



Interreg



France (Channel Manche) England

**RAPPORT DE LA ICE T1.3 : CADRE DE
DURABILITE DU CYCLE DE VIE**

VERSION FINALE
29/06/20



Livrable T1.3 : Cadre de durabilité du cycle de vie

Xiaoyu Yan, Victor Kouloumpis



À propos de l'ICE

Soutenu par Interreg VA France (Manche) Angleterre, le projet Intelligent Community Energy (ICE, l'énergie intelligente pour les communautés), vise à concevoir et mettre en œuvre des solutions énergétiques intelligentes et innovantes pour les territoires isolés de la Manche. Les îles et les communautés isolées sont confrontées à des défis énergétiques uniques. De nombreuses îles ne sont pas connectées à des systèmes de distribution d'électricité plus larges et sont dépendantes de fournitures d'énergie importées, généralement alimentées par des combustibles fossiles. Les systèmes énergétiques dont dépendent les communautés isolées ont tendance à être moins fiables, plus coûteux et à générer davantage d'émissions de gaz à effet de serre (GES) que les systèmes du réseau continental. En réponse à ces problèmes, le projet ICE prend en compte l'ensemble du cycle énergétique, de la production à la consommation, et intègre des technologies nouvelles et établies afin de proposer des solutions innovantes en matière de systèmes énergétiques. Ces solutions seront mises en œuvre et testées sur nos sites de démonstration pilotes uniques (l'île d'Ouessant et le campus de l'Université d'East Anglia), afin de démontrer leur faisabilité et de développer un modèle général pour les systèmes énergétiques intelligents isolés ailleurs. Le consortium ICE réunit des chercheurs et des organisations de soutien aux entreprises en France et au Royaume-Uni. L'engagement auprès des PME permettra de soutenir le déploiement du projet et de promouvoir la coopération européenne.



Contenu

1	Introduction	6
2	Méthodologie d'évaluation de la durabilité du cycle de vie Description	7
2.1	Approche ACV et indicateurs de durabilité.....	7
2.2	Aperçu du LCSF	8
3	Mise en œuvre de la méthodologie LCSF : étude de cas de l'île d'Ouessant	13
3.1	Coût du cycle de vie	14
3.2	Analyse du cycle de vie	15
4	Résultats.....	21
4.1	Techno-économique	23
4.1.1	Production d'électricité.....	23
4.1.2	Coût nivelé de l'électricité (LCoE)	24
4.2	Environnement	25
4.2.1	Potentiel d'épuisement abiotique (éléments ADP)	25
4.2.2	Potentiel d'épuisement abiotique (ADP fossile).....	26
4.2.3	Potentiel d'acidification (PA)	27
4.2.4	Potentiel d'eutrophisation (PE).....	28
4.2.5	Potentiel d'écotoxicité en eau douce (FAETP).....	29
4.2.6	Potentiel de réchauffement de la planète (PRP 100 ans).....	30
4.2.7	Potentiel d'écotoxicité en milieu marin (MAETP).....	31
4.2.8	Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (ODP)	32
4.2.9	Potentiel de création d'ozone photochimique (POCP).....	33
4.2.10	Potentiel d'écotoxicité terrestre (TETP).....	34
4.3	Social	35
4.3.1	Potentiel de toxicité humaine (HTP).....	35
4.3.2	Le métal en fin de vie	36
4.3.3	Plastiques (y compris les composites) en fin de vie.....	37
5	Conclusion.....	38
6	Références	39
	Annexe A LCI des hydroliennes.....	40
	Annexe B Tableaux des résultats analytiques du scénario Ouessant.....	41



Liste des tableaux

Tableau 1 Description du scénario des énergies renouvelables d'Ouessant	14
Tableau 2 Coût nivelé de l'électricité des technologies sélectionnées	14
Tableau 3 Tableau de la feuille d'entrée iCELTIC pour la modification de la valeur de la LCoE	15
Tableau 4 Impacts de la modélisation de LCA par kWh.....	18
Tableau 5 Fiche d'entrée du modèle iCELTIC.....	19
Tableau 6 Résumé des résultats — feuille de sortie du modèle iCELTIC.....	21
Tableau 7 Résultats de l'analyse des scénarios de production d'électricité	23
Tableau 8 Intrants matériels et énergétiques pour le modèle d'ICA des hydroliennes	40
Tableau 9 Résultats de l'analyse des scénarios pour le coût nivelé de l'électricité	41
Tableau 10 Résultats analytiques des scénarios pour les éléments ADP	42
Tableau 11 Résultats analytiques des scénarios pour l'ADP fossile	43
Tableau 12 Résultats analytiques du scénario pour AP	44
Tableau 13 Résultats analytiques du scénario pour EP	45
Tableau 14 Résultats analytiques du scénario pour le FAETP	46
Tableau 15 Résultats analytiques des scénarios pour le PRP	47
Tableau 16 Résultats analytiques du scénario pour MAETP.....	48
Tableau 17 Résultats analytiques du scénario pour le PAO	49
Tableau 18 Résultats analytiques du scénario pour POCP	50
Tableau 19 Résultats analytiques du scénario pour TETP	51
Tableau 20 Résultats analytiques du scénario pour le HTP	52
Tableau 21 Résultats analytiques du scénario pour les métaux éliminés en fin de vie.....	53
Tableau 22 Résultats analytiques du scénario pour les plastiques éliminés en fin de vie	54



Tableau des schémas

Schéma 1 Schéma général du cycle de vie d'une éolienne.....	7
Schéma 2 Cadre de l'analyse du cycle de vie — Les quatre phases d'une ACV.....	7
Schéma 3 Organigramme du cadre de durabilité du cycle de vie	10
Schéma 4 Point de départ du LCSF	11
Schéma 5 Définition du scénario	11
Schéma 6 Composants de LCA et LCC.....	11
Schéma 7 Modèle iCELTIC.....	12
Schéma 8 Nœud de décision de résiliation.....	12
Schéma 9 Carte de l'île d'Ouessant	13
Schéma 10 Comparaison des scénarios pour l'électricité, la LCoE, le GWO, le HTP et les métaux et plastiques éliminés.....	22
Schéma 11 Résultats de l'analyse des scénarios pour le coût.....	24
Schéma 12 Résultats de l'analyse des scénarios pour les éléments d'ADP.....	25
Schéma 13 Résultats de l'analyse des scénarios pour l'ADP fossile	26
Schéma 14 Résultats analytiques du scénario pour AP	27
Schéma 15 Résultats analytiques du scénario pour EP	28
Schéma 16 Résultats analytiques du scénario pour FAETP	29
Schéma 17 Résultats de l'analyse des scénarios pour le PRP.....	30
Schéma 18 Résultats analytiques du scénario pour MAETP.....	31
Schéma 19 Résultats analytiques des scénarios pour le PAO.....	32
Schéma 20 Résultats analytiques du scénario pour POCP.....	33
Schéma 21 Résultats analytiques du scénario pour TETP.....	34
Schéma 22 Résultats analytiques du scénario pour le HTP	35
Schéma 23 Résultats analytiques du scénario pour les métaux éliminés en fin de vie.....	36
Schéma 24 Résultats des analyses de scénarios pour les plastiques éliminés en fin de vie	37



1 Introduction

Ce document présente le cadre de durabilité du cycle de vie (LCSF) développé pour le projet ICE et démontre son application et ses résultats pour l'île d'Ouessant au nord-ouest de la France.

Il est nécessaire de disposer d'un cadre qui couvre les aspects technico-économiques, environnementaux et sociaux sur l'ensemble du cycle de vie des systèmes énergétiques considérés. Pour cette raison, des indicateurs de durabilité pertinents ont été identifiés et un modèle d'analyse du cycle de vie (ACV) de l'île en tant que système énergétique contraint a été développé sur la base des indicateurs choisis. Une version préliminaire du modèle a été présentée lors de la réunion du projet ICE à Falmouth en octobre 2018. Des commentaires ont été reçus en particulier de la part des partenaires qui ont davantage de connaissances sur l'application des plans d'énergie renouvelable et la durabilité des communautés locales. Ceci ainsi que le retour d'information des communautés locales et la Conférence internationale sur le développement durable à Belgrade en avril 2019 ont mis en évidence les éléments nécessaires pour transformer le modèle préliminaire en une méthode d'analyse décisionnelle multicritères qui soutient l'évaluation holistique et le classement des différentes options du futur système énergétique. L'une des principales préoccupations a été alimentée par le récent tollé sur les déchets plastiques et le défi auquel les autorités locales sont confrontées pour traiter avec succès la quantité de déchets produits. Compte tenu de ces préoccupations, le modèle a été encore amélioré et les dernières améliorations ont porté sur les matériaux qui doivent être éliminés à la fin de leur vie. La dernière version du modèle, qui constitue également le principal instrument du LCSF, est le modèle iCELTIC (Intelligent Community Electricity Lifecycle Technology Impact Calculator, Calculateur d'impact technologique du cycle de vie de l'électricité de la communauté intelligente).

La section suivante décrit la méthodologie d'évaluation de la durabilité du cycle de vie en présentant l'approche LCA et la manière dont elle est liée aux indicateurs de durabilité, et en illustrant la vue d'ensemble du LCSF à l'aide d'un organigramme et d'une explication étape par étape de sa mise en œuvre. Ensuite, l'étude de cas de l'île d'Ouessant qui a été utilisée est brièvement présentée dans la section 3, suivie des résultats dans la section 4 et des limites dans la section 5.



2 Méthodologie d'évaluation de la durabilité du cycle de vie Description

2.1 Approche ACV et indicateurs de durabilité

La méthodologie de l'analyse du cycle de vie (ACV) est une méthode normalisée qui peut aider à identifier les possibilités d'améliorer la performance environnementale des produits à différents stades de leur cycle de vie, à informer les décideurs et à sélectionner des indicateurs pertinents de la performance environnementale. (Organisation internationale de normalisation, 2006, p. 14044). Il n'est pas rare d'utiliser une ACV pour l'évaluation des alternatives de production d'électricité et, idéalement, cela inclut toute leur durée de vie, depuis l'extraction des matières premières, la fabrication, l'assemblage, le transport, l'installation, l'exploitation et l'élimination qui peut inclure le démontage, le recyclage, l'incinération et la mise en décharge de leurs différentes parties, comme le montre le Figure 1.

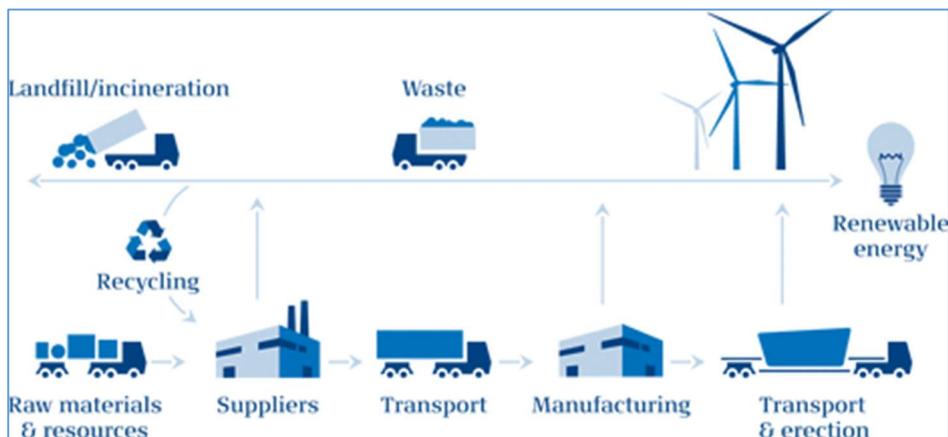


Figure 1 Schéma général du cycle de vie d'une éolienne

Le cadre du cycle de vie comprend quatre phases : i) la définition de l'objectif et du champ d'application, ii) l'analyse de l'inventaire, iii) l'évaluation de l'impact et iv) l'interprétation qui se déroule tout au long de l'ACV (Figure 2).

Par exemple, dans le cas de la production d'électricité à partir d'une éolienne, l'objectif est d'évaluer l'impact potentiel sur l'environnement de la production d'un kWh, ce qui peut inclure l'extraction des matières premières et des ressources, le transport et la fabrication tout au long de la chaîne d'approvisionnement, l'installation et l'exploitation, ainsi que l'élimination des déchets et les activités de fin de vie, qui peuvent être la mise en décharge, l'incinération ou, idéalement, le recyclage. Selon le

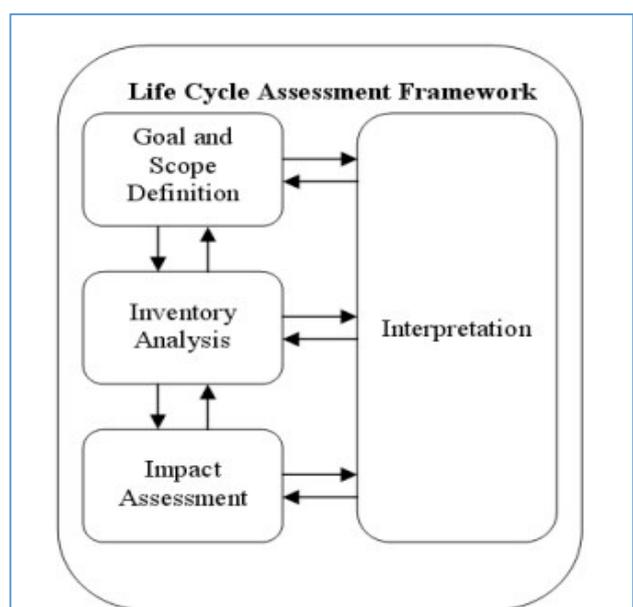


Figure 2 Cadre d'analyse du cycle de vie — Les quatre phases d'une ACV



cas, les limites d'une étude ACV peuvent inclure ou exclure un ensemble d'activités comme le réseau de transmission et de distribution ou la fin de vie.

Au cours de l'analyse de l'inventaire, des données sont collectées pour les ressources (matières et énergie) utilisées, les déchets et les émissions produites pour chaque activité et un inventaire du cycle de vie (ICV) est compilé. Cet ICV est utilisé pour procéder aux étapes de classification et de caractérisation de la phase d'évaluation de l'impact du cycle de vie (EICV). Selon la méthode d'évaluation d'impact utilisée, les émissions/déchets et les ressources sont traduits en un nombre limité de scores d'impact sur l'environnement au moyen de facteurs dits de caractérisation. Habituellement, un modèle est construit à l'aide de logiciels sophistiqués et de bases de données commerciales fiables, qui permettent de calculer les résultats de nombreuses incidences environnementales potentielles pour la production d'un kWh d'électricité, y compris par exemple le potentiel de réchauffement planétaire, l'écotoxicité marine, la toxicité humaine, etc.

Dans une approche similaire, une analyse des coûts du cycle de vie (LCCA) peut être réalisée pour évaluer la performance économique potentielle qui, idéalement, prend en compte le développement et l'autorisation (D & C), la production et l'acquisition (P&A), l'installation et la mise en service (I&C), l'exploitation et la maintenance (O&M), le démantèlement (DECOM). (Myhr et al., 2014). Les résultats de l'analyse LCCA sont donnés à l'aide d'une métrique basée sur la production d'énergie attendue pendant la durée de vie, le coût nivelé de l'énergie (LCOE).

Le LCSF doit couvrir les aspects technico-économiques, environnementaux et sociaux sur l'ensemble du cycle de vie des systèmes énergétiques considérés et une partie de ce travail implique l'identification d'indicateurs de durabilité pertinents. Les indicateurs technico-économiques de ce LCSF sont pertinents pour la sécurité et l'équité énergétiques et sont le **pourcentage de la demande qui est couvert** par le portefeuille de production d'électricité créé et le **LCoE** pour ce portefeuille. Pour les aspects environnementaux, une série d'indicateurs basés sur la méthode d'évaluation de l'impact du cycle de vie CML2001 — Jan. 2016 (Guinée, 2002) méthode d'évaluation de l'impact du cycle de vie sont calculés, à savoir : **i) Potentiel d'épuisement abiotique (éléments), ii) Potentiel d'épuisement abiotique (fossiles), iii) Potentiel d'acidification, iv) Potentiel d'eutrophisation, v) Potentiel d'écotoxicité aquatique en eau douce, vi) Potentiel de réchauffement climatique, vii) Potentiel d'écotoxicité aquatique marine, viii) Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone, ix) Potentiel de création d'ozone photochimique, x) Potentiel d'écotoxicité terrestre.** Pour l'aspect social, la santé humaine et plus particulièrement le **potentiel de toxicité humaine** (HTP) est utilisé comme indicateur. En outre, en raison des préoccupations croissantes des communautés locales concernant le volume de la production de déchets qui augmente la pression sur le potentiel local de gestion des déchets, un ensemble de trois indicateurs supplémentaires pour la **quantité** prévue de **métaux et de matières plastiques éliminés en fin de vie** a été inclus.

2.2 Aperçu du LCSF

Sur la base de l'approche ACV et des indicateurs de durabilité décrits dans la sous-section précédente, un LCSF est proposé et analysé. Cela inclut le développement de modèles ACV pour l'infrastructure de production d'électricité d'une île. Les résultats de la modélisation de l'ACV sont utilisés pour la conception d'une méthode d'analyse décisionnelle multicritères pour soutenir l'évaluation holistique



et le classement des différentes options du futur système énergétique. Le cœur de la méthode est le calculateur d'impact technologique du cycle de vie de l'électricité de la communauté intelligente (iCELTIC).

Figure 3 Diagramme du cadre de durabilité du cycle de vie qui suit illustre le LCSF et sa description est présentée dans les paragraphes suivants.



