

SCENARIOS DE TRANSITIONS ENERGETIQUES : FORCES ET FAIBLESSES DE L'ACV DANS UNE PERSPECTIVE DE RESSOURCES LIMITEES

RAPPORT FINAL

Juillet 2019

Responsables scientifiques

- Caroline Catalan, Gianluca Tonolo, Guillaume Neveux
I Care & Consult, 28 rue du 4 Septembre, 75002 Paris

- Mélissa Cornelus, Stéphane Le Pochat
EVEA, 8 rue des Thébaudières, 44800 Saint Herblain



icare
& consult



L'association SCORE LCA est une structure d'étude et de recherche dédiée aux travaux relatifs à l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) et à la quantification environnementale. Elle vise à promouvoir et à organiser la collaboration entre entreprises, institutionnels et scientifiques afin de favoriser une évolution partagée et reconnue, aux niveaux européen et international, de la méthode d'Analyse du Cycle de Vie et de sa mise en pratique.

- ✓ En Bibliographie, ce document sera cité sous la référence :
SCORE LCA, Scénarios de transition énergétiques : forces et faiblesses de l'ACV dans une perspective de ressources limitées, 2019, 133 pages, n°2017-02.
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)
www.ademe.fr
- ✓ Les points de vue et recommandations exprimés dans ce document n'engagent que les auteurs et ne traduisent pas nécessairement, sauf mention contraire, l'opinion de l'ensemble des membres de SCORE LCA.
- ✓ Les informations et les conclusions présentées dans le présent document ont été établies au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Comité de Suivi pour SCORE LCA: Erwan Autret – ADEME, Jean-Paul Cazalets – Total, Daniel Dunet - Veolia, Jade Garcia - SCORE LCA, Alain Geldron – ADEME, Anne Grau – EDF, Emmanuel Hache – IFPEN, Mary Hanoun – ENGIE, Denis Le Boulch – EDF, Stéphane Morel – Renault, Philippe Osset - SCORE LCA, Violaine Poulain – Renault, Anne Prieur-Vernat – ENGIE.

RESUME

Face aux enjeux du développement durable et de lutte contre le réchauffement climatique, les stratégies se sont multipliées, à l'échelle internationale comme régionale, avec pour ambition d'élaborer des scénarios d'évolution permettant (en théorie) de limiter l'augmentation globale des températures. Les différents scénarios de transition énergétique ne représentent pas des prédictions, mais bien les actions à entreprendre pour atteindre un objectif fixé. A ce titre, le scénario de l'Agence Internationale de l'Energie intitulé *Energy Technology Perspectives 2017*, fait figure de référence car il prend en compte de manière détaillée les émissions de différents secteurs d'activités. Il prévoit notamment une réduction de 70% des émissions annuelles de CO₂ du secteur énergétique par rapport au niveau actuel d'ici à 2060. Cependant, malgré le développement de scénarios de transition énergétique sophistiqués, il apparaît difficile d'appréhender la problématique de l'épuisement des ressources, notamment dans ce contexte de fort développement des énergies renouvelables. L'Analyse du Cycle de Vie (ACV), en tant que méthodologie multicritère, a un rôle clé à jouer pour évaluer les impacts environnementaux des scénarios de transition. Elle peut notamment permettre de « coupler » de manière précise, extensive et quantifiée les scénarios de transition et les flux de matière et d'énergie nécessaires à cette transition, et donc d'apporter une contribution importante au débat sur l'enjeu des ressources limitées. Cependant, différents freins à l'application de l'ACV dans ce contexte prospectif de scénario de transition peuvent être soulevés, à la fois méthodologique (ACV attributionnelle ou conséquentielle ?), relatifs à la disponibilité des données d'inventaire (évolution des technologies à horizon 2060 ?) ou encore à la caractérisation des impacts environnementaux (fiabilité des indicateurs d'épuisement des ressources disponibles dans un contexte prospectif ?). Ainsi, bien que l'ACV permette aujourd'hui une première évaluation quantitative des besoins en ressources pour la transition et une caractérisation des impacts concernant leur épuisement, différents travaux complémentaires seront nécessaires afin de fiabiliser ce type d'analyse.

MOTS CLES

Scénario de transition énergétique ; Analyse du Cycle de Vie ; Ressources

SUMMARY

In the context of sustainable development, its challenges and the fight against global warming, strategies have been multiplied, at both international and regional levels, with the aim of developing evolution scenarios that should (in theory) limit global temperature increases. The different energy transition scenarios do not represent predictions, but rather the actions to be taken to achieve a set objective. In this regard, the International Energy Agency's scenario entitled *Energy Technology Perspectives 2017* is a reference because it takes into account in detail the emissions of different sectors of activity. In particular, it forecasts a 70% reduction in annual CO₂ emissions from the energy sector compared to the current level by 2060. However, despite the development of sophisticated energy transition scenarios, it seems difficult to consider the problem of resource depletion, particularly in this context of strong development of renewable energies. Life Cycle Assessment (LCA), as a multi-criteria methodology, has a key role to play in assessing the environmental impacts of transition scenarios. In particular, it should be possible to "couple" in a precise, extensive and quantified way the transition scenarios and the flows of resources and energy necessary for this transition, and thus to make an important contribution to the debate on the issue of limited resources. However, various obstacles to the application of LCA in this prospective transition scenario context can be raised, related to methodology (attributional or consequential LCA?), the availability of inventory data (evolution of technologies by 2060?) or to the characterization of environmental impacts (reliability of indicators of depletion of available resources in a prospective context?). Thus, although LCA now allows for an initial quantitative assessment of resource needs for the transition and a characterization of the impacts regarding their depletion, various additional studies will be required to make this type of analysis more reliable.

KEY WORDS

Energy transition scenario; Life cycle assessment; Resources

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	9
1. Contexte et objectifs	9
2. Méthodologie générale.....	9
I. BIBLIOGRAPHIE.....	11
1. Etat de l'art des scénarios de transition énergétique	11
1.1. Grille d'analyse des scénarios	11
1.2. Focus sur le scénario Energy Technology Perspectives 2DS de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) 13	
1.3. Analyse comparative des scénarios	17
1.4. Cas de la France : focus sur le scénario « Visions 2050 » de l'ADEME	23
2. Etat de l'art des travaux existants et en cours sur le sujet « matériaux et transition énergétique.....	26
2.1. Les ressources minérales : un enjeu clé pour la transition énergétique.....	26
2.2. Enseignements préliminaires sur les matériaux et la transition énergétique	27
2.3. Des enjeux différents selon les catégories de matières premières	32
3. Evaluation environnementale des scénarios de transition énergétique	38
3.1. Un besoin d'évaluation identifié	38
3.3. L'évaluation de scénarios de transition énergétique par l'Analyse du Cycle de Vie	40
II. APPLICATION : MODELISATION ACV D'UN SCENARIO DE TRANSITION ENERGETIQUE.....	43
1. Objectif	43
2. Périmètre d'étude.....	43
3. Approche méthodologique	45
4. Unité fonctionnelle	45
5. Définition des hypothèses de référence pour l'ACV du scénario ETP 2017 2DS	45
6. Méthodologie d'évaluation des impacts sur les ressources.....	47
6.1. Terminologie	47
6.2. Concept de réserves.....	47
6.3. Méthodes de caractérisation	49
6.4. Mise à jour de la méthode Schneider et al. (AADP 2015)	49
6.5. Résumé des différences entre méthodes	54
7. Résultats de l'ACV « test »	55
7.1. Comparaison du périmètre couvert par l'étude avec les données USGS	55
7.2. Evolution de la consommation en 2025, 2040 et 2060	56
7.3. Analyse de la contribution des différents secteurs (et technologies) sur la consommation de métaux : effet volume et effet transition.....	57
7.4. Impact sur l'épuisement des ressources du scénario ETP 2017 (2DS)	68
7.4.1. Analyse des facteurs de caractérisation (FC)	68
7.4.2. Analyse des résultats comparatifs des scénarios selon les méthodes	71
7.4.3 Analyse de contribution des différentes ressources à l'impact d'épuisement des ressources selon les méthodes	73
7.5. Conclusion.....	85
III. RECOMMANDATIONS POUR L'APPLICATION DE L'ACV A L'EVALUATION D'UN SCENARIO DE TRANSITION ENERGETIQUE.....	88

1. Problématiques associées à l'étude	88
2. Etape 1 : définition des objectifs et du champ de l'étude	89
2.1. ACV attributionnelle ou conséquentielle ?	89
2.2. Statique ou dynamique ?	90
3. Etape 2 : analyse de l'inventaire.....	92
3.1. Ampleur de la collecte de données.....	92
3.2. Régionalisation de l'inventaire.....	92
3.3. Cohérence des technologies décrites par le scénario de transition énergétique et les technologies disponibles dans la base de données ACV	93
3.4. Adapter la collecte de données pour la modélisation de technologies futures mal connues aujourd'hui	95
4. Etape 3 évaluation de l'impact : amélioration des méthodes de caractérisation	96
5. Etape 4 interprétation : Incertitudes liées aux hypothèses.....	98
6. Synthèse	99
IV. CONCLUSIONS	101
ANNEXE 1 - BIBLIOGRAPHIE	102
ANNEXE 2 - FICHES DES SCENARIOS DE TRANSITION ENERGETIQUE.....	105
Energy Technology Perspective 2DS – AIE	105
Sustainable Development Scenario (SDS) – AIE	108
Faster transition (2018) – BP	109
Energy [R]evolution (E[R])- Greenpeace	110
Sky – Shell	111
World Energy Scenarios - World Energy Council	112
Ecofys Energy Scenario – WWF.....	114
Visions 2050 – ADEME.....	114
ANNEXE 3 – INVENTAIRE DU CYCLE DE VIE POUR L'ACV TEST.....	116

Liste des figures

Figure 1 : Approche méthodologique pour l'étude	10
Figure 2 : Le modèle ETP- TIMES. Source : ETP, AIE.....	14
Figure 3 : Demande globale en énergie primaire en 2014 et 2060 (International Energy Agency, 2017)	15
Figure 4 : Mix énergétique mondial (consommation d'énergie finale par source d'énergie) en 2060 (Energy Technology Perspectives, AIE).....	16
Figure 5 : Evolution de la consommation d'énergie finale par secteur entre 2014 et 2060 (ETP 2018, AIE).....	16
Figure 6 : Evolution des émissions de gaz à effet de serre par secteur entre 2014 et 2060 (ETP 2018, AIE).....	17
Figure 7 - Représentation des différents scénarios étudiés en fonction du mix énergétique et de l'évolution de la consommation énergétique. Source : I Care & Consult	20
Figure 8 : Fonctionnement du modèle ThreeME (I Care & Consult, 2018).....	23
Figure 9 : Consommation énergétique totale en 2010, 2035 et 2050 par forme d'énergie (Source : ADEME).....	24
Figure 10 : Bilan des consommations finales d'énergie par secteur en 2010, 2035 et 2050. (Source : ADEME).....	24
Figure 11 : Emissions de gaz à effet de serre de la France continentale (Source : ADEME)	25
Figure 12 : Schéma récapitulatif du raisonnement pour évaluer l'épuisement des ressources.....	27
Figure 13 : Les différentes phases du projet SURFER	28
Figure 14 : Synthèse de l'analyse bibliographique sur l'enjeu ressources dans la transition énergétique	31
Figure 15 : Liste 2017 des Matières Premières Critiques pour l'Union Européenne (HREEs = Heavy Rare Earth Elements, LREEs = Light Rare Earth Elements, PGMs = Platinum Group Metals)	32
Figure 16 : Taux de recyclage en fin de vie de 60 métaux. Les cases vides indiquent qu'il n'y a pas de données disponibles (Graedel, Allwood, et al., 2011a)	36
Figure 17 : Illustration du principe itératif de la démarche d'évaluation environnementale (Delduc et al., 2015).....	38
Figure 18 : Matrice d'analyse ou grille multicritère (Delduc et al., 2015)	39
Figure 19 : Exemple de périmètre d'évaluation d'un scénario de mobilité pour la ville de Copenhague à horizon 2030 (adapté de Bohnes, 2017)	42
Figure 20 : Représentation schématique d'un scénario de transition énergétique	43
Figure 21 : Périmètre retenu pour l'ACV test	44
Figure 22 : Diagramme de Mc Kelvey (1972) modifié par Gordon et al. (2007) (Fizaine, 2014)	49
Figure 23 : Comparaison du facteur de caractérisation original (Schneider et al. 2015) par rapport aux facteurs mis à jour	69
Figure 24 : Analyse des résultats comparatifs des scénarios selon les méthodes.....	71
Figure 25 : Comparaison des méthodes de caractérisation et contribution à horizon 2015	73
Figure 26 : Comparaison des méthodes de caractérisation et contribution à horizon 2025	76
Figure 27 : Comparaison des méthodes de caractérisation et contribution à horizon 2040	79
Figure 28 : Comparaison des méthodes de caractérisation et contribution à horizon 2060	82
Figure 29 Segmentation temporelle des modèles de caractérisation utilisés lors de la phase de caractérisation	91
Figure 30 : Consommation d'énergie dans l'industrie de l'acier : état actuel et projection (source Intervention workshop ScoreLCA, O. Vidal)	95
Figure 31 : Pistes de recherches à court et moyen terme pour l'amélioration de l'évaluation ACV d'un scénario de transition énergétique	100

