

# ANALYSE DU CYCLE DE VIE DE CAS D'USAGES DE DEVELOPPEMENT DE STOCKAGE D'ELECTRICITE

---

Approvisionnement en électricité  
d'un site isolé – exemple du  
village de Kaw en Guyane

---



**EXPERTISES**

**RAPPORT FINAL**

Octobre 2025

# REMERCIEMENTS

Elisabeth LEMAIRE (CEA Liten)  
Yves-Marie BOURIEN (CEA Liten)  
Vincent LALY (ATEE)

## CITATION DE CE RAPPORT

Sacher Pierre (ADEME), Sauze Marie (ADEME), Chammas Maxime (Artelys), Fourniols Batiste (Artelys), Gruet Quentin (Artelys), Charles Cécile (Gingko21), Thébaud Frédéric (Gingko21), Teulon Hélène (Gingko21) ; 2025. ANALYSE DU CYCLE DE VIE DE CAS D'USAGES DE DEVELOPPEMENT DE STOCKAGE D'ELECTRICITE - Approvisionnement en électricité d'un site isolé – exemple du village de Kaw en Guyane. 112p.

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 : 2023AC000008

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par : ArtélyS et Gingko21

Coordination technique - ADEME : SAUZE Marie et SACHER Pierre

Direction/Service : DBER/PEPIT et DBER/SERR

# SOMMAIRE

<b>1. AVANT-PROPOS .....</b>	<b>6</b>
<b>2. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE .....</b>	<b>7</b>
2.1. Contexte de l'étude.....	7
2.2. Généralités et objectifs réglementaires.....	7
2.3. Introduction à l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) .....	8
2.4. Public visé par le rapport .....	8
2.5. Acteurs de l'étude.....	9
2.6. Comités.....	9
<b>3. CAS D'ETUDE – APPROVISIONNEMENT D'ELECTRICITE EN SITE ISOLE .....</b>	<b>10</b>
3.1. Contexte du cas d'étude .....	10
3.2. Définition du cas d'étude .....	10
3.2.1. Objectif du cas d'étude .....	10
3.2.2. Unité Fonctionnelle .....	11
3.2.3. Systèmes étudiés.....	11
3.3. Description du village de Kaw et de ses caractéristiques.....	11
3.4. Description des technologies de production et de stockage d'électricité.....	12
<b>4. MODELISATION DU SYSTEME ELECTRIQUE.....</b>	<b>14</b>
4.1. Construction des courbes de charge .....	14
4.2. Dimensionnement des actifs de production et de stockage en entrée de modélisation	
16	
4.2.1. Profil de production du photovoltaïque .....	16
4.2.2. Courbe d'efficacité du générateur diesel .....	17
4.2.3. Caractéristiques de la batterie pour les systèmes.....	18
4.2.4. Système SI 1 : Production d'électricité par groupe diesel .....	19
4.2.5. Système SI 2 : Production d'électricité par groupe diesel et batterie .....	20
4.2.6. Système SI 3 : Production d'électricité avec un système photovoltaïque, batterie Li-ion et groupe diesel .....	20
4.2.7. Système SI 4 : Production d'électricité par photovoltaïque et batterie.....	21
4.2.8. Système SI 5 : Production d'électricité par un système photovoltaïque, batterie Li-ion et groupe diesel limité.....	21
4.3. Résultats et analyse.....	21
4.3.1. Production d'électricité par diesel – SI 1.....	23
4.3.2. Production d'électricité par diesel et batterie – SI 2.....	23
4.3.3. Production d'électricité avec un système photovoltaïque, batterie et diesel – SI 3	
24	
4.3.4. Production d'électricité par PV et batterie – SI 4.....	25

4.3.5.	Production d'électricité avec un système photovoltaïque, batterie et diesel limité – SI 5 .....	26
4.3.6.	Limites de la modélisation.....	26
<b>5.</b>	<b>MODELISATION ACV .....</b>	<b>28</b>
<b>5.1.</b>	<b>Champ de l'étude .....</b>	<b>28</b>
5.1.1.	Objectifs .....	28
5.1.2.	Périmètre de l'étude.....	28
5.1.3.	Critère de coupure .....	28
5.1.4.	Fin de vie et règles d'allocation.....	29
<b>5.2.</b>	<b>Cadrage de la collecte de données ACV .....</b>	<b>30</b>
5.2.1.	Organisation de la collecte de données .....	30
5.2.1.1.	Les données primaires .....	30
5.2.1.2.	Les données secondaires .....	30
5.2.2.	Gestion de la qualité des données et de l'incertitude .....	31
<b>5.3.</b>	<b>Inventaires de cycle de vie .....</b>	<b>31</b>
5.3.1.	Les groupes électrogènes .....	31
5.3.2.	Les panneaux photovoltaïques .....	33
5.3.3.	Les batteries stationnaires.....	37
5.3.4.	Bâtiment.....	39
<b>5.4.</b>	<b>Limites de la modélisation ACV .....</b>	<b>40</b>
<b>5.5.</b>	<b>Evaluation de l'impact du cycle de vie.....</b>	<b>40</b>
5.5.1.	Méthode d'évaluation de l'impact .....	40
5.5.2.	Résultats pour l'ensemble du cycle de vie .....	42
5.5.3.	Identification des indicateurs pertinents.....	42
5.5.4.	Résultats comparatifs sur l'ensemble du cycle de vie par indicateur pertinent .....	43
5.5.4.1.	Changement climatique .....	44
5.5.4.2.	Formation d'ozone troposphérique.....	45
5.5.4.3.	Épuisement des ressources fossiles .....	46
5.5.4.4.	Acidification des sols et de l'eau .....	48
5.5.4.5.	Eutrophisation terrestre .....	49
5.5.4.6.	Épuisement des ressources minerais et métaux.....	51
5.5.4.7.	Effets des particules fines.....	52
5.5.4.8.	Eutrophisation eaux douce .....	54
5.5.5.	Comparaison des impacts des systèmes de SI 1 à SI 5.....	55
5.5.5.1.	Comparaison des indicateurs pertinents .....	55
5.5.5.2.	Éclairage par le Score Unique .....	58
<b>5.6.</b>	<b>Sensibilités, incertitudes et limitations .....</b>	<b>58</b>
5.6.1.	Analyses de sensibilités locales : introduction .....	58
5.6.2.	Analyses de sensibilité locales : détails des sensibilités .....	59
5.6.2.1.	Sensibilité à l'efficacité des panneaux photovoltaïques .....	59
5.6.2.2.	Sensibilité à la durée de vie des panneaux photovoltaïques .....	60
5.6.2.3.	Sensibilité à la densité énergétique de la batterie .....	61

5.6.2.4.	Sensibilité à la durée de vie de la batterie .....	62
5.6.3.	Analyses de sensibilités locales : conclusions.....	62
5.6.4.	Analyses d'incertitude.....	62
5.6.4.1.	Introduction sur les incertitudes .....	62
5.6.4.2.	Les limites des incertitudes .....	64
5.6.4.3.	Estimation des incertitudes sur les résultats globaux des 5 systèmes.....	65
5.6.4.4.	Estimation des incertitudes des Scores Uniques .....	66
5.6.4.5.	Conclusion de l'étude des incertitudes.....	68
<b>6.</b>	<b>PRINCIPALES CONCLUSIONS DE L'ETUDE.....</b>	<b>69</b>
<b>7.</b>	<b>ANNEXES.....</b>	<b>71</b>
7.1.	Annexe : Présentation d'Artelys Crystal Super Grid.....	71
7.2.	Annexe : Coûts utilisés dans la modélisation électrique.....	71
7.3.	Annexe : Méthode des Stocks en ACV.....	72
7.4.	Annexe : Analyse de la qualité des données au cadrage de l'étude .....	73
7.5.	Annexe : Nomenclature et ICV de la ferme solaire de 570kWc.....	73
7.6.	Annexe : Nomenclature et ICV de la batterie stationnaire.....	76
7.7.	Annexe : Normalisation et pondération .....	76
7.8.	Annexe : Ventilation des sources pour les catégories d'impacts pertinentes pour chaque système isolé.....	78
7.9.	Annexe : Exemple de calcul d'incertitude .....	80
7.10.	Annexe : Rapport détaillé du Comité de Revue Critique .....	81
7.11.	Annexe : Commentaires de revue critique.....	86
	<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>106</b>
	<b>INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES .....</b>	<b>108</b>
	<b>SIGLES ET ACRONYMES .....</b>	<b>110</b>

# 1. Avant-propos

Ce rapport a été élaboré par le groupement Artelys - Gingko 21 pour le compte de l'ADEME. Les conditions du contrat prévoient, sans que cela ne soit exhaustif, que le groupement n'aura aucune responsabilité :

- Concernant la façon dont le livrable est utilisé par l'ADEME ;
- Concernant les suites résultant de l'utilisation du livrable par l'ADEME ;
- Vis-à-vis de tiers exploitant le présent livrable.

Par ailleurs, les informations et conclusions qui se trouvent dans ce rapport ont été élaborées dans un contexte précis. Elles pourraient être différentes dans un autre contexte, notamment dans le cadre de l'usage d'informations et de données différentes de celles qui ont été choisies par l'ADEME.

Le lecteur du présent rapport est le seul responsable de l'usage qu'il en fera. Il ne saura tenir le groupement pour responsable des conséquences qui en découlent, notamment lors de l'usage de citations extraites de leur contexte.

Cette étude d'analyse du cycle de vie a été réalisée selon les exigences des normes suivantes :

- NF EN ISO 14040 :2006 : Management Environnemental – Analyse du cycle de vie – Principes et cadre
- NF EN ISO 14044 :2006 : Management Environnemental – Analyse du cycle de vie – Exigences et lignes directrices.

## 2. Contexte et objectifs de l'étude

### 2.1. Contexte de l'étude

Le développement des énergies renouvelables en France est un des leviers majeurs sur lesquels la France s'appuie pour atteindre les objectifs de neutralité carbone qu'elle s'est fixée pour la métropole et les territoires d'outre-mer. La production électrique d'origine éolienne et solaire photovoltaïque étant intermittente, le développement de solutions de flexibilité électrique pour gérer cette variabilité est nécessaire (amélioration de la flexibilité de la demande, développement de stockage, interconnexions, etc.).

En ce qui concerne les stockages d'électricité, différentes technologies sont en développement mais celle qui suit un développement particulièrement intense ces dernières années est le stockage électrochimique (batteries stationnaires et batteries embarquées dans les véhicules). Les batteries des véhicules électriques peuvent en effet être une source de flexibilité en fonction du mode de recharge des véhicules électriques, notamment en charge pilotée ou en véhicule-to-grid<sup>1</sup>. Des moyens de stockage permettent de stocker de l'énergie sur de plus longues durées, en passant notamment par les vecteurs hydrogène ou gaz de synthèse. Ces moyens de stockages étant encore en cours de développement à grande échelle, ils ne seront pas abordés dans cette étude.

L'objectif de limiter les émissions de dioxyde de carbone n'est pas l'unique but de la décarbonation. L'analyse de l'impact environnemental par une approche Analyse de Cycle de Vie (ACV) doit intégrer l'ensemble du système électrique, et des solutions de stockage qui se développent : les impacts propres aux systèmes de stockage, notamment des batteries, doivent être mieux compris. Cet impact est très dépendant de la géographie étudiée : d'une part le déploiement de ces solutions ne fait pas appel aux mêmes chaînes d'approvisionnement et démantèlement en métropole et dans les territoires d'outre-mer ; d'autre part, les systèmes électriques environnant varient de zones non-interconnectées de la taille d'un village à la plaque européenne interconnectée. Ils disposent chacun de leurs productions propres et spécifiques, ce qui se traduit sur les impacts que peut avoir la gestion des flexibilités sur ces systèmes.

### 2.2. Généralités et objectifs réglementaires

Ce projet a pour but d'effectuer un panorama d'études en ACV sur différents systèmes énergétiques afin d'orienter les politiques publiques et de permettre la priorisation du développement des différentes installations du système énergétique en fonction du cas envisagé et de la particularité des périmètres. Cette étude permettra également de donner des éléments comparatifs et quantitatifs à l'ADEME afin d'instruire des dossiers de projets spécifiques dès aujourd'hui.

Ce projet s'inscrit donc dans le cadre réglementaire de la Loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) qui couvre différents domaines clés de la transition énergétique et contient différentes mesures (Ministère de la transition écologique, Loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV), 2017). Ces mesures concernent notamment le développement des énergies renouvelables, l'amélioration de la performance énergétique et environnementale des bâtiments neufs ou encore des mesures favorisant le développement de transports propres. Le développement des énergies renouvelables est, en particulier, un élément central traité dans cette étude.

---

<sup>1</sup> Le véhicule-to-grid (ou charge bidirectionnelle) est une technologie qui permet à une voiture électrique de moduler sa recharge, mais également d'en fournir en retour grâce à ses batteries lorsqu'un besoin sur le réseau s'en fait sentir.

## 2.3. Introduction à l'Analyse de Cycle de Vie (ACV)

Dans le cadre de cette étude, la méthode d'évaluation des impacts environnementaux utilisée est l'Analyse de Cycle de Vie (ACV). Les ACV mises en œuvre dans cette étude sont des ACV attributionnelles réalisées en suivant les recommandations des normes ISO 14040 (ISO, 2006) et ISO 14044 (ISO, 2006). L'ACV attributionnelle est l'étude des impacts environnementaux d'un système composé des étapes du cycle de vie d'un bien ou d'un service. Cette étude se base sur le bilan des flux attribuables au système, intrants et sortants du système – c'est-à-dire ce qui est consommé et émis ou rejeté par le système. L'ACV est une méthode multi-critères et multi-étapes. Ainsi, elle tient compte de l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de vie du produit, en passant par la fabrication, les transports, la distribution, l'utilisation de produit et la maintenance ou l'entretien de celui-ci.

Une ACV se décompose en quatre phases qui consistent à :

- Définir les objectifs et le champ de l'étude : cette étape permet de définir le cadre de l'étude ;
- Réaliser l'inventaire de tous les entrants et sortants du ou des systèmes de produits : à ce stade il est important de disposer de données cohérentes et fiables ;
- Évaluer les impacts potentiels liés à ces entrants et sortants en faisant appel à une méthode d'évaluation des impacts reconnue ;
- Interpréter les hypothèses de travail, les données d'inventaire et les résultats de l'évaluation des impacts en liaison avec les objectifs et le champ de l'étude.

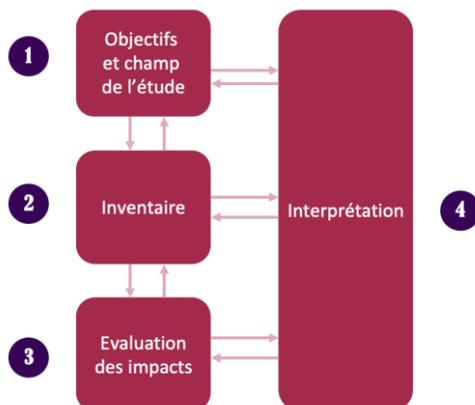


Figure 1 – Schéma d'ensemble du processus d'ACV selon les normes ISO 14040-44

L'ACV est un processus itératif et les choix effectués au cours de l'étude sont modifiés en fonction d'informations complémentaires.

Dans le cadre de cette étude, les calculs sont réalisés sous le logiciel SimaPro couplé aux bases de données d'Ecoinvent 3.10. La méthode utilisée est celle préconisée par la Commission Européenne : Environmental Footprint 3.1. ("EF 3.1") (PEFCR Guidance Document – Guidance for the Development of Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCRs) v6.3, 2018).

## 2.4. Public visé par le rapport

L'ADEME envisage une communication large des résultats de cette étude :

- Auprès des pouvoirs publics en métropole et dans les Zones Non Interconnectées ;
- Auprès des professionnels des secteurs du bâtiment, de l'industrie et des énergies Renouvelables, des filières réseaux électriques, ou des installateurs de borne de recharge rapide de véhicules électriques par exemple ;

- Ce rapport n'est pas destiné au grand public. Des documents spécifiques adaptés pour le grand public et reprenant les résultats seront préparés si le besoin s'en fait sentir.

## 2.5. Acteurs de l'étude

L'étude a été réalisée par un groupement externe à l'ADEME, constitué des acteurs suivants :

- Artelys, une société indépendante constituée en majorité de docteurs et d'ingénieurs en mathématiques appliquées ou dans le domaine de l'énergie et l'économie de l'énergie. Artelys appuie les acteurs privés, régulateurs, collectivités territoriales, ministères et agences de l'énergie ainsi que la Commission Européenne pour des études d'investissement ou pour évaluer l'impact de politiques énergétiques et environnementales.
- Gingko 21 est un cabinet de conseil en ACV et éco-innovation fondé par Hélène Teulon en 2005. Il compte aujourd'hui une quinzaine de consultants. Sa mission est d'accompagner les entreprises et les organismes dans leur transition vers l'économie de demain, en fournissant notamment des services de mesure de la performance environnementale. L'entreprise intervient dans tous les secteurs, aussi bien auprès de grands groupes que de PME et de start-ups. Gingko 21 s'appuie sur une expérience de plus de 30 ans dans le domaine de l'évaluation environnementale et de l'ACV.

## 2.6. Comités

Un comité technique (COTECH) a été mis en place afin de suivre le projet, sur les aspects de collecte de données (orientations, arbitrages), de choix des hypothèses et d'expertises dans les domaines d'étude. Les membres du comité technique sont :

- Le Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux du Commissariat à l'Energie Atomique (CEA-Liten)
- L'Association Technique Energie Environnement (ATEE)
- L'Association nationale pour le développement de la mobilité électrique (AVERE)
- EDF SEI

Le comité technique s'est réuni à deux reprises :

- Réunion de lancement du comité technique le 14 mars 2024 ;
- Réunion intermédiaire du comité technique le 25 juin 2024

Suivant les normes ISO 14040-44 et ISO 14071 en vue d'assertions comparatives destinées à la publication, l'étude a été soumise à une revue critique par un comité dont les membres sont indépendants du commanditaire et des réalisateurs de l'étude. Cette revue critique menée par des experts du domaine est un gage complémentaire de la fiabilité et de l'objectivité des résultats de l'étude.

Elle permet de vérifier que les choix méthodologiques, les hypothèses, l'interprétation des résultats respectent les objectifs de l'étude et que la transparence et la complétude du rapport d'ACV respecte les normes précitées.

Le comité de revue critique fait appel à des experts indépendants de l'étude. Selon la norme, il est composé

- D'experts ACVistes :
  - Delphine Bauchot, président le panel et coordonnant la revue critique, et
  - Guillaume Audard, expert ACViste, tous deux du bureau d'étude Solinnen ;
- D'experts Métier/Industrie :
  - France Jonathan, experte en stratégie carbone pour PINK Strategy, et
  - Hubert Gentou, expert dans les marchés de l'énergie, notamment la gestion des risques marché, actif chez ZE Energy.

Le rapport a été revu dans le détail afin de vérifier la cohérence des hypothèses avec la réalité du marché et des pratiques des systèmes de l'énergie.

Le rapport de revue critique complet est en annexe 7.11.

## 3. Cas d'étude – Approvisionnement d'électricité en site isolé

### 3.1. Contexte du cas d'étude

Avec l'électrification massive des usages, l'accès à l'électricité est un enjeu crucial. En France, certaines zones dites sites isolés ne sont pas reliées au réseau de distribution d'électricité. S'il existe quelques zones de ce type en métropole (notamment en haute montagne), ce nombre augmente fortement en outre-mer où de nombreux villages reculés ne sont pas connectés au réseau. Dans ces villages, des solutions fiables doivent être apportées pour produire l'électricité nécessaire aux besoins des habitants. Historiquement, cette production d'électricité repose sur des sources d'énergies fossiles, notamment des groupes électrogènes diesel qui possèdent des atouts non négligeables : installation rapide, fiabilité d'utilisation, pilotabilité. Cependant, des inconvénients notables sont aussi présents : coût du diesel élevé lié aux contraintes d'acheminement, pollution sonore, émissions de polluants atmosphériques, raréfaction des ressources fossiles, pollutions des sols et de l'eau. Ces territoires étant reculés, ils sont très souvent dans des zones riches en biodiversité. Rendre plus vertueuse la production d'électricité tout en assurant la continuité du service est donc un enjeu pour ces zones. Enfin, le verdissement de la production d'électricité dans les zones non interconnectées comme en Guyane, s'inscrit dans une transition énergétique française globale.

### 3.2. Définition du cas d'étude

#### 3.2.1. Objectif du cas d'étude

L'objectif de ce cas est d'étudier l'impact environnemental de plusieurs options pour l'approvisionnement en électricité d'un site isolé : option fossile, renouvelable ou hybride. Pour cela, le système électrique d'un **site isolé en Guyane** est modélisé et simulé avec le logiciel Artelys Crystal Super Grid, dont les résultats sont les entrées d'un modèle d'Analyse de Cycle de Vie du système. Les sorties de l'ACV permettent de quantifier, indicateur par indicateur, les impacts environnementaux des options d'approvisionnement en électricité du site isolé considéré.

Le but de l'évaluation est l'étude de l'influence des systèmes de production et de stockage d'électricité sur le bilan environnemental dans le cas de la fourniture d'un site isolé, avec l'ambition d'obtenir des conclusions générales pour des villages isolés situés relativement proche de l'équateur, avec peu de saisonnalité. Le cas de Kaw est apparu adapté comme modèle d'étude, du fait des détails disponibles, de sa visibilité<sup>2</sup> et de son climat qui peut être retrouvé dans d'autres sites isolés français avec peu de saisonnalité météorologique. Par conséquent, l'étude ne tient pas compte des spécificités de ce site isolé qui le différencient (par exemple, la localisation dans une réserve naturelle, dans un territoire de marais ou l'absence de route pour le transport des derniers kilomètres).

---

<sup>2</sup> La CRE communique sur le site de Kaw avec un rang de « démonstrateur » sur <https://www.cre.fr/documents/fiches-demonstrateurs-smartgrids/centrale-hybride-de-kaw.html> (fév. 2025)

## 3.2.2. Unité Fonctionnelle

L'Unité Fonctionnelle (UF) est une unité de service, commune aux différents scénarios comparés permettant d'assurer la comparaison de solutions répondant au même service rendu.

L'unité fonctionnelle pour ce cas d'étude est définie comme :

« Fournir l'électricité sur une année type de consommation en site isolé (année 2023) ».

### Note sur l'unité fonctionnelle :

L'unité fonctionnelle est la fourniture de la demande d'électricité pour un site isolé dont les caractéristiques sont détaillées dans la suite. Les hypothèses structurantes de l'année 2023 sont reprises (volume et profils de consommation, ensoleillement, etc.). Les variations climatiques entre les années ne sont pas représentées dans cette analyse.

Les flux de référence associés, définis par la norme ISO 14040-44 comme « la mesure des extrants des processus [...] nécessaire pour remplir la fonction telle qu'elle est exprimée par l'unité fonctionnelle », vont inclure les portions **annuelles** (en fonction des durées de vie de chacun des équipements) des systèmes de production d'énergie, leur transport jusqu'au lieu d'installation, l'infrastructure nécessaire, les carburants et émissions afférents au fonctionnement, ainsi que le démantèlement et le traitement des déchets en fin de vie.

## 3.2.3. Systèmes étudiés

Les différents systèmes qui sont comparés dans ce cas sont :

- SI 1<sup>3</sup> : La production d'électricité par **groupes diesel**
- SI 2 : La production d'électricité par **groupes diesel avec batterie Li-ion**
- SI 3 : La production d'électricité par **panneaux photovoltaïques (PV) avec batterie Li-ion**
- SI 4 : La production d'électricité par **panneaux PV avec batterie Li-ion et groupe diesel**
- SI 5 : La production d'électricité par **panneaux PV avec batterie Li-ion et groupe diesel (variante avec diesel limité)**

Chacun de ces systèmes doit répondre à la demande d'électricité sur une année pour un site isolé en Guyane.

Le site isolé choisi pour la modélisation est le village de Kaw situé au nord de la Guyane. Le site du village de Kaw est un site particulièrement isolé. Situé au cœur de la réserve naturelle des marais de Kaw, il est uniquement accessible par la rivière à l'aide d'embarcations (canot, pirogue...). Le choix de ce village est porté par la disponibilité des données de consommation ainsi que par l'existence d'un projet pilote visant à garantir la production d'électricité en autonomie à l'aide de panneaux photovoltaïques et de batteries plomb-acide suppléées par des groupes électrogènes. L'extrapolation des résultats obtenues à d'autres sites isolés devra se faire avec prudence en tenant compte notamment des conditions climatiques et des volumes de consommations.

## 3.3. Description du village de Kaw et de ses caractéristiques

Le village de Kaw est situé dans la commune de Régina, en territoire de la réserve naturelle des marais de Kaw. Le village compte environ une cinquantaine d'habitants en 2022 (France Télévisions, 2022). Dans le

---

<sup>3</sup> « SI » pour « Site Isolé »

village, une agence postale, une école, une église, un restaurant, un dispensaire et un foyer rural sont présents. L'activité principale des habitants est la pêche, la chasse et le tourisme.



(Marais de Kaw, 2020)



Source : Wikipédia

Figure 2 – Localisation du village de Kaw

Figure 3 – Photo aérienne du village de Kaw

### 3.4. Description des technologies de production et de stockage d'électricité

Afin de répondre à la demande et d'assurer la consommation en électricité sur l'année 2023, différents systèmes sont étudiés. Une synthèse des systèmes étudiés est réalisée dans le tableau ci-dessous.

Systèmes	SI 1 GE	SI 2 GE + Batterie	SI 3 PV + Batterie + GE	SI 4 PV + Batterie	SI 5 PV + Batterie + GE (limité)
<b>Groupe diesel</b>	2 groupes électrogènes diesel de 80kVA	2 groupes électrogènes diesel de 80kVA	2 groupes électrogènes diesel de 80kVA	1 groupe électrogène diesel de secours de 80 kVA	2 groupes électrogènes diesel de 80kVA. La consommation de diesel est limitée à 4 000 L
<b>PV</b>	-	-	Dimensionnement actuel (100 kWc)	Dimensionnement optimisé	Dimensionnement optimisé
<b>Batterie</b>	-	Dimensionnement optimisé	Dimensionnement actuel (1,25 MWh)	Dimensionnement optimisé	Dimensionnement optimisé

Tableau 1 – Description des 5 systèmes étudiés

Le système de production **SI 1 GE** correspond à la solution historiquement utilisée pour produire de l'électricité dans un site isolé. Deux groupes électrogènes sont utilisés afin d'assurer une production d'électricité même en cas de panne ou de maintenance de l'un des deux groupes.

L'analyse du système **SI 2 GE + Batterie** permet d'évaluer l'intérêt de l'ajout d'une batterie pour permettre au groupe diesel de fonctionner moins longtemps et plus proche de sa puissance nominale et ainsi maximiser son efficacité. L'efficacité de production du groupe diesel dépend en effet de la puissance à laquelle il est appelé. Plus cette puissance est proche de la puissance nominale, plus l'efficacité est grande (Bernard Multon, 2011). La puissance et la capacité de la batterie sont quant à eux optimisées de manière disjointe sans contrainte sur le nombre de cycles journaliers pouvant être effectués. La puissance et la capacité de la batterie constituent ainsi des résultats de l'étude et sont présentés dans la *section 4.3 – Résultats et analyse*.

Le système **SI 3 PV + Batterie + GE** est le système qui est actuellement utilisé dans le village de Kaw. Le photovoltaïque se développe de plus en plus dans les zones non interconnectées comme la Guyane, en particulier dans les sites isolés (7 centrales photovoltaïques ont été installées depuis 2006 en Guyane (L'ADEME en Guyane, 2022)). Le photovoltaïque possède divers avantages économiques et environnementaux notamment car son utilisation n'émet pas directement de gaz à effet de serre et polluants. La ferme solaire est complétée d'une batterie, qui permet de déphaser les productions de jour sur la nuit et de lisser les variations d'ensoleillement. Néanmoins le dimensionnement du système ne permet pas de répondre aux périodes de forte consommation ou de faible ensoleillement. Des groupes électrogènes sont alors ajoutés pour détendre la contrainte du système et garantir la production. Deux sont installés à Kaw pour une redondance en cas de panne ou maintenance. Les batteries considérées dans l'analyse sont des batteries Lithium-Ion car c'est aujourd'hui la solution de stockage la plus répandue dans les zones non interconnectées et les sites isolés (ADEME, Vers l'autonomie énergétique des ZNI, 2020), même si la batterie aujourd'hui utilisée à Kaw est une batterie plomb-acide.

L'objectif du système **SI 4 PV + Batterie** est d'étudier la pertinence environnementale d'un système énergétique qui apparaît comme non consommateur de ressources fossiles. Afin de se rapprocher le plus possible d'un cas réel, un générateur de secours reste inclus dans ce système. Ce générateur n'intervient pas dans la production d'électricité mais est pris en compte dans la modélisation ACV. La puissance et la capacité de la batterie sont quant à eux optimisées de manière disjointe sans contrainte sur le nombre de cycles journaliers pouvant être effectués. La puissance et la capacité de la batterie constituent ainsi des résultats de l'étude et sont présentés dans la *section 4.3 - Résultats et analyse*.

L'objectif de l'analyse du système **SI 5 PV + Batterie + GE (limité)** est de nuancer l'analyse du précédent, en permettant au système d'utiliser les générateurs diesel pour une durée limitée, lors des périodes de forte consommation ou lorsque la production photovoltaïque est faible sur plusieurs jours. La limitation de l'utilisation à une faible quantité de diesel permet ainsi de ne pas avoir à surdimensionner les installations photovoltaïques et Batterie comme pour le système SI 4 PV + Batterie. La puissance et la capacité de la batterie sont quant à eux optimisées de manière disjointe sans contrainte sur le nombre de cycles journaliers pouvant être effectués. La puissance et la capacité de la batterie constituent ainsi des résultats de l'étude et sont présentés dans la *section 4.3 - Résultats et analyse*. Deux groupes diesels sont installés à Kaw pour une redondance en cas de panne ou maintenance.

## 4. Modélisation du système électrique

Dans cette section est détaillée la méthodologie employée pour la modélisation des systèmes électriques décrits précédemment pour Kaw en 2023. Le but de cette modélisation est d'obtenir les dimensionnements et les consommations de chacun des moyens de production ou stockage. Ces données seront ensuite utilisées dans une deuxième étape pour obtenir les impacts ACV associés à chacun des systèmes.

La modélisation des systèmes électriques se déroule en trois étapes :

- Reconstruction d'une courbe de charge pour Kaw au pas de temps horaire pour l'année 2023
- Dimensionnement des actifs de production en entrée de modélisation
- Réalisation des simulations via *Artelys Crystal Super Grid*, (voir 7.1 – Annexe : *Présentation d'Artelys Crystal Super Grid* pour une présentation du logiciel)

### 4.1. Construction des courbes de charge

La première étape des travaux a consisté à reconstruire une courbe de charge pour le village de Kaw au pas de temps horaire pour l'année 2023<sup>4</sup>. Cette construction, présentée dans la Figure 4 et décrit au paragraphe suivant, s'appuie en partie sur des données de consommation réelles du village de Kaw pour les années 2009, 2010 et 2011 fournies par l'ADEME<sup>5</sup>.

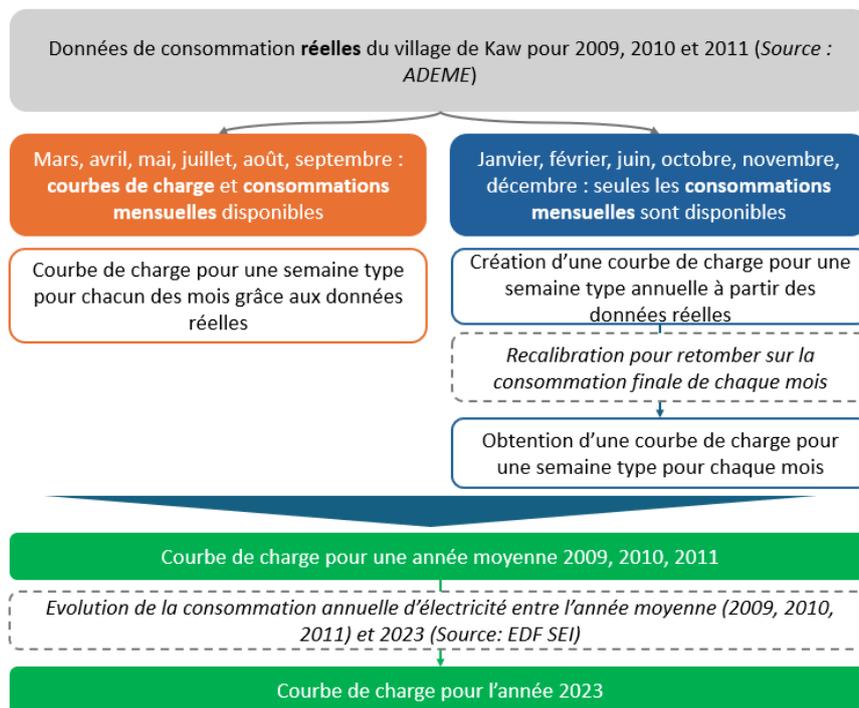


Figure 4 – Construction de la courbe de charge annuelle pour le village de Kaw en 2023

Les données fournies par l'ADEME incluent les consommations d'électricité mensuelles pour les années 2009, 2010 et 2011 mais également des données de consommations horaires pour quelques jours des mois de mars 2010, avril 2010, mai 2011, juillet 2009, août 2010 et septembre 2010. Pour ces quelques jours, les données sont disponibles au pas de temps 15 minutes, ce qui permet de les agréger pour obtenir des

<sup>4</sup> Une courbe de charge définit l'évolution de la consommation d'énergie pendant une durée fixée (1 heure, 1 minutes, 10 secondes...), elle correspond à la puissance électrique consommée pendant cette durée.

<sup>5</sup> Source : données internes de l'ADEME sur la situation énergétique du village de Kaw

données au pas de temps horaire. Ces données de consommation sont disponibles uniquement à l'échelle du village entier, ce qui ne permet pas de spécifier des consommations par type d'usage.

Pour construire les courbes de charge au pas de temps horaire d'une année moyenne 2009, 2010, 2011, des courbes de charge au pas de temps horaire pour des semaines types ont été créées à partir des données disponibles :

- Pour les mois de mars, avril, mai, juillet, août et septembre, les courbes de charge des semaines types sont construites directement à partir des données réelles fournies. Ces données fournies permettent d'obtenir des courbes de charges au pas de temps horaires pour les semaines types des mois mentionnés plus haut.
- Pour les mois de janvier, février, juin, octobre, novembre et décembre, comme les données au pas de temps horaire ne sont pas disponibles, une courbe de charge au pas de temps horaires pour une semaine type **moyenne** a été créée à partir des données des mois de mars, avril, mai, juillet, août et septembre. L'allure de la courbe de charge est transposable sur les mois manquants du fait d'une saisonnalité peu marquée en Guyane (voir Figure 5). Cela permet d'obtenir une semaine type au pas de temps horaire pour chacun des mois. Cette semaine type est ensuite recalibrée à partir de la consommation totale mensuelle (issue des données réelles des années 2009, 2010 et 2011) pour chacun des mois (i.e. janvier, février, juin, octobre, novembre et décembre) afin d'obtenir la consommation mensuelle de chaque mois conforme aux données historiques réelles.

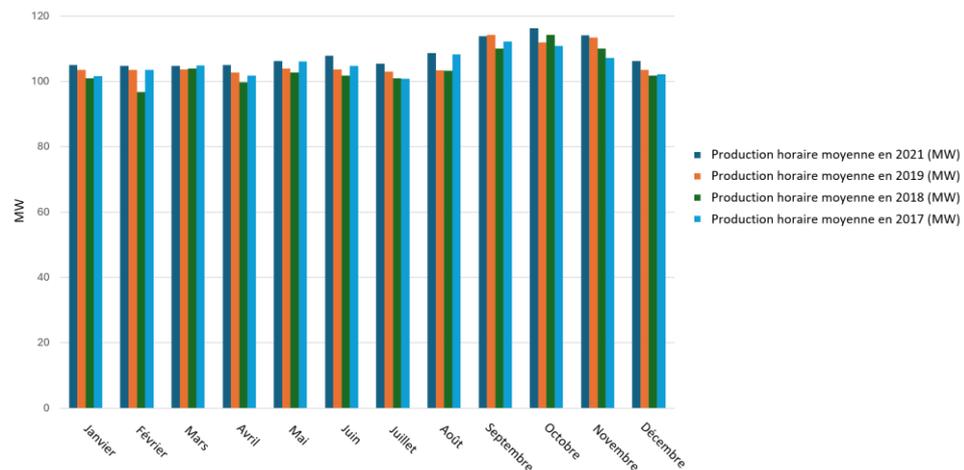


Figure 5 – Production horaire moyenne en Guyane pour les années 2017, 2018, 2019 et 2021

Ce processus permet d'obtenir une courbe de charge annuelle au pas de temps horaire pour chacun des mois de l'année pour une année moyenne 2009, 2010, 2011. Cette courbe de charge est ensuite recalibrée sur l'année 2023 grâce aux données de consommation pour le village de Kaw établies dans le Bilan Prévisionnel 2015 d'EDF SEI (EDF SEI, 2015) qui note une consommation annuelle de 169 MWh en 2023 comme le montre la Figure 6. La méthode suivie fait alors l'hypothèse que la dynamique des consommations (variation journalière et saisonnière) est restée similaire ces dernières années.

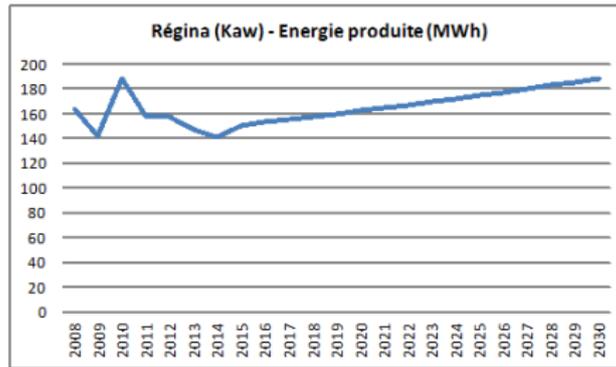


Figure 6 – Production et consommation d'électricité pour le village de Kaw (EDF SEI BP 2015)

La pointe de consommation obtenue est de 31 kW d'après la courbe de charge construite pour l'année 2023. Une partie de la courbe de charge obtenue pour le village de Kaw en 2023 est présentée en Figure 7. La courbe de charge obtenue ici ne prend pas en compte la consommation auxiliaire liée à l'installation des batteries (refroidissement, etc.), cette consommation additionnelle est détaillée en section 4.2.3 - *Caractéristiques de la batterie pour les systèmes*. La courbe de charge finale pour le village de Kaw est donc la courbe de charge présentée ici à laquelle une consommation auxiliaire de la batterie est ajoutée.

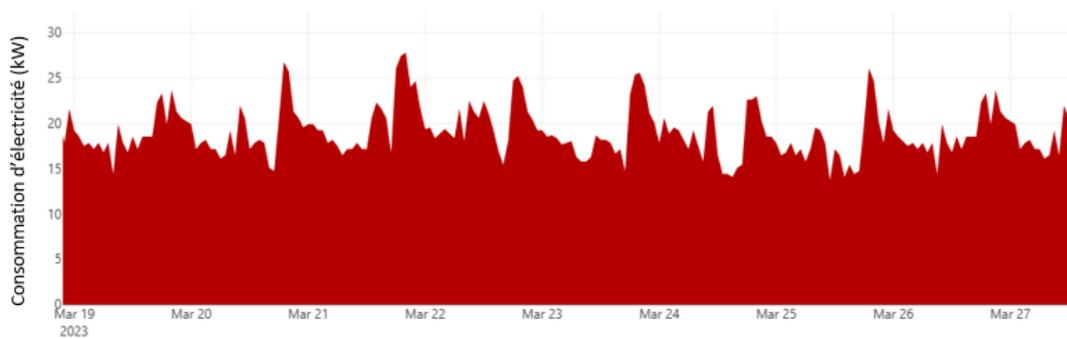


Figure 7 – Courbe de charge obtenue pour le village de Kaw entre le 19 mars et le 27 mars 2023 (sans la consommation auxiliaire des batteries)

## 4.2. Dimensionnement des actifs de production et de stockage en entrée de modélisation

Les différents systèmes qui sont comparés dans ce cas d'usage sont :

- La production d'électricité par groupes diesel SI 1
- La production d'électricité par groupes diesel avec batterie Li-ion SI 2
- La production d'électricité par panneaux photovoltaïques avec batterie Li-ion et groupe diesel SI 3
- La production d'électricité par panneaux photovoltaïques avec batterie Li-ion SI 4
- La production d'électricité par panneaux photovoltaïques avec batterie Li-ion et groupe diesel limité en volume SI 5

Dans chaque cas, le dimensionnement des actifs de production et de stockage est soit **fixé en entrée**, soit **optimisé** par le modèle, au moyen d'une optimisation économique prenant conjointement en compte les coûts d'investissement et les coûts opérationnels du système.

### 4.2.1. Profil de production du photovoltaïque

Dans tous les systèmes faisant intervenir un actif de production photovoltaïque, il est nécessaire d'estimer une courbe de disponibilité solaire afin de modéliser la production du photovoltaïque, prenant à la fois

en compte l'évolution de l'ensoleillement ainsi que les pertes énergétiques du système. Pour cela des données historiques issues de l'opendata d'EDF SEI sont utilisées. La courbe de disponibilité utilisée est construite à partir de données réelles sur la Guyane pour l'année 2019 qui est une année moyenne d'un point de vue de la disponibilité solaire moyenne. Le choix de cette année est motivé par la disponibilité des données consolidées<sup>6</sup> pour cette année et par la volonté d'avoir un cas le plus représentatif possible et qui prend en compte des niveaux d'ensoleillement divers tout au long de l'année.

Aussi, les courbes de charge construites pour le village de Kaw ne présentent pas de variabilité selon la disponibilité du photovoltaïque. Les comportements des usagers du village sont indépendants de la disponibilité du solaire. La courbe de charge du village correspond à une reconstitution de la courbe de charge de l'année 2023 à partir des données de consommation des années 2009, 2010 et 2011. Ces données de consommation étant limitées, elles ne permettent pas de connaître la part de la consommation sensible à la disponibilité solaire.

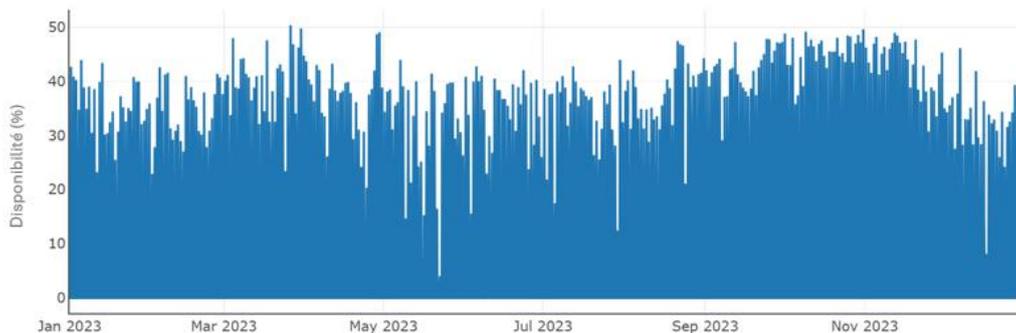


Figure 8 – Profil de production solaire en 2023 pour le village de Kaw

#### 4.2.2. Courbe d'efficacité du générateur diesel

Dans les systèmes SI 1, SI 2, SI 3 et SI 5, la consommation de diesel d'un générateur dépend de son efficacité (Bernard Multon, 2011). Un groupe électrogène fonctionnant au diesel ou au biodiesel a une efficacité qui dépend de son régime de charge : plus le générateur fonctionne à une puissance proche de sa puissance nominale, plus son efficacité sera grande.

La consommation d'un groupe électrogène en l/h est modélisable par une fonction affine :

$$C = P_n * (C_0 + K * \frac{P}{P_n})$$

- $C_0$  est un paramètre de consommation à vide du générateur, c'est-à-dire lorsqu'il tourne sans produire d'énergie. Cette valeur est issue des données réelles du village de Kaw, elle vaut 0,0825 l/kVA/h (données ADEME). Cette valeur permet de prendre en compte la surconsommation lors du démarrage et de l'arrêt des générateurs.
- $K$  indique la production d'électricité hors consommation à vide est vaut 0,246 L/kW/h dans le cas du village de Kaw (données ADEME).
- $P_n$  est la puissance nominale du générateur diesel celle-ci est fixée en entrée et vaut 80 kVA. Un facteur de puissance d'une valeur de 0,8 kW/kVA est utilisé dans l'ensemble de l'étude, ainsi un générateur de 80kVA a une **puissance nominale de 64 kW (80 kVA)**.
- $P$  est la puissance moyenne à laquelle fonctionne le générateur pendant une heure en kW.

<sup>6</sup> Lors de la réalisation de l'étude des données de production solaire horaire consolidées sont disponibles seulement pour les années 2017, 2018, 2019 et 2021.

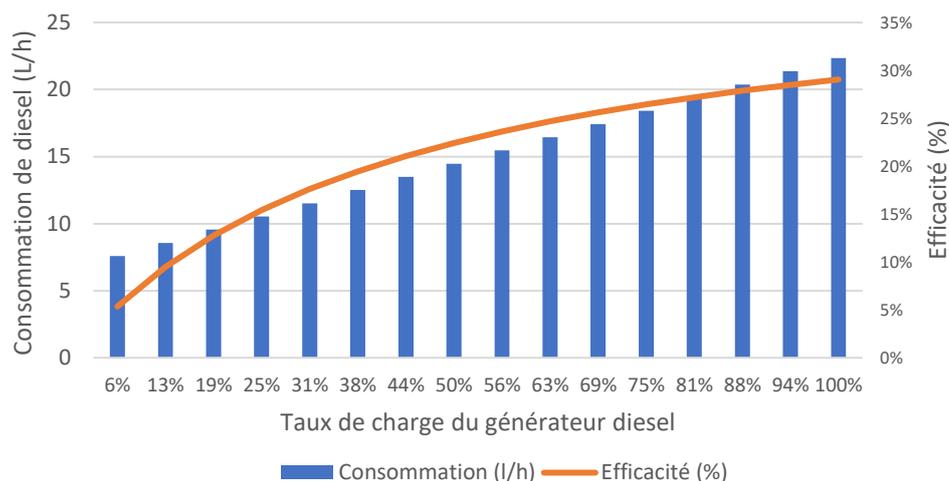


Figure 9 – Consommation et efficacité du générateur diesel en fonction de son taux de charge

Dans ce système et pour tous les systèmes faisant intervenir un générateur diesel, le calcul de la consommation horaire du générateur est effectué à partir des données de puissance de fonctionnement calculées au pas de temps horaire.

### 4.2.3. Caractéristiques de la batterie pour les systèmes

Dans l'ensemble de l'étude, les batteries ont les caractéristiques suivantes (certaines de ces données sont issues de rapports, d'autres ont pu être validées lors des différents échanges externes et en COTECH, notamment avec le CEA-Liten) :

- Les batteries Lithium-Ion comme celles utilisées dans tous les systèmes de ce cas d'étude ont une profondeur de décharge (Depth of Discharge, DoD) qui varie généralement entre 80% et 100%, même s'il est généralement recommandé de ne pas dépasser 80% afin d'assurer la pérennité de la batterie (ECOFLOW, 2023). **Dans l'ensemble de l'étude le DoD de la batterie est choisi égal à 80%** afin de modéliser un état de charge (State of Charge, SoC) de la batterie pouvant varier de 10% à 90% de sa capacité totale.
- La durée de vie des batteries Lithium-Ion est de 15 ans et 6 000 cycles<sup>7</sup>.
- La batterie a un rendement aller-retour de 85%, (NREL, 2021). Son efficacité en entrée et en sortie est de 92,2%<sup>8</sup>.
- L'état de la batterie (State of Health, SoH) se dégrade au cours du temps. Plus la batterie effectue de cycles, plus sa capacité réelle diminue. Dans l'ensemble de l'étude il est supposé qu'après 6000 cycles ou 15 années d'utilisation, la batterie à un SoH de 70%. Par conséquent, la capacité de la batterie est dimensionnée pour qu'en fin de vie (à SoH de 70%) elle puisse répondre aux consommations de Kaw, en faisant l'hypothèse d'une consommation stable. En d'autres termes, la capacité de la batterie est réhaussée de 43% afin qu'elle puisse apporter le même service en fin de durée de vie que le service apporté pour sa première année de fonctionnement (qui correspond à l'année modélisée).
- L'ajout des batteries dans les systèmes SI 2, SI 3, SI 4 et SI 5 nécessite l'ajout de systèmes auxiliaires permettant le fonctionnement optimal de ces batteries (ventilation, systèmes de refroidissement, etc.) (Rancilio, 2019). Ces systèmes auxiliaires ont une consommation qui dépend notamment de la température extérieure, et de la vitesse de charge/décharge de la batterie (C-rate). Le C-rate

<sup>7</sup> Cette durée de vie est une hypothèse conservatrice, et a été décidée lors des échanges avec les différents acteurs de l'étude, notamment le CEA-Liten lors des COTECH.

