



## **Groupe de travail « environnement »**



Analyse des impacts environnementaux des  
scénarios du Bilan prévisionnel 2050

## Table des matières

1. Contexte et objectifs du groupe de travail.....	3
1.1 Cadre général : la construction de scénarios de mix électrique à horizon 2050 .....	3
1.2 Objectifs du groupe de travail : la discussion de la méthodologie et des hypothèses pour l'analyse environnementale des scénarios .....	4
1.3 Les principaux éléments de cadrage et questions soulevées .....	6
1.4 Les enjeux environnementaux à étudier.....	6
1.5 Un périmètre adéquat à identifier pour étudier un système complexe .....	8
2. Un tour d'horizon des méthodes d'analyse environnementale .....	11
2.1 L'empreinte écologique.....	11
2.2 Analyse cycle de vie (ACV).....	13
3. Illustration de la méthode d'analyse environnementale des scénarios : une étude pilote d'analyse du cycle de vie pour le mix électrique des scénarios du Bilan prévisionnel 2017 .....	18
3.1 Modélisation.....	19
3.2 Résultats obtenus sur l'impact environnemental des scénarios du BP 2017 .....	22
3.3 Enseignements issus de l'étude-pilote.....	28
4. Pistes méthodologiques pour l'analyse environnementale des mix de production des scénarios du bilan prévisionnel 2050 .....	33
4.1 Frontières du système étudié.....	33
4.2 Méthode pour réaliser l'analyse cycle de vie des mix de production.....	33
4.3 Choix des indicateurs.....	33
4.4 Caractère prospectif .....	36
5. Bibliographie.....	37

## 1. Contexte et objectifs du groupe de travail

### 1.1 Cadre général : la construction de scénarios de mix électrique à horizon 2050

Dans le cadre de ses missions prévues par le Code de l'énergie, RTE établit périodiquement un Bilan prévisionnel pluriannuel de l'équilibre entre l'offre et la demande d'électricité en France. Celui-ci contribue à l'élaboration de la politique énergétique, en éclairant le paysage du système électrique à long terme.

Pour répondre à des demandes de certaines parties prenantes, le prochain Bilan prévisionnel à long terme intégrera un volet portant sur l'horizon 2050 et proposera des scénarios d'évolution possibles du mix électrique français, dans un contexte de transition énergétique et d'ambition de l'atteinte de la neutralité carbone de la France à ce même horizon, portée par la Stratégie nationale bas carbone (SNBC).

Les premiers éléments de cadrage pour la construction des scénarios à horizon 2050 ont été présentés par RTE et discutés avec l'ensemble des parties prenantes au cours des réunions plénières de la Commission perspectives système et réseau (CPSR)<sup>1</sup> des 17 mai et 27 septembre 2019.

La gouvernance des travaux d'élaboration des scénarios 2050 est articulée autour de plusieurs piliers, visant notamment à renforcer la transparence et la robustesse des analyses :

- **des groupes de travail** lancés dès juin 2019 et réunissant l'ensemble des experts et parties prenantes intéressées sur des thématiques précises, notamment : la consommation, la base climatique, la scénarisation, le couplage entre les différents vecteurs, la modélisation de la production, les flexibilités, l'acceptabilité sociétale ou encore l'inertie et la stabilité du réseau...
- **une consultation publique** très large, structurée sous forme d'appels à contributions prévus pour le printemps 2020 et qui viendront enrichir les échanges initiés dans les premiers groupes de travail ;
- **la CPSR**, qui servira d'instance de cadrage stratégique des travaux, et d'arbitrage des orientations.

De nombreuses réunions des groupes de travail ont déjà eu lieu ou sont programmées pour le début d'année 2020. D'autres réunions thématiques suivront dans les prochains mois et s'étaleront tout au long de l'année 2020.

Pour chacun de ces ateliers, RTE diffuse un document de cadrage visant à présenter de manière synthétique la méthodologie et les jeux d'hypothèses envisagés pour la construction des scénarios. Le document présent porte sur le cadrage de l'analyse environnementale des scénarios du Bilan prévisionnel.

---

<sup>1</sup> Les supports de présentation des réunions plénières de la CPSR sont disponibles sur le site de la concertation : <https://www.concerte.fr/content/actualite-de-la-commission-perspectives-systeme-et-reseau>

## 1.2 Objectifs du groupe de travail : la discussion de la méthodologie et des hypothèses pour l'analyse environnementale des scénarios

Les objectifs de lutte contre le changement climatique inscrits dans l'accord de Paris engagent le monde dans une transition énergétique visant à faire évoluer en profondeur les modes de production et de consommation d'énergie. Il s'agit en premier lieu de transformer le secteur énergétique en vue de réduire les émissions de gaz à effet de serre qu'il engendre mais plus généralement de réduire les effets néfastes de ce secteur sur l'environnement sans déplacer la pollution sur d'autres problématiques environnementales.

A l'échelle nationale, la France s'est dotée d'un certain nombre d'objectifs au travers de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) de 2015 ou encore de la loi énergie et climat de 2019, afin de permettre au pays de contribuer plus efficacement à **la lutte contre le dérèglement climatique et à la préservation de l'environnement**, tout en renforçant son indépendance énergétique et en offrant à ses entreprises et ses citoyens l'accès à une énergie à un coût compétitif. La stratégie énergie et climat de la France se décline également dans plusieurs documents de programmation tels que la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) ou encore la stratégie nationale bas-carbone (SNBC), qui définissent les mesures à mettre en œuvre pour atteindre les objectifs fixés dans la loi.

Les travaux engagés par RTE sur la construction de scénarios de mix électrique s'inscrivent dans le cadre de ces orientations publiques en matière d'énergie et d'environnement. Les prochains scénarios de long terme du Bilan prévisionnel visent à éclairer l'évolution du paysage du système à l'horizon 2050 dans ce contexte de transition énergétique. Conformément au cadrage discuté lors des réunions plénières de la CPSR, l'analyse de ces transformations nécessite de pouvoir apporter une description du système sur les plans technique, sociétal, économique et environnemental. Dans ce contexte, il apparaît indispensable d'évaluer l'efficacité des scénarios considérés en matière de lutte contre le dérèglement climatique et de préservation de l'environnement.

Les publications de RTE (bilan électrique annuel, bilan prévisionnel...) comprennent depuis longtemps des analyses sur les émissions de gaz à effet de serre associées à la production électrique en France et en Europe. Par le passé, ces analyses ont permis d'éclairer les décisions publiques sur les conséquences en matière d'émissions de gaz à effet de serre associées à différents scénarios d'évolution du mix et ont constitué une aide à la décision publique.

Pour autant, les questions remontées par les parties prenantes dans le débat public ou dans la concertation sur les études prospectives de RTE interrogent de manière plus large les impacts environnementaux des évolutions du mix électrique que la seule problématique des émissions de gaz à effet de serre en France.

D'une part, dans un contexte d'accélération de la lutte contre le changement climatique, **l'attention se focalise désormais sur la notion d'empreinte carbone (qui inclut les émissions induites à l'échelle mondiale), plutôt que sur les seules émissions nationales** : en témoigne l'introduction dans la loi énergie et climat de 2019 d'un plafond indicatif sur l'évolution de l'empreinte carbone de la France (même si l'objectif de neutralité carbone également introduit dans cette loi porte lui sur les émissions sur le territoire national).

D'autre part, **les interrogations des parties prenantes portent aujourd'hui sur l'analyse d'autres impacts environnementaux que la maîtrise des émissions de gaz à effet de serre** : consommation de ressources, protection de la biodiversité et de l'eau, volume de déchets radioactifs...

Ces enjeux apparaissent de manière plus prégnante dans le cadre d'un développement rapide de nouvelles technologies de production d'énergie ou de nouvelles formes d'usages. Le débat sur l'impact environnemental du véhicule électrique en est un exemple révélateur : s'il est admis de longue date que le véhicule électrique peut éviter les émissions liées à la combustion de carburants pétroliers, des questions se sont faites jour sur l'impact environnemental de la production d'électricité induite, sur le bilan carbone de la phase de fabrication du véhicule et des batteries ou encore sur les consommations en ressources minérales associées à ces batteries.

Pour répondre à ces différents enjeux et apporter des éléments d'éclairage dans le débat public, RTE fait évoluer ses études et tente d'approfondir l'analyse environnementale des évolutions du mix électrique. A titre d'exemple, l'étude sur la mobilité électrique [1] publiée par RTE en mai 2019 comprend une analyse détaillée des impacts en matière de gaz à effet de serre, qui prend en compte les impacts sur l'ensemble du cycle de vie du véhicule (en particulier, la phase de fabrication des batteries avec plusieurs hypothèses de localisation des sites de production) ainsi que les émissions induites à l'échelle du système électrique européen. De même, le volet « environnement » du schéma de réseau [2] publié par RTE en septembre 2019 comprend une analyse détaillée et quantitative de plusieurs indicateurs environnementaux au-delà des émissions de gaz à effet de serre : impact visuel du réseau, consommation de ressources...

**Dans le cadre de l'élaboration des prochains scénarios du Bilan prévisionnel à l'horizon 2050, RTE souhaite prolonger ce type d'analyse afin de présenter une analyse complète des impacts environnementaux associés à l'évolution du mix électrique.**

L'objectif du GT environnement est de présenter et d'échanger avec les parties prenantes sur les objectifs, le cadrage méthodologique et les hypothèses de l'analyse environnementale de ces prochains scénarios de long terme.

La première réunion du groupe de travail, qui s'appuie sur le présent document, vise ainsi à présenter le socle méthodologique de cette analyse, pour discussion avec les parties prenantes intéressées. Les discussions porteront en particulier sur les enjeux environnementaux à étudier, les frontières du système, la méthode d'analyse et les données à utiliser. Pour accompagner la discussion, les méthodes d'analyse existantes seront présentées ainsi qu'une étude-pilote menée par RTE sur le Bilan prévisionnel 2017 pour illustrer l'exercice et donner un aperçu des opportunités et blocages qui pourront être rencontrés.

Les réunions suivantes du groupe de travail porteront sur les premiers éléments d'analyse des scénarios 2050, la définition des analyses de sensibilité et d'incertitudes et enfin en fonction de l'avancée des travaux sur les impacts induits par l'évolution des usages et les impacts liés au réseau électrique.

Ce document de travail est évolutif, il pourra être complété en fonction de l'avancée des travaux et des échanges menés avec les parties prenantes au sein du groupe de travail sur l'analyse environnementale.

### 1.3 Les principaux éléments de cadrage et questions soulevées

Les problématiques environnementales associées à l'évolution du système électrique sont larges et correspondent à des interrogations très diverses. **Afin de proposer une analyse structurée et rigoureuse sur le plan scientifique, le cadrage de l'analyse environnementale exige de définir quatre points-clés :**

- 1- Les enjeux étudiés :** comme présenté ci-dessus, les interrogations des parties prenantes portent désormais sur des enjeux plus larges que la seule maîtrise des émissions de gaz à effet de serre. Le cadrage de l'analyse environnementale discutée dans le cadre de la concertation doit permettre de définir les enjeux / indicateurs à étudier, et de préciser les enjeux prioritaires ou à approfondir dans l'analyse.
- 2- Le périmètre du système :** cet élément de cadrage est central pour définir les limites du système à étudier dans le cadre de l'analyse environnementale. Si le périmètre d'étude inclura de manière évidente l'ensemble des moyens de production d'électricité en France, celui-ci pourrait également être élargi à certaines évolutions structurantes du système et des usages énergétiques.
- 3- La méthode :** l'analyse environnementale des scénarios peut s'appuyer sur différentes méthodes existantes dans la littérature (empreinte, analyse de cycle de vie), qui sont détaillées dans la section 2.
- 4- Les données :** comme pour toute analyse prospective, les hypothèses et données sources utilisées sont tout à fait structurantes pour l'analyse. Plusieurs sources de données peuvent être mises à profit et seront discutées avec les parties prenantes tout au long de la concertation. Les échanges organisés dans le cadre du GT environnement et la consultation publique constitueront des possibilités pour les parties prenantes d'alimenter le socle d'hypothèses à utiliser dans l'analyse environnementale du Bilan prévisionnel.

### 1.4 Les enjeux environnementaux à étudier

La dernière transition énergétique s'est déroulée de la fin du XIX<sup>ème</sup> au milieu du XX<sup>ème</sup> siècle. Elle est apparue avec la généralisation de l'usage de l'énergie fossile, qui a conduit à une transformation inédite de l'industrie, de l'agriculture et du confort énergétique de la vie quotidienne, que ce soit en termes de chauffage, de mobilité, de circulation de l'information (avec les téléphones, ou les ordinateurs) ou encore de vie pratique (équipements électroménagers, froid domestique). Cependant le développement d'une société urbaine et industrielle de grande consommation a peu tenu compte de la biosphère dans laquelle elle évolue.

Une manière schématique de se représenter les enjeux est illustrée sur la figure 1 : la sphère des activités humaines (« l'éconosphère ») s'alimente en énergie et en matières premières depuis la biosphère<sup>2</sup>, tout en rejetant vers cette dernière des déchets et des pollutions.

---

<sup>2</sup> Correspond ici à la lithosphère, l'hydrosphère et l'atmosphère ainsi que la totalité des écosystèmes qui y sont présents

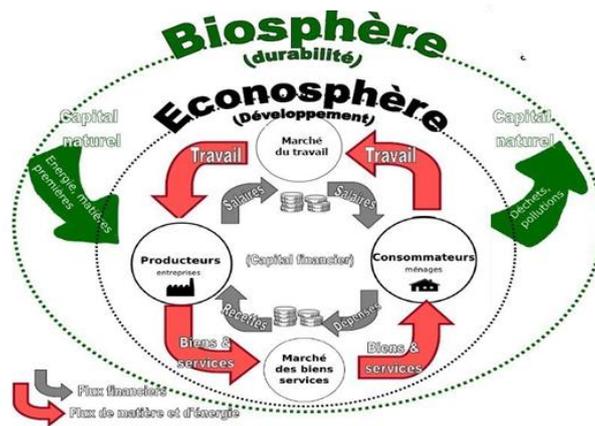


Figure 1. Représentation schématique des interactions entre la biosphère et l'écosphère (source Boutaud et Gondran, 2009)

Le présent document se concentre sur la dimension environnementale. Aussi les dimensions techniques, économiques et sociales sont écartées (elles sont traitées dans d'autres groupe de travail qui interagiront avec le présent groupe de travail).

Dans la littérature existante (publications officielles des pouvoirs publics, d'académiques, de consultants ou encore d'associations traitant d'environnement), les principaux enjeux pour l'environnement sont généralement classés à travers quatre grandes familles :

- **le climat** (maîtrise des émissions de gaz à effet de serre...)
- **la qualité des écosystèmes** (protection de la biodiversité, qualité de l'eau...),
- **les ressources naturelles** (eau, combustibles fossiles, minéraux...),
- **la santé humaine** (effets cancérigènes, rayonnement ionisant...).

En effet la planète est dotée d'un capital naturel qui permet un environnement viable à l'Homme et ce capital est composé des biens communs qui sont étroitement liés entre eux à savoir donc le climat, les écosystèmes et la biodiversité qui l'habite, et enfin les ressources naturelles comme l'eau douce, les minéraux et métaux, les fossiles ou la biomasse.