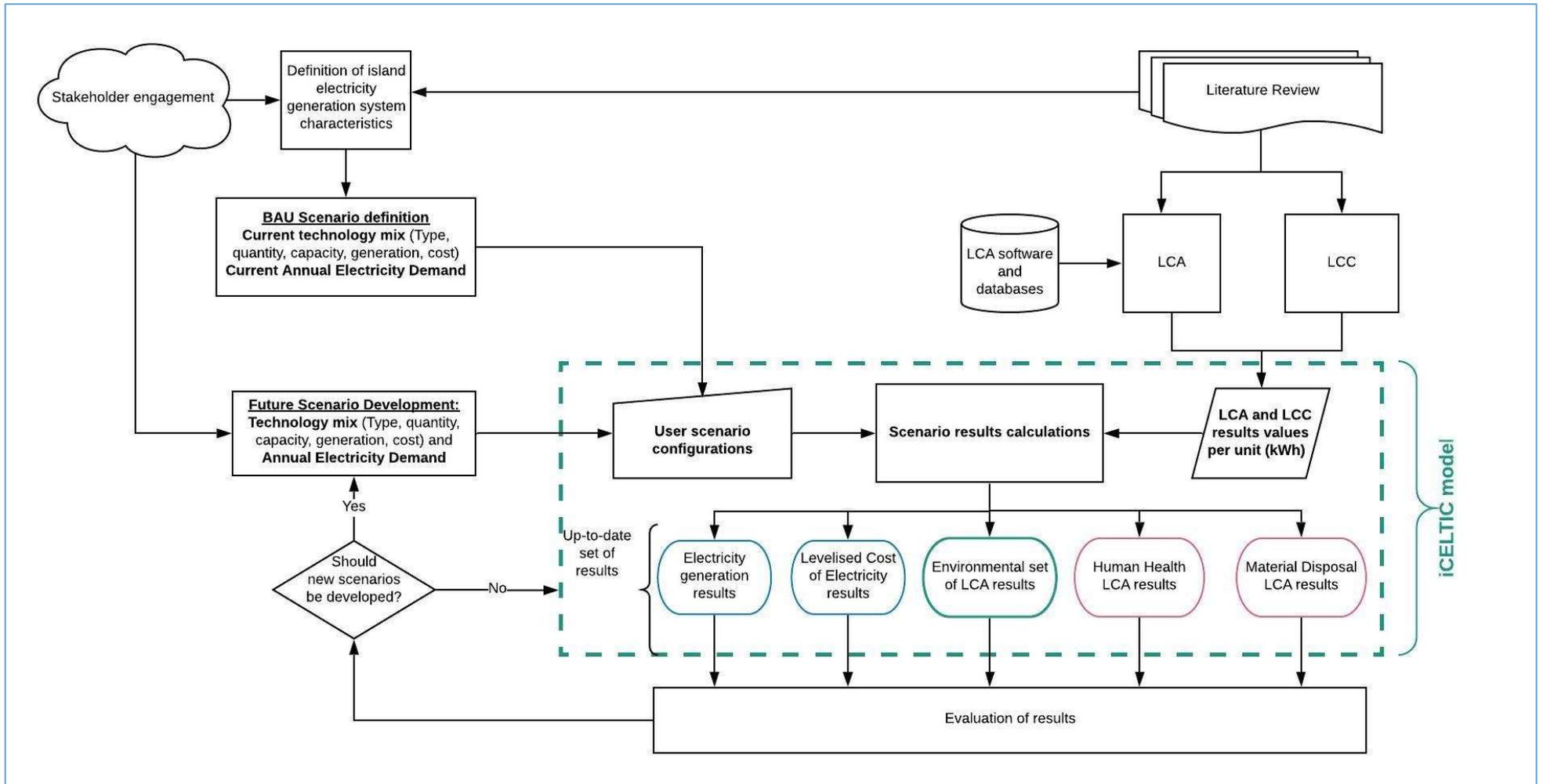


Figure 3 Diagramme du cadre de durabilité du cycle de vie





Figure 4 Point de départ du LCSF

La première étape consiste à impliquer les parties prenantes concernées, qui peuvent être les communautés locales, les modérateurs du réseau national et les fournisseurs d'énergie, les autorités locales et nationales. La conception d'un nouveau plan d'énergie durable a une perspective d'avenir et, pour cette raison, elle nécessite également des connaissances sur la production d'électricité à différents niveaux de préparation technologique. Les membres de la communauté scientifique ainsi que les entreprises qui développent de telles technologies pourraient apporter une contribution assez significative. La manière dont ces parties prenantes peuvent être impliquées varie et dépend de ceux qui dirigent ou suivent le LCSF. Ils ont généralement une meilleure compréhension des conditions pour choisir la manière la plus appropriée, qu'il s'agisse de réunions privées, de journées portes ouvertes, d'ateliers, d'enquêtes et d'autres formes de participation et de méthodes de consultation.

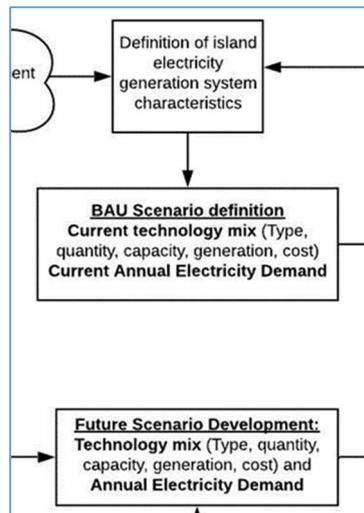


Figure 5 Définition du scénario

L'engagement des parties prenantes peut fournir deux résultats principaux qui sont nécessaires pour suivre le LCSF. Le premier est de contribuer à la définition des caractéristiques actuelles de la production d'électricité insulaire (avec l'appui de la littérature pertinente telle que les rapports techniques, les documents politiques et les publications scientifiques). Le second est de contribuer à l'élaboration des scénarios énergétiques futurs. Dans les deux cas, ce qui doit être défini à la fois pour la situation actuelle et les scénarios futurs sont : i) la demande annuelle en électricité (par exemple 10 000 kWh) et ii) le mix technologique des technologies de production d'électricité, à savoir le nombre, le type, la capacité nominale, la production réelle ou le facteur de capacité (FC) et le coût par MWh (par exemple 2 éoliennes terrestres d'une capacité de 800 kW, 30 % de FC et 100 £/MWh).

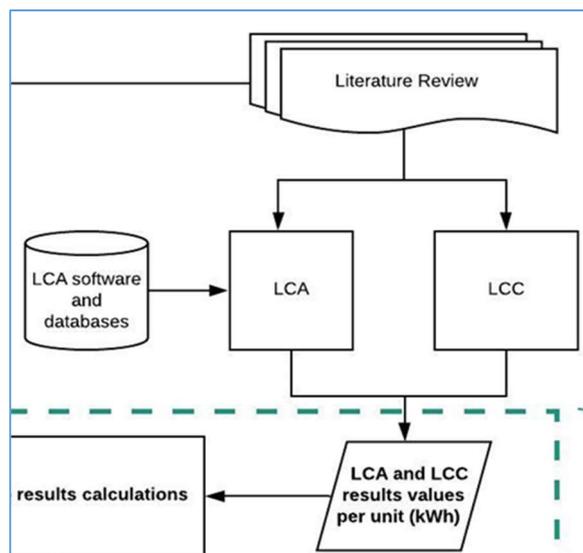


Figure 6 Composants de l'ACV et du CCV

Une fois que les scénarios ont été définis et que les composants qui constituent le mix de production d'électricité actuel et futur sont connus, une série d'ACV et de LCC sont réalisées pour chacun d'entre eux en utilisant comme unité fonctionnelle la production d'un kWh d'électricité à partir d'un composant dont la durée de vie prévue est de 20 ans. Ces évaluations sont réalisées du berceau à la porte et excluent le traitement EoL, bien qu'elles incluent une série d'indicateurs pour les matériaux qui devraient être éliminés. La principale raison en est qu'elles se réfèrent principalement à des scénarios futurs et qu'il est difficile de prédire si les infrastructures bénéficieront d'une extension, d'une modernisation ou d'un démantèlement et si leurs



matériaux seront mis en décharge, incinérés ou recyclés. Les limites de ces études excluent le réseau local de transmission et de distribution (T&D) qui peut rester inchangé. Néanmoins, comme il s'agit de systèmes fermés, une option de stockage par batterie Li-ion est incluse et pourra être mise à jour lorsque d'autres modèles d'ACV seront disponibles à l'avenir. Enfin, le modèle se concentre sur la demande d'électricité qui doit être générée en excluant les pertes pendant la transmission et la distribution.

Le reste des données ont été collectées à partir de la littérature et des bases de données pertinentes comme l'ecoinvent. (Wernet et al., 2016) et ont été traitées à l'aide du logiciel GaBi version 8.7. (Thinkstep A.G., 2019). En utilisant la méthode d'évaluation d'impact CML, les impacts potentiels ont été calculés pour chaque technologie pour l'unité fonctionnelle.

Toutes ces informations sont intégrées dans le modèle iCELTIC qui est développé en Excel et qui peut être mis à la disposition des parties prenantes. Le principal objectif de ce modèle est de fournir une interface utilisateur permettant d'utiliser les résultats de l'ACV et du CCV et de les combiner avec les configurations des scénarios actuels et futurs. Les utilisateurs peuvent voir deux feuilles, une pour les entrées où ils peuvent saisir les valeurs pour les scénarios actuels et futurs préférés et une pour les sorties qui fournit les résultats des indicateurs de durabilité pour chacun des scénarios sous forme de tableau et de représentation graphique.

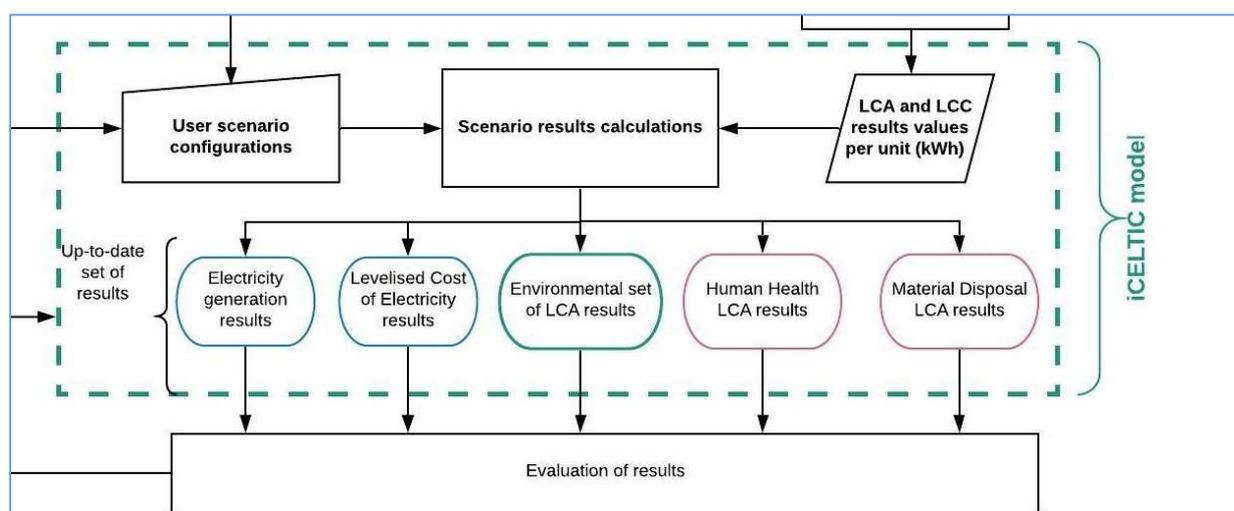


Figure 7 Modèle iCELTIC

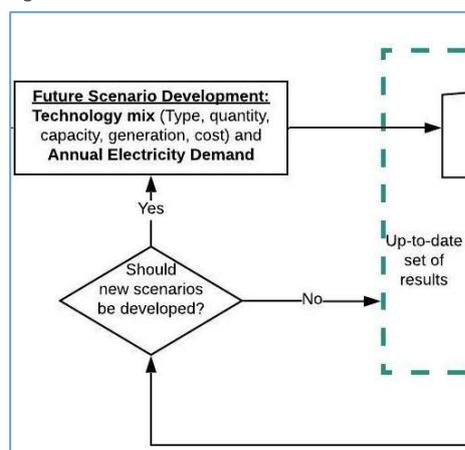


Figure 8 Nœud de décision de résiliation

Les utilisateurs peuvent ensuite évaluer les résultats qu'ils reçoivent et les partager avec le reste des parties prenantes. S'ils sont jugés satisfaisants, le processus peut être terminé et les utilisateurs peuvent utiliser les tableaux et les graphiques en les copiant. Les cellules des sorties sont verrouillées afin que les utilisateurs ne puissent pas accidentellement supprimer ou écraser les résultats. Si les résultats ne sont pas satisfaisants et que les utilisateurs souhaitent introduire de nouveaux scénarios ou modifier certaines valeurs des scénarios existants, ils peuvent le faire dans la feuille des entrées et répéter le processus. La souplesse et la facilité d'utilisation du modèle iCELTIC



favorisent ce processus itératif et interactif, de sorte que les parties prenantes peuvent s'engager de manière productive et efficace. Cela facilite l'étude de nombreux scénarios et la réalisation d'analyses de sensibilité pour examiner si les résultats des scénarios proposés sont robustes. Cela est également particulièrement utile lorsqu'elles souhaitent identifier les compromis entre l'amélioration de leurs indicateurs de durabilité, par exemple pour déterminer si la minimisation des coûts peut augmenter l'empreinte carbone.

Un exemple d'utilisation du modèle iCELTIC est fourni dans les sections suivantes pour le cas de l'île d'Ouessant.

3 Mise en œuvre de la méthodologie LCSF : étude de cas de l'île d'Ouessant

L'étude de cas principale pour mettre en œuvre la méthodologie LCSF est Ouessant, une île au large de la côte nord-ouest de la France. L'île, dont l'industrie principale est le tourisme, voit sa population augmenter d'environ 850 résidents en accueillant plus de 100 000 visiteurs qui se rendent sur l'île chaque année, en particulier en été. La principale source d'énergie est constituée par les quatre générateurs diesel qui fournissent jusqu'à 4,1 MW. Il est estimé que les générateurs consomment plus de 2 000 000 de litres de carburant par an, ce qui correspond au scénario du statu quo (BAU).

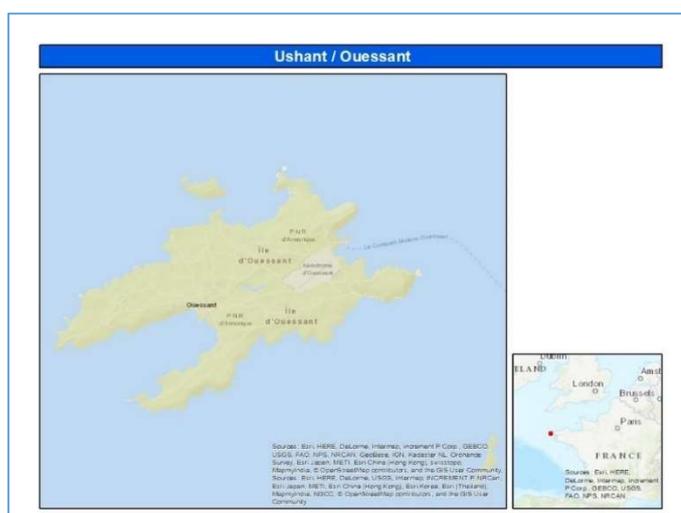


Figure 9 Carte de l'île d'Ouessant

En 2015, une hydrolienne Sabella D10 de 1,1 MW (initialement limitée à 250 kW) a alimenté l'île en électricité (Paboeuf et al., 2016). En 2017, des panneaux solaires ont été installés en vue d'étendre davantage la production solaire (SDEF, 2018). Avec l'objectif d'atteindre 70 % de la production électrique à partir de technologies renouvelables d'ici 2020 et 100 % de production renouvelable d'ici 2030, il est clairement nécessaire d'étudier l'utilisation de plus de technologies renouvelables sur ou autour de l'île, telles que les technologies solaires, éoliennes et marémotrices. C'est la raison pour laquelle sept scénarios théoriques ont été élaborés, puis approfondis. (Fitch-Roy et Connor, 2018 ; Hardwick et al., 2018a ; Mahmood et al., 2019). dont la description sommaire est présentée dans le tableau 1.



Tableau 1 Description du scénario des énergies renouvelables d'Ouessant

Scénario	Description
1	Installations solaires prévues (5 sites) et une éolienne de 300 kW
2	Un grand nombre de panneaux solaires (20 % de tous les toits) et une éolienne de 800 kW.
3	Un grand nombre d'installations solaires et une éolienne de 2 MW
4	L'hydrolienne Sabella D10 et les installations solaires prévues
5	Turbine marémotrice Sabella D10 et grande installation solaire
6	Deux turbines Sabella D10 et des installations solaires prévues
7	L'hydrolienne Sabella D10, un grand nombre d'installations solaires et une éolienne de 800 kW.

Il est utile de rappeler que ces scénarios ont été créés pour évaluer comment la contribution d'une combinaison de technologies de production d'énergie renouvelable solaire, éolienne et marémotrice se comparerait aux besoins de la demande électrique de l'île et que certains d'entre eux pourraient ne pas être possibles sans changements, car les contraintes techniques, environnementales ou sociopolitiques potentielles n'ont pas été prises en compte lors de leur conception. Pour des informations plus détaillées sur ces scénarios, veuillez consulter les rapports correspondants de l'ICE.