<sup>8</sup> La filière évoluant très rapidement, l'hypothèse effectuée ici est une hypothèse plutôt conservatrice, ce rendement peut également varier légèrement au cours de la durée de vie de la batterie.

correspond au rapport entre le courant de charge/décharge en kW et la capacité de la batterie en kWh. Les batteries en site isolé ont généralement des C-rate très faibles (situés entre 0 et 0,2) dus à des temps de décharge élevés. La température du village de Kaw varie entre 26 et 30 degrés au cours de l'année sans variation saisonnière notable. Les consommations auxiliaires sont ainsi calculées dans chaque système à partir de la littérature (Rancilio, 2019) et disponible dans le Tableau 2 ci-dessous. La consommation des auxiliaires est calculée à température constante (moyenne des consommations sur les valeurs 25-35°C) ainsi qu'à C-rate unique (moyenne des consommations sur les C-rate atteints en fonctionnement). Le SI 3 fonctionnant à des C-rate inférieurs (cf Tableau 3), la consommation des auxiliaires est unitairement inférieure.

Systèmes	SI 1	SI 2	SI 3 <sup>9</sup>	SI 4	SI 5
Consommation auxiliaire de la batterie (en_W/kWh_BESS)	-	2,23	2	2,23	2,23

Tableau 2 – Tableau des consommations auxiliaires des batteries pour les différents systèmes étudiés

#### 4.2.4. Système SI 1 : Production d'électricité par groupe diesel

Ce système de production d'électricité pour le village de Kaw est constitué de deux groupes diesel de 80 kVA. Ce système de production est la solution historiquement utilisée pour produire de l'électricité dans un site isolé.

Comme mentionné précédemment, un facteur de puissance de 0,8 kW/kVA est choisi pour cette étude. Par conséquent, **la puissance de chacun des deux générateurs est fixée en entrée et vaut 64 kW**. D'après la courbe de charge construite en section 4.1 – *Construction des courbes de charge*, la pointe de consommation du village étant de 31 kW en 2023 un seul générateur diesel est suffisant afin de subvenir à la demande d'électricité. Un seul générateur est donc allumé tout au long de l'année. Néanmoins, deux groupes diesel sont comptabilisés dans l'ACV afin d'assurer un secours, une production d'électricité même en cas de panne ou de maintenance de l'un des deux groupes. Ici le générateur diesel peut produire de l'électricité durant toute la journée, même pendant la nuit (ADEME, Etude stratégique sur les besoins en production électrique du bourg de Regina à l'échéance 2030, 2016).

<sup>9</sup> Dans le système SI 3, la puissance et la capacité de la batterie et la puissance de PV sont fixées en entrée du modèle. Ce système correspond au système de référence pour le village de Kaw, les puissances et capacités sont ainsi reprises des puissances et capacités réelles actuellement en service dans le village (avec une batterie Acide-Plomb au lieu d'une batterie LFP).

### Note sur le système SI 1 :

Dans le SI 1, seuls les générateurs diesel présents sur le site peuvent fournir de l'électricité. Afin de pouvoir fournir de l'électricité à n'importe quel moment de la journée, ces générateurs doivent pouvoir tourner en continu (en pratique un seul générateur tourne en continu) y compris la nuit, contrairement aux autres systèmes étudiés où les générateurs ne peuvent pas tourner sur la plage horaire 21h - 7h.

L'étude de ce système SI 1 permet néanmoins de donner un ordre de grandeur sur la quantité de diesel utilisée dans le cas « le moins favorable » permettant ainsi de mieux quantifier l'impact de l'ajout des systèmes de production additionnels (batterie, PV).

Enfin, le bruit n'est pas un impact pris en compte dans l'analyse de l'impact environnemental lors de l'ACV. Même si le bruit est un facteur décisionnel pour certains sites isolés, de nombreux sites sont, en réalité, contraints d'utiliser des générateurs diesel en continu tout au long de la journée. L'étude de ce système permet donc de généraliser l'étude à un nombre plus large de sites isolés.

## 4.2.5. Système SI 2 : Production d'électricité par groupe diesel et batterie

Ce système de production d'électricité est composé de deux groupes diesel de 80 kVA (soit 64 kW) couplés à une batterie. L'ajout d'une batterie aux groupes diesel permet aux groupes diesel de se rapprocher du point de fonctionnement optimal afin de maximiser leur efficacité comme détaillé en section 4.2.2. Comme dans le cas précédent, deux groupes électrogènes sont utilisés afin d'assurer une production d'électricité même en cas de panne ou de maintenance de l'un des deux groupes. Ici, comme dans les systèmes SI 3 et SI 5, les deux générateurs ne peuvent fonctionner que de 7h à 21h et sont éteints durant la nuit.

La capacité de la batterie est optimisée économiquement afin de minimiser le coût d'investissement et d'opération du système<sup>10</sup>. La batterie possède les mêmes caractéristiques que celles décrites en section 4.2.3. Son dimensionnement est un résultat de la modélisation avec Artelys Crystal Super Grid.

## 4.2.6. Système SI 3 : Production d'électricité avec un système photovoltaïque, batterie Li-ion et groupe diesel

Ce système est celui qui est actuellement utilisé dans le village de Kaw (à l'exception près que les batteries aujourd'hui utilisées à Kaw sont au plomb et non au Lithium-ion comme modélisé ici).

Ce système est constitué :

- D'un actif de production photovoltaïque d'une puissance de **100 kWc**
- D'une batterie Li-ion de capacité **1,25 MWh**
- De deux groupes diesel d'une puissance apparente de **80 kVA** afin de permettre de répondre aux pointes de demande. La présence de deux groupes diesel permet d'assurer une production d'électricité même en cas de panne ou de maintenance de l'un des deux groupes. Les groupes diesel peuvent seulement fonctionner de 7h à 21h et sont coupés durant la nuit pour des raisons de nuisances sonores<sup>11</sup>.

Les dimensions de tous les actifs sont ici fixées en entrée.

<sup>10</sup> Les détails concernant les coûts d'investissement des batteries et des panneaux solaires, ainsi que le coût du diesel sont présents en 7.2 - Annexe : Coûts utilisés dans la modélisation électrique

<sup>11</sup> Source : données ADEME sur la situation énergétique du village de Kaw

#### 4.2.7. Système SI 4 : Production d'électricité par photovoltaïque et batterie

Ce système de production d'électricité est un système de production photovoltaïque couplé à une batterie. La puissance du photovoltaïque installée (kWc) est une sortie de la modélisation avec Artelys Crystal Super Grid. Elle est optimisée économiquement par le modèle, tout comme la capacité et la puissance de la batterie. **Les deux équipements sont ainsi optimisés économiquement afin de minimiser le coût d'investissement et d'opération du système, avec l'objectif de répondre à l'intégralité de la demande**, même en cas de faible ensoleillement ou durant la nuit. La batterie possède les mêmes caractéristiques que celles décrites en section 4.2.3.

Un générateur de secours de 80 kVA (64 kW) est aussi présent mais n'intervient pas dans la production d'électricité au cours de l'année. Il est seulement pris en considération dans l'ACV. Ce système de production n'utilise pas directement de combustibles fossiles.

#### 4.2.8. Système SI 5 : Production d'électricité par un système photovoltaïque, batterie Li-ion et groupe diesel limité

Ce système de production d'électricité est issu d'une première évaluation des résultats de modélisation. En effet, le système 100% renouvelable ayant recours à une superficie de photovoltaïque importante pour un site isolé, le commanditaire de l'étude a souhaité réaliser un cas supplémentaire proche du scénario PV + Batterie + GE SI 3 avec une consommation de diesel limitée en quantité. Les dimensions des actifs sont les suivantes :

- Groupe diesel de 80kVA soit 64kW. **Ce groupe diesel ne peut consommer qu'un volume maximal de 4000 litres au cours de l'année.** Un second groupe est également modélisé en ACV, ce second groupe permet d'assurer une alimentation de secours.
- Système de production photovoltaïque dont la dimension est optimisée économiquement
- Batterie couplée au système photovoltaïque dont la dimension est elle aussi optimisée économiquement.

### 4.3. Résultats et analyse

Les résultats des modélisations annuelles des systèmes détaillés en section 4.2 (Dimensionnement des actifs de production) sont présentés ci-dessous. Ils représentent les dimensionnements nécessaires pour répondre aux besoins du village de Kaw pour les équipements étudiés, qui ne sont pas déjà en hypothèse d'entrée.

Ces résultats sont ensuite utilisés comme entrée pour la modélisation ACV. En particulier, les résultats utilisés en entrée de la modélisation ACV sont :

- Le dimensionnement des actifs de production : groupe diesel, batterie et PV
- La consommation de diesel au cours de l'année
- Le nombre de cycles effectués par la batterie sur une année afin d'évaluer son vieillissement et sa durée de vie

Un tableau récapitulatif des résultats obtenus dans le cas de l'approvisionnement d'électricité pour le village de Kaw est présenté ci-dessous :

Systèmes	SI 1 GE	SI 2 GE + Batterie	SI 3 GE +PV + Batterie <sup>12</sup>	SI 4 PV + Batterie	SI 5 PV + Batterie + GE (limité)
Dimensionnement groupe diesel (kVA)	2*80	2*80	2*80	80	2*80
Capacité de la batterie (kWh)	-	410	1 250	1 350	590
Puissance de la batterie (kW)	-	50	50	225	110
Puissance de PV (kWc)	-	-	100	702	273
Consommation de diesel sur l'année (litres)	99 380	82 530	47 090	0	4 000
Nombre de cycles effectués par la batterie sur une année	-	217	53	109	228
DoD maximal	-	80%	80%	80%	80%
State of Health – End of life	-	70%	70%	70%	70%
Consommation auxiliaire annuelle liée à la batterie (MWh)	-	8,0	21,9	26,4	11,5

Donnée fixée en entrée	Donnée de sortie du modèle
------------------------	----------------------------

Tableau 3 – Comparaison des résultats obtenus pour les 5 systèmes étudiés

Comme le montre le Tableau 3, la consommation auxiliaire des batteries représente une consommation non négligeable, la consommation du village hors consommation des auxiliaires étant de 169MWh (jusqu'à 16% de la consommation du village pour SI 4).

Dans chacun des systèmes, le nombre de cycles effectués par la batterie Lithium-ion est calculé de la manière suivante :

$$N_{cycles} = \frac{Production}{Capacité * Efficacité\ en\ sortie}$$

- *Production* : la production cumulée de la batterie en kWh sur l'année modélisée
- *Capacité* : la capacité de la batterie en kWh
- *Efficacité en sortie* : l'efficacité en sortie de la batterie qui est fixée à 92,2% pour tous les systèmes (voir 4.2.3 pour plus de détails).

<sup>12</sup> Dans le système SI 3, la puissance et la capacité de la batterie et la capacité de PV sont fixées en entrée du modèle. Ce système correspond au système de référence pour le village de Kaw, les puissances et capacités sont ainsi reprises des puissances et capacités réelles actuellement en service dans le village (avec une batterie Acide-Plomb au lieu d'une batterie LFP).

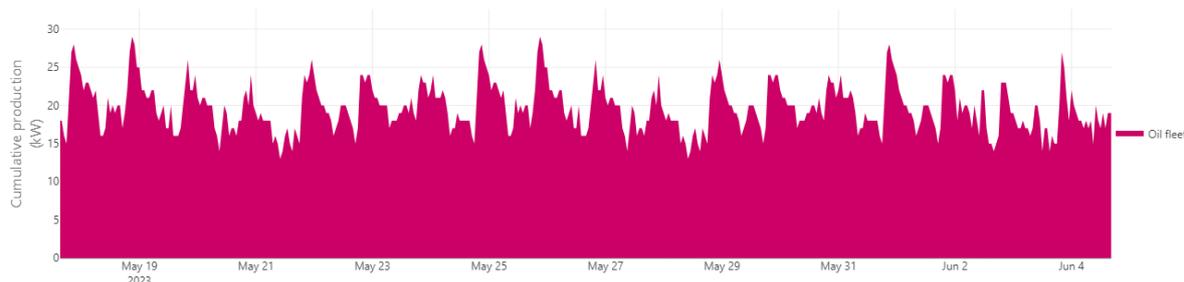
#### Note sur la prise en compte du « State of Health » :

Comme mentionné en section 4.2.3, le State of Health de la batterie diminue au fur et à mesure de l'utilisation de la batterie. Après 15 ans d'utilisation de la batterie, celui-ci atteint 70%. Afin de s'assurer que la capacité disponible de la batterie en année 15 puisse permettre de subvenir à la demande électrique du village, une première optimisation a permis d'obtenir les capacités des batteries nécessaires pour l'année 1 dans les **systèmes (SI 2), (SI 4) et (SI 5)**. Ces capacités ont ensuite été réhaussées de  $1/\text{SoH}_{\text{année15}}$  afin que la capacité de la batterie en année 15 soit suffisante pour subvenir à la demande qui est supposée restée constante.

Dans le **système PV + Batterie + GE (SI 3)**, la batterie est quant à elle surdimensionnée par hypothèse puisque la technologie de batterie modélisée ici est du li-ion alors qu'actuellement du Pb-a est utilisée : cela permet de passer d'une DoD de 40% à une DoD de 80% en gardant la même capacité. Une vérification a permis de montrer que la dégradation du SoH en fin de vie n'impacte

### 4.3.1. Production d'électricité par diesel – SI 1

Ici, les seuls actifs de production sont les groupes diesel. Deux groupes diesel sont présents sur le site, mais un seul groupe diesel est utilisé à la fois afin que celui-ci puisse fonctionner au plus proche de sa puissance nominale (la pointe de demande annuelle étant inférieure à la puissance nominale du générateur, il n'est jamais nécessaire d'allumer les deux générateurs en même temps). Les générateurs fonctionnent alors en alternance, pour équilibrer leur usure. Le générateur ne fonctionnant pas étant présent en tant que groupe de secours en cas d'avarie.



(Source : Sortie Artelys Crystal Super Grid)

Figure 10 – Production d'électricité pour le système SI 1 au cours du mois de mai

Ici le générateur diesel effectue du suivi de charge et permet donc d'alimenter le village en électricité durant les 8 760 heures de l'année. La consommation de diesel est donc très élevée et atteint près de 100 000 L. Le bruit du groupe en période nocturne peut être une nuisance pour les habitants, des technologies d'insonorisation phonique peuvent éventuellement être mises en œuvre selon la localisation du groupe électrogène par rapport au village. Cette insonorisation supplémentaire n'est ici pas modélisée, le bruit n'étant pas nécessairement une nuisance pour tous les sites isolés (voir paragraphe 4.2.44.2.5).

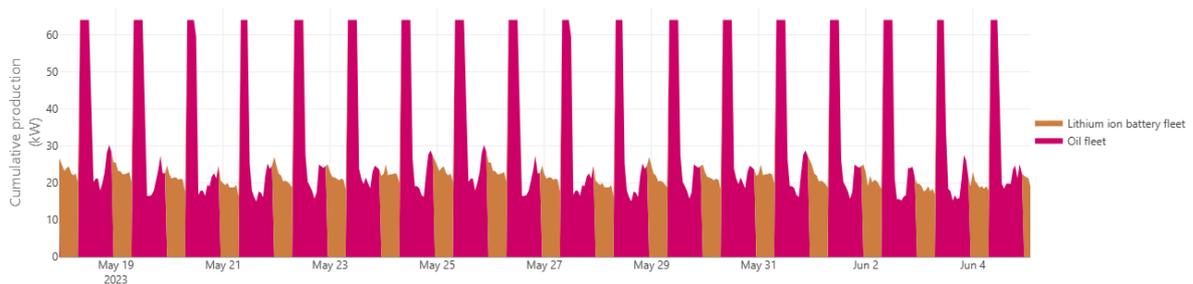
### 4.3.2. Production d'électricité par diesel et batterie – SI 2

Ce système est composé de deux générateurs diesel de 80 kVA et d'une batterie dont le dimensionnement est optimisé par le modèle. **La capacité de la batterie obtenue est de 410 kWh.** Le système fonctionne de la manière suivante :

- Dès 7h, le générateur se met en route à sa puissance nominale afin de subvenir à la demande mais aussi afin de charger la batterie (cela permet de s'assurer que la batterie sera totalement chargée à 21h). Le générateur arrête de fonctionner à sa

puissance nominale une fois que la batterie est totalement chargée. Le générateur effectue ensuite le suivi de charge jusqu'à 21h<sup>13</sup>.

- Entre 21h et 7h, la batterie prend le relais afin de subvenir à la demande.



(Source : Sortie Artelys Crystal Super Grid)

Figure 11 – Production d'électricité pour le système SI 2 au cours du mois de mai

Même si deux générateurs sont présents, un seul générateur fonctionne à la fois durant l'année. Les résultats montrent que la batterie permet une consommation de diesel près de 20% inférieure au cas où seul un groupe diesel est présent (82 000 L de diesel ici contre 100 000 L dans le cas où le groupe diesel est le seul actif de production). Cette baisse de consommation entre les deux cas s'explique par le fait que le générateur du cas diesel + batterie fonctionne plus souvent à sa puissance nominale que lorsque le générateur n'est pas accompagné par la batterie et doit faire du suivi de charge, son efficacité est donc bien meilleure. La batterie effectue près de 220 cycles complets.

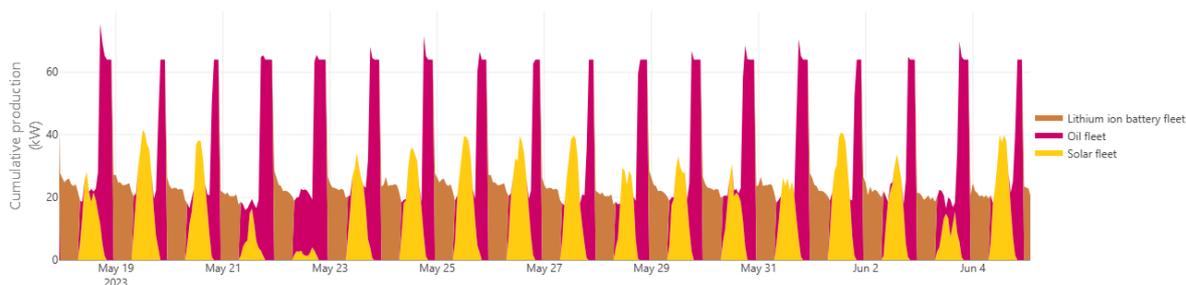
### 4.3.3. Production d'électricité avec un système photovoltaïque, batterie et diesel – SI 3

Dans ce système, les puissances installées de chacun des actifs photovoltaïques, batterie et diesel sont fixées en entrée par analogie aux paramètres du système actuellement en service à Kaw (avec une batterie Acide-Plomb au lieu d'une batterie LFP). Le système global fonctionne de la manière suivante :

- La production photovoltaïque permet d'assurer la demande électrique durant les heures de fort ensoleillement. Le surplus photovoltaïque qui n'est pas consommé est utilisé afin de charger la batterie.
- Les générateurs diesel permettent de compléter la production photovoltaïque lorsque celle-ci n'est pas assez importante pour assurer la demande généralement entre 7h et 9h et entre 18h et 21h. Ils permettent également de finaliser la charge de la batterie en début de soirée avant 21h afin que celle-ci puisse être utilisée durant la nuit<sup>14</sup>. Un seul générateur est utilisé durant toute l'année, le second n'est présent qu'en cas de maintenance ou de panne du premier. Le générateur fonctionne alors autant que possible à sa puissance nominale (64 kW).
- La batterie est donc chargée en partie grâce au photovoltaïque et en partie grâce aux générateurs diesel. Celle-ci est utilisée lorsqu'il n'y a pas de soleil et lorsque les générateurs ne peuvent pas fonctionner entre 21h et 7h.

<sup>13</sup> Pour rappel, dans les cas PV + Batterie + GE et GE + Batterie, les générateurs diesel ne peuvent fonctionner que de 7h à 21h et sont éteints durant la nuit.

<sup>14</sup> Pour rappel, dans les cas PV + Batterie + GE et GE + Batterie, les générateurs diesel ne peuvent fonctionner que de 7h à 21h et sont éteints durant la nuit.



(Source : Sortie Artelys Crystal Super Grid)

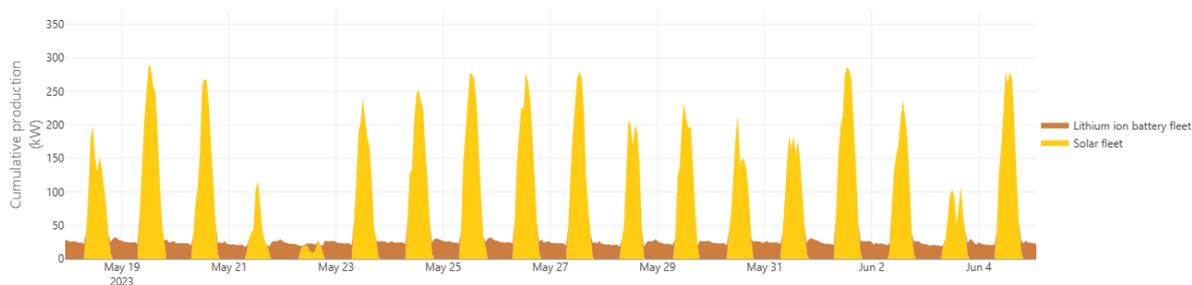
Figure 12 – Production d'électricité pour le système SI 3 au cours du mois de mai

La batterie de ce système est surdimensionnée : elle fait peu de cycles au cours de l'année (uniquement 53). Enfin une consommation de près de 47 000 L de diesel permet de subvenir à la demande électrique lors des jours avec peu d'ensoleillement ainsi que de charger la batterie pour que celle-ci puisse être utilisée la nuit.

#### 4.3.4. Production d'électricité par PV et batterie – SI 4

Ce système est composé d'un actif de production photovoltaïque et d'une batterie. Une optimisation économique et conjointe de ces deux actifs est réalisée afin d'assurer une production qui satisfait la demande durant toute l'année. Le système fonctionne de la manière suivante :

- Le photovoltaïque permet d'assurer la demande lors des fortes périodes d'ensoleillement. Au cours de ces heures, le surplus est stocké dans la batterie.
- Lorsque l'ensoleillement diminue, la batterie prend le relais afin de subvenir à la demande.



(Source : Sortie Artelys Crystal Super Grid)

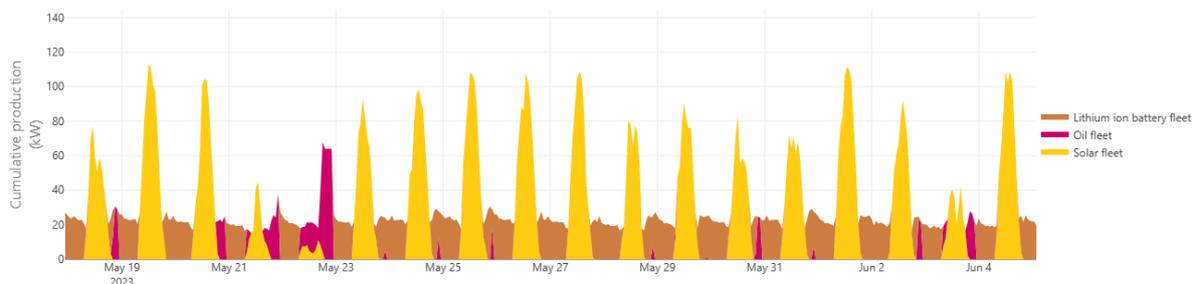
Figure 13 – Production d'électricité pour le système SI 4 au cours du mois de mai

Afin de subvenir à la demande, une puissance photovoltaïque de 702 kWc (cela correspond à une surface d'environ 3000m<sup>2</sup> en considérant des panneaux solaires ayant une puissance moyenne de 235Wc/m<sup>2</sup>) et une batterie 1,35 MWh doivent être installés. Le nombre de cycles effectués par la batterie est de 109, il se situe entre les cas SI 2 et SI 3. Pour rappel, un générateur diesel est présent en cas d'urgence mais n'intervient pas dans la production électrique, modélisée ici. Par conséquent les puissances obtenues pour le photovoltaïque et la batterie sont très importantes afin de permettre de subvenir à la demande lors de plusieurs jours avec un faible ensoleillement comme entre le 21 mai et le 23 mai sur la Figure 13. Cette quantité de panneaux solaires est le résultat d'une optimisation économique sans contraintes sur la surface disponible, celle-ci pouvant être limitante dans le cas d'un site isolé et induire des changements d'affectations des sols assez peu modélisés avec les choix méthodologiques d'ACV choisis ici.

### 4.3.5. Production d'électricité avec un système photovoltaïque, batterie et diesel limité – SI 5

Ce système est composé d'un actif de production photovoltaïque, d'une batterie ainsi que de deux groupes diesel de 80 kVA dont le volume de diesel consommé est limité (4 000 L de diesel sont disponibles par année). Un seul groupe diesel est utilisé à la fois, le second est un générateur de secours présent en cas de dysfonctionnement du premier générateur. Une optimisation économique et conjointe de la batterie et du photovoltaïque est réalisée afin de déterminer les puissances et capacités installées pour chacun de ces actifs. Le système fonctionne de la manière suivante :

- Le photovoltaïque permet d'assurer la demande lors des périodes ensoleillées. Au cours de ces heures, le surplus est stocké dans la batterie.
- Lorsque l'ensoleillement diminue, la batterie prend le relais afin de subvenir à la demande.
- Les groupes diesel sont utilisés en complément lorsque la demande est élevée ou lorsqu'il y a plusieurs jours avec un faible taux d'ensoleillement. Ils ne peuvent pas fonctionner entre 21h et 7h. Le volume de diesel disponible sur une année étant limité, le diesel n'est pas utilisé systématiquement pour recharger la batterie comme dans le cas PV + batterie + diesel décrit en section 4.3.3.



(Source : Sortie Artelys Crystal Super Grid)

Figure 14 – Production d'électricité pour le système SI 5 au cours du mois de mai

La puissance de photovoltaïque installée est de 273 kWc (ce qui correspond à une surface de plus de 1000m<sup>2</sup> en considérant des panneaux solaires ayant une puissance moyenne de 235Wc/m<sup>2</sup>), et la capacité de la batterie vaut 590 kWh. Les groupes diesel consomment la totalité des 4 000 L disponibles au cours de l'année. La capacité de photovoltaïque installée est près de 2,5 fois inférieure à la capacité de photovoltaïque installée dans le système SI 4, et celle de la batterie est près de 2,2 fois inférieure à la batterie installée dans ce même système SI 4. L'utilisation des groupes diesel, même dans une quantité limitée (la consommation de diesel sur l'année est 10 fois inférieure à la consommation de diesel dans le système SI 3 détaillé en section 4.3.3 ci-dessus) permet de réduire considérablement les dimensions des actifs de production photovoltaïque et batterie. En effet, la Figure 14 montre que l'utilisation des groupes diesel permet de fournir de l'électricité au site isolé en cas de faible ensoleillement sur plusieurs jours consécutifs sans avoir à surdimensionner les capacités de la batterie et des PV comme dans le SI 4.

### 4.3.6. Limites de la modélisation

Les résultats présentés ici dans le cas du village de Kaw sont à nuancer à travers quelques limites de modélisation.

1. Le focus et les résultats sont valables directement pour le village de Kaw en Guyane et donc pas directement applicables à d'autres sites isolés. Les données spécifiques à la Guyane et au village de Kaw ont donc été utilisées, ce qui limite la généralisation des résultats. Néanmoins les tendances devraient rester les mêmes pour des sites de caractéristiques similaires sur la forme du profil de charge et d'ensoleillement.

2. De la même manière, étant donné les faibles disponibilités des données, une seule année climatique a été modélisée. La construction de cette année climatique permet néanmoins de considérer d'importantes variations inter-journalières (entre les différents jours de l'année) et intra-journalières (entre les différentes heures de la journée) dans la consommation et la production. Cela permet d'obtenir des profils de consommation et de production qui prennent en compte les aléas météorologiques et qui se rapprochent de la réalité.
3. Les données utilisées pour l'ensoleillement proviennent d'une moyenne spatiale sur l'ensemble du territoire de la Guyane, ce qui introduit un effet de foisonnement<sup>15</sup>. Cette méthode tend à lisser les fluctuations de production solaire par rapport à une chronique spécifique à un site unique. Par conséquent, les résultats obtenus pourraient sous-estimer les besoins en capacité de stockage par batterie, puisque des variations locales plus marquées auraient potentiellement nécessité un dimensionnement plus important. Toutefois, cette approche reste cohérente avec l'objectif de généralisation de l'étude : prendre des données d'ensoleillement trop spécifiques à un site précis ne permettrait pas de généraliser l'étude à d'autres sites isolés situés dans d'autres régions. Ce cas permet ainsi de fournir une vision globale et représentative pour des sites isolés dans diverses régions de la Guyane.
4. Une année « moyenne » de consommation et d'ensoleillement pour le village de Kaw a été modélisée dans le cadre de cette étude. Les aléas météorologiques réels sur site peuvent par exemple entraîner des différences de production solaire pouvant créer des différences de consommation de diesel. L'étude des différences de consommation et d'irradiation avec le cas réel dépasse le cadre de cette étude. Néanmoins, dans les systèmes SI 4 et SI 5, les dimensions des actifs obtenues lors de l'optimisation sont influencées par des journées consécutives ayant une faible irradiation, permettant au modèle de prendre en compte certains aléas météorologiques. De plus, même si les incertitudes météorologiques annuelles ne sont pas considérées, la modélisation d'une irradiation sur 365 jours au pas de temps horaire permet de prendre en compte les incertitudes météorologiques journalières. Enfin, en cas d'écart d'ensoleillement entre la situation modélisée ici et la situation réelle, des générateurs diesel sont toujours présents en secours afin de fournir de l'électricité. Ces générateurs de secours permettent d'assurer la sécurité d'approvisionnement du site isolé.
5. Les dimensionnements de la batterie et des actifs de production sont effectués par rapport à l'année de consommation et d'ensoleillement étudiée (année moyenne représentant l'année 2023). Ces dimensionnements ne prennent donc pas en compte une évolution potentielle de la consommation, de l'ensoleillement ou de l'efficacité des panneaux solaires PV sur la durée de vie de la batterie. Le vieillissement de la batterie est pris en compte dans le dimensionnement de la batterie afin de s'assurer que la batterie puisse satisfaire les besoins du village tout au long de sa durée de vie pour des niveaux de consommation et d'ensoleillement semblables à l'année modélisée.

---

<sup>15</sup> L'effet de foisonnement désigne la situation où l'on dispose d'un volume de données trop important par rapport au besoin spécifique d'une étude. Par exemple, lorsqu'on étudie l'ensoleillement d'une région précise mais que l'on possède des données pour l'ensemble du pays, l'excès d'informations peut diluer la spécificité locale recherchée et donc sous-estimer des aléas météorologiques locaux (notamment la nébulosité).

# 5. Modélisation ACV

## 5.1. Champ de l'étude

### 5.1.1. Objectifs

Les principaux objectifs de cette étude sont définis au « §3.2.1 Objectif du cas d'étude » en page 10.

L'objectif de cette partie est de comparer la performance environnementale de plusieurs systèmes de solutions de stockage sur le site isolé de Kaw. Ce rapport présente une Analyse de Cycle de Vie (ACV) comparative en conformité avec les normes ISO 14040 et ISO 14044, permettant de quantifier, d'analyser et de comparer les impacts environnementaux des scénarios pour la même Unité Fonctionnelle.

### 5.1.2. Périmètre de l'étude

Le périmètre de l'étude englobe l'ensemble du cycle de vie des composants du système photovoltaïque et de la batterie pour fournir l'énergie demandée par le village de Kaw. Concernant le GE, l'ensemble du cycle de vie est pris en compte, les impacts de l'huile de lubrification en maintenance étant intégrés conjointement au carburant diesel consommé (approche d'ecoinvent). La frontière s'arrête donc à la sortie de la centrale électrique de Kaw, au câble de connexion au réseau électrique local.

L'étude adopte l'approche dite "du berceau à la tombe" (cradle-to-grave), incluant toute la chaîne aboutissant à la fourniture des systèmes énergétiques (extraction des matières, raffinages, mises en forme, assemblage, transports, traitements des chutes, rebuts et déchets de production), le transport de ces systèmes jusqu'au site de fonctionnement – la centrale électrique de Kaw –, le carburant (diesel) et son transport sur site, les émissions pendant le fonctionnement, ainsi que le démantèlement et transports des systèmes en fin de vie vers le tri et traitement de leurs déchets, chacun en fonction de leur durée de vie et lieu de traitement.

Le périmètre géographique est le village de Kaw et le périmètre temporel est l'année 2023.

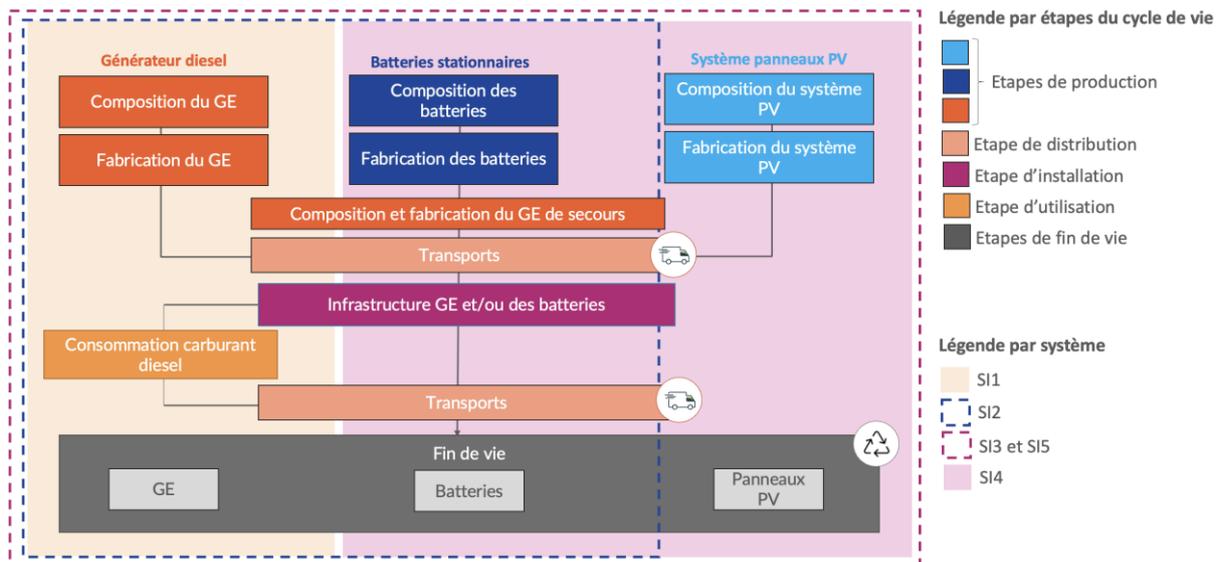


Figure 15 – Périmètre du cas d'étude

### 5.1.3. Critère de coupure

L'étude présentée s'inspire d'un cas réel. Chaque élément a été modélisé avec les données disponibles. Chaque élément négligé a fait l'objet d'une évaluation pour s'assurer qu'il ne dépassait pas 5% en masse

du système, en énergie et en impact environnemental. Par conséquent, le critère de coupure maximal appliqué pour cette étude est de 5%.

L'étude n'a pas pu bénéficier du travail d'un bureau d'étude qui aurait spécifié les nomenclatures précises de l'ensemble des systèmes électriques, du génie civil, etc. Les nomenclatures ont été estimées et certains éléments ont été négligés en vérifiant qu'ils restaient en dessous du seuil de coupure de 5% en masse, en énergie et en impact environnemental.

Plus précisément, les éléments négligés et la raison de ce choix sont précisés ci-dessous.

- La consommation du générateur électrique dans le cas Site Isolé 4, où le générateur est présent comme moyen de secours et n'est pas en fonctionnement. Une vérification du bon état de l'installation consomme environ 60 L de carburant annuellement. Il a été choisi de négliger cette consommation comparée aux consommations des autres cas allant de 4 000 L à 100 000 L) ;
- Le transport du carburant vers Kaw, qui doit être réalisé par pirogue en bidons de faible contenance, a aussi été négligé, et ce à double titre : d'une part la masse/l'énergie lié à ce transport restent bien inférieures devant la masse/l'énergie du Diesel transporté ; d'autre part, comme déjà mentionné, l'ambition de l'étude n'est pas d'étudier précisément le site de Kaw ;
- Des convertisseurs DC/DC qui, selon la tension du système photovoltaïque, de la batterie et du réseau des utilisateurs, pourraient être inclus dans la modélisation du système. La similitude des systèmes électroniques entre les convertisseurs DC/DC (non pris en compte) et les onduleurs DC/AC (présents dans la ferme solaire) dont la contribution est inférieure à 5% a permis de valider le choix de négliger ces convertisseurs ;
- Les systèmes auxiliaires de ventilation/refroidissement de la batterie. L'énergie consommée pour faire fonctionner le système de refroidissement, et les quantités de fluide réfrigérant ont été pris en compte dans l'étude mais la contribution de la production des systèmes associés (groupe froid) n'a pas été modélisée. La vérification du 5% en masse a été réalisée ;
- Les emballages du dernier transport vers le site de Kaw, dont d'éventuels emballages spécifiques nécessaires pour le transport en pirogue, non modélisés. (Note : les emballages des constituants en amont sont eux intégrés au modèle par les ICV d'ecoinvent 3.10 – par exemple les cartons et palettes entre les usines de fabrications de briques et lingots de silicium, de cellules photovoltaïques).

#### 5.1.4. Fin de vie et règles d'allocation

Gingko 21 a appliqué la règle cut-off en fin de vie pour les matières recyclées, en suivant les recommandations des « Product Category Rules » éditées par « International EPD System »<sup>16</sup> :

- Product Category Rules – Electricity, Steam and Hot/Cold Water Generation and Distribution, version 5.0.0 (PCR 2007:08, 2024)
- NPCR 029 – Part B for photovoltaic modules used in the building and construction industry, including production of cell, wafer, ingot block, solar grade silicon, solar substrates, solar superstrates and other solar grade semiconductor materials (NPCR 029, 2020).

Aucune matière recyclée n'a été mentionnée en entrée dans les inventaires des différents systèmes énergétiques du site étudié : aucun des composants n'est, à ce stade de développement du marché, susceptible d'être remplacé par une alternative recyclée – les batteries pourront l'être à long terme, mais la tension marché ne le permet pas à échéance connue. Il a donc été choisi de mettre en œuvre la **méthode des stocks** (détaillée en Annexe 7.2 page 71), d'une part pour suivre les recommandations du PCR 2007:08 Electricity, Steam and Hot/Cold Water Generation and Distribution, d'autre part parce

---

<sup>16</sup> voir <https://www.environdec.com>

qu'aucun enjeu particulier n'est apparu, ni en amont, ni en aval sur la seconde vie des composants, et que l'étude des matières recyclées ou à recycler n'est pas l'objectif de l'étude.

## 5.2. Cadrage de la collecte de données ACV

### 5.2.1. Organisation de la collecte de données

#### 5.2.1.1. Les données primaires

Pour les différents systèmes du cas Site Isolé, les données primaires issues du modèle électrique sont :

- Les puissances des éléments du système installés
  - o Des Générateurs (kW)
  - o Du Système photovoltaïque (kWc)
  - o De la batterie LFP (capacité en kWh)
- La consommation de carburant diesel (en l)
- Le nombre de cycles annuels charges/décharge selon la profondeur de décharge (DoD, Depth of Discharge) propre au type de batterie considéré (en nombre)
- Le type, la quantité initiale de fluide réfrigérant et la consommation annuelle de ce fluide par des fuites dans le système de refroidissement de la batterie (auxiliaires)

Les données primaires sont issues du dimensionnement des cas, de caractéristiques techniques livrées par les membres du COTECH et l'ADEME, ainsi que de la modélisation électrique d'Artelys par Crystal Super Grid.

Par ailleurs, une adaptation de l'ICV du système photovoltaïque a été conduite grâce à des données primaires des usines de fabrication des panneaux, modules, briques et lingots de silicium, fournies par l'ADEME (détails en § 5.3.1).

#### 5.2.1.2. Les données secondaires

Les données secondaires sont majoritairement issues de la base de données ecoinvent 3.10. Des erreurs ont été reconnues par ecoinvent dans la version 3.10, et il a été vérifié que celles-ci n'avaient un impact sur nos résultats qu'avec une très faible probabilité. Les problèmes principaux identifiés par ecoinvent dans la version 3.10 concernent :

- Les émissions dans l'air dans le cadre de « coke production » : notre inventaire des flux des émissions dans l'air n'en comporte pas, mais pourrait être impacté indirectement via le métal issu d'aciéries chinoises et RoW (Rest of the World), utilisé dans les différents composants des systèmes étudiés. Manuellement a été corrigé la base de données Ecoinvent 3.10 pour 28 valeurs erronées dont la déviation dépassait un facteur 10 (« coke production {RoW} » et « coke production, wet quenching {CN} », pour les émissions dans l'air de 3 matières : « Anthracene », « Cobalt II » et « Polychlorinated biphenyls », dont les valeurs étaient surévaluées dans un rapport 800, 1'000 ou 1'000'000 selon les cas, d'après le correctif mis à disposition par Ecoinvent : <https://support.ecoinvent.org/ecoinvent-version-3.10.1>)
- Les volumes de Production dans les procédés « market for electricity » au Brésil et notamment la production d'électricité des panneaux photovoltaïques. Nos travaux ne font appel à aucune électricité du Brésil directement, mais il serait possible qu'un procédé « global » au sens d'ecoinvent en inclue une partie logiquement minime.

Par ailleurs, des compléments de données fournies par le COTECH et l'ADEME, entre autres :

- La puissance surfacique d'un module photovoltaïque (230W/m<sup>2</sup>, source ADEME)

- La durée de vie d'un panneau photovoltaïque (30 ans, source ADEME)
- La durée de vie des onduleurs et de l'installation électrique d'un système photovoltaïque (15 ans, source ADEME et Ecoinvent 3.10)
- La densité énergétique d'une batterie LFP (130Wh/kg, source ADEME), qui correspond à des cellules de densité 160Wh/kg comme expliqué en 5.3.3
- L'usure « normale » d'une batterie LFP stationnaire : 6000 cycles ou 15 ans, au premier des deux paramètres atteint (source CEA-Liten)
- Des distances utilisées dans la modélisation en ACV des transports maritimes des éléments et carburants, en libre accès sur divers sites internet.

## 5.2.2. Gestion de la qualité des données et de l'incertitude

Les données d'entrée provenant de la modélisation électrique par le logiciel Crystal Super Grid sont des données considérées fixes, sans intervalle de confiance ni incertitude connue. Elles sont donc traitées dans le modèle ACV comme telles.

Les données primaires citées au paragraphe 5.2.1.1 sont en amélioration permanente grâce à l'évolution technologique (puissance surfacique d'un module photovoltaïque, durée de vie d'un panneau photovoltaïque, densité énergétique des batteries LFP, vieillissement au cyclage des batteries LFP). Ces données non figées ont été fixées au meilleur des connaissances actuelles pour représenter l'année 2023, la sensibilité des résultats à leurs variations a été testée.

La représentativité de chacune des données tirées d'ecoinvent 3.10 au regard du cas d'usage a été vérifiée sous l'aspect de leur adéquation temporelle, géographique et technologique. L'Annexe 7.4 présente la grille des critères utilisée.

Le statut particulier des données ICV des systèmes photovoltaïques est expliquée au paragraphe 5.3.2 ci-après.

Les données issues d'ecoinvent 3.10 bénéficient de la description de complétude et d'incertitude des données incluse à cette base de données.

## 5.3. Inventaires de cycle de vie

### 5.3.1. Les groupes électrogènes

La modélisation utilise l'ICV de référence d'ecoinvent 3.10 « Diesel-electric generating set, 18.5kW {GLO} » en multiple linéaire de la puissance mise en œuvre dans les systèmes. Cet ICV a été choisi au plus proche de l'ordre de grandeur du Groupe Electrogène de Kaw. Le traitement linéaire des impacts est une approximation : les impacts sont calculés proportionnellement à la masse, mais la masse d'un groupe électrogène n'est pas exactement proportionnel à sa puissance, comme montré en Figure 16. Pour le calcul des t.km des transports des GE, une régression linéaire a été utilisée ci-dessous. Il s'agit d'une démarche conservatrice dans le calcul ACV : la fonction linéaire passant par l'origine et par le premier point du graphe (18,5kVA, donnée issue d'ecoinvent 3.10) donne un résultat de masse plus élevé en tous cas de puissance supérieure à 18,5kVA que la fonction affine représentée.

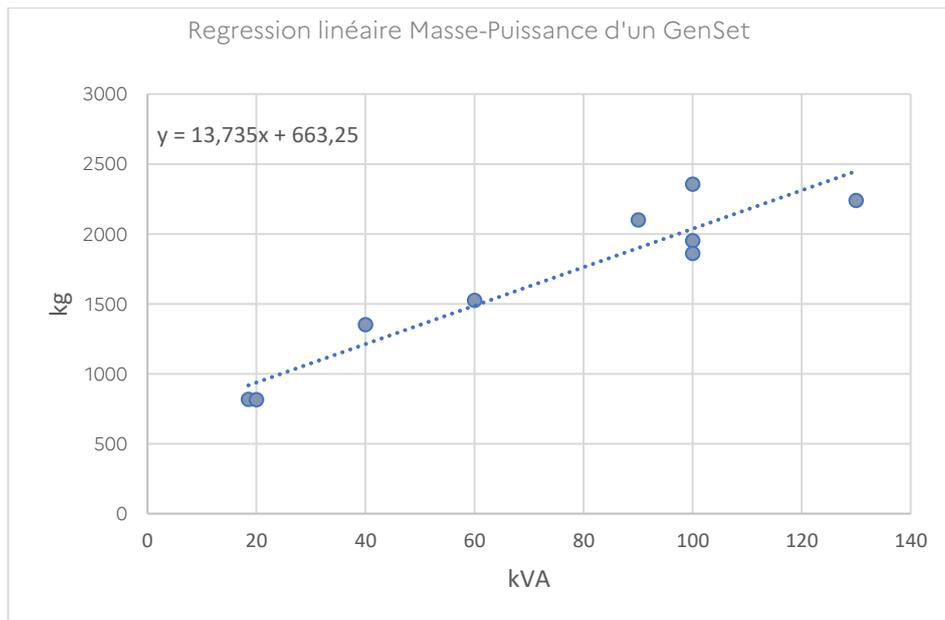


Figure 16 – Poids en fonction de la puissance de Groupes Electrogènes d'après ecoinvent 3.10, CGL, Loxam et Beiser

Dans la pratique, les GE sont en opération alternée et leur usure est donc deux fois moindre. Dans le cas SI 4, le groupe électrogène n'est présent que comme secours et ne fonctionne pas : sa durée de vie a été doublée dans le calcul d'ACV.

L'étude « Global Top 7 Diesel Generator Manufacturers [2023] » par Blackridge Research montre en sommaire accessible en ligne<sup>17</sup> au début de notre travail les 7 compagnies suivantes, dont aucune n'est française : 1. Aggreko (Glasgow, UK) 2. Atlas Copco (Stockholm, Suède) 3. Caterpillar Inc. (USA) 4. Cummins Inc. (USA) 5. Generac Holdings, Inc. (USA) 6. Kohler Power Systems, Inc. (USA) 7. Yanmar Co., Ltd. (Japon). Du fait de l'influence française en Guyane, le fournisseur de l'Union Européenne Atlas a été choisi comme représentatif à défaut d'un fournisseur français, les miles marins entre Stockholm et Cayenne étant supérieurs aux miles marins les ports de France et Cayenne, dans un souci d'approche de maximisation des impacts.