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques des scénarios étudiés	18
Tableau 2 : Identification des données d'activités issues du scénario ETP 2017 et autres sources de données mobilisées	46
Tableau 3 : Définition des différents types de réserves	47
Tableau 4 : Ressources ultimes extractibles selon les différents horizons de temps	51
Tableau 5 : Stocks anthropogéniques selon les différents horizons de temps	52
Tableau 6 : Facteurs de caractérisation utilisés dans l'étude	53
Tableau 7 : Principales différences dans les données sources dans les méthodes de caractérisation de l'impact sur les ressources	55
Tableau 8 : Evaluation comparative de la consommation de ressources entre l'étude ACV et les données de l'USGS 2015	55
Tableau 9 : Consommation en 2015 et différence de consommation par matière première entre deux années du scénario	57
Tableau 10 : Contribution des principaux macro-secteurs au delta de consommation entre 2015 et 2040 en millions de tonnes	57
Tableau 11 : Contribution des principaux macro-secteurs au delta de consommation entre 2015 et 2040 en kilo tonnes	58
Tableau 12 : Delta cumulé 2040 par rapport à 2015	58
Tableau 13 : Effet volume et effet transition du delta cumulé entre 2015 et 2040	59
Tableau 14 : Comparaison des données du scénario avec un mix de puissance installée sans transition (unité : GW)	60
Tableau 15 : Comparaison de l'effet volume et de l'effet transition pour le secteur de la production d'électricité entre 2015 et 2040	60
Tableau 16 : Part de l'effet transition et de l'effet volume du delta cumulé 2040 vs 2015 pour le secteur Power	62
Tableau 17 : Contribution de chaque technologie à l'effet transition du delta cumulé pour le secteur Power	62
Tableau 18 : Comparaison de l'effet volume et de l'effet transition pour les véhicules automobiles entre 2015 et 2040	63
Tableau 19 : Contribution de chaque technologie au delta de consommation pour le secteur Automobile	63
Tableau 20 : Contribution des différentes technologies à la part du delta de consommation due à l'effet transition entre 2040 et 2015	64
Tableau 21 : Comparaison de l'effet volume et de l'effet transition du delta cumulé pour le secteur Automobile	64
Tableau 22 : Contribution de chaque technologie du secteur Automobile à l'effet transition du delta cumulé	65
Tableau 23 : Contribution des différentes technologies au delta de consommation entre 2040 et 2015	65
Tableau 24 : Comparaison de l'effet volume et de l'effet transition pour le fret routier entre 2015 et 2040	66
Tableau 25 : Contribution de chaque technologie à l'effet transition du delta de consommation 2040-2015 du secteur fret	66
Tableau 26 : Delta cumulé 2040-2015 et part de l'effet volume et de l'effet transition pour le secteur Autre Transport	67
Tableau 27 : Contribution des différentes technologies à l'effet transition du delta cumulé 2040-2015 du secteur fret	67
Tableau 28 : Comparaison des facteurs de caractérisation (FC) entre les méthodes AADP Schneider et la méthode AADP mise à jour aux différents horizons de temps	70
Tableau 29 : Evolution des nouveaux facteurs de caractérisation	70
Tableau 30 : Résultats des scénarios selon les méthodes	71
Tableau 31 : Taux de variation des impacts sur les différents horizons de temps	72
Tableau 32 : Quelles ressources les plus extraites (top 10 selon le scénario IEA ETP 2017 modélisé et analysé) à horizon contribuent à plus de 2% en termes d'impact sur les ressources selon les méthodes en 2015	73
Tableau 33 : Analyse croisée des facteurs et taux d'extraction des principales ressources identifiées par la méthode CML UR en 2015	74
Tableau 34 : Analyse croisée des facteurs et taux d'extraction des principales ressources identifiées par la méthode CML RB en 2015	74

Tableau 35 : Analyse croisée des facteurs et taux d'extraction des principales ressources identifiées par la méthode AADP (Schneider et al. 2015) en 2015	75
Tableau 36 : Analyse croisée des facteurs et taux d'extraction des principales ressources identifiées par la méthode AADP mise à jour en 2015	75
Tableau 32 : Quelles ressources les plus extraites (top 10 selon le scénario IEA ETP 2017 modélisé et analysé) contribuent à plus de 2% en termes d'impact sur les ressources selon les méthodes en 2025	76
Tableau 33 : Analyse croisée des facteurs et taux d'extraction des principales ressources identifiées par la méthode CML UR en 2025.....	77
Tableau 34 : Analyse croisée des facteurs et taux d'extraction des principales ressources identifiées par la méthode CML RB en 2025.....	77
Tableau 35 : Analyse croisée des facteurs et taux d'extraction des principales ressources identifiées par la méthode AADP (Schneider et al. 2015) en 2025	78
Tableau 36 : Analyse croisée des facteurs et taux d'extraction des principales ressources identifiées par la méthode AADP mise à jour en 2025	78
Tableau 37 : Quelles ressources les plus extraites (top 10 selon le scénario IEA ETP 2017 modélisé et analysé) à horizon contribuent à plus de 2% en termes d'impact sur les ressources selon les méthodes en 2040	80
Tableau 38 : Analyse croisée des facteurs et taux d'extraction des principales ressources identifiées par la méthode CML UR en 2040.....	80
Tableau 39 : Analyse croisée des facteurs et taux d'extraction des principales ressources identifiées par la méthode CML RB en 2040.....	81
Tableau 40 : Analyse croisée des facteurs et taux d'extraction des principales ressources identifiées par la méthode AADP (Schneider et al. 2015) en 2040	81
Tableau 41 : Analyse croisée des facteurs et taux d'extraction des principales ressources identifiées par la méthode AADP mise à jour en 2040	82
Tableau 42 : Quelles ressources les plus extraites	83
Tableau 43 : Analyse croisée des facteurs et taux d'extraction des principales ressources identifiées par la méthode CML UR en 2060.....	83
Tableau 44 : Analyse croisée des facteurs et taux d'extraction des principales ressources identifiées par la méthode CML RB en 2060.....	84
Tableau 45 : Analyse croisée des facteurs et taux d'extraction des principales ressources identifiées par la méthode AADP (Schneider et al. 2015) en 2060	84
Tableau 46 : Analyse croisée des facteurs et taux d'extraction des principales ressources identifiées par la méthode AADP mise à jour en 2060	85
Tableau 47 : Application de l'ACV à un scénario de transition	88
Tableau 48 : Recommandations pour l'amélioration de l'évaluation environnementale d'un scénario de transition par l'ACV	99

Introduction

1. Contexte et objectifs

Face aux enjeux du développement durable et de lutte contre le réchauffement climatique, les stratégies se sont multipliées, à l'échelle internationale comme régionale, avec pour ambition d'élaborer des scénarios d'évolution permettant (en théorie) de limiter l'augmentation globale des températures.

Les différents scénarios de transition énergétique ne représentent pas des prédictions, mais permettent d'étudier le champ des possibles en termes de demande et de production énergétique, notamment dans le but de définir les actions à entreprendre pour atteindre un objectif climatique fixé. En France par exemple, la Loi relative à la Transition Énergétique pour la Croissance Verte (Loi TECV) a défini, en particulier, un outil de pilotage pour animer et suivre la politique de décarbonation de l'économie française et de transformation de son modèle énergétique : la stratégie nationale bas-carbone (SNBC).

Cependant, malgré le développement de scénarios de transition énergétique sophistiqués, il apparaît difficile d'appréhender la problématique de l'épuisement des ressources. Depuis quelques années de nombreuses études sont menées pour évaluer les interactions entre les problématiques des ressources et les scénarios de transition.

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV), en tant que méthodologie multicritère de référence, a un rôle clé à jouer pour évaluer les impacts environnementaux des scénarios de transition. Elle peut notamment permettre de « coupler » de manière précise, extensive et quantifiée les scénarios de transition et les flux de matière et d'énergie nécessaires à cette transition, et donc d'apporter une contribution importante au débat sur l'enjeu des ressources limitées. Des questions de méthodologies et de données doivent cependant être résolues, que ce soit sur les indicateurs d'épuisement de ressource utilisées ou sur la prise en compte du côté prospectif, afin que les résultats de l'ACV puissent donner une réponse pertinente sur la question des ressources dans la transition énergétique.

Dans ce contexte, SCORELCA et ses membres souhaitent mener la présente étude visant à mieux appréhender l'impact de la transition énergétique sur la problématique de l'épuisement des ressources et de comprendre les forces et les faiblesses de l'ACV pour l'évaluation de ces scénarios. Ainsi, les objectifs spécifiques de cette étude sont :

- Réaliser une analyse détaillée des travaux sur le sujet « enjeu matière et transition énergétique »
- Définir un ensemble de recommandations pour l'application de l'ACV aux scénarios de transition énergétique avec un focus sur l'enjeu « épuisement des ressources »
- Appliquer l'ACV à un corps d'hypothèses relatif à un scénario énergétique existant (scénario 2°C de l'AIE par exemple) et illustrer une partie des recommandations établies.

2. Méthodologie générale

Cette étude a une visée théorique mais surtout pratique : c'est pourquoi, après une phase de bibliographie et une phase de recommandations sur les meilleures façons d'utiliser l'ACV pour évaluer un scénario de transition énergétique, l'étude se concrétisera à travers un cas d'application précis. Les conclusions de l'étude auront pour objectif, à partir du retour d'expérience de ce cas d'application, de déterminer dans quelle mesure, à court-terme comme à moyen terme, l'ACV pourrait permettre de caractériser l'enjeu de l'épuisement des ressources dans un scénario de lutte contre le changement climatique.

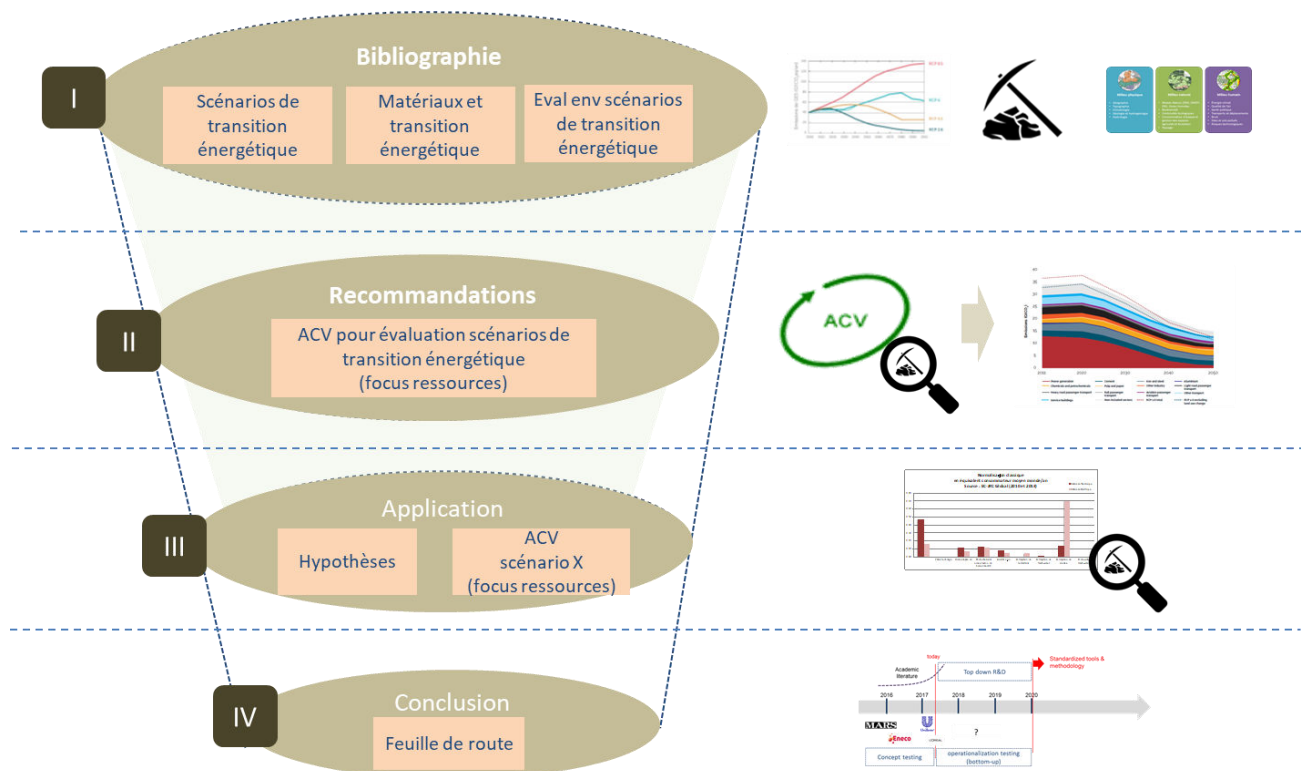


Figure 1 : Approche méthodologique pour l'étude

I. Bibliographie

1. Etat de l'art des scénarios de transition énergétique

Un scénario de transition énergétique est une projection de la demande et de l'offre d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre (GES) associées, avec un horizon de temps et un périmètre bien défini. En proposant une trajectoire, avec un détail des consommations et des productions d'énergie, l'enjeu d'un scénario est de, non pas prévoir l'avenir, mais d'explicitier comment atteindre une série d'objectifs en révélant leurs conditions de réussite ainsi que d'autres hypothèses structurantes. Un scénario de transition énergétique a pour objectif la réduction des émissions de GES liées à la production et consommation d'énergie, en ligne avec des objectifs spécifiques comme par exemple la limitation du réchauffement de la planète à 2°C. Il est axé sur la maîtrise de la consommation énergétique et sur le développement de l'offre d'énergie (notamment renouvelable), mais également sur les technologies de réduction des émissions de CO₂ telles que la Capture et le Stockage du Carbone.

Pour répondre aux objectifs de l'étude, les scénarios suivants ont fait l'objet d'une analyse spécifique :

- AIE – Energy Technology Perspectives - 2DS
- AIE – World Energy Outlook – Sustainable Development Scenario
- BP – Faster Transition
- Greenpeace – Energy [R]evolution
- Shell – Sky
- World Energy Council – World Energy Scenarios – Unfinished Symphony
- WWF – Ecofys Energy Scenario
- ADEME – Visions 2050

Ces scénarios ont notamment été choisis pour leur capacité à suivre une trajectoire « 2°C », c'est-à-dire permettant de limiter la hausse de température moyenne de la surface terrestre à moins de 2°C en 2100 par rapport à l'ère préindustrielle. Plusieurs types de développeurs de scénarios ont également été sélectionnés afin de permettre une représentativité de parties prenantes : organisations internationales, organisations non-gouvernementales ou entreprises.