3.1 Coût du cycle de vie

En ce qui concerne le LCC, les LCoE de chacune des technologies sont indiqués dans le tableau 2. Tableau 2 et ils sont basés sur des valeurs acquises à partir du « BEIS Electricity Generation Cost Report » (Rapport BEIS sur les coûts de production d'électricité) du ministère des affaires, de l'énergie et de la stratégie industrielle. (BEIS, 2016). Le « coût nivelé » calculé pour chaque technologie « est le rapport entre les coûts totaux d'une centrale générique (y compris les coûts d'investissement et d'exploitation) et la quantité totale d'électricité qui devrait être produite pendant la durée de vie de la centrale. Les deux sont exprimés en termes de valeur actuelle nette. ». Ce rapport ne tient pas compte des flux de revenus potentiels et utilise un coût actualisé sur la durée de vie (dans ce cas pour 20 ans) de la propriété et de l'utilisation d'un actif de production, converti en une unité équivalente de coût de production en GBP/MWh. Les valeurs utilisées font référence aux projets mis en service en 2020 et un effort a été fait pour faire correspondre les technologies du rapport avec celles de l'étude de cas.

Tableau 2 Coût nivelé de l'électricité des technologies sélectionnées

Technologie de production/stockage d'électricité	Vent 300 kW	Vent 800 kW	Vent 2 MW	Photo voltaïque 3kWp	Photovoltaïque, 570kWp en pleine terre	Turbine marémotrice 1 MW	Batterie Li-ion 2,1 kWh
LCoE £ par MWh	145	104	76	103	86	446	425

Pour toutes les éoliennes, les valeurs LCoE « Onshore wind 100-1500kW » (Éoliennes terrestres 100-1500 kW) du rapport ont été prises en compte et plus particulièrement pour l'éolienne de 300 kW l'estimation High Capex (145 GBP/MWh), pour l'éolienne de 800 kW l'estimation Central Capex (124 £/MWh) et pour l'éolienne de 2 MW l'estimation Low Capex (104 GBP/MWh). Pour le



photovoltaïque monté de 3kWp qui est utilisé pour modéliser les installations photovoltaïques de toit, la valeur Low Capex LCoE « Solar<10 kW » du rapport a été considérée (103 GBP/MWh) et pour l'installation photovoltaïque au sol ouverte la valeur High Capex « PV 1-5MW ground » (£86/MWh). Pour l'hydrolienne Sabella D10, l'estimation de la valeur élevée du Capex pour 2025 (446 GBP/MWh) a été prise en compte car il s'agissait de la valeur de projection la plus proche disponible.

Pour la batterie Li-ion, la valeur a été calculée en utilisant « l'analyse du coût nivelé du stockage de Lazard ». (Lazard, 2015) en tenant compte du fait que le coût moyen du stockage pour l'intégration du PV est de 520 \$ (égal à environ 425 GBP). Il s'agit de la valeur présentant la plus grande incertitude, mais elle n'est pas incluse dans les calculs qui suivent et n'affectera donc pas les résultats de cette étude de cas.

Pour le LCoE de la génération diesel, un LCoE n'est pas considéré sur la base de ce rapport parce que les dépenses en capital ont déjà été réalisées dans le passé et que seules les dépenses opérationnelles sont concernées, et le carburant est considéré comme un coût annuel. Selon une publication de Sabella « Les générateurs consomment plus de 2 000 000 l de carburant par an, apporté par bateau une fois tous les trois jours. "Cette valeur est utilisée comme une valeur prédéfinie pour la consommation de diesel (au prix de 1,05 GBP/litre).

Tableau 3 Tableau de la feuille d'entrée d'iCELTIC pour la modification de la valeur de la LCoE

	These values can be overwritten by user
Electricity generation/storage technology	LCoE £ per MWh
Wind 300 kW	145
Wind 800 kW	124
Wind 2MW	76
Photovoltaic, 3kWp façade	103
Photovoltaic, 3kWp flat-roof	103
Photovoltaic, 3kWp slanted-roof	103
Photovoltaic, 570kWp open ground	86
Tidal turbine 1MW	446
Battery Li-ion 2.1 kWh	400
Diesel electric generating set 10MW	0

Les utilisateurs sont autorisés à écraser les valeurs prédéfinies du modèle dans la feuille « Entrée » du modèle iCELTIC, car les différents coûts d'investissement et de dépenses associés au coût nivelé de l'électricité peuvent changer dans un environnement économique volatile. Les valeurs sont très susceptibles de changer en raison des modifications du taux de conversion des devises, par exemple lorsque l'utilisateur souhaite convertir les coûts en livres sterling en euros. Bien entendu, des changements dans les coûts sont également attendus, car les valeurs obtenues à partir des rapports sont des estimations basées sur des projections des valeurs des années précédentes. En outre, la prolifération de certaines des technologies les plus récentes devrait réduire les coûts en raison

de la poursuite de la R&D et des économies d'échelle. Enfin, l'utilisateur peut remplacer ces valeurs par celles citées par les développeurs qui étudient les projets potentiels en tenant compte des conditions spécifiques du site.

3.2 Analyse du cycle de vie

En ce qui concerne l'ACV pour l'île d'Ouessant, les modèles ont été développés en utilisant les matériaux et les hypothèses décrits dans les paragraphes qui suivent.

L'hypothèse de base commune est que la durée de vie est de 20 ans et que le réseau reste le même, il n'est donc pas nécessaire de modéliser les composants supplémentaires pour la transmission et les



distributions tels que les lignes électriques, les pylônes et les sous-stations. Pour rester cohérent avec les facteurs de capacité alloués par les modèles initiaux pour les composants utilisés à partir de la base de données ecoinvent, ceux-ci restent les mêmes lors du calcul des impacts par kWh généré qui est l'unité fonctionnelle. Le modèle iCELTIC intègre une fonction qui ajuste les impacts globaux en divisant le facteur de capacité utilisé dans le modèle d'ACV par le facteur de capacité que l'utilisateur définit sur la base de l'électricité réellement produite. Cela signifie que si le résultat du modèle d'ACV pour le PRP d'une éolienne de 300 kW basée sur un facteur de capacité de 20 % est de 23,4 g d'éq. CO₂/kWh, alors pour la production de 10 kWh à partir d'une éolienne du même type ayant un facteur de capacité de 40 %, le PRP sera de $(20\%/40\%)*10\text{ kWh}*23,4\text{ g d'éq. CO}_2 = 117\text{ g d'éq. CO}_2$. Les facteurs de capacité utilisés comme intrants pour les scénarios d'Ouessant ont été calculés à partir des capacités données et de la production estimée dans les scénarios décrits dans le rapport ICE T1.4. (Hardwick et al., 2018b).

Pour l'électricité produite par l'éolienne de 2 MW, le modèle « Production d'électricité, éolienne, turbine 1-3 MW, terrestre » de la base de données ecoinvent 3.5 a été utilisé car il est également basé sur une éolienne terrestre Vestas de 2 MW. Ce modèle suppose un facteur de capacité de 24,25 % et comprend à la fois la construction de l'éolienne et le raccordement au réseau. Le modèle pour l'éolienne de 800 kW est basé sur la "Production d'électricité, éolienne, <1 MW turbine, onshore" de la base de données ecoinvent 3.5 qui est basée sur une Nordex N50/800 (Bauer et Matysik, s.d.) et un facteur de capacité de 20,29 %. Ce type de turbine a la même capacité nominale, un diamètre similaire (50 m et 52,9 m respectivement) et peut avoir le même moyeu de 50 m et donc la même tour que l'Enercon E53-800 (ENERCON GmbH, 2016) utilisée dans les scénarios développés pour Ouessant (Hardwick et al., 2018b). Par conséquent, l'utilisation des mêmes parties fixes (c'est-à-dire les fondations, la tour, etc.) et des mêmes parties mobiles (c'est-à-dire la nacelle, les pales, etc.) crée un modèle assez représentatif. Malheureusement, un jeu de données existant pour un 300 kW proche de l'Enercon E33-300 (Bauer et Matysik, n.d.) n'est pas disponible dans cette version de la base de données et un travail supplémentaire a été nécessaire. La hauteur de la tour reste inchangée mais le poids considéré comme étant de 36,7 tonnes diffère beaucoup de la masse de la tour beaucoup plus lourde du modèle Nordex N50/800 (Bauer et Matysik, n.d.) Il a donc fallu procéder à des ajustements et réestimer les masses de l'acier et de l'énergie. Les pièces mobiles sont encore plus différentes et le poids total des pièces mobiles (nacelle, pales, rotor) de l'E33 (environ 18,7 tonnes) peut être environ la moitié de celui du N50 (environ 39 tonnes). L'utilisation du N50 comme base et la réduction de l'échelle en conséquence ont permis de produire un modèle ACV adéquat.

Pour le photovoltaïque installé sur les bâtiments, un ensemble de jeux de données ecoinvent 3.5 a été utilisé : Production d'électricité, photovoltaïque, installation sur toit plat 3kWp, multi-Si, Production d'électricité, photovoltaïque, installation sur toit incliné 3kWp, multi-Si et Production d'électricité, photovoltaïque, installation sur façade 3kWp, multi-Si. Le photovoltaïque est une technologie plus homogène et évolutive. Ainsi, avec un modèle de 3 kWc, il est facile de passer à 9 kWc et d'obtenir des résultats d'ACV fiables, mais il n'en va pas de même avec l'éolien, comme nous l'avons vu avec les hypothèses et les modifications supplémentaires requises pour créer un modèle de 300 kW à partir d'un modèle de 800 kW. Les facteurs de capacité pris en compte pour le toit plat et le toit incliné étaient de 17,31 %, tandis que pour la façade, ils étaient de 11,6 %. Les systèmes photovoltaïques déjà installés ainsi que ceux qui sont prévus sont de type toit incliné. Bien que dans les sept scénarios décrits dans T1.4 un sol ouvert ne soit pas prévu, un photovoltaïque en sol ouvert ainsi que le stockage Li-ion ont été ajoutés dans le modèle pour faciliter les futurs utilisateurs qui souhaiteraient les inclure dans leurs analyses. Pour le photovoltaïque en pleine terre, le jeu de données ecoinvent 3,5 « production d'électricité, photovoltaïque, installation en pleine terre 570kWp, multi-Si » a été utilisé



et pour le stockage, le jeu de données ecoinvent 3.5 « production de batteries, Li-ion, rechargeables, prismatiques » a été utilisé.

Pour l'hydrolien, les données n'étaient pas disponibles auprès de Sabella comme prévu et les données n'étaient pas non plus disponibles dans les ensembles de données ACV commerciaux. C'est pourquoi un modèle d'ACV pour un générateur marémoteur de 1 MW a été construit à partir de zéro en utilisant les données de la littérature et en supposant un facteur de capacité de 10 %. (Howell et al., 2013) et en supposant un facteur de capacité de 10 %. De plus amples détails sur le type et la quantité de matériaux utilisés sont disponibles dans le Tableau 8 l'annexe A.

Sur la base des travaux d'ACV ci-dessus, les résultats par kWh sont fournis en **Error! Reference source not found.** Ces résultats sont basés sur les conditions spécifiques et les données disponibles à ce moment-là et peuvent et pourraient changer à l'avenir en fonction des circonstances et des exigences.

En utilisant les résultats de l'ACV et du CCV, le modèle iCELTIC a été configuré pour l'étude des sept scénarios mentionnés. Ces scénarios sont fournis pour montrer comment la méthodologie LCSF et le modèle iCELTIC fonctionnent et ils peuvent être mis à jour et modifiés en fonction des exigences de ce projet. Le schéma suivant donne un aperçu des entrées spécifiques du modèle pour l'étude de cas d'Ouessant.



Tableau 4 Impacts de la modélisation de l'ACV par kWh

Impacts par kWh	éléments ADP [kg Sb-Eq.]	Fossile d'ADP [MJ]]	AP [kg SO2-Eq.]	EP [kg Phosphate- Eq.]	FAETP [kg DCB-Eq.]	GWP [kg CO2- Eq.]	HTP [kg DCB-Eq.]	MAETP [kg DCB- Eq.]	ODP [kg R11- Eq.]	POCP [kg Ethene- Eq.]	TETP [kg DCB- Eq.]
Vent 300 kW	3.34E-07	3.17E-01	1.10E-04	6.86E-05	2.96E-02	2.34E-02	1.04E-01	4.84E+01	1.44E-09	1.55E-05	3.05E-03
Vent 800 kW	2.38E-07	2.07E-01	8.76E-05	5.53E-05	6.35E-02	1.51E-02	8.40E-02	4.75E+01	8.30E-10	1.03E-05	2.17E-03
Vent 2 MW	3.08E-07	1.92E-01	7.37E-05	5.49E-05	4.60E-02	1.31E-02	4.99E-02	3.80E+01	1.01E-09	9.26E-06	1.12E-03
Photovoltaïque, façade 3kWp	4.36E-06	1.42E+00	7.07E-04	4.37E-04	2.85E-01	1.04E-01	2.49E-01	3.63E+02	1.08E-08	6.14E-05	1.34E-03
Photovoltaïque, toit plat 3kWp	2.89E-06	9.63E-01	4.69E-04	3.15E-04	1.92E-01	6.97E-02	1.67E-01	2.42E+02	7.15E-09	4.10E-05	9.57E-04
Photovoltaïque, 3kWp en toiture inclinée	3.06E-06	1.00E+00	5.00E-04	3.08E-04	2.01E-01	7.38E-02	1.76E-01	2.57E+02	7.61E-09	4.34E-05	9.25E-04
Photovoltaïque, 570kWp en pleine terre	2.33E-06	1.03E+00	4.37E-04	2.34E-04	1.06E-01	7.60E-02	1.19E-01	1.94E+02	7.63E-09	4.08E-05	9.56E-04
Turbine marémotrice 1 MW	2.92E-07	4.62E-01	1.33E-04	1.62E-05	5.49E-03	4.80E-02	1.42E-02	7.46E+00	2.98E-09	1.51E-05	2.43E-04
Batterie Li-ion 2,1 kWh	1.39E-07	2.20E-01	6.33E-05	7.71E-06	2.61E-03	2.29E-02	6.76E-03	3.55E+00	1.42E-09	7.19E-06	1.16E-04
Groupe électrogène diesel 10 MW	1.89E-07	1.24E+01	9.00E-03	2.23E-03	2.33E-02	8.77E-01	9.84E-02	6.97E+01	1.62E-07	8.71E-04	1.12E-03

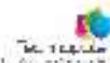


Tableau 5 Fiche d'entrée du modèle iCELTIC

DEMANDE ANNUELLE D'ÉLECTRICITÉ (MWh)	6,807	Capacité des différentes centrales/installations électriques (kW)							Facteurs de capacité des différentes technologies (%)							Fourniture annuelle d'électricité par centrale/installation (MWh)						
DEMANDE ANNUELLE DE CARBURANT (LITRES)	2 000 000																					
COÛT DU CARBURANT PAR LITRE (£/LT)	1,05	SCÉNARIO 1	SCÉNARIO 2	SCÉNARIO 3	SCÉNARIO 4	SCÉNARIO 5	SCÉNARIO 6	SCÉNARIO 7	SCÉNARIO 1	SCÉNARIO 2	SCÉNARIO 3	SCÉNARIO 4	SCÉNARIO 5	SCÉNARIO 6	SCÉNARIO 7	SCÉNARIO 1	SCÉNARIO 2	SCÉNARIO 3	SCÉNARIO 4	SCÉNARIO 5	SCÉNARIO 6	SCÉNARIO 7
Nom de l'usine ou de l'installation	Type d'usine ou d'installation	Total = 489	Total = 4400	Total = 5600	Total = 1189	Total = 4600	Total = 2189	Total = 5400	Min = 9,5 % Max = 57,5 %	Min = 12,33% Max = 62,29%	Min = 12,33% Max = 61,63%	Min = 9,5 % Max = 14,74 %	Min = 11,4 % Max = 12,33 %	Min = 9,5 % Max = 14,74 %	Min = 11,4 % Max = 62,29 %	Total = 1696	Total = 8254	Total = 14 686	Total = 1183	Total = 4888	Total = 2182	Total = 9253
Petit parc éolien	Vent 300 kW	300							57,50 %							1511						
Parc éolien moyen	Vent 800 kW		800					800		62,29 %					62,29 %		4365					4365
Un grand parc éolien	Vent 2 MW			2000							61,63 %							10 797				
Turbine marémotrice	Turbine marémotrice 1 MW				1000	1000	2000	1000				11,40 %	11,40 %	11,40 %	11,40 %				999	999	1997	999
Salle de sport PV	Photovoltaïque, 3kWp en toiture inclinée	45			45		45		14,74 %			14,74 %		14,74 %		58			58			58
PV Salle Ployvante	Photovoltaïque, 3kWp en toiture inclinée	13,2			13,2		13,2		12,44 %			12,44 %		12,44 %		14			14			14
Auberge PV	Photovoltaïque, 3kWp en toiture inclinée	8,8			8,8		8,8		11,04 %			11,04 %		11,04 %		9			9			9
PV Mairie	Photovoltaïque, 3kWp en toiture inclinée	9			9		9		12,34 %			12,34 %		12,34 %		10			10			10
Technique de service PV	Photovoltaïque, 3kWp en toiture inclinée	113			113		113		9,50 %			9,50 %		9,50 %		94			94			94
PV 20 % de toits adaptés	Photovoltaïque, 3kWp en toiture inclinée		3600	3600		3600		3600		12,33 %	12,33 %		12,33 %		12,33 %		3889	3889		3889		3889



Stockage	Batterie Li-ion 2,1 kWh							
----------	-------------------------	--	--	--	--	--	--	--



4 Résultats

La première série de résultats pour tous les indicateurs de durabilité est présentée sous une forme concentrée, sous forme de résumé, au début de la feuille de sortie du modèle iCELTIC. La raison en est que les tableaux et les graphiques sont nombreux et que l'utilisateur pourrait préférer voir tous les résultats brièvement au lieu de les faire défiler.