Le Tableau 4 présente les hypothèses principales considérées pour la modélisation des GE pour chaque système. A noter que les données en orange et en gras sont des données fixées en entrée dans le modèle d'Artelys. Les données en bleu et en gras sont des données de sorties fournies par le modèle d'Artelys. D'après ecoinvent 3.10, la durée de vie du GE est de 10 ans. Dans le cas du SI 4, il s'agit d'un GE de secours. N'étant pas utilisé et usé, il a une durée de vie doublée. Les masses du GE pour les transports sont calculées à partir de la régression linéaire de la Figure 16. Comme expliqué en 3.2.1, le transport en pirogue du dernier kilomètre spécifique au site de Kaw n'a pas été comptabilisé.

<sup>17</sup> Le lien <https://www.blackridgeresearch.com/blog/list-of-global-top-best-diesel-generator-dg-sets-genset-manufacturers-companies-distributors-makers-suppliers-in-the-world> renvoie aujourd'hui l'actualisation 2025 de l'étude

		SI 1	SI 2	SI 3	SI 4	SI 5
GE de Kaw	Puissance (kVA)	80	80	80	80	80
	Durée de vie (ans)	10	10	10	20	10
	Quantité (pièces)	2	2	2	1	2
	Masse GE (kg)	1 762	1 762	1 762	1 762	1 762
	Consommation diesel (L)	99 380	82530	47090	0	4 000
	Transports jusqu'à Kaw	Transport par route jusqu'au port de Stockholm : 100km Transport par bateau, du Port de Stockholm au Grand port Maritime de La Guyane : 4 750nm Transport par route, du Grand Port Maritime de La Guyane au village de Kaw : 75km				
	Transports de fin de vie	Transport par route, du village de Kaw au Grand Port Maritime de La Guyane : 75km Transport par bateau, du Grand port Maritime de La Guyane au Port de Bordeaux : 3 800nm Transport par route jusqu'au centre de retraitement : 100km				

Note : En orange, les hypothèses d'entrée de la modélisation d'Artelys. En bleu, les résultats du modèle électrique de Crystal Super Grid, entrées du calcul ACV.

Tableau 4 – Hypothèses principales appliquées aux Groupes Électrogènes du Système Isolé de l'étude

Le tableau suivant indique les quantités du composant GE permettant de répondre à l'UF en fonction des étapes du cycle de vie.

Etape du cycle de vie	Procédé utilisé	Unité	SI 1	SI 2	SI 3	SI 4	SI 5
Matières premières	Diesel-electric generating set, 18.5kW {GLO}	op	0,43	0,43	0,43	0,22	0,43
Transport vers Kaw	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 {RER}	tkm	17,62	17,62	17,62	8,81	17,62
	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 {RoW}	tkm	13,21	13,21	13,21	6,61	13,21
	Transport, freight, sea, container ship {GLO}	tkm	1550,38	1550,38	1550,38	775,19	1550,38
Transport de fin de vie	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 {RoW}	tkm	13,21	13,21	13,21	6,61	13,21
	Transport, freight, sea, container ship {GLO}	tkm	1239,88	1239,88	1239,88	619,94	1239,88
	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 {RER}	tkm	17,62	17,62	17,62	8,81	17,62

Tableau 5 – Éléments modélisés du GE pour l'ensemble des systèmes de l'étude

L'ICV de la donnée « Diesel-electric generating set, 18.5kW {GLO} » ecoinvent 3.10 inclut directement la fin de vie du GE à travers le procédé « Used diesel-electric generating set, 18.5kW {GLO} », auquel est ajouté un transport pour l'acheminement jusqu'à son lieu de traitement de fin de vie en France. De plus, l'huile nécessaire à la maintenance du GE est incluse dans le procédé ecoinvent « Diesel-electric generating set, 18.5kW {GLO} ».

### 5.3.2. Les panneaux photovoltaïques

Pour cette étude l'ambition n'est pas de poser une référence pour l'ICV d'un système photovoltaïque. Les ICV disponibles dans ecoinvent 3.10 étant fondées sur des données de l'industrie allemande supplantée par la production chinoise depuis plus de 10 ans, il est apparu opportun de faire usage de

données d'inventaire et de production fournies par l'ADEME (issues d'un benchmark de la CRE) pour une meilleure représentativité temporelle.

Les données utilisées pour réaliser l'ICV du système photovoltaïque sont issues d'ACV certifiées par l'organisme Certisolis pour répondre aux appels d'offre de la CRE. Afin d'être certifiés, ces ACV doivent respecter la norme ISO 14040. Une autre condition pour obtenir cette certification est une validation par l'ADEME. C'est donc par ce biais que l'ADEME dispose des données respectant la norme ISO 14040, qu'elle a mises au service de cette étude.

A l'issue de la modélisation réalisée sans interaction avec des spécialistes du domaine ni possibilité de d'obtenir des détails sur les données, la cohérence à ecoinvent 3.10 a été vérifiée (voir Annexe 7.5).

L'adaptation de la modélisation s'est fondée sur l'ICV d'ecoinvent 3.10 pour une ferme solaire au sol de 570kWc : "**Photovoltaic plant, 570kWp, multi-Si, on open ground {GLO}**". Pour les systèmes SI 3 à SI 5, un multiple de cette installation a été pris en compte en fonction de la puissance en kWc spécifiée par les données d'entrée ou les données issues du modèle d'Artelys.

Les modifications de l'ICV initial pour l'étude concernent :

- La provenance 100% de Chine des modules photovoltaïques, et l'assemblage des panneaux en Chine
- La mise en œuvre d'un coefficient de proportionnalité à la puissance surfacique conforme aux performances récentes de 230W/m<sup>2</sup>, au lieu de 133W/m<sup>2</sup> dans ecoinvent 3.10, réduisant proportionnellement la surface des modules nécessaires ainsi que tous les composants (notamment : câblages et structure de montage des panneaux photovoltaïques)
- L'intégration de la chaîne de valeur du silicium mono-facial PERC « cellule M10 » (wafers, briques, lingots, silicium vierge et recyclé) en lieu et place des données d'ecoinvent 3.10 grâce aux données ADEME issues du benchmark de la CRE, apportant les données d'usines de production chinoises, pondérées par les volumes de production annuels qui les rendent représentatifs (de l'ordre du GW annuel).
- Le remplacement des câbles en cuivre par de l'aluminium, recommandé par un expert du domaine pour prendre en compte cette évolution technologique, avec des sections de câble environ double du fait de la résistivité différente de l'aluminium par rapport au cuivre.

L'accès à une collection importante de données sur les cellules PERC M10 a permis de modéliser une incertitude de chacune des données primaires conduisant à l'ICV de la ferme solaire. Ce point est discuté au § 5.6.4.

Une limite de l'ICV modifié a trait à l'onduleur :

- Le statut d'éventuelles redondances des onduleurs, souvent mises en œuvre dans les fermes solaires dans un but de sûreté de fonctionnement en cas de défaillances partielles, n'est pas apparu clairement dans la documentation ecoinvent 3.10
- Le type (centralisé, string) et la quantité d'onduleurs (batterie/secteur) mis en œuvre
- La modélisation linéaire par coefficient de proportionnalité, est une approximation en l'absence d'étude technique détaillée de la ferme solaire considérée dans le cas d'étude. Les impacts sont modélisés par la masse des matières mises en œuvre dans l'ACV, alors que la masse n'est pas proportionnelle à la puissance comme le montre la Figure 17. Des effets de seuils ou de choix technologiques sont prépondérants.

La part des impacts de l'onduleur reste faible dans la contribution globale de la ferme solaire modélisée, inférieure à 10% sur tous les indicateurs comme montré en Figure 18 : l'imprécision sur les onduleurs impactera donc peu les résultats globaux du système isolé, puisque le système photovoltaïque n'est qu'une fraction de l'ensemble du système.

La figure ci-dessous montre le poids, en fonction de leur puissance nominale, de trois onduleurs centralisés de la marque « PV Power Electronics », ainsi qu'un onduleur de technologie « String » sans système de refroidissement de la marque Huawei. [Source : Ze Energy].

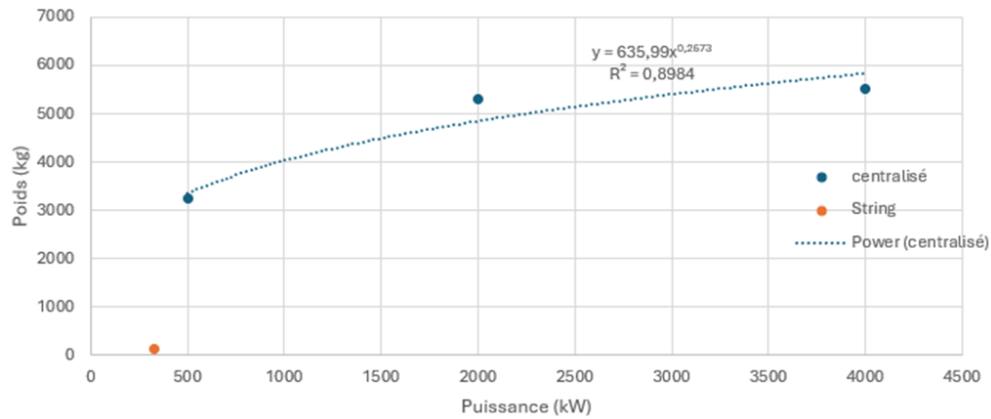


Figure 17 – Poids en fonction de la puissance d'onduleurs

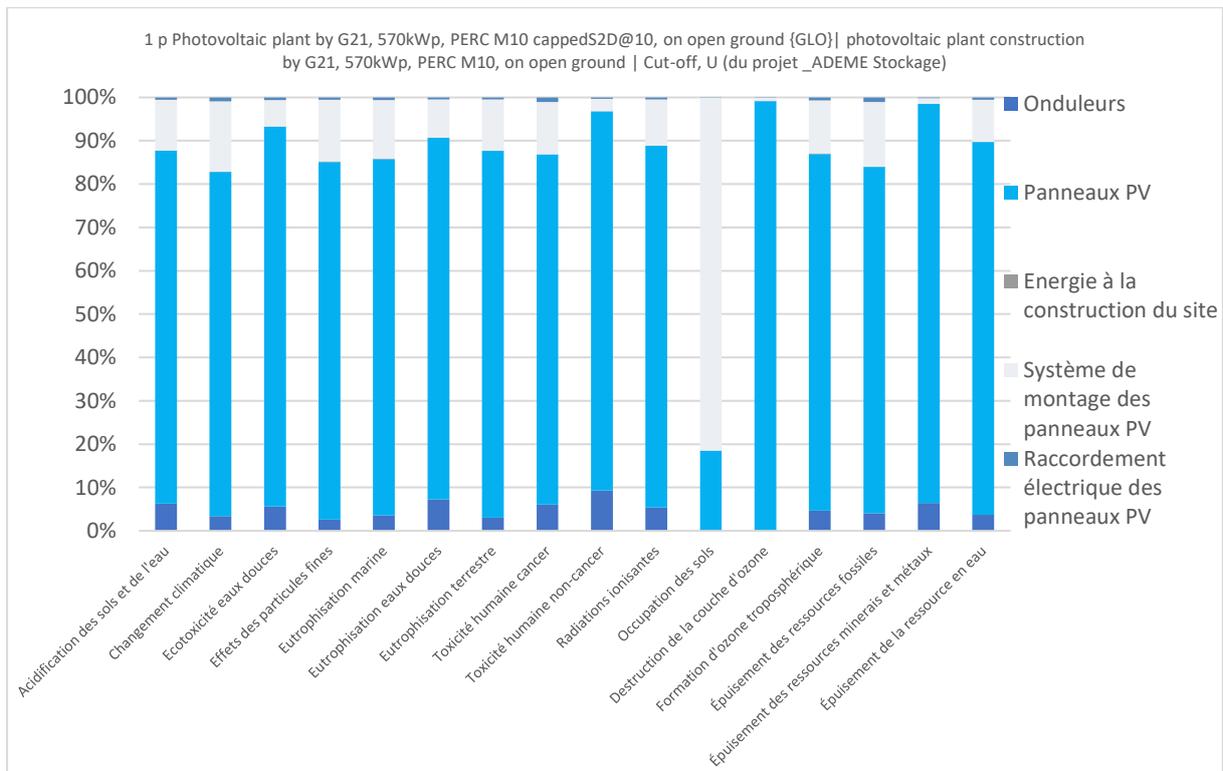


Figure 18 – Ventilation des impacts de la ferme solaire 570kWc utilisée dans l'étude (indicateurs EF3.1)

Les inventaires et les valeurs des impacts de la ferme solaire de 570kWc utilisées dans ce cas d'étude sont montrés à l'Annexe 7.5 en page 73.

Pour le calcul des t.km des transports, le poids moyen utilisé est de :

- Pour les panneaux photovoltaïques, 11,5kg/m<sup>2</sup> (Source Engie 16 mai 2022, <https://mypower.engie.fr/conseils/panneaux-solaires/caracteristiques-panneaux-solaires/quel-poids-de-panneaux-solaires-peut-supporter-mon-toit.html>)
- Pour les montants supports des panneaux (« mounting system »), 10,37kg/m<sup>2</sup> (Source : ecoinvent 3.10 documentation de l'ICV "photovoltaic mounting system production, for 570kWp open ground module").

Le modèle ne prend en compte aucune maintenance pour pièces des panneaux photovoltaïques pendant leur phase d'usage, d'après les informations reçues du COTECH.

La donnée ecoinvent 3.10 initiale prise pour base pour adapter l'ICV de la ferme solaire prend pour hypothèse un changement d'affectation des sols depuis des pâturages (« pasture, man made » vers « industrial area ») et n'a pas été modifiée. Elle ne correspond certes pas à la réalité du site des marais de Kaw, dont la première centrale photovoltaïque a été construite en 1983 : d'une part, l'ambition de l'étude d'un site isolé n'était pas de coller à la réalité exacte du cas particulier de la centrale de Kaw. D'autre part, la situation de Kaw quant à la prise en compte de l'affectation des sols est complexe à représenter, car la centrale, après 20 ans de production, a connu une période de mise en sommeil de 2003 à 2009, avant qu'une nouvelle centrale ait été décidée<sup>18</sup>. Le point d'affectation des sols n'étant pas central dans notre étude d'ACV sur le stockage par batterie, nous l'avons laissé de côté.

Le Tableau 6 présente les hypothèses principales considérées pour la modélisation des panneaux photovoltaïques pour chaque système. Les données en orange sont des données fixées en entrée dans le modèle d'Artelys. Les données en bleu sont des données de sorties fournies par le modèle d'Artelys. Les autres données en gris sont a) les résultats de calculs d'inventaire (à partir des caractéristiques des systèmes, calcul de leur masse selon des régressions linéaires des références ecoinvent 3.10) ; b) les données issues d'ecoinvent 3.10 (par ex. durées de vie des panneaux photovoltaïques, de l'onduleur) ; c) des estimations issues d'autres sources (distances des transports terrestres par Google Maps, distances nautiques par sea-distances.org). Comme expliqué en 3.2.1, le transport en pirogue du dernier kilomètre spécifique au site de Kaw n'a pas été comptabilisé.

		SI 1	SI 2	SI 3	SI 4	SI 5
Photovoltaïques	Puissance (kWc)	/	/	100	702	273
	Durée de vie panneaux photovoltaïques	/	/	30 ans	30 ans	30 ans
	Masse d'onduleurs (kg)	/	/	561	3941	1533
	Durée de vie onduleurs	/	/	15 ans	15 ans	15 ans
	Transports jusqu'à Kaw	Transport par route, de Yancheng, Jiangsu, Chine au Port de Shanghai : 300km Transport par bateau, du Port de Shanghai au Grand port Maritime de La Guyane : 12 300nm Transport par route, du Grand Port Maritime de La Guyane au village de Kaw : 75km				
	Transports de fin de vie	Transport par route, du village de Kaw au Grand Port Maritime de La Guyane : 75km				

Note : En orange, les hypothèses d'entrée de la modélisation d'Artelys. En bleu, les résultats du modèle électrique de Crystal Super Grid, entrées du calcul ACV.

Tableau 6 – Hypothèses principales appliquées aux systèmes photovoltaïques du Système Isolé de l'étude

Le tableau suivant indique les quantités du composant panneaux photovoltaïques permettant de répondre à l'UF en fonction des étapes du cycle de vie.

Etape du cycle de vie	Procédé utilisé	Unité	SI 1	SI 2	SI 3	SI 4	SI 5
Matières premières	Photovoltaic plant by G21, 570kWp, PERC M10, on open ground {GLO}	p	/	/	0,006	0,041	0,016
Transport vers Kaw	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 {RoW}	tkm	/	/	8,00	56,16	21,84
	Transport, freight, sea, container ship {GLO}	tkm	/	/	608,00	4268,16	1659,84

<sup>18</sup> Source : <https://www.cre.fr/documents/fiches-demonstrateurs-smartgrids/centrale-hybride-de-kaw.html>, accédé fév 2025

	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 {RoW}	tkm	/	/	2,00	14,04	5,46
Fin de vie de l'électronique	Waste electric and electronic equipment {GLO} treatment of waste electric and electronic equipment, shredding	kg	/	/	26,67	187,20	72,80
Transport de fin de vie des poutrelles	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 {RoW}	tkm	/	/	11,27	79,13	30,77
Transport de fin de vie des panneaux photovoltaïques	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 {RoW}	tkm	/	/	12,50	87,75	34,13

Tableau 7 – Éléments modélisés pour les panneaux photovoltaïques pour l'ensemble des systèmes de l'étude

Les poutrelles de structure des panneaux photovoltaïques, les cadres métalliques des panneaux photovoltaïques et le verre de protection des panneaux photovoltaïques sont considérés comme des matières recyclables en fin de vie. Ces déchets sont collectés et triés au centre de tri de Cayenne. Leur transport de Kaw à Cayenne est inclus dans l'ACV. Il a pu être vérifié, grâce à la Direction Régionale locale de l'ADEME, que le verre et les cadres aluminium sont triés à Cayenne. Le verre est localement broyé et inclus aux lits de gravats posés sous les routes. On a posé une hypothèse simplificatrice sur le silicium des modules, environ 5% de la masse, et considéré la même fin de vie pour celui-ci.

### 5.3.3. Les batteries stationnaires

Le village de Kaw est aujourd'hui équipé d'une batterie Plomb-Acide, mais l'étude est tournée vers les technologies actuelles et futures – une batterie LFP a été mise pour les systèmes. L'ICV d'Ecoinvent 3.10 « **Battery, Li-ion, LFP, rechargeable, prismatic {CN} battery production** » pour une batterie LFP d'application de mobilité (automobile) est choisi, la modélisation date de 2018. Elle inclut les cellules, les enveloppes de modules et leurs séparateurs, le BMS (Battery Management System), les structures métalliques des modules et une enveloppe de protection extérieure dimensionnée pour résister aux sollicitations de l'application de mobilité. Aucun inventaire spécifique au stationnaire n'a été trouvé dans ecoinvent, l'inventaire d'une batterie LFP de mobilité a donc été adapté. Pour une application stationnaire, l'aluminium de l'enveloppe de protection extérieure a été retiré, et la moitié de la masse de cette enveloppe a été réalloué en une structure métallique de maintien (tôle inox), pour fixer les modules : nous avons voulu représenter une structure en « racks », bien que n'ayant pas eu accès à une nomenclature détaillée de batterie stationnaire. Les mêmes éléments de conduction thermique (en aluminium) ont été considérés que dans l'application de mobilité, ainsi que la même quantité de glycol (fluide caloporteur vers l'auxiliaire de refroidissement). La densité énergétique des cellules est de 160Wh/kg si l'on considère leur masse seule, sans les enveloppes de module, le BMS, les accessoires de maintien, comme montré par le détail des quantités considérées en Annexe 0 page 76. Pour notre modèle de batterie stationnaire, l'ensemble est ensuite inséré dans un conteneur de transport de 20 pieds (20ft), installé sur le site de la centrale de Kaw séparément du bâtiment abritant le GE et l'onduleur du système photovoltaïque. L'intégration de batteries stationnaires en conteneurs est la pratique standard (SAFT, Konka, CAPSA, Voltai, PKENERGY, etc.). Il s'agit donc d'une solution industriellement courante et conservatrice par rapport aux récentes évolutions. Pour des sites isolés tels que Kaw non accessible par la route, la containérisation se fait sur place. La modélisation du transport en conteneur est donc une limite du modèle dans son application à Kaw.

Un groupe froid nécessaire au refroidissement de la batterie a été incluse au calcul, en prenant pour référence la déclaration PEP Ecopassport de la Pompe à chaleur HTi(70) 6-14kWh AUER, comme approximation de climatisation. Ont été considérées :

- La consommation électrique, intégrée au calcul de Crystal Super Grid ; selon le Système Isolé, la conséquence en est, par exemple, des litres de diesel consommés, de la surface de panneau photovoltaïque ajoutée. Notons donc que ces conséquences sont bien incluses dans le calcul ACV mais apparaissent en dehors du bloc de calcul « batterie » ;
- La production du fluide frigorigène R290 (propane) nécessaire au fonctionnement (0,17kg pour 3 recharges sur 17 ans de fonctionnement par kW de puissance thermique), et ses fuites dans l’atmosphère pendant l’usage, estimées annuellement à 2% de la quantité de fluide dans la machine thermique, d’après la source.

La fabrication et la fin de vie des composants de la machine thermique ont été négligés , en l’absence de nomenclature de climatisation et de dimensionnement par une étude thermique précise. De l’expérience de Gingko21, la consommation d’énergie et l’impact du fluide sont les sources prépondérantes d’impact d’une machine thermique.

La quantité de fluide frigorigène a été dimensionnée en considérant une machine thermique délivrant une puissance double de la puissance thermique moyenne prise en compte par le calcul énergétique. Il s’agit d’une approche de maximisation par un « coefficient de sécurité de 2 » en l’absence d’étude thermique, pour représenter que la chaleur à évacuer est plus forte aux moments de charge ou décharge.

Le Tableau 8 récapitule les hypothèses principales considérées pour la modélisation des batteries pour chaque système. Les données en orange sont des données fixées en entrée dans le modèle d’Artelys. Les données en bleu sont des données de sorties fournies par le modèle d’Artelys. Les autres données en gris sont a) les résultats de calculs d’inventaire (à partir des caractéristiques des systèmes, calcul de leur masse selon des régressions linéaires des références ecoinvent 3.10) ; b) les données issues d’ecoinvent 3.10 (par ex. durées de vie des panneaux photovoltaïques, de l’onduleur) ; c) des estimations issues d’autres sources (distances des transports terrestres par Google Maps, distances nautiques par sea-distances.org). Comme expliqué en 3.2.1, le transport en pirogue du dernier kilomètre spécifique au site de Kaw n’a pas été comptabilisé. On rappelle aussi, comme déjà mentionné en 4.3.3, que le SI 3 a vu la capacité de sa batterie choisie par analogie au système actuellement en service à Kaw avec une batterie Acide-Plomb au lieu d’une batterie LFP.

		SI 1	SI 2	SI 3	SI 4	SI 5
<b>Batterie</b>	Capacité (kWh)	/	410	1 250	1 350	590
	Nombre de cycles/an	/	217	53	109	228
	Durée de vie (ans)	/	15	15	15	15
	Puissance électrique de la climatisation (W)	/	914	2 500	3 011	1 316
	Infrastructure	/	Conteneur 20ft	Conteneur 20ft	Conteneur 20ft	Conteneur 20ft
	Transports jusqu’à Kaw	Transport par route, de Yancheng, Jiangsu, Chine au Port de Shanghai : 300km Transport par bateau, du Port de Shanghai au Grand port Maritime de La Guyane : 12 300nm Transport par route, du Grand Port Maritime de La Guyane au village de Kaw : 75km				
	Transports de fin de vie	Transport par route, du village de Kaw au Grand Port Maritime de La Guyane : 75km Transport par bateau, du Grand port Maritime de La Guyane au Port de Bordeaux : 3 800nm Transport par route jusqu’au centre de retraitement : 100km				

Tableau 8 – Hypothèses principales appliquées aux Batteries du Système Isolé de l’étude

Le tableau suivant indique les quantités du composant batterie permettant de répondre à l’UF en fonction des étapes du cycle de vie. A noter qu’il est supposé que la batterie LFP ne nécessite aucune maintenance pour pièces pendant sa phase d’usage, d’après les informations reçues du COTECH.

Etape du cycle de vie	Procédé utilisé	Unité	SI 1	SI 2	SI 3	SI 4	SI 5
Matières premières	Battery, Li-ion, LFP stationary by G21, rechargeable, prismatic {CN}	kg	/	210,26	641,03	692,31	302,56
Transport vers Kaw	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 {RoW}	tkm	/	63,08	192,31	207,69	90,77
	Transport, freight, sea, container ship {GLO}	tkm	/	4793,85	14615,38	4872,18	6898,46
	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 {RoW}	tkm	/	15,77	48,08	69,23	22,69
Fin de vie	Used Li-ion battery {GLO} treatment of used Li-ion battery, hydrometallurgical treatment	kg	/	105,13	320,51	346,15	151,28
	Used Li-ion battery {GLO} treatment of used Li-ion battery, pyrometallurgical treatment	kg	/	105,13	320,51	346,15	151,28
Transport de fin de vie	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 {RoW}	tkm	/	15,77	48,08	51,92	22,69
	Transport, freight, sea, container ship {GLO}	tkm	/	1479,70	4511,28	4872,18	2129,33
	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 {RER}	tkm	/	21,03	64,10	69,23	30,26

Tableau 9 – Éléments modélisés de la batterie pour l'ensemble des systèmes de l'étude

La nomenclature de la batterie « Battery, Li-ion, LFP stationary by G21, rechargeable, prismatic {CN} », hors conteneur maritime 20 pieds, est détaillée en Annexe 0 page 76.

Le transport en fin de vie de la batterie est assuré jusqu'à un centre de tri et de traitement spécialisé en France métropolitaine, car il s'agit d'un déchet nécessitant une prise en charge spécifique. Pour la batterie, une fin de vie avec 50% de traitement pyrométallurgie et 50% hydro-métallurgique est modélisée. Il s'agit d'une hypothèse neutre en attendant que la filière de fin de vie des batteries se structure et qu'un traitement devienne majoritaire en volume. Le marché des batteries de seconde vie et la régénération des matières critiques n'est pas encore clarifié ; le « passeport batterie » européen (2027) a pour ambition de le structurer (EC, 2023).

### 5.3.4. Bâtiment

Le bâtiment abritant le GE est inclus au calcul ACV, bâtiment industriel en acier modélisé par l'ICV « Building, hall, steel construction {RoW} » issu d'ecoinvent 3.10.

Pour déterminer sa surface, les conseils en ingénierie de « Generator Source », section « **Site Planning for an Industrial Generator Installation** » ont été suivis, librement disponibles sur internet à l'adresse [https://www.generatorsource.com/Site\\_Planning\\_for\\_Generator\\_Installation.aspx](https://www.generatorsource.com/Site_Planning_for_Generator_Installation.aspx).

La surface a été estimée proportionnelle à la masse du GE (meilleure approximation de la taille de l'engin à abriter que la puissance, comme déjà discuté plus haut en Figure 16). Pour 2 unités de GE de 80kW, l'estimation est de 13 m<sup>2</sup>. La durée de vie de ce bâtiment est considérée de 50 ans.

## 5.4. Limites de la modélisation ACV

Les limites de la modélisation ACV ont trait à

- L'absence d'inventaire spécifique pour des batteries stationnaires, qui a mené à une adaptation d'un inventaire spécifique à la mobilité
- La linéarité des quantités mises en œuvre, comme discuté ci-avant, alors que les systèmes ne sont pas tous en quantité linéaire du service apporté (voir Onduleurs). Cette hypothèse de linéarité est néanmoins une pratique courante en ACV, en l'absence de bureau d'étude éditant des spécifications réelles ;
- La modélisation par un conteneur de 20 pieds pour accueillir la batterie, alors qu'un tel contenant ne peut pas être acheminé sur le site de la centrale électrique du village de Kaw par manque de route. La batterie devrait sans doute être considérée démontée pour le transport et réassemblée sur place dans un bâtiment *ad hoc* ;
- Au transport du carburant vers le site de la centrale électrique du village de Kaw, qui doit être fait en bidon de 20L par pirogue, particularité locale dont il n'a pas été tenu compte précisément dans le calcul ACV, qui a vocation à généraliser les considérations ;
- La modélisation de la surface du bâtiment pour abriter le Générateur Electrique, jugée *a posteriori* sous-évaluée par un expert ADEME de Direction Régionale sans qu'une nouvelle valeur soit clairement établie. Le calcul s'est fondé sur la source extérieure mentionnée plus haut, en l'absence de bureau d'étude participant au projet. L'impact du bâtiment étant négligeable dans tous les scénarios, le doublement ou triplement de sa surface reste sans influence visible, et il a été choisi de ne pas creuser plus avant ce point ;
- Le statut de la fin de vie du silicium, faible part de la masse des panneaux, n'est pas établie. Le silicium est considéré incorporé au lit de gravier des routes de la Guyane, comme d'autres éléments inertes des panneaux photovoltaïques (dont le verre). La pratique précise du démontage des panneaux photovoltaïques en Guyane n'a pas pu être établie précisément par élément ;
- La modélisation ACV s'appuie sur les résultats de la modélisation dans Crystal Super Grid par Artelys, sans évaluation de leur incertitude.

## 5.5. Evaluation de l'impact du cycle de vie

### 5.5.1. Méthode d'évaluation de l'impact

Les impacts sont évalués selon le jeu d'indicateurs préconisé par la Commission Européenne à ce jour : Environmental Footprint 3.1. "EF 3.1" (PEFCR, 2017).

L'ensemble des catégories d'impact est listé dans le tableau ci-dessous :

Catégorie d'impact	Unité	Méthode	Robustesse
Changement Climatique, dont: - Fossile - Carbone biogénique - Occupation des sols	kg CO <sub>2</sub> eq	Baseline model of 100 years of the IPCC (based on IPCC 2021)	I
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC-11 eq	Steady-state ODPs as in (WMO 1999)	I
Effets des particules fines	Nb of diseases	PM method recommended by UNEP 2016	I
Formation d'ozone troposphérique	kg NMVOC eq	LOTOS-EUROS (Van Zelm et al, 2008) as applied in ReCiPe 2008	II
Acidification des sols et de l'eau	mol H+ eq	Accumulated Exceedance (Seppälä et al. 2006, Posch et al, 2008)	II
Radiations ionisantes	kBq U235eq	Dreicer et al. 1995 and Frischknecht 2000	II
Eutrophisation eaux douces	kg P eq	EUTREND model (Struijs et al, 2009) as implemented in ReCiPe	II
Eutrophisation marine	kg N eq	EUTREND model (Struijs et al, 2009) as implemented in ReCiPe	II
Eutrophisation terrestre	Mol N eq	Accumulated Exceedance (Seppälä et al. 2006, Posch et al, 2008)	II
Toxicité humaine : Cancérogène Non-cancérogène	CTUh	USEtox 2.1. model (Rosenbaum et al, 2008)	III
Ecotoxicité eaux douces	CTUe	USEtox 2.1. model (Rosenbaum et al, 2008)	III
Occupation des sols	Pt	Soil quality index based on LANCA (Beck et al. 2010 and Bos et al. 2016)	III
Épuisement de la ressource en eau	m <sup>3</sup>	Available Water Remaining (AWARE) in UNEP, 2016	III
Épuisement des ressources fossiles	MJ	CML Guinée et al. (2002) and van Oers et al. (2002)	III
Épuisement des ressources minerais et métaux	kg Sb eq	CML Guinée et al. (2002) and van Oers et al. (2002)	III

Tableau 10 – Catégories d'impacts Source : (Fazio & al., 2018)

Les résultats sont normalisés et pondérés afin de pouvoir identifier les catégories d'impacts pertinentes pour l'étude. La méthode, issue des travaux de EF, est explicitée en Annexe 7.7 page 76.

Une fois les résultats normalisés et pondérés, il est possible de les agréger en un Score Unique. La comparaison de scénarios par le biais d'un Score Unique n'est pas recommandée par les normes ISO 14040 et 14044 de l'ACV, mais permet d'apporter un éclairage additionnel à l'analyse des indicateurs pris séparément.

C'est sur ces méthodes de normalisation et pondération que sera construite la sélection des indicateurs pertinents ci-après.

## 5.5.2. Résultats pour l'ensemble du cycle de vie

Les résultats des cinq systèmes du cas Site Isolé (SI 1 à SI 5), présentés ci-après en Tableau 11, par catégorie d'impact de la méthode EF3.1, sont donnés en fonction de l'unité fonctionnelle rappelée dans le §3.2.2. L'ensemble des étapes du cycle de vie est considéré dans les cinq systèmes.

Catégorie	Unité	SI 1	SI 2	SI 3	SI 4	SI 5
Changement climatique	kg CO2 eq	3,73E+05	3,13E+05	1,91E+05	2,88E+04	3,30E+04
Formation d'ozone troposphérique	kg NMVOC eq	6,56E+03	5,46E+03	3,18E+03	1,34E+02	3,46E+02
Épuisement des ressources fossiles	MJ	4,82E+06	4,05E+06	2,45E+06	3,28E+05	3,96E+05
Acidification des sols et de l'eau	mol H+ eq	4,69E+03	3,95E+03	2,43E+03	3,42E+02	3,82E+02
Eutrophisation terrestre	mol N eq	2,35E+04	1,96E+04	1,16E+04	7,31E+02	1,35E+03
Épuisement des ressources minerais et métaux	kg Sb eq	2,38E-01	5,84E-01	1,64E+00	3,03E+00	1,63E+00
Effets des particules fines	disease inc.	6,78E-03	6,06E-03	4,82E-03	3,09E-03	2,09E-03
Eutrophisation eaux douces	kg P eq	6,48E+00	8,01E+00	1,32E+01	1,97E+01	1,15E+01
Eutrophisation marine	kg N eq	2,15E+03	1,79E+03	1,04E+03	3,99E+01	1,11E+02
Toxicité humaine non-cancer	CTUh	7,60E-04	8,51E-04	1,24E-03	1,73E-03	9,65E-04
Ecotoxicité eaux douces	CTUe	2,44E+05	2,52E+05	2,96E+05	3,50E+05	2,09E+05
Occupation des sols	Pt	3,26E+05	2,96E+05	6,73E+05	2,19E+06	1,17E+06
Épuisement de la ressource en eau	m3 depriv.	6,69E+03	6,73E+03	7,93E+03	1,05E+04	6,25E+03
Toxicité humaine cancer	CTUh	2,01E-05	2,38E-05	3,40E-05	3,11E-05	2,37E-05
Radiations ionisantes	kBq U-235 eq	1,35E+03	1,36E+03	1,48E+03	1,54E+03	9,88E+02
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC11 eq	5,73E-03	4,82E-03	3,46E-03	2,80E-03	1,73E-03

(3 chiffres significatifs) – Code couleur du fond : par ligne, des valeurs faibles à fortes : vert sombre, vert clair, jaune, orange, rouge

Tableau 11 – Résultats d'impact des cinq systèmes sur l'ensemble du cycle de vie par catégorie d'impact, méthode EF 3.1

## 5.5.3. Identification des indicateurs pertinents

La priorisation des indicateurs permet de sélectionner les indicateurs pertinents sur l'ensemble de notre cas d'étude, afin de simplifier la communication et la compréhension des résultats, en réduisant la complexité des informations présentées.

L'identification des indicateurs pertinents pour le cas d'étude s'effectue à partir des résultats de la pondération réalisée après la normalisation. Les indicateurs pertinents sont ceux qui représentent 80% des impacts totaux de la pondération cumulés par ordre d'impact décroissant pour chacun des systèmes. Sont retenus ensuite tous les indicateurs pertinents pour tous les systèmes. Les résultats sont présentés pour tous les systèmes dans un ordre identique des catégories d'impact, de la plus contributrice à la moins contributrice d'après le système 3, qui est le système incluant le plus de composants différents.

Le tableau ci-dessous montre en fond vert les indicateurs d'impact responsable de 80% des résultats pondérés de chaque système du site isolé :

Catégorie de dommages	Unité	SI 1	SI 2	SI 3	SI 4	SI 5
<b>Total</b>	<b>Pt</b>	<b>39,383</b>	<b>33,625</b>	<b>22,254</b>	<b>7,096</b>	<b>5,567</b>
Acidification des sols et de l'eau	Pt	5,234	4,409	2,709	0,382	0,426
Changement climatique	Pt	10,393	8,734	5,321	0,803	0,920
Ecotoxicité eaux douces	Pt	0,083	0,085	0,100	0,119	0,071

Catégorie de dommages	Unité	SI 1	SI 2	SI 3	SI 4	SI 5
Effets des particules fines	Pt	1,021	0,912	0,726	0,465	0,315
Eutrophisation marine	Pt	3,248	2,707	1,573	0,060	0,168
Eutrophisation eaux douces	Pt	0,113	0,140	0,230	0,342	0,201
Eutrophisation terrestre	Pt	4,927	4,119	2,430	0,153	0,283
Toxicité humaine cancer	Pt	0,025	0,029	0,042	0,038	0,029
Toxicité humaine non-cancer	Pt	0,109	0,122	0,177	0,248	0,138
Radiations ionisantes	Pt	0,016	0,016	0,018	0,018	0,012
Occupation des sols	Pt	0,032	0,029	0,065	0,212	0,114
Destruction de la couche d'ozone	Pt	0,007	0,006	0,004	0,003	0,002
Formation d'ozone troposphérique	Pt	7,672	6,392	3,716	0,157	0,405
Épuisement des ressources fossiles	Pt	6,171	5,182	3,139	0,420	0,507
Épuisement des ressources minerais et métaux	Pt	0,283	0,693	1,946	3,596	1,930
Épuisement de la ressource en eau	Pt	0,050	0,050	0,059	0,078	0,046

Note : en fond vert sont présentées les catégories d'impact retenues pour chaque système, comme responsables de 80% des résultats pondérés

Tableau 12 – Indicateurs retenus pour chaque système du cas site isolé par la méthode EF3.1

Cette sélection d'indicateur est identique entre les systèmes SI 1 et SI 2. L'inclusion des panneaux photovoltaïques dans les systèmes SI 3, SI 4 et SI 5 ajoute l'indicateur épuisement des ressources minerais et métaux. Le système SI 4 est le seul à avoir l'indicateur eutrophisation en eaux douces dans sa priorisation. Enfin, les systèmes SI 4 et SI 5 ont en commun l'indicateur Effets des particules fines, parce qu'ils considèrent des surfaces de panneaux photovoltaïques bien plus grandes que les trois autres systèmes, et par conséquent mobilisent la métallurgie du silicium et sa découpe en fines tranches.

En plus des indicateurs priorisés par rapport aux résultats des pondérations, l'ADEME a identifié un autre indicateur jugé important dans le cadre de cette étude, l'épuisement des ressources fossiles.

Finalement, les indicateurs considérés comme pertinents dans ce cas d'étude sont récapitulés dans le Tableau 13.

Critère	Catégorie d'impact pertinente
Priorisés car contribuant aux 80% majeurs des résultats de pondération pour tous les systèmes de SI 1 à SI 5	Changement climatique
	Formation d'ozone troposphérique
	Épuisement des ressources fossiles
	Acidification des sols et de l'eau
	Eutrophisation terrestre
	Épuisement des ressources minerais et métaux
	Effets des particules fines
	Eutrophisation eaux douces

Tableau 13 – Liste des indicateurs pertinents pour le cas d'étude Site Isolé

### 5.5.4. Résultats comparatifs sur l'ensemble du cycle de vie par indicateur pertinent

Cette partie a pour but d'examiner les systèmes du site isolé de 1 à 5 pour chaque indicateur pertinent pris isolément. Néanmoins, les comparaisons devront être validées à la lumière des incertitudes et des écarts significatifs calculés dans la partie 5.6.4.3 page 65.

### 5.5.4.1. Changement climatique

C'est un indicateur de robustesse de niveau I.

Le changement climatique est provoqué par l'émission de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère, en grande majorité par le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>) et le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O). Cet indicateur est la somme de trois catégories d'impact : le changement climatique lié aux émissions fossiles, le changement climatique lié aux émissions biogéniques et le changement climatique lié à l'usage des sols.

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque composant des différents systèmes des différents scénarios du cas d'étude Site Isolé appliqué au village de Kaw sur l'indicateur changement climatique. L'ensemble des étapes du cycle de vie a été considéré pour chaque composant.

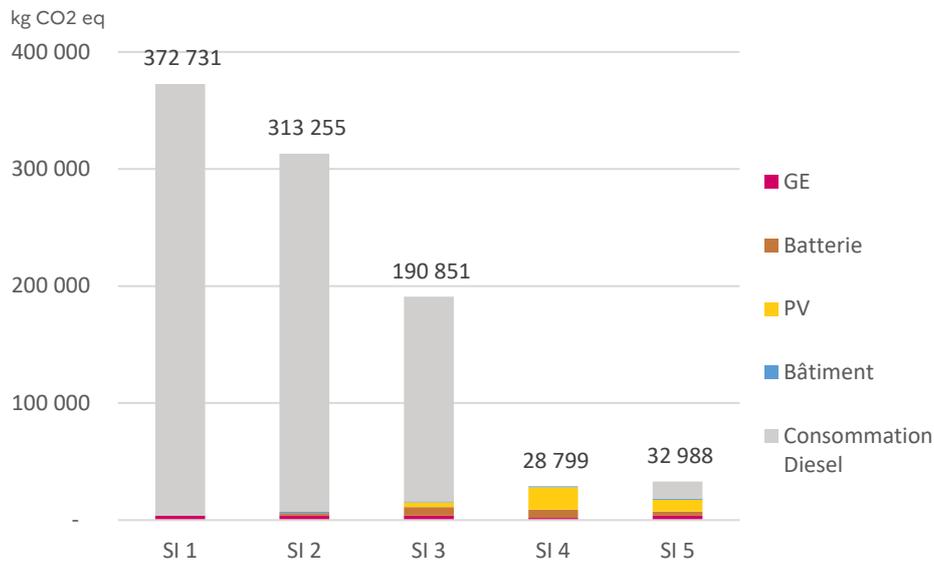


Figure 19 – Site isolé – Analyse de contribution sur l'indicateur changement climatique (kg CO<sub>2</sub>eq)

D'un point de vue comparatif :

- Les scénarios intégrant une forte dépendance au diesel (SI 1, SI 2, SI 3) présentent des impacts sur le changement climatique nettement plus élevés que le scénario sans consommation de diesel SI 4 et le scénario avec une consommation limitée à 4000 L SI 5
- Entre le scénario le plus impactant SI 1 et le scénario le moins impactant SI 4, un facteur 13 est observé
- La contribution des systèmes photovoltaïques et des batteries augmente avec leur dimensionnement, cependant leurs impacts restent faibles par rapport à la consommation de diesel.

Changement climatique	Composants des systèmes				
	GE	Batterie	PV	Bâtiment	Consommation Diesel
SI 1	1%			~0%	99%
SI 2	1%	1%		~0%	98%
SI 3	2%	4%	2%	~0%	92%
SI 4	6%	25%	66%	3%	
SI 5	11%	11%	30%	3%	45%

Tableau 14 – Site isolé – Résultats d'analyse de contribution par des systèmes sur l'indicateur changement climatique

D'un point de vue composants des systèmes :

- La consommation de diesel représente l'essentiel des impacts pour les scénarios SI 1, SI 2 et SI 3 (supérieur à 92%).
- Pour le Système SI 4, les impacts liés aux équipements photovoltaïques (66%) et batteries (25%) deviennent dominants, bien que leurs contributions restent faibles en valeur absolue par rapport aux scénarios incluant une consommation de diesel non nulle.
- Les impacts liés au bâtiment (inférieurs à 3%) sont négligeables pour tous les systèmes.

Les résultats sur l'impact changement climatique sont corrélés à la quantité de diesel utilisée. Plus celle-ci est importante, plus l'impact sera important sur le changement climatique. Ainsi, limiter ou éliminer la consommation de diesel, comme dans les scénarios SI 4 et SI 5, est un levier clé pour diminuer l'impact environnemental global sur cet indicateur.

### 5.5.4.2. Formation d'ozone troposphérique

Le potentiel de formation d'ozone troposphérique est un indicateur de robustesse de niveau II.

L'ozone photochimique (O<sub>3</sub>) est un gaz nocif pour les yeux et les poumons. Il est formé par une réaction chimique entre des gaz précurseurs et les rayons solaires UV. Beaucoup de molécules émises par les activités industrielles sont précurseurs.

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque composant des différents systèmes des différents scénarios du cas d'étude Site Isolé sur l'indicateur formation d'ozone troposphérique. L'ensemble des étapes du cycle de vie a été considéré pour chaque composant.

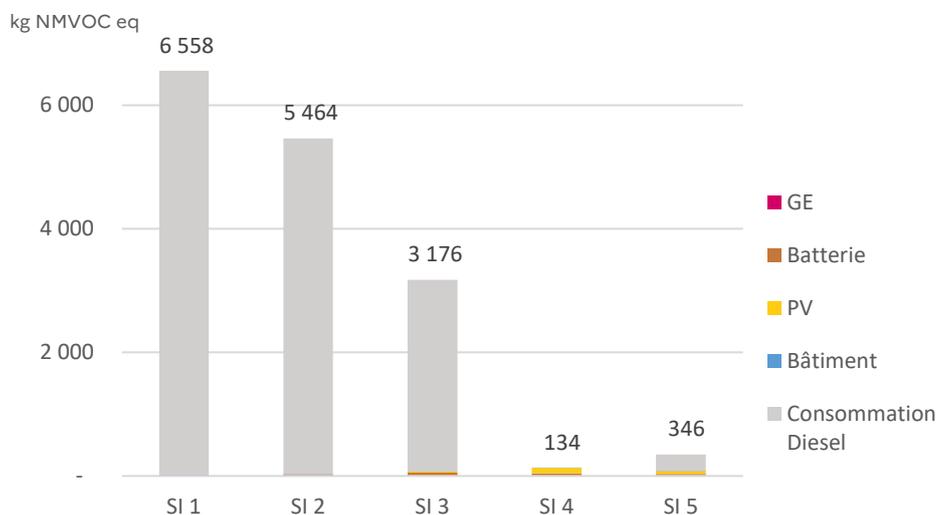


Figure 20 – Site isolé – Analyse de contribution sur l'indicateur formation d'ozone troposphérique (kg NMVOCeq)

D'un point de vue comparatif :

- Les scénarios dépendants du diesel (SI 1, SI 2 et SI 3) présentent des impacts significativement plus élevés sur la formation d'ozone troposphérique que le scénario avec une consommation limitée SI 5 et celui sans diesel SI 4.
- Le scénario SI 1 génère l'impact le plus important avec ~6 560 kg NMVOC eq/an, tandis que le scénario SI 4, le moins impactant, est 49 fois moins impactant.

Formation d'ozone troposphérique	Composants des systèmes				
	GE	Batterie	PV	Bâtiment	Consommation Diesel
SI 1	~0%			~0%	100%
SI 2	~0%	~0%		~0%	99%
SI 3	1%	1%	1%	~0%	98%
SI 4	5%	27%	66%	2%	
SI 5	4%	5%	14%	1%	76%

Tableau 15 – Site isolé – Résultats d'analyse de contribution par composant sur l'indicateur formation d'ozone troposphérique

Du point de vue des composants des systèmes :

- La consommation de diesel domine les contributions dans tous les scénarios incluant une consommation de diesel, soit les scénarios SI 1 (~100%), SI 2 (99%), SI 3 (98%) et SI 5 (76%).
- Pour le système SI 4, la contribution des systèmes photovoltaïques devient prédominante, à hauteur de 66% en valeur relative, mais mineure en valeur absolue
- Les bâtiments ont un impact négligeable dans tous les scénarios (inférieur à 2%).

La formation d'ozone troposphérique est étroitement liée à la quantité de diesel consommée. Ainsi, la réduction de la consommation de diesel est déterminante pour minimiser l'impact sur cet indicateur.

### 5.5.4.3.Épuisement des ressources fossiles

Le potentiel d'épuisement des ressources fossiles est un indicateur de robustesse de niveau II.

L'indicateur d'épuisement des ressources fossiles est utilisé pour mesurer la quantité de ressources fossiles consommées tout au long du cycle de vie du matériel roulant pour le transport de personnes et de marchandises. L'épuisement des ressources fossiles est évalué en MJ selon le pouvoir calorifique du combustible. Il quantifie la quantité d'énergie extraite du sol.