Ces 4 enjeux environnementaux ont souvent tendance à être cloisonnés, or les liens, les chaînes de causes à effet qui existent entre eux sont complexes et hétérogène. Les schémas ci-dessous illustrent à travers l'impact « eutrophisation eau douce » pour l'un et « changement climatique » pour l'autre, ces liens de cause à effet ; à savoir que chaque schéma ne représente qu'une partie des liens existants.

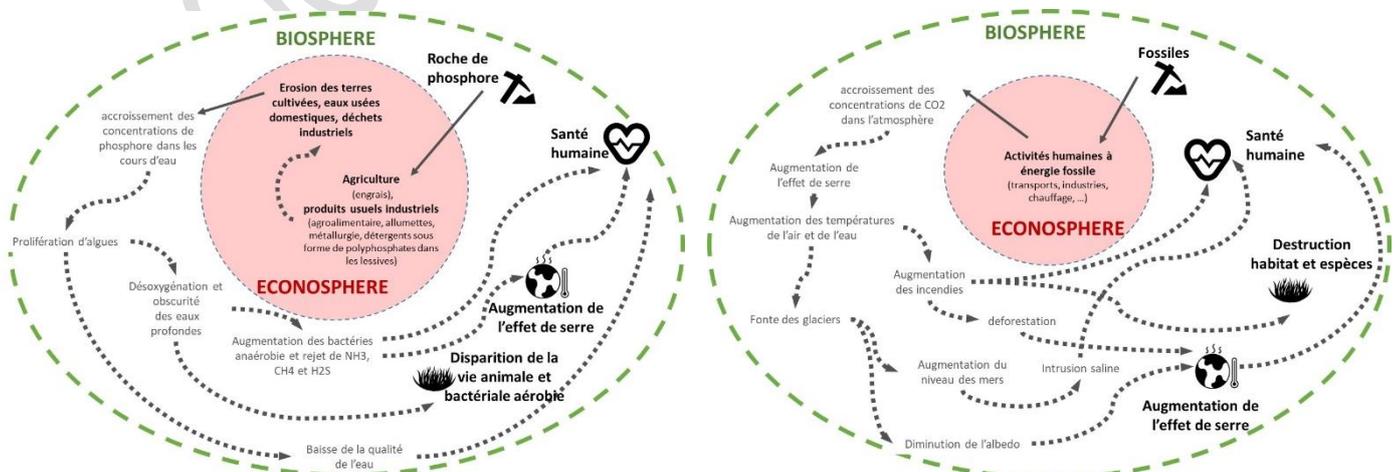


Figure 1 - illustration des chaînes de cause à effet : eutrophisation d'eau douce (à gauche), augmentation de l'effet de serre (à droite)

A l'origine les effets sur l'environnement sont causés par des prélèvements (roche de phosphores et ressources fossiles dans l'exemple ci-dessus) ou des rejets<sup>3</sup> (phosphore et CO2 au-dessus) dans la biosphère issus d'une ou plusieurs activités humaine. Chacun de ces flux engendre un impact sur l'environnement (prolifération d'algues et augmentation de l'effet de serre) qui en engendre eux-mêmes sur d'autres (désoxygénation et obscurité au fond de la colonne d'eau et augmentation de la température). Les enjeux environnementaux relèvent eux de plusieurs impacts et peuvent eux-mêmes entraîner différents effets sur l'homme, la faune, la flore ou le climat. Selon l'impact considéré, l'effet sur l'environnement peut se faire à différentes échelles. Par exemple l'eutrophisation d'eau douce est un phénomène plutôt localisé voir régional tandis que le réchauffement climatique est un impact global.

L'objectif de l'analyse environnementale est donc d'essayer d'identifier et de mesurer les chaînes de cause à effet qui pourraient être engendrés par les orientations énergétiques et technologiques des scénarios à travers les 4 enjeux environnementaux que sont le changement climatique, la qualité des écosystèmes, la disponibilité des ressources naturelles ainsi que les effets sur la santé.

### 1.5 Un périmètre adéquat à identifier pour étudier un système complexe

Les flux d'entrée et de sorties (flux élémentaires) au sein de l'éconosphère ne constituent pas un système figé qui pourrait être étudié comme une problématique externe donnée une fois pour toute et le système électrique, objet d'étude du bilan prévisionnel 2050 est imbriqué dans le système énergétique, qui est lui-même imbriqué dans l'éconosphère. Par conséquent, les flux dépendent au premier ordre des choix technologiques des filières de production et d'utilisation de la sphère industrielle globale, dont les options énergétiques constituent un sous-ensemble.

Le système est donc à étudier dans sa globalité, dans sa complexité du fait des relations et des interactions entre les éléments qui le composent, impliquant une approche systémique. Pour autant, il n'est pas possible de prétendre étudier dans l'exercice du bilan prévisionnel de façon réaliste tous les flux de l'éconosphère. Il est donc nécessaire de se limiter à un système plus restreint, mais la détermination de ce périmètre devra permettre d'assurer la cohérence globale avec le niveau de précision recherché (explicitation des troncatures).

- **Les interactions à la frontière du système électrique**

Les diagrammes de Sankey ci-dessous illustrent certaines des interactions qui peuvent exister entre le secteur électrique et les autres secteurs du système énergétique. Ces diagrammes représentent l'équilibre production-consommation du système énergétique en France en 1975 et en 2015. En 1975, la consommation d'électricité représentait environ 10% de la consommation totale d'énergie et le mix de production d'électricité était principalement d'origine fossile. Jusqu'en 2015, la consommation d'électricité a augmenté bien plus rapidement que la consommation totale d'énergie et le mix de production d'électricité s'est transformé pour devenir principalement d'origine nucléaire. En 40 ans, le système énergétique a ainsi été marqué par des transferts d'usages importants entre vecteurs d'énergie et par une évolution de la consommation totale.

---

<sup>3</sup> Les prélèvements ou rejet dans la biosphère sont qualifiés de flux élémentaires.

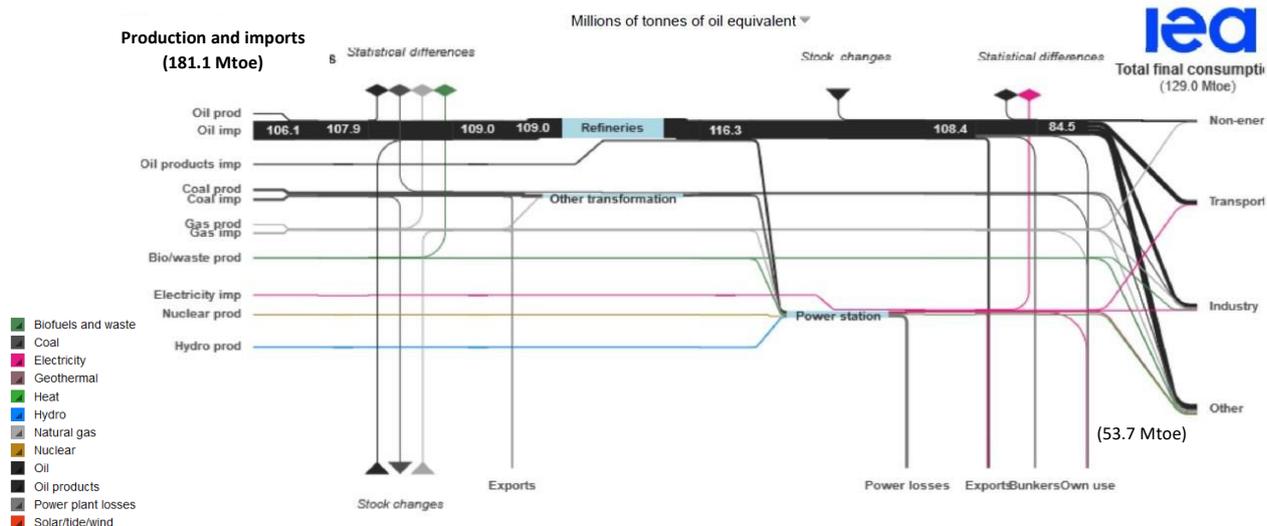


Figure 2 : diagramme de Sankey du système énergétique français en 1975 (source AIE)

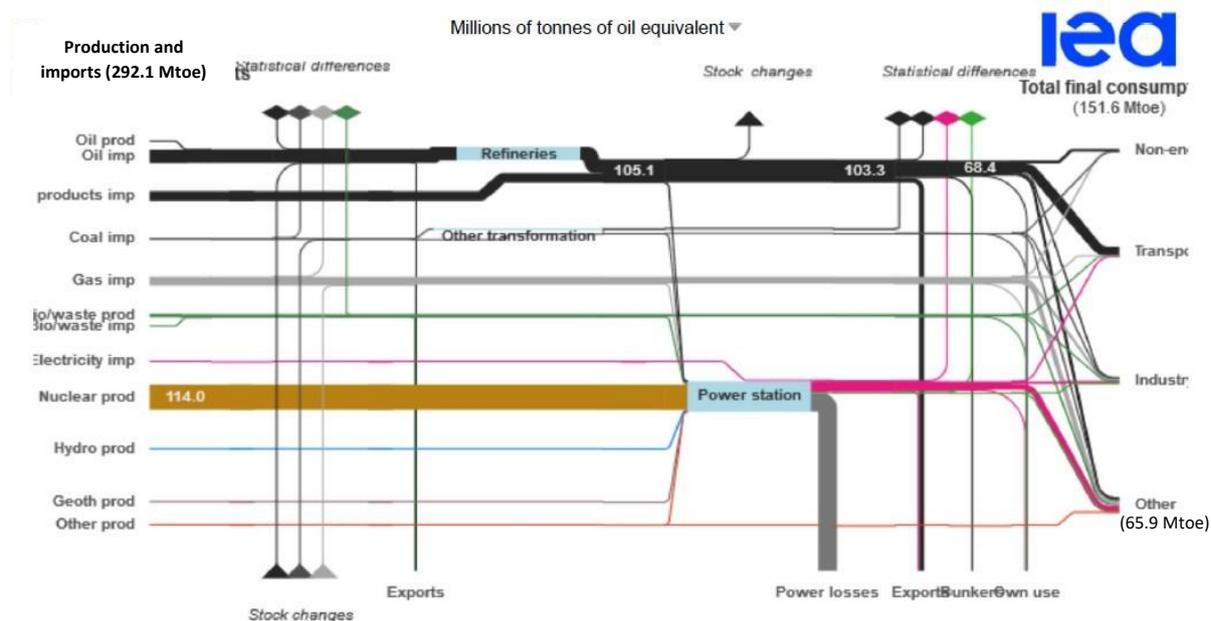


Figure 3 : diagramme de Sankey du système énergétique français en 2015 (source AIE)

Cet exemple illustre le fait que l'évolution du système électrique peut entraîner des changements à sa frontière dans les autres secteurs énergétiques. Ces changements peuvent avoir des impacts sur l'environnement :

- Les impacts induits (nouveaux ou évités) à travers les changements d'usage ou les vecteurs énergétiques utilisés pour transporter l'énergie vers les lieux de consommations, éventuellement la stocker, et in fine satisfaire ces usages (combustible pour le chauffage ou la mobilité par exemple).

- **Les interactions à l'intérieur du système électrique**

Le système électrique est composé d'un mix de production qui alimente à travers un réseau d'électricité différents usages d'électricité. Chacun de ces composants peuvent avoir des impacts sur l'environnement :

- Les impacts directs et indirects dus à l'évolution du mix électrique issus du mix de production selon les sources d'énergie primaire – éolien, solaire, biomasse, méthane, uranium...-, ou les technologies utilisées – éoliennes toitées, panneaux PV à tracker, EPR...,
- Les impacts induits (nouveaux ou évités) issus de la consommation d'électricité par usage final selon le niveau d'efficacité énergétique, la sobriété dans les usages, ou le couplage avec d'autres vecteurs...ou encore issus de l'évolution du réseau électrique.

**RTE propose donc, dans l'exercice de ce bilan prévisionnel 2050, d'analyser de façon prospective pour chacun des scénarios :**

- **les impacts potentiels directs et indirects dus à l'évolution du mix électrique,**
- **et dans la mesure du possible les impacts potentiels induits (nouveaux ou évités) liés à l'évolution du système électrique :** changement d'usage de consommation (véhicule électrique, numérique..), impacts dans les autres secteurs de l'économie (rénovation des bâtiments, etc).

## 2. Un tour d'horizon des méthodes d'analyse environnementale

Le cadrage de l'analyse environnementale nécessite ensuite de préciser la méthodologie d'étude. Pour ce faire, RTE propose de s'appuyer sur les méthodes existantes dans la littérature, qui sont d'ores et déjà utilisées pour étudier l'impact environnemental d'un produit, d'un service, d'une activité ou encore d'un territoire.

La revue de littérature fait état de l'existence d'un certain nombre de méthodes possibles pour l'évaluation des impacts environnementaux, désormais bien documentées. La suite de cette partie détaille le principe des deux grandes familles de méthodes les plus répandues, et dont il serait possible de s'inspirer pour les études du Bilan prévisionnel, à savoir l'empreinte écologique et l'analyse de cycle de vie. Cette liste n'est néanmoins pas exhaustive : d'autres outils complémentaires peuvent être couplés à ces méthodes, tels que l'analyse de flux de matières et d'énergie (dit MFA) ou encore les modèles d'équilibre économique.

### 2.1 L'empreinte écologique

Une première famille de méthode repose sur la notion d'empreinte écologique. Le concept d'empreinte écologique a fait son apparition au moment de la conférence de Rio (« sommet de la Terre ») en 1992 [3] pour exprimer la pression exercée par les hommes sur les ressources naturelles et les « services écologiques » fournis par la nature. Ce concept peut donc se retrouver dans différentes approches d'analyse environnementale mais ce qui est appelé la méthode d'empreinte écologique a été développée dans une thèse de Mathis Wackernegel sous la direction de William E. Rees, auteur du concept.

Il convient de noter que les notions d'empreinte carbone et d'empreinte eau se sont progressivement distinguées de la notion d'empreinte écologique. Cependant, bien que les outils développés soient différents, le concept est commun à ces différentes notions. Dans la suite, seule l'empreinte écologique est décrite. Notons simplement que contrairement à l'empreinte écologique qui est quantifiée en surface globale/an/personne, l'empreinte carbone est quantifiée en CO<sub>2</sub>eq/an/personne et l'empreinte eau en volume d'eau/an/personne. Ce sont donc toutes des méthodes d'analyse monocritère et quantitative.

#### 2.1.1 Définition de la méthode « empreinte écologique »

M. Wackernegel et W. Rees donne la définition suivante à la méthode : l'empreinte écologique mesure la pression qu'exerce l'homme sur la planète : elle mesure la surface biologiquement productive de terre et d'eau dont un individu, une ville, un pays, une région ou l'humanité a besoin pour produire les ressources qu'il consomme et absorber les déchets qu'il génère, en utilisant les technologies et les systèmes de gestion des ressources en usage. Cette surface de terre et d'eau, qui représente la superficie totale des écosystèmes nécessaires pour que la population ou la personne puisse continuer à vivre de façon durable, peut se trouver n'importe où dans le monde.