1.1. Grille d'analyse des scénarios

Afin d'analyser les différents scénarios de transition énergétique retenus, l'étude s'est focalisée sur leurs caractéristiques principales afin de comprendre les objectifs de chaque scénario ainsi que leur méthode de construction. Chacune des caractéristiques, décrites ci-dessous, sont explicitées pour chaque scénario dans les fiches de présentation en annexe :

- Nature du développeur : Organisation Non-Gouvernementale, nationale ou internationale, organisme gouvernemental ou secteur privé ;
- Type de modélisation utilisée : top-down, bottom-up ou hybride.
 - Les modèles top-down ou macro-économiques, proposent une représentation relativement sophistiquée des flux économiques du système décrit, mais s'abstiennent de représenter explicitement les flux physiques et contraintes techniques du système ;
 - Les modèles bottom-up, ou technico-économiques proposent une représentation réaliste des flux physiques d'énergie et de matière dans l'économie en tenant compte des technologies de production réelle, mais ne permettent pas d'analyser l'évolution des flux économiques du système.
 - Les modèles dits « hybrides », associant représentation explicite de flux physiques et modélisation des flux économiques, relèvent aujourd'hui de l'exception dans le champ de la modélisation.
- Approche analytique, c'est-à-dire la manière d'analyser les résultats issus du modèle, en décrivant quelques spécificités du modèle ;
- Horizon temporel et pas de temps considéré ;
- Périmètre géographique.

Certaines hypothèses de fond, différentes pour chaque scénario, ont également été détaillées, à savoir :

- L'évolution de la croissance économique ;
- L'évolution de la croissance démographique ;
- L'évolution des prix des énergies ;
- Les technologies bas-carbone prises en compte ;
- Les politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre envisagées.

Pour chaque scénario, l'étude se focalise également sur l'évolution de la demande en énergie primaire, l'évolution de la consommation d'énergie finale par source et secteur, et les trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre par secteur, ce qui représente les éléments de sortie du scénario et les résultats attendus par la mise en œuvre du scénario.

Par ailleurs, les fiches ont été complétées en fonction de la disponibilité des données, qui varie selon les différents scénarios.

1.2. Focus sur le scénario Energy Technology Perspectives 2DS de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE)

1.2.1 Introduction

Le scénario Energy Technology Perspectives (ETP) 2DS de l'AIE a été traité plus spécifiquement, car les trajectoires énergétiques et d'émissions de GES des secteurs sont très détaillées et permettent de réaliser des analyses plus précises. De plus c'est souvent ce scénario qui est utilisé comme scénario 2°C de référence par plusieurs initiatives internationales comme l'initiative *Science-Based Targets*.

La fiche détaillée pour le scénario ETP de l'AIE, et les 6 fiches descriptives simplifiées seront donc présentées de manière synthétique dans cette partie.

1.2.2 Caractéristiques principales

Le rapport « Energy Technology Perspectives » (ETP) est publié chaque année par l'AIE (International Energy Agency, 2017). L'édition 2018 propose 3 scénarios différents :

- Le scénario de référence, appelé « Reference Technology Scenario » (RTS), propose une tendance qui prend en compte les technologies existantes et les engagements actuels des pays, incluant les INDCs (Intended Nationally Determined Contributions) soumis avant l'Accord de Paris. Ce scénario est plus ambitieux qu'un scénario dit « business-as-usual », mais ne permet pas d'atteindre l'objectif de l'Accord de Paris, à savoir de contenir le réchauffement climatique d'ici à 2100 bien en-dessous de 2°C par rapport aux niveaux préindustriels.
- Le *2 Degree Scenario* (2DS). Ce scénario établit une trajectoire de développement du système énergétique et de réduction des émissions de CO₂ compatibles avec une probabilité d'au moins 50% de limiter l'augmentation de la température moyenne globale à +2°C avant 2100, en lien avec les engagements pris lors des Accords de Paris. Ce scénario prévoit une réduction de 70% des émissions annuelles de CO₂ du secteur énergétique par rapport au niveau actuel d'ici à 2060. Par ailleurs, il aboutit à un total d'émissions cumulées d'environ 1170 gigatonnes de CO₂ (GtCO₂) entre 2015 et 2100 en prenant notamment en compte les émissions spécifiques des procédés industriels (ciment, acier, aluminium etc.).
- Le « Beyond 2 Degrees Scenario » (B2DS), où la neutralité carbone du système énergétique mondial est atteinte en 2060, pour limiter la hausse de température à +1,75°C d'ici à 2100. La neutralité carbone, aussi appelée « zéro émissions nettes » est définie comme un équilibre entre les émissions anthropiques et les absorptions par les puits de gaz à effet de serre. Elle s'appuie sur les mécanismes de compensation carbone (capture et stockage de carbone), permettant de financer la réduction d'émissions de gaz à effet de serre via l'achats de crédit carbone issus d'un projet mené sur un territoire.

L'horizon temporel des 3 scénarios développés par l'AIE est 2060, avec un pas de temps entre les analyses de 5 ans, sauf pour le secteur « Conversion de l'énergie » qui a été analysé avec un pas de 2 heures pour 4 jours types dans l'année en fonction des saisons. L'intérêt de ce dernier pas temporel est de pouvoir adapter l'offre aux pics de la demande en énergie électrique.

Le scénario est défini selon un périmètre global, avec 28 pays et régions principaux qui sont traités séparément comme l'ASEAN (Association des nations de l'Asie du Sud-Est), le Brésil, la Chine, l'UE (Union Européenne), l'Inde, le Mexique, la Russie, l'Afrique, les Etats-Unis etc.

Le modèle utilisé est un modèle de type bottom-up, à savoir le modèle ETP-TIMES (acronyme de The Integrated Markal-Efom System). C'est un modèle (d'équilibre partiel) technologique et dynamique d'optimisation sous contrainte (Maïzi & Assoumou, 2007) permettant d'examiner sur le long terme des technologies déjà disponibles ou en développement pour 4 secteurs différents (Conversion de l'énergie, Industrie, Bâtiment, Transport). L'objectif est d'étudier l'impact de ces technologies sur l'offre, la demande d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre. Il est ainsi possible à partir de données technico-économiques et d'hypothèses exogènes (demande, coût des ressources, taux d'actualisation, etc.) de fournir les évolutions des principaux déterminants du système énergétique, à savoir l'estimation des émissions de polluants, la simulation de différentes compétitions technologiques

et économiques, les conséquences de politiques énergétiques ou encore l'effet de ruptures technologiques.

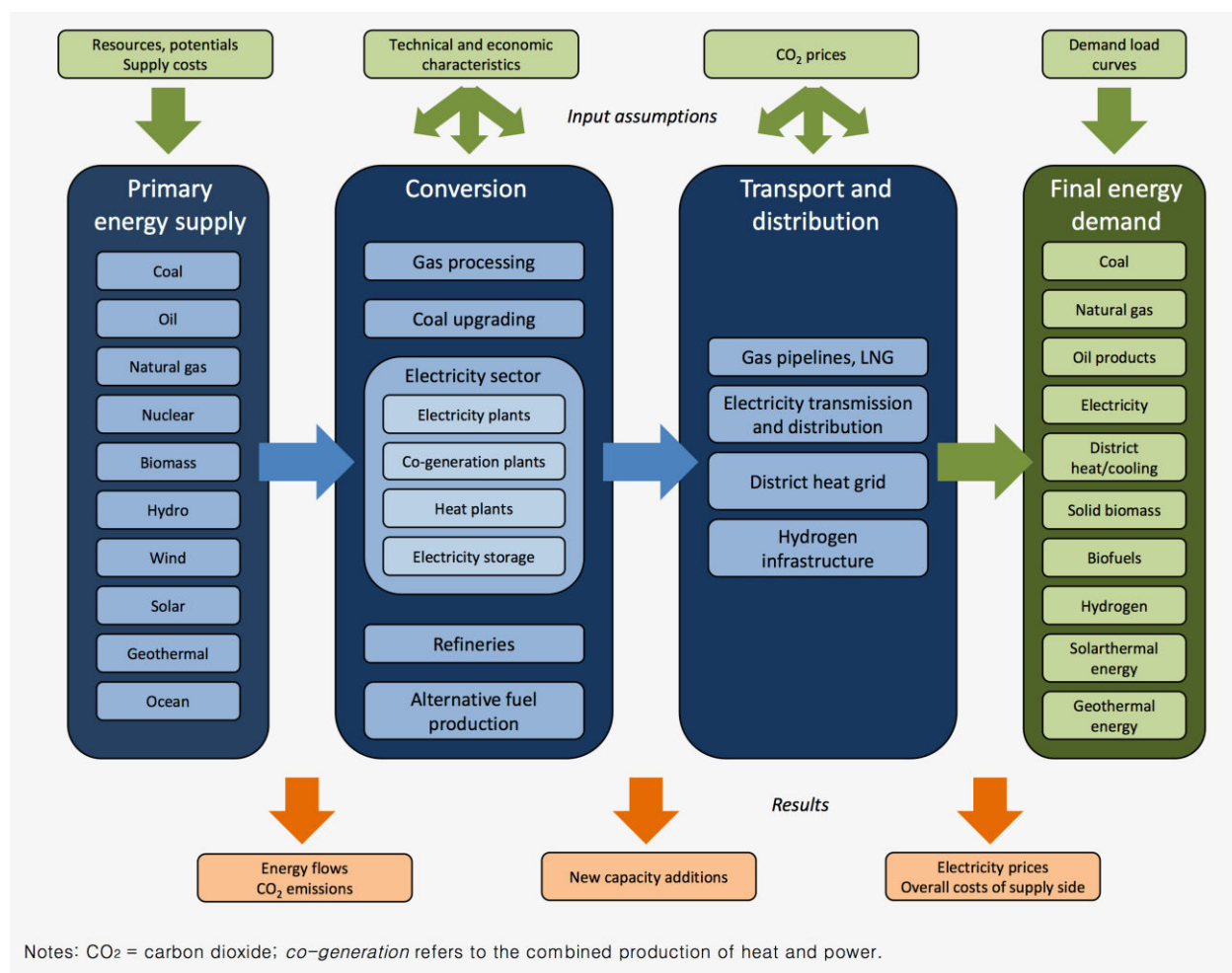


Figure 2 : Le modèle ETP- TIMES. Source : ETP, AIE.

1.2.3 Hypothèses du scénario 2DS

La croissance économique et la croissance démographique sont deux hypothèses structurantes dans un scénario de transition énergétique. Dans le cas du scénario 2DS, il est considéré que le PIB mondial est multiplié par 3 entre 2017 et 2060 et que la population atteint 10 milliards d'habitants en 2060 (contre 7,2 milliards en 2014). Le scénario 2DS considère également des politiques climatiques ambitieuses, notamment via des mesures visant à changer le comportement des consommateurs, comme par exemple des mesures incitant au report modal vers des modes de transport plus doux, pour permettre une transition vers des technologies bas-carbone.

Par ailleurs, les prix des énergies, notamment des ressources fossiles, sont les principales variables du scénario 2DS. Il est considéré une augmentation constante des prix tout au long de la période d'étude, à cause de la demande énergétique mondiale croissante. Les technologies et politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre ont cependant un impact considérable sur la demande, particulièrement au regard des énergies fossiles.

Du point de vue technologique, ETP combine une approche « backcasting » (rétrospective) et « forecasting » (exploratoire) : la première cherche à mettre en évidence les étapes à franchir pour atteindre l'objectif global des 2°C tandis que la seconde s'intéresse davantage aux contraintes à court terme. Notamment, le scénario prend en compte toutes les technologies déjà commercialisées, ou en phase de développement mais **il ne prend pas en compte l'apparition de technologies futures à ce jour inconnues**. Dans les hypothèses prises en compte, les rendements des technologies s'améliorent et les coûts de ces dernières diminuent au cours du temps. Il est important de souligner que, pour de nombreuses raisons, ce ne sont pas nécessairement les technologies aux coûts les plus faibles qui sont

déployées, ces dernières n'étant pas forcément les plus pertinentes pour réduire drastiquement les émissions, et il existe aussi d'autres facteurs non modélisables : les préférences politiques, les contraintes en capital ou l'acceptabilité sociale.

Enfin, afin de renforcer et de baser les hypothèses sur des éléments solides, des consultations approfondies ont été menées avec des experts sectoriels internes et issus de certains Etats étudiés (Canada, Allemagne, Japon, Pays-Bas et Suède). Cette étude a également été relue par un très grand nombre de spécialistes venant d'organismes comme l'IAEA (International Atomic Energy Agency), l'IRENA (International Renewable Energy Agency) ou encore EDF.

1.2.4 Résultats

Comme indiqué précédemment, un scénario de transition énergétique permet d'avoir une vision future sur les consommations d'énergies (primaire et finale) par source et par secteur, et sur les émissions de gaz à effet de serre associées.