Tableau 6 Résumé des résultats — feuille de sortie du modèle iCELTIC

	RÉSUMÉ DES RÉSULTATS							
	BAU	SCÉNARIO 1	SCÉNARIO 2	SCÉNARIO 3	SCÉNARIO 4	SCÉNARIO 5	SCÉNARIO 6	SCÉNARIO 7
Production d'électricité (MWh)	6807	1696	8254	14 686	1183	4888	2182	9253
Coût nivelé de l'électricité (GBP)	2 100 000	238,150	941,871	1 221 118	464,420	845,962	909,813	1 387 265
Potentiel d'épuisement abiotique (éléments ADP) [kg Sb-Equiv.]	1.29E+00	1.05E+00	1.70E+01	1.80E+01	1.13E+00	1.70E+01	1.39E+00	1.73E+01
Potentiel d'épuisement abiotique (ADP fossile) [MJ].	8.44E+07	4.53E+05	5.75E+06	6.27E+06	6.91E+05	5.86E+06	1.10E+06	6.16E+06
Potentiel d'acidification (PA) [kg SO2-équiv.]	6.13E+04	2.01E+02	2.85E+03	3.04E+03	2.60E+02	2.85E+03	3.76E+02	2.97E+03
Potentiel d'eutrophisation (PE) [kg d'équivalent phosphate].	1.52E+04	1.24E+02	1.76E+03	1.91E+03	1.02E+02	1.70E+03	1.17E+02	1.77E+03
Potentiel d'écotoxicité aquatique en eau douce (PEDAF) [kg DCB-équiv.]	1.59E+05	7.32E+04	1.19E+06	1.29E+06	6.24E+04	1.10E+06	6.72E+04	1.19E+06
Potentiel de réchauffement de la planète (PRP) [kg d'équivalent CO2].	5.97E+06	3.34E+04	4.24E+05	4.59E+05	6.32E+04	4.45E+05	1.05E+05	4.66E+05
Potentiel d'écotoxicité en milieu marin (MAETP) [kg DCB-Equiv.]	4.74E+08	9.91E+07	1.47E+09	1.56E+09	8.02E+07	1.41E+09	8.67E+07	1.48E+09
Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (ODP) [kg R11-Equiv.]	1.10E+00	2.94E-03	4.27E-02	4.58E-02	4.79E-03	4.42E-02	7.40E-03	4.53E-02
Potentiel de création d'ozone photochimique (POCP) [kg d'éthène-équiv.]	5.93E+03	2.06E+01	2.52E+02	2.76E+02	2.57E+01	2.50E+02	3.89E+01	2.65E+02
Potentiel d'écotoxicité terrestre (TETP) [kg DCB-Equiv.]	7.62E+03	1.87E+03	8.14E+03	9.81E+03	4.78E+02	5.26E+03	6.91E+02	8.35E+03
Potentiel de toxicité humaine (HTP) [kg DCB-Equiv.]	6.70E+05	1.05E+05	1.08E+06	1.17E+06	6.29E+04	9.73E+05	7.53E+04	1.09E+06
Métal en fin de vie (tonnes éliminées)		1.05E+00	1.70E+01	1.80E+01	1.13E+00	1.70E+01	1.39E+00	1.73E+01
Plastiques (y compris les composites) en fin de vie (tonnes éliminées)		1.05E+00	1.70E+01	1.80E+01	1.13E+00	1.70E+01	1.39E+00	1.73E+01

En plus de cela, un graphique est fourni qui contient une comparaison entre le scénario actuel et les sept scénarios. Afin de rendre le graphique plus facile à suivre pour les résultats environnementaux, seul le PRG est inclus car la transition vers les technologies d'énergie renouvelable est soutenue comme un soutien contre la crise climatique.



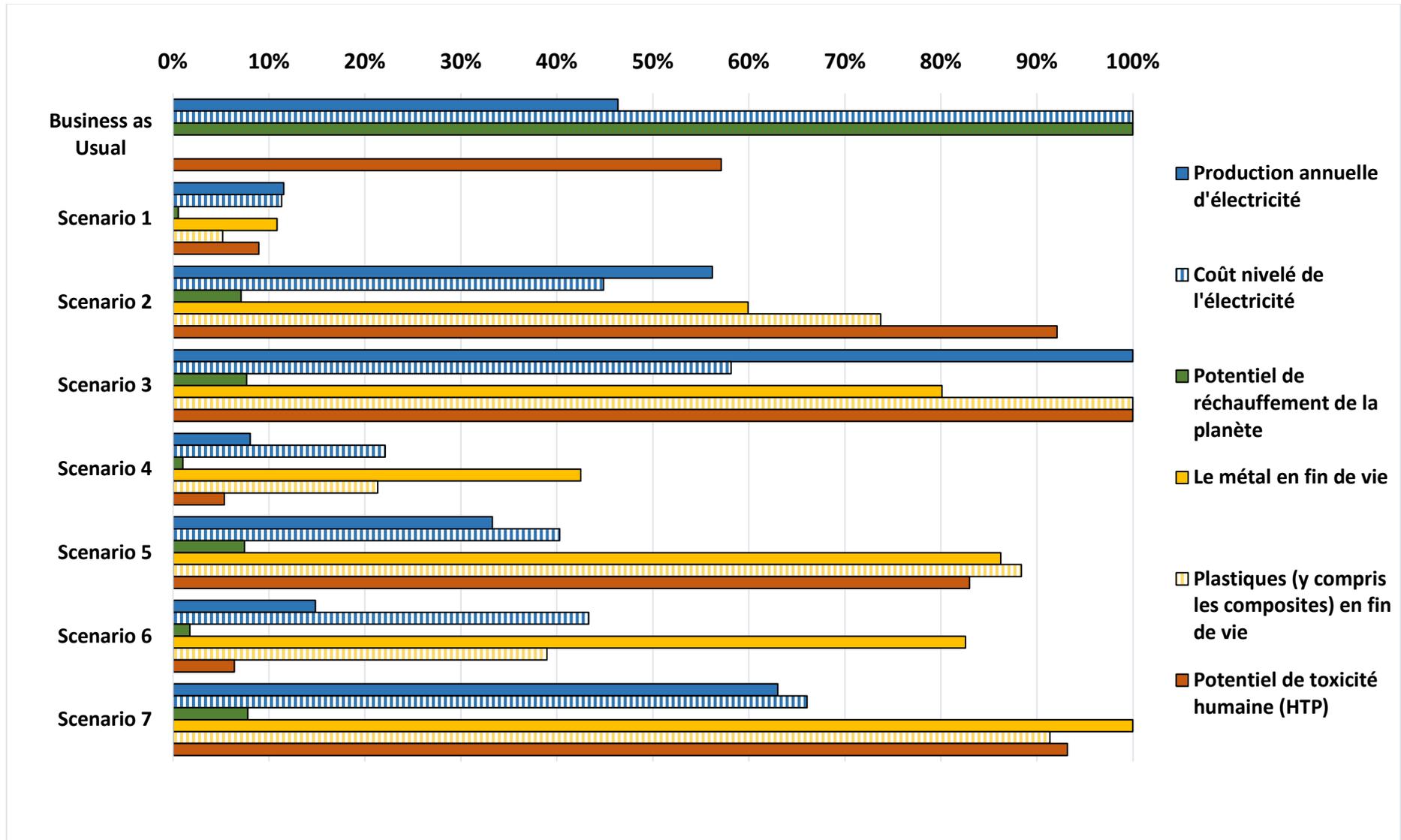


Figure 10 Comparaison des scénarios pour l'électricité, la LCoE, le GWP, le HTP et les métaux et plastiques éliminés.



4.1 Techno-économique

4.1.1 Production d'électricité

Les résultats de la production d'électricité sous une forme analytique sont en fait donnés sur la feuille d'entrée comme un calcul primaire. Ils sont également inclus dans le résumé des résultats de la feuille de sortie. Pour aider l'utilisateur, les lignes de résultats sont codées par couleur et les résultats de production d'électricité comportent une vérification intégrée qui permet à l'utilisateur de voir si les scénarios d'énergie renouvelable proposés couvrent la production réalisée par l'infrastructure de combustible fossile habituelle.

Tableau 7 Résultats de l'analyse des 7 production d'électricité

Scénario	BAU	SCÉNARIO 1	SCÉNARIO 2	SCÉNARIO 3	SCÉNARIO 4	SCÉNARIO 5	SCÉNARIO 6	SCÉNARIO 7
Production d'électricité (MWh)	6,807	1,696	8,254	14,686	1,183	4,888	2,182	9,253
Petit parc éolien		1511						
Parc éolien moyen			4365					4365
Un grand parc éolien				10 797				
Turbine marémotrice					999	999	1997	999
Salle de sport PV		58			58		58	
PV Salle Ployvante		14			14		14	
Auberge PV		9			9		9	
PV Mairie		10			10		10	
Technique de service PV		94			94		94	
PV 20 % de toits adaptés			3889	3889		3889		3889

Les résultats montrent que sur les sept scénarios développés, seuls trois parviennent à couvrir les 6 807 MWh par an fixés comme seuil par le scénario « business as usual » (« affaires courantes »). Il s'agit des scénarios 2, 3 et 7. Le scénario 5 ne remplit pas les conditions requises, mais il s'en approche, tandis que les autres scénarios (1, 4 et 6) ne couvrent même pas un tiers de la production existante. Aucun des scénarios admissibles n'utilise les panneaux photovoltaïques prévus, mais plutôt une installation solaire étendue sur 20 % des toits et une sorte de vent. L'hydrolienne pourrait apporter un soutien et réduire les besoins en énergie éolienne, mais elle ne peut être suffisante sans elle, quelle que soit la contribution restante de l'énergie solaire.



4.1.2 Coût nivelé de l'électricité (LCoE)

Le coût actuel de l'électricité pour le scénario BAU basé sur une consommation de 2 000 000 de litres de diesel au prix très bas de 1,05 GBP s'élève à 2 100 000 GBP. En examinant les résultats des coûts sur le schéma Figure 11 on constate que tous les scénarios s'avèrent plus économiques. Parmi les trois scénarios qui couvrent la demande, le scénario 2 présente le coût le plus bas, suivi du scénario 3 et du scénario 7. Cela montre qu'une éolienne de taille moyenne de 800 kW peut fournir l'énergie requise au coût le plus bas sans qu'il soit nécessaire de la surdimensionner et d'utiliser une éolienne de 2 MW comme le scénario 3 ou d'ajouter une turbine marémotrice au mix énergétique comme le scénario 7. Le scénario 1 est celui qui présente le coût le plus bas, mais il ne couvre pas la demande même si une utilisation étendue de l'énergie photovoltaïque pourrait être ajoutée, donc l'utilisation d'une éolienne de plus petite taille ne peut être recommandée. Le scénario 6 est le deuxième plus cher et le scénario 5 le quatrième plus cher et aucun d'entre eux ne couvre la demande, il est donc utile d'examiner si une turbine marémotrice avec le facteur de capacité estimé (11,4 %) est effectivement un bon investissement au LCoE par unité considérée (446 £/MWh — le plus élevé parmi toutes les options).

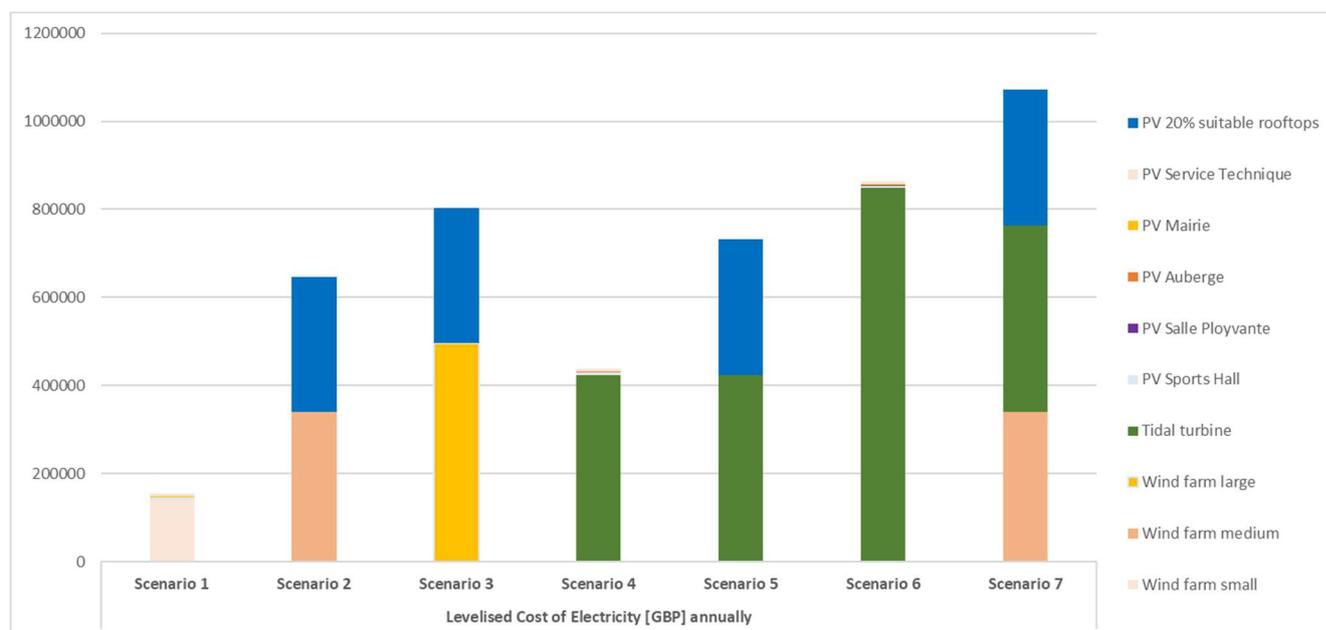


Figure 11 Résultats analytiques du scénario pour les coûts

D'après les résultats de la production d'électricité et de la LCoE, il s'avère que, du point de vue technico-économique, le meilleur scénario est le scénario 2, suivi des scénarios 3 et 7. Cette analyse a jusqu'à présent mis en évidence l'importance de l'efficacité par unité, à la fois technique et économique, et les utilisateurs intéressés pourraient étudier l'effet de l'utilisation de différentes valeurs, en particulier dans le cas de l'hydrolienne.



4.2 Environnement

4.2.1 Potentiel d'épuisement abiotique (éléments ADP)

Les éléments ADP montrent la diminution de la disponibilité des ressources non biologiques en raison de leur utilisation non durable et sont mesurés en kg d'équivalent antimoine (Sb). Les scénarios qui obtiennent les meilleurs résultats sont ceux qui génèrent également plus d'électricité, ce qui est prévisible puisque davantage de ressources seraient nécessaires pour créer plus de dispositifs. En outre, l'installation technologique qui contribue le plus est le photovoltaïque étendu sur 20 % des toits appropriés, ce qui est attendu jusqu'à un certain point car les photovoltaïques montés sur les toits ont des valeurs d'éléments ADP par kWh produit environ dix fois plus élevées que les éoliennes et les hydroliennes. C'est pourquoi le scénario 5, qui ne produit pas une quantité suffisante d'électricité, obtient tout de même les valeurs les plus élevées.

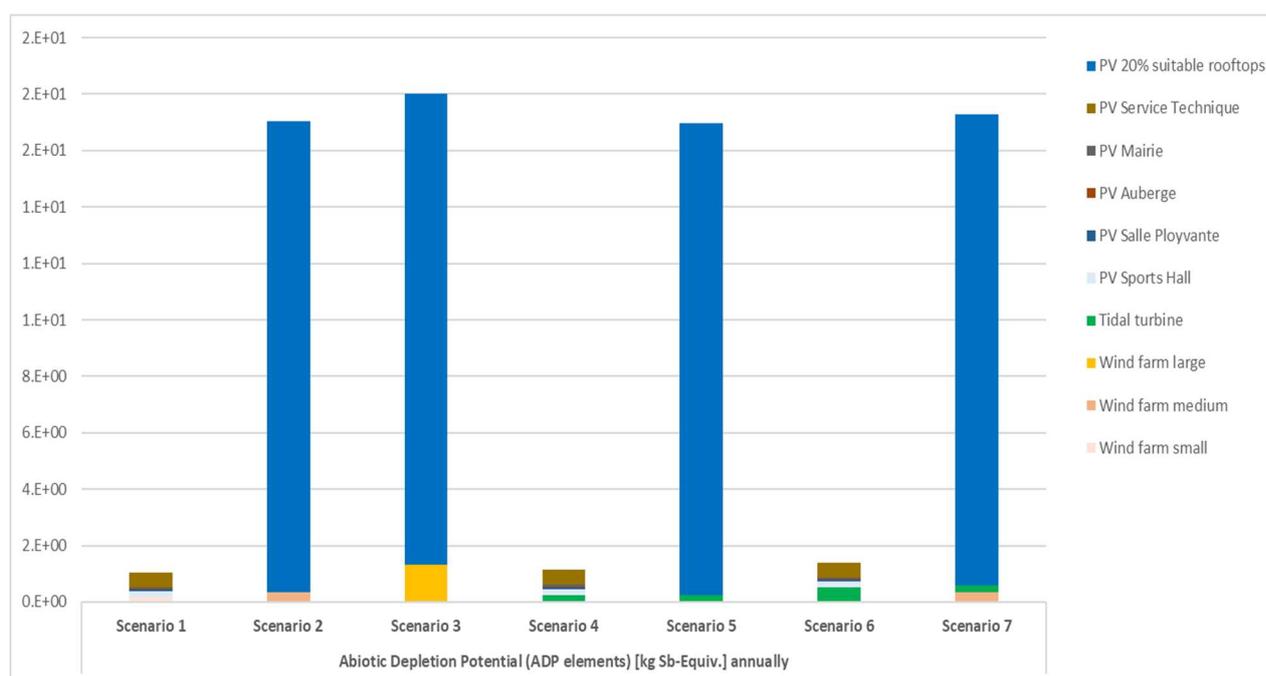


Figure 12 Résultats de l'analyse des scénarios pour les éléments d'ADP

Le scénario qui couvre la demande et maintient en même temps les impacts des éléments d'ADP à un niveau inférieur est le scénario 2, suivi des scénarios 7 et 3.