L'empreinte écologique évalue le métabolisme d'un système, c'est-à-dire qu'elle quantifie l'ensemble des flux de matières et d'énergie qui entrent et qui sortent d'un système, qu'il s'agisse d'un pays, d'une collectivité ou d'une entreprise, et les pondère en fonction de leurs impacts respectifs.

### 2.1.2 Principales méthodologies associées à l’empreinte écologique

La méthodologie de l’empreinte écologique est en perpétuel développement. Elle est affinée par l’ajout de détails et de données améliorées dès que disponibles. La coordination de cette tâche est effectuée par le Global Footprint Network (présidé par M. Wackernagel). Plusieurs approches de calcul ont été développées pour que l’outil soit applicable à différentes échelles :

- **L’approche ‘compound’**

Approche « top-down », elle est réalisée à partir des données nationales de production et d’importations-exportations compilées par les organisations internationales, telles que la FAO. L’empreinte de la consommation d’une population est donc le résultat de l’empreinte de la production et des importations, à laquelle est retranchée celle des exportations, pour les biens et services de façon agrégée.

Cette approche correspond à celle utilisée pour la réalisation du bilan annuel des chiffres-clés du climat par les services du ministère de la Transition écologique et solidaire<sup>4</sup>.

- **L’approche ‘component’**

Approche « bottom-up », elle est la somme de l’empreinte écologique des principales composantes de la consommation d’une population. Elle est réalisée :

- en identifiant tous les éléments individuels (énergie, biens et services), et leurs quantités, qu’une population consomme, grâce à une analyse des flux entrants et sortants, typiquement réalisée via une analyse des flux de matières (Material Flow Analysis MFA<sup>5</sup>) ;
- en évaluant l’empreinte écologique de chaque composant en utilisant les données d’analyses de cycle de vie (ACV, méthode décrite plus bas) qui collectent entre autres les quantités de ressources utilisées pour un produit donné depuis l’extraction des ressources jusqu’à sa fin de vie.

Le degré d’exhaustivité de la liste de composantes et la fiabilité des ACV déterminent la qualité de la mesure de l’empreinte écologique.

- **L’approche ‘input-output’**

Sous-catégorie de l’approche « top-down », elle est réalisée à partir de la comptabilité nationale. Elle permet la répartition détaillée, par secteurs d’activités, de l’empreinte des biens et services consommés dans un pays.

### 2.1.3 Inconvénients de la méthode d’empreinte écologique pour l’analyse environnementale

L’Institut de la Statistique du Québec<sup>6</sup> suggère d’utiliser l’approche *input-output* pour mesurer l’empreinte écologique d’une population et l’approche *component* pour mesurer l’empreinte d’un secteur en particulier. Ainsi dans le cas du bilan prévisionnel 2050, l’empreinte écologique par approche *component* serait la plus adaptée au secteur électrique. Elle fait notamment appel à l’analyse de cycle de vie décrite ci-dessous. Cependant le résultat final de l’empreinte écologique est

<sup>4</sup> Chiffres-clés du climat en France - France, Europe et Monde - Édition 2020, <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/chiffres-cles-du-climat-france-europe-et-monde-edition-2020-0>

<sup>5</sup> Au niveau micro, on s’appuie sur les factures d’eau, énergie, bilan déchets, etc... de la structure étudiée.

Au niveau produit, on s’appuie sur les inventaires de cycle de vie (cf. Analyse cycle de vie)

Au niveau macro donc territoire, on s’appuie soit sur les données statistiques (*top-down*), soit sur les AFME micro (*bottom-up*) des organisations qui composent le territoire (entreprises, institutions, industries, etc...).

<sup>6</sup> « L’empreinte écologique : revue de littérature et analyse critique », L’Institut de la Statistique du Québec (2009)

monocritère et donc issus de nombreuses agrégations. En effet pour arriver à compter en hectare globaux par personne et par an, l'ensemble des impacts issus des flux de matière et d'énergie, entrants et sortant du système étudié, sont calculés puis agrégé, et donc un certain nombre d'hypothèses sont faites introduisant de trop nombreuses incertitudes. **L'analyse environnementale des scénarios du bilan prévisionnel s'appuiera sur l'approche component de l'empreinte écologique, donc sur la méthode d'analyse cycle de vie décrite ci-dessous mais n'utilisera pas le caractère monocritère pour le résultat final.**

## 2.2 Analyse cycle de vie (ACV)

L'ACV est reconnue et normée comme la méthode globale de référence pour la prise en compte du cycle de vie entier d'un produit. Elle est donc la méthode la plus couramment utilisée.

### 2.2.1 Définition

L'ACV est régi par la norme internationale ISO 14040-44, qui fournit la définition suivante :

« L'analyse du Cycle de Vie est un outil d'évaluation des impacts potentiels sur l'environnement d'un système incluant l'ensemble des activités liés à un produit ou à un service depuis l'extraction des matières premières jusqu'au dépôt et traitement des déchets. »

Les ACV classiques se fondent sur des données historiques et mesurables, de manière à évaluer un état, un objet ou un service à un instant précis (le plus souvent sur une année moyenne). Elle est d'une part multi-étape, c'est-à-dire que le système est modélisé du berceau à la tombe, et d'autre part multicritères, c'est-à-dire pouvant caractériser différents impacts environnementaux potentiels distincts dans une même analyse.

Notons que la production du produit ou du service considéré peut, pour des raisons physiques ou technologiques, s'accompagner d'une production simultanée d'autres services ou matières utiles à l'écosphère : ce qui est nommé co-produits (exemple : récupération de la chaleur issue d'une réaction chimique exothermique).

L'ACV est un outil d'aide à la décision qui favorise l'optimisation des caractéristiques environnementales du sujet analysé et permet d'effectuer un bilan environnemental.



Figure 4 - Etapes du cycle de vie d'un produit

## 2.2.2 Principales méthodologies associées à l'analyse de cycle de vie

Trois approches se distinguent au sein de l'ACV, d'une part l'ACV-attributionnelle qui fait partie de la norme et qui est largement utilisée, et d'autre part l'ACV-conséquentielle et l'ACV-prospective qui sont plus récentes et ne sont pas régies par la norme à ce stade.

- **L'approche 'attributionnelle'**

L'ACV attributionnelle (ACV-A) se focalise sur la description des impacts environnementaux de flux entrants et sortants d'un cycle de vie et son sous-système. Elle attribue (alloue) des impacts au produit ou au procédé étudié. L'ACV-A est réalisée dans un état statique où le cycle de vie du produit ou procédé considéré n'évolue pas dans le temps.

La méthode se déroule en 4 étapes itératives selon la norme ISO 14040 :

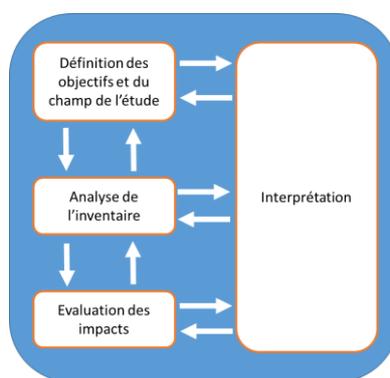


Figure 5 - Les 4 étapes de l'ACV selon les normes ISO 14040 et 14044

1. En premier lieu, les objectifs et le champ d'étude sont définis pour préciser les « limites » du système étudié. Cette étape permet de choisir l'unité fonctionnelle (UF), c'est-à-dire la ou les fonction(s) identifiée(s) du système dont on cherche à mesurer les impacts environnementaux ainsi que le flux de référence. Elle permet aussi de déterminer la prise en compte ou non de procédés dans l'analyse.
2. La deuxième étape consiste à élaborer l'inventaire de cycle de vie (ICV), c'est-à-dire à dresser à chaque étape du cycle de vie du produit en fonction de l'unité fonctionnelle, la liste des flux élémentaires (c'est-à-dire les ressources naturelles consommées et des substances émises dans l'environnement), et des flux intermédiaires (c'est-à-dire les flux de produit de matière ou d'énergie avec transformation humaine préalable ou ultérieure). L'inventaire est donc un recueil/calcul de données, avec affectation des flux et des émissions. C'est notamment à cette étape que les règles d'allocation s'appliquant aux coproduits éventuels sont définies. Une détermination correcte de l'inventaire est essentielle car elle conditionne la bonne évaluation de tous les impacts dans les résultats finaux.
3. En troisième étape l'évaluation des impacts, il s'agit de quantifier les impacts des différents procédés et flux identifiés dans l'inventaire. Plusieurs indicateurs sont utilisés pour quantifier ces impacts. L'ACV distingue des indicateurs dits « midpoint », reflétant des impacts potentiels (négatifs ou non), et des indicateurs dits « endpoint », réputés mesurer des dommages potentiels. Par exemple, le résultat d'ICV gaz à effet de serre peut avoir comme « midpoint » le changement climatique et comme « endpoint » la hausse du niveau des mers ou les catastrophes naturelles ou encore le déplacement des populations.

4. Et enfin l'interprétation permet de résumer les résultats et de les mettre en perspectives. Il est souvent conseillé de procéder à une analyse de sensibilité afin de vérifier la fiabilité des résultats lorsqu'il existe une forte incertitude sur certains paramètres de l'analyse. L'analyse de sensibilité permet de déterminer l'influence de ces paramètres sur les résultats et de les interpréter en conséquence.

- **L'approche 'conséquentielle'**

La méthodologie de l'ACV conséquentielle (ACV-C) est apparue dans les années 2000 et son application est en constante évolution depuis.

L'objectif d'une ACV-C est de modéliser l'ensemble des impacts environnementaux consécutifs à un changement survenant dans le cycle de vie d'un produit.

Cet objectif est donc sensiblement différent de celui d'une ACV-A qui consiste à étudier le cycle de vie d'un produit. Alors que l'ACV-A est réalisée dans un état statique où le cycle de vie du produit n'évolue pas dans le temps, l'ACV-C repose sur l'évaluation des conséquences causées par le passage d'un état A à un état B du cycle de vie d'un produit. Il y a donc intrinsèquement une notion temporelle à prendre en compte en ACV-C, correspondant à la période de temps nécessaire pour que le cycle de vie du produit passe de l'état A à l'état B.

Concrètement l'ACV-C suit les mêmes phases que l'ACV-A. La principale différence entre les deux méthodologies réside dans le système étudié. En ACV-C, le consensus méthodologique n'est pas encore établi, mais la communauté scientifique s'accorde à dire que le système doit inclure au moins les processus affectés par le changement étudié, ces processus pouvant appartenir ou pas au cycle de vie du produit étudié [1]. En effet, alors qu'en ACV-A tous les processus sont reliés entre eux par des flux de matière ou d'énergie, en ACV-C, les processus peuvent également être unis par des liens de causalité. Mais dans la majorité des cas, seuls les processus affectés par le changement sont inclus dans le système de l'ACV-C.

Donc, en théorie, l'approche conséquentielle peut être mise en œuvre pour étudier tous types de changements affectant un ou plusieurs cycles de vie. Cependant, dans la pratique, l'ACV-C a été principalement développée pour analyser un changement considéré comme marginal survenant dans un cycle de vie. Cette restriction méthodologique provient essentiellement de la nature des interactions économiques entre différents cycles de vie, laquelle diffère suivant que la taille du changement considéré est marginale ou pas.

Alors qu'une modélisation relativement simple permet de modéliser des interactions économiques associées à des changements marginaux, une modélisation plus complexe est requise lorsque la taille des changements considérés est plus importante [4].

- **L'approche 'prospective'**

Comme l'ACV-C, l'apparition de l'ACV prospective (ACV-P) est relativement récente (années 2000) et il n'existe pas de consensus sur la méthodologie. La frontière entre ces deux types d'ACV n'est pas évidente. Aussi l'association SCORE LCA, dans son rapport de 2015 « recommandations pratiques pour l'ACV prospective / références et exemples dans le domaine de l'énergie » les différencient par les définitions suivantes :

- *ACV-C : Approche d'évaluation des impacts environnementaux générés par la chaîne de conséquences (directes et indirectes) induites par un changement subi par le système étudié, associé à une (ou plusieurs) décision(s) et aux actions respectives. L'[ACV-C] est lié à un contexte*

*spatial et un horizon temporel précis. La majorité des experts en ACV interrogés concordent sur ce point essentiel de la définition de l'approche conséquentielle.*

- *ACV-P : approche d'évaluation des impacts environnementaux générés par un produit ou un système déjà existant mais à un horizon temporel plus ou moins éloigné. L'ACV prospective quantifie les évolutions technologiques sur un horizon temporel donné et se base généralement sur des scénarios, sans chercher à évaluer les conséquences de ce changement technologique sur d'autres secteurs de l'économie.*

Plusieurs typologies d'ACV-P sont dégagées dans le rapport du SCORE-LCA, d'après la revue de littérature menée :

- ACV d'un produit ou d'une gamme de produits existant à un horizon temporel éloigné ;
- ACV d'un produit extrapolé du laboratoire au déploiement commercial ;
- ACV d'un secteur entier (par ex. transport, énergie) associé à des scénarios prospectifs.

### 2.2.3 Application de la méthode d'analyse de cycle de vie à l'analyse des scénarios du Bilan prévisionnel

Les trois approches décrites ci-dessus peuvent être utilisées de façon indépendante ou complémentaire.

L'ACV présente l'intérêt de mener une analyse multicritère et tout au long du cycle de vie du système étudié. A noter cependant que l'approche est pragmatique donc approximative. D'autant plus que la modélisation est complexe de par sa quantité de données (cf schéma ci-dessous) et de relations rendant l'analyse d'autant plus soumise aux incertitudes. Cependant, il est possible de mesurer leur degré de robustesse grâce aux analyses de sensibilité et d'incertitudes (ce point pourra faire l'objet de discussions ultérieures du groupe de travail).

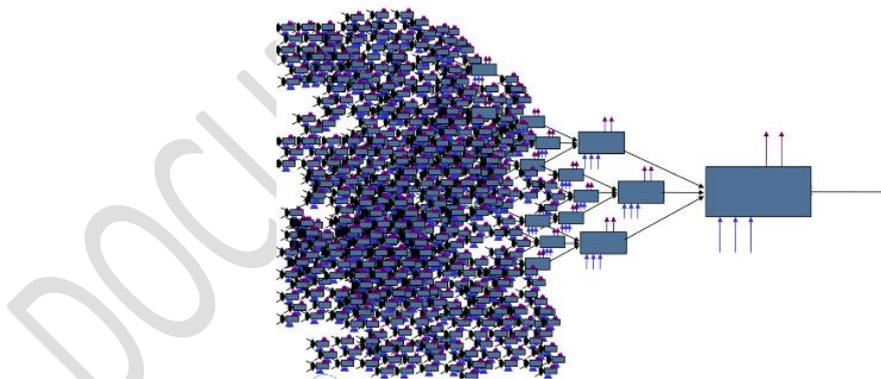


Figure 6. Représentation schématique d'une base de données avec les flux entrants et sortants des processus

Il existe plusieurs études qui utilisent l'ACV pour évaluer les impacts d'un scénario du système électrique. Ils sont souvent couplés à d'autres outils, tels que l'analyse des flux de matières (dits MFA) [5] ou des modèles macroéconomiques [4]. Lorsque les approches ACV sont appliquées à des technologies complexes et émergentes du système électrique, les résultats peuvent varier considérablement d'une étude à l'autre en fonction des méthodologies, des hypothèses et des limites du système choisi [6] (cf encadré ci-dessous).