Les ressources fossiles sont utilisées comme combustibles afin de générer des sources d'énergie. Notamment la production d'électricité et de chaleur pour les processus de fabrication. Les ressources fossiles sont considérées comme des ressources non renouvelables du fait de leur disponibilité limitée ainsi que de leur régénération à l'échelle humaine.

Les principales ressources fossiles utilisées dans les inventaires de cette étude sont l'uranium, le pétrole et le gaz naturel. Il est à noter que l'uranium est considéré comme une ressource fossile et non une ressource métallique, bien que l'uranium soit un métal et que le terme fossile se rapporte à de la matière organique sédimentée<sup>19</sup>. Cela est dû à un choix méthodologique du jeu de données EF3.1 qui considère l'uranium comme une ressource combustible.

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque composant des différents systèmes des différents scénarios du cas d'étude Site Isolé sur l'indicateur épuisement des ressources fossiles. L'ensemble des étapes du cycle de vie a été considéré pour chaque composant.

<sup>19</sup> <https://www.connaissancedesenergies.org/questions-et-reponses-energies/quest-ce-qu'une-energie-fossile>

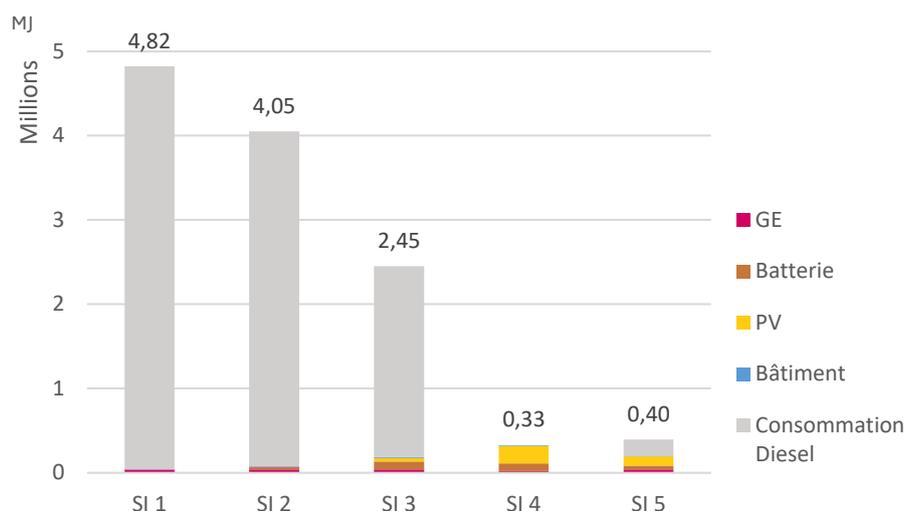


Figure 21 – Site isolé – Analyse de contribution sur l'indicateur épuisement des ressources fossiles (MJ)

D'un point de vue comparatif :

- Les scénarios intégrant une forte dépendance au diesel (SI 1, SI 2, SI 3) présentent des impacts sur l'indicateur épuisement des ressources fossiles nettement plus élevés que le scénario sans consommation de diesel SI 4 et le scénario avec une consommation limitée à 4000 L SI 5
- Entre le scénario le plus impactant SI 1 et le scénario le moins impactant SI 4, un facteur d'environ 15 est observé
- La contribution des systèmes photovoltaïques et des batteries augmente avec leur dimensionnement, cependant leurs impacts restent faibles par rapport à la consommation de diesel.

Épuisement des ressources fossiles	Composants des systèmes				
	GE	Batterie	PV	Bâtiment	Consommation Diesel
SI 1	1%			~0%	99%
SI 2	1%	1%		~0%	98%
SI 3	2%	4%	2%	~0%	92%
SI 4	6%	28%	63%	3%	
SI 5	10%	11%	28%	2%	49%

Tableau 16 – Site isolé – Résultats d'analyse de contribution par composant sur l'indicateur épuisement des ressources fossiles

Du point de vue des composants des systèmes :

- La consommation de diesel représente l'essentiel des impacts pour les scénarios SI 1, SI 2 et SI 3 (supérieur à 92%).
- Pour le Système SI 4, les impacts liés aux équipements photovoltaïques (63%) et batteries (28%) deviennent dominants, bien que leurs contributions restent faibles en valeur absolue par rapport aux scénarios incluant une consommation de diesel non nulle.
- Les impacts liés au bâtiment (inférieurs à 3%) sont négligeables pour tous les systèmes.

L'épuisement des ressources fossiles est étroitement lié à la quantité de diesel consommée, qui nécessite l'extraction de pétrole. Ainsi, la réduction de la consommation de diesel est déterminante pour minimiser l'impact sur cet indicateur.

#### 5.5.4.4. Acidification des sols et de l'eau

C'est un indicateur de robustesse de niveau II.

L'acidification des sols et de l'eau est provoquée par des retombées de pluies acides résultant du lessivage de gaz se dissolvant dans l'eau en formant des espèces acides.

Les impacts d'acidification des sols et de l'eau sont principalement générés par les émissions dans l'atmosphère de dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), de dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>) et d'ammoniac (NH<sub>3</sub>). Ces gaz, très solubles dans l'eau, forment des molécules acides au contact de l'eau présent dans l'atmosphère (acide sulfurique, acide sulfureux, acide nitrique).

Les conséquences sont nombreuses, en voici quelques-unes :

- L'acidification des sols inhibe la croissance des végétaux, ce qui entraîne une perte de la biodiversité. Les sols cultivés atteints peuvent perdre en rendements et nécessiter un apport en chaux.
- La faune peut être atteinte par contact cutané en cas de pluies acides ou en buvant de l'eau acide.
- Des effets indirects peuvent se manifester par l'augmentation ou la diminution de substances selon l'acidité du milieu (Baker). L'acidité peut provoquer des réactions (notamment avec le calcaire) générant des composés qui eux-mêmes ont des effets potentiels sur les écosystèmes, la faune ou la flore.

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque composant des différents systèmes des différents scénarios du cas d'étude Site Isolé sur l'indicateur acidification des sols et de l'eau. L'ensemble des étapes du cycle de vie a été considéré pour chaque composant.

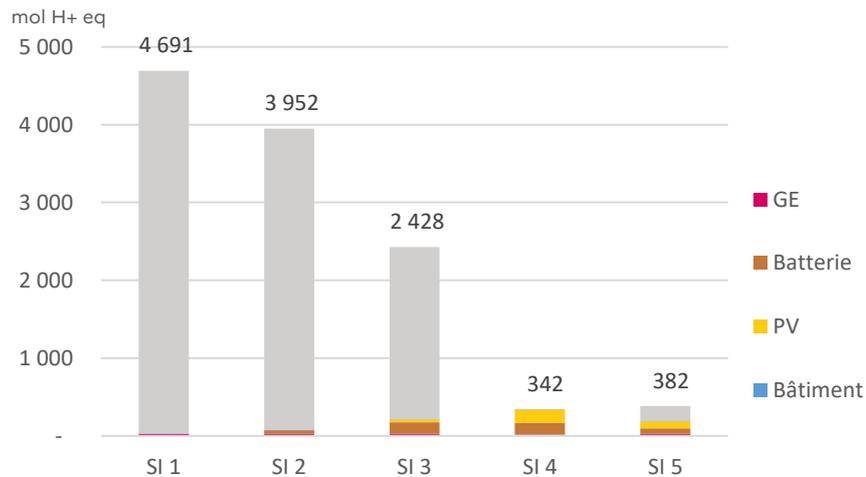


Figure 22 – Site isolé – Analyse de contribution sur l'indicateur acidification des sols et de l'eau (mol H+ eq)

D'un point de vue comparatif :

- L'impact lié à la consommation de diesel est majeur par rapport à celle des systèmes photovoltaïques et des batteries. Les scénarios intégrant une forte dépendance au diesel (SI 1, SI 2 et SI 3) présentent des impacts significativement plus élevés sur l'acidification des sols et de l'eau que le scénario avec une consommation limitée SI 5 et celui sans diesel utilisé SI 4.
- La contribution, mineure, des systèmes photovoltaïques et des batteries augmente avec leur dimensionnement.
- Entre le scénario le plus impactant SI 1 et le scénario le moins impactant SI 4, un facteur 14 est observé.

Acidification des sols et de l'eau	Composants des systèmes				
	GE	Batterie	PV	Bâtiment	Consommation Diesel
SI 1	1%			~0%	99%
SI 2	1%	1%		~0%	98%
SI 3	1%	6%	1%	~0%	91%
SI 4	4%	45%	50%	2%	
SI 5	7%	19%	24%	2%	49%

Tableau 17 – Site isolé – Résultats d'analyse de contribution par composant sur l'indicateur acidification des sols et de l'eau

Du point de vue des composants des systèmes :

- La consommation de diesel est responsable de la majorité des impacts dans tous les scénarios incluant une consommation de diesel, soit les scénarios SI 1 (99%), SI 2 (98%), SI 3 (91%) et SI 5 (49%).
- Les impacts liés aux équipements photovoltaïques (principalement dû aux éléments en cuivre et zinc) et batteries (principalement dû au lithium) sont dominants dans le scénario SI 4, bien que leur contribution reste faible en valeur absolue par rapport aux scénarios incluant une consommation importante de diesel.
- Les impacts liés au bâtiment sont négligeables pour tous les systèmes.

La quantité de diesel consommée est le contributeur majeur sur l'acidification des sols et de l'eau. Par conséquent, réduire la consommation est essentiel pour limiter l'impact sur cet indicateur.

#### 5.5.4.5. Eutrophisation terrestre

L'eutrophisation est un indicateur de robustesse de niveau II.

L'eutrophisation désigne l'accumulation dans les milieux aquatiques et terrestres de substances nutritives. Les nutriments azotés et phosphorés participent à la croissance des végétaux. C'est la raison pour laquelle les engrais contenant de l'azote et du phosphate jouent un rôle si important dans l'agriculture (Justus Liebig, 1841). En présence de ces nutriments, les espèces végétales des milieux aquatiques et terrestres prospèrent, mais des apports trop importants et leur accumulation provoquent le déséquilibre du milieu.

L'eutrophisation terrestre est mesurée en mole azote équivalent (mol N eq). Elle se caractérise par la quantité de substances nutritive azotées émise dans l'environnement et la proportion moyenne de ces substances atteignant les milieux terrestres.

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque composant des différents systèmes des différents scénarios du cas d'étude Site Isolé sur l'indicateur eutrophisation terrestre. L'ensemble des étapes du cycle de vie a été considéré pour chaque composant.

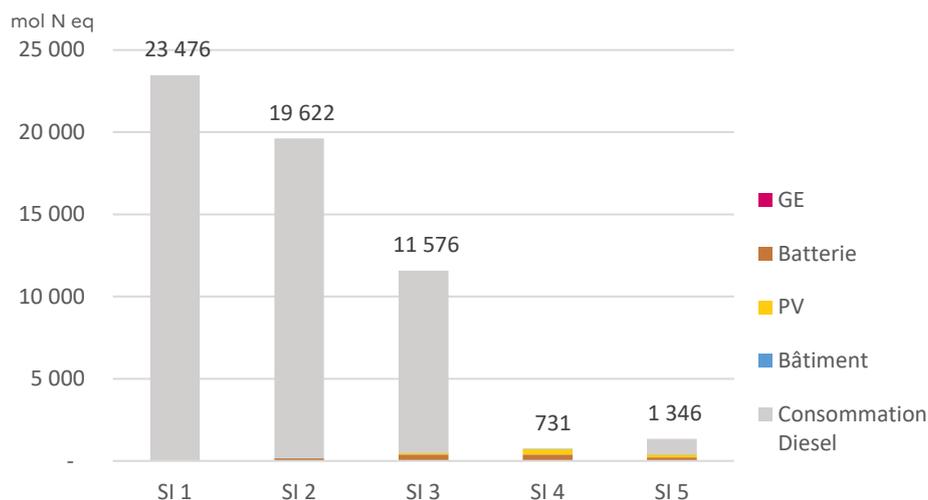


Figure 23 – Site isolé – Analyse de contribution sur l'indicateur eutrophisation terrestre (mol N eq)

D'un point de vue comparatif :

- Les scénarios utilisant une forte consommation de diesel (SI 1, SI 2 et SI 3) présentent des impacts significativement plus élevés sur l'indicateur eutrophisation terrestre que les scénarios avec une consommation limitée SI 5 et celui sans diesel utilisé SI 4.
- Les variations d'impacts des batteries et des systèmes photovoltaïques entre les systèmes sont légères par rapport à l'impact de la consommation de diesel. Elles sont directement liées au dimensionnement des équipements dans chaque système.
- Entre le scénario le plus impactant SI 1 et le scénario le moins impactant SI 4, un facteur 32 est observé.

Eutrophisation terrestre	Composants des systèmes				
	GE	Batterie	PV	Bâtiment	Consommation Diesel
SI 1	~0%			~0%	100%
SI 2	~0%	1%		~0%	99%
SI 3	~0%	3%	1%	~0%	96%
SI 4	3%	49%	46%	1%	
SI 5	3%	12%	13%	1%	70%

Tableau 18 – Site isolé – Résultats d'analyse de contribution par composant sur l'indicateur eutrophisation terrestre

Du point de vue des composants des systèmes :

- La consommation de diesel est responsable de la majorité des impacts dans tous les scénarios incluant une consommation de diesel, soit les scénarios SI 1 (>99%), SI 2 (99%), SI 3 (96%) et SI 5 (70%).
- Les impacts liés aux équipements photovoltaïques et batteries sont dominants et équivalents dans le scénario SI 4, bien que leur contribution reste faible en valeur absolue par rapport aux scénarios incluant une consommation importante de diesel.
- Les impacts liés au bâtiment sont négligeables pour tous les systèmes.

Les impacts de l'indicateur eutrophisation terrestre sont fortement liés à la quantité de diesel consommé : plus l'utilisation de diesel est élevée, plus les impacts augmentent. Réduire ou éliminer cette consommation, comme illustré par les scénarios SI 4 et SI 5, représente une stratégie essentielle pour minimiser l'impact environnemental global sur cet indicateur.

### 5.5.4.6.Épuisement des ressources minerais et métaux

Le potentiel d'épuisement des ressources minérales et métalliques est un indicateur de robustesse de niveau III.

L'indicateur d'épuisement des ressources minérales est utilisé pour évaluer la quantité de ressources minérales consommées sur l'ensemble des composants des systèmes.

Les ressources minérales sont nécessaires dans la fabrication des GE, des systèmes photovoltaïques, des batteries ou de la quantité de diesel. Elles sont extraites de la terre et transformées en matériaux tels que les métaux.

Les ressources minérales ne sont pas renouvelables à l'échelle humaine. La consommation excessive de ces ressources rend plus difficile et coûteuse leur extraction, compromettant leur disponibilité.

L'épuisement des ressources minérales est évalué en antimoine équivalent (Sb eq) et dépend de deux facteurs :

- Le stock disponible sur Terre
- La vitesse d'extraction par les humains

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque composant des différents systèmes des différents scénarios du cas d'étude Site Isolé sur l'indicateur épuisement des ressources minerais et métaux. L'ensemble des étapes du cycle de vie a été considéré pour chaque composant.

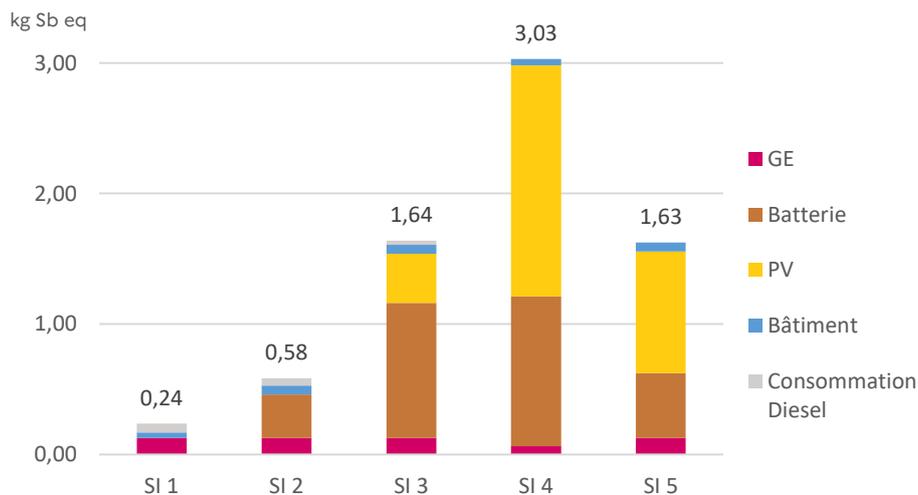


Figure 24 – Site isolé – Analyse de contribution sur l'indicateur épuisement des ressources minerais et métaux (kg Sb eq)

D'un point de vue comparatif :

- Le scénario SI 4 est le plus impactant sur l'indicateur épuisement des ressources minerais et métaux. Il est 13 fois plus impactant que le scénario SI 1.
- Les scénarios SI 3 et SI 5 ont pratiquement les mêmes impacts. Leurs impacts sont liés aux mêmes composants (la batterie et les panneaux PV). Dans le cas de SI 3, la batterie domine les impacts, alors que dans le cas de SI 5, ce sont le système photovoltaïque qui sont prédominants au niveau des impacts.
- Les impacts du GE dans le scénario SI 4 est plus faible que dans les autres scénarios car le générateur n'est utilisé qu'en secours (consommation nulle et usure limitée à l'affront du temps). Pour rappel, il a été supposé une durée de vie de 20 ans par rapport à 10 ans pour un générateur utilisé quotidiennement.
- La consommation de diesel est peu impactante sur cet indicateur par rapport aux équipements (GE, batteries, panneaux PV).

Épuisement des ressources minerais et métaux	Composants des systèmes				
	GE	Batterie	PV	Bâtiment	Consommation Diesel
SI 1	54%			17%	29%
SI 2	22%	57%		12%	10%
SI 3	8%	63%	23%	4%	2%
SI 4	2%	38%	58%	2%	
SI 5	8%	31%	57%	4%	~0%

Tableau 19 – Site isolé – Résultats d'analyse de contribution par composant sur l'indicateur épuisement des ressources minerais et métaux

Du point de vue des composants des systèmes :

- Les équipements – GE, batteries, panneaux PV – sont plus contributeurs que la consommation de diesel. Sur le SI 1, le GE représente la majorité des impacts (54%).
- La batterie est le contributeur majoritaire pour les scénarios SI 2 et SI 3.
- Les systèmes photovoltaïques deviennent les principaux contributeurs dans les scénarios SI 4 et SI 5. C'est directement lié à l'utilisation de leurs matières premières, silicium, terres rares dans les composants électroniques et aluminium pour les cadres et câbles de connexions.
- L'impact lié au bâtiment reste faible dans les scénarios incluant des panneaux PV (inférieur à 4%). Sur SI 1 et SI 2, la proposition d'impact de l'infrastructure est supérieure par rapport à SI 3, SI 4 et SI 5.

Les scénarios impliquant une forte utilisation des batteries et des systèmes photovoltaïques présentent un impact plus élevé, notamment en raison de l'extraction des matières premières nécessaires à leur fabrication, en particulier le cuivre et l'or, ce dernier élément en impact indirect des composants électroniques. Ainsi, le scénario SI 4 affiche l'impact le plus important. À l'inverse, SI 1 et SI 2, qui intègrent moins d'éléments à forte empreinte, montrent des valeurs nettement plus faibles. L'influence de la consommation de diesel reste marginale dans la plupart des scénarios.

### 5.5.4.7. Effets des particules fines

La pollution aux particules est un indicateur de robustesse de niveau I.

La pollution aux particules se caractérise par une concentration de particules de diamètre de moins de 2,5 µm à 10 µm. Elle se manifeste par des événements localisés lorsque la concentration dans l'atmosphère dépasse les seuils recommandés. L'inhalation de particules fines engendre des maladies respiratoires chroniques et peut entraîner une mortalité prématurée. L'indicateur est mesuré en incidence de maladie (disease incidence).

Les particules peuvent être d'origines naturelles, pollen, feux de forêt, éruptions. Elles sont cependant majoritairement d'origine anthropogénique, majoritairement issues de combustions incomplètes liées aux activités industrielles, domestiques ou aux transports. Elles sont aussi émises directement par l'agriculture dans les travaux d'épandage. Les particules fines peuvent aussi être issues de la transformation chimique entre polluants.

Dans le modèle ACV, les émissions aux particules fines sont causées par les particules fines (< 2,5 µm : PM2.5 et < 10 µm : PM10), l'ammoniac dans l'air, le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>) et plus généralement les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>).

La figure ci-après fournit la contribution relative de chaque composant des différents systèmes des différents scénarios du cas d'étude Site Isolé sur l'indicateur effets des particules fines. L'ensemble des étapes du cycle de vie a été considéré pour chaque composant.

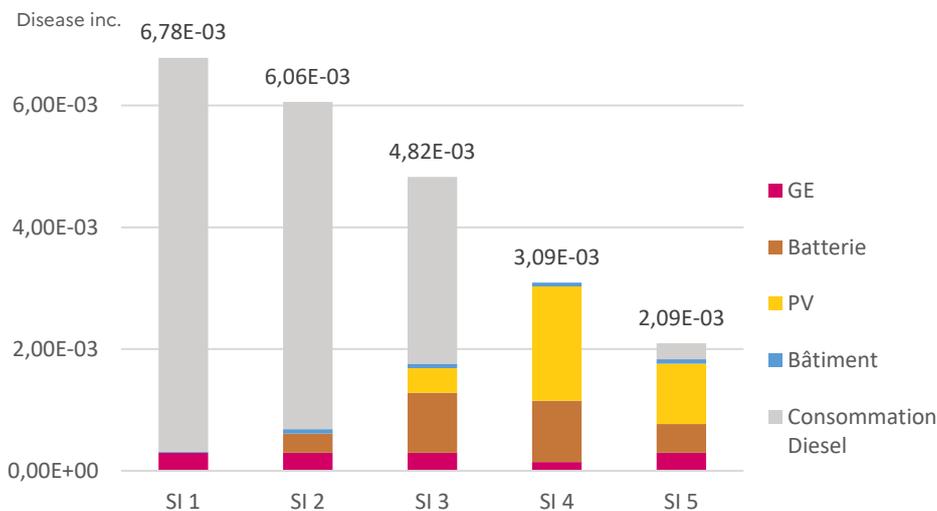


Figure 25 – Site isolé – Analyse de contribution sur l'indicateur effets des particules fines (disease inc.)

D'un point de vue comparatif :

- Les scénarios utilisant une forte consommation de diesel (SI 1, SI 2 et SI 3) présentent des impacts plus élevés sur l'indicateur pollution particules fines que les scénarios sans diesel utilisé SI 4 et celui avec une consommation limitée SI 5.
- Les variations d'impacts des batteries et des systèmes photovoltaïques entre les systèmes en contenant sont dues au dimensionnement des équipements dans chaque système.
- Entre le scénario le plus impactant SI 1 et le scénario le moins impactant SI 5, un facteur 3 est observé. L'écart étant relativement faible entre les scénarios, les conclusions seront à valider avec la partie incertitudes.

Effets des particules fines	Composants des systèmes				
	GE	Batterie	PV	Bâtiment	Consommation Diesel
SI 1	4%			~0%	95%
SI 2	5%	5%		1%	89%
SI 3	6%	21%	8%	2%	64%
SI 4	5%	33%	61%	2%	
SI 5	14%	23%	47%	4%	12%

Tableau 20 – Site isolé – Résultats d'analyse de contribution par composant sur l'indicateur effets des particules fines

Du point de vue des composants des systèmes :

- La consommation de diesel est responsable de la majorité des impacts dans tous les scénarios incluant une forte consommation de diesel, soit les scénarios SI 1 (95%), SI 2 (89%) et SI 3 (64%). Dans le scénario SI 5, la quantité de diesel est limitée à 4000 L par an et le dimensionnement du système photovoltaïque et batteries est plus important que dans les trois premiers scénarios. Ainsi, ce sont les panneaux photovoltaïques qui sont les plus impactants dans le système SI 5.
- Les impacts liés aux équipements photovoltaïques sont dominants dans le scénario SI 4, bien que leur contribution reste moins importante en valeur absolue par rapport aux scénarios incluant une consommation forte de diesel.
- Les impacts liés au bâtiment sont négligeables pour tous les systèmes.

Les impacts liés à la pollution des particules fines sont étroitement liés à la consommation de diesel : une utilisation accrue entraîne des impacts plus importants. Cependant, en utilisant de faibles quantités de

diesel de manière raisonnée SI 5, il est possible d'avoir moins d'impact qu'un système sans consommation de diesel SI 4.

### 5.5.4.8. Eutrophisation eaux douces

L'eutrophisation aquatique d'eau douce est un indicateur de robustesse de niveau II.

Le mécanisme de l'eutrophisation est détaillé dans la partie précédente 0.

L'eutrophisation aquatique d'eau douce est mesurée en Phosphate équivalent (P eq). Elle se caractérise par la quantité de phosphate émis dans l'environnement et sa proportion moyenne atteignant les milieux aquatiques d'eau douce.

Les principales sources de l'émission de phosphate dans les eaux douces sont d'une part les épandages d'engrais phosphatés sur les cultures, et d'autre part les stockages de déchets miniers à ciel ouvert. Ces méthodes de stockage permettent le ruissellement des substances polluantes sur un horizon temporel long. En particulier les terrils miniers de charbon et de lignite et les résidus miniers sulfureux issus des mines d'or et de cuivre, susceptibles de produire un drainage minier acide.

La figure ci-dessous fournit la contribution relative de chaque composant des différents systèmes des différents scénarios du cas d'étude Site Isolé sur l'indicateur eutrophisation eaux douces. L'ensemble des étapes du cycle de vie a été considéré pour chaque composant.

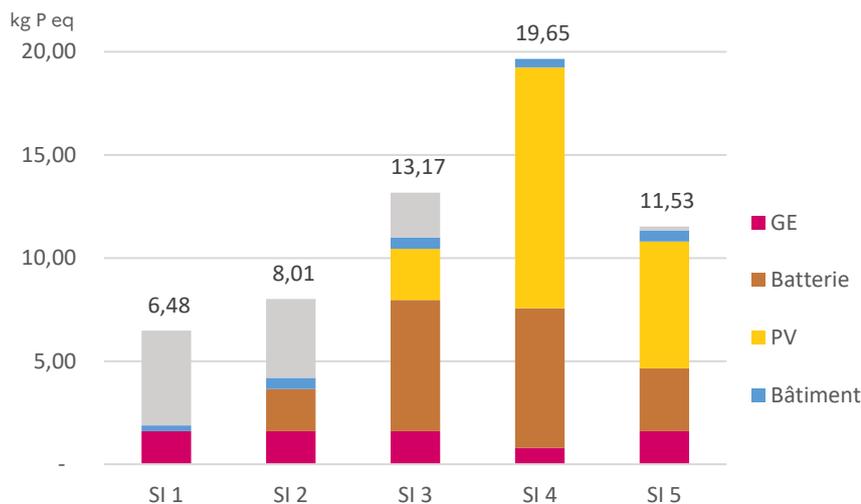


Figure 26 – Site isolé – Analyse de contribution sur l'indicateur eutrophisation eaux douces (kg P eq)

D'un point de vue comparatif :

- Entre le scénario le moins impactant SI 1 et le scénario le plus impactant SI 4, un facteur 3 est observé.
- Les scénarios SI 3 et SI 5 ont des impacts équivalents. Les impacts de ces scénarios sont liés aux mêmes composants (la batterie et les panneaux PV). Dans le cas de SI 3, la batterie domine les impacts, alors que dans le cas de SI 5, ce sont le système photovoltaïque qui sont prédominants au niveau des impacts.
- Les impacts du GE dans le scénario SI 4 est plus faible que dans les autres scénarios car le générateur n'est utilisé qu'en secours (consommation nulle et usure limitée à l'affront du temps). Pour rappel, il a été supposé une durée de vie de 20 ans par rapport à 10 ans pour un générateur utilisé quotidiennement.

Eutrophisation en eaux douces	Composants des systèmes				
	GE	Batterie	PV	Bâtiment	Consommation Diesel
SI 1	25%			4%	71%
SI 2	20%	25%		7%	48%
SI 3	12%	48%	19%	4%	17%
SI 4	4%	34%	59%	2%	
SI 5	14%	26%	53%	5%	2%

Tableau 21 – Site isolé – Résultats d'analyse de contribution par composant sur l'indicateur eutrophisation eaux douces

Du point de vue des composants des systèmes :

- La consommation de diesel est le contributeur principal pour le cas SI 1 (71%) et le cas SI 2 (48%). Pour les cas SI 3 et SI 5, le dimensionnement des équipements sont plus impactant que la consommation de diesel sur l'eutrophisation en eaux douces.
- Les impacts liés à la batterie, notamment la présence de cuivre, sont dominants dans le scénario SI 3 (48%).
- Les équipements photovoltaïques sont responsables de la majorité des impacts dans les scénarios SI 4 (59%) et SI 5 (53%).
- Les impacts liés au bâtiment sont faibles pour tous les systèmes et varient de 2 à 7%.

Les impacts liés à l'eutrophisation en eaux douces sont étroitement liés au dimensionnement de la batterie et des systèmes photovoltaïques. Ainsi, le scénario SI 4 présente l'impact le plus important. À l'inverse, SI 1 et SI 2 affichent des valeurs plus faibles, avec une contribution significative de la consommation de diesel, qui reste un facteur d'impact non négligeable.

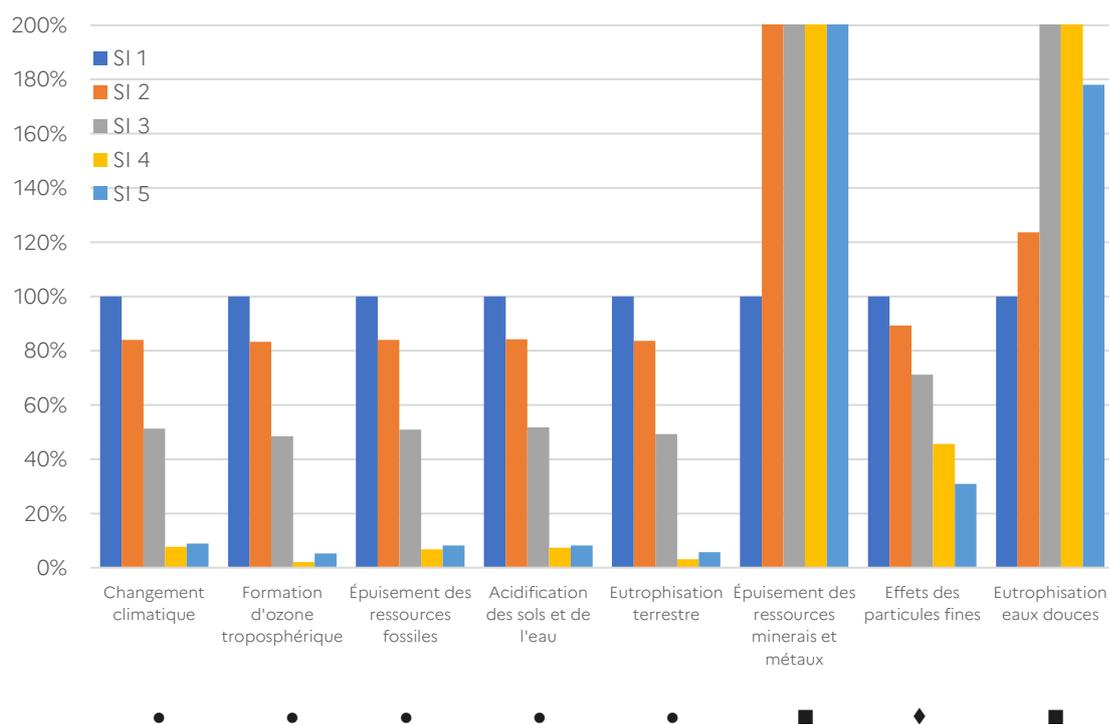
## 5.5.5. Comparaison des impacts des systèmes de SI 1 à SI 5

### 5.5.5.1. Comparaison des indicateurs pertinents

L'objectif de cette analyse est de dégager les tendances des indicateurs pertinents non plus unitairement, mais par groupes d'indicateurs qui évoluent de façon corrélée. Ainsi, la comparaison des systèmes en sera simplifiée et l'interprétation des résultats plus claire.

Cette étape permet de chercher des pistes pour comprendre les causes de ces évolutions, et donc d'aboutir à une compréhension des enjeux.

Les résultats des indicateurs pertinents sont montrés sur la Figure 27 ci-dessous, rapportés à la base 100 du SI 1 (GE seul, presque 100 000 L de consommation annuelle de Diesel). Ils sont montrés par ordre décroissant de pondération du SI 3.



Base 100 : Système Isolé 1 (SI 1 = GE seul)

Figure 27 – Site isolé – Comparaison des indicateurs pertinents des 5 systèmes

L'analyse du graphe en Figure 27, croisée avec les analyses indicateur par indicateur menées en section 5.5.4, fait apparaître trois groupes d'indicateurs aux leviers et causes similaires :

- Les indicateurs notés ●, respectivement Changement climatique, Formation d'ozone troposphérique, Épuisement des ressources fossiles, Acidification des sols et de l'eau et Eutrophisation terrestre sont fortement liées à la consommation diesel, et moins influencés par les autres extrants des systèmes ;
- Les indicateurs notés ■, respectivement, Épuisement des ressources minerais et métaux, et Eutrophisation eaux douces sont surtout liés, pour les systèmes tel que dimensionnés dans l'étude, d'abord aux matériaux des batteries et des systèmes photovoltaïques, et dans une moindre mesure à la consommation de diesel ;
- L'indicateur noté ◆, Effets des particules fines, reste avec une évolution différente des deux groupes ci-dessus, selon les systèmes SI 1 à SI 5. L'analyse de la Figure 25 en section 5.5.4.7 l'a déjà montré comme dépendant d'abord de la consommation de diesel, puis des matériaux des batteries et des systèmes photovoltaïques de grande puissance.

Cette approche « simplifiée » est validée par la comparaison des contributions indicateur par indicateur détaillée en section 5.5.4.7 ou la comparaison de tous les indicateurs entre eux par système montrée en Annexe 7.8 page 78. Elle permet d'appréhender plus facilement les variations et de tirer les conclusions vers des recommandations.

Ainsi, dans une volonté simplificatrice, la Figure 27 peut être lue comme suit :

1. Les impacts environnementaux diminuent sur les indicateurs (●) au fur et à mesure que l'on passe du système SI 1 au système SI 4, puis croissent légèrement de SI 4 au SI 5,
2. Tandis que les indicateurs (■) croissent au fur et à mesure que l'on passe du système SI 1 au système SI 4, puis diminuent pour SI 5 et reviennent à un niveau inférieur au SI 3 ;
3. L'indicateur (◆) Effet des Particules Fines décroît au fur et à mesure que l'on passe du système SI 1 au système SI 5.

Les conclusions en termes d'impact environnemental des options de système énergétique du site isolé de Kaw peuvent être exprimées comme suit, avant de discuter de l'assertivité de ces conclusions en fonction des seuils d'écart significatifs plus loin :

1. Comparaison de SI 2 à la référence SI 1: une batterie ajoutée au générateur optimise le fonctionnement de celui-ci et diminue la consommation diesel de 17%, et par suite
  - i. Les catégories d'impact (●) diminuent d'à peu près autant ;
  - ii. Les catégories d'impact (■) augmentent de façon forte à modérée, respectivement pour Épuisement des ressources minerais et métaux (+130%), l'Eutrophisation des eaux douces (+25%) ;
  - iii. L'indicateur (◆) Effet des Particules Fines décroît d'environ la moitié du gain des (●), ca. 10%.
2. Comparaison de SI 3 à SI 2 : un système photovoltaïque ajouté au générateur et batterie diminue à nouveau de 43% la consommation diesel, et par suite
  - i. Les catégories d'impact (●) diminuent à peu près d'autant ;
  - ii. Les catégories d'impact (■), augmentent dans les mêmes proportions que précédemment, de fortement à modérément ;
  - iii. L'indicateur (◆) Effet des Particules Fines décroît d'environ la moitié du gain des (●), ca. 20%.
3. Comparaison de SI 4 à SI 3 : La suppression opérationnelle du Groupe Électrogène, et donc la suppression de la consommation de diesel en même temps que l'augmentation de la capacité de la batterie de 7% et de la puissance de l'installation photovoltaïque par un facteur 7 :
  - i. Divise au moins par 4 les catégories d'impact (●)
  - ii. Mais augmente toujours dans les mêmes proportions les catégories d'impact (■), de fortement à modérément ;
  - iii. L'indicateur (◆) Effet des Particules Fines décroît significativement.
4. Comparaison de SI 5 à SI 4 : La réintégration opérationnelle du Groupe Électrogène, avec une consommation diesel « optimisée » (limitée à 4000 L), permet de réduire significativement les systèmes : division par un facteur plus que 2,25 de la capacité de la batterie, et presque 2,6 de la puissance de l'installation photovoltaïque.
  - i. Les catégories d'impact liées majoritairement à la consommation diesel augmentent fortement par rapport à SI 4 qui ne consommait aucun diesel, restant néanmoins à 1/5<sup>ème</sup> des valeurs du SI 3 qui en consommait 47 000 L (●),
  - ii. et ramène les catégories d'impact (■) proches de leurs valeurs pour SI 3 dont la batterie est presque équivalente et l'installation photovoltaïque 2,7 fois moindre que le SI 5.
  - iii. L'indicateur (◆) Effet des Particules Fines décroît encore par rapport à SI 4 : la réduction des systèmes batterie et photovoltaïque « surcompensent » la consommation de 4000 L de diesel pour cette catégorie d'impact.

Au global, en prenant référence sur SI 1 (GE seul), les systèmes SI 4 et SI 5 montrent des impacts au moins 10 fois moindres sur les catégories (●), un impact 2 ou 3 fois moindre sur la catégorie (◆), mais un transfert vers les catégories (■), principalement vers l'Épuisement des ressources minerais et métaux qui culmine à 7~13 fois la valeur du SI 1.

Il n'est pas possible d'ordonner strictement entre eux les autres systèmes par mérite environnemental décroissant, du fait du transfert d'impact vers l'Épuisement des ressources minerais et métaux.

Pour éclairer la comparaison, qui ne permet pas de conclure avec une forte assertivité, la mise en œuvre de l'indicateur « Score Unique » du JRC est réalisée au paragraphe suivant.

### 5.5.5.2.Éclairage par le Score Unique

La comparaison de scénarios par le biais d'un Score Unique n'est pas recommandée par les normes ISO 14040 et 14044 de l'ACV, car l'étape de pondération implique des choix de valeurs : l'utilisation d'une pondération différente entraînerait des conclusions différentes. La pondération recommandée par EF3.1 est utilisée ici pour d'apporter un éclairage additionnel à l'analyse séparée des indicateurs pertinents conduite en section 5.5.4 à partir de la page 43. Le but est de proposer un jugement prenant en compte le transfert d'impact vers l'Épuisement des ressources minerais et métaux via la pondération relative des catégories d'impact.

La Figure 28 montre SI 4 et SI 5 comme les moins impactants pour l'environnement (de Score Uniques proches), et classe ensuite le SI 3, SI 2 et SI 1.

Le fort poids accordé sur le Changement Climatique (21,06%) par rapport à celui à l'Épuisement des ressources minerais et métaux (7.55%) est visible dans le résultat du Score Unique – cf. Tableau 28.

Une discussion sur les incertitudes du Score Unique est introduite en section 5.6.4.4 page 66.

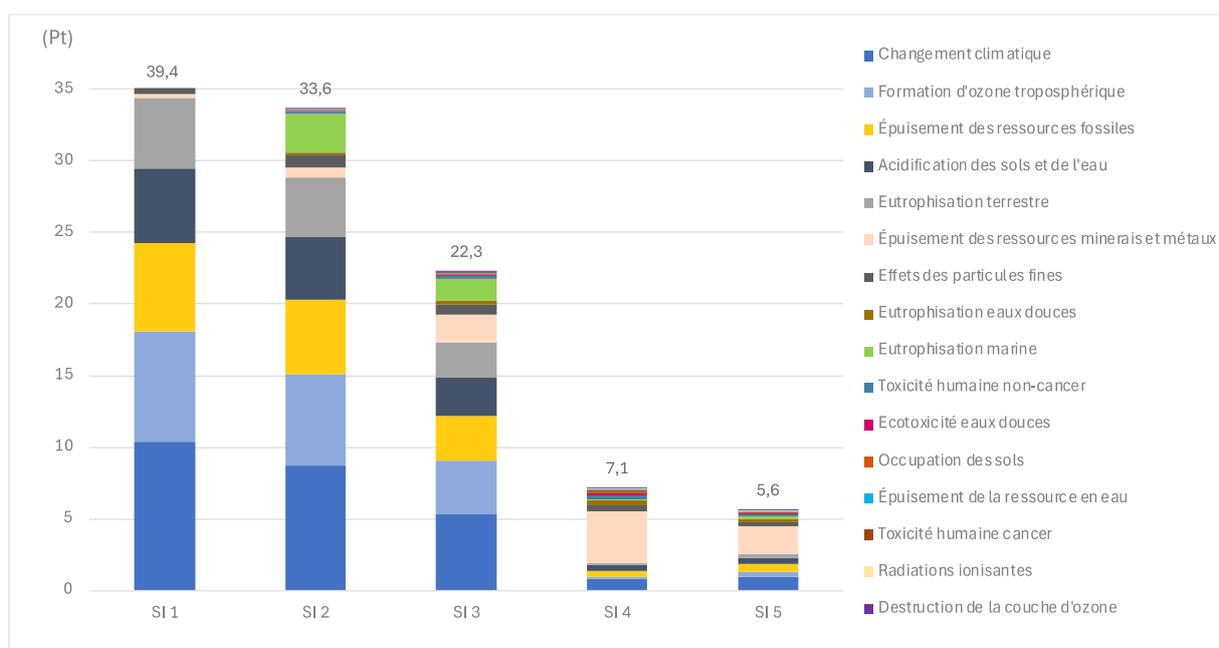


Figure 28 – Site isolé – Scores uniques EF3.1 des 5 systèmes

## 5.6. Sensibilités, incertitudes et limitations

### 5.6.1. Analyses de sensibilités locales : introduction

Certains paramètres de dimensionnement et de calcul étant en rapide amélioration avec l'évolution des technologies, la sensibilité des résultats à différents paramètres a été testée :

- Efficacité des panneaux photovoltaïques, caractérisée par la puissance surfacique, choisie à +/-15% autour de la valeur centrale de 230W/m<sup>2</sup> car la valeur centrale représente le marché actuel des panneaux photovoltaïques. Cette valeur moins 15% correspond aux panneaux photovoltaïques d'y a 5 ans et cette valeur plus 15% est la puissance surfacique envisageable dans un futur assez proche.

Durée de vie des panneaux photovoltaïques, choisie à  $\pm 5$  ans autour de la valeur centrale de 30 ans, il semble raisonnable de réaliser une sensibilité de 5 ans sur des panneaux photovoltaïques actuels de 30 ans.

- Densité énergétique de la batterie, choisie à  $\pm 15\%$  autour de la valeur centrale de 130Wh/kg (équivalente à 160Wh/kg des cellules). Un écart de  $-15\%$  correspond à la différence de densité énergétique avec une batterie à LiCoO<sub>2</sub>, technologie de l'accumulateur lithium-ion commercialisé par Sony en 1991, tandis que les batteries NMC atteignent la densité de 145Wh/kg. Les fabricants annoncent des capacités spécifiques en hausse au fur et à mesure des améliorations de leurs modèles.
- Durée de vie de la batterie, choisie à  $\pm 2$  ans comme arrondi de  $\pm 15\%$  autour de la valeur centrale conservatrice de 15 ans, par cohérence avec l'approche de sensibilité antérieure. La durée de vie d'une batterie LFP est influencée par de nombreux facteurs (profondeur de décharge, puissance de la charge/décharge, température d'utilisation). Le retour du Comité Technique sollicité statue en faveur d'une durabilité des batteries meilleure qu'espérée. Des fabricants garantissent aujourd'hui leurs batteries jusqu'à 20 ans.

Ces variations ont été mises en œuvre sur le Système SI 5, qui montre non seulement les impacts environnementaux les plus faibles, mais aussi le meilleur engagement des systèmes énergétiques.

Il est à noter que la durée de vie des batteries, qui est définie par 15 ans ou 6000 cycles, affiche un résultat de 15 ans quels que soient les 5 systèmes : les batteries sont donc limitées par le temps dans les 5 systèmes, et non par leur nombre de cycles. Il n'a pas été nécessaire de tester la sensibilité au « changement de mode de vieillissement » (entre temps et cyclage) de la batterie.

## 5.6.2. Analyses de sensibilité locales : détails des sensibilités

### 5.6.2.1. Sensibilité à l'efficacité des panneaux photovoltaïques

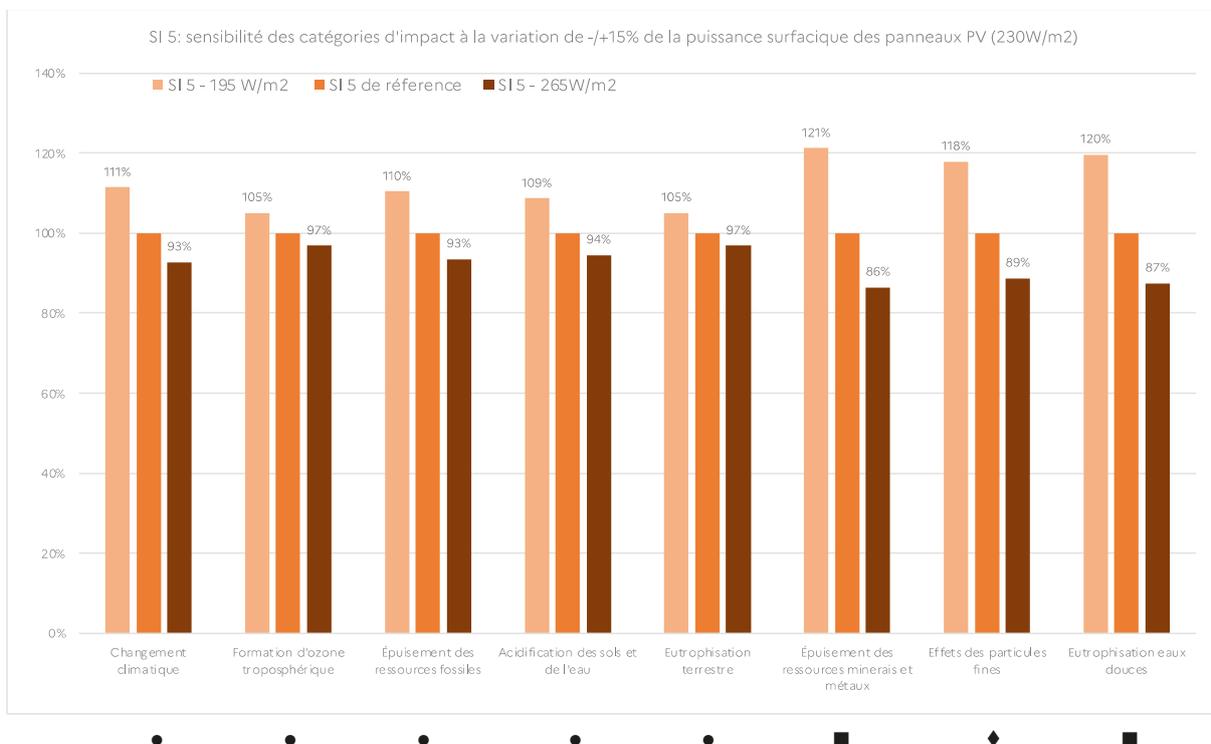


Figure 29 – Système 5 : Sensibilités des indicateurs à l'efficacité des panneaux photovoltaïques

Transparaissent sur le graphe ci-dessus les 3 groupes d'indicateurs et leurs leviers, introduits en section 5.6.1 page 58 et rappelés par les symboles (●) (■) (◆), en comparant la variation en % des indicateurs en sortie à la variation de 15% en entrée du paramètre d'efficacité du système photovoltaïque :

- Les indicateurs (■) et (◆) sont les plus sensibles à une diminution de la masse de système photovoltaïque par l'augmentation de leur efficacité (rendement).
- Les indicateurs (●) réagissent au plus « moitié moins » que ces premiers.