- **Consommation d'énergie primaire par source**

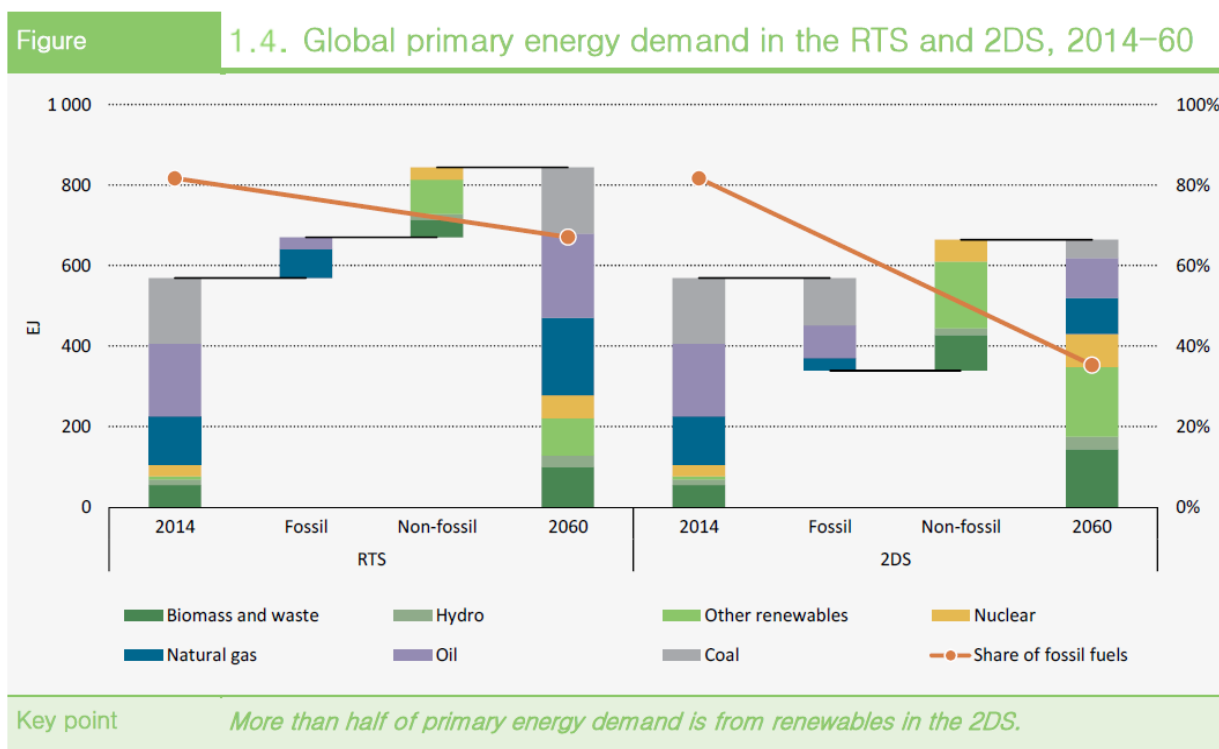


Figure 3 : Demande globale en énergie primaire en 2014 et 2060 (International Energy Agency, 2017)

Comme présenté à la Figure 3, la demande totale en énergie primaire croît de 17% entre 2014 et 2060 dans le scénario 2DS. Les sources énergétiques sont : les énergies renouvelables hors hydraulique et biomasse à 26% (contre 1,4% en 2014), la biomasse et déchets à 22% (contre 10% en 2014), le pétrole à 15% (contre 32% en 2014), le gaz naturel à 13% (contre 21% en 2014), le nucléaire à 12% (contre 5% en 2014), le charbon à 7% (contre 29% en 2014) et l'hydraulique à 5% (contre 2,5% en 2014). Les énergies fossiles représentent 35% de la demande en énergie primaire en 2060, contre 82% en 2014.

- **Consommation d'énergie finale par source**

Figure 1.5. Final energy demand in the RTS and 2DS, 2014–60

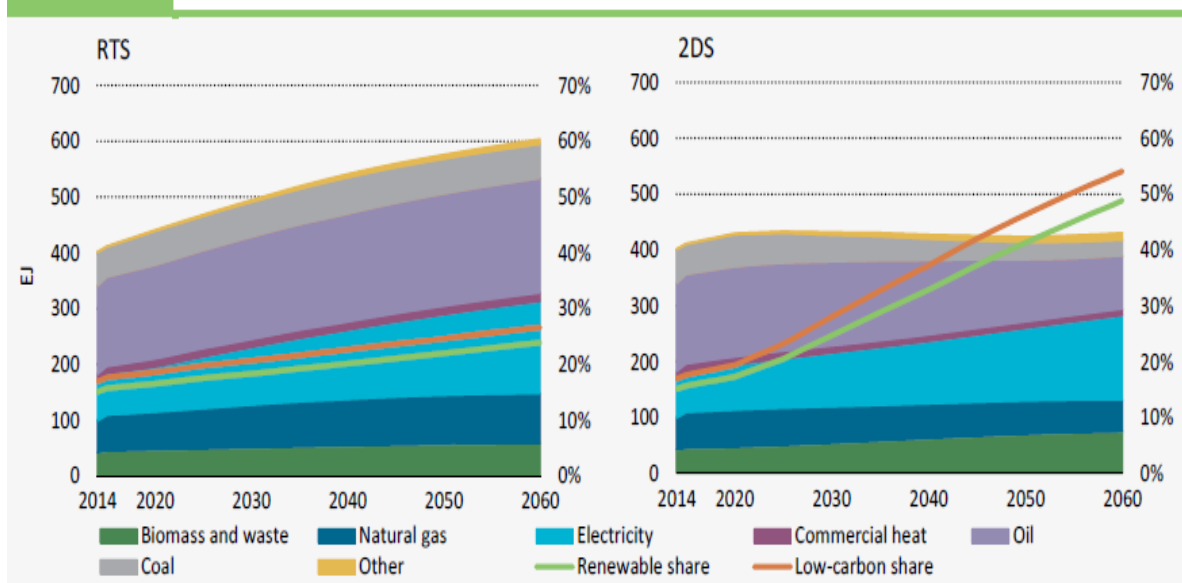


Figure 4 : Mix énergétique mondial (consommation d'énergie finale par source d'énergie) en 2060 (Energy Technology Perspectives, AIE)

Dans le scénario 2DS, la consommation finale d'énergie en 2060 (401EJ) serait 7% plus élevée qu'en 2014 (430 EJ). Plus de la moitié (56%) de celle-ci est satisfaite par des sources bas-carbone (dont énergies renouvelables) en 2060, alors qu'en 2014 cette part était d'environ 17%. Les énergies fossiles représentent 44% du mix d'énergie finale consommée. On note par exemple que les produits pétroliers chutent à 22% (contre 39% en 2014) et le charbon à 6% (contre 15% en 2014).

- **Consommation d'énergie finale par secteur**

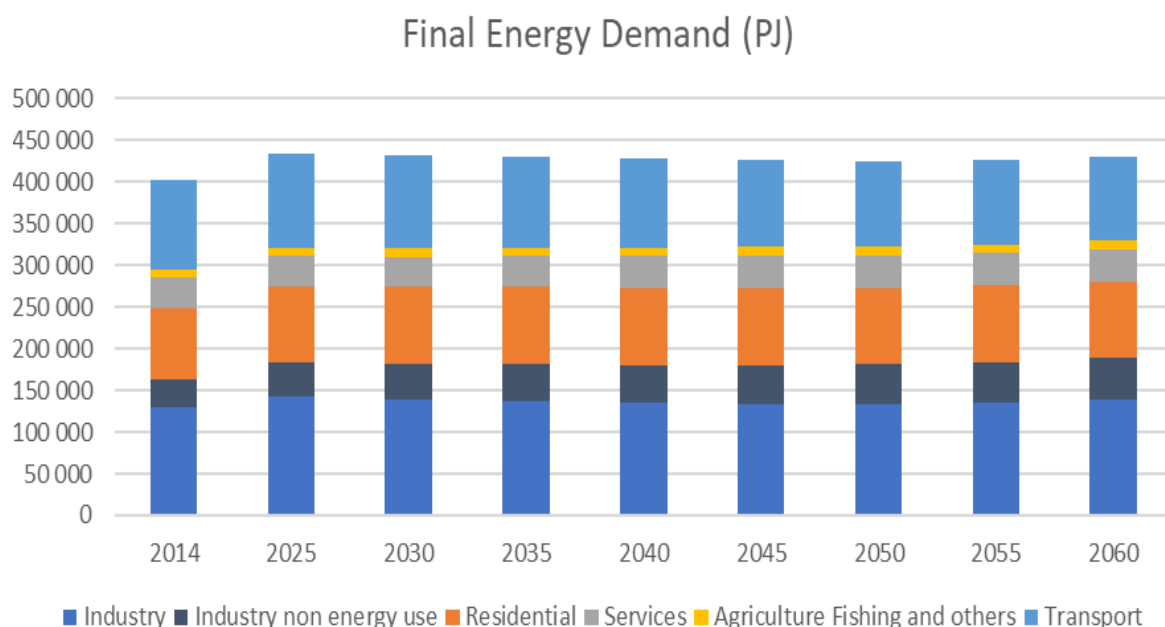


Figure 5 : Evolution de la consommation d'énergie finale par secteur entre 2014 et 2060 (ETP 2018, AIE)

L'évolution de la consommation d'énergie finale par secteur est limitée. On peut constater cependant une légère augmentation de la part consacrée à l'industrie.

- **Emissions de gaz à effet de serre**

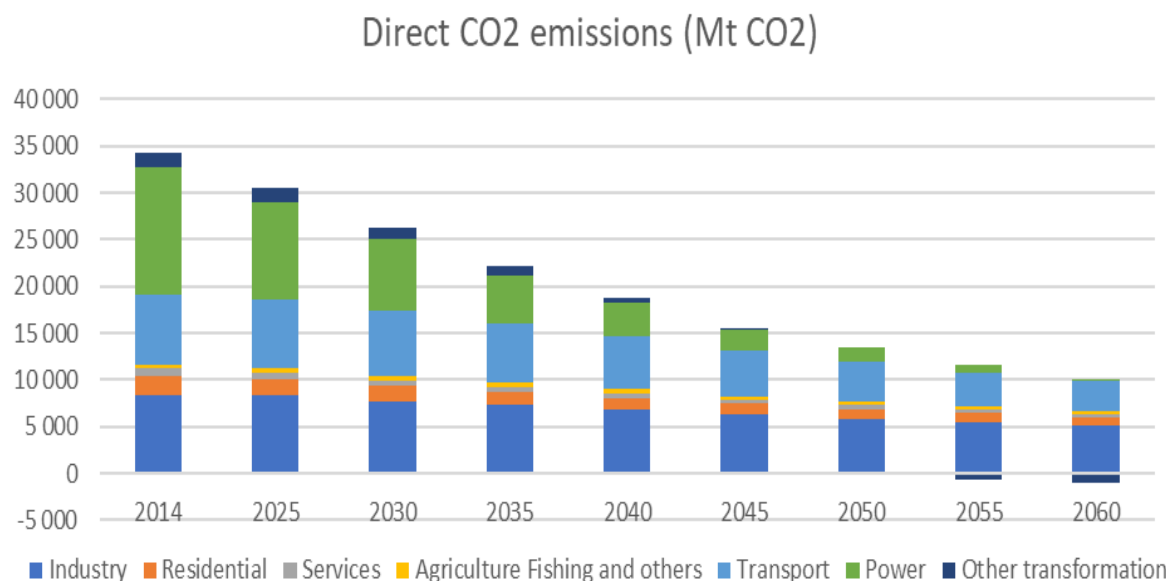


Figure 6 : Evolution des émissions de gaz à effet de serre par secteur entre 2014 et 2060 (ETP 2018, AIE)

Dans le scénario 2DS, les émissions globales de CO₂ diminueraient de 61% entre 2014 (34 254 MtCO₂) et 2060 (8 975 MtCO₂), principalement grâce à la décarbonation de l'électricité (- 89%), du transport (-42%) et de l'industrie (-31%). 20 % de cette réduction serait obtenue grâce à l'utilisation de technologies de capture et de stockage du carbone (6 645 MtCO₂ stockés en 2060) dans l'industrie et la production de l'électricité.

La neutralité carbone du système électrique peut être atteinte dans ce scénario impliquant un déploiement massif des technologies bas-carbone, et en particulier les énergies renouvelables. Dans le mix électrique, le solaire photovoltaïque (à 17%), l'hydraulique (à 17%), le nucléaire (à 15%) et l'éolien terrestre (à 15%) constituent les principales sources d'énergie en 2060.

Les transports seraient également très largement décarbonés, puisque le scénario prévoit 160 millions de véhicules électriques, sachant qu'aujourd'hui ce nombre est de 2 millions. Une baisse des transports individuels au profit des transports collectifs permettrait de réduire la consommation énergétique des déplacements et de mieux gérer l'électrification des véhicules, réduisant ainsi l'investissement requis.

Les industries intensives en énergie, grâce à la mise en place de procédés industriels décarbonés, contribueraient à 18% des réductions des émissions de gaz à effet de serre cumulées. Les secteurs stratégiques concernés sont par exemple l'acier (dont la demande augmente sur la période), l'aluminium, le papier, la chimie ou le ciment.