A la connaissance de RTE, aucune étude n'a développé une méthode qui prenne en compte les ajustements nécessaires dus à la nature du système électrique, à l'exception des travaux de Boubault et al. 2019 [7], qui ont inspiré la méthodologie développée par RTE.

**La méthode d'analyse cycle de vie représente donc la méthode la plus adaptée pour les études du bilan prévisionnel 2050 de par son analyse multicritère et tout au long du cycle de vie.**

NOTE SUR LES ACV APPLIQUEES AU SYSTEME ELECTRIQUE –MASANET ET AL. 2013 [6]

D'après Masanet et al. 2013 [6], lorsque les approches ACV sont appliquées aux technologies du système électrique, complexes et émergentes, les résultats peuvent varier considérablement d'une étude à l'autre selon les méthodologies, hypothèses et limites du système retenu. Dans leur papier les auteurs fournissent quatre clés d'opportunités données pour améliorer l'utilisation des ACV appliquées au système électrique :

→ Amélioration des pratiques

Bien que l'ACV soit couverte par les normes ISO 14040-44 ou encore d'autres comme la norme ISO 14067<sup>7</sup>, elles n'empêchent pas des pratiques individuelles avec un certain nombre de choix qui influencent fortement la qualité et la légitimité des résultats des ACV. C'est pourquoi une des suggestions pour réduire l'ambiguïté des résultats de l'ACV et augmenter l'efficacité de l'ACV comme outil d'aide à la décision, serait d'obtenir un consensus plus large sur les méthodes de caractérisation.

→ Intégration avec d'autres méthodes de modélisation de système

Les méthodes d'analyses intégrées sont conçues pour évaluer les relations entre systèmes économiques et géophysiques. L'évolution des systèmes électriques à grande échelle impacte plusieurs domaines (scientifiques, économiques, politiques..) nécessitant une coopération interdisciplinaire. L'ACV doit donc pouvoir refléter cette complexité pour décrire les réels coûts et bénéfices de l'évolution du système. Ainsi coupler l'ACV avec d'autres modèles (tels que l'analyse *Input-Output*, la MFA, les scénarios prospectifs ou les analyses économiques), enrichirait l'analyse des politiques par rapport à ce que fournissent les modèles d'ACV seuls, en apportant des informations relevant du contexte global, dynamique et macroéconomique.

→ Management des incertitudes et sets de données communs

Etant donné que le champ de recherche de l'ACV pour les systèmes électriques est relativement jeune, les praticiens d'ACV des systèmes électriques font face à diverses sources d'incertitudes (de données, de méthodes). Cependant le nombre croissant d'études permet de constituer des espaces de données communs de plus en plus riches, processus qui devrait à terme favoriser la cohérence et réduire les incertitudes. Il est donc souhaitable d'aller vers une harmonisation des études d'ACV appliquées aux systèmes électriques.

→ Amélioration de l'utilisation de l'ACV-C

Une ACV-A est appropriée pour comparer, sur la base du cycle de vie, les diverses technologies de production d'électricité. L'ACV-C est quant à elle plus appropriée pour évaluer l'impact sur le cycle de vie complet d'une politique (d'un changement de composition du mix électrique par exemple). Les ACV-A nécessitent une certaine quantité de données mais les ACV-C en demandent encore plus.

<sup>7</sup> La norme ISO 14067 vise à accroître la transparence en quantifiant et en rendant compte du cycle de vie des émissions de CO<sub>2</sub>e des produits et services évalués.

### 3. Illustration de la méthode d'analyse environnementale des scénarios : une étude pilote d'analyse du cycle de vie pour le mix électrique des scénarios du Bilan prévisionnel 2017

En s'appuyant sur les principes de l'analyse de cycle de vie, RTE a développé une première méthodologie pour l'analyse environnementale des scénarios d'évolution du système électrique. Pour faciliter l'appropriation de cette méthode, et identifier les difficultés ou les axes d'approfondissements liés à celle-ci, RTE a appliqué cette méthode sur des scénarios existants, à savoir ceux du Bilan prévisionnel 2017.

L'étude et les résultats ci-dessous sont présentés dans le cadre de cette concertation, non pas pour tirer des conclusions sur les résultats obtenus, mais pour mettre en évidence un certain nombre de blocages à lever, de leviers à activer ou d'opportunités qui permettront d'orienter la suite de l'analyse environnementale dans le cadre du prochain Bilan prévisionnel de long terme.

Les quatre scénarios étudiés (Volt, Ampère, Hertz et Watt) ont été décrits dans le Bilan prévisionnel 2017 sous différents axes (bilans énergétiques, sécurité d'approvisionnement, coût économique, émissions de CO<sub>2</sub>). S'agissant des impacts environnementaux, le Bilan prévisionnel 2017 restitue l'analyse des seules émissions directes de gaz à effet de serre associées à la combustion dans les centrales de production pendant la phase d'exploitation.

Pour compléter cette analyse et élargir le champ de l'analyse environnementale, RTE a initié un travail-pilote visant à prendre en compte :

- ➔ les émissions de gaz à effet de serre tout au long du cycle de vie des systèmes de production d'électricité (en prenant ainsi en compte la chaîne d'approvisionnement en combustibles, la construction et déconstruction des centrales, etc.)
- ➔ des indicateurs environnementaux supplémentaires, au-delà des émissions de gaz à effet de serre, en s'inspirant des indicateurs prioritaires retenus par RTE, à savoir les effets sur la biodiversité, l'épuisement des ressources et la santé humaine.



Au préalable, l'analyse a été menée avec l'outil d'ACV SIMAPRO. Ce premier exercice a permis d'identifier le besoin de développer un outil adapté aux particularités du système électrique, qui sont rappelées dans le paragraphe ci-dessous. En effet, sous SIMAPRO le facteur de charge est intrinsèquement figé par la base de données utilisée, dans le cas présent *Ecoinvent*.

Dans chaque scénario, le parc de production électrique est dimensionné en puissance installée et en énergie afin de satisfaire à la demande annuelle ainsi qu'aux périodes de pointe de consommation. Pour satisfaire cette demande, plusieurs types de technologies cohabitent et se complètent au sein du mix par leur différence de pilotabilité. Cette différence transparait à travers le facteur de charge qui correspond au rapport entre sa production moyenne et sa capacité installée sur une année.

### 3.1 Modélisation

#### 3.1.1 La méthodologie développée

Les méthodologies existantes ne permettant pas de paramétrer le facteur de charge et la durée de vie des moyens de production, RTE a développé une méthode permettant de palier à ce verrou. La méthodologie s'appuie sur l'approche ACV-attributionnelle et s'applique à **deux unités fonctionnelles différentes** qui distinguent :

- ➔ d'une part, la production électrique sur un an (appelée dans la suite UF-kWh)
- ➔ et d'autre part, le parc de production installé ramené sur une année (UF-kW dans la suite).

Les schémas ci-dessous illustrent la méthode ainsi développée au regard de la méthode par défaut.

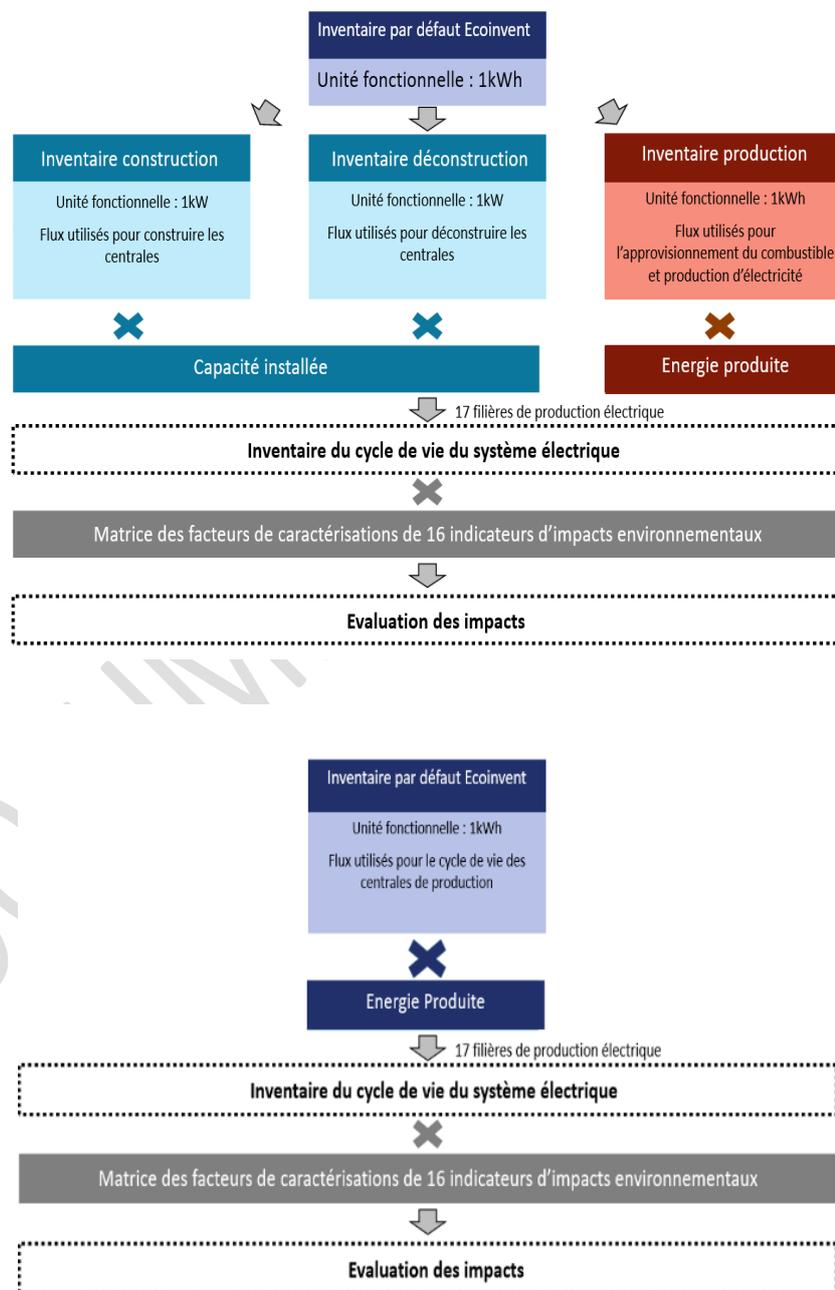


Figure 7 - schémas représentant la méthodologie développée par RTE (en haut) et celle par défaut dans l'outil SIMAPRO (en bas)

Le tableau ci-dessous détaille les différents paramètres (selon la norme ISO 14040-44) retenus pour la méthode développée par RTE :

Approche UF-kW	Approche UF-kWh
<b>Frontière du système</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Périmètre sectoriel : la frontière est définie par le cycle de vie des centrales de production d'électricité. Le système s'arrête à la sortie des centrales de production, les composants du réseau d'électricité ainsi que les postes de consommation ne sont pas inclus.</li> <li>▪ Périmètre géographique : maille française<sup>8</sup>, et une variante a été faite à la maille européenne<sup>9</sup></li> </ul>	
<b>Unité fonctionnelle</b>	
1kW construit et déconstruit sur une année	1kWh produit sur une année
<b>Flux de référence<sup>10</sup></b>	
Le flux de référence correspond à la puissance installée (en kW) en France l'année de référence étudiée (2016, 2025, 2030 et 2035). Chaque puissance est ramenée, par filière, à une fraction fonction de la durée de vie des centrales.	Le flux de référence correspond à l'énergie produite (en kWh) en France l'année de référence étudiée (2016, 2025, 2030 et 2035).
<b>Données d'inventaire du cycle de vie</b>	
Comme la base de données <i>Ecoinvent</i> , pilotée et maintenue par l'EPFL (Suisse) est la base de données d'inventaire internationale la plus exhaustive à ce jour, RTE l'a retenue pour ses propres analyses internes. L'inventaire de cycle de vie est un bilan complet des flux entrants et des flux sortants sur tout le cycle de vie du système. Il comporte ainsi l'ensemble des ressources énergétiques, matières premières, et transports nécessaires pour réaliser l'unité fonctionnelle.	
<b>Indicateurs</b>	
<p>Le diagramme présente quatre catégories d'indicateurs environnementaux dans des boîtes grises arrondies :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><b>Climate change</b> (climate change)</li> <li><b>Ressources</b> (dissipated water, fossils, land use, minerals and metals)</li> <li><b>Human health</b> (carcinogenic effects, ionising radiation, non-carcinogenic effects, ozone layer depletion, photochemical ozone creation, respiratory effects inorganics)</li> <li><b>Ecosystem quality</b> (Freshwater and terrestrial acidification, freshwater ecotoxicity, freshwater eutrophication, marine eutrophication, terrestrial eutrophication)</li> </ul>	
<b>Evaluation des impacts potentiels</b>	
Le calcul des impacts environnementaux est réalisé à partir de la plateforme ACV Brightway2 en code source ouvert (Python), qui permet de créer des modèles qui dépassent les limites conventionnelles de l'ACV.	

<sup>8</sup> Le périmètre du système étudié est limité à la France mais les flux entrants et sortant dans le système sont mondiaux.

<sup>9</sup> Outre la France, les entités européennes modélisées dans le bilan prévisionnel 2017 sont : l'Allemagne, l'Autriche, la Belgique, le Danemark, l'Espagne, la Grande-Bretagne, l'Irlande, l'Irlande du Nord, l'Italie, le Luxembourg, la Norvège, les Pays-Bas, La Pologne, le Portugal, la République Tchèque, la Suède et la Suisse.

<sup>10</sup> C'est le flux que l'on souhaite produire avec un processus, c'est un flux intermédiaire particulier, car les quantités des autres flux dépendent de sa valeur. Le flux de référence est la raison d'être du processus, il est donc la cause de l'existence du processus, en l'occurrence ici la production d'électricité.

La méthode appliquée est commune pour chacun des scénarios mais le service rendu dans chacun des scénarios varie en termes de kWh délivré et chaque scénario a son propre contexte.

RAPPEL SUR LES SCENARIOS DU BILAN PREVISIONNEL 2017 :

Les scénarios du bilan prévisionnel 2017 sont en particulier caractérisés par :

- ➔ leur parc installé : la capacité totale installée à horizon 2025, 2030 et 2035 de chaque filière
- ➔ leur bilan électrique : la production au pas horaire à horizon 2025, 2030 et 2035 de chaque filière.

