du projet INCER-ACV pour le développement de la méthode de prise en compte des incertitudes dans les paramètres d'entrée lors de l'ACV de filières énergétiques