### 5.6.2.2. Sensibilité à la durée de vie des panneaux photovoltaïques

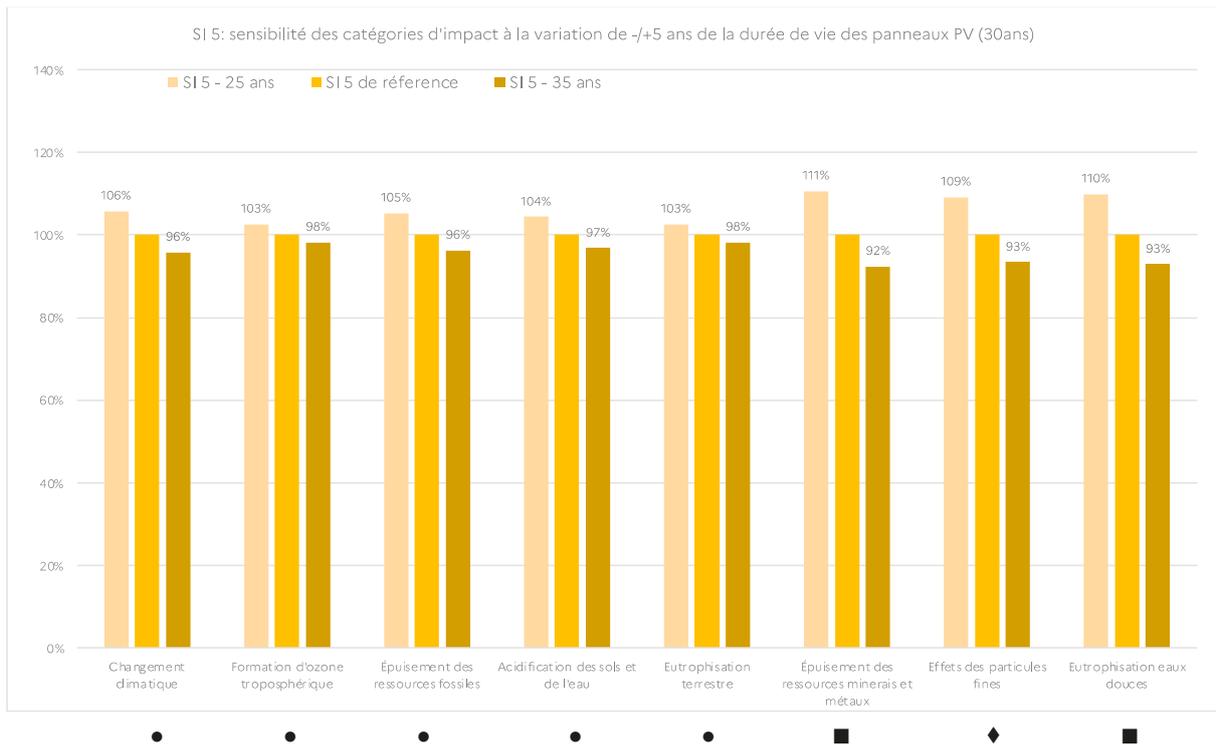


Figure 30 – Système 5 : Sensibilités des indicateurs à la durée de vie des systèmes photovoltaïques

Les conclusions du calcul de sensibilité à la durée de vie des systèmes photovoltaïques montré en graphe ci-dessus sont similaires à celles tirées en section précédente, avec une réaction moins forte des indicateurs à la variation du paramètre qui a varié.

### 5.6.2.3. Sensibilité à la densité énergétique de la batterie

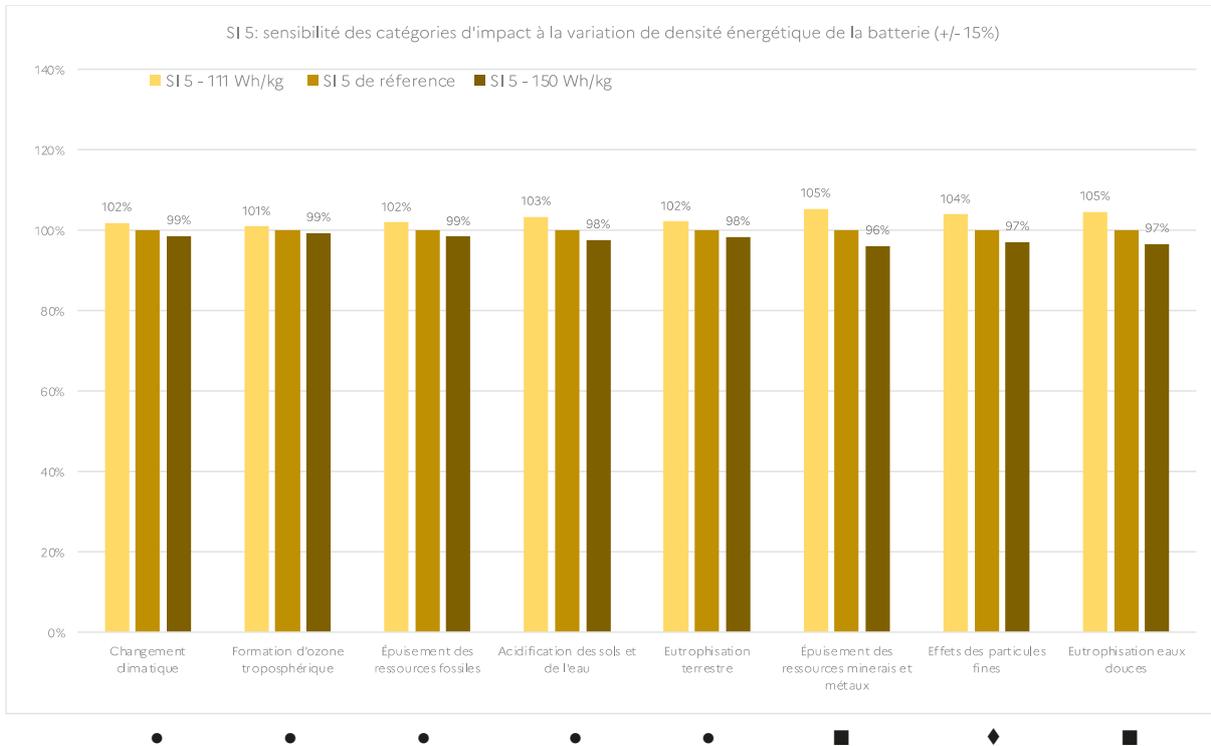


Figure 31 – Système 5 : Sensibilités des indicateurs à la densité énergétique de la batterie

On rappelle que la densité énergétique de la batterie de 130Wh/kg équivaut à 160Wh/kg des cellules. Sur le graphe ci-dessus se manifestent les indicateurs (■) et (◆) comme les plus sensibles à une diminution de la masse de la batterie par l'augmentation de sa densité énergétique.

Les indicateurs (●) réagissent bien moins fortement que ces premiers à la variation de la densité énergétique de la batterie.

### 5.6.2.4. Sensibilité à la durée de vie de la batterie

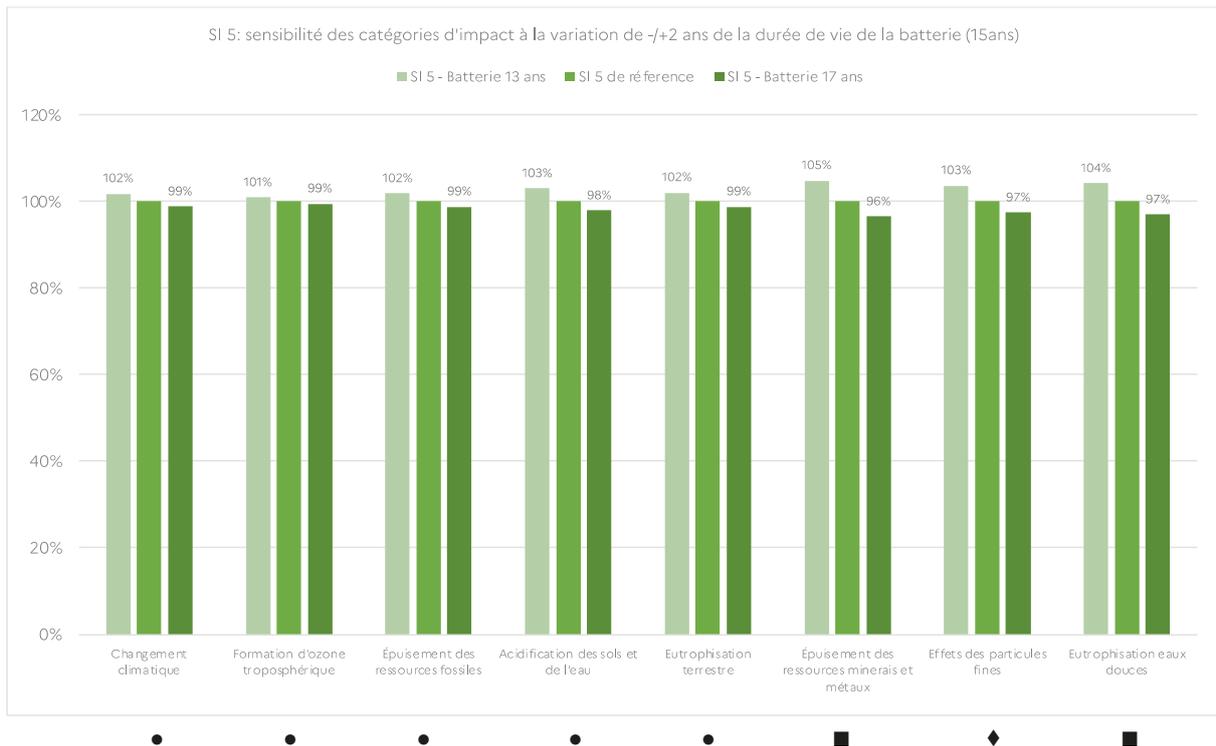


Figure 32 – Système 5 : Sensibilités des indicateurs à la durée de vie de la batterie

Sur le graphe ci-dessus, les indicateurs (■) et (◆) se montrent les plus sensibles à une diminution de la masse annuelle de la batterie impliquée dans le calcul par l'augmentation de sa durée de vie.

- Les indicateurs (●) réagissent bien moins fortement que ces premiers à cette variation.
- La capacité et le SoH de la batterie n'ont pas été modifiés dans le calcul de ces sensibilités (voir encadré page 23).

### 5.6.3. Analyses de sensibilités locales : conclusions

Les analyses de sensibilité dans des fourchettes d'environ +/-15% des paramètres choisis mettent en évidence

- Des variations des résultats d'au maximum 20% : il n'y a donc pas de « surréaction » des résultats, montrant leur stabilité ;
- La dépendance aux constituants introduite à la partie 5.5.5.1 de la discussion, en page 55 : les indicateurs qui réagissent le plus aux variations dans les tests de sensibilité sont bien ceux qui semblent liés aux constituants à travers les « groupes » d'indicateurs (■), (●) et (◆) – par exemple, jouer sur le système photovoltaïque, efficacité ou durée de vie, influe principalement sur (●) et (◆), et moins sur (■).

### 5.6.4. Analyses d'incertitude

#### 5.6.4.1. Introduction sur les incertitudes

L'analyse d'incertitude est effectuée sur le logiciel SimaPro par la méthode de Monte Carlo. Cette méthode consiste à calculer un grand nombre de fois les impacts environnementaux des scénarios en piochant au hasard les valeurs des paramètres selon la distribution qui leur est attribuée, autour de la valeur moyenne. Les résultats sont stockés et le logiciel en déduit des analyses statistiques. La moyenne,

l'écart-type, le coefficient de variation (l'écart-type divisé par la moyenne, en pourcentage), et les bornes de l'intervalle de confiance à 95 % sont ainsi calculés par le logiciel. Ces dernières sont utilisées pour représenter l'incertitude des scénarios grâce à des barres d'erreur à empâtement.

### ***Données primaires issues de Crystal Super Grid***

L'incertitude relative aux calculs d'Artelys avec Crystal Super Grid n'étant pas estimable par le logiciel, les résultats de la modélisation électrique en entrée de l'ACV ont été considérées comme fixes : il s'agit des puissances des installations photovoltaïques ou batterie (lorsqu'elles sont le résultat de calcul d'optimisation par Artelys Crystal Super Grid) et de la consommation de diesel. Notons qu'une limite importante de la modélisation de l'incertitude de l'ACV est l'absence d'estimation de l'incertitude de ces données primaires issues de Crystal Super Grid, entrées du modèle d'ACV.

### ***Choix des incertitudes en entrée***

#### *1. Données secondaires du modèle*

Les valeurs liées au vieillissement des installations photovoltaïques (30 ans), de leur électronique (15 ans) et des batteries (15 ans ou moins, selon cyclage), ont été intégrées au calcul de Monte-Carlo avec une incertitude arbitraire « de 5% » (en loi log-normale,  $(e^{\sqrt{\sigma}})^2 = 1.05$ ).

#### *2. Données secondaires provenant de l'ADEME et du COTECH*

Le même choix arbitraire de 5% a été posé pour les données secondaires de densité énergétique de la batterie (130Wh/kg de batterie, équivalente à 160Wh/kg de cellule), de puissance surfacique en crête des panneaux photovoltaïques (230kWc/m<sup>2</sup>).

#### *3. Données secondaires provenant d'ecoinvent 3.10*

Les incertitudes en loi log-normale des procédés issus de la base de données ecoinvent 3.10 ont été reprises sans changement.

#### *4. Données primaires provenant de l'ADEME (d'un benchmark de la CRE) pour les ICV des systèmes photovoltaïques*

L'accès à un échantillon important de données sur les constituants et fabrication des panneaux photovoltaïques et de leurs cellules PERC M10 a permis de modéliser une incertitude pour les données primaires conduisant à l'ICV de la ferme solaire.

Certaines données semblaient trop éloignées des moyennes, ou peu cohérentes entre elles. Elles ont donc été manuellement retirées de l'échantillon statistique. Aucune interaction n'a été possible avec les émetteurs des données, donc aucune vérification en cas de doutes et questions (par ex : concentration des solutions chimiques utilisées ; composition de certains adjuvants de production et de bien intermédiaires ; absence d'émissions dans l'air présentes dans ecoinvent 3.10, potentielle modernisation du processus de fabrication ou oubli de données). Des produits chimiques dont les ICV n'étaient pas disponibles dans ecoinvent 3.10 ont été approximés par des produits proches (par exemple, le Trichlorosilane (TCS, SiHCl<sub>3</sub>, CAS number **10025-78-2**) a été approximé par du Dimethyldichlorosilane (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub> Cl<sub>2</sub> Si en l'absence de correspondance exacte dans ecoinvent 3.10. Similairement, le « Boron » (=Bore) a été approximé par du Borax anhydride Na<sub>2</sub>[B<sub>4</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>].8H<sub>2</sub>O). De telles approximations, laissées à l'ACViste sans autre recours, sont de l'ordre d'une dizaine sur un inventaire de plus de 100 matières prises en compte. L'influence de ces approximations n'a pas été encadrée spécifiquement, mais une vérification globale par comparaison avec ecoinvent 3.10 est montrée en Annexe 7.5.

Les données issues d'ecoinvent 3.10 sont fournies avec des incertitudes quantitativement représentées par une loi statistique log-normale. La plupart des évaluations de cette loi se fondent sur une « matrice de Pedrigree » agrégeant des évaluations qualitatives sur une échelle à 5 degrés, selon des axes de fiabilité, complétude, adéquation temporelle, adéquation géographique, et adéquation technologique des données.

Il a été choisi, comme dans la majorité des jeux de données d'ecoinvent 3.10, d'approcher les variations des données par une loi log-normale, adaptée à la conjugaison statistique d'une multitude de petites incertitudes indépendantes sur des paramètres prenant leurs valeurs dans  $]0 ; +\infty[$ . Elle a été évaluée non par une matrice de Pedigree, mais par le calcul de la moyenne et l'écart type géométrique des échantillons de données disponibles.

SimaPro appelle « S2D » et prend en compte dans ses calculs la valeur de  $(e^{\sqrt{\hat{\sigma}}})^2$

où  $\hat{\sigma}$  est l'écart type géométrique de la variable  $x_i$ , défini par

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{(\sum_{i=1}^n p_i) - 1} \sum_{i=1}^n p_i (\ln(x_i) - \hat{\mu})^2$$

et  $\hat{\mu}$  la moyenne géométrique pondérée des poids de chacun des volumes de production  $p_i$

$$\hat{\mu} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n p_i} \sum_{i=1}^n p_i \ln(x_i)$$

Pour certaines matières déclarées dans les inventaires des moyens de production par les usines de la chaîne de valeur des cellules photovoltaïques, les échantillons de données sont réduits (inférieur à 20 données). Certaines chimies ne sont pas utilisées par toutes les usines de production, celles-ci pouvant faire appel à des chimies/solvants alternatifs, voire à des processus de production et de nettoyage différents. Du fait de ces échantillons trop réduits, l'écart type géométrique devient trop grand, et il a été choisi de couper à 10 (1000%) tout écart type trouvé supérieur, pour ne pas propager trop d'incertitude sur l'ensemble des données.

Les résultats de l'analyse de Monte-Carlo ne suivant pas une loi normale (la répartition des résultats n'est pas symétrique autour de la moyenne), les valeurs moyennes et médianes des simulations sont différentes des résultats caractérisés, c'est-à-dire les valeurs calculées par l'ACV et présentées dans ce rapport. La valeur calculée par l'ACV dans les graphiques est représentée à côté de la moyenne issue des simulations de Monte-Carlo.

### 5.6.4.2. Les limites des incertitudes

La méthode de Monte-Carlo est une méthode analytique pour estimer les incertitudes permettant de faire remonter les incertitudes attachées à tous les paramètres d'un modèle. Son utilisation dans une modélisation conséquente pose plusieurs contraintes qu'il est nécessaire de comprendre afin d'apprécier pleinement les résultats énoncés dans la partie suivante.

Nous répétons qu'une limite importante des estimations d'incertitude est l'absence d'incertitude sur les résultats des calculs de Crystal Super Grid pris comme entrées du modèle d'ACV.

Le modèle de calcul est quantitatif : il permet de prendre en compte les plages d'erreur sur les données d'entrée mais ne permet pas de représenter les erreurs dues au manque d'information, par exemple l'utilisation de matières « similaires » lorsque les bases de données environnementales ne disposent pas de l'exacte substance utilisée (par ex., inventaire des matières en jeu dans la fabrication des panneaux photovoltaïques).

Les méthodes de calcul sont des modèles environnementaux complexes développés par des chercheurs et reposant sur des mesures, des calculs statistiques et des hypothèses. Ces méthodes regroupent et synthétisent les effets sur l'environnement des polluants pris en compte. Chaque mesure, paramètre, calcul et hypothèse étant chargé d'une incertitude, le modèle de calcul s'en retrouve mécaniquement incertain. Cette incertitude est résumée dans le niveau de robustesse proposé par la commission européenne (PEFCR Guidance Document, Guidance for the Development of Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCRs) v6.3, 2018). Les incertitudes des méthodes de calcul ne sont pas prises en compte dans cette analyse.

Seules les incertitudes relatives au modèle ACV sont prises en compte dans ces simulations. La base de données ecoinvent 3.10 propose des incertitudes calculées à partir de la méthode de Pedigree pour chaque élément des inventaires. La base de données ecoinvent 3.10 étant large et interconnectée, les incertitudes liées à celle-ci peuvent être élevées, en particulier pour certains indicateurs (changement climatique biogénique et de changement d'affectation des sols, eutrophisation en eau douce, pollution liée aux particules fines, utilisation de ressources fossiles et utilisation de ressources minérales) voire extrêmement élevées (écotoxicité, toxicité humaine à effets cancérigènes, radiations ionisantes et consommation d'eau douce). Ces incertitudes sont vraisemblablement des aberrations dues à la méthode de Monte-Carlo, comme expliqué dans le paragraphe ci-dessous.

La méthode de Monte-Carlo peut amplifier des incertitudes dans certains cas. Ces emballlements sont notamment formés quand des substances auxquelles sont associées des incertitudes fortes se compensent. Selon les tirages, la somme des résultats peut alors être très faible ou très forte, créant une plage d'incertitude globale très élevée.

### 5.6.4.3. Estimation des incertitudes sur les résultats globaux des 5 systèmes

La Figure 33 montre, pour les indicateurs pertinents, les « boîtes à moustaches » des quartiles 2,5% et 97,5% – afin de couvrir 95% des tirages – autour des moyennes obtenues par 1000 itérations de Monte-Carlo considérant les incertitudes des systèmes SI 1 à SI 5. La Figure 34 montre le même graphe avec un axe des ordonnées jusqu'à 400% en page 66 pour une vue non tronquée.

L'Annexe 7.9 page 80 montre une distribution de l'indicateur Changement Climatique pour le Système SI 5 (pour exemple), qui fait apparaître la cloche non symétrique résultant de la combinaison des lois statistiques log-normales des constituants du système.

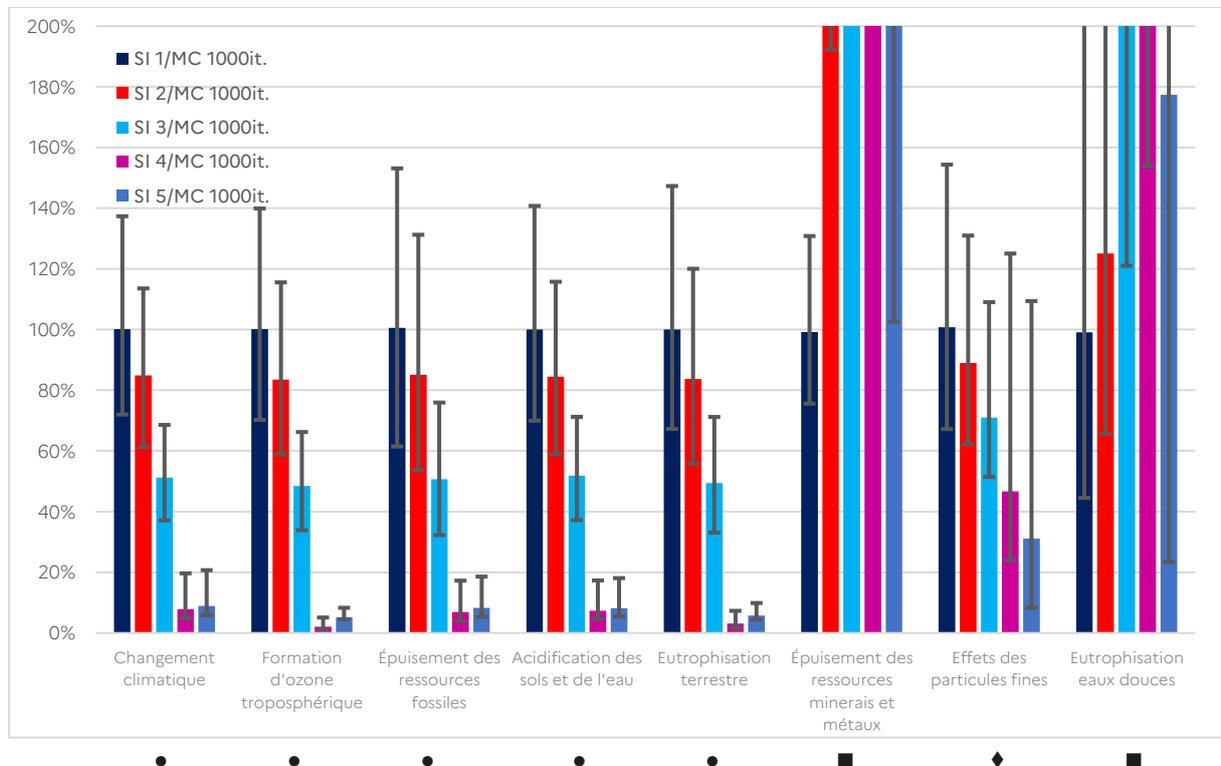


Figure 33 – Incertitudes des indicateurs sur les 5 systèmes, moyennes et quartiles 2,5%/97,5% (focus sur les moyennes)

En Figure 33 (et sa copie avec une échelle différente, la Figure 34), les « moustaches » des incertitudes montrent des recouvrements des zones de résultat pour presque tous les indicateurs entre les systèmes SI 1 SI 2 et SI 3, rendant la conclusion non claire entre les systèmes.

De même, entre SI 1 - SI 3 d'une part et SI 4 et SI 5 d'autre part, le recouvrement des « moustaches » n'est pas présent pour les indicateurs (●), au contraire des indicateurs (◆) (■) pour lesquels le recouvrement subsiste.

Entre SI 4 et SI 5, le recouvrement des « moustaches » est visible sur tous les indicateurs. La conclusion n'est confirmée entre ces deux systèmes pour aucune catégorie d'impact.

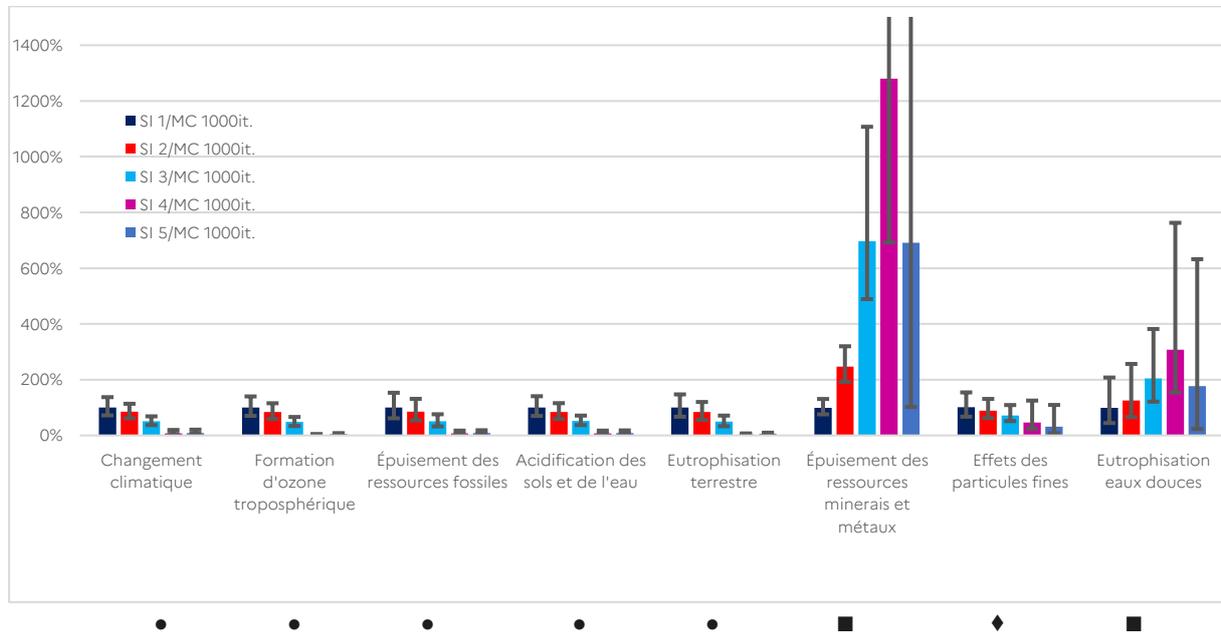


Figure 34 – Incertitudes des indicateurs sur les 5 systèmes, moyennes et quartiles 2,5%/97,5% (focus sur les amplitudes des incertitudes)

Les incertitudes ci-dessus sont toutes calculées indépendamment les unes des autres, alors que de grandes parts des installations sont similaires, et que les erreurs qui en découlent sont corrélées. Nous allons donc utiliser l'éclairage par le Score Unique avec des incertitudes corrélées dans la partie suivante pour clarifier autant que faire se peut « l'ordre de mérite environnemental » de SI 1 à SI 5.

#### 5.6.4.4. Estimation des incertitudes des Scores Uniques

Les itérations de Monte-Carlo permettent d'estimer des incertitudes sur le Score Unique introduit en section 5.5.5.2

- Par des calculs indépendants sur chacun des systèmes (de SI 1 à SI 5) ;
- Par des corrélations des résultats de calculs des tirages, en comparant les systèmes deux à deux.

La Figure 35 montre le résultat des calculs indépendants : on ne peut pas déduire de cette figure de classement des cas par ordre de mérite environnemental, car les incertitudes des 5 systèmes se recouvrent. On note au passage que les fourchettes résultantes du calcul de Monte-Carlo vont jusqu'à des valeurs négatives du Score Unique, qui semblent non significatives.

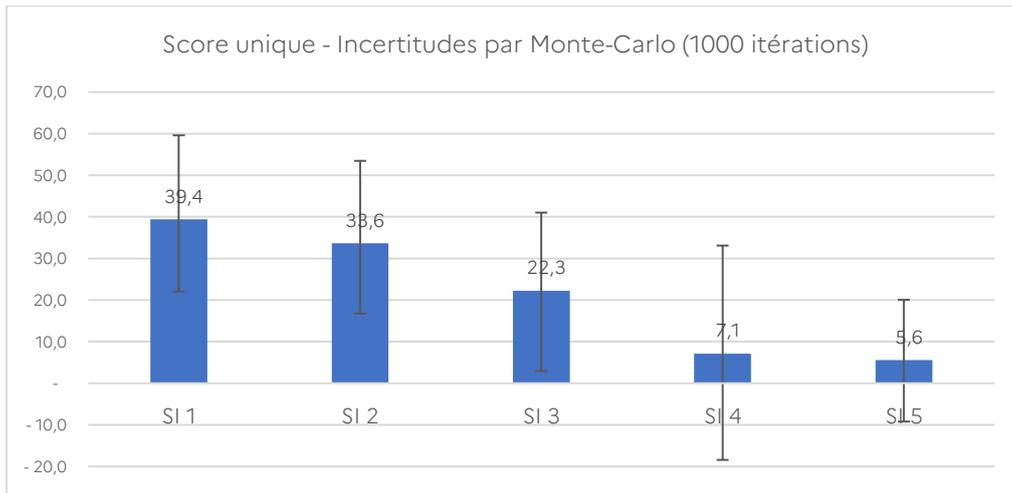
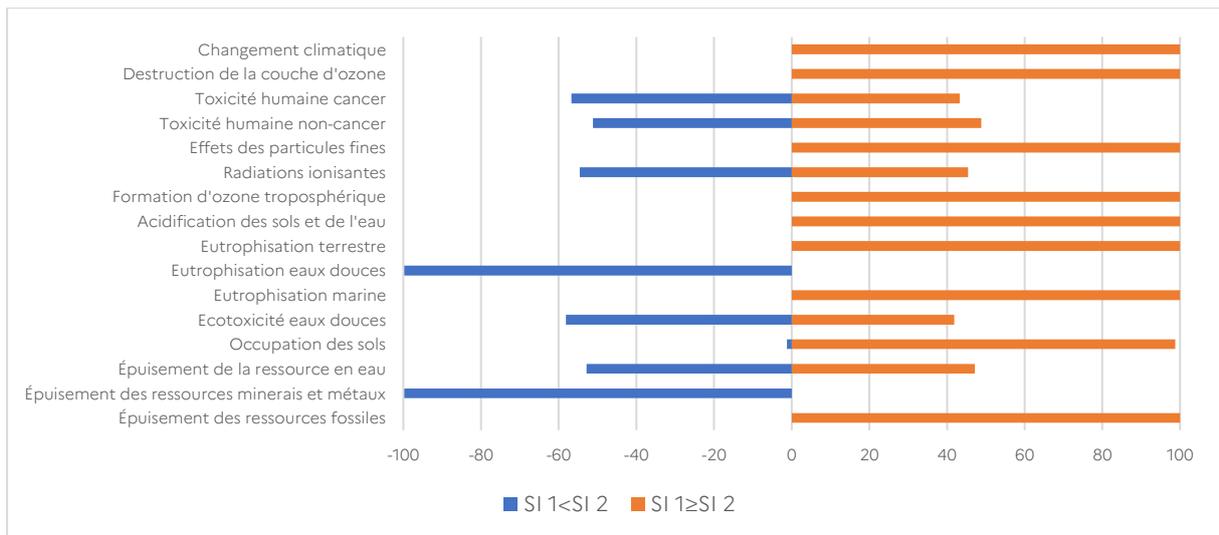


Figure 35 – Incertitudes du Score Unique des 5 systèmes par méthode de Monte-Carlo<sup>20</sup>, calculs indépendants

La Figure 36 est issue d'un calcul par tirage de Monte-Carlo sur les paramètres d'incertitude appliqués identiquement aux deux systèmes comparés SI 1 (GE) et SI 2 (GE+Batterie). Elle révèle, pour chaque indicateur, la proportion de tirages dans lesquels SI 1 est inférieur au SI 2 (barre bleue à gauche) ou supérieur (barre orange à droite). Le total des deux barres vaut 100% pour chaque indicateur.



Note : L'ordre des indicateurs est celui du JRC (Tableau 28, page 77)

Figure 36 – Résultats de la probabilité en % de comparaison des résultats des calculs corrélés de tous les indicateurs des systèmes 1 et 2 avec incertitudes en entrée, par méthode de Monte-Carlo, 1000 tirages.

A chaque tirage, les deux Scores Uniques de chacun des deux systèmes sont calculés par normalisation et pondération, puis comparés entre eux. En résulte la statistique de la comparaison en Figure 37. La comparaison est à 100% favorable au SI 2 par rapport au SI 1.

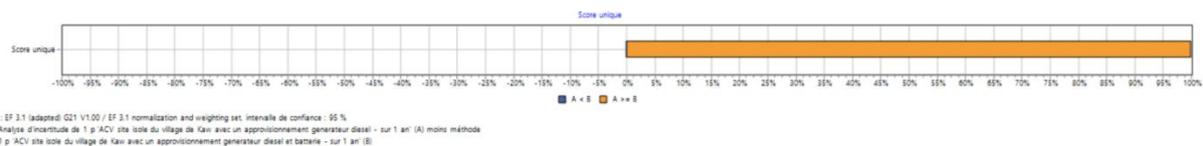


Figure 37 – Résultats de la comparaison des Scores Uniques corrélés des systèmes 1 et 2 avec incertitudes en entrée, par méthode de Monte-Carlo, 1000 tirages

<sup>20</sup> On montre sur cette Figure les quartiles 2,5% et 97,5% autour de la valeur issue du calcul sans incertitude. La moyenne statistique issue des 1000 tirages de Monte-Carlo est légèrement surévaluée par rapport au calcul sans incertitude.

La même approche est répétée par la comparaison des Scores Uniques de SI 2 et SI 3, puis SI 3 et SI 4 et enfin SI 4 et SI 5. Les résultats sont montrés en Tableau 22. Ils tendent à montrer un ordre d'impact décroissant global sur l'environnement au sens du Score Unique (i.e. incluant les transferts d'impact) : SI 1 > SI 2 > SI 3 > SI 4 ~ SI 5, avec une bonne certitude pour les 4 premier systèmes, et une faible certitude que nous notons par le signe « ~ » entre le SI 4 et SI 5, en légère faveur de ce dernier.

Comparaison corrélée des Scores Uniques	Probabilité
SI 1 ≥ SI 2	100,0%
SI 2 ≥ SI 3	98,80%
SI 3 ≥ SI 4	98,00%
SI 4 ≥ SI 5	64,80%

Tableau 22 – Résultats des comparaisons deux à deux des calculs corrélés des 5 systèmes par tirage de Monte-Carlo avec 1000 itérations

#### 5.6.4.5. Conclusion de l'étude des incertitudes

Les calculs d'incertitude montrent le recouvrement d'une grande part des intervalles de quartiles des indicateurs, ne permettant pas d'exprimer une conclusion forte sur une hiérarchisation environnementale des solutions, au regard des résultats d'évaluation multicritère de l'ACV.

L'étude des incertitudes du Score Unique, qui vient avec ses limitations évoquées en Annexe 7.7, permet un éclairage priorisant les systèmes selon l'ordre 1>2>3>4~5 en termes de « performance environnementale ».

## 6. Principales conclusions de l'étude

Les conclusions en termes d'impact environnemental des options de système énergétique du site isolé de Kaw peuvent être exprimées comme :

- Au fil des solutions SI 1 - SI 2 - SI 3 - SI 5 - SI 4 (dans cet ordre), il y a un transfert d'impact de plus en plus important de 5 catégories d'impact (● et ◆)<sup>21</sup> pertinentes aux systèmes étudiés vers 3 autres catégories d'impact (■)<sup>22</sup>, notamment vers l'Épuisement des ressources minérales et métaux. En conséquence, il n'est pas possible de dégager de hiérarchisation environnementale formelle entre les systèmes, du fait du caractère multi-critères de l'évaluation ;
  - o De SI 1 à SI 2 : une batterie ajoutée au groupe électrogène diminue les catégories d'impacts ● et ◆ de presque 20%, restant dans la zone d'incertitude ne permettant pas d'être assertif par rapport à la situation sans groupe électrogène, tandis que la catégorie d'impact Épuisement des ressources minérales et métaux est multipliée par presque 2½, et les deux autres catégories ■ s'élèvent légèrement et de 24% sur l'eutrophisation en eaux douces, restant dans la zone d'incertitude ne permettant pas d'être assertif ;
  - o De SI 2 à SI 3 : Un système photovoltaïque ajouté au générateur et batterie diminue de moitié les impacts environnementaux sur les catégories d'impact ● et de ~15% sur ◆ Effets des particules fines, avec transfert vers la catégorie d'impact Épuisement des ressources minérales et métaux qui est multiplié par 2,8, tandis que les autres catégories d'impact s'élevant de ~65% et 20% ;
  - o De SI 3 à SI 4 : La suppression opérationnelle du groupe électrogène et la forte augmentation de la capacité de batterie et de la puissance de la ferme solaire nécessaires pour assurer le service divise par un facteur entre ~6 et ~20 les catégories d'impact ●, réduit d'un tiers les Effets des particules fines, et occasionne un transfert d'impact additionnel vers l'Épuisement des ressources minérales et métaux qui double presque à nouveau ;
  - o De SI 4 à SI 5 : La réintégration opérationnelle du Groupe Électrogène avec consommation de diesel limitée à 4000 litres, permet de réduire la capacité de batterie et de la puissance de la ferme solaire. Les catégories d'impact ● réaugmentent et les catégories ■ baissent pour revenir au niveau de SI 3. Les Effets des particules fines baissent encore d'un tiers.
- La méthode du Score Unique permet d'agréger le multicritère en monocritère, et propose la hiérarchisation des scénarios selon leur impact : 1>2>3>4~5. Nous rappelons que le Score Unique est une méthode qui se fonde sur des jugements d'experts, avec une part de subjectivité, et qu'elle ne fait pas l'unanimité (cf. Annexe 7.7).
- Selon le Score Unique, 4 et 5 ne sont pas hiérarchisables entre eux de façon claire. D'autres contraintes externes (investissement, place disponible pour la ferme solaire, difficulté de ravitaillement en carburant) sont importantes dans le choix de solution.

L'analyse de cycle de vie ne caractérise pas l'ensemble des impacts environnementaux spécifiques à un site et des évaluations environnementales spécifiques au site sont nécessaires ; par exemple, l'impact au sol de l'installation photovoltaïque n'est pas neutre d'un point de vue du changement d'affectation des terres, ni pour la biodiversité.

Le focus et les résultats sont valables directement pour le village de Kaw en Guyane et donc non directement applicables à d'autres sites isolés. Les données spécifiques à la Guyane et au village de Kaw

---

<sup>21</sup> notées ● au paragraphe 5.5.5.1, Changement climatique, Formation d'ozone troposphérique, Épuisement des ressources fossiles, Acidification des sols et de l'eau et Eutrophisation terrestre et ◆, Effets des particules fines.

<sup>22</sup> notées ■, Épuisement des ressources minérales et métaux, et Eutrophisation eaux douces.

ont donc été utilisées, ce qui limite la généralisation des résultats. Néanmoins les tendances devraient rester les mêmes pour des sites de caractéristiques similaires sur la forme du profil de charge et d'ensoleillement.

Les progrès techniques réguliers des solutions de production d'énergie solaire (efficacité, électronique des onduleurs, etc.) et des batteries (densité d'énergie, chimies nouvelles) devrait à l'avenir amoindrir le phénomène de transfert d'impact vers l'Épuisement des minerais et métaux, sans que l'on puisse supposer l'effacer, vu son ampleur.

Par ailleurs, il faut rappeler deux limites importantes de la modélisation mise en œuvre : une seule année climatique a été modélisée du fait des faibles données disponibles, et l'incertitude relative aux calculs et résultats d'Artelys Crystal Super Grid ne sont pas estimables dans les calculs d'incertitudes ACV.

## 7. Annexes

### 7.1. Annexe : Présentation d'Artelys Crystal Super Grid

Les modélisations du système électriques sont effectuées à partir du logiciel Artelys Crystal Super Grid.

Les modèles d'Artelys Crystal Super Grid permettent de représenter finement chacun des types d'actifs de demande et de production énergétique et leurs caractéristiques technico-économiques : flexibilité de la demande, puissances installées et coûts d'investissement des filières de production, coûts fixes et variables d'opération, puissance minimale d'opération, gradients, réserve, gestion optimale des réservoirs hydrauliques, gestion des imports de LNG, stockage saisonnier de gaz, variabilité de la production renouvelable et les principales contraintes sur les réseaux électriques, gaz et hydrogène entre les différentes zones étudiées.

En fonction de l'ensemble des paramètres définis, Artelys Crystal Super Grid permet d'optimiser la capacité installée et la stratégie d'opération de chaque filière afin de respecter un équilibre offre demande énergétique au moindre coût pour le système complet, et selon des critères de sécurité d'approvisionnement donnés.

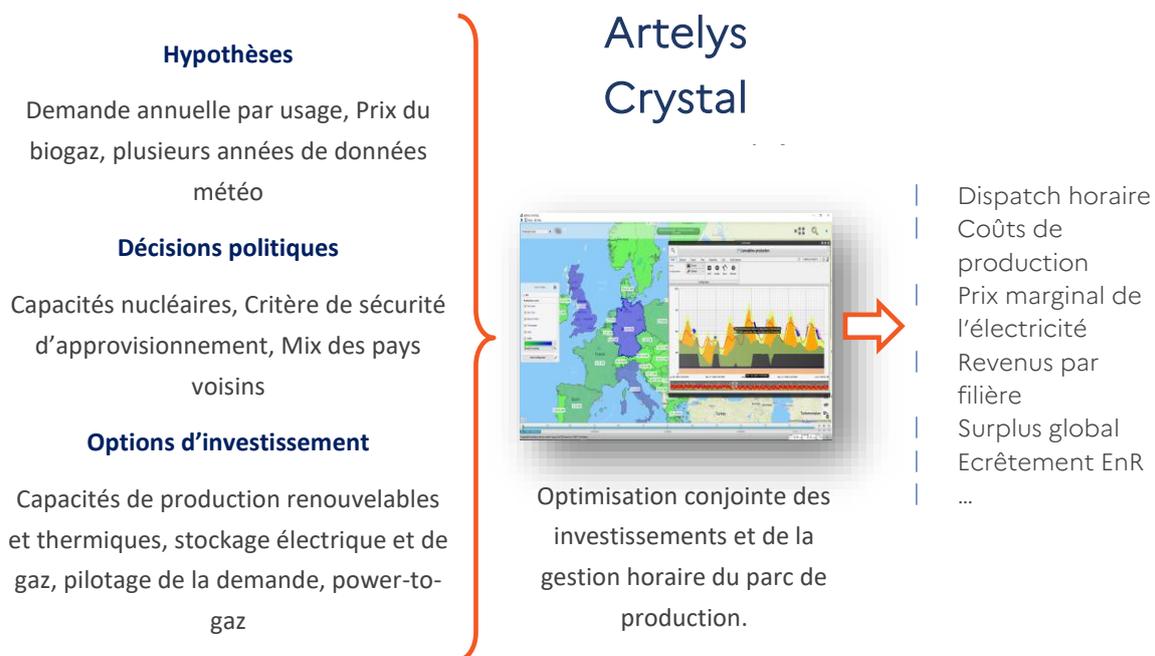


Figure 38 – Présentation d'Artelys Crystal Super Grid

### 7.2. Annexe : Coûts utilisés dans la modélisation électrique

Dans les systèmes SI 2, SI 4 et SI 5, les dimensions des batteries et/ou PV sont optimisées. L'optimisation est faite de manière à minimiser les coûts du système, cette optimisation prend donc en compte les coûts opérationnels fixes et variables du système ainsi que les coûts d'investissement. Il est donc nécessaire de définir des coûts d'investissement pour les batteries et les panneaux photovoltaïques ainsi que les coûts fixes et variables d'opérations des différents actifs (les coûts d'investissement et les coûts fixes d'opération des générateurs diesel ne sont pas pris en compte car ces générateurs diesel sont déjà présents dans le village de Kaw : ils ne rentrent donc pas en compte dans l'optimisation économique réalisée).

Actifs	Coûts d'investissement actualisé (taux 7,5%)	Coûts fixes opérationnels
Groupe diesel	Non utilisé car dimension non optimisée	
Batterie	25,5 €/kWh/an	13,2 €/kWh/an
PV	43,5 €/kW/an	16,5 €/kW/an

Tableau 23 – Récapitulatif des coûts utilisés dans l'optimisation

Les coûts d'investissements et les coûts fixes d'opération pour les batteries et les PV sont issus de la base ASSET de l'EU (European Commission, 2020). Les coûts d'investissements actualisés ont ensuite été calculés en amortissant les coûts d'investissements initiaux à un taux de 7,5% sur la durée de vie des actifs (30 ans pour le PV et 15 ans pour les batteries).

Le coût du diesel choisi dans l'étude pour le village de Kaw est de 1,55€/L. Ce coût a été calculé à partir du coût du diesel pour le bourg de Regina (dans lequel se situe le village de Kaw) en 2016 grâce aux données de l'ADEME et a été extrapolé à 2023 en considérant une augmentation similaire à l'augmentation du coût du diesel aux Etats-Unis (EIA, 2025). Le coût du diesel a augmenté de près de 80% entre 2016 et 2023 aux Etats-Unis. Une augmentation similaire est donc supposée pour le village de Kaw, le prix du diesel passant ainsi de 0,87€/L en 2016 à près de 1,55€/L en 2023.

### 7.3. Annexe : Méthode des Stocks en ACV

La modélisation des matières à recycler et recyclées est réalisée dans les différentes ACV présentées ici selon la méthode des stocks (en anglais : "cut-off"). Ce choix influe notamment sur le résultat d'impact « épuisement des ressources, métalliques et minérales ».

Le principe appliqué avec la méthode des stocks consiste à poser la frontière entre deux cycles de vie au niveau du stock homogène de matière. Dans la figure présentée ci-dessous, le premier cycle de vie mobilise de l'acier primaire pour la fabrication d'une voiture, le second utilisateur mobilise de l'acier en partie recyclé pour armer du béton. En considérant la frontière au niveau du stock de matière homogène, le premier utilisateur de matière se voit attribuer les impacts des premières étapes de recyclage (broyage, tri, éventuellement lavage selon les cas). Le second utilisateur se voit attribuer les étapes suivantes du recyclage, ici la fonte de l'acier dans une aciérie électrique.

Dans cette configuration, l'utilisateur de matière secondaire est avantagé car seuls les impacts de l'action de recyclage à partir d'un stock de matière triée lui sont attribués ; l'impact de la matière en elle-même est très faible dans le second cycle. Les impacts de production de la matière vierge ont été attribués au (autrement dit « ont été déjà supportés par le ») premier utilisateur.

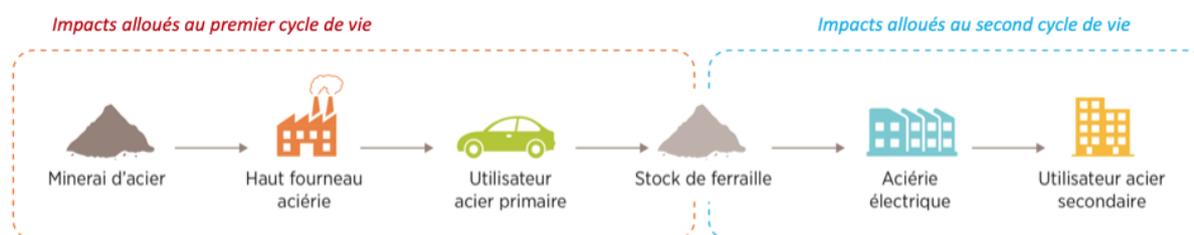


Figure 39 – Méthode des stocks

Cette méthode ne permet pas de prendre en compte des potentiels effets positifs liés au recyclage des produits en fin de vie, objectif qui n'est pas au cœur de notre étude.