Scenario	Principales hypothèses
AMPERE	Ce scénario est caractérisé par un développement important des énergies renouvelables en substitution au nucléaire existant, conduisant à atteindre l'objectif de 50% de nucléaire dans la production à l'horizon 2030. Cette évolution du mix se fait sans construction de nouveaux moyens de production thermique fossile.
HERTZ	La diversification du mix électrique s'inscrit dans un contexte de développement modéré des sources renouvelables tout en s'appuyant sur les nouvelles sources de production thermique.
VOLT	Ce scénario s'appuie sur un développement modéré des énergies renouvelables, et sur un pilotage de l'évolution du parc nucléaire en fonction des opportunités économiques. Dans ce scénario, la part du nucléaire reste supérieure à 50% sur tout l'horizon d'étude et la part de la production d'électricité d'origine fossile est très réduite.
WATT	Ce scénario est caractérisé par un déclasserment systématique des réacteurs nucléaires à 40 ans d'exploitation, qui conduit à une baisse importante de l'énergie nucléaire en 15 ans. Le scénario est également marqué par un développement important des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique.

### 3.1.2 Le choix des catégories d'impacts mesurés (indicateurs)

La traduction des inventaires (flux élémentaires entrants et sortants) en impacts potentiels sur l'environnement peut se faire à plusieurs niveaux (« midpoint » et « endpoint ») à partir de méthodes de caractérisation. Les méthodes orientées problèmes dites « midpoint » sont situées au début de la chaîne de cause à effet, elles s'attachent à caractériser les effets primaires, découlant directement des activités étudiées. Tandis que les méthodes orientées dommages dites « end-point » reflètent les dommages potentiels en bout de chaîne.

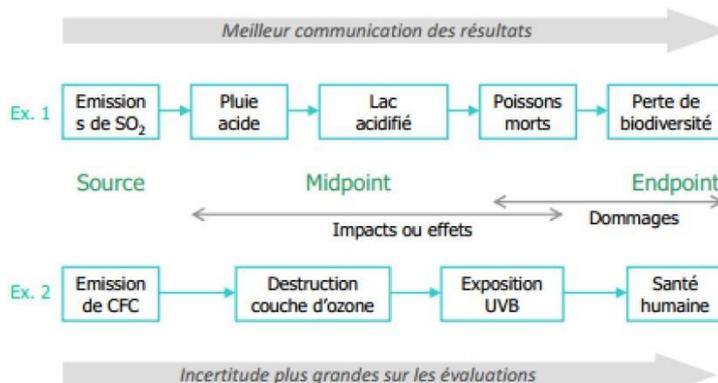


Figure 8 - Illustration de la chaîne cause à effet<sup>11</sup>

Par exemple, comme l'illustre la figure ci-dessus les émissions de dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) peuvent provoquer des pluies acides qui peuvent conduire à acidifier les lacs. L'acidification des lacs pourra conduire à la mortalité de poissons qui se traduit par une perte de biodiversité.

Pour les travaux préliminaires menés sur les scénarios du Bilan prévisionnel 2017, RTE a retenu les méthodes orientées problèmes. Bien que cette méthode ne soit pas la plus triviale pour communiquer sur les résultats obtenus, elle est jugée plus robuste du fait que contrairement aux méthodes orientées dommages, la chaîne de causalité est plus courte et donc moins soumise aux incertitudes.

Les indicateurs retenus sont les 16 recommandées par l'ILCD Handbook [8] (*International Reference Life Cycle Data System*).

## 3.2 Résultats obtenus sur l'impact environnemental des scénarios du BP 2017

L'analyse fournit donc 16 indicateurs d'impacts environnementaux potentiels à différents horizons temporels (2016, 2025, 2030, 2035) selon chaque filière de production, et ceci pour chaque scénario du Bilan prévisionnel 2017. La suite de cette section détaille quelques éléments qu'il est possible d'en extraire, mais l'ensemble des indicateurs obtenus ne sont pas restitués de manière exhaustive.

<sup>11</sup> Source : « Atelier 2 : Méthode d'évaluation environnementales - Analyse du Cycle de Vie (ACV : Principe et mise en perspective » , Philippe Roux Cémagrf, Février 2011

### 3.2.1 Comparaison entre l'outil SIMAPRO et la méthode développée par RTE pour l'indicateur « minéraux et métaux »

La figure ci-dessous illustre les impacts du mix de production du scénario Watt en 2016, 2025, 2030 et 2035 pour l'indicateur d'épuisement des ressources « minéraux et métaux », calculé d'une part avec l'outil SIMAPRO utilisant les données par défaut de la base *Ecoinvent*, et d'autre part avec la méthode développée par RTE.

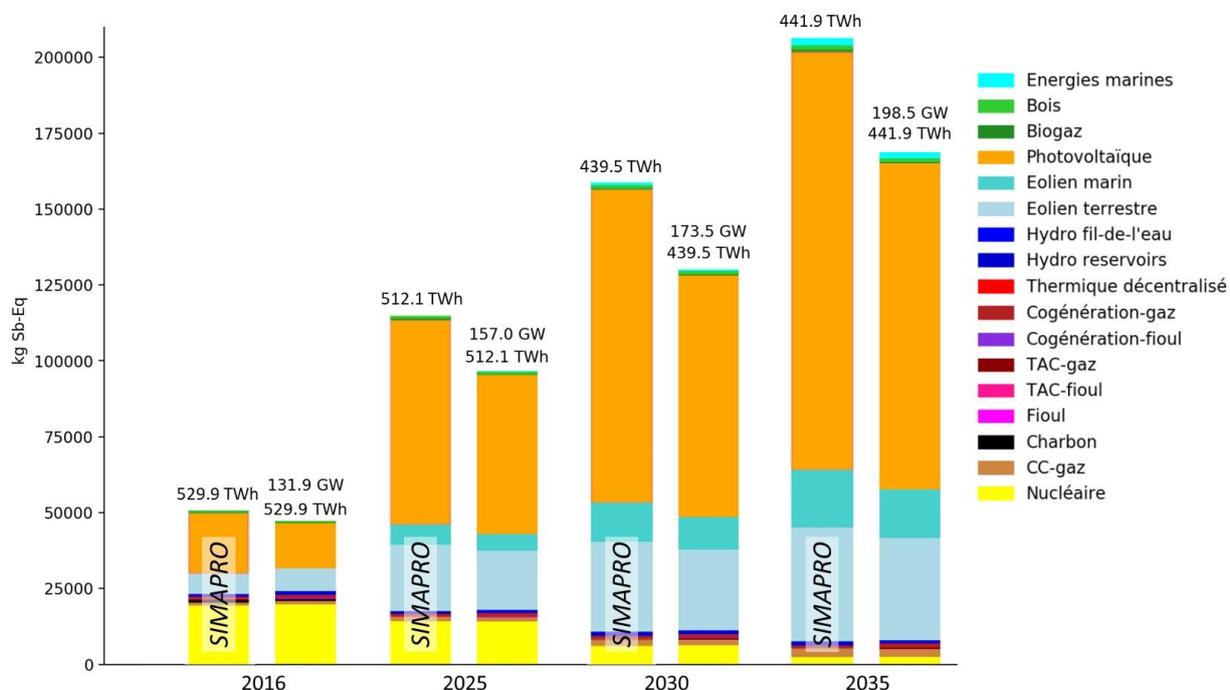


Figure 9 - comparaison entre l'outil SIMAPRO et la méthode développée par RTE, scénario Watt, indicateur « minéraux et métaux » - maille française

Clé de lecture : SIMAPRO n'utilise qu'une unité fonctionnelle (kWh), ainsi la durée de vie et le facteur de charge sont fixes, tandis que la méthode développée utilise deux types d'unité fonctionnelle (kW et kWh)

La différence de résultat observée est de l'ordre de 20% pour le scénario Watt et l'indicateur « minéraux et métaux ». Les hypothèses d'entrée dans les deux méthodes sont identiques. L'approche RTE distingue la part variable liée à la production électrique simulée sur le scénario, de la part fixe liée au développement des infrastructures. Les facteurs de charge dans la base de données *Ecoinvent* sont figés (11% pour le PV) et utilisés tels quel par l'outil SIMAPRO tandis qu'avec la méthode développée par RTE, les facteurs de charge sont paramétrables et adaptés à chaque scénario (14% pour le PV dans le scénario Watt).

La différence entre les deux méthodes est plus ou moins grande selon l'indicateur considéré. En effet, la différence sera minime pour les indicateurs plus sensibles aux impacts directs (issus de la production d'électricité) qu'aux impacts indirects (issus des phases amont et aval d'utilisation de la centrale) ; c'est le cas de l'indicateur « changement climatique » par exemple.

L'influence du facteur de charge est développée dans la partie suivante 3.3.2 et l'indicateur « minéraux et métaux » est développé dans la partie 3.3.5.

**Minéraux et métaux** exprimé en kg Sbeq (masse de l'antimoine équivalent) – échelle globale

L'indicateur « minéraux et métaux » représente l'épuisement des ressources abiotiques, c'est-à-dire les minéraux et les métaux qui sont des ressources non renouvelables. Les facteurs de caractérisations sont calculés à partir des ressources ultimes présentes dans la croûte terrestre et des niveaux d'extraction annuels.

**3.2.2 Comparaison des scénarios en 2035 pour l'indicateur « changement climatique »**

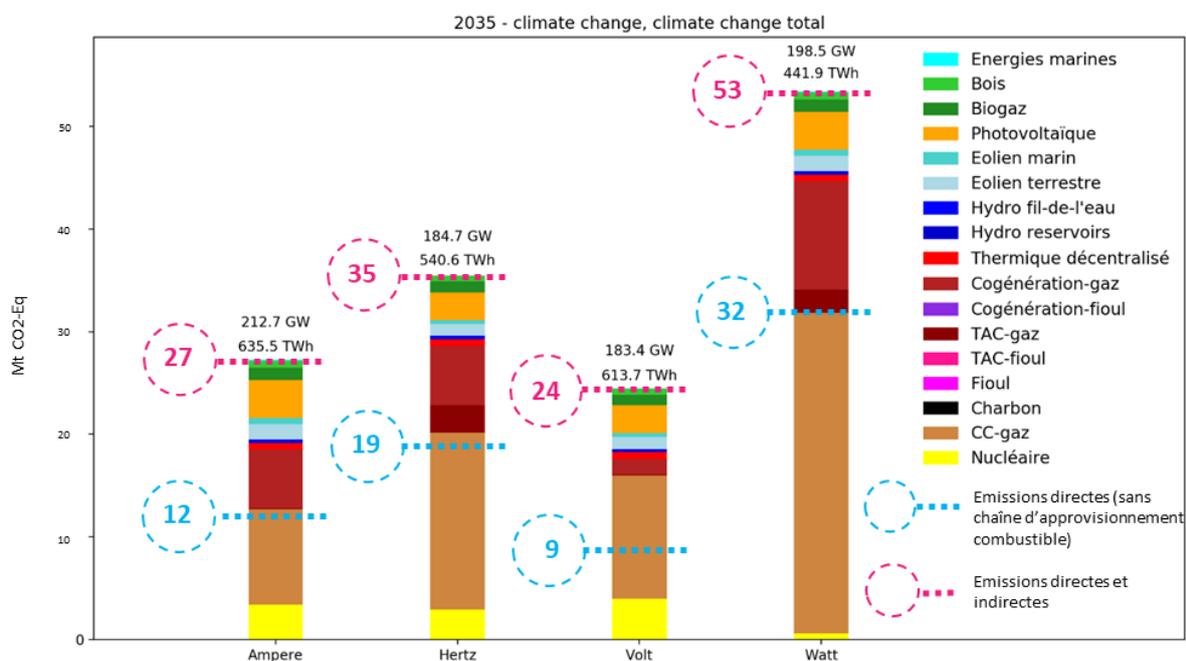


Figure 10. Indicateur du réchauffement climatique des quatre scénarios du Bilan prévisionnel à l'horizon 2035

Clé de lecture : le scénario Ampère a une capacité installée de 212,7 GW, son mix électrique produit 635,5 TWh et son impact selon l'indicateur du changement climatique est évalué à 27 Mt CO2eq (12 Mt CO2eq dans le bilan prévisionnel). Les impacts de son mix sont majoritairement issus des cycles combiné gaz (en marron), suivi de la cogénération gaz.

Dans le Bilan prévisionnel 2017, les émissions de CO2 étaient calculées à partir des émissions produites par les centrales de production d'électricité alimentées par les combustibles fossiles, hors bioénergies (dont l'impact carbone sur l'ensemble du cycle de vie est supposé neutre dans le cas d'une gestion « renouvelable » de la biomasse).

Avec une approche ACV, les émissions de tous les gaz à effet de serre sont comptabilisés pour toutes les filières et pour toutes les phases de vie (de l'extraction des matières premières pour la construction de la centrale en passant par la production d'électricité et jusqu'à la fin de vie de la centrale). La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** montre que l'impact selon l'indicateur du changement climatique est en réalité 1,6 à 2,6 fois plus important (selon le scénario) que le volume des seules émissions directes. En effet, des gaz à effet de serre sont aussi émis au moment de l'extraction du combustible et de la préparation du combustible ou encore à la phase de fabrication des composants du moyen de production et de leur transport et doivent être comptabilisés.

Toutefois, selon l'indicateur du changement climatique, quel que soit le scénario étudié, les impacts restent principalement issus des productions thermiques (CCG, TAC-gaz et cogénération au gaz).

**Changement climatique** exprimé en kg CO<sub>2</sub>eq (masse de CO<sub>2</sub> équivalent) – échelle globale

L'indicateur « changement climatique » représente les émissions de gaz à effet de serre, tels que le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>), le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O), ou encore les chlorofluorocarbures (CFCs) contribuant au réchauffement climatique à un horizon temporel de 100 ans. Du fait de l'effet de serre, l'augmentation de la concentration atmosphérique de ces différents gaz induit une augmentation de la température moyenne dans l'air et dans l'eau.

Le rayonnement solaire est réémis par la surface de la terre sous forme de rayonnement infrarouge, qui est lui-même partiellement absorbé par diverses espèces chimiques présentes dans l'atmosphère. Le bilan radiatif détermine la température moyenne de la planète. La présence de substances « à effet de serre » donne une température telle qu'elle permet la vie sur terre (sans cet effet, la température serait de l'ordre de -15°C). Le déséquilibre écologique provient donc non pas de l'existence de cet effet, indispensable à la survie de toute espèce, mais de l'augmentation de celui-ci.