1.3. Analyse comparative des scénarios

Les 7 scénarios étudiés ont été analysés et comparés selon plusieurs critères : l'horizon temporel, le mix d'énergie primaire, l'évolution de la consommation d'énergie finale et enfin les émissions de gaz à effet de serre associées. Les principales caractéristiques sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 1 : Caractéristiques des scénarios étudiés

Nom du scénario	Horizon temporel	Mix d'énergie primaire			Consommation d'énergie finale	Emissions de gaz à effet de serre	Remarques
		Energies renouvelables	Energies fossiles	Nucléaire			
AIE – ETP 2DS	2060	52% EnR 25% (hors biomasse et hydraulique) Biomasse 22% Hydraulique 5%	35% Pétrole 15% Gaz naturel 13% Charbon 7%	12%	430 EJ en 2060 (+6% par rapport à 2014)	9 GtCO ₂ en 2060 (-61% par rapport à 2014), 19 GtCO ₂ en 2040	Orienté prospective technologique et ne se base pas que sur la rentabilité des technologies
AIE – WEO Sustainable Development	2040	30% (dont hydraulique et biomasse)	60% Gaz naturel 24% Pétrole 23% Charbon 13%	10%	425 EJ (10 173 Mtep, +7% par rapport à 2016)	18,3 GtCO ₂ en 2040 (-42% par rapport à 2016)	Orienté politiques climatiques, accès à l'énergie et amélioration de la qualité de l'air
BP – Faster Transition	2040	33% EnR (hors hydraulique) 25% Hydraulique 8%	60% Pétrole 25% Gaz naturel 22% Charbon 13%	7%	<i>669 EJ (lecture graphique) [Energie primaire]</i> Cependant, un graphique montre une hausse de la consommation d'énergie primaire d'environ 25%.	25 GtCO ₂ en 2040 (-24% par rapport à 2016)	Vision à moyen-terme, et pas d'objectif de satisfaire l'Accord de Paris.
Greenpeace – Energy [R]evolution	2050	76%	24%	-	289 EJ en 2050 (-11% par rapport à 2012)	4,4 GtCO ₂ en 2050 (-80% par rapport à 1990)	Orienté énergies renouvelables et prévoit l'arrêt du nucléaire
Shell – Sky	2070	67% Dont : Solaire 32% Eolien 13%	22% Pétrole 10% Gaz naturel 6% Charbon 6%	11%	<i>Aucun chiffre mais doublement de la consommation énergétique mondiale d'ici 2070</i>	Neutralité carbone en 2070	Orienté politiques climatiques et accès à l'énergie. Gains majeurs grâce aux technologies
World Energy Council – World Energy Scenarios (Unfinished Symphony)	2060	36% 19% Biomasse 13% Autres renouvelables 4% Hydraulique	51% 24% Gaz 22% Pétrole 5% Charbon	13%	478 EJ (+21% par rapport à 2014)	12,6 GtCO ₂ en 2060 (-60% par rapport à 2014)	Orienté politiques climatiques, « croissance modérée mais intelligente » et coopération internationale et régionale forte
WWF – Ecofys Energy Scenario	2050	95%	5%	-	-26% par rapport à 2014	Environ 4 GtCO ₂ en 2050 (-80% par rapport à 1990)	Orienté énergies renouvelables et prévoit l'arrêt du nucléaire

1.3.1 Principaux résultats concernant les autres scénarios étudiés

Le scénario de **Greenpeace** prévoit un fort taux d'énergies renouvelables dans le mix énergétique (76% en 2050), combiné à une baisse de la consommation énergétique primaire (-19% en 2050 par rapport à 2012). L'ONG exclut l'énergie du nucléaire du mix, et souhaite à terme se diriger vers un mix 100% renouvelable vers la fin du siècle. Les émissions atteignent environ 4 GtCO₂ en 2050, soit une baisse de -80% par rapport à 1990 (Greenpeace, 2015).

Le scénario **WWF** compte également sur un développement rapide et massif des énergies renouvelables, comme l'atteste le taux d'énergies renouvelables de 74% en 2050 dans le mix énergétique mondial. La baisse de la consommation énergétique finale est également importante (-26% en 2050 par rapport à 2014), ce qui permet des émissions de GES très faibles en 2050 (WWF, 2013).

Le scénario **Shell** considère encore une part de nucléaire non négligeable (11%) en 2070. Cette forte décarbonation du mix énergétique, combiné à une baisse de la consommation énergétique (20 à 25%), permet dans ce scénario de réduire drastiquement les émissions de gaz à effet de serre, et d'atteindre la neutralité carbone en 2070 (Shell, 2018).

Le scénario **ETP 2DS** estime que le taux d'énergies renouvelables serait environ de 52% en 2060, mais que la consommation énergétique finale augmente de 6% en 2060 par rapport à 2014.

Le scénario **WEO Sustainable Development de l'AIE** considère un taux d'énergies renouvelables d'environ 30% en 2030 et une hausse de la consommation énergétique finale de 7% en 2040 par rapport à 2014. Il est assez similaire à ETP 2DS en termes d'émissions de GES à l'horizon 2050 (environ 19 GtCO₂ en 2050).

Le scénario **Unfinished Symphony de World Energy Council** possède un mix énergétique assez proche des scénarios de l'AIE, avec une place grandissante des énergies renouvelables (36%) mais des énergies fossiles toujours bien présentes (World Energy Council, 2016). Cependant, celui-ci table sur une hausse importante de la consommation d'énergie d'ici à 2060 (+21%) comparé aux deux derniers scénarios évoqués.

Enfin, le scénario **Faster Transition de BP** peut être qualifié de modéré, malgré une hausse non-négligeable des énergies renouvelables (33% en incluant l'hydraulique). La hausse de la consommation d'énergie (+25%) peut expliquer une réduction des émissions de gaz à effet de serre moins marquée que les autres scénarios (BP, 2018).

Ci-dessous, les scénarios étudiés ont été classifiés selon deux axes :

- Le scénario table-t-il sur une hausse ou une baisse de la consommation énergétique d'ici à 2050¹ ? Le milieu de l'axe représente une stagnation de la consommation (axe vertical) ;
- Le mix énergétique en 2050 tend-il vers 100 % d'énergie renouvelable ou les énergies fossiles sont-elles encore massivement présentes ? Le milieu de l'axe représente 50 % d'énergie renouvelable en 2050 (axe horizontal).

Enfin, un indicateur coloré indique si en 2050, la neutralité carbone sera atteinte (en vert foncé) ou si les émissions de GES resteront fortes (en rouge). Sachant que les scénarios n'ont pas tous le même horizon temporel, il a été décidé que l'année sur laquelle s'appuyer pour effectuer les comparaisons est 2050.

¹ NB : pour les scénarios limités à 2040, une extrapolation a été réalisée jusqu'en 2050 à partir des taux de croissance annuels moyens (TCAM)

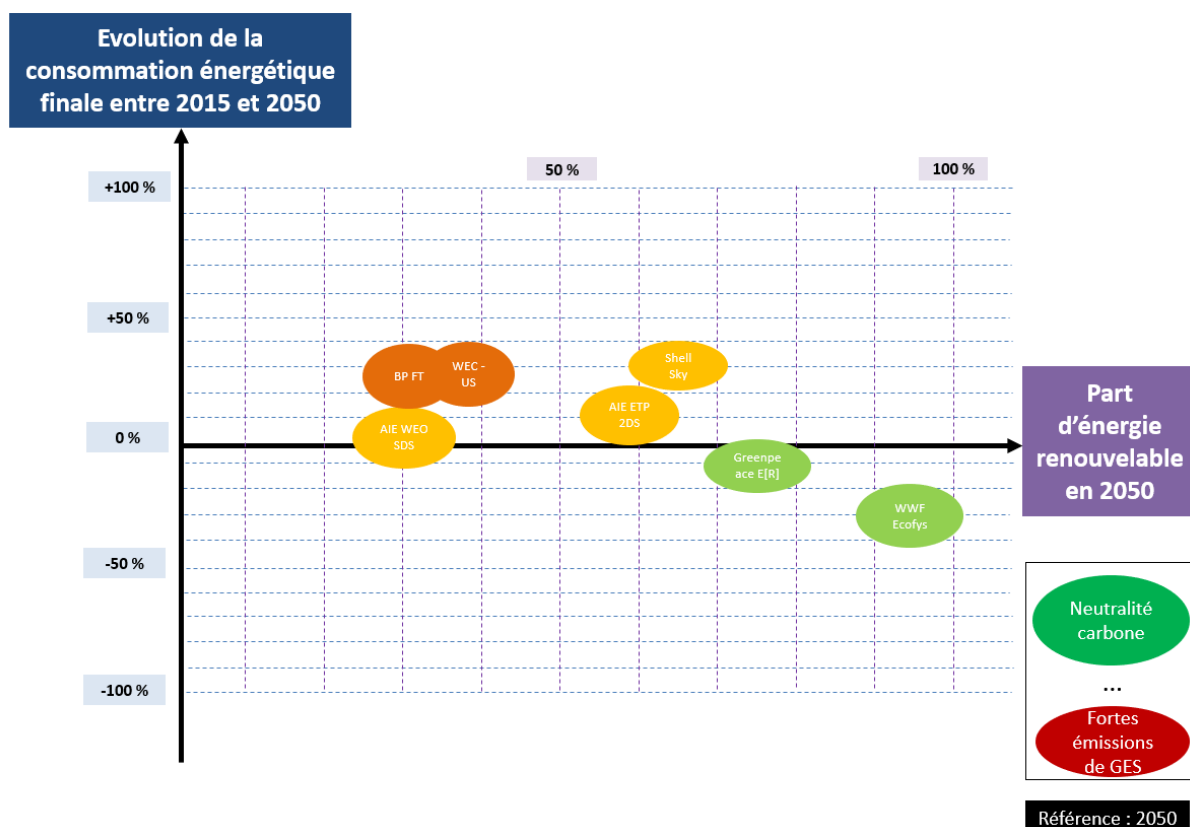


Figure 7 - Représentation des différents scénarios étudiés en fonction du mix énergétique et de l'évolution de la consommation énergétique. Source : I Care & Consult

Grâce à ce schéma, il est possible d'observer trois grands groupes de scénarios :

- Les scénarios « les plus ambitieux » qui misent sur un mix à plus de 50 % d'énergie renouvelable et sur une baisse de la consommation énergétique : Greenpeace Energy [R]evolution et WWF Ecofys Energy Scenario. Cela n'a pas été précisé dans les deux scénarios, mais il semble que la neutralité carbone puisse être atteinte avant 2070, et voire même 2060 pour Greenpeace et WWF. Ces scénarios ont de très grandes chances d'atteindre l'objectif des 2°C en 2100.
- Les scénarios « intermédiaires » qui misent sur 30 à 50 % d'énergie renouvelable mais où la consommation énergétique augmente tout de même sur la période : Shell, AIE ETP 2DS et AIE WEO SDS (Sustainable Development Scenario). Il est estimé que ces scénarios puissent très probablement permettre de rester sous les 2°C en 2100 (50% de chances pour ETP).
- Les scénarios « bas » où les énergies renouvelables restent minoritaires dans le mix et où la hausse de la consommation d'énergie est importante : BP Faster Transition et World Energy Council Unfinished Symphony. Ces scénarios se veulent réalistes et c'est pour cela qu'ils ne se veulent pas trop ambitieux. Ils ont peu de chance de satisfaire les objectifs de l'Accord de Paris.

1.3.2 Analyse critique de ces scénarios

Les scénarios des ONG, WWF et Greenpeace, et surtout ceux de l'AIE, peuvent être considérés comme très transparents en ce qui concerne les hypothèses prises contrairement aux scénarios de BP, Shell, ou du World Energy Council.

Par exemple, parmi les scénarios où les données de consommation d'énergie primaires et finales étaient disponibles, on observe que les ratios énergie primaire/énergie finale varient entre 1,54 (pour AIE – ETP 2DS) et 1,32 (pour World Energy Council – World Energy Scenarios) : les différences proviennent des différences dans le mix électrique. Il n'est toutefois pas possible de vérifier, source par source, ces facteurs de conversion de l'énergie primaire en énergie finale, sauf pour les scénarios de l'AIE grâce aux données fournies sous forme de fichiers Excel.

Il faut aussi noter la grande sensibilité aux hypothèses technologiques de ces scénarios de transition. Ainsi l'hypothèse de diffusion de technologies CCS à partir de 2030 dans le scénario AIE est un paramètre clé qui conditionne en grande partie le rythme de décroissance des énergies fossiles dans le cadre d'une contrainte 2°C.

En rapport avec cette étude, il est aussi important de noter que dans l'ensemble des scénarios, l'énergie supplémentaires consommée pour extraire les métaux et minerais n'est pas prise en compte.

Enfin, la mise à jour des scénarios est aussi une donnée importante pour disposer de données les plus récentes possibles : dans ce cas, seuls les scénarios de l'AIE sont performants car ils sont mis à jour chaque année et font l'objet d'une actualisation complète.

1.3.3 Les modèles utilisés

Le modèle technologique et d'optimisation énergétique sous contrainte MARKAL est utilisé par l'AIE pour le scénario ETP 2DS (variante TIMES) et par le World Energy Council (variante GMM). Il vise à optimiser la structure technologique, et non nécessairement les coûts.

Le modèle de simulation énergétique World Energy Model, interne à l'AIE, est quant à lui utilisé par l'AIE pour le scénario WEO SDS. Il utilise des modèles de stocks pour caractériser les infrastructures énergétiques. Les coûts spécifiques servent à déterminer la part de chaque technologie dans le scénario.

Dans son scénario Energy [R]evolution, Greenpeace utilise le **modèle de simulation Mesap/PlaNet dont l'approche est basée sur des technologies**. Le pas temporel peut être très fin (de quelques minutes à plusieurs années). Il est souvent utilisé pour simuler des mix 100% renouvelables.

Enfin, **le modèle IGSM du MIT** est utilisé par Shell : celui-ci permet **d'analyser les interactions entre le système terrestre et les humains**. Il est très souvent utilisé pour mesurer les pollutions anthropiques atmosphériques, océaniques, terrestres ou urbaines.

Les modèles utilisés par BP et le WWF ne sont pas spécifiés. WWF précise seulement que son modèle se base sur l'approche « Trias Energetica » : réduire la demande énergétique au minimum, fournir autant d'énergie renouvelable que possible, par des sources locales si possible, et enfin fournir le reste de l'énergie par des sources « traditionnelles » les plus « propres » possibles.

1.3.4 Les données disponibles

Les seuls scénarios mettant à disposition librement leurs données sont les scénarios **ETP 2DS et WEO SDS de l'AIE**. A travers les rapports (payants), il est très facile d'accéder aux données grâce aux identifiants et codes fournis, permettant d'accéder à une plateforme sur le site internet dédié. ETP 2DS présente une granularité beaucoup plus élevée que WEO SDS en termes de résultats. De plus, les données de ces scénarios sont très désagrégées par secteur, et il est assez facile de collecter des données sur les matières premières (acier, aluminium etc.).