4.2.2 Potentiel d'épuisement abiotique (ADP fossile)

Les éléments ADP montrent la diminution de la disponibilité des ressources fossiles non biologiques en raison de leur utilisation non durable et sont mesurés en MJ. Les scénarios qui obtiennent les meilleurs résultats sont ceux qui génèrent également plus d'électricité, ce qui est prévisible puisque davantage de ressources seraient nécessaires pour créer plus de dispositifs. En outre, l'installation technologique qui contribue le plus est le photovoltaïque étendu sur 20 % des toits appropriés, ce qui est attendu jusqu'à un certain point car les photovoltaïques montés sur les toits ont des valeurs fossiles ADP environ deux fois plus élevées par kWh produit que l'hydrolienne et trois à cinq fois plus que les éoliennes. C'est pourquoi le scénario 5, qui ne produit pas une quantité suffisante d'électricité, obtient tout de même les valeurs les plus élevées.

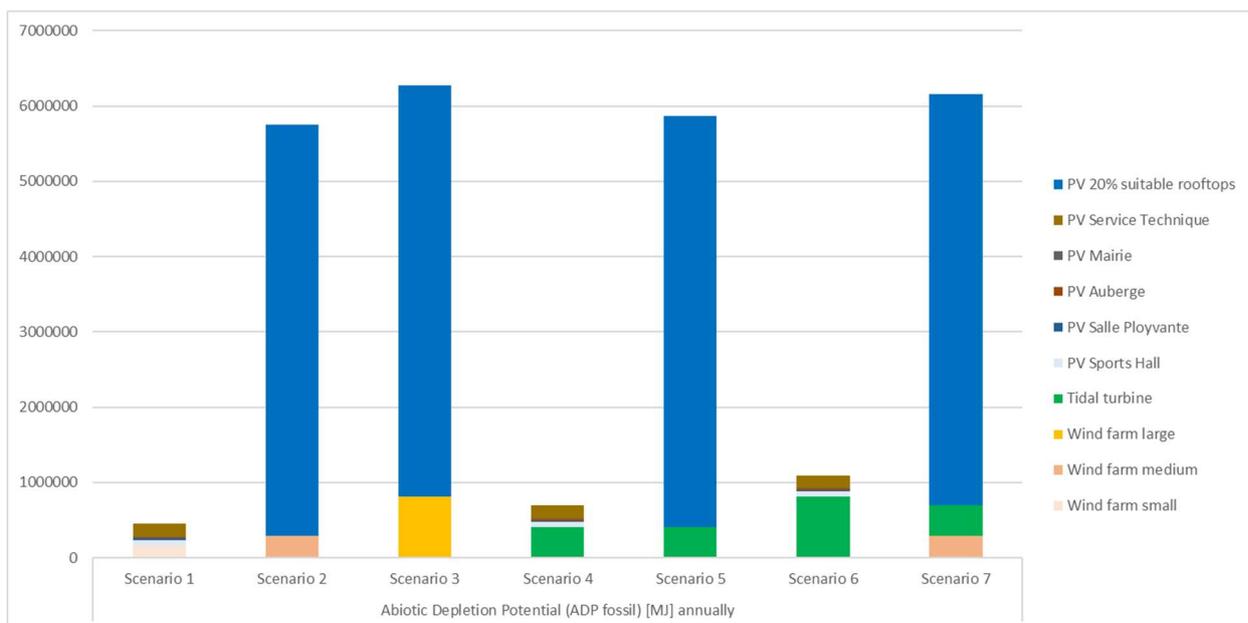


Figure 13 Résultats analytiques du scénario pour ADP fossile

Le scénario qui couvre la demande et maintient en même temps les impacts des éléments d'ADP à un niveau inférieur est le scénario 2, suivi des scénarios 7 et 3.



4.2.3 Potentiel d'acidification (PA)

Le PA montre la réduction du pH due aux effets acidifiants des émissions anthropiques, qui est liée à la dégradation de la qualité des écosystèmes et à la diminution de la biodiversité, et est mesurée en équivalent dioxyde de soufre (SO₂). Les scénarios qui obtiennent les meilleurs résultats sont ceux qui génèrent également plus d'électricité, ce qui est prévisible puisque davantage de ressources seraient nécessaires pour créer plus de dispositifs. En outre, l'installation technologique qui contribue le plus est le photovoltaïque étendu sur 20 % des toits appropriés, ce qui est attendu jusqu'à un certain point car les photovoltaïques montés sur les toits ont des valeurs PA par kWh produit environ quatre fois plus élevées que l'hydrolienne et cinq à sept fois plus élevées que les éoliennes. C'est pourquoi le scénario 5, qui ne produit pas une quantité suffisante d'électricité, obtient tout de même les valeurs les plus élevées.

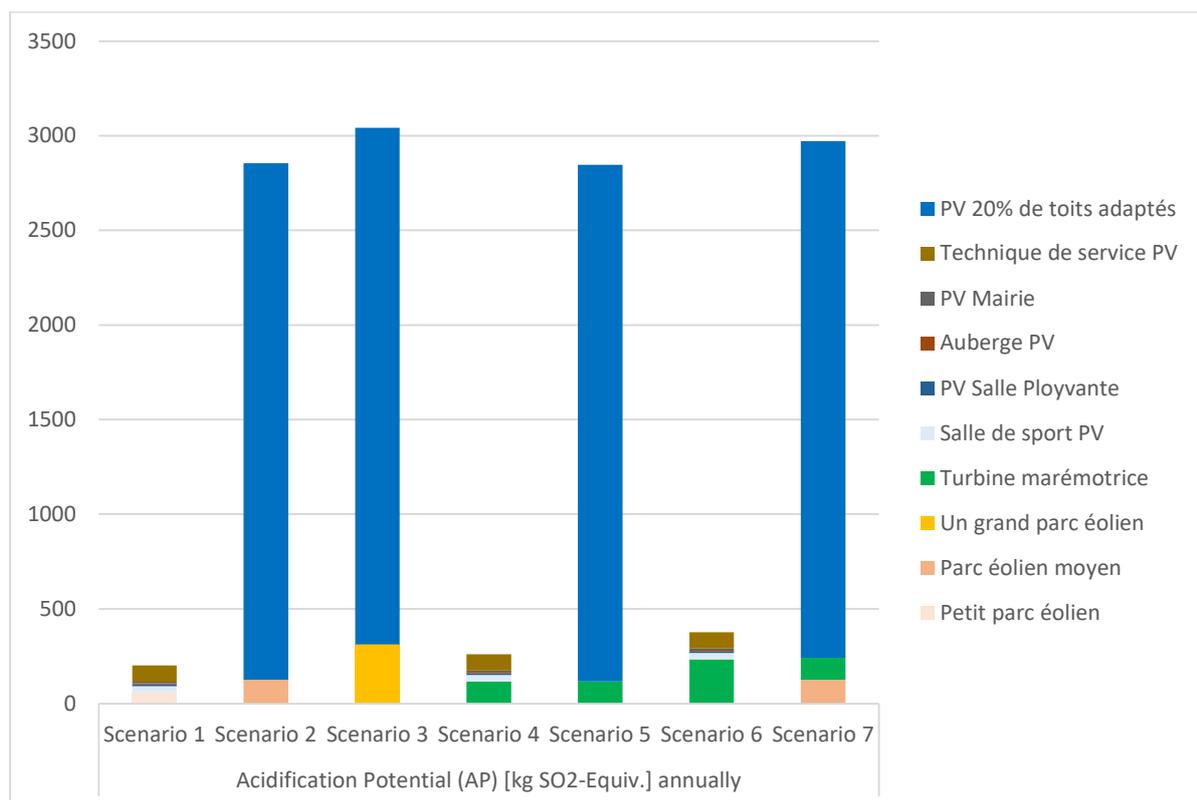


Figure 14 Résultats analytiques du scénario pour AP

Le scénario qui couvre la demande et maintient simultanément les impacts du PA au niveau le plus bas possible est le scénario 2, suivi des scénarios 7 et 3.



4.2.4 Potentiel d'eutrophisation (PE)

Le PE montre l'accumulation de nutriments dans les systèmes aquatiques et est lié à l'atteinte à la qualité des écosystèmes. Il est mesuré en kg d'équivalent Phosphate PO_4^{3-} . Les scénarios qui obtiennent les meilleurs résultats sont ceux qui génèrent également plus d'électricité, ce qui est prévisible puisque davantage de ressources seraient nécessaires pour créer plus de dispositifs. En outre, l'installation technologique qui contribue le plus est le photovoltaïque étendu sur 20 % des toits appropriés, ce qui est attendu jusqu'à un certain point car les photovoltaïques montés sur les toits ont des valeurs de PE par kWh produit environ 19 fois plus élevées que l'hydrolienne et quatre à six fois plus élevées que les éoliennes. Par conséquent, le scénario 5, qui ne produit pas une quantité suffisante d'électricité, obtient tout de même des valeurs proches des plus élevées.

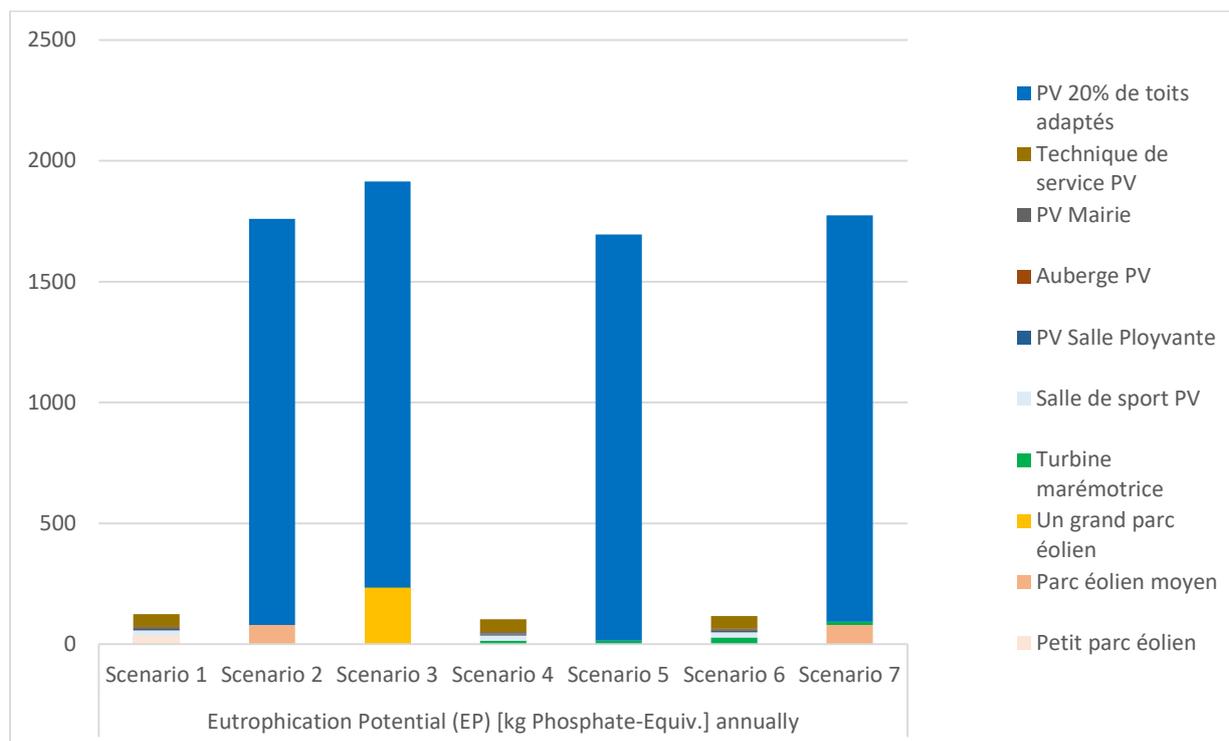


Schéma 15 Résultats analytiques du scénario pour EP

Le scénario qui couvre la demande et maintient simultanément les impacts du PE au niveau le plus bas possible est le scénario 2, suivi des scénarios 7 et 3.



4.2.5 Potentiel d'écotoxicité en eau douce (FAETP)

Le FAETP montre les effets toxiques des produits chimiques sur un écosystème aquatique d'eau douce et est lié aux dommages causés à la qualité de l'écosystème et à l'extinction des espèces. Il est mesuré en kg d'équivalent 1,4 — dichlorobenzène (1,4 — DB). Les scénarios qui obtiennent les meilleurs résultats sont ceux qui génèrent également plus d'électricité, ce qui est prévisible car il faudrait davantage de ressources pour créer plus de dispositifs. En outre, l'installation technologique qui contribue le plus est le photovoltaïque étendu sur 20 % des toits appropriés, ce qui est attendu jusqu'à un certain point car les photovoltaïques montés sur les toits ont des valeurs FAETP par kWh produit environ 37 fois plus élevées que l'hydrolienne et trois à sept fois plus élevées que les éoliennes. Par conséquent, le scénario 5, qui ne produit pas une quantité adéquate d'électricité, obtient tout de même les valeurs les plus élevées.

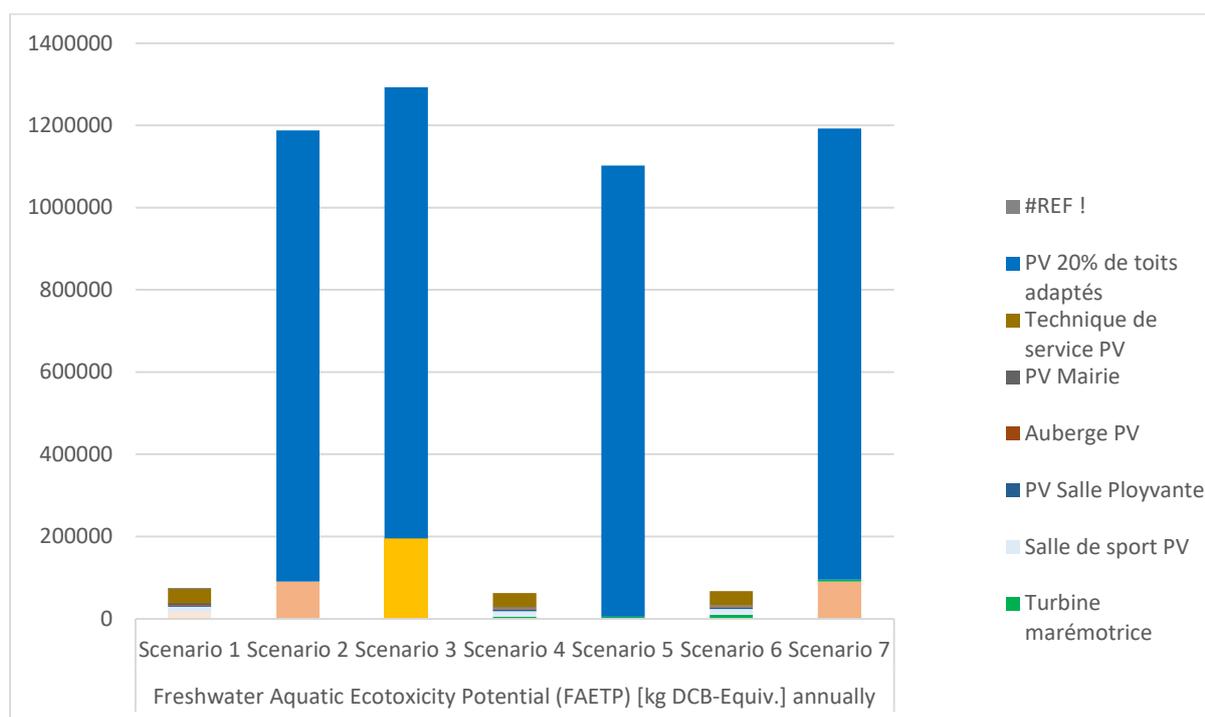


Schéma 16 Résultats analytiques du scénario pour FAETP

Le scénario qui couvre la demande et maintient simultanément les impacts du FAETP au niveau le plus bas possible est le scénario 2, suivi des scénarios 7 et 3.