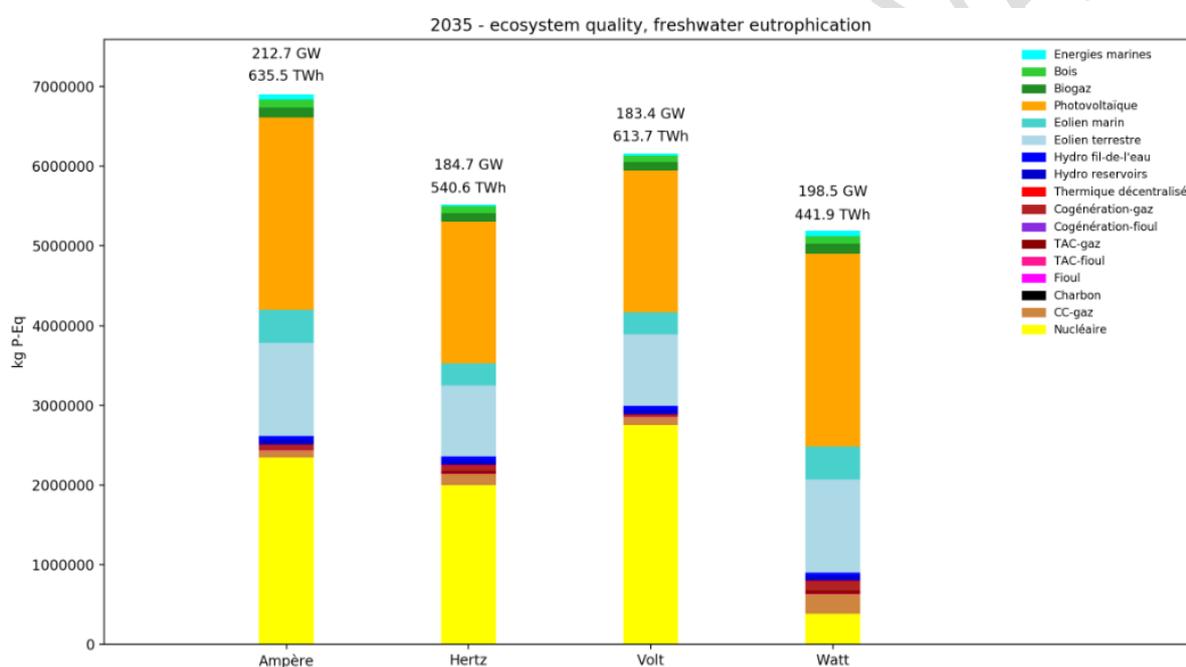
**3.2.3 Comparaison des scénarios en 2035 pour l'indicateur « eutrophisation eau douce »**

Figure 11 - Indicateur " eutrophisation eau douce " des quatre scénarios du Bilan prévisionnel 2017 en 2035

Clé de lecture : le scénario Hertz a une capacité installée de 184,7 GW, son mix électrique produit 540,6 TWh et son impact selon l'indicateur « eutrophisation eau douce » est évalué à 5,5 kt Peq.

L'indicateur « eutrophisation eau douce » est principalement tiré par la contribution des filières nucléaire, éolien et photovoltaïque. Dans les trois filières, l'eutrophisation semble causée par le rejet de phosphate au moment de la fabrication des composants des moyens de production (cas du photovoltaïque), soit par le traitement des déchets du combustible (c'est le cas du nucléaire) ou encore par les centrales de raffinerie du carburant servant à transporter les composants des moyens de production (c'est le cas de l'éolien).

Finalement, l'impact « eutrophisation eau douce » apparaît plus limité dans le scénario Watt du fait de la part plus faible du nucléaire dans le mix électrique.

**Eutrophisation de l'eau douce, exprimé en kg Peq (masse phosphore équivalent) – échelle locale**

L'indicateur « eutrophisation eau douce » représente l'impact potentiel d'émissions de composés phosphatés dans les cours d'eau. Ce phosphate, qui est un nutriment limitant pour les algues en eau douce, entraîne leur prolifération et, se faisant, conduisent à l'asphyxie des écosystèmes aquatiques.

**3.2.4 Comparaison des scénarios en 2035 pour l'indicateur « ozone photochimique »**

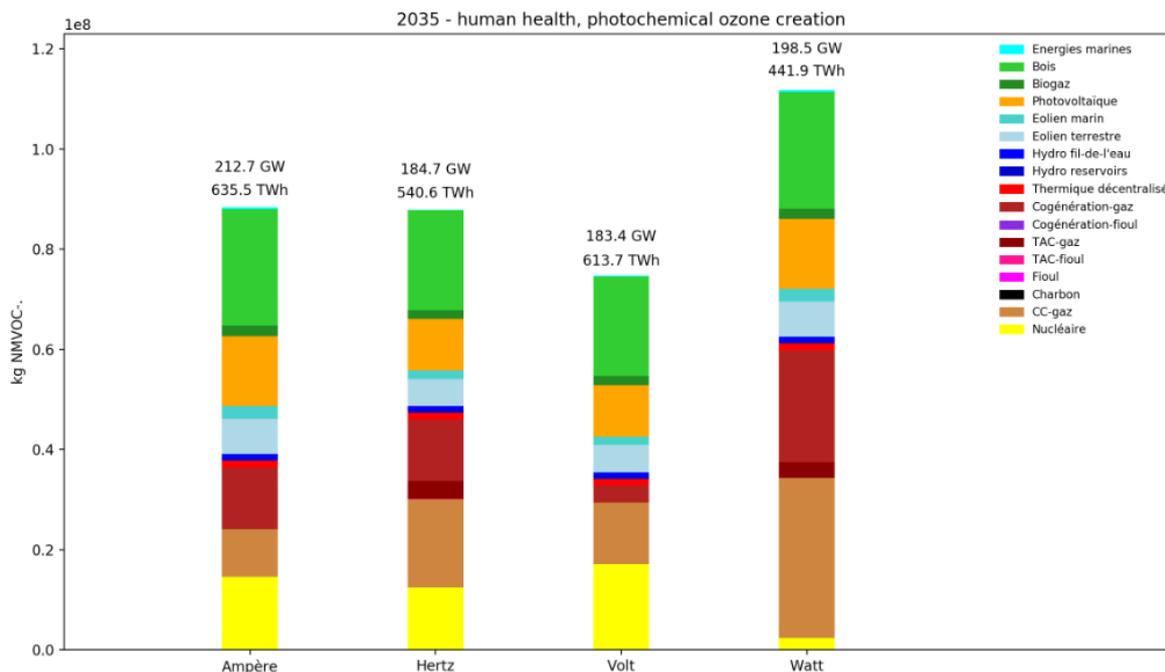


Figure 12 - Indicateur "ozone photochimique" des quatre scénarios du bilan prévisionnel 2017 à l'horizon 2035

Clé de lecture : le scénario Volt a une capacité installée de 183,4 GW, son mix électrique produit 613,7 TWh et son impact selon l'indicateur « ozone photochimique » est évalué à 74,7 kt NMVOC (12 Mt CO2eq dans le bilan prévisionnel). La majorité des filières du mix contribuent à l'impact potentiel.

La majorité des filières sont contributrices aux impacts selon l'indicateur « création ozone photochimique ». Les polluants atmosphériques peuvent être émis au moment de l'extraction des combustibles (c'est le cas pour le gaz et le nucléaire), dans la phase de construction des composants des centrales (c'est le cas du photovoltaïque), dans la phase de transport du combustibles (par pipeline pour le gaz, par poids lourd au diesel pour l'éolien) ou encore à la production d'électricité (bois et gaz).

**Création Ozone Photochimique, exprimé en kg NMVOC (masse composé organique volatile non méthanique) – échelle locale**

L'indicateur « ozone photochimique » représente la transformation, sous l'influence du rayonnement solaire, de polluants atmosphériques (COV, NOx, CO et SOx) en ozone et autres composés oxydants. Ces phénomènes ont lieu dans la troposphère qui est la partie de l'atmosphère terrestre située au plus proche de la surface du globe jusqu'à une altitude d'une dizaine de kilomètres. Les composés oxydants peuvent conduire à la formation d'une brume brunâtre constituée de particules fines et d'ozone, encore appelée smog photochimique<sup>12</sup>. Les oxydants formés ont des effets néfastes sur la santé humaine et sur la biodiversité (végétaux).

<sup>12</sup> Le smog photochimique est un mélange toxique de polluants atmosphériques que l'on peut souvent observer sous forme de brume diffuse dans l'air. Le terme smog est formé à partir des mots anglais smoke (fumée) et fog (brouillard). Il est constitué de particules fines et d'ozone. Le smog apparaît surtout en zones urbaines de circulation automobile intense, dans des conditions météorologiques de fort ensoleillement et de faible vent. Il est connu également sous le nom de "brouillard d'été".

### 3.2.5 Comparaison des scénarios en 2035 pour tous les indicateurs

Les trois exemples cités ci-dessus montrent une hiérarchie différente des indicateurs environnementaux selon les scénarios du BP 2017. L'analyse environnementale étant multicritère l'inter-comparaison des scénarios est possible à l'aide de visualisation en radar des indicateurs (voir figure ci-dessous).

Selon l'indicateur observé, la hiérarchie entre les scénarios varie. Il convient de noter que, bien que les filières thermiques n'aient pas une grande part dans le mix électrique, leur impact apparaît significatif dans tous les scénarios pour certains indicateurs (changement climatique et formation d'ozone photochimique notamment).

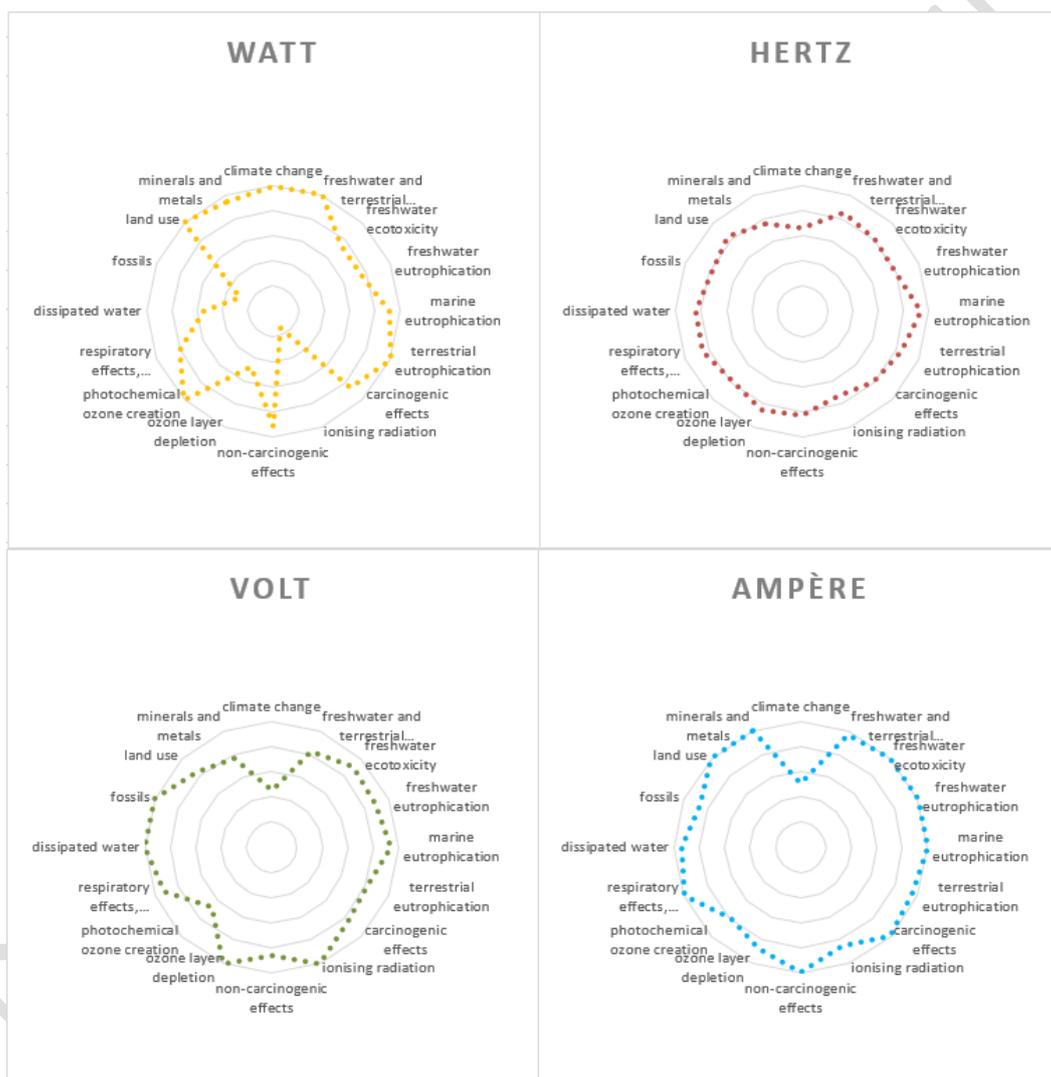


Figure 13 - comparaison des quatre scénarios du Bilan prévisionnel à l'horizon 2035 selon les 16 indicateurs ILCD - maille France

Clé de lecture : Le scénario Volt a la valeur la plus élevée des 4 scénarios pour l'indicateur « fossils », tandis qu'il est de l'ordre de 70% pour l'indicateur « photochemical ozone creation »

Les résultats observés dans les figures précédentes se retrouvent sur ces radars. Les radars mettent en avant les indicateurs pour lesquels les scénarios ont les valeurs les plus hautes. Par exemple, le scénario Watt a la valeur la plus élevée pour l'indicateur « changement climatique », pour l'indicateur « ecotoxicité » c'est le scénario Ampère ou encore pour l'indicateur « rayonnement ionisant » c'est le scénario Volt. Seul le scénario Hertz n'a de valeur maximale pour aucun indicateur. Selon les scénarios

les impacts potentiels ne se situent pas sur les mêmes indicateurs, bien que les scénarios Ampère et Volt ont des profils de radar relativement similaires.

**Ecotoxicité, exprimé en CTUe (comparative toxic unit for ecosystem) – échelle locale**

L'indicateur « ecotoxicity » représente les effets des rejets dans les cours d'eau de composés ayant un effet direct sur la santé des écosystèmes. Cet impact est caractérisé pour plus de 800 composés chimiques. L'unité CTUe traduit la fraction d'espèce potentiellement affectée pour un mètre cube pour une année.

**Fossils, exprimé en MJ – échelle globale**

L'indicateur « fossils » représente la somme de toutes les sources d'énergie qui sont directement puisées dans les réserves naturelles fossiles telles que le gaz naturel, le pétrole, le charbon, et l'énergie nucléaire.

### 3.3 Enseignements issus de l'étude-pilote

#### 3.3.1 Enseignement n°1 : l'analyse permet d'évaluer l'impact de chaque filière de production à chaque étape du cycle de vie

Dans la partie 0 le constat était fait que la filière « cycle combiné gaz » était responsable à plus de 50% des impacts du scénario Watt pour l'indicateur du réchauffement climatique. Avec la méthode développée il est possible de savoir à quelle hauteur l'impact s'élève, selon l'étape du cycle de vie des centrales. A titre d'exemple pour la filière gaz, l'impact se répartit en partie de la façon suivante :

- ➔ 4% des gaz à effet de serre sont émis à la combustion dans les stations de compression,
- ➔ 6% des gaz à effet de serre sont émis au moment du transport dans pipeline,
- ➔ 83% des gaz à effet de serre sont émis au moment de la combustion pour génération d'électricité.

Dans le cadre de l'analyse des résultats ceci permet également d'envisager de projeter la localisation des impacts (prélèvements ou rejet) sur l'environnement, et leur évolution éventuelle en fonction des autres évolutions de l'économie et du système énergétique (ex : localisation de l'industrie...)