1.3.5 Conclusion

Le scénario qui semble le plus approprié pour cette étude est ETP 2DS de l'AIE, souvent utilisé par des initiatives comme Science Based Targets (SBT) ou ACT (Assessing low-Carbon Transition). Proche du scénario WEO du même organisme, il est cependant différent de ce dernier puisqu'il ne se base pas sur les coûts pour définir sa structure technologique. Il s'appuie sur une optimisation sous contrainte alors que WEO utilise un modèle basé sur une simulation.

Parmi tous les scénarios étudiés, ETP 2DS semble être un scénario ambitieux puisque l'AIE considère qu'il a 50 % de chances de voir la température moyenne de la Terre être limitée à 2°C. Il semble également pragmatique, puisque le mix énergétique est bien plus renouvelable en 2050 qu'actuellement, mais ce n'est pas sa visée première, contrairement à d'autres scénarios. C'est un scénario qu'on peut qualifier de réaliste comparé aux autres scénarios étudiés : il ne table pas sur une baisse de la consommation énergétique mais une très faible hausse, et considère un mix énergétique très diversifié, il s'appuie à la fois sur des énergies renouvelables, du nucléaire et des énergies fossiles toujours présentes.

Les autres scénarios analysés ne sont soit :

- Pas aussi détaillés que l'ETP 2DS : la disponibilité sera un critère clef pour le cas d'étude ;
- Peu ambitieux pour un scénario 2°C : certains scénarios se basent sur des hypothèses trop conservatrices ;
- Très optimistes, comme ceux des ONG misant sur des capacités d'énergies renouvelables parfois très importantes par rapport aux autres scénarios.

1.4. Cas de la France : focus sur le scénario « Visions 2050 » de l'ADEME

1.4.1 Contexte

Dans cette partie, il convient de s'intéresser au cas de la France, en étudiant un des scénarios phares de l'ADEME, le scénario « Visions 2050 » initialement publié dans le rapport « Visions 2030-2050 » en 2013 et récemment mis à jour en 2017 sous l'intitulé « Visions 2035-2050 ».

L'objectif principal de ce scénario est de dresser la feuille de route permettant d'atteindre le Facteur 4 en 2050, c'est-à-dire la division par 4 des émissions de gaz à effet de serre en 2050 par rapport aux niveaux de 1990. Ce scénario est normatif, c'est-à-dire que ce scénario souhaite d'abord atteindre ce Facteur 4 et s'interroge ensuite sur la trajectoire le permettant.

Un ensemble de solutions technologiques et organisationnelles sont donc mises en œuvre pour atteindre l'objectif du Facteur 4 en fonction de critères de performance technique et de maturité des technologies. Le levier « social » ou « mode de vie » a été mobilisé sur les sujets socio-économiques afin de poser des hypothèses « normatives » raisonnables.

1.4.2 Modèle utilisé : ThreeME

Le modèle ThreeME est utilisé par l'OFCE (Observatoire Français des Conjonctures Economiques)² pour mesurer l'impact macro-économique et sectoriel de la transition énergétique en France. Il a notamment été utilisé dans l'étude intitulée « Mix Electrique 100% Renouvelable, Evaluation Macro-Economique ».

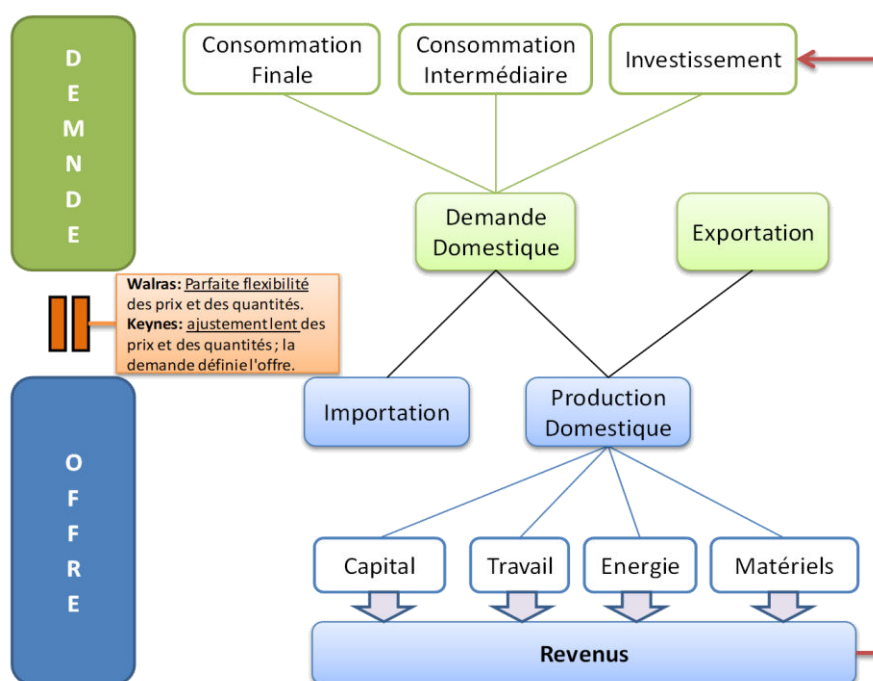


Figure 8 : Fonctionnement du modèle ThreeME (I Care & Consult, 2018)

² L'Observatoire français des conjonctures économiques (OFCE) est un organisme indépendant de prévision, de recherche et d'évaluation des politiques publiques, accueilli en son sein par la Fondation nationale des sciences politiques (FNSP), en application de la convention passée en 1981 entre l'Etat et la FNSP : <https://www.ofce.sciences-po.fr/>

1.4.3 Hypothèses du scénario

La croissance annuelle du PIB entre 2010 et 2050 varie entre 1,4% et 1,7% : elle reste donc modérée et à long terme, elle ne retrouve pas le niveau d'avant crise. Quant à elle, la population totale évolue entre +0,2 et +1,5% par année, donc à un rythme plus faible sous l'effet du vieillissement.

1.4.4 Résultats

En ce qui concerne le mix énergétique, l'ADEME a réalisé 3 sous-scénarios se différenciant par leur mix électrique. Ainsi, le taux d'énergies renouvelables en 2050 est de 46% dans la variante « 2050 – 50% d'électricité nucléaire », 61% dans la variante « 2050 – 80% d'électricité renouvelable » et 69% dans la variante « 2050 – 90% d'électricité renouvelable et power-to-gaz » (contre 10% en 2010). La consommation énergétique est identique pour les trois variantes, seul le vecteur électrique a une part de renouvelable plus ou moins importante.

Dans ces trois variantes, comme le montre l'illustration ci-dessous, la biomasse (agricole, forestière et déchets) est très sollicitée pour la production d'énergie thermique. Une baisse très importante des produits pétroliers s'observe en 2050 par rapport à 2010 (4% en 2050 contre 40% en 2010), s'opposant à une forte hausse du vecteur électrique (+14% entre 2010 et 2050).

CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE TOTALE EN 2010, 2035 ET 2050, PAR FORME D'ÉNERGIE

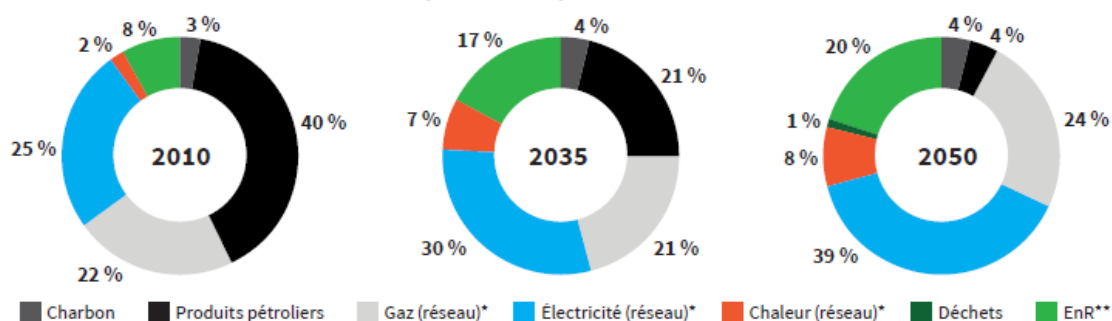


Figure 9 : Consommation énergétique totale en 2010, 2035 et 2050 par forme d'énergie (Source : ADEME)

Globalement, la consommation d'énergie finale diminue beaucoup entre 2010 et 2050, passant de 148,7 Mtep à 81,8 Mtep (-45%) : en valeur absolue, le secteur des transports est le secteur participant le plus à cet effort (-27 Mtep), suivi du secteur résidentiel (-20 Mtep), et du secteur de l'industrie (-11 Mtep).

BILAN DES CONSOMMATIONS FINALES D'ÉNERGIE PAR SECTEUR EN 2010, 2035 ET 2050

Unités : Mtep / %	2010		2035		2050	
Transport	44,0	30 %	25,8	25 %	17,0	21 %
Résidentiel	44,3	30 %	30,0	28 %	24,7	30 %
Tertiaire	22,1	15 %	17,4	17 %	14,3	17 %
Industrie	33,8	23 %	29,0	28 %	22,9	28 %
Agriculture	4,5	3 %	3,0	3 %	3,0	4 %
Total	148,7		105,1		81,8	

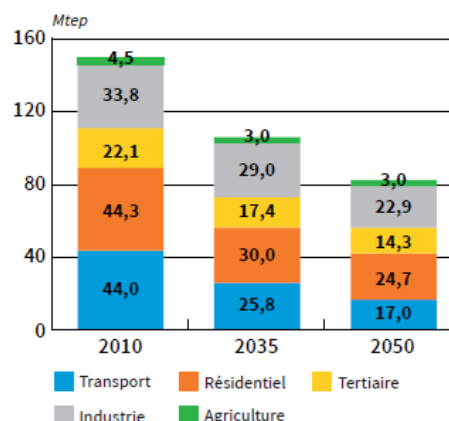


Figure 10 : Bilan des consommations finales d'énergie par secteur en 2010, 2035 et 2050. (Source : ADEME)

Globalement, **les émissions de gaz à effet de serre diminuent de 70 à 72% entre 1990 et 2050, en passant de 529 MtCO₂ à environ 150 MtCO₂.**

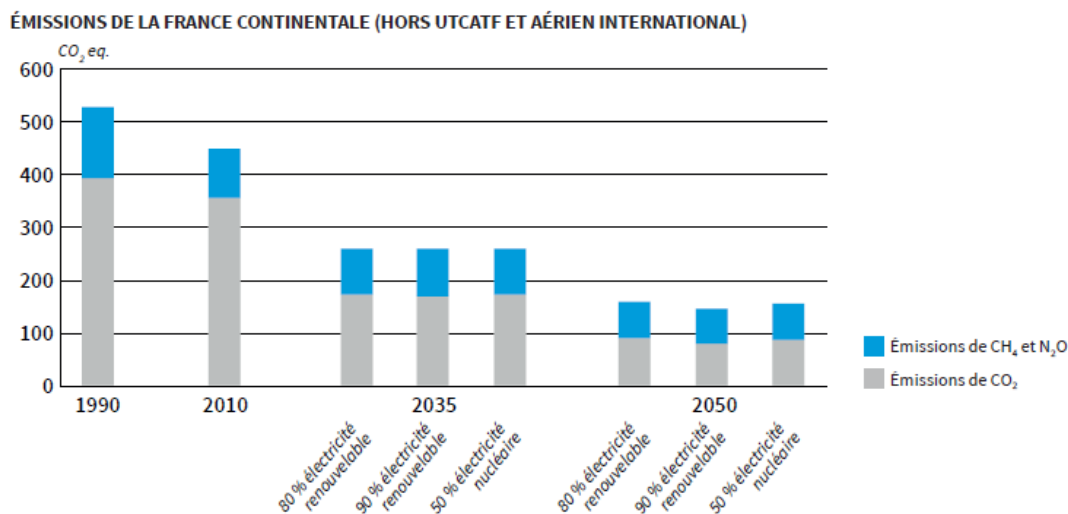


Figure 11 : Emissions de gaz à effet de serre de la France continentale (Source : ADEME)

1.4.5 Conclusion

Ces résultats permettent finalement de souligner l'enjeu représenté par l'atteinte des objectifs climatiques ambitieux fixés par la loi, et la nécessité d'une inflexion à court terme des politiques publiques.

Dans ce scénario, les énergies renouvelables occupent une place de plus en plus importante dans le mix énergétique national, et plus particulièrement dans le mix électrique. Cependant, afin de mieux comprendre le besoin en matériaux pour la transition, il convient d'étudier un scénario à l'échelle internationale, car les besoins de la France ne représentent qu'une infime partie des besoins mondiaux en matériaux.

2. Etat de l'art des travaux existants et en cours sur le sujet « matériaux et transition énergétique »

2.1. Les ressources minérales : un enjeu clé pour la transition énergétique

La question de la disponibilité des matériaux nécessaires à la transition énergétique, bien que récente, n'est pas nouvelle. La transition énergétique, évoquée dans les paragraphes précédents à travers les différents scénarios, va nécessiter la construction d'installations de production d'énergie et va donc être consommatrices de matériaux de construction traditionnels (fer, béton, cuivre, etc.) mais aussi de matériaux peu utilisés jusqu'ici, mais nécessaires à certaines des technologies, dont beaucoup sont encore émergentes. Par ailleurs, cette demande en matières premières augmente à l'échelle mondiale sur tous les métaux et matériaux.

Selon le scénario *Energy Technology Perspectives* de l'AIE présenté à la section 1.2, la consommation globale d'énergie en 2060 serait satisfaite à 56% par des technologies bas carbone (dont les énergies renouvelables), avec des demandes en énergie solaire et éolienne cumulant à 39 000 TWh en 2060. Selon les projections du WWF, l'électricité mondiale produite par les sources solaires et éoliennes devrait évoluer de 400 TWh en 2013 à 12 000 TWh en 2035, puis 25 000 TWh en 2050. Aujourd'hui, **les quantités de matériaux nécessaires à la construction de ces nouvelles installations divergent selon les sources**, notamment à cause de l'incertitude sur l'évolution des parts de marchés des différentes technologies. De plus, les données historiques sur le long terme ne sont pas disponibles pour pouvoir prévoir l'évolution de la demande en matériaux.