4.2.6 Potentiel de réchauffement de la planète (PRP 100 ans)

Le PRP indique l'altération de la température globale causée par les gaz à effet de serre et est lié aux dommages causés à la diminution de la biodiversité en général, aux perturbations de la température et à l'anomalie des phénomènes climatiques (par exemple, des cyclones plus puissants, des tempêtes torrentielles, etc.) Il est mesuré en kg d'équivalent dioxyde de carbone CO₂-eq. Les scénarios qui obtiennent un score plus élevé sont ceux qui génèrent également plus d'électricité, ce qui est attendu car il faudrait pour cela davantage de ressources pour créer plus de dispositifs. En outre, l'installation technologique qui contribue le plus est le photovoltaïque étendu sur 20 % des toits appropriés, ce qui est attendu jusqu'à un certain point car les photovoltaïques montés sur les toits ont des valeurs de PRP par kWh produit environ deux fois plus élevées que l'hydrolienne et trois à six fois plus élevées que les éoliennes. Par conséquent, le scénario 5, qui ne produit pas une quantité suffisante d'électricité, obtient tout de même les valeurs les plus élevées.

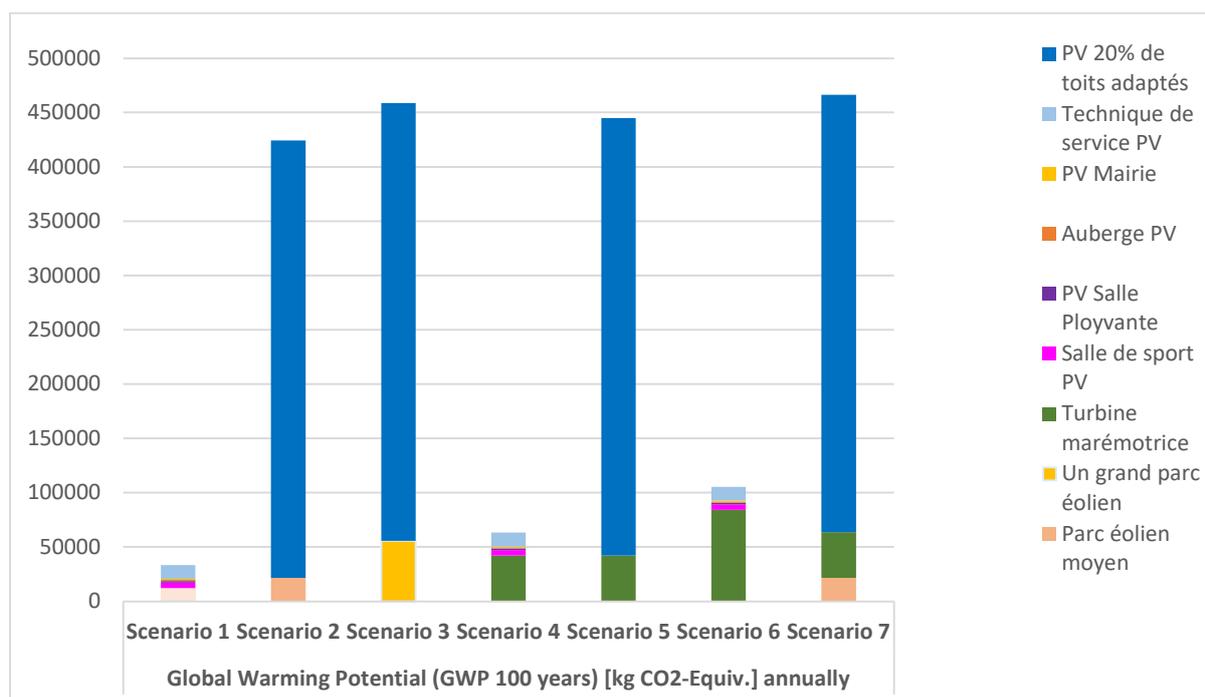


Schéma 17 Résultats analytiques des scénarios pour le PRP

Le scénario qui couvre la demande et maintient simultanément les impacts du PRP au niveau le plus bas possible est le scénario 2, suivi des scénarios 3 et 7.



4.2.7 Potentiel d'écotoxicité en milieu marin (MAETP)

Le MAETP montre les effets toxiques des produits chimiques sur un écosystème aquatique marin et est lié aux dommages causés à la qualité de l'écosystème et à l'extinction des espèces. Il est mesuré en kg d'équivalent 1,4 — dichlorobenzène (1,4 — DCB). Les scénarios qui obtiennent les meilleurs résultats sont ceux qui génèrent également plus d'électricité, ce qui est prévisible car il faudrait davantage de ressources pour créer plus de dispositifs. En outre, l'installation technologique qui contribue le plus est le photovoltaïque étendu sur 20 % des toits appropriés, ce qui est attendu jusqu'à un certain point car les photovoltaïques montés sur les toits ont des valeurs MAETP par kWh produit environ 34 fois plus élevées que l'hydrolienne et cinq à sept fois plus élevées que les éoliennes. Par conséquent, le scénario 5, qui ne produit pas une quantité adéquate d'électricité, obtient tout de même les valeurs les plus élevées.

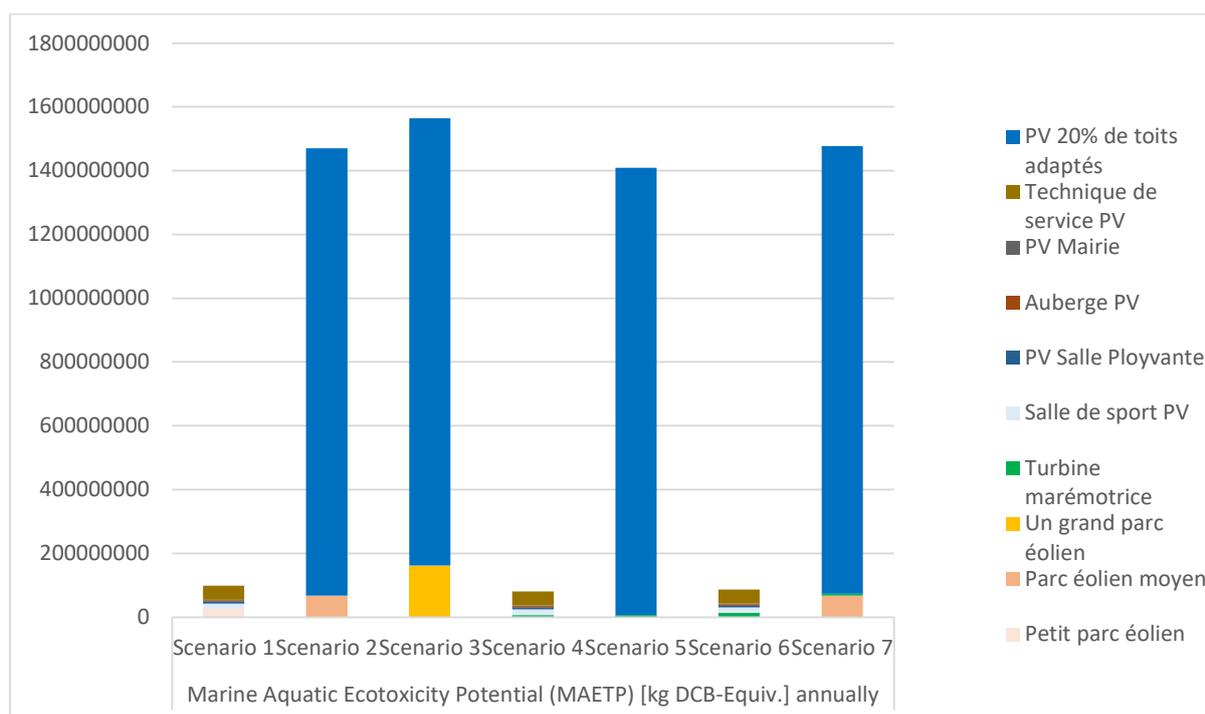


Schéma 18 Résultats analytiques du scénario pour MAETP

Le scénario qui couvre la demande et maintient simultanément les impacts du MAETP au niveau le plus bas possible est le scénario 2, suivi des scénarios 7 et 3.



4.2.8 Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (ODP)

L'ODP indique la diminution de la couche d'ozone stratosphérique due aux émissions anthropiques de substances appauvrissant la couche d'ozone et est lié aux dommages causés à la qualité des écosystèmes et à la santé humaine. Il est mesuré en kg d'équivalent trichlorofluorométhane R-11. Les scénarios qui obtiennent les meilleurs résultats sont ceux qui génèrent également plus d'électricité, ce qui est prévisible puisque davantage de ressources seraient nécessaires pour créer plus d'appareils. En outre, l'installation technologique qui contribue le plus est le photovoltaïque étendu sur 20 % des toits appropriés, ce qui est attendu jusqu'à un certain point car les photovoltaïques montés sur les toits ont des valeurs ODP par kWh produit environ trois fois plus élevées que l'hydrolienne et cinq à huit fois plus élevées que les éoliennes. Par conséquent, le scénario 5, qui ne produit pas une quantité suffisante d'électricité, obtient tout de même des résultats proches des valeurs les plus élevées.

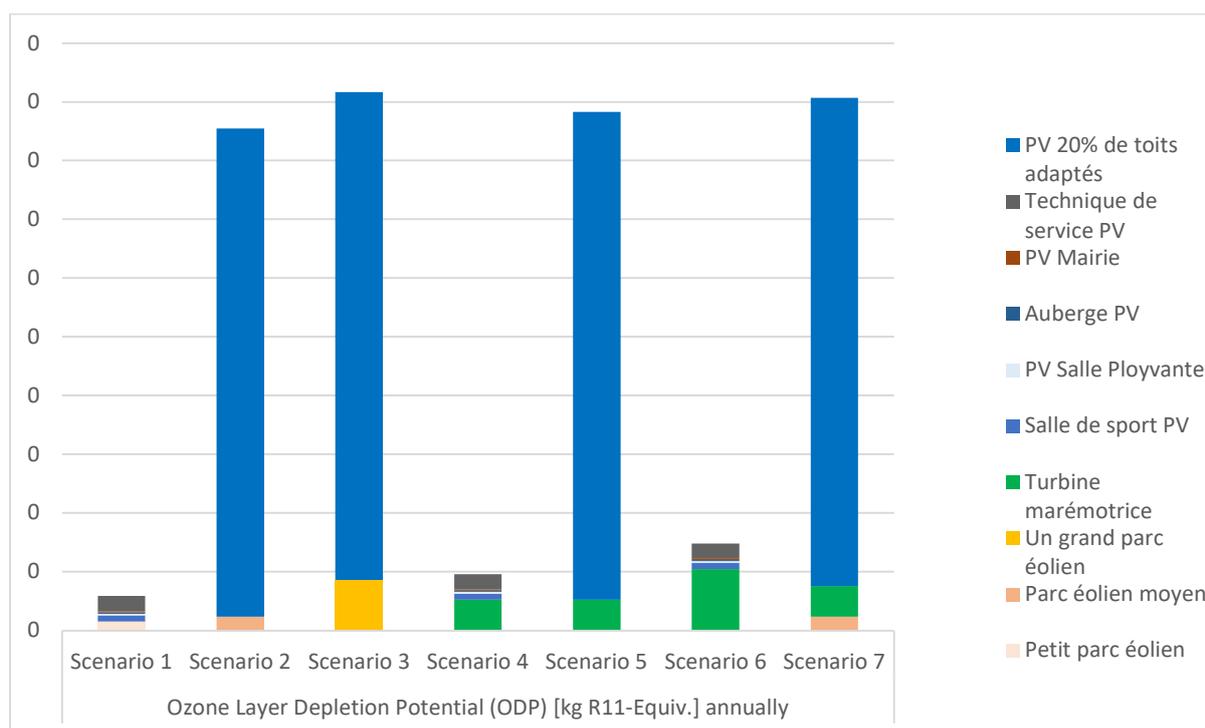


Schéma 19 Résultats analytiques du scénario pour le PAO

Le scénario qui couvre la demande et maintient simultanément les impacts PAO au niveau le plus bas possible est le scénario 2, suivi des scénarios 7 et 3.



4.2.9 Potentiel de création d'ozone photochimique (POCP)

Le POCP indique le type de smog créé par l'effet de la lumière du soleil, de la chaleur, des COVNM et des NOx. Il est lié aux dommages causés à la qualité de l'écosystème et à la santé humaine et est mesuré en kg d'équivalent éthylène. Les scénarios qui obtiennent les meilleurs résultats sont ceux qui génèrent également plus d'électricité, ce qui est prévisible puisque davantage de ressources seraient nécessaires pour créer plus de dispositifs. En outre, l'installation technologique qui contribue le plus est le photovoltaïque étendu sur 20 % des toits appropriés, ce qui est attendu jusqu'à un certain point car les photovoltaïques montés sur les toits ont des valeurs POCP par kWh produit environ trois fois plus élevées que l'hydrolienne et trois à cinq fois plus élevées que les éoliennes. Par conséquent, le scénario 5, qui ne génère pas une quantité adéquate d'électricité, obtient tout de même les valeurs les plus élevées.

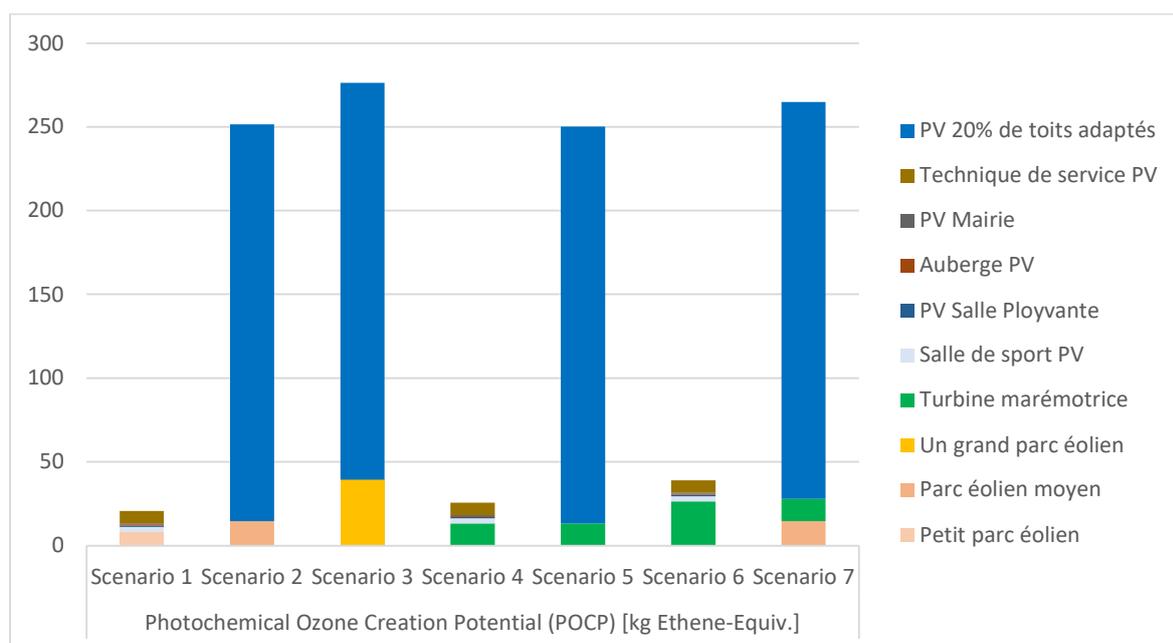


Schéma 20 Résultats analytiques du scénario pour POCP

Le scénario qui couvre la demande et maintient simultanément les impacts POCP au niveau le plus bas possible est le scénario 2, suivi des scénarios 7 et 3.



4.2.10 Potentiel d'écotoxicité terrestre (TETP)

Le TETP montre les effets toxiques des produits chimiques sur un écosystème terrestre et est lié aux dommages causés à la qualité de l'écosystème et à l'extinction des espèces. Il est mesuré en kg d'équivalent 1,4 — dichlorobenzène (1,4 — DCB). Les scénarios qui obtiennent les meilleurs résultats sont ceux qui génèrent également plus d'électricité, ce qui est prévisible car il faudrait plus de ressources pour créer plus de dispositifs. En outre, l'installation technologique qui contribue le plus est le photovoltaïque étendu sur 20 % des toits appropriés, mais cette fois la différence avec les autres scénarios n'est pas si grande, car les photovoltaïques montés sur le toit ont des valeurs TETP par kWh produit environ quatre fois plus élevées que l'hydrolienne, mais elles ont des valeurs jusqu'à trois fois plus faibles que les éoliennes. Le scénario 5, qui ne produit pas une quantité suffisante d'électricité, obtient tout de même les valeurs les plus élevées.

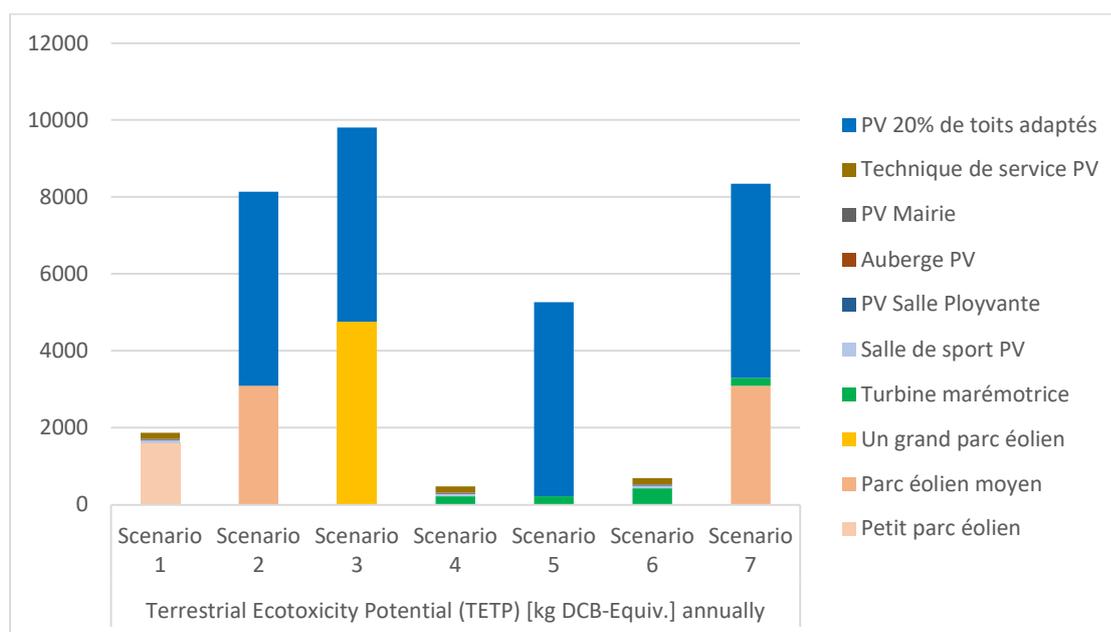


Schéma 21 Résultats analytiques du scénario pour TETP

Le scénario qui couvre la demande et maintient simultanément les impacts du TETP au niveau le plus bas possible est le scénario 2, suivi des scénarios 7 et 3.