#### 3.3.2 Enseignement n°2 : la prise en compte explicite du facteur de charge a un impact de premier ordre

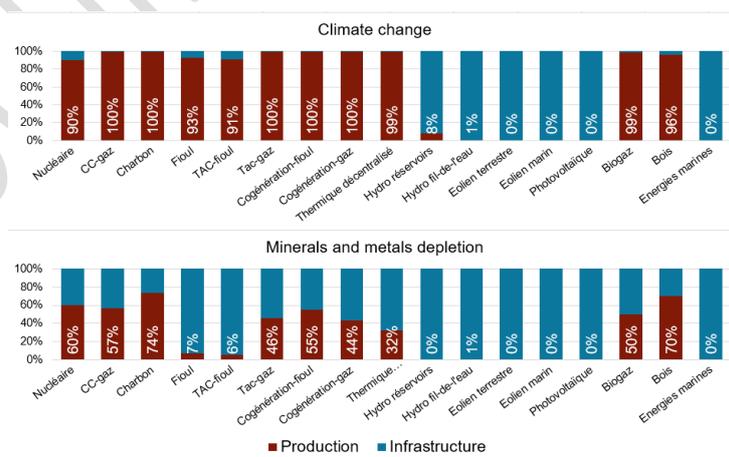


Figure 14 - répartition de la part relative à la phase de production sur l'infrastructure

Clé de lecture : Selon l'indicateur « climate change », 90% de l'impact potentiel de la filière nucléaire est liée à la phase de production (principalement la chaîne d'approvisionnement et d'élimination du combustible), tandis que pour les filières éolienne l'impact potentiel est concentré sur l'infrastructure (construction et déconstruction de la centrale)

NB : l'impact potentiel absolu des filières nucléaire et éolienne est faible comparé aux filières thermiques conventionnelles

La partie 0 a introduit l'intérêt de la méthode développée par RTE pour paramétrer le facteur de charge. La figure ci-dessus met en évidence pour chaque filière la part relative de la phase de production (production d'électricité et chaîne d'approvisionnement et élimination du combustible) par rapport à la phase liée à l'infrastructure (construction et déconstruction) selon 2 indicateurs ILCD.

Ainsi la part relative de la production dans le total de l'impact potentiel dépend de l'indicateur sélectionné et de la filière.

Dans l'outil SIMAPRO, les données par défaut Ecoinvent, en particulier les paramètres du facteur de charge et la durée de vie par filière, sont fixés, tandis que le modèle développé par RTE permet de modifier ces données. En effet, le facteur de charge détermine l'énergie qui sera produite pour une infrastructure donnée. La figure ci-dessous illustre l'influence du facteur de charge selon différents indicateurs.

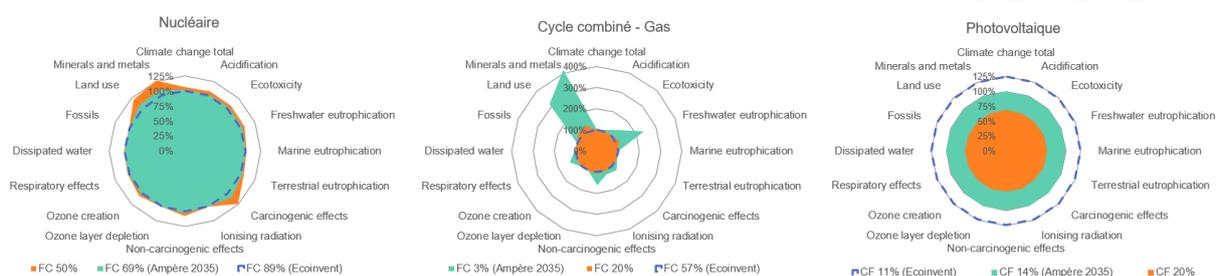


Figure 15 – Impact potentiel moyen du facteur de charge pour 1kWh généré par 3 filières selon 16 indicateurs  
Clé de lecture : l'impact potentiel selon l'indicateur "freshwater eutrophication" pour 1kWh généré par une unité de cycle combiné gaz est 2,5 fois plus grand (240%) pour un facteur de charge de 3% (en vert pour le scénario Ampère) au lieu de 57% (pointillé bleu dans le modèle par défaut d'Ecoinvent)

Les facteurs de charge ont été choisis délibérément de façon distinctes (mais réalistes) pour illustrer l'influence de ce paramètre sur les résultats d'étude ACV. Conformément à l'intuition, la figure ci-dessus montre que, plus le facteur de charge est élevé et plus l'impact potentiel par kWh est faible. En effet, lorsque le facteur de charge est faible, c'est-à-dire que la centrale ne fonctionne pas souvent à sa puissance maximale pendant sa durée de vie, un kWh supportera une charge plus importante des impacts liés à l'infrastructure.

Par conséquent, la durée de vie et le facteur de charge sont deux paramètres non négligeables dans l'analyse environnementale du cycle de vie d'un mix électrique. Tous ces effets additionnés peuvent conduire à un écart important entre la méthode par défaut d'Ecoinvent et celle développée par RTE comme illustrer dans la Figure 9 plus haut.

### 3.3.3 Enseignement n°3 : l'exercice requiert une base de données environnementales de qualité pour illustrer l'analyse de scénarios de manière pertinente

Dans l'étude présentée ici, les données d'inventaire, c'est-à-dire les flux de matières et d'énergie en amont, pendant et en aval des centrales de production d'électricité correspondent aux données par défaut de la base de données Ecoinvent. Ces données sont génériques et parfois peu spécifiques aux activités ou périmètre géographique considéré. Par exemple, le modèle d'éolienne est le même pour le monde entier. De même pour la filière nucléaire, la technologie d'enrichissement en uranium retenue par Ecoinvent est la diffusion gazeuse, alors que cette filière a été abandonnée complètement en France en 2012 au profit de la technologie d'ultracentrifugation.

**Afin de conserver une approche par filière type, une alternative intéressante est d'identifier, pour chacune des technologies énergétiques modélisées, un ensemble réduit de paramètres structurant en termes d'impact, puis de créer des modèles paramétrés d'inventaire. En faisant varier ces paramètres, il serait à la fois possible de tenir compte des évolutions technologiques et des spécificités temporelles et géographiques des parcs envisagés.** Cette approche permettrait également de changer le périmètre géographique de la modélisation (ajout de nouveaux pays) et de déterminer, indicateur par indicateur, l'incertitude liée à la connaissance limitée des dits paramètres et de leurs trajectoires futures (approche de type Monte Carlo).

Ce travail a été mené par le centre O.I.E. de Mines ParisTech [9] pour quelques filières. A titre d'exemple, les paramètres principaux suivants ont été discernés, reflétant la variabilité spatiale et temporelle des moyens de production :

- ➔ Pour la filière éolienne, le modèle paramétré a en entrée une vingtaine de paramètres dont : la capacité de l'éolienne, le diamètre du mât, la hauteur du mât, la distinction éolien en mer ou terrestre, la taille du parc dans lequel l'éolienne est, la distance au plus proche transformateur, la distance à la côte, la profondeur de la mer, la durée de vie, la masse de la fondation, la masse de la nacelle, etc... Tous ces paramètres ne sont pas tous indépendants (ex : la profondeur de la mer et la distance à la côte) ; il existe donc des relations entre les paramètres qui doivent être considérés dépendants, pour se ramener à un ensemble plus petit de paramètres indépendants.
- ➔ Pour la filière photovoltaïque, la variabilité temporelle et géographique peut aussi être résumée en une quinzaine de paramètres, dont les suivants : l'efficacité du module, la part d'aluminium recyclé pour la fabrication de la ferme, le type d'onduleur, la durée de vie de l'onduleur, l'épaisseur du verre sur chaque panneau, l'épaisseur des cellules, le type de cellules, le taux de recyclage, etc...

Pour les filières thermiques, les paramètres sont l'efficacité de la centrale, le facteur de charge moyen, le type et la provenance des combustibles en entrée, les fuites de combustible dans les procédés, etc.

Comme la base de données Ecoinvent est constituée, d'un ensemble d'hypothèses qui n'est pas nécessairement cohérent avec celles qui permettent de construire les scénarios du bilan prévisionnel 2050, **l'analyse retiendra un ensemble de données dérivée de la base Ecoinvent, où certaines hypothèses structurantes seront susceptibles d'être revisitées. En d'autres termes, les données de la base Ecoinvent seront utilisées par défaut, sauf à ce que RTE dispose d'hypothèses plus précises ou plus spécifiques pour certaines filières.**

### **3.3.4 Enseignement n°4 : les résultats sont très sensibles au périmètre géographique d'étude**

La figure ci-dessous illustre, selon 5 indicateurs sur les 16 (par souci de clarté), l'impact généré par 1kWh d'électricité produite en 2035, dans le scénario Ampère. En orange, l'impact a été calculé pour un périmètre géographique de la France et en violet si le mix européen est considéré<sup>13</sup>.

---

<sup>13</sup> Outre la France, les entités européennes modélisées explicitement dans le Bilan prévisionnel 2017 sont : l'Allemagne, l'Autriche, la Belgique, le Danemark, l'Espagne, la Grande-Bretagne, l'Irlande, l'Irlande du Nord, l'Italie, le Luxembourg, la Norvège, les Pays-Bas, La Pologne, le Portugal, la République Tchèque, la Suède et la Suisse.

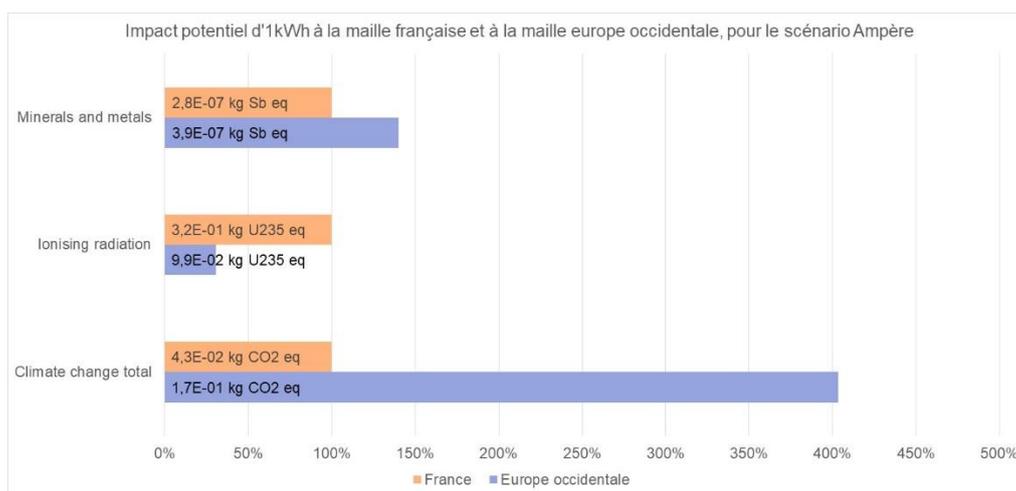


Figure 16 - impact potentiel d'1kWh à la maille française et à la maille europe occidentale - scénario Ampère

Ce graphique éclaire sur l'importance de définir le périmètre d'étude adéquat quand il s'agit de mener une étude ACV d'un mix de production prospectif. En effet les mix de production à l'échelle de la France ou à l'échelle de l'Europe occidentale sont largement différents. **Le Bilan prévisionnel vise à étudier les impacts associés aux choix publics sur le mix français, mais l'ensemble de l'Europe occidentale est modélisée pour refléter le fait que l'équilibre entre l'offre et la demande se fait au niveau européen.** L'analyse de ces différents indicateurs permet de mieux comprendre les implications de l'adoption d'un certain mix électrique prospectif, tant au niveau national qu'au niveau du périmètre du marché de l'électricité :

- L'épuisement des minéraux et métaux : un kWh d'Europe occidentale en 2035 a un impact 1,4 fois plus important qu'un kWh français. Parmi les filières, l'éolien et le photovoltaïque sont celles qui ont le plus d'impact sur les ressources de minéraux et des métaux. L'Europe occidentale a une pénétration relative plus élevée de ces deux technologies par rapport à la France, d'où un impact plus important pour cet indicateur à l'échelle européenne.
- Changement climatique : par rapport aux autres technologies, le charbon a un impact considérable sur le changement climatique. En France, les scénarios prospectifs supposent la fermeture des centrales à charbon avant 2025, d'où des résultats plus favorables pour les mix français pour cet indicateur.
- Rayonnements ionisants : cet impact est principalement dû au nucléaire qui est majoritairement localisé en France, les résultats sont donc meilleurs si l'on considère l'Europe dans son ensemble.

**Rayonnement ionisant**, exprimé en kg U235eq (masse d'uranium 235 équivalent) – échelle régionale

L'indicateur « ionizing radiation » représente les effets pour la santé humaine causés par l'exposition aux rayonnements ionisants. L'évaluation se base sur la radioactivité émise (qui se mesure en Becquerel) et sur l'exposition des organismes humains à ces rayonnements. Toute la radioactivité émise n'étant pas absorbée par les organismes humains, le débit de dose absorbé se mesure lui en Gray (1 Gy = 1 J/kg). Les effets biologiques des rayonnements ionisants sur la matière vivante sont eux exprimés en Sievert. En effet, la matière vivante, à énergie égale est plus ou moins sensible à certains types de rayonnement ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ), alors la dose équivalente est calculée, puis la dose efficace en tenant compte de la sensibilité diverse des organes à ces rayonnements.

### 3.3.5 Enseignement n°5 : les résultats sont sensibles aux méthodes de caractérisation des indicateurs

La Figure 9 de la partie 0 illustre que la contribution de la filière photovoltaïque est prépondérante selon l'indicateur « minerals and metals ». En effet, les volumes d'argent, d'or et de cadmium utilisés pour fabriquer les panneaux sont à l'origine de l'impact.

Cependant, ce résultat repose sur une méthode de caractérisation spécifique pour évaluer l'impact de l'utilisation des ressources minérales et métalliques. Or, les résultats peuvent fortement différer d'une méthode d'évaluation des impacts à l'autre, comme l'illustre la figure ci-dessous et aucune de ces méthodes ne fait consensus aujourd'hui [10].

Il apparaît donc essentiel d'essayer de choisir les indicateurs en fonction des substances prises en compte dans la méthode de caractérisation et en fonction des substances présentes dans le système étudié.