Cependant, (Vidal, Goffé, & Arndt, 2013) estiment quelques tonnages en lien avec les projections du WWF, qui correspondraient à la consommation d'environ 3 200 Mt d'acier, 310 Mt d'aluminium et 40 Mt de cuivre, soit une augmentation de la production annuelle de 5 à 18% pour les 40 prochaines années. Cette augmentation s'ajoute à celle de la demande en « grands » et « petits » métaux (voir paragraphe 2.2). Or, autour de 12% de la consommation mondiale d'énergie est aujourd'hui déjà destinée à l'extraction et au raffinage des ressources minérales (US Energy Information Administration, 2019) : une augmentation des quantités de matières à extraire induirait en conséquence une augmentation de la consommation mondiale d'énergie d'autant plus importante que les gisements deviennent plus difficiles à exploiter.

Aussi, de nombreuses publications (ANCRE, 2015; Bonnet, Carcanague, Hache, Seck, & Simoen, 2018; Geldron, 2017; Hache, Simoen, & Seck, 2018; L'Usine Nouvelle, 2018; Lepesant, 2018; Vidal, 2018; Vidal et al., 2013; World Bank Group, 2017) s'intéressent à l'évolution des différents paramètres constituant le marché de ces ressources et essayent de répondre aux inquiétudes que peuvent poser de tels chiffres, à savoir :

- Y a-t-il un réel risque d'épuisement des ressources dans les prochaines années ?
- Quelles ressources minérales sont concernées ?
- Comment pallier ce risque ?

Le raisonnement et l'analyse des documents étudiés dans la suite s'appuient sur le schéma suivant, qui relie l'impact des scénarios de transition sur la demande en ressources à un éventuel épuisement de celles-ci.

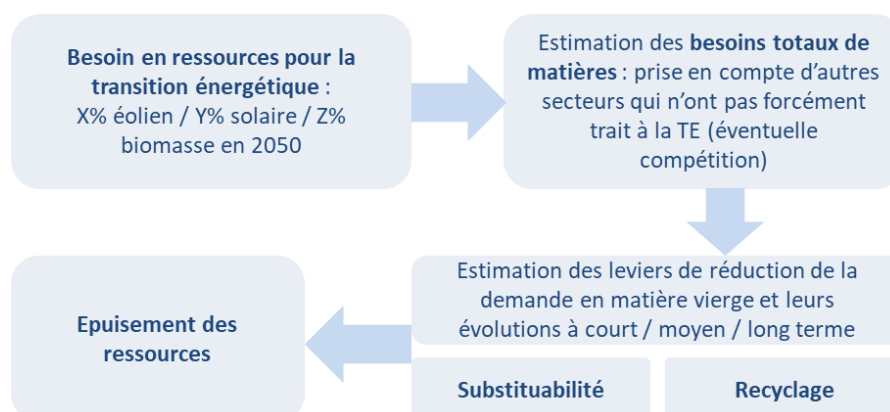


Figure 12 : Schéma récapitulatif du raisonnement pour évaluer l'épuisement des ressources (I Care & Consult, 2018)

2.2. Enseignements préliminaires sur les matériaux et la transition énergétique

2.2.1. Le besoin en ressources minérales pour la transition énergétique n'est pas clairement chiffré aujourd'hui

Selon l'Alliance nationale de coordination pour la recherche sur l'énergie (ANCRE), l'intensité matière des différents modes de production d'électricité est difficile à estimer à cause de la grande variabilité des technologies et du très faible nombre d'études validées qui reportent, souvent de manière incomplète, des intensités de matières premières (ANCRE, 2015). De plus, l'incertitude sur l'évolution des parts de marché des différentes technologies augmente la difficulté à prévoir l'intensité matière : selon l'Usine Nouvelle « Dans le seul véhicule électrique, les projections de parts de marché à 10 ou 20 ans vont du simple au triple, et les promesses de pénuries de lithium, puis de cobalt suivent les mêmes variations » (L'Usine Nouvelle, 2018).

Cependant, l'étude de Vidal reprise dans le rapport de l'ANCRE estime des besoins par technologie ou par secteur pour quelques matériaux :

- Pour une transition énergétique envisagée selon les scénarios de l'AIE et d'Ecofys (WWF), l'ANCRE estime « une consommation en matières premières de base (acier, cuivre, aluminium, ciment, verre) égale à 2 à 8 années de production mondiale 2010 » (ANCRE, 2015), et ce pour le seul secteur de la production d'électricité à partir de sources éoliennes et solaires.
- Selon les mêmes scénarios de transition énergétique, Vidal et al. estiment les quantités suivantes nécessaires pour les 40 prochaines années, toujours pour la production d'électricité éolienne et solaire :
 - o 3 200 millions de tonnes d'acier
 - o 310 millions de tonnes d'aluminium
 - o 40 millions de tonnes de cuivre

Soit une augmentation annuelle de la production globale de ces métaux de 5 à 18% (Vidal et al., 2013)

Le *Global Material Resources Outlook* (OCDE, 2018) réalise une estimation des quantités de matières premières consommées à horizon 2060, basée sur le modèle économique ENV-Linkages développé par l'OCDE. **Cette estimation prévoit un passage de 89 Gt de matériaux consommés en 2017 à 167 Gt en 2060.** En particulier, les projections pour les minerais métalliques prévoient un passage de 9 Gt en 2017 à 20 Gt en 2060, et pour les minerais non-métalliques un passage de 44 à 86 Gt. Cependant, cette modélisation ne se base pas sur un scénario de transition énergétique en particulier mais considère la demande en énergie, la valeur ajoutée des ressources naturelles ou encore la productivité comme des facteurs long-terme de la croissance du PIB mondial³.

³ Le modèle ENV-Linkages couvre l'économie mondiale désagrégée en 25 pays ou régions et distingue 35 secteurs d'activité. Les secteurs en lien avec l'énergie et l'agriculture font l'objet d'une attention particulière dans le modèle. Celui-ci fonctionne de manière complémentaire avec le modèle ENV-Growth, développé par les mêmes équipes et utilisé pour simuler l'évolution de long terme des principaux déterminants de la croissance (travail, capital humain, capital physique, ressources naturelles et productivité).

A partir du constat de l'absence d'une vision consolidée de l'impact de scénarios de transition énergétique sur l'ensemble des ressources minérales (dû non seulement à la variabilité des scénarios énergétiques mais aussi aux différentes trajectoires technologiques envisagées ainsi qu'au manque de données historiques pour certains types de métaux), deux projets ont été récemment initiés en France : GENERATE et SURFER (voir encadré ci-dessous).

SURFER et GENERATE : des projets innovants et complémentaires

SURFER, porté par le CNRS, le BRGM et l'ADEME, est un projet de recherche visant à évaluer les impacts de scénarios de transition énergétique sur les matières premières dans le contexte français. Il comporte 4 tâches principales :

- 1) **Constitution d'une base de données d'intensités matières.** Cette phase doit s'attacher à la quantification des besoins en matières premières relatifs aux différentes technologies qui couvrent l'ensemble du système énergétique (actuel et prospectif) : production, distribution, stockage et utilisation finale.
- 2) **Quantification des besoins dans le temps.** Il s'agira ici de formuler des hypothèses sur le déploiement des filières et leurs évolutions dans les scénarios énergétiques considérés.
- 3) **Contextualisation des besoins totaux en matières**, par rapport :
 - i. aux besoins indirects correspondants, selon une approche en cycle de vie ;
 - ii. à la consommation française totale de ces matières premières, tous produits confondus, par l'analyse de tableaux entrées-sorties ;
 - iii. à la dynamique économique mondiale des flux et stocks de matières premières, tenant compte des marchés du recyclage et de l'évolution globale du mix énergétique.
- 4) **Etude des risques d'approvisionnement et de la criticité des matières premières** pour les différents scénarios énergétiques considérés.

L'ensemble du secteur énergétique est représenté (production, transport, stockage) pour ses différentes utilisations (bâtiments, industries, agriculture). Actuellement, la base de données d'intensités matières (tâche 1) est en cours de réalisation.

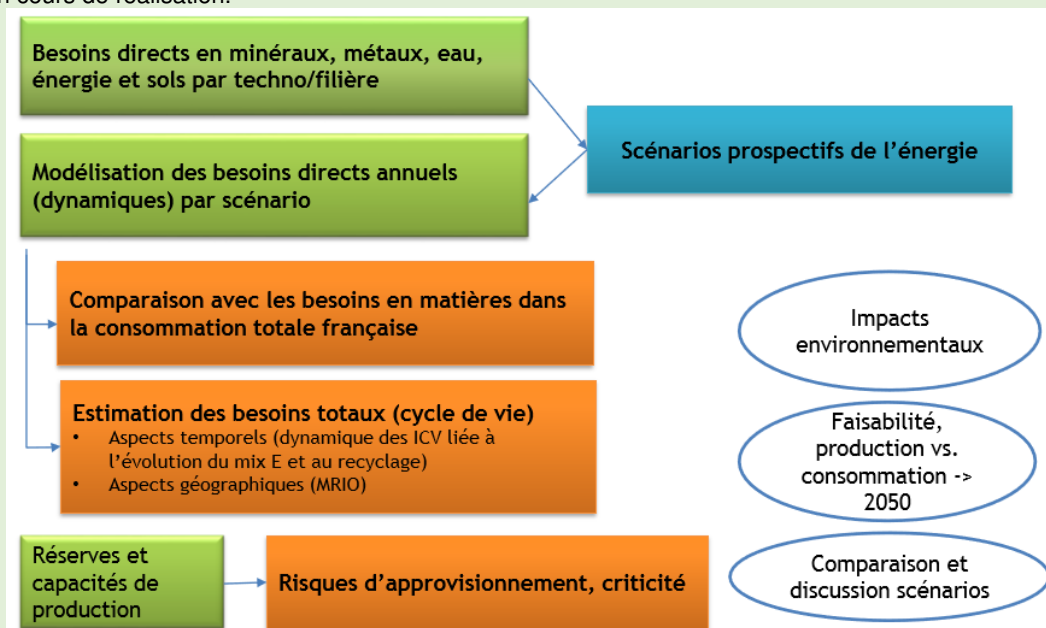


Figure 13 : Les différentes phases du projet SURFER

GENERATE⁴, lancé par l'IFPEN et l'IRIS (IFPEN & IRIS, 2018) a pour objectif d'analyser les conséquences géopolitiques des énergies renouvelables à l'échelle mondiale, et ce dans le cadre d'une approche pluridisciplinaire en prenant en compte les 3 enjeux clés suivants :

- **L'évaluation de la criticité des matériaux** (aluminium, cuivre, nickel, béton, cobalt, granulats, acier) dans le processus de déploiement des technologies de la transition énergétique (éolien, solaire, électrification du parc automobile mondial, etc.). Une double approche permettra de compléter une

⁴ <https://anr.fr/fileadmin/documents/2018/CP-Generate-IFPEN-IRIS-ANR-avril-2018.pdf>

- étude de marché par une modélisation (scénario prospectif à horizon 2050 de la consommation et de la production de matières premières) ;
- **Les nouveaux pouvoirs de marché** issus des politiques d'innovation nationales et l'établissement d'une cartographie des technologies de la transition énergétique. Un focus sera réalisé sur l'Asie (Chine, Corée du Sud, Japon), ainsi qu'une étude sur la quantification et la qualité des brevets déposés associés à la transition énergétique ;
 - **La trajectoire de la transition énergétique des pays producteurs d'hydrocarbures**. Cette phase sera réalisée avec l'Institut de Relations Internationales et Stratégiques (IRIS) et vise à connaître l'impact de la diffusion des énergies renouvelables sur les pays producteurs d'énergies fossiles.

2.2.2 La modélisation de l'évolution de la demande globale par matériau n'est pas non plus adressée de manière complète

La majorité des documents étudiés s'intéresse aux ressources nécessaires pour la transition énergétique, mais aucun ne considère d'autres facteurs d'évolution de la demande. Par exemple, des scénarios de modélisation de la demande auraient pu intégrer les pressions exercées par les secteurs du numérique ou de la mobilité, etc. Ainsi, nous avons aujourd'hui peu de données précises et complètes sur les besoins en ressources et sur l'évolution de ces besoins.

Cependant, plusieurs études (BGR Energy Study, 2017; Geldron, 2017; L'Usine Nouvelle, 2018; Lepesant, 2018; Vidal et al., 2013; World Bank Group, 2017) se penchent sur les leviers de réduction de la demande en matière vierge, et notamment la substituabilité et le recyclage des matières premières.

Selon Vidal et al. (2013), **l'attention portée ces dernières années sur les « petits » métaux dits « critiques » (terres rares par exemple) n'est pas justifiée, à cause de leur fort potentiel de substitution** (Vidal et al., 2013). Au contraire, il semblerait que les « grands » métaux de structure ne soient pas, ou peu, substituables. Par exemple, le U.S. Geological Survey s'est intéressé aux différents substituts possibles pour les métaux (World Bank Group, 2017) et confirme le faible potentiel de substitution des grands métaux :

- **« Grands » métaux :**
 - o Le **fer** n'est pas substituable ;
 - o Le **cuivre** n'est substituable que par l'aluminium dans les câbles et équipements électriques, ou par la fibre optique dans les applications de télécommunication ;
 - o L'**aluminium** peut être remplacé par le magnésium, l'acier ou le titane pour des usages structuraux ou de transport.
- **« Petits » métaux :**
 - o Le **cobalt** serait substituable par 15 éléments pour plusieurs fonctions, dont celle qu'il occupe dans les batteries Lithium-ion ;
 - o De nombreux composants peuvent remplacer le **lithium** dans les batteries ;
 - o Dans les alliages, un substitut du **nickel** pourrait être le titane ;
 - o De nombreux substituts existent pour les **terres rares**, même s'ils sont en général moins efficaces (moins bonnes propriétés physiques).