## 7.4. Annexe : Analyse de la qualité des données au cadrage de l'étude

Lors de la phase de cadrage de l'étude, les données, y compris celles tirées d'Ecoinvent 3.10, nécessaires à la modélisation des systèmes mis en œuvre dans le cas d'usage étudié ont été vérifiées quant à leur qualité en fonction des critères du Tableau 24. La note de 3/5 a été définie comme note minimale pour que l'étude du cas d'usage soit engagée.

Note	Définition
5/5	<ul style="list-style-type: none"> <li>Données existantes dans les bases de données courantes (ecoinvent 3.10, GaBi...) ou dans un article avec un ICV donnant 5 indicateurs majeurs – au sens de la normalisation Européenne PEF – avec validité technique, temporelle (selon système), et géographique</li> <li>Données fournies lors de la partie forfaitaire de l'étude par un membre du COTECH ou l'ADEME et validée par le COTECH (ICV ou Flux ou Nomenclature)</li> </ul>
4/5	<ul style="list-style-type: none"> <li>Données existantes dans les bases de données courantes (ecoinvent 3.10, GaBi...) ou dans un article avec un ICV donnant avec 5 indicateurs majeurs – au sens de la normalisation Européenne PEF – avec validité technique, temporelle (selon système), et géographique</li> <li>Données fournies lors de la partie forfaitaire de l'étude par un membre du COTECH ou l'ADEME et validée par le COTECH (ICV ou Flux ou Nomenclature)</li> <li>Données extrapolées sur la base de l'ajout du transport à partir d'un autre périmètre géographique</li> </ul>
3/5	Données promises lors de la partie forfaitaire de l'étude par un membre du COTECH ou l'ADEME et validée par le COTECH (ICV ou Flux ou Nomenclature)
2/5	Données trouvées dans la littérature, dans les bases de données mais non représentatives des systèmes actuels de l'étude <b>Ou:</b> Sur la majorité des composants du Système : Données ICV partielles (par exemple: GWP seulement)
1/5	Données partiellement trouvées dans la littérature, dans les bases de données (au moins 1 composant du système manquant, qu'il soit production, transport, ...) <b>Ou:</b> Sur l'ensemble des composants du Système: Données ICV partielles (par exemple: GWP seulement)

Tableau 24 – Détail des évaluations des données ACV

## 7.5. Annexe : Nomenclature et ICV de la ferme solaire de 570kWc

Comme expliqué en section 5.3.2, une mise à jour des ICV des panneaux photovoltaïques est effectuée pour les besoins de l'étude. Partant d'une ferme solaire 570kWc d'Ecoinvent 3.10, les données d'inventaires disponibles sont réinjectées dans les différents niveaux. Il s'agit

- de la fabrication de cellules photovoltaïques (silicium monocristallin de type PERC M10), résultant en panneaux de 230W/m<sup>2</sup>, de plus forte puissance surfacique que la donnée Ecoinvent 3.10 qui suppose 133W/m<sup>2</sup>
- de la surface de panneaux nécessaires pour générer la même puissance de ferme solaire, avec l'influence sur les systèmes de montage des panneaux associés
- des quantités d'onduleur mises en œuvre
- des câblages dont le cuivre est remplacé par de l'aluminium.

Le résultat est comparé à l'ICV Ecoinvent 3.10 « Photovoltaic plant, 570kWp, multi-Si, on open ground [GLO] photovoltaic plant construction, 570kWp, multi-Si, on open ground | Cut-off, U » en Figure 40, et vérifiant que l'ordre de grandeur est correct. Les valeurs résultantes sont détaillées dans le tableau ci-dessous.

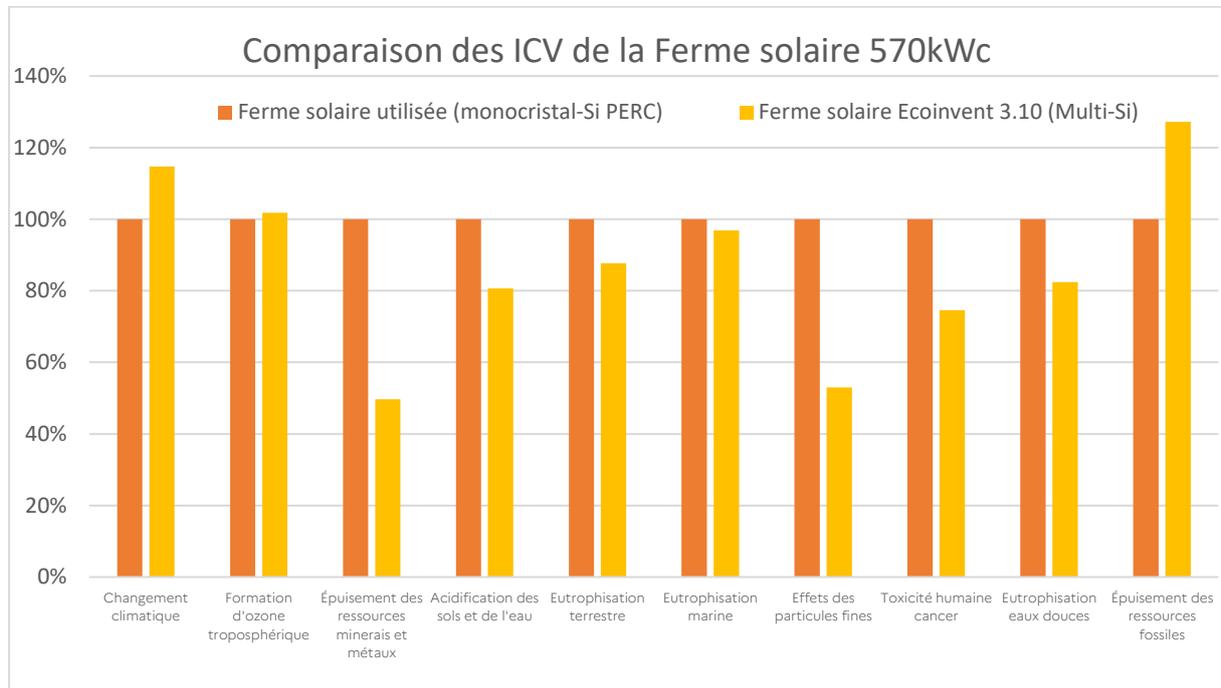


Figure 40 – Comparaison des impacts de la ferme solaire de 570kWc a) utilisée dans les modèles de Sites Isolés de l'étude et b) de la ferme solaire de 570kWc d'Ecoinvent 3.10 à Si polycristallin (base 100 : ferme utilisée dans l'étude)

Catégorie de dommages	Unité	Total
Acidification des sols et de l'eau	mol H+ eq	10 700
Changement climatique	kg CO2 eq	1 190 000
Ecotoxicité eaux douces	CTUe	13 300 004
Effets des particules fines	disease inc.	0,118
Eutrophisation marine	kg N eq	1 530
Eutrophisation eaux douces	kg P eq	732
Eutrophisation terrestre	mol N eq	21 300
Toxicité humaine cancer	CTUh	1,23E-03
Toxicité humaine non-cancer	CTUh	6,42E-02
Radiations ionisantes	kBq U-235 eq	59 000
Occupation des sols	Pt	133 000 000
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC11 eq	0,165
Formation d'ozone troposphérique	kg NMVOC eq	5 530
Épuisement des ressources fossiles	MJ	13 000 000
Épuisement des ressources minerais et métaux	kg Sb eq	111
Épuisement de la ressource en eau	m3 depriv.	454 000

(Catégories d'impact selon EF3.1, 3 chiffres significatifs affichés)

Tableau 25 – ICV de la ferme solaire de 570kWc utilisée dans les modèles de Sites Isolés de l'étude

La Figure 41 montre la même comparaison au niveau des panneaux, dont les puissances par m<sup>2</sup> diffèrent. Outre les détails de l'évaluation déjà mentionnés en section 5.3.2 et au début de cette Annexe, on précise en sus qu'a été considéré le mix électrique « Global electricity supply by source and for solar PV manufacturing » de la chaîne de valeur de l'industrie photovoltaïque globale dans sa mise à jour de 2022 par l'International Energy Agency (voir (IEA, 2022), page 38), et que les palettes de transport logistique inter-usines dans les phases amont du processus ont été approximées par des euro-palettes (approximation supposée peu impactante sur le bilan environnemental de la ferme solaire dans son ensemble).

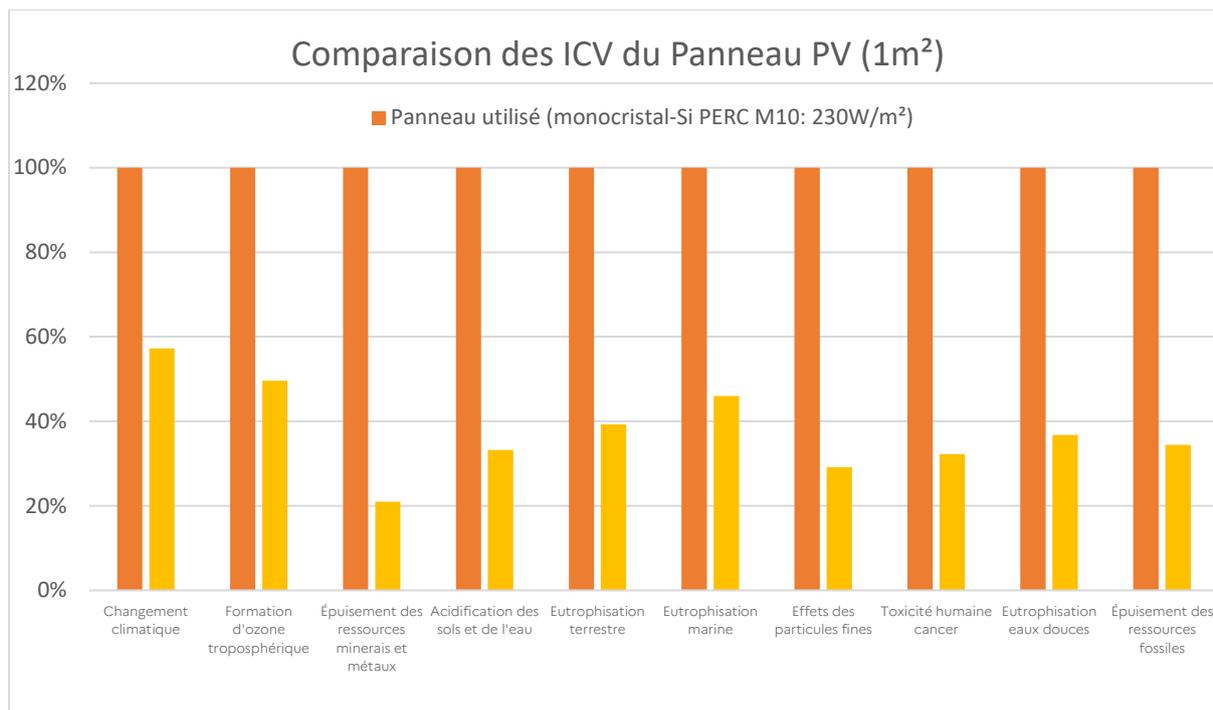


Figure 41 – Comparaison des impacts du panneau photovoltaïque a) PERC M10 Si monocristallin (230W/m<sup>2</sup>) utilisé dans les modèles de Sites Isolés de l'étude et b) du panneau d'Ecoinvent 3.10 à Si polycristallin (133 W/m<sup>2</sup>) (base 100 : panneau utilisé dans l'étude)

## 7.6. Annexe : Nomenclature et ICV de la batterie stationnaire

Flux	Quantité	Unité
Steel, chromium steel 18/8 {RER}   steel production, electric, chromium steel 18/8   Cut-off, U	0,0682	kg
Battery cell, Li-ion, LFP {GLO}   market for battery cell, Li-ion, LFP   Cut-off, U	0,727	kg
Battery management system, for Li-ion battery {GLO}   battery management system production, for Li-ion battery   Cut-off, U	0,0201	kg
Battery module packaging, Li-ion {GLO}   market for battery module packaging, Li-ion   Cut-off, U	0,0558	kg
Copper, anode {GLO}   market for copper, anode   Cut-off, U	0,000540	kg
Electronic component, passive, unspecified {GLO}   market for electronic component, passive, unspecified   Cut-off, U	0,00350	kg
Ethylene glycol {RoW}   market for ethylene glycol   Cut-off, U	0,0255	kg
Glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded {GLO}   market for glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded   Cut-off, U	0,000180	kg
Sheet rolling, chromium steel {RER}   sheet rolling, chromium steel   Cut-off, U	0,0683	kg
Injection moulding {GLO}   market for injection moulding   Cut-off, U	0,00386	kg
Metal working factory {GLO}   market for metal working factory   Cut-off, U	1,15E-09	p
Polyethylene, high density, granulate {GLO}   market for polyethylene, high density, granulate   Cut-off, U	0,00386	kg
Reinforcing steel {GLO}   market for reinforcing steel   Cut-off, U	0,00710	kg
Sheet rolling, aluminium {GLO}   market for sheet rolling, aluminium   Cut-off, U	0,00102	kg
Sheet rolling, copper {GLO}   market for sheet rolling, copper   Cut-off, U	0,000540	kg
Sheet rolling, steel {GLO}   market for sheet rolling, steel   Cut-off, U	0,00710	kg
Tap water {RoW}   market for tap water   Cut-off, U	0,0255	kg
Electricity, medium voltage {CN}   market group for electricity, medium voltage   Cut-off, U	0,000280	kWh

(3 chiffres significatifs affichés)

Base : Ecoinvent 3.10 « Battery, Li-ion, LFP, rechargeable, prismatic {CN} battery production, Li-ion, LFP, rechargeable, prismatic

Tableau 26 – nomenclature d'1kg de batterie LFP adaptée et utilisée dans les modèles de Système Isolé de l'étude

Les impacts d'1kg de batterie stationnaire, hors conteneur de 20 pieds, utilisée dans l'étude sont montrés dans le Tableau 27.

Catégorie de dommages	Unité	Total
Acidification des sols et de l'eau	mol H+ eq	0,220
Changement climatique	kg CO2 eq	10,1
Ecotoxicité eaux douces	CTUe	162
Effets des particules fines	disease inc.	1,40E-06
Eutrophisation marine	kg N eq	1,78E-02
Eutrophisation eaux douces	kg P eq	9,43E-03
Eutrophisation terrestre	mol N eq	0,502
Toxicité humaine cancer	CTUh	1,26E-08
Toxicité humaine non-cancer	CTUh	8,99E-07
Radiations ionisantes	kBq U-235 eq	0,667
Occupation des sols	Pt	79,9
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC11 eq	2,12E-07
Formation d'ozone troposphérique	kg NMVOC eq	5,07E-02
Épuisement des ressources fossiles	MJ	129
Épuisement des ressources minerais et métaux	kg Sb eq	1,60E-03
Épuisement de la ressource en eau	m3 depriv.	3,75

(3 chiffres significatifs affichés)

Tableau 27 – ICV d'1kg de batterie LFP adaptée et utilisée dans les modèles de Système Isolé de l'étude

## 7.7. Annexe : Normalisation et pondération

A chaque catégorie d'impacts est attribué un niveau de fiabilité (aussi appelée « robustesse ») dans la méthode EF3.1 (Sala S., 2018)

- I : recommandé et satisfaisant
- II : recommandé mais peut être amélioré
- III : recommandé mais à appliquer avec précaution

Les évaluations d'impact sur le changement climatique, la destruction de la couche d'ozone, et l'effet des particules fines ont été évaluées comme les plus fiables, de niveau de fiabilité I.

La priorisation des catégories d'impacts (plus simplement aussi appelés « indicateurs ») s'appuie sur la normalisation et la pondération. Les catégories d'impacts priorisés sont appelées « indicateurs pertinents » pour le cas d'étude.

La normalisation consiste à diviser les valeurs des indicateurs retenus ci-dessus (résultats caractérisés) par une valeur de référence par indicateur. Cette valeur de référence, préconisée par la Commission Européenne et définie, est l'impact d'un habitant moyen dans la méthode EF 3.1 (Andreasi Bassi & al., 2023). Les résultats normalisés sont alors exprimés en points.

Les facteurs de normalisation proviennent d'une étude auprès d'experts sur l'importance accordée aux impacts proposés par la méthode et sur la portée de leurs effets sur l'environnement, la santé humaine et les ressources, présentée dans le rapport du JRC européen (Sala & al., 2019).

Les résultats normalisés peuvent ensuite être pondérés par des facteurs de pondération (weighting factors). Il existe différents jeux de pondérations, et l'utilisation d'une pondération différente pourrait entraîner des conclusions différentes. Nous utilisons la pondération recommandée par le JRC dans EF par la Commission Européenne, qui a recueilli les avis d'experts et de parties prenantes selon des méthodes quantitatives et qualitatives, et en conjuguant dans une approche statistique l'importance accordée aux impacts, la portée de leurs effets sur l'environnement, la santé humaine et les ressources. Les facteurs résultants ont l'ambition de traduire l'importance relative de chaque indicateur pour la société. L'approche, on le comprend par sa description, inclut une part de subjectivité de la part des experts et partie prenante, avec de surcroît un biais potentiel dû au choix du panel d'experts et de parties prenantes dont les avis ont été réunis. Ils restent un sujet de débat dans la communauté scientifique.

La méthode complète est présentée dans le EC-JRC 106939 (Joint Research Centre et al., 2019). Les facteurs de normalisation et de pondération utilisés sont rappelés en Tableau 28.

Catégorie d'impact	Facteur de normalisation (pt)	Facteur de pondération (%)
Changement climatique	1,80E-02	21,06
Destruction de la couche d'ozone	1,32E-04	6,31
Toxicité humaine cancer	1,76E-05	2,13
Toxicité humaine non-cancer	1,68E+03	1,84
Effets des particules fines	5,12E-02	8,96
Radiations ionisantes	6,22E-01	5,01
Formation d'ozone troposphérique	5,66E-03	4,78
Acidification des sols et de l'eau	5,80E+04	6,20
Eutrophisation terrestre	7,77E+03	3,71
Eutrophisation eaux douces	2,37E-04	2,80
Eutrophisation marine	1,22E-06	2,96
Ecotoxicité eaux douces	1,91E+01	1,92
Occupation des sols	2,45E-02	7,94
Épuisement de la ressource en eau	1,54E-05	8,51
Épuisement des ressources minerais et métaux	1,57E+01	7,55
Épuisement des ressources fossiles	8,72E-05	8,32
<b>Total</b>		100,00

Tableau 28 – Facteurs de normalisation et de pondération de la méthode EF3.1 (Sala S., 2018)

## 7.8. Annexe : Ventilation des sources pour les catégories d'impacts pertinentes pour chaque système isolé

Les symboles (●), (■), et (◆) sont expliqués en section 5.5.5.1 page 56

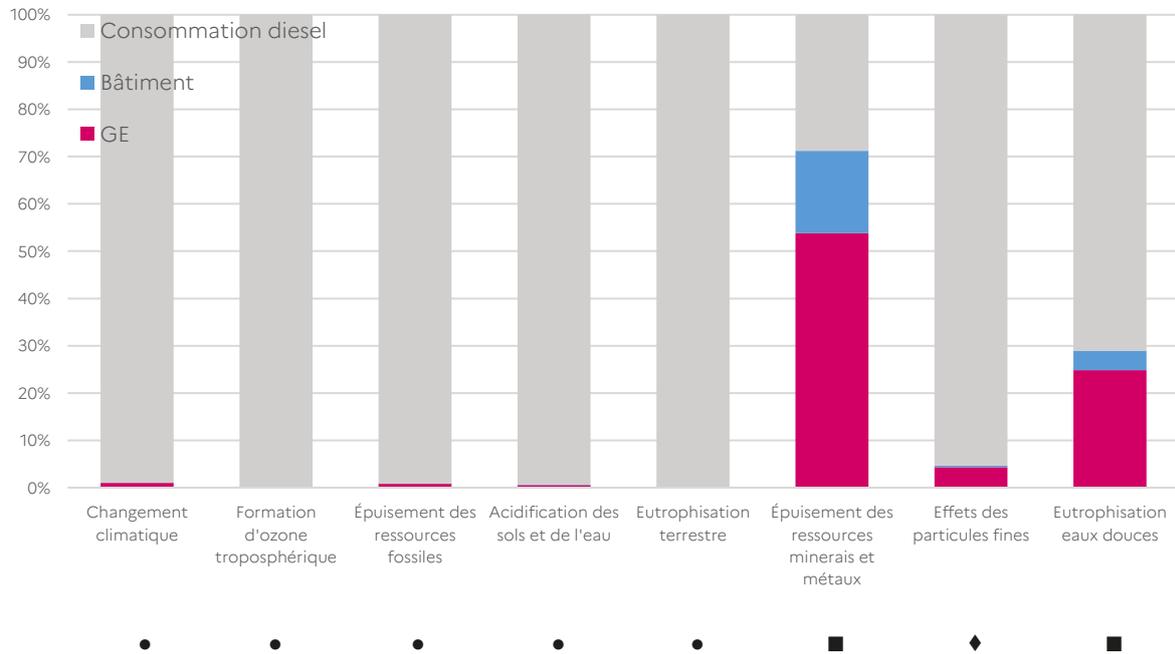


Figure 42 – Ventilation des sources pour les catégories d'impacts pertinentes, système isolé SI 1

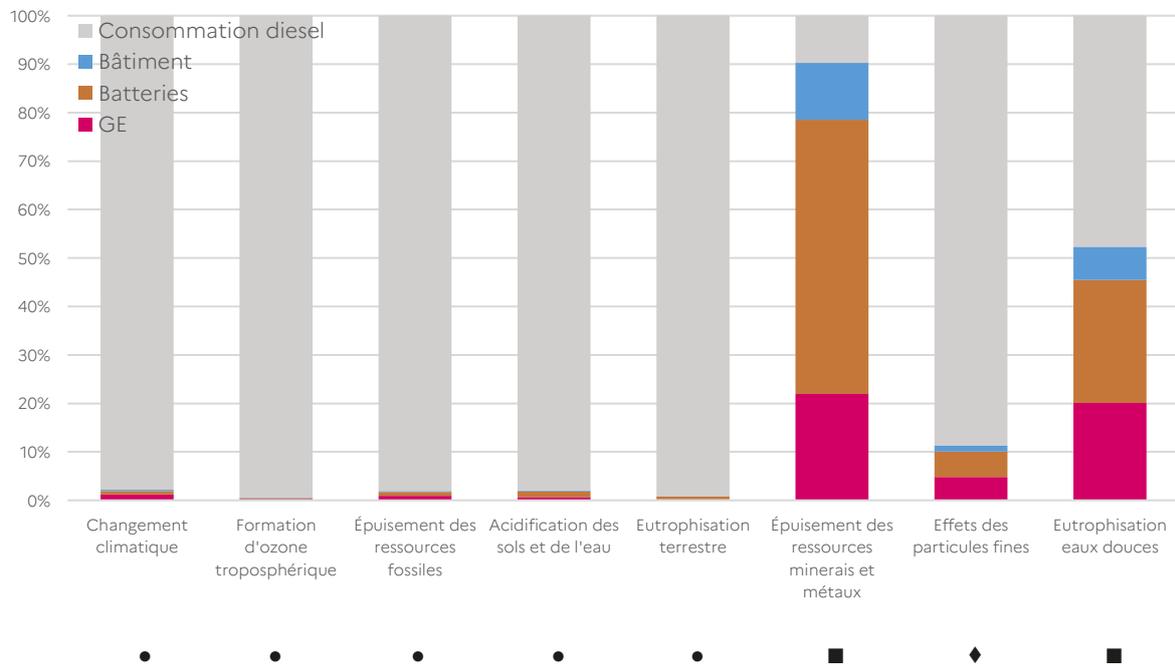


Figure 43 – Ventilation des sources pour les catégories d'impacts pertinentes, système isolé SI 2

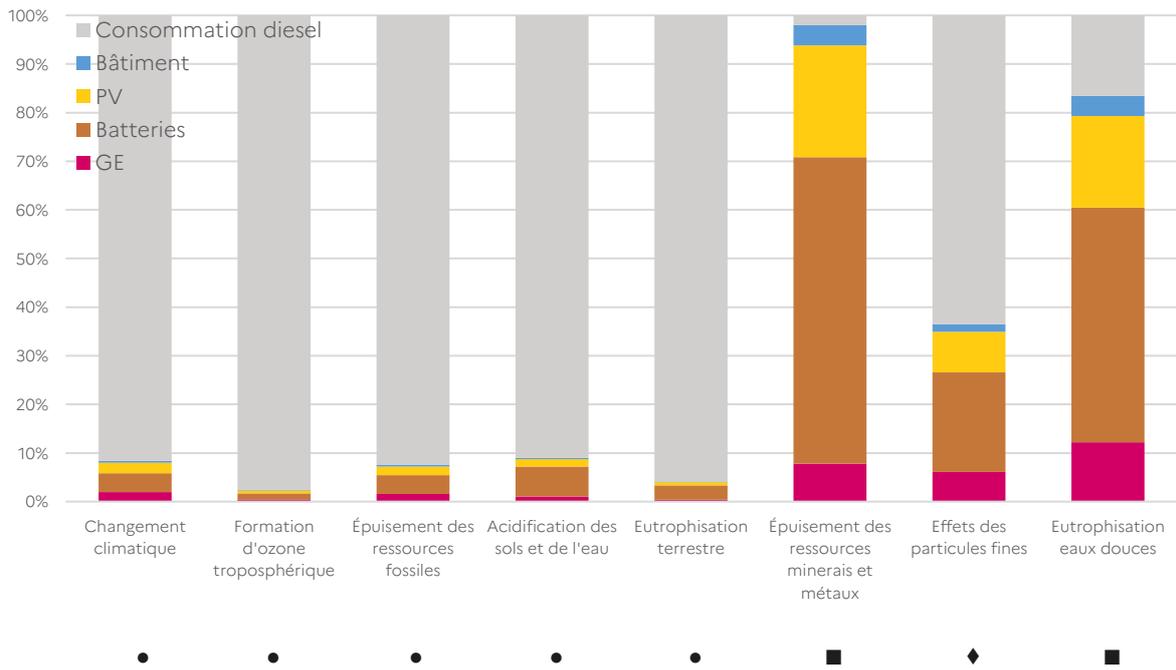


Figure 44 – Ventilation des sources pour les catégories d'impacts pertinentes, système isolé SI 3

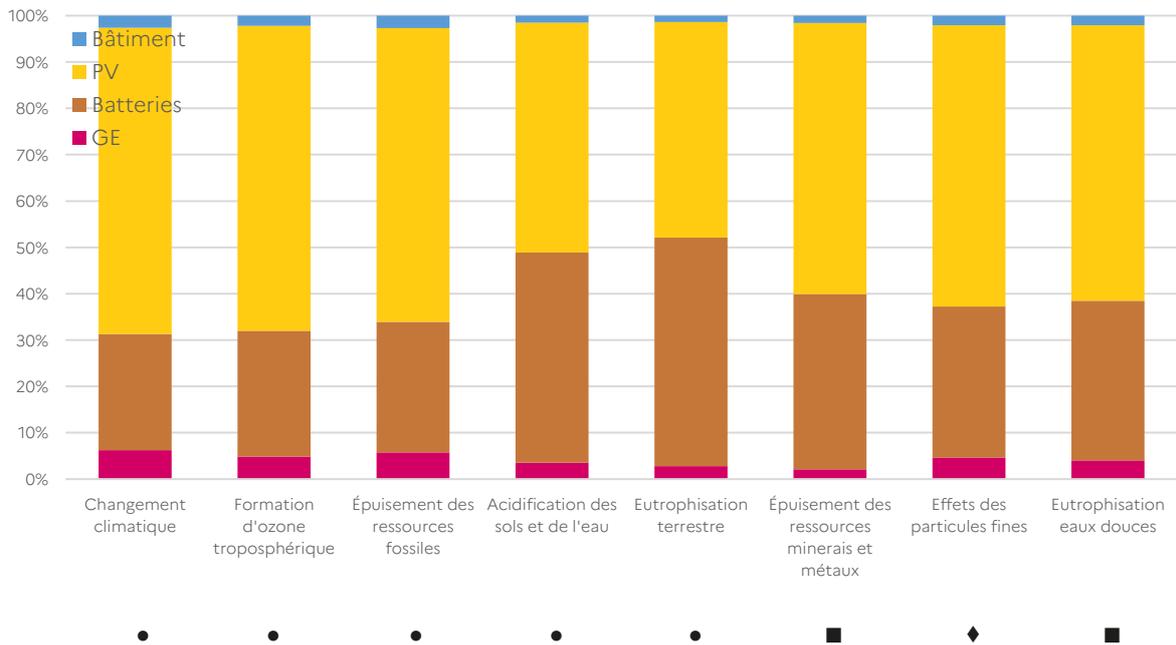


Figure 45 – Ventilation des sources pour les catégories d'impacts pertinentes, système isolé SI 4

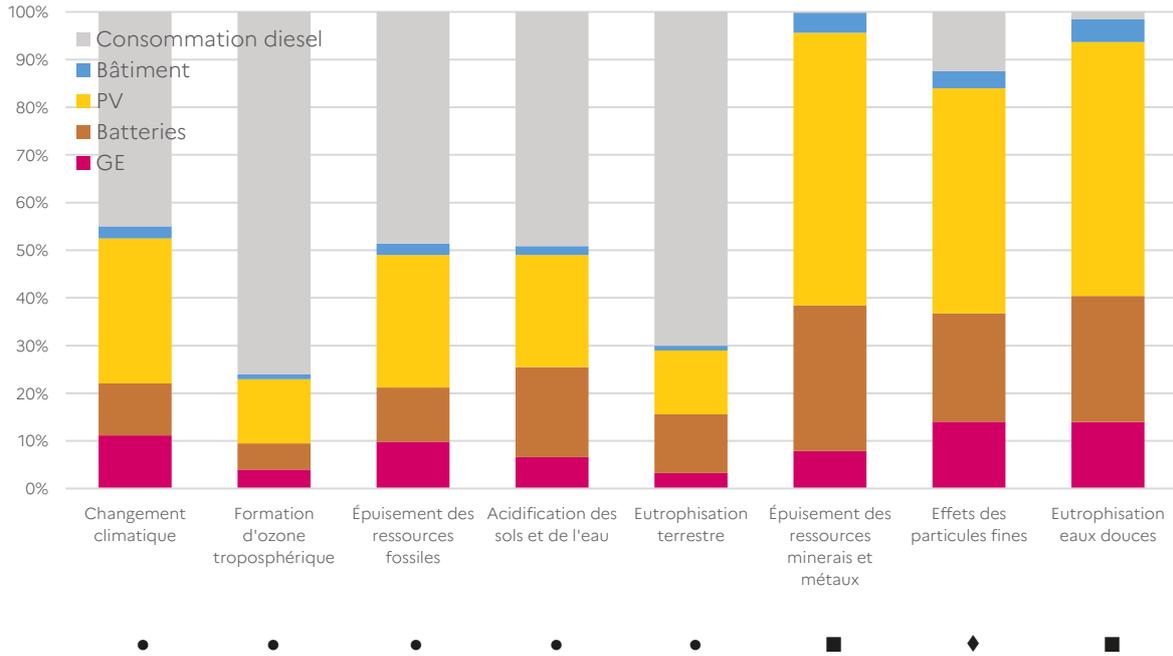


Figure 46 – Ventilation des sources pour les catégories d'impacts pertinentes, système isolé SI 5

## 7.9. Annexe : Exemple de calcul d'incertitude

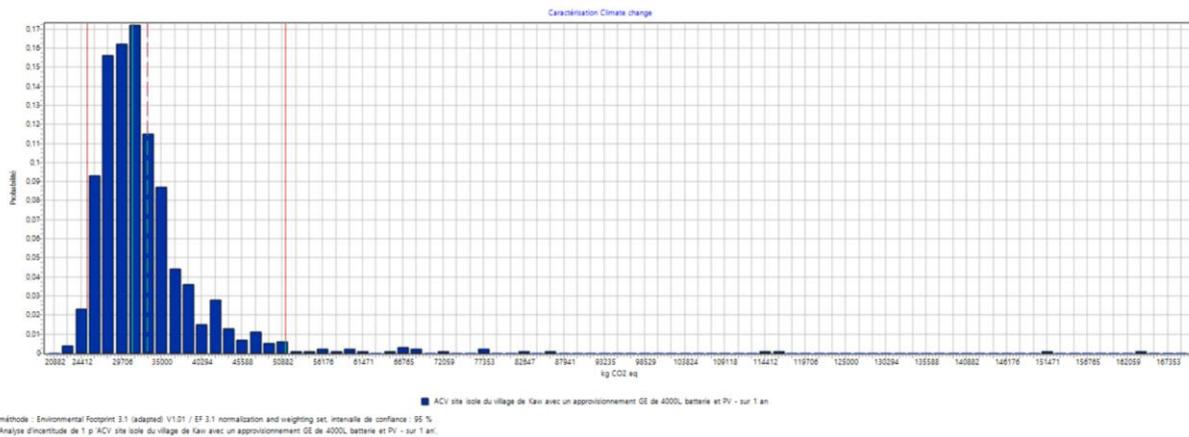


Figure 47 – Exemple de distribution des incertitudes sur la catégorie d'impact Changement Climatique lors du calcul de 1000 itérations de Monte-Carlo du SI 5 (GE4000 L + PV + Batterie)

## 7.10. Annexe : Rapport détaillé du Comité de Revue Critique

*Revue Critique du rapport*  
" ANALYSE DU CYCLE DE VIE DE CAS D'USAGES DE DEVELOPPEMENT DE STOCKAGE D'ELECTRICITE -  
Approvisionnement en électricité d'un site isolé – exemple du village de Kaw en Guyane  
Mars 2025"  
selon  
ISO 14040 & ISO 14044  
et ISO 14071

SOL 24-410.1  
25 mars 2025

Rapport pour  
**Ginkgo 21 et Artelys**  
et  
**l'ADEME**

### 1. Introduction

Ginkgo 21 et Artelys (nommée « le praticien » dans le reste du document) ont réalisé une analyse du cycle de vie Analyse du Cycle de Vie de cas d'usages de Développement de Stockage d'électricité - Approvisionnement en électricité d'un site isolé – exemple du village de Kaw en Guyane - Mars 2025 – pour son commanditaire l'ADEME (nommée « le commanditaire » dans le reste du document).

L'étude s'inscrit dans un projet dont l'objectif est « d'effectuer un panorama d'études en ACV sur différents systèmes énergétiques afin d'orienter les politiques publiques et de permettre la priorisation du développement des différentes installations du système énergétique en fonction du cas envisagé et de la particularité des périmètres » (chapitre 2.2 du rapport d'étude). De plus chaque étude de cas a pour objectif complémentaire de « de donner des éléments comparatifs et quantitatifs à l'ADEME afin d'instruire des dossiers de projets spécifiques dès aujourd'hui » (chapitre 2.2 du rapport d'étude).

Plus spécifiquement pour le cas considéré ici, l'objectif est « l'étude de l'influence des systèmes de production et de stockage d'électricité sur le bilan environnemental dans le cas de la fourniture d'un site isolé, avec l'ambition d'obtenir des conclusions générales pour des villages isolés situés relativement proche de l'équateur, avec peu de saisonnalité » (chapitre 3.2.1 du rapport)

Cette étude comparative a été réalisée dans le cadre des normes ISO 14040 et ISO 14044.

Cette étude a vocation à être communiquée en l'état à un tiers externe.

De ce fait, le commanditaire a souhaité faire réaliser une revue critique par un comité de suivi (nommée « le panel » ou « les membres du panel » dans le reste du document).

Le présent rapport est le rapport final de revue critique, préparé par le panel. Ce rapport, comprenant ses annexes, est destiné à être intégré au rapport final du praticien.

### 2. Composition du panel

Les membres du panel qui ont réalisé la revue sont :

- Delphine BAUCHOT et Guillaume AUDARD, de la société Solinnen, société spécialisée dans les applications de l'Analyse du Cycle de Vie. Delphine, Directrice chez Solinnen, a plus de 20 ans d'expérience en environnement et réalise régulièrement en tant qu'expert ACV des revues critiques. Elle est la présidente de panel. Guillaume est expert ACV chez Solinnen depuis 2017 et docteur en Energétique et Procédés. Il a réalisé sa thèse sur un sujet lié au réseau électrique de transport.
- France JONATHAN, expert en stratégie carbone, directrice chez Pink Strategy. PINK Strategy, société spécialisée dans les applications de l'Analyse du Cycle de Vie pour les secteurs de l'énergie, et des infrastructures. France JONATHAN a plus de 20 ans d'expérience dans l'analyse

de valeur sur le cycle de vie des équipements et réalise régulièrement des ACV, éco-conceptions et revues critiques.

- Hubert Gentou, expert dans les marchés de l'énergie, notamment la gestion des risques marché, a une expérience approfondie de l'optimisation d'actifs énergétiques dans les marchés d'énergie. Il est actuellement Chief Economist chez ZE Energy et supervise le développement des outils d'optimisation des actifs de production de Ze Energy. Ze Energy est une entreprise spécialisée dans le développement et l'opération de batteries stationnaires et de centrales de production photovoltaïque hybrides (centrale + batterie stationnaire). Hubert apporte sa connaissance des marchés d'énergie et des batteries afin de vérifier la cohérence des hypothèses avec la réalité du marché et des actifs énergétiques utilisés.

Les membres du panel ont travaillé de la façon la plus indépendante possible vis à vis des praticiens et du commanditaire.

### 3. Nature du travail de Revue Critique, processus et limitations

Le panel a travaillé conformément aux exigences des normes mentionnées en référence. Le panel a pris de plus en compte également l'ISO 14071. Conformément à ISO 14044, le panel a notamment travaillé afin de vérifier les points suivants :

- les méthodes utilisées pour réaliser l'ACV sont cohérentes avec les exigences de la norme ISO 14044,
- les méthodes utilisées pour réaliser l'ACV sont valables d'un point de vue scientifique et technique,
- les données utilisées sont appropriées et raisonnables par rapport aux objectifs de l'étude,
- les interprétations reflètent les limitations identifiées et les objectifs de l'étude,
- le rapport d'étude est transparent et cohérent.

Le premier objectif du panel été de fournir au praticien des commentaires détaillés afin qu'il améliore son travail. Ces commentaires ont couvert les choix méthodologiques et le mode de restitution des résultats. Les membres du panel ont vérifié la plausibilité des données utilisées au travers de tests aléatoires. Enfin, le présent rapport final de revue critique fournit au futur lecteur du rapport du praticien des informations qui lui permettront de mieux comprendre le rapport final du praticien pour le commanditaire.

Le travail de revue critique a été mené au fur et à mesure du travail du praticien, de juillet 2024 à mars 2025. Ce travail commencé après la genèse d'un premier rapport par le praticien, et s'est achevé au vu du rapport final du praticien, version finalisée en mars 2025. Pendant la période de revue critique, des échanges oraux et écrits ont eu lieu entre les membres du panel et le praticien, incluant des clarifications concernant les commentaires produits, et la production de plusieurs versions successives du rapport par le praticien. Les principaux échanges ont eu lieu le 2 juillet 2024 (présentation du cas d'étude au panel), le 16 janvier 2025 (revue de la modélisation sous Simapro), le 30 janvier (réunion d'échanges sur les commentaires du panel). Le praticien a pris en compte la majeure partie des commentaires du panel et significativement modifié et amélioré son rapport.

Le présent rapport de revue critique est la synthèse finale des commentaires par les membres panel. Quelques commentaires détaillés clefs sont fournis au sein du présent rapport de revue critique, ainsi que l'ensemble des échanges en annexe.

Le présent rapport est livré par le panel au commanditaire et au praticien. Le panel ne peut pas être tenu pour responsable de l'usage de son travail par des tiers. Les conclusions du panel couvrent *l'ensemble du rapport du praticien* mentionné plus haut et aucun autre rapport, extrait, publication ou généralisation de tout type qui pourrait être fait. Les conclusions du panel ont été données dans le cadre de l'état de l'art courant, et de l'information qu'il a reçu au cours de son travail. Ces conclusions auraient pu être différentes dans un contexte différent.

#### 4. Conclusions de la revue

Les 122 commentaires détaillés couvrent les points suivants :

- Méthodologie (ISO et science) : 42 commentaires ;
- Données et calculs : 35 commentaires ;
- Analyse et interprétations : 21 commentaires ;
- Rapport, éditorial et autres commentaires : 24 commentaires.

A ces commentaires sur le rapport, s'ajoutent 29 commentaires sur le modèle réalisés lors de la revue en janvier 2025.

Un travail important a été réalisé par le praticien pour répondre aux commentaires de façon détaillée, et les prendre en compte au sein de son rapport final. La pertinence des modifications proposées a été discutée en réunion, et la réalisation effective des modifications vérifiée au vu du rapport final. La revue critique note l'effort du praticien qui a apporté très souvent des modifications en direct adéquation avec les commentaires de la revue.

Le panel a émis 14 commentaires complémentaires sur la version finale du rapport. En l'absence de tour complémentaire, ces commentaires n'ont pas donné lieu à des échanges avec le praticien ni d'amendements du rapport par ce dernier. L'ensemble de ces commentaires sont listés à la suite des autres commentaires en annexe de ce document.

Au vu du rapport final, le panel considère que les conclusions apportées répondent de façon adéquate et crédible aux objectifs mentionnés, et qu'elles ont été établies dans le respect des normes mentionnées. Ces conclusions sont mesurées et prennent en compte les incertitudes associées aux différents impacts étudiés. Ces conclusions s'inscrivent dans le cadre des limitations mentionnées aux chapitres 5.4, 5.6 et 6. Le rapport du praticien s'inscrit ainsi bien dans le cadre général des exigences d'ISO 14044 concernant les rapports d'ACV communiqué à des tiers.

#### 5. Commentaires détaillés

Les lignes suivantes apportent des éclairages spécifiques qu'un lecteur du rapport final du praticien pourra utiliser pour l'assister dans sa lecture et sa compréhension du rapport. Ces lignes récapitulent des commentaires essentiels qui n'auraient pas été traités de façon appropriée selon les exigences des normes, en mentionnant les raisons apportées et l'implication sur les résultats que ces écarts peuvent avoir. Elles identifient également des recommandations d'améliorations pour les prochaines études. La lecture des commentaires détaillés, et des réponses correspondantes, fournis au sein de l'annexe, est disponible pour mieux comprendre les points suivants.

##### 5.1 Adéquation des méthodes avec les exigences des normes de référence

Le rapport est globalement conforme dans sa structure aux exigences de la norme ISO 14044.

Le panel attire l'attention du lecteur que le rapport s'appuie sur deux modélisations, une modélisation par Artelys pour définir les caractéristiques de chaque scénario selon une optimisation économique (dans le rapport nommé « modélisation ») et une modélisation par Gingko21 sous le logiciel Simapro pour l'évaluation des impacts environnementaux selon les exigences des normes ISO 14040 et 44 (dans le rapport nommé « modélisation ACV »).

##### 5.2 Validité technique et scientifique

Le rapport détaille de manière adéquate les données utilisées et les modélisations réalisées (modélisation par Artelys et modélisation ACV).

Concernant la modélisation ACV, la modélisation du processus de fabrication des panneaux solaires est réalisée à partir du benchmark de la CRE communiqué par l'ADEME. Chaque étape de fabrication y est traitée séparément puis réassemblée avec des pertes et casses liées à chaque procédé. Les étapes considérées correspondent à une réalité industrielle. Néanmoins, l'interprétation du benchmark étant complexe, la représentativité globale du processus, bien que suffisante pour statuer sur l'intérêt des différentes options, comporte des approximations. Les modèles techniques utilisés (secondary data) ne sont pas toujours représentatifs de l'industrie et une alerte particulière est à noter sur la modélisation du processus amont de purification du silicium solaire pour lequel les benchmarks de l'ADEME sont

extrêmement restreints, limités à une seule technologie et usine. Ce processus étant extrêmement impactant dans la chaîne de valeur, cette modélisation conservatrice a notamment une influence sur les indicateurs de changement climatique et d'utilisation des ressources fossiles. Les conclusions de l'étude, notamment dans la comparaison des scénarios, restent pertinentes grâce à cette approche conservatrice.

### **5.3 Adéquation des données utilisées en relation avec les objectifs de l'étude**

Concernant le benchmark de la CRE mentionné précédemment et utilisé pour la modélisation ACV des panneaux, le panel tient à préciser que ce benchmark regroupe un peu moins d'une centaine d'ACV monocritère carbone, réalisées par plusieurs praticiens, pour différents fabricants de la chaîne photovoltaïque et toujours soumis à un audit sur site, une double revue critique par des experts de la filière et l'ADEME (avec le support du CSTB et de Certisolis). Les données de ce benchmark sont issues d'ACV certifiées respectant les normes ISO 14040/44 (certificats non communiqués).

Si ces données sont plus pertinentes pour l'étude que les données ecoinvent, comme l'indique le rapport en chapitre 5.3.2, le panel et plus spécifiquement France Jonathan qui a été impliquée dans ce benchmark, souligne que l'analyse de l'ensemble de la chaîne de valeur (en remontant jusqu'à la purification du silicium), ainsi que la structure du benchmark par matériaux et non par fonction, rendent l'analyse complexe. Le benchmark, étant issu d'ACV monocritère, ne trace pas l'ensemble des émissions à l'eau et à l'air pour les procédés concernés (Les modèles Ecoinvent ont été repris pour compléter ce volet). L'objectif de l'étude n'étant pas d'établir un ICV du panneau photovoltaïque en tant que tel, le praticien s'est appuyé sur sa propre compréhension des inventaires communiqués et a tenté de faire sens lui-même de certaines disparités. La comparaison des résultats d'impact de l'inventaire utilisé avec celui disponible dans ecoinvent 3.10 permet de valider sa pertinence pour cette étude. Par conséquent, le modèle proposé dans ce rapport reste très conservateur par rapport aux pratiques industrielles constatées sur ce même marché de la CRE. Néanmoins, l'inventaire utilisé est à considérer avec précaution et uniquement dans l'usage de comparaison fait dans cette étude et ne doit en aucun cas être utilisé comme référence à la modélisation de l'impact d'une centrale photovoltaïque hors de ce contexte. Une évaluation plus spécifique, qui n'est pas l'objet de cette étude, nécessiterait un travail approfondi, une approche adaptée à la taille des échantillons disponibles selon les étapes du cycle de fabrication, et une revue avertie avant modélisation, de la qualité de la remontée de données.

Concernant les batteries, il est à noter que certaines hypothèses et caractéristiques concernant les batteries chimiques évoluent rapidement avec la dynamique forte du marché actuel. Certaines hypothèses prises en compte dans l'étude, en particulier concernant les résultats de dimensionnement des batteries obtenus des systèmes électriques étudiés, provenant de bases de données un peu anciennes, sont plutôt conservatrices en comparaison aux produits industriels commercialisés actuellement et dans un futur proche.

### **5.4 Validité des interprétations dans le cadre des limitations de l'étude**

Le panel souligne au lecteur que les données issues des calculs d'optimisation économiques par Artelys sont prises directement dans la modélisation ACV, sans prise en compte d'incertitudes, telles que, par exemple, incertitudes de la demande ou incertitudes de la production photovoltaïque. Ce point est rappelé en limitation dans le rapport de manière adéquate.

Il est à noter également que le niveau d'information à disposition du panel pour établir certaines hypothèses d'entrée du modèle économiques était assez faible (en particulier profil de demande électrique et profil de production électrique photovoltaïque). Il n'a pas été fait d'analyse de sensibilité sur les impacts éventuels relatifs de ces hypothèses sur les résultats de dimensionnement obtenus des systèmes électriques étudiés. Ce point est rappelé en limitation dans le rapport.

Dans le chapitre 5.5.3, le rapport indique que l'indicateur « Epuisement des ressources fossiles » a été rajouté, celui-ci n'étant pas prépondérant dans l'analyse par pondération, à la liste des indicateurs pertinents à la demande de l'ADEME. Cependant l'analyse, faite sur la modélisation corrigée, montre bien que cet indicateur fait bien partie des indicateurs pertinents.

Dans le chapitre 5.5.5, le panel attire l'attention du lecteur pour sa bonne compréhension sur le fait que la figure 27 est coupée sur les indicateurs épuisement des ressources (le ratio entre S4 et S1 étant 12,7) et eutrophisation eaux douces (le ratio entre S4 et S1 étant de 3).