4.3 Social

La partie sociale de l'évaluation comprend le HTP et les métaux et plastiques éliminés en fin de vie. D'autres impacts de l'ACV pourraient également être inclus ici, comme le POCP, l'ODP, etc., car leurs dommages ne concernent pas seulement l'écosystème mais aussi la santé humaine, mais le HTP est celui qui a un impact sur la santé humaine exclusivement.

4.3.1 Potentiel de toxicité humaine (HTP)

Le HTP montre les effets toxiques des produits chimiques sur les humains et est lié aux dommages causés à la santé humaine. Il est mesuré en kg d'équivalent 1,4 — dichlorobenzène (1,4 — DCB). Les scénarios qui obtiennent les meilleurs résultats sont ceux qui génèrent également plus d'électricité, ce qui est prévisible car il faudrait plus de ressources pour créer plus d'appareils. En outre, l'installation technologique qui contribue le plus est le photovoltaïque étendu sur 20 % des toits appropriés, ce qui est attendu jusqu'à un certain point car les photovoltaïques montés sur les toits ont des valeurs HTP par kWh produit environ 12 fois plus élevées que l'hydrolienne et deux à quatre fois plus élevées que les éoliennes. Par conséquent, le scénario 5, qui ne produit pas une quantité suffisante d'électricité, obtient tout de même des valeurs proches des plus élevées.

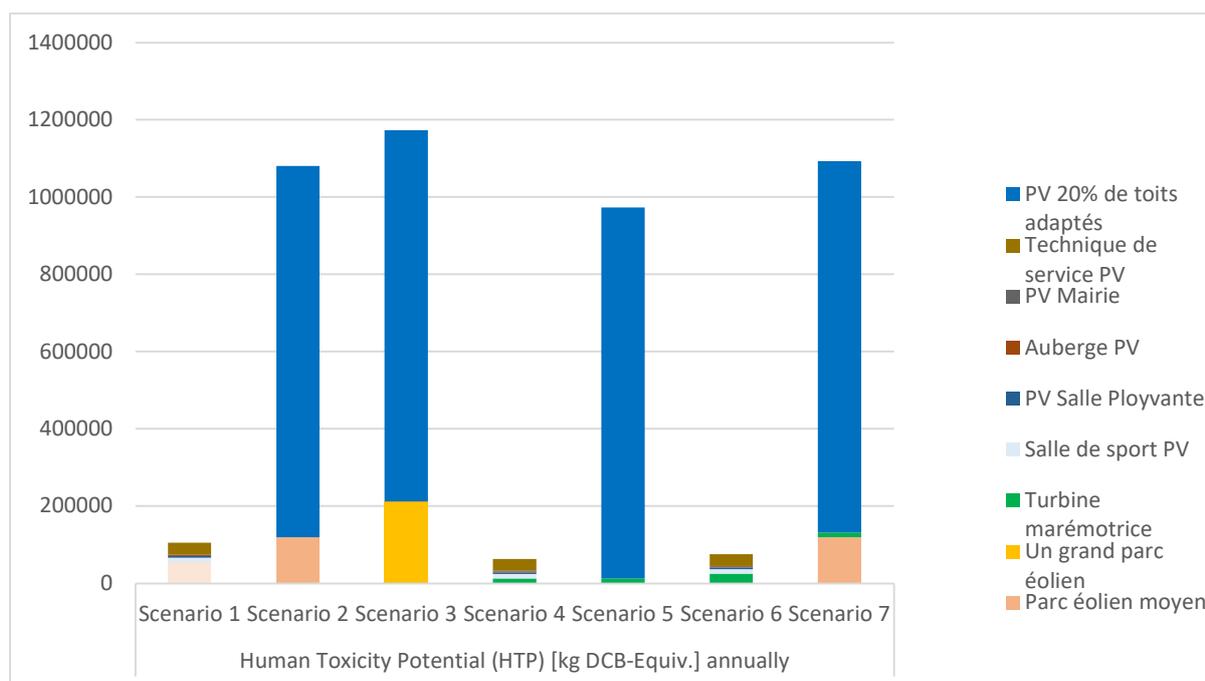


Schéma 22 Résultats analytiques du scénario pour le HTP



Le scénario qui permet à la fois de couvrir la demande et de maintenir les incidences sur les PTH au niveau le plus bas possible est le scénario 2, suivi des scénarios 7 et 3.

4.3.2 Le métal en fin de vie

Les métaux en fin de vie ne constituent pas une mesure normalisée comme les catégories d'impact du cycle de vie présentées précédemment. Néanmoins, étant donné que les métaux peuvent être un matériau présentant des caractéristiques de recyclabilité et de valorisation élevées, il peut être très utile pour les parties prenantes d'avoir une vue d'ensemble des métaux éliminés à la fin de la durée de vie du dispositif. D'un autre côté, ils constituent toujours un déchet qui doit être collecté et géré de manière appropriée. Les scénarios qui obtiennent les meilleurs résultats sont ceux qui génèrent également plus d'électricité, ce qui est prévisible puisque davantage de ressources seraient nécessaires pour créer plus d'appareils. Cette fois, cependant, la troisième position est pour le scénario 6 et non le scénario 3. Cela s'explique par le fait que l'installation technologique qui contribue le plus est l'hydrolienne, ce qui est attendu jusqu'à un certain point car elle a des valeurs par kWh généré environ cinq fois plus élevées que le photovoltaïque et trois à six fois plus élevées que les éoliennes.

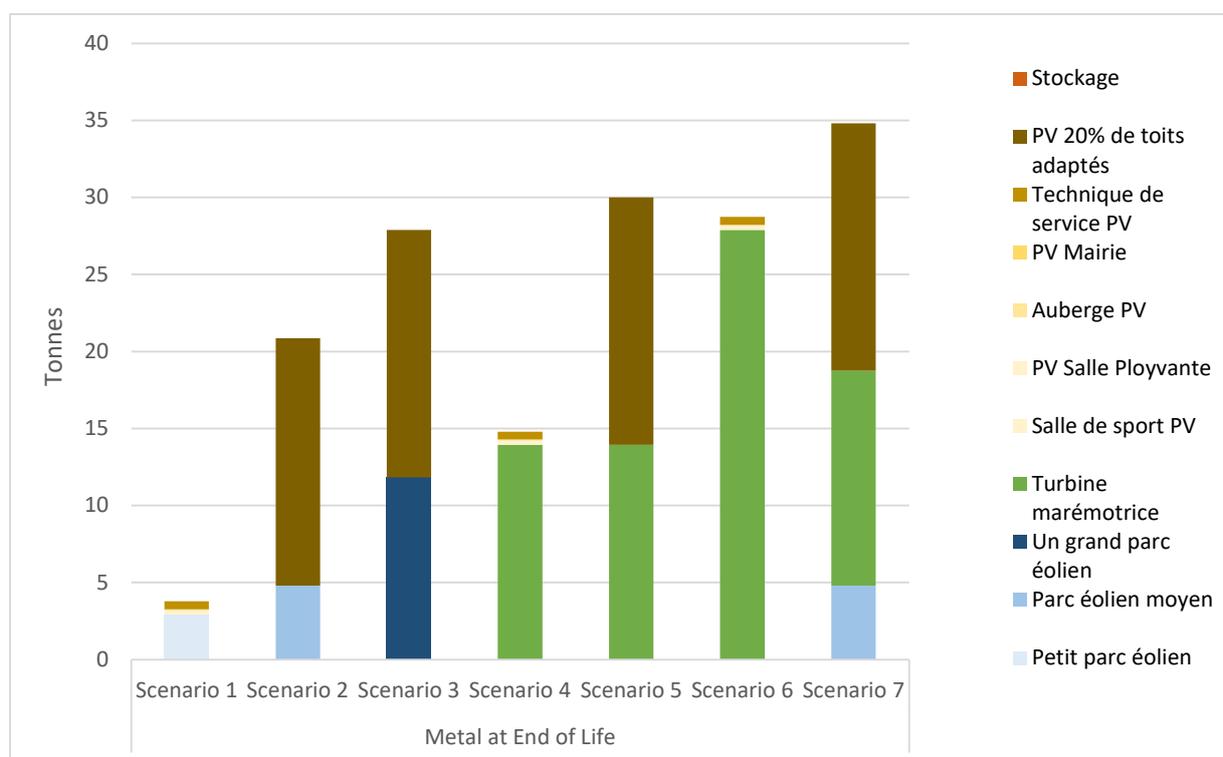


Figure 23 Résultats analytiques du scénario pour les métaux éliminés en fin de vie



Le scénario qui couvre la demande et maintient simultanément la masse des métaux éliminés au niveau le plus bas possible est le scénario 2, suivi des scénarios 3 et 7.

4.3.3 Plastiques (y compris les composites) en fin de vie

Les plastiques, comme les métaux en fin de vie, ne constituent pas une mesure standardisée comme les catégories d'impact du cycle de vie présentées précédemment. Malheureusement, jusqu'à présent, les plastiques ne sont pas, comme les métaux, des matériaux présentant des caractéristiques élevées de recyclabilité et de valorisation. Cependant, même s'il s'agit d'une forme de déchet difficile à manipuler et à valoriser, la connaissance de leur masse est très utile aux parties prenantes pour avoir une vue d'ensemble des plastiques éliminés à la fin de la durée de vie de l'appareil. Les scénarios qui obtiennent les meilleurs résultats sont ceux qui génèrent également plus d'électricité, ce qui est prévisible puisque davantage de ressources seraient nécessaires pour créer plus d'appareils. Cette fois-ci, cependant, la troisième position est attribuée au scénario 5 et non au scénario 3. Bien que l'installation technologique qui contribue le plus est le photovoltaïque monté sur le toit, les turbines marémotrices ont des valeurs par kWh généré environ deux fois plus élevées que le photovoltaïque et trois à sept fois plus élevées que les turbines éoliennes.

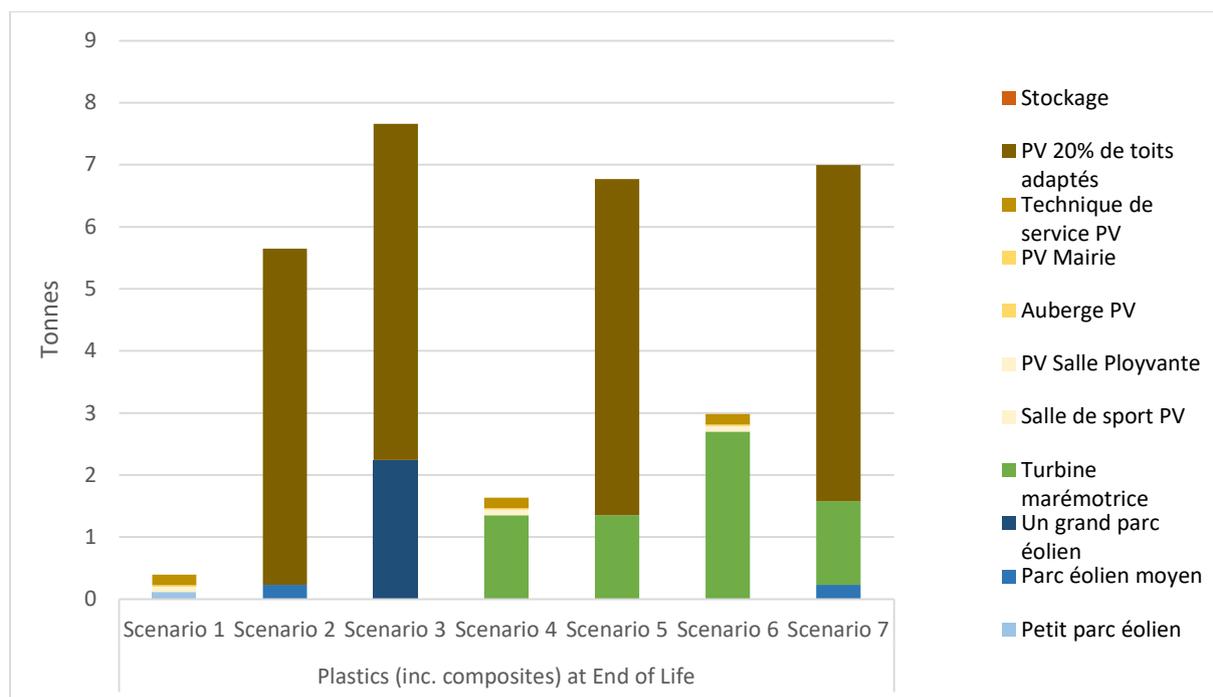


Schéma 24 Résultats des analyses de scénarios pour les plastiques éliminés en fin de vie

Le scénario qui couvre la demande et maintient simultanément la masse des plastiques éliminés au niveau le plus bas possible est le scénario 2, suivi des scénarios 7 et 3.



5 Conclusion

Les résultats récapitulatifs de l'étude de cas d'Ouessant montrent qu'il existe des scénarios qui peuvent réduire tous les scores pour les impacts des indicateurs de durabilité et donc utiliser les énergies renouvelables et obtenir une meilleure durabilité du point de vue du cycle de vie. Cependant, compte tenu du fait que seuls les scénarios 2, 3 et 7 peuvent atteindre le même niveau de production d'électricité, il est intéressant de les examiner de plus près. Il apparaît alors qu'ils obtiennent un score inférieur à celui du scénario BAU pour toutes les catégories, à l'exception des éléments ADP et de l'écotoxicité de l'eau douce, marine et terrestre. Une explication possible de cette exception pourrait être que les générateurs diesel existants nécessitent beaucoup moins de matériaux pour être fabriqués en tant que dispositif que les autres. En comparant les scénarios entre eux, on constate que le scénario 2 est celui qui génère une quantité adéquate d'électricité tout en maintenant les autres impacts au niveau le plus bas possible, suivi de très près par les scénarios 3 et 7. Le scénario 2 est celui qui fait un usage intensif de l'énergie photovoltaïque et d'une éolienne de taille moyenne, ce qui pourrait faire passer le message qu'un dimensionnement approprié et surtout l'absence de surdimensionnement sont essentiels.

En ce qui concerne la méthode LCSF et le modèle iCELTIC, ils peuvent faciliter l'étude et soutenir le développement de scénarios d'énergie renouvelable plus complets. Les actions futures peuvent inclure le développement de scénarios pour différentes îles et/ou des scénarios qui utilisent d'autres composants du modèle tels que le photovoltaïque au sol, le stockage, etc.