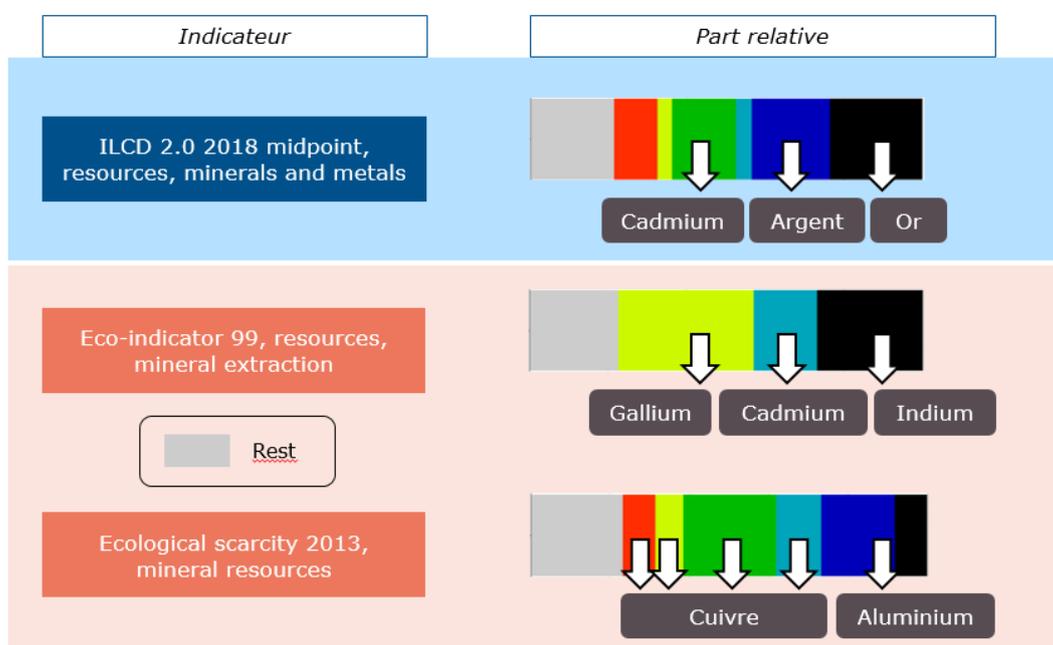


Figure 17 - part relative des minéraux et métaux selon 3 méthodes de caractérisation différentes pour 1kWh produit par la filière photovoltaïque en France (données Ecoinvent par défaut)

Clé de lecture : selon la méthode Eco-indicator 99, l'impact potentiel d'1kWh généré par la filière photovoltaïque sur l'indicateur ressources minérales seraient lié aux volumes de cuivre, nickel et aluminium pour la fabrication des panneaux et selon la méthode Ecological scarcity 2013 l'impact serait lié aux volumes de galium, cadmium et indium.

## 4. Pistes méthodologiques pour l'analyse environnementale des mix de production des scénarios du bilan prévisionnel 2050

Les observations et les enseignements tirés des travaux d'analyse environnementale détaillée des scénarios du Bilan prévisionnel 2017 permettent de projeter la méthodologie et les hypothèses qui seront utilisés pour l'analyse environnementale des scénarios à l'horizon 2050. Ces travaux permettent également d'identifier les axes d'approfondissement possibles par rapport à la méthode existante.

Les discussions avec les parties prenantes dans le cadre de la concertation viseront à définir les principaux enjeux et questions environnementales à étudier, afin de prioriser les travaux du Bilan prévisionnel (en tenant compte des limites de temps et de ressources disponibles pour la réalisation de ces travaux).

L'objectif de l'analyse ne visera évidemment pas à définir une hiérarchie des scénarios dans leur impact sur l'environnement mais plutôt d'éclairer sur les différents impacts possibles associés aux scénarios (selon plusieurs indicateurs) et la sensibilité des résultats aux différents choix et hypothèses utilisés.

### 4.1 Frontières du système étudié

Etant donné les premiers travaux menés à RTE, le périmètre étudié a un impact non négligeable sur les résultats. Une façon de déterminer le périmètre à étudier dans cette analyse serait de retenir le croisement entre le périmètre souhaitable et le périmètre réalisable.

Dans un premier temps, les périmètres suivants seront retenus :

- Le périmètre sectoriel se limite pour l'instant au mix de production d'électricité des scénarios sur l'ensemble du cycle de vie des centrales de production.
- Le périmètre géographique est défini à la maille de la France (mais connecté au réseau européen) dans un premier temps et fera l'objet d'une maille « électrique » européenne dans un second temps. Ceci signifie que l'analyse environnementale porte sur le système électrique français, même si les impacts potentiels de ce système seront évalués à l'échelle globale, indépendamment de la localisation géographique de ces impacts.

### 4.2 Méthode pour réaliser l'analyse cycle de vie des mix de production

La méthode d'analyse de cycle de vie utilisée dans les travaux menés par RTE a montré son intérêt pour mesurer les impacts environnementaux du mix électrique tout au long du cycle de vie des moyens de production. Plusieurs points sensibles ont été identifiés, comme la robustesse des données. Ainsi RTE souhaite améliorer les données d'inventaires par filière pour les rendre plus réalistes et proches des moyens de production développés et à développer en France.

### 4.3 Choix des indicateurs

Le choix des indicateurs d'impacts potentiels comme critère d'un processus décisionnel en fait une étape majeure de l'analyse cycle de vie. La norme ISO 14 044 précise qu'il est nécessaire de définir la description de la sélection des catégories d'impact, des indicateurs et des sets de modèles de caractérisation associés.

Le choix des indicateurs pour l'analyse environnementale des scénarios du bilan prévisionnel à l'horizon 2050 se fera à partir des 16 indicateurs disponibles et recommandés par l'ILCD Handbook [8] (*International Reference Life Cycle Data System*).

Dans ce jeu d'indicateurs, la robustesse de chacun des indicateurs est évaluée qualitativement d'après un consensus scientifique actuel : I pour les catégories les plus robustes, III pour les moins robustes (source : JRC). Pour les indicateurs de robustesse II ou III, RTE propose de comparer les résultats obtenus à ceux réalisés avec d'autres méthodes existantes. Si les résultats sont cohérents entre les méthodes utilisées, l'indicateur sera considéré robuste, tandis que si les résultats varient fortement, une analyse plus spécifique sera menée pour déterminer quel indicateur sera le plus représentatif de l'impact à mesurer (tout en gardant une cohérence entre le jeu d'indicateur final). Par exemple, l'indicateur le plus pertinent pourra être celui qui prend en compte le maximum des substances prélevées ou rejetées dans la biosphère dans les processus des scénarios étudiés.

Les 16 indicateurs retenus et leurs niveaux de robustesse associés sont listés dans le tableau ci-dessous.

Famille d'indicateur	Indicateur	Méthode d'origine	Robustesse
Climate Change	Climate change	IPPC, 2007	I
Human health	Ozone layer depletion	WMO, 1999	I
	Carcinogenic effects	USEtox (Rosenbaum et al 2008)	II/III
	Non-carcinogenic effects	USEtox (Rosenbaum et al 2008)	II/III
	Respiratory effects inorganics	RiskPoll model (Rabl and Spadaro, 2004) and Greco et al 2007	II/III
	Ionising radiation	Frischknecht et al 2000	II
	Photochemical ozone creation	Van Zelm et al 2008 as applied in ReCiPe2008	II
Ecosystem Quality	Freshwater ecotoxicity	USEtox (Rosenbaum et al 2008)	II/III
	Freshwater and terrestrial acidification	Seppala et al 2006, Posch et al 2008	II
	terrestrial Eutrophication	Seppala et al 2006, Posch et al 2008	II
	Freshwater eutrophication	ReCiPe2008 (EUTREND model -Struijs et al 2009b)	II
	Marine eutrophication	ReCiPe2008 (EUTREND model -Struijs et al 2009b)	II
Ressources	Land use	Mila I Canals et al 2007a	III
	Dissipated water	Ecoscarcity (Frischknecht et al 2008)	III
	mineral and metals	CML 2002 (Guinée et al 2002)	II
	fossils	CML 2002 (Guinée et al 2002)	II

Tableau 1 - Les 16 indicateurs d'impacts potentiels "midpoint" recommandés par l'ILCD Handbook

La multiplicité des critères d'analyse environnementale ne permet pas forcément une aide à la décision évidente. Par ailleurs, en matière d'environnement, il apparaît difficile de pondérer les différents impacts selon un indicateur unique, d'autant plus qu'ils sont reliés les uns aux autres par différentes chaînes de cause à effet.

**Toutefois dans le cadre de l'analyse environnementale des scénarios du bilan prévisionnel 2050 il pourra être intéressant d'essayer de mettre les résultats de l'analyse au regard des limites planétaires et ainsi de se concentrer sur les indicateurs les plus critiques.** Le rapport 2019 sur l'environnement en France [11] précise que « *Connaître l'impact de la France vis-à-vis de ces*

différentes limites est indispensable pour conduire une transition compatible avec le fonctionnement durable de la planète ». Face à la complexité des effets dont il s'agit de rendre compte, différentes propositions de mesure de ces limites planétaires ont été introduites dans les dernières décennies. Sans viser l'exhaustivité, la situation de tension actuelle peut être illustrée via, par exemple, la méthodologie scientifique développée par *Rockström et al., 2009*<sup>14</sup> [12], imputant à la France une contribution notable au dépassement de 6 des 9 limites qu'il identifie :

Limites planétaires	Situation mondiale		Situation / Contribution de la France
Changement climatique	Limite dépassée (notamment en termes de concentration de CO <sub>2</sub> dans l'atmosphère ; objectif de réchauffement maximal inférieur à 2 °C).		La France dépasse le budget cible de 1,6 à 2,8 t de CO <sub>2</sub> par personne et par an ; ses seules émissions territoriales s'élèvent à 4,9 t/hab. et l'empreinte CO <sub>2</sub> de sa population liée aux importations est de 7,9 t/hab.
Érosion de la biodiversité	Limite dépassée (le taux d'extinction d'espèces dépasse 10 fois le seuil fixé).		Évolution préoccupante selon l'indice Liste Rouge (de l'UICN), en métropole et dans les outre-mers. Par ailleurs, la présence en proportion importante d'espèces endémiques (exclusives d'un territoire) confère à la France une forte responsabilité vis-à-vis de ce patrimoine unique, souvent menacé.
Perturbation du cycle de l'azote, et du cycle du phosphore	Limite largement dépassée pour l'azote (pertes excessives). Limites dépassées pour le phosphore.		Les surplus d'azote et de phosphore tendent à diminuer avec des dépassements des seuils à l'échelle locale ; problèmes d'eutrophisation.
Changements d'utilisation des sols	Limite dépassée (surfaces forestières insuffisantes pour la régulation du climat).		La France contribue à la déforestation mondiale via ses importations ; la surface boisée nationale augmente mais les terres agricoles diminuent.
Acidification des océans	Limite globale non atteinte.	Forts risques d'acidification avec le réchauffement climatique.	Des effets de l'acidification marqués, notamment sur la faune (huîtres, poissons, récifs coralliens des outre-mers, etc.).
Utilisation mondiale de l'eau	Limite globale respectée (part de la ressource renouvelable en eau que les activités humaines peuvent utiliser sans compromettre durablement les écosystèmes).		Prélèvement global en deçà du seuil, mais les volumes prélevés en été (notamment pour le refroidissement des centrales nucléaires ou pour l'agriculture) dépassent localement les volumes d'eau renouvelables disponibles.
Appauvrissement de l'ozone stratosphérique	Limite quasiment satisfaite après des années de dépassement.		Les substances réglementées qui appauvrissent la couche d'ozone ont quasiment disparu ; certains des produits de substitution (ex : les hydrofluorocarbures ou HFC) ont toutefois un potentiel de réchauffement climatique élevé, ce qui a conduit à réglementer également.
Augmentation des aérosols dans l'atmosphère	Seuil global non défini. Situations régionales préoccupantes (Asie Sud-Est).		Améliorations constatées en France sur les différentes émissions de particules.
Entités nouvelles dans la biosphère	Seuil global non défini. Nanoparticules, etc., avec des impacts écotoxicologiques et environnementaux potentiels (de 5 à 13 millions de tonnes rejetées chaque année dans les océans).		La France contribue aux rejets de polluants chimiques dans l'environnement sur son territoire, mais également dans les océans (déchets plastiques).

Tableau 2 - Situation mondiale et contribution de la France aux limites planétaires  
(source : Rapport sur l'environnement 2019)

<sup>14</sup> Rockström et al., (2009). Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity, Ecology and Society 14(2): 32  
Cette méthodologie définit un espace de développement sûr et juste pour l'humanité, fondé actuellement sur neuf processus biophysiques qui, ensemble, régulent la stabilité de la planète : le changement climatique, l'érosion de la biodiversité, la perturbation des cycles biogéochimiques de l'azote et du phosphore, les changements d'utilisation des sols, l'acidification des océans, l'utilisation mondiale de l'eau, l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique, l'augmentation des aérosols dans l'atmosphère, l'introduction d'entités nouvelles dans l'écosphère.

#### 4.4 Caractère prospectif

La méthode actuellement développée par RTE a recours à une approche attributionnelle, qui est par nature statique. Les impacts sont donc calculés en « régime permanent », c'est-à-dire à « parc constant » (en puissance installée et en production). Les impacts liés à la production sont calculés à partir de l'énergie produite sur une année, mais les impacts liés à la construction et la déconstruction sont calculés pour une fraction de centrale construite et déconstruite sur une année. Si les impacts indirects du parc installé en France étaient calculés en 2019 par exemple, alors seraient compté les impacts dus à une fraction de la construction et la déconstruction des centrales construites avant 2019 et en 2019.

L'analyse environnementale du Bilan prévisionnel s'attachera à essayer de distinguer les impacts sur l'environnement passés, qu'il n'est donc plus possible d'éviter, des impacts à venir, et sur lesquels il est donc théoriquement possible d'agir.

**La prise en compte de l'effet dynamique, idéalement au pas d'un an, semble indispensable pour avoir une estimation plus affinée des impacts environnementaux des scénarios.**

DOCUMENT DE TRAVAIL

## 5. Bibliographie

- [1] RTE, 'Enjeux du développement de l'électromobilité pour le système électrique - principaux résultats', 2019.
- [2] RTE, 'Schéma décennal de développement du réseau - édition 2019', 2019.
- [3] Rees and William E., 'Ecological Footprints and Appropriated Carrying Capacity: What Urban Economics Leaves Out', 1992.
- [4] T. Dandres, C. Gaudreault, P. Tirado-Seco, and R. Samson, 'Assessing non-marginal variations with consequential LCA: Application to European energy sector', 2011.
- [5] E. G. Hertwich *et al.*, 'Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies', *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 112, no. 20, pp. 6277–6282, May 2015, doi: 10.1073/pnas.1312753111.
- [6] Masanet *et al.*, 'Life-Cycle Assessment of Electric Power Systems', 2013.
- [7] A. Boubault and N. Maïzi, 'Devising Mineral Resource Supply Pathways to a Low-Carbon Electricity Generation by 2100', *Resources*, vol. 8, no. 1, p. 33, Feb. 2019, doi: 10.3390/resources8010033.
- [8] European Commission, JRC, and Institute for Environment and Sustainability, *Characterisation factors of the ILCD Recommended Life Cycle Impact Assessment methods*. 2012.
- [9] R. Sacchi, R. Besseau, P. Pérez-López, and I. Blanc, 'Exploring technologically, temporally and geographically-sensitive life cycle inventories for wind turbines: A parameterized model for Denmark', *Renewable Energy*, vol. 132, pp. 1238–1250, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.09.020.
- [10] V. De Bruille, 'Impact de l'utilisation des ressources minérales et Métalliques dans un contexte cycle de vie : Une approche fonctionnelle', 2014.
- [11] Ministère de la Transition écologique et solidaire, 'L'environnement en France 2019 - rapport de synthèse'.
- [12] J. Rockström, W. Steffen, K. Noone, and Å. Persson, 'Planetary boundaries: Exploring the safe operating space for humanity', *Ecology and Society*, 2009.