Le panel rappelle également que les résultats en score unique dépendent d'un jeu de facteurs de pondération qui reflète un choix de valeurs, et qu'un choix de valeurs différent pourrait entraîner des conclusions en score unique différentes. De plus concernant les incertitudes évaluées sur les scores uniques au chapitre 5.6.4.4, la figure 35 montre que le score unique peut prendre des valeurs négatives pour les systèmes S14 et S15. Cela ne peut s'expliquer que par le fait que certains indicateurs puissent aussi prendre des valeurs négatives. Or, sur la figure 33, aucun indicateur n'a de valeur à centile à 2,5% qui soit négatif. Par conséquent ce calcul d'incertitude est erroné. Le panel considère cependant que cette erreur n'est pas susceptible de remettre en cause les conclusions de l'étude.

Concernant la comparaison des scénarios 4 et 5, le praticien conclut que S14 et S15 sont équivalents uniquement sur le score unique, et indique précédemment dans le même paragraphe que tous les indicateurs • augmentent entre S14 et S15. Or, les analyses de sensibilité et les analyses d'incertitude qui sont présentées dans le rapport ne permettent pas de faire une conclusion aussi tranchée sur plusieurs indicateurs où les résultats des deux systèmes sont très proches. Cette conclusion est à lire avec précaution et il serait plus juste de dire que ces deux scénarios sont donc équivalents sur le score unique et plusieurs indicateurs pertinents.

### **5.5 *Transparence et consistance***

Le praticien a pris en compte les commentaires du panel et a fortement amélioré le niveau de transparence du rapport.

Cependant, il est à noter que malgré la demande faite, les calculs intermédiaires sur les différentes étapes de fabrication du panneau photovoltaïque (extract Simapro) n'ont pas été communiqués au panel ce qui a limité la revue de la pertinence du modèle utilisé aux indicateurs pour le produit fini alors que des benchmarks et valeurs de référence sont disponibles (ADEME, Experts, littérature) pour chaque étape du procédé.

## **6. Annexes**

Le tableau de commentaires détaillés échangés au cours du travail de revue critique, ainsi que les réponses des praticiens, est une annexe du présent rapport de revue critique.

## 7.11. **Annexe : Commentaires de revue critique**

Le tableau de commentaires détaillés échangés au cours du travail de revue critique, ainsi que les réponses des praticiens, est présenté dans cette annexe.

## Commentaires du rapport

N°	Rev. ID	Chapitre du rapport/ Tableau/ Schéma	N° ligne du rapport	Type de com	Niveau d'importance du commentaire	Commentaire du reviewer	Suggestion éventuelle du reviewer	Type réponse du praticien	Réponse du praticien
1	DB	2.1	146	Autre	Editorial	"vehicule-to-grid" - terme à expliciter (bas de page ou dans rubrique definition) et à mettre peut-être entre guillemet car pas en français.	rajouter une definition	Pris en compte	Ajout d'une définition en partie 2.1
2	DB	2.1	146-148	Autre	Editorial	"Des stockages de plus longues durées sont également envisagés à plus long terme". Clarifier ce que signifie "envisager des stockages"? Est-ce leur R&C? leur mise en place?	clarifier la phrase	Pris en compte	Modification de la phrase pour dire que les technologies matures uniquement sont étudiées
3	DB	2.1	149-157	Autre	Editorial	Phrase un peu longue et difficile à lire.	Simplifier par des phrases courtes si possible.	Pris en compte	Texte adapté
4	DB	2.2	169-170	Autre	Editorial	"Plusieurs de ces éléments sont traités dans le cadre de cette étude. " La phrase nous laisse sur notre fin.	Il serait bien de préciser lesquels.	Pris en compte	Ajout de la prise en compte du déploiement d'ENR dans l'étude
5	GA	2.3	194	DT	Important - Ecart	Il existe des erreurs majeures dans ecoinvent 3.10. Une version 3.10.1 corrigeant ces erreurs a été publiée en novembre 2024. Voir : <a href="https://support.ecoinvent.org/ecoinvent-version-3.10">https://support.ecoinvent.org/ecoinvent-version-3.10</a> Ces données devraient être mises à jour. Si ce n'est pas le cas, l'influence des erreurs dans ecoinvent 3.10 sur les résultats de l'étude devrait être discutée dans le rapport.		Pris en compte	Pas de mise à jour SimaPro prévue par l'éditeur Pré-sustainability pour prendre en compte Ecoinvent 3.10.1. La prochaine mise à jour est prévue au printemps/été 2025 avec Ecoinvent 3.11. Les pb reconnus par ecoinvent dans 3.10 sont: - Emissions to air in coke production CN et RoW, qui a une influence sur l'acier mondial. Les valeurs les plus déviantes des émissions dans l'air (tout facteur <1/10 et >10, donc les erreurs de *800, *1000, *10E6) ont été corrigées manuellement dans la base de donnée de Gingko 21 3.10 utilisée. - Production volumes in markets for electricity in Brazil On ne fait appel à aucune électricité directement. Il serait néanmoins possible qu'un procédé GLO en inclue une petite partie (GE, infra...). Note intégrée en 5.2.1.2
6	GA	2.4	203	AI	Recommandation	Vous indiquez que le rapport est à destination du grand public. Définir le public visé permet de s'assurer que le contenu du rapport est adapté à son public, et qu'il sera compréhensible. A priori, le rapport se destine plutôt à un public technique, qui a des bases suffisantes pour pouvoir comprendre les notions mobilisées dans le rapport.	Indiquer que le rapport est destiné à être rendu public, mais qu'il s'adresse à un public technique. Pour pouvoir s'adresser au grand public, une version vulgarisée des résultats devrait être préparée à partir du contenu de ce rapport.	Pris en compte	Une clarification est intégrée dans le rapport en § 2.4 qu'il s'adresse à un public technique et que si le besoin s'en fait sentir des documents grands publics reprenant les résultats seront préparés.
7	DB	2.6	239	Autre	Editorial	Un seul president de panel : moi-même. Guillaume Audard intervient en tant qu'expert.		Pris en compte	texte adapté
8	DB	2.6	245-246	M	Important - Ecart	Il est important de mentionner ici le rapport de revue et d'indiquer l'annexe où il figurera.		Pris en compte	Texte ajouté en fin de § 2.6., en nouveau §2.7 et en annexe 7.7 spécifiques créés
9	DB	3.2.3	301	M	Recommandation	A ce stade, il pourrait être juste de mettre également les caractéristiques d'isolement du site.		Pris en compte	Explication des conditions d'accès au site

### Rev. ID :

DB : Delphine Bauchot  
GA : Guillaume Audard  
FJ : France Jonathan  
HG : Hubert Gentou

### Type de commentaire :

AI : Analyse/interprétation  
DT : Données, technique  
M : Méthodologie



N°	Rev. ID	Chapitre du rapport/ Tableau/ Schéma	N° ligne du rapport	Type de com	Niveau d'importance du commentaire	Commentaire du reviewer	Suggestion éventuelle du reviewer	Type réponse du praticien	Réponse du praticien
10	HG	3.4	311	DT	Recommandation	Les caractéristiques des batteries ne sont pas mentionnées. En particulier les dimensionnement energie/puissance et les cyclages journaliers max		Pris en compte	Les dimensionnements énergie/puissance + cyclages journaliers max sont optimisés. Une phrase a été ajoutée. Pour le SI3, les dimensions sont disponibles dans le tableau 2
11	JF/HG	4.1	361	DT	Recommandation	La fréquence de mesure (granularité) des données 2009, 2010, 2011 n'est pas explicitement mentionnée. Les données dont est issue la courbe de charge 2023 ne sont pas communiquées. La variabilité des données 2009, 2010, 2011 n'est pas analysée		Pris en compte	La granularité des données des années 2009, 2010 et 2011 a été précisée dans le rapport. La courbe de charge de 2023 est issue de la courbe de charge construite à partir des données des années 2009, 2010 et 2011 qui est ensuite projeté sur l'année 2023 à l'aide des données du BP d'EDF SEI. Enfin la variabilité des données pour 2009, 2010 et 2011 n'est pas analysée puisque l'objectif est d'avoir une courbe qui est ensuite projetée pour l'année 2023.
12	JF/HG	4.1	361	M	Recommandation	La représentativité de la courbe de charge n'est pas démontrée. La méthodologie d'extrapolation n'est pas décrite et la justification de la saisonnalité peu marquée n'apparaît pas au rapport. Il est seulement fait référence à des courbes de charge (sans mention de la granularité) et consommation mensuelles. Il n'est pas fait non plus référence aux types d'usages de l'énergie électrique dans le village et à leurs évolutions dans le futur: y a t il des consommations liées à des usages de froid ou des évolutions des usages qui augmenteraient la thermosensibilité de la consommation (congélation de poisson avec la pêche par exemple ?). De tels usages ont pour conséquence une sensibilité à la température et à l'ensoleillement qui n'est pas décrite.		Pris en compte	La méthodologie d'extrapolation a été complétée dans le rapport dans la partie 4.1 pour expliciter les données disponibles, le traitement fait et ce qui est disponible en sortie
13	FJ	4.1	370	DT	Editorial	Les consommations a maille horaire n'étant fournies que pour certains mois, des semaines types ont été créées pour les autres. La méthodologie d'extrapolation n'est pas décrite et la justification de la saisonnalité peu marquée n'apparaît pas au rapport		Pris en compte	La méthodologie d'extrapolation a été complétée dans le rapport dans la partie 4.1 pour expliciter les données disponibles, le traitement fait et ce qui est disponible en sortie
14	HG	4.1	380	DT	Recommandation	Une comparaison entre ces données historiques et les données modélisées pour 2023 n'est pas fournie.		Non pris en compte	Les données historiques sont seulement disponibles pour les années 2009, 2010 et 2011, une telle comparaison n'est donc pas possible.
15	DB	4.1	380	DT	Recommandation	A-t-on accès à cette courbe de charge? Mettre une référence si dans le rapport, lien si disponible ailleurs.		Non pris en compte	Un graphique a été ajouté pour représenter un extrait de la courbe de charge obtenue.
16	HG	4.1	383	M	Recommandation	Il est fait référence à une publication d'EDF SEI dans le cadre du bilan prévisionnel 2015 d'EDF SEI pour une prévision de consommation du village de Kaw en 2023. Des bilans prévisionnels ont été publiés entre temps, le dernier étant de 2023 ( <a href="https://www.edf.gf/sites/sei_gf/files/2023-12/BP_23_Guyane_Littoral.pdf">https://www.edf.gf/sites/sei_gf/files/2023-12/BP_23_Guyane_Littoral.pdf</a> ). Ceux ci publient des consommation annuelles depuis 2014. Un ajustement de la prévision en fonction des écarts entre prévisions de consommation et consommation réelles durant la période 2015-2023 pourrait être utile.		Non pris en compte	Les BP après 2015 ne donnent pas d'information sur la consommation du village de Kaw. Nous n'avons pas pu avoir accès à des données plus actualisées. Un réajustement entre prévision de consommation et consommations réelles aurait pu en effet être réalisé dans le cadre de cette étude mais aucun élément ne permettait de considérer que l'évolution de la consommation sur le littoral était la même que celle du village de Kaw. Des agents locaux de l'ADEME ont pu avoir accès au rapport et n'avaient pas remonté d'éléments sur la méthode ou l'origine des données utilisées

**Rev. ID :**

DB : Delphine Bauchot  
GA : Guillaume Audard  
FJ : France Jonathan  
HG : Hubert Gentou

**Type de commentaire :**

AI : Analyse/interprétation  
DT : Données, technique  
M : Méthodologie



N°	Rev. ID	Chapitre du rapport/ Tableau/ Schéma	N° ligne du rapport	Type de com	Niveau d'importance du commentaire	Commentaire du reviewer	Suggestion éventuelle du reviewer	Type réponse du praticien	Réponse du praticien
17	HG	4.1	387	M	Recommandation	L'évolution a la hausse de la consommation présentée en figure 5 n'est pas réactualisée avec des informations plus récentes d'EDF SEI. Il n'y a peut être pas un focus spécifique sur le village de Kaw dans les versions plus récentes des Bilans Prévisionnels mais les tendances de prévision de consommation globale peuvent permettre de réactualiser la prévision de 2015.		Non pris en compte	Les BP après 2015 ne donnent pas d'information sur la consommation du village de Kaw. Nous n'avons pas pu avoir accès à des données plus actualisées. Un réajustement entre prévision de consommation et consommations réelles aurait pu en effet être réalisé dans le cadre de cette étude mais aucun élément ne permettait de considérer que l'évolution de la consommation sur le littoral était la même que celle du village de Kaw. Des agents locaux de l'ADEME ont pu avoir accès au rapport et n'avaient pas remonté d'éléments sur la méthode
18	GA	4.2.1	407	M	Recommandation	Vous faites l'hypothèse que la courbe de charge et l'ensoleillement sont indépendants, et que des données d'années différentes peuvent être utilisées (2023 reconstruit pour la courbe de charge ; 2019 pour l'ensoleillement).  En métropole, la courbe de charge est fortement corrélée à la météo (thermosensibilité). C'est probablement beaucoup moins le cas en Guyane du fait de l'absence de chauffage, mais quid de la climatisation et du refroidissement (réfrigérateurs et congélateurs) ? On peut supposer que la consommation de ces équipements est corrélée à la température extérieure, qui est en partie corrélée à l'ensoleillement.	Ajouter des éléments supplémentaires pour justifier que cette hypothèse est valide, et qu'elle n'a pas d'influence notable sur les conclusions.	Pris en compte	Élément ajouté pour justifier la méthodologie suivie
19	HG	4,2,1	407	M	Recommandation	y a t il des consommations liées à des usages de froid ou des évolutions des usages qui augmenteraient la thermosensibilité de la consommation (congélation de poisson avec la pêche par exemple ?). De tels usages ont pour conséquence une sensibilité à la température et à l'ensoleillement qui n'est pas décrite.		Pris en compte	Les données de consommation disponibles ne nous permettent pas de connaître la part de la consommation thermosensible, notamment les usages de froid. Une phrase dans ce sens a été ajoutée dans le rapport
20	HG	4,2,1		M	Important - Ecart	Il n'est pas fait référence aux écarts entre prévision d'irradiation et irradiation réelle sur site. Un fonctionnement avec batterie nécessite une logique de fonctionnement qui anticipe la production solaire et permet d'utiliser les batteries aux mieux en fonction de prévision. L'usage de données considérée comme la consommation réelle ou la production réelle sous estimation des incertitudes et sur estimation l'optimisation réelle qui peut être faite sur site. La conséquence de cet écart entre prévision et réel fait que les actifs sont toujours sous optimisés en comparaison à une situation de connaissance parfaite. Cela peut se traduire en une surconsommation de carburant dans les scénarios hybrides avec un générateur diesel, ou un besoin de surdimensionnement de la batterie pour couvrir les aléas avec un stockage en énergie un peu plus important, ou conjointement à la fois une production photovoltaïque plus importante et un stockage plus important. Les écarts entre prévision en J-1 et production réelle en jour J par pas de temps de 30 minutes est typiquement de +/- 30% en moyenne.		Pris en compte	Il existe en effet des écarts entre l'irradiation prévue et l'irradiation réellement observée, ces différences dépassent le cas de l'étude. Néanmoins, lors de la modélisation le comportement du système n'est pas très anticipatif afin de se rapprocher au mieux du cas d'opération réel. Ces éléments ont été ajoutés dans les limites de l'étude.

**Rev. ID :**

DB : Delphine Bauchot  
GA : Guillaume Audard  
FJ : France Jonathan  
HG : Hubert Gentou

**Type de commentaire :**

AI : Analyse/interprétation  
DT : Données, technique  
M : Méthodologie



N°	Rev. ID	Chapitre du rapport/ Tableau/ Schéma	N° ligne du rapport	Type de com	Niveau d'importance du commentaire	Commentaire du reviewer	Suggestion éventuelle du reviewer	Type réponse du praticien	Réponse du praticien
21	FJ	4.2.1		M	Important - Ecart	La modélisation de la production du système PV manque de transparence. La prise en compte des pertes systèmes par exempl n'est pas décrite		Pris en compte	Les pertes sont prises en compte de manière implicite via la prise en compte du facteur de charge solaire utilisé (celui de la Guyane). Une phrase a été ajoutée dans la partie 4.2.1 pour expliciter les données utilisées pour la disponibilité solaire.
22	FJ	4.2.2	418	DT	Recommandation	La formule de calcul des consommations du générateur diesel ne semble pas prendre en compte les consommations au démarrage et à l'arrêt mais un fonctionnement continu. Quel impact cela a-t-il sur les consommations?		Pris en compte	Ajout d'une phrase dans la 4.2.2 (la fonction affine avec une valeur positive en 0 permet de prendre en compte la surconsommation au démarrage et à l'arrêt). + la consommation globale de diesel est cohérent avec les données réelles fournies par un agent local de l'ADEME
23	DB	4.2.3	431	Autre	Recommandation	Si vous vous adressez à un public novice, plusieurs termes doivent être définis et toujours nommé de la même façon (taux de charge, courbe de charge, disponibilité solaire ou ensoleillement?, état de charge, profondeur de charge, etc.)		Non pris en compte	Le public auquel s'adresse le rapport n'est pas un public novice
24	DB	4.2.3	438	Autre	Editorial	Ecrire CEA-Liten partout de la même manière.		Pris en compte	CEA-Liten
25	DB	4.2.3	446	DT	Recommandation	"• La durée de vie des batteries Lithium-Ion est de 15 ans et 6 000 cycles." Preciser la source et l'incertitude de cette donnée.		Pris en compte	Une note de bas de page a été ajoutée
26	HG	4.2.3	447	DT	Editorial	Le rendement aller retour (ou Round Trip Efficiency) est typiquement supérieur à 85% en début de vie du projet (environ 87% à 88%) et typiquement un peu inférieur à 85% en fin de vie.		Pris en compte	Hypothèse conservatrice, ajouté dans le rapport
27	HG	4.2.3	446 et 449	DT	Recommandation	Une durée de vie de 15 ans et 6000 cycles sous estime les durées de vie et le cyclage possible sur les batteries actuelles, surtout celles dont le C rate est de 0,5 ou 0,25, correspondant à des batteries de ration énergie/puissance de 0,5 à 0,25, c'est à dire de 2h à 4h de réserve. La technologie dominante actuelle est la technologie LFP. Le SOH à 70% est atteint maintenant à un plutot 8000 cycles. Certains constructeurs annoncent meme 10 000 cycles à 70% de SOH.	Préciser que l'hypothèse est conservatrice	Pris en compte	Hypothèse conservatrice, ajouté dans le rapport
28	DB	4.2.3	450-452	M	Important - Ecart	"Dans l'ensemble de l'étude il est supposé qu'après 6000 cycles ou 15 années d'utilisation, la batterie à un SoH de 70%. " On note ici une limitation forte du modèle : la première est que l'on fait l'hypothèse que le village de Kaw a toujours la même demande pendant 15 ans. Sans cette limitation, cela signifierait qu'il faudrait soit une batterie encore plus importante dans le cas d'une hypothèse de croissance, soit une batterie similaire mais avec une prevision de baisse de la demande. Le scenario se passe sur une année bien définie mais les installations sont dimensionnées pour une 15zaine d'année. Bien clarifier les hypothèses et les limitations de l'étude ici et dans les conclusions. Cette question s'appuie sur les hypothèses de dimensionnement par Artelys donc sont certainement plus larges que la batterie. Il serait necessaires de clarifier les hypothèses d'Artelys et si ces dernières sont representatives d'un dimensionnement qu'ils auraient fait dans la réalité.	Clarifier le processus de dimensionnement d'Artelys et les hypothèses prises.	Pris en compte	Les hypothèses ont été clarifiées dans la partie 4.2.3 et des éléments ajoutés dans les limites de la modélisation des systèmes électriques

**Rev. ID :**

DB : Delphine Bauchot  
GA : Guillaume Audard  
FJ : France Jonathan  
HG : Hubert Gentou

**Type de commentaire :**

AI : Analyse/interprétation  
DT : Données, technique  
M : Méthodologie



N°	Rev. ID	Chapitre du rapport/ Tableau/ Schéma	N° ligne du rapport	Type de com	Niveau d'importance du commentaire	Commentaire du reviewer	Suggestion éventuelle du reviewer	Type réponse du praticien	Réponse du praticien
29	HG	4.2.3	453	DT	Recommandation	Il n'est pas fait référence aux écarts entre prévision d'irradiation et irradiation réelle sur site. Le dimensionnement de la batterie, tout comme la consommation de diesel peuvent être plus importants du fait d'une gestion du fonctionnement du site qui doit tenir compte d'aléas d'incertitude météo (L'écart entre prévision en J-1 et production réelle en jour J par pas de temps de 30 minutes est typiquement de +/- 30% en moyenne). A noter que ce point n'est pas aussi important pour le système (3) que les systèmes (4) et (5)		Pris en compte	Il existe en effet des écarts entre l'irradiation prévue et l'irradiation réellement observée, ces différences dépassent le cadre de l'étude. Néanmoins, lors de la modélisation le comportement du système n'est pas très anticipatif afin de se rapprocher au mieux du cas d'opération réel. Ces éléments ont été ajoutés dans les limites de l'étude.
30	HG	4.2.3	453	DT	Recommandation	Il n'est pas fait référence à la consommation d'auxiliaires (refroidissement de la batterie LFP). Cette consommation dépend de la température ambiante (plus il fait chaud, plus il faut refroidir). Les technologies chimiques nécessitent des températures des cellules autour de 20-23°C pour limiter le vieillissement, car les chimies sont très sensibles aux hautes températures qui dégradent fortement le SOH. La consommation auxiliaire est dépendante de la puissance activée, mais il y a aussi une consommation minimale plancher. Une consommation auxiliaire équivalente à 5% de l'énergie cyclée paraît tout à fait possible pour les types de designs de batteries présentés (6 à 7 heures de stockage), ce qui serait à peu près équivalent en termes énergétiques à réduire le rendement aller retour de l'ordre de 5%, mais pas exact en terme de flux d'énergies en terme de temporalité. Cet ordre de grandeur dépend aussi d'informations concernant les températures et l'humidité.		Pris en compte	Les consommations auxiliaires ont été prises en compte et les résultats ont été mis à jour. Ces consommations auxiliaires sont de 2W/kWh_BESS dans le S13 car C-rate plus faible et de 2,23W/kWh_BESS dans les S12, S14 et S15. Les résultats sont affectés de manière suivante : - S12 : légère augmentation de la capacité de la batterie afin de prendre en compte cette nouvelle consommation en base pendant la nuit. La consommation de diesel est naturellement augmentée par l'ajout de cette consommation auxiliaire. - S13 : Augmentation de la consommation de diesel. Les capacités de PV et de la batterie étant fixées. - S14 : Diminution de la taille de la batterie et augmentation très significative de la capacité PV. Il est économiquement plus avantageux de réduire la taille de la batterie (et donc d'avoir une consommation auxiliaire moins importante) et d'augmenter la capacité de PV installée afin de subvenir à la demande additionnelle notamment lorsque plusieurs jours avec un faible ensoleillement s'enchaînent. - S15 : comme dans le S14, faible diminution de la capacité de la batterie. En revanche contrairement au S14, l'utilisation du diesel permet de limiter l'augmentation du PV.
31	FJ	4.2.3	459	DT	Recommandation	Si la puissance max du village est de 31MW et qu'un générateur permet 64kW pourquoi n'y a-t-il pas eu de redimensionnement des GE pour éviter la surcapacité?		Non pris en compte	Ce choix est fait pour coller au système présent aujourd'hui dans le village de Kaw et ainsi faciliter les comparaisons avec le système de référence.
32	FJ	4.2.3	459	DT	Editorial	Remplacer "la puissance des deux générateurs" par "la puissance de chaque générateur"		Pris en compte	"la puissance de chacun des deux générateurs"
33	FJ	4.2.3	461	DT	Editorial	La puissance max de 31MW pourrait être mentionnée au paragraphe 4.1 pour une meilleure vision		Pris en compte	Ajouté
34	DB	4.2.3	473	M	Important - Ecart	"ne peuvent". Expliciter cette contrainte qui ne s'applique qu'aux scénarios 2 à 5 mais pas au 1. L'absence de contrainte de bruit sur le 1 remet même en question la pertinence de ce scénario. Expliciter les raisons de ce scénario et ce bien avant dans le rapport. Si ce scénario est conservé, il faut bien mettre en évidence cette absence de contrainte qui ne permet pas ou limite fortement sa faisabilité. Cela remet même en question sa comparabilité.		Non pris en compte	Le bruit n'est pas un impact mesuré dans la méthodologie EF. Le bruit est un facteur qui peut être gênant pour certains sites isolés et pas pour d'autres : refuge en montagne non gênant. donc souhait de le garder
35	DB	4.2.3	513		Recommandation	où sont décrits les systèmes dimensionnés selon une approche économique. Mettre une référence dans le rapport.		Pris en compte	Des précisions ont été apportées en annexe

**Rev. ID :**

DB : Delphine Bauchot  
GA : Guillaume Audard  
FJ : France Jonathan  
HG : Hubert Gentou

**Type de commentaire :**

AI : Analyse/interprétation  
DT : Données, technique  
M : Méthodologie



N°	Rev. ID	Chapitre du rapport/ Tableau/ Schéma	N° ligne du rapport	Type de com	Niveau d'importance du commentaire	Commentaire du reviewer	Suggestion éventuelle du reviewer	Type réponse du praticien	Réponse du praticien
36	DB	4.3	530 - tableau 2	M	Important - Ecart	Puissance en PV pour SP3. Rappeler ici en note pourquoi la capacité de la batterie, la puissance raccordée et la puissance PV sont fixés en entrée.		Pris en compte	Ajout d'une note de bas de page
37	GA	4.3.1	547	Autre	Recommandation	Figure 8 : Pourquoi utiliser un générateur de 80 kVA (64 kW) si la demande maximale ne dépasse pas 30 kW ? Des générateurs de puissance nominale plus proche de 30 kW ne seraient-ils pas plus adaptés ?		Non pris en compte	Ce choix est fait pour coller au système présent aujourd'hui dans le village de Kaw et ainsi faciliter les comparaisons avec le système de référence comme expliqué en 4.2.4
38	HG	4.3.1	550	AI	Recommandation	Les consommations de carburant sont modélisées sur la base d'une prévision parfaite. Les incertitudes météo amènent à des consommations toujours un peu plus élevées du fait des écarts entre prévisions et production/consommation réelle		Pris en compte	Les écarts entre la prévision et le cas réels sortent du cadre de l'étude. Néanmoins, même si les incertitudes météorologiques annuelles ne sont pas considérées, la modélisation d'une irradiation sur 365 jours au pas de temps horaire permet de prendre en compte les incertitudes météorologiques journalières. Cet élément a été ajouté dans les limites de la modélisation.
39	FJ	4.3.1	550	AI	Editorial	Redites dans ce paragraphe		Pris en compte	Paragraphe mis à jour
40	DB	4.3.2	567 - figure 9	Autre	Recommandation	Si vous vous adressez à un public novice, il faut expliquer les valeurs négatives.		Non pris en compte	Le public auquel s'adresse le rapport n'est pas un public novice
41	HG	4.3.2	574	M	Recommandation	Les consommations de carburant sont modélisées sur la base d'une prévision parfaite. Les incertitudes météo amènent à des consommations toujours un peu plus élevées du fait des écarts entre prévisions et consommation réelle. La batterie est fortement sollicitée (308 cycles par an et 80% de DOD chaque jour) et donc toute variabilité de la consommation peut se traduire en une plus grande consommation de fuel (si la batterie est vide) ou un besoin de surdimensionnement de la batterie		Pris en compte	Les écarts entre la prévision et le cas réels sortent du cadre de l'étude. Néanmoins, même si les incertitudes météorologiques annuelles ne sont pas considérées, la modélisation d'une irradiation sur 365 jours au pas de temps horaire permet de prendre en compte les incertitudes météorologiques journalières. Cet élément a été ajouté dans les limites de la modélisation.
42	DB	4.3.3	596	Autre	Recommandation	" Les résultats montrent" : indiquer où? Quel tableau? Quelle figure?		Pris en compte	Modification dans le texte pour éviter la tournure "Les résultats montrent"
43	HG	4.3.3	597	M	Recommandation	Les consommations de carburant sont modélisées sur la base d'une prévision parfaite. Les incertitudes météo amènent à des production de fuel et consommations de combustible toujours un peu plus élevées du fait des écarts entre prévisions et consommation réelle. La batterie est peu sollicitée et donc capable d'absorber probablement tous les excédents solaires, mais pas nécessairement fournir toutes les variabilités de la consommation. Un besoin de surdimensionnement de la batterie ne semble pas nécessaire		Pris en compte	Les écarts entre la prévision et le cas réels sortent du cadre de l'étude. Néanmoins, même si les incertitudes météorologiques annuelles ne sont pas considérées, la modélisation d'une irradiation sur 365 jours au pas de temps horaire permet de prendre en compte les incertitudes météorologiques journalières. Cet élément a été ajouté dans les limites de la modélisation.
44	FJ	4.3.4	605	Autre	Editorial	Corriger "ces heures là"		Pris en compte	"ces heures, "
45	GA/FJ	4.3.4	611	DT	Recommandation	Préciser la surface nécessaire pour l'installation d'une ferme solaire de 470 kWc.		Pris en compte	Ajout d'une notion de surface (avec hypothèse supplémentaire sur la puissance unitaire d'un panneau PV)

**Rev. ID :**

DB : Delphine Bauchot  
GA : Guillaume Audard  
FJ : France Jonathan  
HG : Hubert Gentou

**Type de commentaire :**

AI : Analyse/interprétation  
DT : Données, technique  
M : Méthodologie



N°	Rev. ID	Chapitre du rapport/ Tableau/ Schéma	N° ligne du rapport	Type de com	Niveau d'importance du commentaire	Commentaire du reviewer	Suggestion éventuelle du reviewer	Type réponse du praticien	Réponse du praticien
46	HG	4.3.4	612	M	Recommandation	Les incertitudes météo amènent à un besoin de surstockage de la batterie pour répondre aux aléas de production PV et de demande/consommation. La batterie est peu sollicitée et donc capable d'absorber probablement les excédents solaires, mais pas nécessairement fournir toutes les variabilité de la consommation (surconsommation). Il se pourrait que les générateurs diesel soient appelés ponctuellement. Un besoin de surdimensionnement de la batterie n'est peut être pas nécessaire.		Pris en compte	Les écarts entre la prévision et le cas réels sortent du cadre de l'étude. Néanmoins, même si les incertitudes météorologiques annuelles ne sont pas considérées, la modélisation d'une irradiation sur 365 jours au pas de temps horaire permet de prendre en compte les incertitudes météorologiques journalières. Cet élément a été ajouté dans les limites de la modélisation.
47	FJ	4.3.5	620	Autre	Editorial	Il y a 2 GE dans ce scénario suivant le tableau du §4.3		Pris en compte	Correction
48	HG	4.3.5	637	M	Recommandation	Les incertitudes météo amènent à un besoin de surstockage de la batterie pour répondre aux aléas de production PV et de demande/consommation. La batterie est assez fortement sollicitée (256 cycles par an) et probablement capable d'absorber les excédents solaires, et les variabilité de la consommation assez souvent. Mais il fait mention du fait que tout le combustible diesel est utilisé dans le modèle de référence, ce qui veut dire qu'une faible flexibilité serait possible avec les générateurs diesel. Un besoin de surdimensionnement de la batterie semble nécessaire.		Pris en compte	Les écarts entre la prévision et le cas réels sortent du cadre de l'étude. Néanmoins, même si les incertitudes météorologiques annuelles ne sont pas considérées, la modélisation d'une irradiation sur 365 jours au pas de temps horaire permet de prendre en compte les incertitudes météorologiques journalières. Cet élément a été ajouté dans les limites de la modélisation.
49	DB	4.3.5	642	Autre	Editorial	attention répétition des références. Revoir tout le rapport.		Pris en compte	texte adapté
50	DB	4.3.6	647-651	M	Recommandation	Ce point 2 ne devrait-il pas être intégré au point 1 car ce n'est pas une limitation en tant que tel.		Pris en compte	Mis à jour
51	DB	4.3.6	653-655	M	Recommandation	Point 3 " Cette année ....par jour type": expliciter davantage, pas clair du tout.		Pris en compte	Texte adapté
52	DB	4.3.6	656-660	M	Recommandation	Point 4 : qu'est ce que la disponibilité photovoltaïque? Est-ce la même chose que la disponibilité solaire ou d'ensoleillement? pourquoi ces deux (voire trois) termes? Définit la notion de foisonnement.		Pris en compte	Ajout de définition pour le foisonnement + correction du terme utilisé
53	GA	4.3.6	661	DT	Recommandation	"Toutefois, cette approche reste cohérente avec l'objectif de généralisation de l'étude, en fournissant une vision globale et représentative pour des sites isolés en Guyane" > Je ne comprends pas cette remarque. Plusieurs sites isolés ne pourront pas profiter de foisonnement, vu qu'ils ne sont pas reliés entre eux. Les besoins de stockages sont donc effectivement potentiellement sous-estimés. En pratique, si vous aviez à dimensionner un tel système et que vous disposiez uniquement de ces données, est-ce que vous ne prendriez pas un coefficient de sécurité sur le dimensionnement des batteries (en particulier pour les SI 4 où le générateur ne peut pas couvrir les situations de faible ensoleillement sur plusieurs jours consécutifs) ?		Pris en compte	Mis à jour des limites de l'étude
54	FJ	5.1.1	668	Autre	Editorial	la référence de la page est erronée		Pris en compte	référence rétablie

**Rev. ID :**

DB : Delphine Bauchot  
GA : Guillaume Audard  
FJ : France Jonathan  
HG : Hubert Gentou

**Type de commentaire :**

AI : Analyse/interprétation  
DT : Données, technique  
M : Méthodologie



N°	Rev. ID	Chapitre du rapport/ Tableau/ Schéma	N° ligne du rapport	Type de com	Niveau d'importance du commentaire	Commentaire du reviewer	Suggestion éventuelle du reviewer	Type réponse du praticien	Réponse du praticien
55	GA	5.1.2	674	M	Important - Ecart	Le critère de coupure et son application ne sont pas explicitement présentés. Il s'agit d'une exigence de la norme ISO 14044		Pris en compte	Ajout du critère de coupure dans une nouvelle partie (5.1.3)
56	GA	5.1.2	688	M	Recommandation	Quid de la maintenance ? Pour les générateurs, il y a probablement de la lubrification et potentiellement du remplacement de pièces d'usure. Cela doit faire partie des frontières du système, même si la contribution est probablement anecdotique.		Pris en compte	Adaptation de la description dans la partie 5.1.2
57	GA	5.1.3	692	Autre	Editorial		Faire référence à International EPD System, qui est l'opérateur de programme qui édite ce PCR.	Pris en compte	Référence ajoutée
58	GA	5.1.3	699	DT	Recommandation	Je ne comprends pas quels sont les éléments du système dont la fin de vie a été modélisé avec des données ecoinvent sans ajout de transport. Vous indiquez "(groupes électrogènes)" dans le groupe i, mais ils sont également cités dans le groupe ii.	Clarifier la modélisation de la fin de vie.	Pris en compte	Modifié, les mentions des fins de vie ont été déplacées dans la partie inventaires, où la fin de vie de chaque composant a été détaillée (5.3)
59	HG	5.2.1.2	752	M	Recommandation	La densité des cellules disponibles sur le marché est plutôt de 150-160 Wh/kg actuellement (CATL par exemple)		Pris en compte	Ref à l'explication ajoutée (voir 5.3.3 et Annexe 7.5 -> La batterie de 130Wh/kg correspond à des cellules de 160Wh/kg (après avoir défalqué les enveloppes des modules, des accessoires de maintien, le BMS, etc).
60	DB	5.2.2	757	M	Recommandation	"Elles sont donc traitées dans le modèle ACV comme telles ". C'est une hypothèse forte comme celle de non evolution de la demande sur 15 ans. Rappeler ces éléments dans les conclusions et limitations.		Non pris en compte	Ces limites sont déjà rappelées en ligne 1647/48 dans le rapport v2 soumis
61	DB	5.2.2	772	M	Important - Ecart	"Les ICV de ces ACV respectant la norme 14040 ont été récupérés. " Il faut clarifier ce point car ne fait pas partie de la revue. Clarifier le processus de collecte, le processus de revue et fournir les preuves.		Pris en compte	Les données utilisées pour réaliser l'ICV du PV sont issues d'ACV certifiées par l'organisme Certisolis pour répondre aux appels d'offre de la commission de régulation de l'énergie. Afin d'être certifiés, ces ACV doivent dans un premier temps faire l'objet d'une revue critique et le rapport de revue critique doit stipuler le respect de la norme 14040, dans un deuxième temps, l'ADEME doit donner sa validation pour obtenir le certificat. Ces donc par ce biais que l'ADEME dispose des données respectant la norme 14040 et qu'elle a mis au service de cette ACV.
62	FJ	5.3	775	M	Important - Ecart	Aucun détail n'est donné sur la fin de vie et notamment aucun bilan massique permettant la vérification entre les entrants et sortants		Pris en compte	Les éléments désirés ont été précisés dans les tableaux 6, 8 et semblables des § 5.3.2, 5.3.3, etc.
63	FJ	5.3	775	M	Recommandation	La fin de vie du packaging ne semble pas être prise en compte (inclure ou lister dans les exclusions)		Pris en compte	Intégré en règle de coupure 5.1.3
64	DB	5.3.1	777-780	M	Recommandation	Ca reste flou . Clarifier ce qui a été modélisé.		Non pris en compte	l'ICV du GE est "natif" d'ecoinvent 3.10, mentionné "Diesel-electric generating set, 18.5kW {GLO}".
65	FJ		781	AI	Editorial	Il n'est pas expliqué pourquoi la régression linéaire n'a pas été retenue pour la modélisation du GE	Préciser que la démarche est conservatrice	Pris en compte	Mention ajoutée sur la démarche conservatrice

**Rev. ID :**

DB : Delphine Bauchot  
GA : Guillaume Audard  
FJ : France Jonathan  
HG : Hubert Gentou

**Type de commentaire :**

AI : Analyse/interprétation  
DT : Données, technique  
M : Méthodologie



N°	Rev. ID	Chapitre du rapport/ Tableau/ Schéma	N° ligne du rapport	Type de com	Niveau d'importance du commentaire	Commentaire du reviewer	Suggestion éventuelle du reviewer	Type réponse du praticien	Réponse du praticien
66	FJ	5.3.1		M	Important - Ecart	L'ICV des GE n'est pas communiquée au rapport		Non pris en compte	L'ICV du GE est "natif" d'ecoinvent 3.10 et il est mentionné "Diesel-electric generating set, 18.5kW (GLO)", nous n'avons pas le droit de le communiquer d'après la licence ecoinvent
67	DB	5.3.1	786-787	M	Recommandation	" 1 GE servant à temps plein". Pas clair. Est-ce un GE fonctionnant à temps plein et un GE ne fonctionnant pas du tout?		Pris en compte	Texte simplifié. (Dans le modèle opérationnel, il nous a été expliqué que les 2 GE fonctionnent alternativement (peut-être 1j/2, ou une sem/2, l'un puis l'autre), afin de "vieillir" à la même vitesse et répartir l'usure.)
68	DB	5.3.1	791	M	Recommandation	"Il faut mentionner qu'il inclut le traitement en fin de vie du groupe électrogène". Il manque la précision du parcours (voir présentation des 3 routes de gestion i, ii, iii présentés précédemment.		Pris en compte	Modifié, les mentions des fins de vie ont été déplacé dans la partie inventaires, où la fin de vie de chaque composant a été détaillé.(5.3) Une précision sur le procédé ecoinvent de fin de vie du GE est mentionnée dans la partie 5.3.1
69	GA	5.3.2	792	DT	Recommandation	La donnée ecoinvent prend pour hypothèse un changement d'affectation des sols depuis « pasture, man made » vers « industrial area ». Est-ce que cette hypothèse est représentative de la situation à Kaw ? La centrale solaire est-elle installée sur une zone déjà déforestée, ou donne-t-elle lieu à de la déforestation ?	Etant donné la volonté d'avoir des conclusions généralisables à d'autres sites isolés, il serait intéressant de vérifier si cette hypothèse a de l'influence ou non sur les résultats sur les indicateurs changement climatique et occupation des sols, en fonction des différentes situations qui peuvent se présenter. Ce point est abordé dans l'interprétation des résultats, sous l'angle de la biodiversité locale, mais pourrait être traité plus en détail à cette étape d'inventaire.	Pris en compte	Mention ajoutée vers la fin de § 5.3.2, en page 29 au moment où la modification est faite (mais les numéros de page vont sans doute encore évoluer)
70	FJ	5.3.2	805	Autre	Editorial	supprimer "des données"		Pris en compte	Texte adapté
71	FJ	5.3.2	838	Autre	Editorial	"Error ! Reference source not found"		Pris en compte	Texte adapté
72	FJ	5.3.2		M	Important - Ecart	Les ICV des phases d'installation, de Use et de fin de vie ne sont pas présentés pour le système PV		Pris en compte	Les ICV de l'installation du PV est détaillé en annexe 7.5 Les fins de vie des PVs sont détaillées dans le § 5.3.2
73	DB	5.3.2	839	M	Recommandation	Est-on vraiment sur un critère de poids et non de volume pour le transport des panneaux? Quelle est la réalité du marché? A préciser.		Non pris en compte	Les transports restent une part négligeable du total, nous n'avons pas cherché à peaufiner ce point
74	HG	5.3.3	856	DT	Recommandation	Les équipements rack et modules sont en acier plutôt qu'en aluminium.		Pris en compte	En l'absence de données de nomenclature de batterie stationnaire (pas d'info précises dans le COTECH), nous avons réalloué la moitié de l'Al du casing vers de l'acier inox

**Rev. ID :**

DB : Delphine Bauchot  
GA : Guillaume Audard  
FJ : France Jonathan  
HG : Hubert Gentou

**Type de commentaire :**

AI : Analyse/interprétation  
DT : Données, technique  
M : Méthodologie



N°	Rev. ID	Chapitre du rapport/ Tableau/ Schéma	N° ligne du rapport	Type de com	Niveau d'importance du commentaire	Commentaire du reviewer	Suggestion éventuelle du reviewer	Type réponse du praticien	Réponse du praticien
75	HG	5.3.3	860	DT	Recommandation	Container 20ft pour batterie : il existe des solutions alternatives avec des PODs (armoires de quelques modules) plus petites que des containers. Le refroidissement par eau est pertinent dans ces cas aussi (exemple phorto de droite)		Non pris en compte	La solution choisie est très courante industriellement, et maximise les impacts. Une précision a été ajoutée en §5.3.3
76	HG	5,3,5	885, 889 et 882	DT	Recommandation	Il est mentionné sur Wikipedia que le village de Kaw est uniquement accessible par les marais, en petites embarcations (canot, pirogue...). ( <a href="https://fr.wikipedia.org/wiki/Kaw_(Guyane)">https://fr.wikipedia.org/wiki/Kaw_(Guyane)</a> ). Un transport par route est-il réalisable?		Pris en compte	Mention ajoutée dans les objectifs 3.2.1 et rappelée aux tableaux d'inventaire
77	DB	5.3.5	886	DT	Recommandation	Expliciter le choix de stockholm. Ou sont fabriqués les panneaux?		Pris en compte	GE: Mention ajoutée § 5.3.1 PV: "Mention assemblage des panneaux en Chine" ajoutée § 5.3.2
78	DB	5.3.5	886	DT	Editorial	Pourquoi certaines distances maritimes sont en km et d'autres en nm? Revoir et homogénéiser. Attention Bordeaux avec un x. A revoir partout.		Pris en compte	Texte adapté
79	DB	5.3.5	890	DT	Recommandation	Rappelez pourquoi seul le SP3 a sa capacité en entrée et les autres en sortie du modèle d'Artelys. Idem tableau suivant ligne 790		Pris en compte	Mention ajoutée au §4.3.3 avec rappel au § 5.3.3 "par analogie aux paramètres du système actuellement en service à Kaw (avec une batterie Acide-Plomb au lieu d'une batterie LFP)."
80	DB	5.3.5	893	DT	Recommandation	Il manque l'origine des valeurs en gris.		Pris en compte	La justification de l'origine de l'hypothèse a été ajoutée dans le texte (5.3)
81	HG	5,3,6	904	DT	Recommandation	Container 20ft pour batterie : il existe des solutions alternatives avec des PODs (armoires de quelques modules) plus petites que des containers. Le refroidissement par eau est pertinent dans ces cas aussi (exemple phorto de droite)		Non pris en compte	La solution choisie est très courante industriellement, et maximise les impacts. Une précision a été ajoutée (5.3.3)
82	DB	5.3.6	909-910	M	Recommandation	"au transport .... Considérations". N'est-ce pas justement la particularité des sites isolés .....? Comment est-ce donc représentatif? Comment delors c'est extrapolable à l'ensemble des sites isolés de Guyane?		Pris en compte	Mention ajoutée dans les objectifs 3.2.1 et rappelée aux tableaux d'inventaire. (un GE de 80kVA pesant environ 1,5t, il doit bien rester 1t même en le déshabillant de tous ses accessoires, ce qui est équivalent à un conteneur de 20ft. Et : ils ont bien été réellement transportés et mis en place au milieu des marais)
83	DB	5.3.6	911-913	M	Important - Ecart	Pourquoi ne pas avoir donc revue cette donnée à la hausse, si une personne de terrain conteste l'estimation? Comment traiter vous le sujet? (revoir et faire faire une ASI!).		Pris en compte	Texte adapté.
84	DB	5.3.6	916	M	Recommandation	"potentiellement inexact". A clarifier car incompréhensible. Préciser l'impact environnemental.		Pris en compte	Texte adapté.
85	DB	5.4.1	922-tableau 6	DT	Editorial	Tableau difficile à lire. Revoir la présentation. Mettre des lignes de séparation.		Pris en compte	Texte adapté.
86	DB	5.4.1	924-tableau 7	DT	Editorial	"4 chiffres significatifs". Que signifie ce commentaire? Il n'est pas cohérent avec le tableau.		Pris en compte	Mention retirée. (Pour une définition des chiffres significatifs, voir <a href="https://fr.wikipedia.org/wiki/Chiffre_significatif">https://fr.wikipedia.org/wiki/Chiffre_significatif</a> .)