6 Références

- Bauer, L., Matysik, S., n.d. Nordex N50 — 800,00 kW - Éolienne .pdf [Document WWW]. Modèle d'éolienne. URL <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/392-nordex-n50> (consulté le 5.7.20a).
- Bauer, L., Matysik, S., s.d. Enercon E-30 — 300,00 kW — Éolienne [Document WWW]. Modèle d'éolienne. URL <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/376-enercon-e-30> (consulté le 5.8.20b).
- BEIS, 2016. Rapport sur les coûts de production d'électricité. Département des affaires, de l'énergie et de la stratégie industrielle, Royaume-Uni.
- ENERCON GmbH, 2016. E-53 [Document WWW]. URL <https://www.enercon.de/en/products/ep-1/e-53/>
- Fitch-Roy, O., Connor, P., 2018. Rapport ICE T1.1.2 Questions de politique générale : Un aperçu de la politique des énergies renouvelables et des considérations réglementaires à Ouessant et sur le campus de l'UEA (rapport de projet ICE n° T1.1.2).
- Guinée, J. (Ed.), 2002. Manuel sur l'analyse du cycle de vie : Guide opérationnel des normes ISO, Efficacité dans l'industrie et la science. Springer Pays-Bas.
- Hardwick, J., Smith, H., Fitch-Roy, O., Connor, P., Sundaram, S., 2018a. Rapport T1.1.1 de la CIE : Une vue d'ensemble du potentiel d'approvisionnement en énergies renouvelables (rapport de projet ICE n° T 1.1.1).
- Hardwick, J., Zheng, S., Smith, H.C.M., Fitch-Roy, O., Williams, J., Connor, P.M., Sundaram, S., Iglesias, G., 2018b. Rapport ICE T1.4 : Une évaluation spécifique à la communauté de l'énergie locale. Université d'Exeter, Royaume-Uni.
- Howell, R.J., Walker, S., Hodgson, P., Griffin, a., 2013. Machines à énergie marémotrice : Une évaluation comparative du cycle de vie. Proc. Inst. Mech. Eng. Part M J. Eng. Marit. Environ. 229, 124-140. <https://doi.org/10.1177/1475090213506184>
- Organisation internationale de normalisation, 2006. ISO 14 044 : 2006 — Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Exigences et lignes directrices.
- Lazard, 2015. Analyse du coût nivelé de stockage de Lazard.
- Mahmood, H., Hussain, E., Xu, J., Abusara, M., Thies, P., Nerenzi, E., Connor, P., 2019. Rapport T1.2 de la CIE : Analyse des options de réseau intelligent et de stockage dans un contexte d'évaluation de la demande. Université d'Exeter, Royaume-Uni.
- Myhr, A., Bjerkseter, C., Aagotnes, A., Nygaard, T. a., 2014. Coût nivelé de l'énergie pour les éoliennes flottantes offshore dans une perspective de cycle de vie. Renouveler. Énergie 66, 714-728. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.01.017>
- Thinkstep A.G., 2019. GaBi. Baden-Württemberg, Allemagne.
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., Weidema, B., 2016. La base de données ecoinvent version 3 (partie I) : aperçu et méthodologie. Int. J. Life Cycle Assess. 21, 1218-1230. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>



Annexe A LCI des hydroliennes

Tableau 8 Intrants matériels et énergétiques pour le modèle d'ACV de l'hydrolienne

Intrant matériel/énergie	Quantité	Unité
Pièce en fonte [Pièces métalliques]	8300	kg
Ciment (CEM I) [Minerais]	147 300	kg
Fil de cuivre [Métaux]	6200	kg
Électricité [Énergie électrique]	1 700 000	MJ
Fibres de verre [Minéraux]	26 100	kg
Tubes en polyéthylène (PE) [Pièces en plastique]	900	kg
Tôle d'acier [Métaux]	113 900	kg
Profilés en acier [Métaux]	75 700	kg
Tuyau soudé en acier [Métaux]	73 200	kg
Fil machine en acier [Métaux]	1500	kg
Capacité de transport [Autres]	75 300 000	kgkm



Annexe B Tableaux des résultats analytiques du scénario Ouessant

Tableau 9 Résultats analytiques des scénarios pour le coût nivelé de l'électricité

	Business as Usual	Levelised Cost of Electricity [GBP] annually						
		Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5	Scenario 6	Scenario 7
Total	2.10E+06	2.38E+05	9.42E+05	1.22E+06	4.64E+05	8.46E+05	9.10E+05	1.39E+06
Wind farm small		2.19E+05						
Wind farm medium			5.41E+05					5.41E+05
Wind farm large				8.21E+05				
Tidal turbine					4.45E+05	4.45E+05	8.91E+05	4.45E+05
PV Sports Hall		5.98E+03			5.98E+03		5.98E+03	
PV Salle Ployvante		1.48E+03			1.48E+03		1.48E+03	
PV Auberge		8.76E+02			8.76E+02		8.76E+02	
PV Mairie		1.00E+03			1.00E+03		1.00E+03	
PV Service Technique		9.68E+03			9.68E+03		9.68E+03	
PV 20% suitable rooftops			4.01E+05	4.01E+05		4.01E+05		4.01E+05
-								
-								
-								
-								
-								
-								
-								
-								
Storage		0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00



Tableau 10 Résultats analytiques du scénario pour les éléments du TAD

	Business as Usual	Abiotic Depletion Potential (ADP elements) [kg Sb-Equiv.] annually						
		Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5	Scenario 6	Scenario 7
Total	1.29E+00	1.05E+00	1.70E+01	1.80E+01	1.13E+00	1.70E+01	1.39E+00	1.73E+01
Wind farm small		1.76E-01						
Wind farm medium			3.38E-01					3.38E-01
Wind farm large				1.31E+00				
Tidal turbine					2.56E-01	2.56E-01	5.12E-01	2.56E-01
PV Sports Hall		2.09E-01			2.09E-01		2.09E-01	
PV Salle Ployvante		6.12E-02			6.12E-02		6.12E-02	
PV Auberge		4.08E-02			4.08E-02		4.08E-02	
PV Mairie		4.18E-02			4.18E-02		4.18E-02	
PV Service Technique		5.24E-01			5.24E-01		5.24E-01	
PV 20% suitable rooftops			1.67E+01	1.67E+01		1.67E+01		1.67E+01
-								
-								
-								
-								
-								
-								
-								
Storage		0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00



Tableau 11 Résultats analytiques des scénarios pour ADP fossiles

	Abiotic Depletion Potential (ADP fossil) [MJ] annually							
	Business as Usual	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5	Scenario 6	Scenario 7
Total	8.44E+07	4.53E+05	5.75E+06	6.27E+06	6.91E+05	5.86E+06	1.10E+06	6.16E+06
Wind farm small		1.67E+05						
Wind farm medium			2.94E+05					2.94E+05
Wind farm large				8.16E+05				
Tidal turbine					4.05E+05	4.05E+05	8.09E+05	4.05E+05
PV Sports Hall		6.82E+04			6.82E+04		6.82E+04	
PV Salle Ployvante		2.00E+04			2.00E+04		2.00E+04	
PV Auberge		1.33E+04			1.33E+04		1.33E+04	
PV Mairie		1.36E+04			1.36E+04		1.36E+04	
PV Service Technique		1.71E+05			1.71E+05		1.71E+05	
PV 20% suitable rooftops			5.46E+06	5.46E+06		5.46E+06		5.46E+06
-								
-								
-								
-								
-								
-								
-								
Storage		0.00E+00						



Tableau 12 Résultats analytiques du scénario pour le PA

	Business as Usual	Acidification Potential (AP) [kg SO ₂ -Equiv.] annually						
		Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5	Scenario 6	Scenario 7
Total	6.13E+04	2.01E+02	2.85E+03	3.04E+03	2.60E+02	2.85E+03	3.76E+02	2.97E+03
Wind farm small		5.78E+01						
Wind farm medium			1.25E+02					1.25E+02
Wind farm large				3.13E+02				
Tidal turbine					1.17E+02	1.17E+02	2.33E+02	1.17E+02
PV Sports Hall		3.41E+01			3.41E+01		3.41E+01	
PV Salle Ployvante		1.00E+01			1.00E+01		1.00E+01	
PV Auberge		6.67E+00			6.67E+00		6.67E+00	
PV Mairie		6.82E+00			6.82E+00		6.82E+00	
PV Service Technique		8.57E+01			8.57E+01		8.57E+01	
PV 20% suitable rooftops			2.73E+03	2.73E+03		2.73E+03		2.73E+03
-								
-								
-								
-								
-								
-								
-								
-								
Storage		0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00



Tableau 13 Résultats analytiques des scénarios pour le PE

	Eutrophication Potential (EP) [kg Phosphate-Equiv.] annually							
	Business as Usual	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5	Scenario 6	Scenario 7
Total	1.52E+04	1.24E+02	1.76E+03	1.91E+03	1.02E+02	1.70E+03	1.17E+02	1.77E+03
Wind farm small		3.61E+01						
Wind farm medium			7.86E+01					7.86E+01
Wind farm large				2.33E+02				
Tidal turbine					1.42E+01	1.42E+01	2.84E+01	1.42E+01
PV Sports Hall		2.10E+01			2.10E+01		2.10E+01	
PV Salle Ployvante		6.16E+00			6.16E+00		6.16E+00	
PV Auberge		4.11E+00			4.11E+00		4.11E+00	
PV Mairie		4.20E+00			4.20E+00		4.20E+00	
PV Service Technique		5.28E+01			5.28E+01		5.28E+01	
PV 20% suitable rooftops			1.68E+03	1.68E+03		1.68E+03		1.68E+03
-								
-								
-								
-								
-								
-								
-								
-								
Storage		0.00E+00						



Tableau 14 Résultats analytiques du scénario pour le FAETP

	Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential (FAETP) [kg DCB-Equiv.] annually							
	Business as Usual	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5	Scenario 6	Scenario 7
Total	1.59E+05	7.32E+04	1.19E+06	1.29E+06	6.24E+04	1.10E+06	6.72E+04	1.19E+06
Wind farm small		1.56E+04						
Wind farm medium			9.03E+04					9.03E+04
Wind farm large				1.95E+05				
Tidal turbine					4.81E+03	4.81E+03	9.62E+03	4.81E+03
PV Sports Hall		1.37E+04			1.37E+04		1.37E+04	
PV Salle Ployvante		4.02E+03			4.02E+03		4.02E+03	
PV Auberge		2.68E+03			2.68E+03		2.68E+03	
PV Mairie		2.74E+03			2.74E+03		2.74E+03	
PV Service Technique		3.44E+04			3.44E+04		3.44E+04	
PV 20% suitable rooftops			1.10E+06	1.10E+06		1.10E+06		1.10E+06
-								
-								
-								
-								
-								
-								
-								
-								
Storage		0.00E+00						



Tableau 15 Résultats analytiques du scénario pour le PRP

	Global Warming Potential (GWP 100 years) [kg CO ₂ -Equiv.] annually							
	Business as Usual	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5	Scenario 6	Scenario 7
Total	5.97E+06	3.34E+04	4.24E+05	4.59E+05	6.32E+04	4.45E+05	1.05E+05	4.66E+05
Wind farm small		1.23E+04						
Wind farm medium			2.15E+04					2.15E+04
Wind farm large				5.57E+04				
Tidal turbine					4.20E+04	4.20E+04	8.41E+04	4.20E+04
PV Sports Hall		5.04E+03			5.04E+03		5.04E+03	
PV Salle Ployvante		1.48E+03			1.48E+03		1.48E+03	
PV Auberge		9.85E+02			9.85E+02		9.85E+02	
PV Mairie		1.01E+03			1.01E+03		1.01E+03	
PV Service Technique		1.26E+04			1.26E+04		1.26E+04	
PV 20% suitable rooftops			4.03E+05	4.03E+05		4.03E+05		4.03E+05
-								
-								
-								
-								
-								
-								
-								
Storage		0.00E+00						



Tableau 16 Résultats analytiques du scénario pour MAETP

	Marine Aquatic Ecotoxicity Potential (MAETP) [kg DCB-Equiv.] annually							
	Business as Usual	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5	Scenario 6	Scenario 7
Total	4.74E+08	9.91E+07	1.47E+09	1.56E+09	8.02E+07	1.41E+09	8.67E+07	1.48E+09
Wind farm small		2.54E+07						
Wind farm medium			6.75E+07					6.75E+07
Wind farm large				1.61E+08				
Tidal turbine					6.53E+06	6.53E+06	1.31E+07	6.53E+06
PV Sports Hall		1.75E+07			1.75E+07		1.75E+07	
PV Salle Ployvante		5.14E+06			5.14E+06		5.14E+06	
PV Auberge		3.43E+06			3.43E+06		3.43E+06	
PV Mairie		3.51E+06			3.51E+06		3.51E+06	
PV Service Technique		4.40E+07			4.40E+07		4.40E+07	
PV 20% suitable rooftops			1.40E+09	1.40E+09		1.40E+09		1.40E+09
-								
-								
-								
-								
-								
-								
-								
-								
Storage		0.00E+00						



Tableau 17 Résultats analytiques des scénarios pour le PAO

	Ozone Layer Depletion Potential (ODP) [kg R11-Equiv.] annually							
	Business as Usual	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5	Scenario 6	Scenario 7
Total	1.10E+00	2.94E-03	4.27E-02	4.58E-02	4.79E-03	4.42E-02	7.40E-03	4.53E-02
Wind farm small		7.57E-04						
Wind farm medium			1.18E-03					1.18E-03
Wind farm large				4.29E-03				
Tidal turbine					2.61E-03	2.61E-03	5.22E-03	2.61E-03
PV Sports Hall		5.19E-04			5.19E-04		5.19E-04	
PV Salle Ployvante		1.52E-04			1.52E-04		1.52E-04	
PV Auberge		1.02E-04			1.02E-04		1.02E-04	
PV Mairie		1.04E-04			1.04E-04		1.04E-04	
PV Service Technique		1.30E-03			1.30E-03		1.30E-03	
PV 20% suitable rooftops			4.15E-02	4.15E-02		4.15E-02		4.15E-02
-								
-								
-								
-								
-								
-								
-								
-								
Storage		0.00E+00						



Tableau 18 Résultats analytiques du scénario pour POCP

	Business as Usual	Photochemical Ozone Creation Potential (POCP) [kg Ethene-Equiv.]						
		Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5	Scenario 6	Scenario 7
Total	5.93E+03	2.06E+01	2.52E+02	2.76E+02	2.57E+01	2.50E+02	3.89E+01	2.65E+02
Wind farm small		8.15E+00						
Wind farm medium			1.46E+01					1.46E+01
Wind farm large				3.93E+01				
Tidal turbine					1.32E+01	1.32E+01	2.65E+01	1.32E+01
PV Sports Hall		2.96E+00			2.96E+00		2.96E+00	
PV Salle Ployvante		8.69E-01			8.69E-01		8.69E-01	
PV Auberge		5.79E-01			5.79E-01		5.79E-01	
PV Mairie		5.92E-01			5.92E-01		5.92E-01	
PV Service Technique		7.44E+00			7.44E+00		7.44E+00	
PV 20% suitable rooftops			2.37E+02	2.37E+02		2.37E+02		2.37E+02
-								
-								
-								
-								
-								
-								
-								
-								
Storage		0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00



Tableau 19 Résultats analytiques des scénarios pour le TETP

	Terrestrial Ecotoxicity Potential (TETP) [kg DCB-Equiv.] annually							
	Business as Usual	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5	Scenario 6	Scenario 7
Total	7.62E+03	1.87E+03	8.14E+03	9.81E+03	4.78E+02	5.26E+03	6.91E+02	8.35E+03
Wind farm small		1.60E+03						
Wind farm medium			3.09E+03					3.09E+03
Wind farm large				4.76E+03				
Tidal turbine					2.13E+02	2.13E+02	4.26E+02	2.13E+02
PV Sports Hall		6.31E+01			6.31E+01		6.31E+01	
PV Salle Ployvante		1.85E+01			1.85E+01		1.85E+01	
PV Auberge		1.23E+01			1.23E+01		1.23E+01	
PV Mairie		1.26E+01			1.26E+01		1.26E+01	
PV Service Technique		1.58E+02			1.58E+02		1.58E+02	
PV 20% suitable rooftops			5.05E+03	5.05E+03		5.05E+03		5.05E+03
-								
-								
-								
-								
-								
-								
-								
-								
Storage		0.00E+00						



Tableau 20 Résultats analytiques du scénario pour le HTP

	Human Toxicity Potential (HTP) [kg DCB-Equiv.] annually							
	Business as Usual	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5	Scenario 6	Scenario 7
Total	6.70E+05	1.05E+05	1.08E+06	1.17E+06	6.29E+04	9.73E+05	7.53E+04	1.09E+06
Wind farm small		5.47E+04						
Wind farm medium			1.19E+05					1.19E+05
Wind farm large				2.12E+05				
Tidal turbine					1.24E+04	1.24E+04	2.49E+04	1.24E+04
PV Sports Hall		1.20E+04			1.20E+04		1.20E+04	
PV Salle Ployvante		3.52E+03			3.52E+03		3.52E+03	
PV Auberge		2.35E+03			2.35E+03		2.35E+03	
PV Mairie		2.40E+03			2.40E+03		2.40E+03	
PV Service Technique		3.02E+04			3.02E+04		3.02E+04	
PV 20% suitable rooftops			9.61E+05	9.61E+05		9.61E+05		9.61E+05
-								
-								
-								
-								
-								
-								
-								
-								
Storage		0.00E+00						



Tableau 21 Résultats analytiques du scénario pour les métaux éliminés en fin de vie

	Business as Usual	Metal at End of Life						
		Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5	Scenario 6	Scenario 7
Total		3.78E+03	2.09E+04	2.79E+04	1.48E+04	3.00E+04	2.87E+04	3.48E+04
Wind farm small		2.93E+03						
Wind farm medium			4.79E+03					4.79E+03
Wind farm large				1.18E+04				
Tidal turbine					1.39E+04	1.39E+04	2.79E+04	1.39E+04
PV Sports Hall		2.01E+02			2.01E+02		2.01E+02	
PV Salle Ployvante		5.89E+01			5.89E+01		5.89E+01	
PV Auberge		3.93E+01			3.93E+01		3.93E+01	
PV Mairie		4.02E+01			4.02E+01		4.02E+01	
PV Service Technique		5.04E+02			5.04E+02		5.04E+02	
PV 20% suitable rooftops			1.61E+04	1.61E+04		1.61E+04		1.61E+04
-								
-								
-								
-								
-								
-								
-								
-								
Storage		0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00



Tableau 22 Résultats des analyses de scénarios pour les plastiques éliminés en fin de vie

	Business as Usual	Plastics (inc. composites) at End of Life						
		Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5	Scenario 6	Scenario 7
Total		3.97E+02	5.65E+03	7.66E+03	1.64E+03	6.77E+03	2.99E+03	7.00E+03
Wind farm small		1.13E+02						
Wind farm medium			2.28E+02					2.28E+02
Wind farm large				2.24E+03				
Tidal turbine					1.35E+03	1.35E+03	2.70E+03	1.35E+03
PV Sports Hall		6.77E+01			6.77E+01		6.77E+01	
PV Salle Ployvante		1.99E+01			1.99E+01		1.99E+01	
PV Auberge		1.32E+01			1.32E+01		1.32E+01	
PV Mairie		1.35E+01			1.35E+01		1.35E+01	
PV Service Technique		1.70E+02			1.70E+02		1.70E+02	
PV 20% suitable rooftops			5.42E+03	5.42E+03		5.42E+03		5.42E+03
-								
-								
-								
-								
-								
-								
-								
Storage		0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