**Rev. ID :**

DB : Delphine Bauchot  
GA : Guillaume Audard  
FJ : France Jonathan  
HG : Hubert Gentou

**Type de commentaire :**

AI : Analyse/interprétation  
DT : Données, technique  
M : Méthodologie



N°	Rev. ID	Chapitre du rapport/ Tableau/ Schéma	N° ligne du rapport	Type de com	Niveau d'importance du commentaire	Commentaire du reviewer	Suggestion éventuelle du reviewer	Type réponse du praticien	Réponse du praticien
87	DB	5.4.1	930	M	Important - Ecart	Pas sure que ces seuils soient pertinent dans le cas de cette étude. Ils sont à destination de non ACVistes. Voir commentaire spécifique dans les interprétations.	Decrire votre approche en mentionnant que vous vous appuyer sur ces seuils en premier lieu mais que vous conduisez des analyses complémentaires lors que ces seuils ne sont pas atteints. Voir par exemple cette approche dans l'étude ADEME Vrac.	Pris en compte	La mention des seuils a été supprimée des commentaires de l'étude afin d'éviter d'embrouiller la lecture entre les seuils et l'analyse d'incertitude
88	FJ/HG	574.1	931	Autre	Editorial	"Error ! Reference source not found" + "un l'examen"		Pris en compte	Corrigé
89	DB	5.4.2	942 - tableau 8	AI	Recommandation	expliquer le code couleur. Expliquer aussi le commentaire "3 chiffres significatifs" qui n'est pas cohérent avec le tableau		Pris en compte	Code couleur expliqué. (Pour une définition des chiffres significatifs, voir <a href="https://fr.wikipedia.org/wiki/Chiffre_significatif">https://fr.wikipedia.org/wiki/Chiffre_significatif</a> .)
90	DB	5.4.3	949	M	Recommandation	"ponderation" rajouter normalisation avant ponderation.		Pris en compte	Texte adapté et précisé
91	DB	5.4.3	955-957	AI	Editorial	Le tableau n'est pas simple à lire. Il aurait été plus lisible de faire un tableau avec les résultats normalisés et pondérés comme le précédent et de mettre en couleur les principaux qui couvrent 80%. A revoir.		Pris en compte	Tableau adapté
92	DB	5.4.3	962-963	AI	Recommandation	"Enfin, les systèmes SI 4 et SI 5 ont en commun les indicateurs toxicité humaine cancer et effets des particules fines ." Si vous avez déjà une explication vous pouvez la mentionner ici.		Pris en compte	Explication ajoutée pour les particules fines (l'indicateur toxicité humaine n'étant plus prioritaire dans l'étude)
93	DB	5.4.4	859	AI	Recommandation	20% me semble particulièrement élevé pour un indicateur de niveau I.		Pris en compte	La mention des seuils a été supprimée des commentaires de l'étude afin d'éviter d'embrouiller la lecture entre les seuils et l'analyse d'incertitude
94	GA	5.4.4.3	1028	DT	Important - Ecart	Dans Empreinte Projet, l'écart de 20% est préconisé pour l'épuisement des ressources fossiles. Pour les ressources minérales et métalliques, il n'y a pas d'exception, et c'est 100% d'écart.  Ces seuils dans Empreinte Projet sont des seuils par défaut pour le niveau 3, qui correspond à une ACV screening sans analyse poussée des résultats. Ils ont vocation à éviter que des praticiens non experts ACV fassent des conclusions actives en comparant des résultats obtenus avec des données génériques d'inventaires potentiellement hétéroclites. Ils n'ont pas du tout vocation à être utilisés comme une règle absolue, sans recul sur la modélisation.  [Note : le guide Empreinte Projet a été rédigé par Solinnen et Bleu-Safran]	Vous disposez ici d'une modélisation SimaPro, et vous pouvez donc faire une analyse des flux élémentaires contributeurs pour vérifier si les écarts sont significatifs ou non. Par exemple, ici, il serait pertinent de détailler un peu plus quels sont les flux qui contribuent au impacts de la consommation de diesel pour l'épuisement des ressources minérales et métalliques.	Pris en compte	La mention des seuils a été supprimée des commentaires de l'étude afin d'éviter d'embrouiller la lecture entre les seuils et l'analyse d'incertitude
95	DB	5.4.4.3	1044	DT	Important - Ecart	Il me semble que la maintenance d'un GE de secours nécessite une certaine maintenance dont on ne parle pas ici. Clarifier et évaluer l'impact.		Pris en compte	Cette maintenance est du même ordre de grandeur que le fonctionnement à vide régulier pour vérification, 1h / mois soit 60L par an négligés, comme mentionné au § 5.1.3

**Rev. ID :**

DB : Delphine Bauchot  
GA : Guillaume Audard  
FJ : France Jonathan  
HG : Hubert Gentou

**Type de commentaire :**

AI : Analyse/interprétation  
DT : Données, technique  
M : Méthodologie



N°	Rev. ID	Chapitre du rapport/ Tableau/ Schéma	N° ligne du rapport	Type de com	Niveau d'importance du commentaire	Commentaire du reviewer	Suggestion éventuelle du reviewer	Type réponse du praticien	Réponse du praticien
96	DB	5.4.4.5	1105	AI	Recommandation	32et non 33 (mauvais arrondi)		Pris en compte	Texte adapté
97	DB	5.4.4.5	1115	AI	Recommandation	Vous utilisez les termes "correlés", "etroitement lié", "directement proportionnels" dans vos analyses mais y-t'il un sens à ces différents termes (comme une hiérarchie). Si ce n'est pas le cas alors utilisez plutôt le même terme. Dans le cas spécifique de cet indicateur le terme "directement proportionnel" me semble faux.		Pris en compte	Texte adapté
98	GA	5.4.4.6	1123	AI	Editorial	Figure 22 manquante		Pris en compte	Ajoutée
99	DB	5.4.4.7	1163	AI	Important - Ecart	Si on est en deça des seuils (voir commentaires sur les seuils), il faut donc une analyse plus spécifique, notamment sur les flux.		Pris en compte	Les seuils ont été enlevé de l'étude (cf commentaire 94). Une phrase générale a été ajouté au début de la partie 5.5.4.
100	DB	5.4.4.8	1199	AI	Recommandation	Une conclusion est possible sur les scenarios utilisant du diesel (analyse au niveau des flux) mais pas avec le scenario sans diesel.		Non pris en compte	Suite à des modifications dans la modélisation et une mise à jour des erreurs de ecoinvent 3.10, l'indicateur toxicité humaine cancer n'est plus prioritaire dans l'étude, ainsi cette conclusion n'est plus existante dans le rapport.
101	DB	5.4.4.7	1216-1218	AI	Important - Ecart	conclusion erronée, les écarts sont pas suffisamment important. Voir si une analyse plus spécifique au niveau flux peut mettre en évidence une tendance voire une conclusion. Mais la conclusion actuelle est non recevable avec la justification actuelle.		Non pris en compte	Suite à des modifications dans la modélisation et une mise à jour des erreurs de ecoinvent 3.10, l'indicateur toxicité humaine cancer n'est plus prioritaire dans l'étude, ainsi cette conclusion n'est plus existante dans le rapport.
102	HG	5,4,5	1303	Autre	Editorial	"Error ! Reference source not found"		Pris en compte	Référence rétablie
103	DB/GA	5.4.5.1	1307	AI	Important - Ecart	La figure 27 est peu lisible. Le fait d'afficher les seuils définis par Empreinte Projet pour une évaluation de type ACV screening donne une trop grande importance à ces seuils. De plus, ils peuvent se confondre avec des barres d'incertitude, ce qu'ils ne sont pas (comme vous le soulignez dans le paragraphe au-dessus).	Je vous recommande fortement de ne pas afficher ces seuils sur la figure, et de revoir la manière dont vous les utilisez dans l'interprétation comparative que vous faites des résultats. Dans la mesure où c'est le même flux élémentaire qui contribue pour les systèmes SI 1 et SI 2, et qu'on sait que la valeur de ce flux est effectivement plus faible pour SI 2, on peut conclure que SI 2 a un impact plus faible même si l'écart entre les deux est plus faible que le minimal.	Pris en compte	Figure refaite et référence aux seuils Empreinte Projet supprimée
104	DB	5.4.5	1315	AI	Important - Ecart	"directement proportionnels". Ce n'est pas le cas. Soyez précis.		Pris en compte	Texte adapté

**Rev. ID :**

DB : Delphine Bauchot  
GA : Guillaume Audard  
FJ : France Jonathan  
HG : Hubert Gentou

**Type de commentaire :**

AI : Analyse/interprétation  
DT : Données, technique  
M : Méthodologie



N°	Rev. ID	Chapitre du rapport/ Tableau/ Schéma	N° ligne du rapport	Type de com	Niveau d'importance du commentaire	Commentaire du reviewer	Suggestion éventuelle du reviewer	Type réponse du praticien	Réponse du praticien
105	GA	5.4.5.2	1385	M	Important - Ecart	Les normes ISO 14040/44 découragent l'utilisation d'un score unique parce que l'étape de pondération repose sur des choix de valeur afin de prioriser les catégories d'impacts les unes par rapport aux autres, ce qui est foncièrement subjectif. La comparaison des systèmes avec des choix de valeur différent pourrait donner des conclusions différentes.  Notre interprétation est qu'il est tout à fait valide d'appliquer un score unique, dans la mesure où le rapport présente les résultats par indicateur, et que le caractère subjectif de la pondération est présenté de manière transparente.	Etant donné que le rapport s'adresse à un public qui n'est pas expert de l'ACV, il serait pertinent de rappeler que l'étape de pondération implique des choix de valeurs, et que l'utilisation d'une pondération différente pourrait entraîner des conclusions différentes.	Pris en compte	Texte adapté
106	GA	5.4.5.2	1391	M	Recommandation	Vous appliquez des écarts minimaux très stricts pour l'analyse indicateur par indicateur, mais le sujet des écarts nécessaires sur le score unique pour pouvoir départager deux solutions n'est absolument pas abordé.		Pris en compte	§ 5.6.4.4 ajouté
107	FJ	5.5.4		M	Important - Ecart	Les analyses d'incertitudes ne semblent pas prendre en comptes l'utilisation de proxy dans les ICV retenus		Pris en compte	Mention ajoutée en 5.6.4.1, point 4
108	HG	5,5,1	1414	DT	Recommandation	La densité des cellules disponibles sur le marché est plutôt de 150-160 Wh/kg actuellement (CATL par exemple)	Préciser que l'hypothèse est conservatrice	Pris en compte	Texte adapté (voir aussi commentaire 59)
109	HG	5,5,1	1420	DT	Recommandation	Durée de vie de la batterie plutôt de l'ordre de 20 ans et plutôt 8000 cycles à 70%, d'autant plus que les batteries sont de type >5h, avec des C-rate faibles (intensités faibles)	Préciser que l'hypothèse est conservatrice	Pris en compte	Texte adapté
110	HG	5,5,1	1426	DT	Recommandation	idem point ci-dessus	Préciser que l'hypothèse est conservatrice	Pris en compte	Texte adapté
111	HG	5,5,2,3	1450	DT	Recommandation	La densité des cellules disponibles sur le marché est plutôt de 150-160 Wh/kg actuellement (CATL par exemple). Le cas de référence devrait être plutôt de 150 Wh/kg avec un scénario haut de 170 Wh/kg		Pris en compte	Texte adapté (voir aussi commentaire 59)
112	GA	5.5.4.2	1539	AI	Recommandation	La principale source d'incertitude des résultats vient du profil de production PV. A demande donnée, et système dimensionné, les impacts correspondant à l'unité fonctionnelle, et la contribution des différents éléments du système, sont susceptibles d'être modifiés significativement si l'ensoleillement est modifié. C'est à mon sens la principale limite qui devrait être mentionnée ici.	Vous pouvez discuter ce point de manière qualitative : par exemple, remarquer que cela ne va affecter que les systèmes S13 et S15, mais pas les 3 autres.	Pris en compte	Texte adapté (voir § 5.6.4.2)

**Rev. ID :**

DB : Delphine Bauchot  
GA : Guillaume Audard  
FJ : France Jonathan  
HG : Hubert Gentou

**Type de commentaire :**

AI : Analyse/interprétation  
DT : Données, technique  
M : Méthodologie



N°	Rev. ID	Chapitre du rapport/ Tableau/ Schéma	N° ligne du rapport	Type de com	Niveau d'importance du commentaire	Commentaire du reviewer	Suggestion éventuelle du reviewer	Type réponse du praticien	Réponse du praticien
113	GA	5.5.4.3	1577	AI	Recommandation	L'analyse d'incertitude que vous réalisez apporte très peu d'information supplémentaire. Elle a même tendance à brouiller le message. Les incertitudes de SI1 et SI2 se chevauchent en effet, mais il est très probable que les deux valeurs soient corrélés et évoluent ensemble.	Il faudrait calculer la distribution de probabilité du ratio SI 1 / SI 2. Cela permettrait très certainement de voir que ce ratio est positif dans la très grande majorité des simulations, et donc qu'on peut conclure y compris sur cette analyse d'incertitude.	Pris en compte	Toutes distributions de probabilité comparées SI1/SI2, SI2/SI3, SI3/SI4 et SI4/SI5 calculées et incluses
114	GA	6	1612	AI	Recommandation	On ne pourrait pas conclure si ces écarts de moins de 20% étaient liés à des flux très différents l'un de l'autre (ex : flux de CH4 pour un système, contre un flux de N2O pour un autre système). Or, en analysant votre modèle, vous êtes capables de dire que cet écart de 20% vient principalement du même flux de CO2 lié à la consommation de diesel consommé par le générateur. Ce flux est effectivement plus faible pour le système SI 2 que pour le système SI 1, donc cette limite arbitraire à 20% n'a pas lieu d'être dans ce type de cas !	Revoir la conclusion pour mieux intégrer les analyses comparatives qui sont faites dans les parties 5.4 et 5.5	Pris en compte	Le calcul d'incertitude corrélée permet de conclure
115	FJ	7.4		AI	Recommandation	Il est recommandé de compléter les ICV (construit pour cette étude) d'une vérification de cohérence sur des impacts connus pour le PV: i.e. les valeurs par défaut Chine publiée par la CRE pour l'impact GES des principales étapes de fabrication et a minima pour l'ingot et le SoG-Si		Pris en compte	Voir annexe 7.5
116	HG	7.1	1653	M	Recommandation	Les incertitudes de production renouvelable et de demande amènent à un besoin de surstockage de la batterie pour répondre aux aléas de production PV et de demande/consommation ou un léger excédent de consommation de combustible pour un générateur. Les écart entre prévisioon en J-1 et production réelle en jour J par pas de temps de 30 minutes est typiquement de +/- 30% en moyenne. Les incertitudes /variabilités concernant la consommation sont probablement plus faibles, mais des données horaires sur une période de quelques semaine permettent d'avoir un ordre de grandeur de la variabilité. Un besoin de surdimensionnement de la batterie est peut être nécessaire dans certaines configurations.		Pris en compte	Des éléments sur cette limite ont été ajoutés dans la partie "Limitations de la modélisation"
117	FJ	7.4	1693	Autre	Editorial	Le cadre aluminium apparait deux fois	vérifier le modele ou le copier/coller	Pris en compte	Erreur de copier/coller, corrigé
118	FJ	7.4	1694	Autre	Editorial	le titre du tableau devrait être "cells" et non PV	vérifier le modele ou le copier/coller	Pris en compte	Corrigé
119	FJ	7.4		M	Important - Ecart	Les unités de références des modèle d'ICV ne sont pas précisées		Non pris en compte	L'unité de référence est indiquée dans la partie "Output" de chacun des ICV

**Rev. ID :**

DB : Delphine Bauchot  
GA : Guillaume Audard  
FJ : France Jonathan  
HG : Hubert Gentou

**Type de commentaire :**

AI : Analyse/interprétation  
DT : Données, technique  
M : Méthodologie



N°	Rev. ID	Chapitre du rapport/ Tableau/ Schéma	N° ligne du rapport	Type de com	Niveau d'importance du commentaire	Commentaire du reviewer	Suggestion éventuelle du reviewer	Type réponse du praticien	Réponse du praticien
120	FJ/HG	7.5	1 715	Autre	Editorial	"Error ! Reference source not found"		Pris en compte	Référence rétablie
121	FJ/HG	7.6	1 748	Autre	Editorial	"Error ! Reference source not found"		Pris en compte	Référence rétablie

Tableau 29 – Grille des commentaires de la revue critique sur le rapport

### Commentaires du modèle

N°	Rev. ID	Chapitre du rapport/ Tableau/ Schéma	N° ligne du rapport	Type de com	Niveau d'importance du commentaire	Commentaire du reviewer	Suggestion éventuelle du reviewer	Type réponse du praticien	Réponse du praticien
1	DB/GA	modele	Diesel	DT	Important - Ecart	L'ICV diesel d'ecoinvent comporte un flux generateur qui n'a pas été retiré dans votre modelisation (le générateur étant modelisé par ailleurs). A retirer. Ce flux risque de jouer sur les résultats. Refaire les calculs et ajuster les analyses en fonction.		Pris en compte	Adaptation de l'ICV ecoinvent fait pour corriger cette double prise en compte, merci.
2	FJ	ILCD procede projet PV	Mod G21	DT	Recommandation	Pour le PV, L'ICV pris pour l'électricité dans l'ensemble de la supply est un mix electric local chinois. Au regard de l'implantation des différentes usines il est recommandé d'utiliser le Mix pays. Il s'agit du mix demandé par la CRE dans sa méthodologie d'évaluation carbone, ce qui facilitera pour les utilisateurs finaux la comparaison de l'ACV		Non pris en compte	Nous avons pris le mix identifié par le rapport IAE "Special Report on Solar PV Global Supply Chains" de 2022 page 38 "Global electricity supply by source and for solar PV manufacturing" comme représentatif de l'industrie photovoltaïque chinoise: prendre le mix moyen chinois serait moins précis
3	FJ	ILCD procede projet PV	Mod G21	DT	Recommandation	Pour le PV, l'ICV pris pour les palettes pour l'ensemble de la supply est une palette europe avec un EF Changement climatique d'environ 300gCO2e/kg. Les palettes utilisées dans l'industrie tout au long du procédé sont des palettes en plywood avec un EF Changement climatique de 1450gCO2e/kg		Non pris en compte	L'ambition n'est pas de poser une référence pour l'ICV d'un système photovoltaïque, ce point détaillé n'a pas été creusé spécifiquement. En revanche, la cohérence avec ecoinvent 3.10 a été vérifiée (voir Annexe 7.5)
4	FJ	ILCD procede projet PV	Mod G21	DT	Recommandation	Pour les étapes de fabrication des wafers et des brick, le diamant utilisé a été modélisé comme du graphite (pour le wafer) ou du silicon carbide (pour la brick). Il s'agit de diamant artificiel qui nécessite une forte consommation énergétique à sa fabrication. Le graphite a un impact de 68gCO2e/kg. Le diamant 859000 gCO2e/kg (voir model communiqué)	Voir mail pour plus de détail sur les models à utiliser	Pris en compte	840kWh d'électricité par kg de graphite sont bien présents dans le modèle en plus du graphite, respectant la recommandation de France J. de sept 2024 (répétée dans son mail du 20/1/2025). Le modèle de Wire Diamond communiqué par France J. dans son mail du 20/1/2025 montre 0,38% de Diamond en masse, et un total de 2g de wire diamond par m2 de wafer => on parle ici de milligramme de diamant industriel par m2 de Wafer. A 840W/g d'électricité pour le diamant industriel, l'impact graphite/diamant est finalement de l'ordre du W/m2 de wafer. L'ambition n'est pas de poser une référence pour l'ICV d'un système photovoltaïque, ce point détaillé n'a pas été creusé spécifiquement. En revanche, la cohérence avec ecoinvent 3.10 a été vérifiée (voir Annexe 7.5).

#### Rev. ID :

DB : Delphine Bauchot  
GA : Guillaume Audard  
FJ : France Jonathan  
HG : Hubert Gentou

#### Type de commentaire :

AI : Analyse/interprétation  
DT : Données, technique  
M : Méthodologie



N°	Rev. ID	Chapitre du rapport/ Tableau/ Schéma	N° ligne du rapport	Type de com	Niveau d'importance du commentaire	Commentaire du reviewer	Suggestion éventuelle du reviewer	Type réponse du praticien	Réponse du praticien
5	FJ	ILCD procede projet PV	Mod G21	DT	Recommandation	Le processus de fabrication des ingots utilise une eau purifiée. La waste water par contre est en générale réutilisée dans un autre procédé (il s'agit d'eau de refroidissement propre et chaude)		Pris en compte	Ajout de processus "Water, ultrapure {RoW}   water production, ultrapure   Cut-off, U" dans Ingot
6	FJ	ILCD procede projet PV	Mod G21	DT	Recommandation	Il n'y a pas de silicone dans le processus de fabrication des cellules. Il s'agit de germes de critaux de silice Solar grade		Pris en compte	Je confirme, pas de silicone dans les cellules, mais du silane, voir ci-dessous
7	FJ	ILCD procede projet PV	Mod G21	DT	Important - Ecart	Il n'y a pas de silicone dans le processus de fabrication des cellules. Il s'agit de Silane, l'un des plus importants impacts	Pour rappel, la valorisation Ecoinvent est erronée, il est recommandé d'utiliser celle de IIAE	Pris en compte	SiH4 corrigé, "Silicon tetrahydride {GLO}   silicon tetrahydride production, silicon hydrochlorination   Cut-off, U"
8	FJ	ILCD procede projet PV	Mod G21	DT	Important - Ecart	La gestion de la fin de vie est insuffisamment détaillée pour être vérifier. Aucune mention n'est faite du verre, l'ensemble des plastiques semble être recyclés hors les plastiques entrant dans l'assemblage des panneaux sont laminés ensemble et peu recyclage (en général valorisation énergétique)		Pris en compte	Modifié, les mentions des fins de vie ont été déplacé et détaillé dans la partie inventaires, où la fin de vie de chaque composant a été détaillé.(5.3) Une précision sur le procédé ecoinvent de fin de vie du GE est mentionnée dans la partie 5.3.1
9	FJ	ILCD procede projet PV	Mod G21	DT	Recommandation	Dans le procédé d'assemblage des panneaux le pottant et le sealant dans le benchmark sont des colles silicones. L'attribution a l'usage de pottant et de sealant est souvent mal fait en usine	Il est recommandé de regrouper les deux usages en 1 seul et de les valoriser en silicone product	Pris en compte	Fait, comme : Silicone product {RoW}   market for silicone product   Cut-off, U
10	FJ	ILCD procede projet PV	Mod G21	DT	Recommandation	Dans le procédé d'assemblage des panneaux la backsheet est très majoritairement du PET. Il peut marginalement avoir du PVF mais pas toujours et généralement en très fine couche	Il est recommandé de valoriser la Backsheet en PET	Pris en compte	Fait, comme : Polyethylene terephthalate, granulate, amorphous {GLO}   market for polyethylene terephthalate, granulate, amorphous   Cut-off, U + Extrusion of plastic sheets and thermoforming, inline {GLO}   market for extrusion of plastic sheets and thermoforming, inline   Cut-off, U
11	FJ	ILCD procede projet PV	Ecoinvent	DT	Recommandation	Les models ecoinvent pour au dela de la cellule ne sont pas dans le fichier		Non pris en compte	Tous les niveaux sont dans le rapport "Rapport_Site_isole_v2_num.pdf", Module, PERC cell, Wafer, Brick, Ingot, Polycrystal Si, Recycled Si
12	FJ	ILCD procede projet PV	Mod G21	DT	Important - Ecart	Le procedé de purification de la silice étant le plus impactant et le benchmark ADEME étant limité et la modélisation G21 comprenant beaucoup de proxy, il est recommandé de procéder une comparaison plus détaillée des différents ICV avec le model Simapro pour conforter l'utilisation du modèle G21		Pris en compte	Fait, voir Annexe 7.5
13	FJ	fichier des résultats				Le modele Global a un impact carbone de 1690 kgCO2/kWc. L'ordre de grandeur est cohérent avec les valeurs simapro et conservateur. Il reste très élevé par rapport a ce qui est constaté industriellement,		Pris en compte	
14	FJ	ILCD procede projet PV	Mod G21	DT	Recommandation	Dans le procédé d'ingot, les germes ont été modélisé comme de la silicone. Il s'agit de Silice SoG (impact faible - mais incohérence technologique du facteur d'emission)		Non pris en compte	Quantité négligeable
15	FJ	Benchmark	Ingot		Important - Ecart	L'argon recyclé est recyclé dans l'usine. La consommation électrique du système est incluse dans la consommation de l'usine. Le benchmark ADEME est cohérent lorsque l'on considère la quantité total d'argon mais L'Argon recyclé ne doit pas être valorisé		Pris en compte	Argon recyclé retiré de l'inventaire

**Rev. ID :**

DB : Delphine Bauchot  
GA : Guillaume Audard  
FJ : France Jonathan  
HG : Hubert Gentou

**Type de commentaire :**

AI : Analyse/interprétation  
DT : Données, technique  
M : Méthodologie



N°	Rev. ID	Chapitre du rapport/ Tableau/ Schéma	N° ligne du rapport	Type de com	Niveau d'importance du commentaire	Commentaire du reviewer	Suggestion éventuelle du reviewer	Type réponse du praticien	Réponse du praticien
16	FJ	Benchmark	Wafer		Recommandation	La résine epoxy et l'ABS peuvent être utilisés pour la plastic plate et parfois comme colle. J'ai modifié le tableau pour attribuer les benchmarks de façon plus cohérente à ces deux usages. Ma recommandation en terme d'ICV est de modéliser la plate en Epoxy qui est la pratique la plus courante		Pris en compte	Plate modifiée en "Epoxy resin, liquid (RoW)   market for epoxy resin, liquid   Cut-off, U"
17	FJ	Benchmark	Wafer		Recommandation	La Wheel est le support du diamond wire. En général en résine type epoxy		Non pris en compte	La Wheel a été négligée, (ca. 1g par m2 de Wafer)
18	HG	_modelisation site isole_données entrées	Hyp	DT	Recommandation	Une durée de vie de 15 ans et 6000 cycles sous estime les durées de vie et le cyclage possible sur les batteries actuelles, surtout celles dont le C rate est de 0,5 ou 0,25, correspondant à des batteries de ration énergie/puissance de 0,5 à 0,25, c'est à dire de 2h à 4h de réserve. La technologie demonante actuelle est la technologie LFP. Le SOH à 70% est atteint maintenant à un plutot 8000 cycles. Certains constructeurs annoncent meme 10 000 cycles à 70% de SOH.		Pris en compte	Hypothèses conservatrices ajoutées dans le rapport
19	HG	_modelisation site isole_données entrées	SI-Q01	DT	Recommandation	La densité des cellules disponibles sur le marché est plutôt de 150-160 Wh/kg actuellement (CATL par exemple)	ajuster la densité de référence à 155 Wh/kg, correspondant à la densité des cellules disponibles actuellement	Pris en compte	Texte adapté (voir aussi commentaire 59)
20	HG	_modelisation site isole_données entrées	SI-Q03	DT	Recommandation	Les evolutions actuelles technologiques font que les inverters decentralisés (string) deviennent la référence dans le domaine des centrales photovoltaïques au sol, car ils ont l'avantage d'etre diffus, et de petite taille. Ainsi, il devient plus facile de changer un equipement en cas de défaillance et de ne pas perdre toute la production, mais seulement celle de la grappe de panneaux raccordés au convertisseur string en cas de défaillance.		Non pris en compte	Les évolutions technologiques récentes ne peuvent pas être prises en compte car non adossables à des données d'inventaire précises en l'absence de BE
21	HG	_modelisation site isole_données entrées	Donnees Artelys	DT	Recommandation	La durée de vie théorique est supérieure à 15 ans dans tous les cas, se situant entre 19 et 88 ans. Ces calculs sont certainement effectués sans prise en compte du vieillissement calendaire. La durée de vie de la batterie retenue devrait tenir compte des garanties actuelles qui évoiluent vers 8000 cycles à 70% et 20 ans. Au vu des résultats des calculs de vies théoriques, qui sont basés sur les données maintenant un peu anciennes de 6000 cycles à 70%, la durée de vie retenue devrait etre de 20 ans	la durée de vie retenue devrait etre de 20 ans	Pris en compte	Ajout dans le rapport de l'hypothèse conservatrice validée avec le COTECH (en particulier le CEA)

**Rev. ID :**

DB : Delphine Bauchot  
GA : Guillaume Audard  
FJ : France Jonathan  
HG : Hubert Gentou

**Type de commentaire :**

AI : Analyse/interprétation  
DT : Données, technique  
M : Méthodologie



N°	Rev. ID	Chapitre du rapport/ Tableau/ Schéma	N° ligne du rapport	Type de com	Niveau d'importance du commentaire	Commentaire du reviewer	Suggestion éventuelle du reviewer	Type réponse du praticien	Réponse du praticien
22	HG	_modelisation site isole_données entrées	Donnees Artelys	DT	Recommandation	Diesel + batterie : Les incertitudes de consommation amènent à un besoin de surstockage de la batterie pour répondre aux aléas de demande/consommation. La batterie est très sollicitée et donc peut être pas capable de fournir toutes les variabilités de la consommation (surconsommation). Il se pourrait que les générateurs diesel soient appelés plus que le modèle l'a évalué. Un besoin de surdimensionnement de la batterie n'est peut être pas nécessaire.		Pris en compte	Ajout de limites dans le rapport
23	HG	_modelisation site isole_données entrées	Donnees Artelys	DT	Recommandation	Sensibilité 4000 L : Les incertitudes météo amènent à un besoin de surstockage de la batterie pour répondre aux aléas de production PV et de demande/consommation. La batterie est peu sollicitée et donc capable d'absorber probablement les excédents solaires, mais pas nécessairement fournir toutes les variabilités de la consommation (surconsommation). Il se pourrait que les générateurs diesel soient appelés plus que le modèle l'a évalué. Un besoin de surdimensionnement de la batterie n'est peut être pas nécessaire.		Pris en compte	Ajout de limites dans le rapport
24	HG	_modelisation site isole_données entrées	site isole-GE & site isole -GE+ batterie & site isole -GE+batterie+PV & site isole- batterie+PV & site isole- GE4000L	DT	Recommandation	La durée de vie de la batterie retenue devrait tenir compte des garanties actuelles qui évoluent vers 8000 cycles à 70% et 20 ans		Non pris en compte	L'avis du COTECH a été suivi dans notre étude : 6000 cycles/15 ans.
25	HG	_modelisation site isole_données entrées	site isole-GE & site isole -GE+ batterie & site isole -GE+batterie+PV & site isole- batterie+PV & site isole- GE4000L	DT	Recommandation	La densité des cellules disponibles sur le marché est plutôt de 150-160 Wh/kg actuellement (CATL par exemple)		Pris en compte	Texte adapté (voir aussi commentaire 59)

**Rev. ID :**

DB : Delphine Bauchot  
GA : Guillaume Audard  
FJ : France Jonathan  
HG : Hubert Gentou

**Type de commentaire :**

AI : Analyse/interprétation  
DT : Données, technique  
M : Méthodologie



26	HG	_modelisation site isole_données entrées	site isole-GE+batterie & site isole-GE+batterie+PV & site isole-GE4000L	DT	Recommandation	Pas de référence aux caractéristiques de poste de transformation en tension. Quelle est la tension de sortie prévue pour la ferme PV et la batterie ?		Pris en compte	Pas de BE dans l'étude : les hacheurs n'ont pas été spécifiés. Ne trouvant pas d'hacheur dans ecoinvent, devant supposer qu'ils étaient similaires en impacts à des onduleurs, ils ont été négligés vu l'impact non prépondérants des onduleurs dans les résultats. Est précisé dans le texte 5.1.3
27	HG	_modelisation site isole_données entrées	site isole-GE+batterie+PV	DT	Recommandation	Les évolutions actuelles technologiques font que les inverters décentralisés (string) deviennent la référence dans le domaine des centrales photovoltaïques au sol, car ils ont l'avantage d'être diffus, et de petite taille. Ainsi, il devient plus facile de changer un équipement en cas de défaillance et de ne pas perdre toute la production, mais seulement celle de la grappe de panneaux raccordés au convertisseur string en cas de défaillance. Le poids de ces convertisseurs est probablement légèrement plus faible, à puissance totale équivalente.		Non pris en compte	Les évolutions technologiques récentes ne peuvent pas être prises en compte car non adossables à des données d'inventaire précises en l'absence de BE
28	HG	_modelisation site isole_données entrées	site isole-GE4000L	DT	Recommandation	Container 20ft pour batterie : il existe des solutions alternatives avec des PODs (armoires de quelques modules) plus petites que des containers. Le refroidissement par eau est pertinent dans ces cas aussi (exemple phorto de droite)		Non pris en compte	La solution choisie est courante industriellement, et maximise les impacts.
29	HG	_modelisation site isole_données entrées	site isole-GE4000L	DT	Recommandation	Container 20ft pour batterie : il existe des solutions alternatives avec des PODs (armoires de quelques modules) plus petites que des containers. Le refroidissement par eau est pertinent dans ces cas aussi (exemple phorto de droite)		Non pris en compte	La solution choisie est courante industriellement, et maximise les impacts.

**Rev. ID :**

DB : Delphine Bauchot  
GA : Guillaume Audard  
FJ : France Jonathan  
HG : Hubert Gentou

**Type de commentaire :**

AI : Analyse/interprétation  
DT : Données, technique  
M : Méthodologie

Tableau 30 - Grille des commentaires de la revue critique sur le modèle



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- ADEME. (2016). *Etude stratégique sur les besoins en production électrique du bourg de Regina à l'échéance 2030*.
- ADEME. (2020). *Vers l'autonomie énergétique des ZNI*.
- Andreasi Bassi, S., & al. (2023). *Updated characterisation and normalisation factors for the Environmental Footprint 3.1 method*. (E.-J. 1. Centre), Éd.) Luxembourg: Publications Office of the European Union. doi:doi:10.2760/798894
- Bernard Multon, G. M. (2011). *Ressources énergétiques et solutions pour l'alimentation en électricité des populations isolées*.
- EC. (2023). *RÈGLEMENT DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL relatif aux batteries et aux déchets de batteries* (Vol. L 191/1, 28/7/2023). Bruxelles: Journal officiel de l'Union européenne. Récupéré sur <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1542&ved=2ahUKewic89iu4JqKAxVPRKQEHfBkCPgQFnoECBgQAQ&usq=AOvVaw0zuo6vsbXyivjK9iuF47fk>
- ECOFLOW. (2023). *What Is Depth of Discharge for Batteries?* Récupéré sur <https://blog.ecoflow.com/us/what-is-depth-of-discharge-for-batteries/#:~:text=The%20more%20electricity%20you%20use,DoD%20of%20up%20to%2080%25.https://blog.ecoflow.com/us/what-is-depth-of-discharge-for-batteries/#:~:text=The%20more%20electricity%20you%20use>
- EDF SEI. (2015). *Bilan Prévisionnel de l'équilibre offre/demande d'électricité*.
- EIA. (2025). *Petroleum & Other Liquids*. Récupéré sur [https://www.eia.gov/dnav/pet/hist/LeafHandler.ashx?n=PET&s=EMD\\_EPD2DXL0\\_PTE\\_NUS\\_DPG&f=W](https://www.eia.gov/dnav/pet/hist/LeafHandler.ashx?n=PET&s=EMD_EPD2DXL0_PTE_NUS_DPG&f=W)
- European Commission. (2020). *EU Reference Scenario 2020*. Récupéré sur [https://energy.ec.europa.eu/data-and-analysis/energy-modelling/eu-reference-scenario-2020\\_en](https://energy.ec.europa.eu/data-and-analysis/energy-modelling/eu-reference-scenario-2020_en)
- Fazio, S., & al. (2018). *Supporting information to the characterisation factors of recommended EF Life Cycle Impact Assessment method*. (JRC109369, Éd.) Luxembourg: Publications Office of the European Union. doi:10.2760/671368
- France Télévisions. (2022). *Horizons : Kaw, petit village, grande réserve*. Récupéré sur <https://ftvpro.francetv.fr/contenu-de-presse/28841915>
- IEA. (2022). *Special Report on Solar PV Global Supply Chains*. Paris: International Energy Agency. Récupéré sur <https://www.iea.org/reports/solar-pv-global-supply-chains/executive-summary>
- L'ADEME en Guyane. (2022). *Solaire*.
- Marais de Kaw. (2020).
- Ministère de la transition écologique. (2017). *Loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV)*. Récupéré sur <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/loi-transition-energetique-croissance-verte>
- Ministère de la transition écologique. (2017). *Loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV)*.
- NPCR 029. (2020). *Part B for photovoltaic modules used in the building and construction industry, including production of cell, wafer, ingot block, solar grade silicon, solar substrates, solar superstrates and other solar grade semiconductor materials (Version 1.1)*. Oslo, Norway: <https://www.epd-norge.no>. Récupéré sur [https://www.epd-norge.no/getfile.php/1315101-1601554095/PCRer/NPCR%2520029%25202020%2520Part%2520B%2520for%2520photovoltaic%2520modules%25201.1%2520011020.pdf&ved=2ahUKewjajo\\_o2ZqKAxX0VaQEHQqGCRgQFnoECBwQAQ&usq=AOvVaw0Pd\\_rABAZn3iP23O-ptQLI](https://www.epd-norge.no/getfile.php/1315101-1601554095/PCRer/NPCR%2520029%25202020%2520Part%2520B%2520for%2520photovoltaic%2520modules%25201.1%2520011020.pdf&ved=2ahUKewjajo_o2ZqKAxX0VaQEHQqGCRgQFnoECBwQAQ&usq=AOvVaw0Pd_rABAZn3iP23O-ptQLI)

- NREL. (2021). *Residential Battery Storage*. Récupéré sur [https://atb.nrel.gov/electricity/2021/residential\\_battery\\_storage](https://atb.nrel.gov/electricity/2021/residential_battery_storage)
- PCR 2007:08, v. (2024). *Product Category Rules - Electricity, Steam and Hot/Cold Water Generation and Distribution (Version 5.0.0)*. (B. 2.-1. EPD International AB, Éd.) Stockholm, Sweden: [www.environdec.com](http://www.environdec.com). Récupéré sur <https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/f6d488e6-7c6c-41ad-c618-08dc95fad0b1/Data>
- PEFCR. (2017). *Guidance for the Development of Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCRs) v6.3*.
- Rancilio, G. A. (2019). *Modeling a Large-Scale Battery Energy Storage System for Power Grid Application Analysis*.
- Rethore O., A. G. (2021). *Empreinte Projet : Evaluer l’empreinte environnementale d’un projet*. Angers: ADEME.
- Sala S., C. A. (2018). *Development of a weighting approach for the Environmental Footprint*. (E. 28562, Éd.) Luxembourg: Publications Office of the European Union. doi:10.2760/945290
- Sala, S., & al. (2019). *Suggestions for the update of the Environmental Footprint Life Cycle Impact Assessment*. Luxembourg: Publications Office of the European Union. doi:10.2760/78072

## INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

### TABLEAUX

Tableau 1 – Description des 5 systèmes étudiés .....	12
Tableau 2 – Tableau des consommations auxiliaires des batteries pour les différents systèmes étudiés .....	19
Tableau 3 – Comparaison des résultats obtenus pour les 5 systèmes étudiés.....	22
Tableau 4 – Hypothèses principales appliquées aux Groupes Électrogènes du Système Isolé de l'étude .....	33
Tableau 5 – Éléments modélisés du GE pour l'ensemble des systèmes de l'étude .....	33
Tableau 6 – Hypothèses principales appliquées aux systèmes photovoltaïques du Système Isolé de l'étude .....	36
Tableau 7 – Éléments modélisés pour les panneaux photovoltaïques pour l'ensemble des systèmes de l'étude .....	37
Tableau 8 – Hypothèses principales appliquées aux Batteries du Système Isolé de l'étude .....	38
Tableau 9 – Éléments modélisés de la batterie pour l'ensemble des systèmes de l'étude .....	39
Tableau 10 – Catégories d'impacts Source : (Fazio & al., 2018) .....	41
Tableau 11 – Résultats d'impact des cinq systèmes sur l'ensemble du cycle de vie par catégorie d'impact, méthode EF 3.1 .....	42
Tableau 12 – Indicateurs retenus pour chaque système du cas site isolé par la méthode EF3.1.....	43
Tableau 13 – Liste des indicateurs pertinents pour le cas d'étude Site Isolé.....	43
Tableau 14 – Site isolé – Résultats d'analyse de contribution par des systèmes sur l'indicateur changement climatique.....	44
Tableau 15 – Site isolé – Résultats d'analyse de contribution par composant sur l'indicateur formation d'ozone troposphérique.....	46
Tableau 16 – Site isolé – Résultats d'analyse de contribution par composant sur l'indicateur épuisement des ressources fossiles.....	47
Tableau 17 – Site isolé – Résultats d'analyse de contribution par composant sur l'indicateur acidification des sols et de l'eau .....	49
Tableau 18 – Site isolé – Résultats d'analyse de contribution par composant sur l'indicateur eutrophisation terrestre.....	50
Tableau 19 – Site isolé – Résultats d'analyse de contribution par composant sur l'indicateur épuisement des ressources minerais et métaux.....	52
Tableau 20 – Site isolé – Résultats d'analyse de contribution par composant sur l'indicateur effets des particules fines.....	53
Tableau 21 – Site isolé – Résultats d'analyse de contribution par composant sur l'indicateur eutrophisation eaux douce .....	55
Tableau 22 – Résultats des comparaisons deux à deux des calculs corrélés des 5 systèmes par tirage de Monte-Carlo avec 1000 itérations .....	68
Tableau 24 – Détail des évaluations des données ACV .....	73
Tableau 25 – ICV de la ferme solaire de 570kWc utilisée dans les modèles de Sites Isolés de l'étude .....	74
Tableau 26 – nomenclature d'1kg de batterie LFP adaptée et utilisée dans les modèles de Système Isolé de l'étude.....	76
Tableau 27 – ICV d'1kg de batterie LFP adaptée et utilisée dans les modèles de Système Isolé de l'étude .....	76
Tableau 28 – Facteurs de normalisation et de pondération de la méthode EF3.1 (Sala S., 2018) .....	77
Tableau 29 – Grille des commentaires de la revue critique sur le rapport .....	101
Tableau 30 - Grille des commentaires de la revue critique sur le modèle .....	105

### FIGURES

Figure 1 – Schéma d'ensemble du processus d'ACV selon les normes ISO 14040-44 .....	8
Figure 2 – Localisation du village de Kaw .....	12
Figure 3 – Photo aérienne du village de Kaw.....	12
Figure 4 – Construction de la courbe de charge annuelle pour le village de Kaw en 2023.....	14
Figure 5 – Production horaire moyenne en Guyane pour les années 2017, 2018, 2019 et 2021 .....	15
Figure 6 – Production et consommation d'électricité pour le village de Kaw (EDF SEI BP 2015).....	16

Figure 7 – Courbe de charge obtenue pour le village de Kaw entre le 19 mars et le 27 mars 2023 (sans la consommation auxiliaire des batteries).....	16
Figure 8 – Profil de production solaire en 2023 pour le village de Kaw.....	17
Figure 9 – Consommation et efficacité du générateur diesel en fonction de son taux de charge.....	18
Figure 10 – Production d'électricité pour le système SI 1 au cours du mois de mai .....	23
Figure 11 – Production d'électricité pour le système SI 2 au cours du mois de mai .....	24
Figure 12 – Production d'électricité pour le système SI 3 au cours du mois de mai.....	25
Figure 13 – Production d'électricité pour le système SI 4 au cours du mois de mai.....	25
Figure 14 – Production d'électricité pour le système SI 5 au cours du mois de mai.....	26
Figure 15 – Périmètre du cas d'étude.....	28
Figure 16 – Poids en fonction de la puissance de Groupes Electrogènes d'après ecoinvent 3.10, CGL, Loxam et Beiser.....	32
Figure 17 – Poids en fonction de la puissance d'onduleurs .....	35
Figure 18 – Ventilation des impacts de la ferme solaire 570kWc utilisée dans l'étude (indicateurs EF3.1)	35
Figure 19 – Site isolé – Analyse de contribution sur l'indicateur changement climatique (kg CO2eq).....	44
Figure 20 – Site isolé – Analyse de contribution sur l'indicateur formation d'ozone troposphérique (kg NMVOCeq).....	45
Figure 21 – Site isolé – Analyse de contribution sur l'indicateur épuisement des ressources fossiles (MJ)	47
Figure 22 – Site isolé – Analyse de contribution sur l'indicateur acidification des sols et de l'eau (mol H+ eq).....	48
Figure 23 – Site isolé – Analyse de contribution sur l'indicateur eutrophisation terrestre (mol N eq) .....	50
Figure 24 – Site isolé – Analyse de contribution sur l'indicateur épuisement des ressources minerais et métaux (kg Sb eq).....	51
Figure 25 – Site isolé – Analyse de contribution sur l'indicateur effets des particules fines (disease inc.)	53
Figure 26 – Site isolé – Analyse de contribution sur l'indicateur eutrophisation eaux douce (kg P eq).....	54
Figure 27 – Site isolé – Comparaison des indicateurs pertinents des 5 systèmes.....	56
Figure 28 – Site isolé – Scores uniques EF3.1 des 5 systèmes .....	58
Figure 29 – Système 5 : Sensibilités des indicateurs à l'efficacité des panneaux photovoltaïques .....	59
Figure 30 – Système 5 : Sensibilités des indicateurs à la durée de vie des systèmes photovoltaïques .....	60
Figure 31 – Système 5 : Sensibilités des indicateurs à la densité énergétique de la batterie .....	61
Figure 32 – Système 5 : Sensibilités des indicateurs à la durée de vie de la batterie .....	62
Figure 33 – Incertitudes des indicateurs sur les 5 systèmes, moyennes et quartiles 2,5%/97,5% (focus sur les moyennes).....	65
Figure 34 – Incertitudes des indicateurs sur les 5 systèmes, moyennes et quartiles 2,5%/97,5% (focus sur les amplitudes des incertitudes).....	66
Figure 35 – Incertitudes du Score Unique des 5 systèmes par méthode de Monte-Carlo, calculs indépendants.....	67
Figure 36 – Résultats de la probabilité en % de comparaison des résultats des calculs corrélés de tous les indicateurs des systèmes 1 et 2 avec incertitudes en entrée, par méthode de Monte-Carlo, 1000 tirages. ....	67
Figure 37 – Résultats de la comparaison des Scores Uniques corrélés des systèmes 1 et 2 avec incertitudes en entrée, par méthode de Monte-Carlo, 1000 tirages.....	67
Figure 38 – Présentation d'Artelys Crystal Super Grid .....	71
Figure 39 – Méthode des stocks .....	72
Figure 40 – Comparaison des impacts de la ferme solaire de 570kWc a) utilisée dans les modèles de Sites Isolés de l'étude et b) de la ferme solaire de 570kWc d'Ecoinvent 3.10 à Si polycristallin (base 100 : ferme utilisée dans l'étude).....	74
Figure 41 – Comparaison des impacts du panneau photovoltaïque a) PERC M10 Si monocristallin (230W/m <sup>2</sup> ) utilisé dans les modèles de Sites Isolés de l'étude et b) du panneau d'Ecoinvent 3.10 à Si polycristallin (133 W/m <sup>2</sup> ) (base 100 : panneau utilisé dans l'étude).....	75
Figure 42 – Ventilation des sources pour les catégories d'impacts pertinentes, système isolé SI 1 .....	78
Figure 43 – Ventilation des sources pour les catégories d'impacts pertinentes, système isolé SI 2.....	78
Figure 44 – Ventilation des sources pour les catégories d'impacts pertinentes, système isolé SI 3.....	79
Figure 45 – Ventilation des sources pour les catégories d'impacts pertinentes, système isolé SI 4.....	79
Figure 46 – Ventilation des sources pour les catégories d'impacts pertinentes, système isolé SI 5.....	80
Figure 47 – Exemple de distribution des incertitudes sur la catégorie d'impact Changement Climatique lors du calcul de 1000 itérations de Monte-Carlo du SI 5 (GE4000 L + PV + Batterie).....	80

## SIGLES ET ACRONYMES

ACV	Analyse de Cycle de Vie
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
BMS	Battery Management System
BT	Basse Tension
COTECH	Comité Technique
CRE	Commission de Régulation de l'Énergie
DoD	Depth of Discharge, profondeur de décharge d'une batterie
DR	Direction Régionale
EDF SEI	Electricité de France Systèmes Energétiques Insulaires
EF	Environmental Footprint
ELD	Entreprise Locale de Distribution
EnR	Energie Renouvelable
GE	Groupe Electrogène
GWP	Global Warming Potentiel
HTA	Haute Tension
ICV	Inventaire de Cycle de Vie
IRVE	Infrastructure de Recharge de Véhicules Electriques
LFP	Lithium-Fer-Phosphate
MC	Monte-Carlo
NMC	Nickel-Manganèse-Cobalt
PEF	Product Environmental Footprint
PPE	Programmation Pluriannuelle de l'Energie
PV	Photovoltaïque
RTE	Réseau de Transport d'Electricité
SI	Site isolé
SICAP	Société Coopérative d'Intérêt Collectif Agricole de la Région de Pithiviers
SoC	State of Charge, Etat de Charge d'une batterie
SoH	State of Health, Etat de Santé d'une batterie
SRD	Sorégies Réseaux de Distribution
t.km / tkm	Tonnes x kilomètres (unité de transport)
UF	Unité Fonctionnelle
V2G	Vehicle-to-Grid
VE	Véhicule Electrique
ZNI	Zone Non Interconnectée

## 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.



## EXPERTISES

### Approvisionnement en électricité d'un site isolé – exemple du village de Kaw en Guyane

L'objectif de ce cas est d'étudier l'impact environnemental de plusieurs options pour l'approvisionnement en électricité d'un site isolé : option fossile, renouvelable ou hybride. Pour cela, le système électrique d'un site isolé en Guyane est modélisé.

Au global, en prenant référence sur un système alimenté par un générateur électrique seul, les systèmes avec des grandes surfaces de photovoltaïque montrent des impacts au moins 10 fois moindres sur plusieurs catégories d'impacts notamment changement climatique et formation d'ozone troposphérique, un impact 2 ou 3 fois moindre sur la catégorie émissions de particules fines, mais un transfert vers les catégories épuisement de ressources minérales et métalliques et eutrophisation eau douce. Le transfert d'impact se fait principalement vers l'épuisement des ressources minérales et métalliques qui culmine à 7~13 fois la valeur du système de référence.

Il n'est pas possible d'ordonner strictement entre eux les systèmes par mérite environnemental décroissant, du fait du transfert d'impact qui est observé.