Cependant, comme le souligne A. Geldron (Geldron, 2017), cette catégorisation des grands et petits métaux et de leur substituabilité associée est à nuancer : le bois apparaît dans certains cas comme un substitut aux mâts d'éoliennes en acier ou en béton, ainsi que dans la construction. De même, l'aluminium peut remplacer le cuivre dans certains types de réseaux. Concernant les petits métaux, il s'agit plus de substitution de technologies que de substitution métal par métal, à fonction équivalente. De plus, les critères et niveaux de criticités dépendent de chaque pays et intègrent une part de subjectivité.

Concernant le recyclage, les publications étudiées proposent des lectures complémentaires quant au potentiel du recyclage pour absorber l'accroissement de la demande en grands métaux. Le temps d'immobilisation de ces métaux dans les infrastructures est long : « Même en le recyclant à 100%, le cuivre secondaire ne pourra pas satisfaire plus de 37% de la demande [au taux de croissance moyen des 55 dernières années qui est de 2,8% par an] », selon Jean-François Labbé, directeur des

géo-ressources au BRGM (L'Usine Nouvelle, 2018). Au-delà de l'aspect immobilisation des métaux, la forte augmentation de la demande ne pourra pas être comblée uniquement par le recyclage : pour Geldron (2017), « dans une croissance continue de la demande à 2 ou 3%, le recyclage ne pourra pas répondre à cet accroissement et restera à moins de 20% des approvisionnements nécessaires » (Geldron, 2017). Ainsi, le recyclage a un faible impact sur l'épuisement des réserves pour la plupart des matériaux. Certaines publications semblent cependant prévoir un rôle important du recyclage du lithium et du cobalt dans l'offre mondiale : des efforts de recyclage pourraient allonger la durée de vie des réserves de 50 et 25 ans respectivement (Moreau, Dos Reis, & Vuille, 2019). D'après les modélisations de (Moreau et al., 2019), basées sur un mix de 5 scénarios de transition énergétique⁵ et sur les estimations de réserves de l'USGS, sept métaux pourraient connaître des risques d'épuisement de réserves d'ici 2050 : le cadmium, le cobalt, l'or, le plomb, le nickel, l'argent, l'étain et le zinc. L'épuisement des ressources est quant à lui plus lointain (à partir de 2060 pour l'or, 2080 pour le cadmium, le cobalt et le lithium) (Hache, Seck, Simoen, Bonnet, & Carcanague, 2019; Moreau et al., 2019).

En complément, Vidal précise qu'il n'y aura pas de problèmes de réserves jusqu'en 2100 (et ce pour tous les métaux), « grâce au recyclage qui croît au même rythme que la production primaire il y a 50 ans. » (Vidal, 2018). L'OCDE précise que si l'étape de recyclage métallurgique des grands métaux peut être considérée comme optimisée aujourd'hui, la collecte est loin de l'être. De plus, le recyclage devenant à terme plus compétitif que l'extraction de matière première vierge, ceci conduirait le secteur du recyclage à dépasser le rythme de croissance de l'extraction minière à horizon 2060 (OCDE, 2018). Les capacités de recyclage, ajoutées à la production de matière première vierge, permettraient donc de satisfaire la demande à moyen terme. Ces modélisations sont réalisées pour des métaux « matures » (pour lesquels l'historique de production et de consommation est robuste) tels que le cuivre, le fer et l'aluminium ; **ces résultats ne peuvent s'appliquer à tous les métaux**. En particulier, la situation structurelle des petits métaux est différente, et l'historique de production encore trop peu connu pour tirer des conclusions, notamment sur le rôle du recyclage.

Enfin, une forte incertitude est notée sur le potentiel économique du recyclage des matériaux critiques. Par exemple, les technologies sont aujourd'hui disponibles pour recycler les batteries lithium-ion, mais la récupération du lithium n'est pas économiquement viable (BGR Energy Study, 2017). Les métaux les plus recyclés aujourd'hui sont les métaux de base (dits « grands » métaux) pour lesquels les flux de déchets sont importants (cuivre, aluminium, zinc, fer notamment), mais aussi les métaux précieux dont les cours élevés assurent un recyclage rentable. Lepesant résume les freins au recyclage des « petits » métaux (Lepesant, 2018) :

- Ces métaux sont liés à des technologies récentes, et donc seules de faibles quantités sont à recycler aujourd'hui ;
- Les circuits de recyclage sont difficiles à organiser ;
- Les ruptures technologiques sont fréquentes ;
- Les cours des matières premières sont très volatiles (et posent la question de la rentabilité du recyclage).

Concernant les estimations des ressources disponibles et leur éventuel épuisement, deux catégories de métaux sont encore distinguées : selon Vidal (2018), les modélisations sur l'épuisement des ressources sont robustes pour les « grands » métaux (les plus usités et ceux pour lesquels l'historique de production est long, voir ci-dessous), à l'inverse des minerais de faible quantité pour lesquels l'estimation des quantités disponibles s'avère peu précise. En complément, Geldron (2017) donne un aperçu du problème de l'estimation des ressources avec l'exemple du cuivre (considéré comme un « grand » métal) : « Alors qu'en 1950 les réserves de cuivre étaient d'un peu moins de 100 Mt elles sont actuellement de 720 Mt, alors que dans le même temps la production, tirée par la demande, est passée de 2,4 Mt/an à 18,7 Mt/an. Ainsi, la durée de vie des réserves connues de cuivre reste depuis 60 ans autour de 40 années ».

Les réserves disponibles évoluent donc, non seulement en fonction des découvertes de gisements et des investissements réalisés, mais aussi en fonction de l'évolution croissante de la consommation : pour certains métaux, la consommation double tous les 25 ans environ (correspond à 3% de croissance annuelle), et vient donc consommer plus rapidement les réserves (Geldron, 2017). Par ailleurs, les

⁵ IPCC, WWF Ecofys, IEA 2DS, IEA High REN et IRENA REMAP

investissements réalisés sont fonction de la concentration des gisements, qui diminue avec leur exploitation. Par exemple, la teneur moyenne des gisements de cuivre en 1900 s'élevait à 3,5% alors qu'elle est aujourd'hui de moins de 1% (Vidal, 2018). Ce paramètre de teneur du gisement implique un coût énergétique pour l'extraction, directement en lien avec la viabilité économique du recyclage. Ainsi, le cuivre est de plus en plus difficile à extraire et lorsque la teneur des gisements aura atteint les 0,5% en moyenne, son recyclage deviendra de plus en plus compétitif par rapport au coût de la matière première vierge (Vidal, 2018). De nouveaux gisements de « mine urbaine » deviendront alors rentables.

S'il est difficile de parler d'épuisement, les publications étudiées identifient une série de minerais pour lesquels des tensions semblent être prévisibles d'ici 2050. « **L'épuisement des ressources minérales avant la fin de ce siècle est très peu probable** pour la plupart des matières premières minérales, par contre des pénuries sur des durées importantes sont à envisager, faute d'une mise en exploitation suffisamment rapide de nouveaux gisements. Ceci pourrait être le cas pour **l'antimoine, le zinc ou le cuivre** » (Geldron, 2017), mais aussi pour **le cadmium, le cobalt et le lithium** (Moreau et al., 2019). Pour Vidal, des tensions sont prévisibles à l'horizon 2050 pour **le cuivre et le nickel**, mais surtout pour **l'or et l'argent**, pour lesquels les gisements exploités aujourd'hui sont de très mauvaise qualité.

Finalement, quelques tensions sont prévisibles mais l'incertitude reste forte au vu de l'ensemble des paramètres présentés. Le déterminant majeur est économique et lié aux conditions géopolitiques. Lepesant résume ainsi cette situation : « Le risque serait moins géologique qu'économique et politique, et une forte volatilité des cours en serait la principale traduction » (Lepesant, 2018).

Le graphe ci-dessous synthétise les différents points de vue recueillis à chaque étape de notre raisonnement.

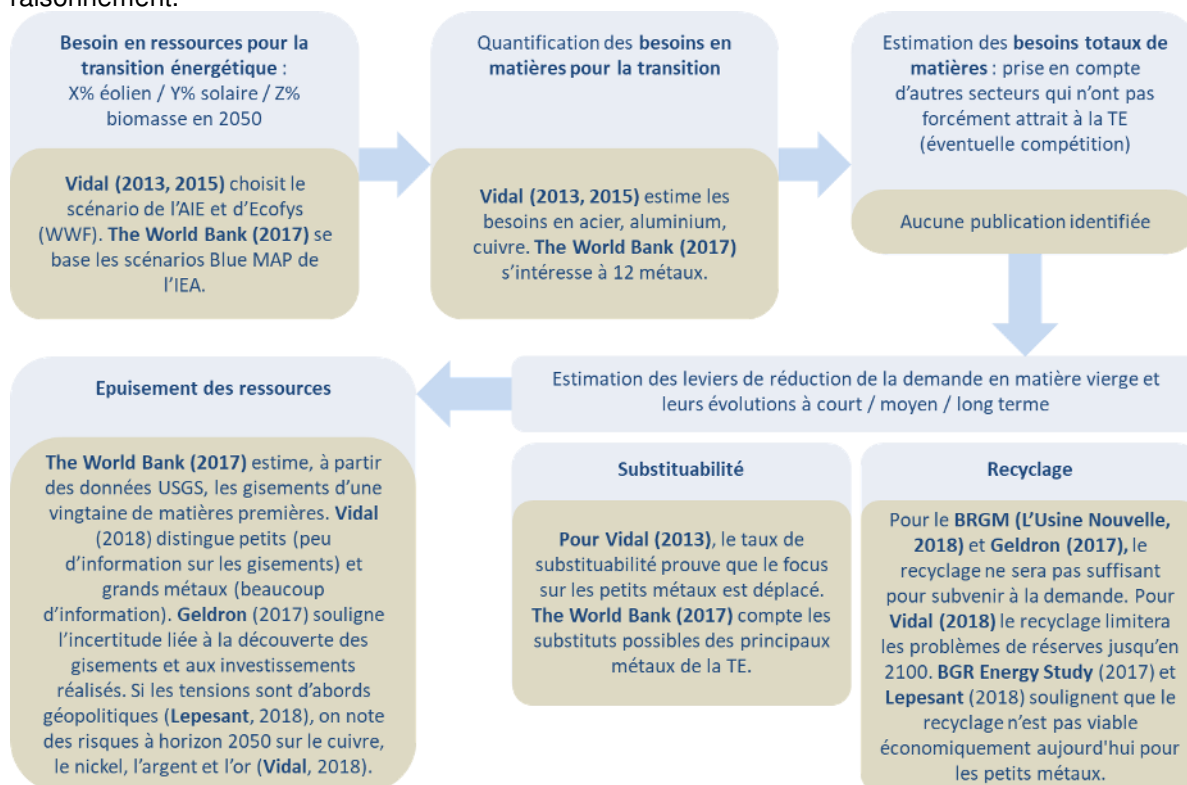


Figure 14 : Synthèse de l'analyse bibliographique sur l'enjeu ressources dans la transition énergétique

2.3. Des enjeux différents selon les catégories de matières premières

Comme indiqué précédemment, les enjeux concernant l'épuisement des ressources diffèrent d'un matériau à l'autre. Au-delà de la disponibilité « géologique », d'autres paramètres permettent de traiter de la disponibilité des ressources, et notamment la criticité. Ainsi, plusieurs définitions de la criticité des matériaux ont été définies dans les publications :

- La première matrice de criticité a été établie aux Etats-Unis en 2008 sur la base d'un double critère, à savoir : l'importance économique de la ressource et le risque de restrictions d'approvisionnement (The Conversation, 2018)
- En Europe, la plus connue est la définition de la Commission Européenne (European Commission, 2018b), qui considère **l'importance économique** de chaque matériau pour l'Union Européenne (basée sur la valeur ajoutée du secteur économique qui utilise cette matière première comme intrant), ainsi que son **risque d'approvisionnement** (sous-paramètres pris en compte : niveau de concentration de la production mondiale, stabilité politique et économique des pays producteurs, potentiel de substitution et taux de recyclage). La première liste de matériaux critiques en ce sens a été établie en 2011, elle comptait alors 14 matières premières critiques. En 2017, elle en comptait 27 (voir Figure 15).

Critical Raw Materials			
Antimony	Fluorspar	LREEs	Phosphorus
Baryte	Gallium	Magnesium	Scandium
Beryllium	Germanium	Natural graphite	Silicon metal
Bismuth	Hafnium	Natural rubber	Tantalum
Borate	Helium	Niobium	Tungsten
Cobalt	HREEs	PGMs	Vanadium
Coking coal	Indium	Phosphate rock	

Figure 15 : Liste 2017 des Matières Premières Critiques pour l'Union Européenne (HREEs = Heavy Rare Earth Elements, LREEs = Light Rare Earth Elements, PGMs = Platinum Group Metals)

- Une seconde définition émane d'un groupement de partenaires (BRGM, McKinsey, CRU), réunis lors du World Material Forum et se veut un outil à disposition des industriels pour évaluer leur propre dépendance aux matières premières, étudiées en fonction de 6 critères (L'Usine Nouvelle, 2018). Elle est également intégrée dans la dernière version de la Commission Européenne :
 - o Nombre d'années de consommation couvert par les réserves connues
 - o Risque pesant sur la production
 - o Exposition au risque politique des pays producteurs
 - o Efficacité du recyclage
 - o Risque de hausse brutale de la demande
 - o Substituabilité du matériau dans l'industrie.

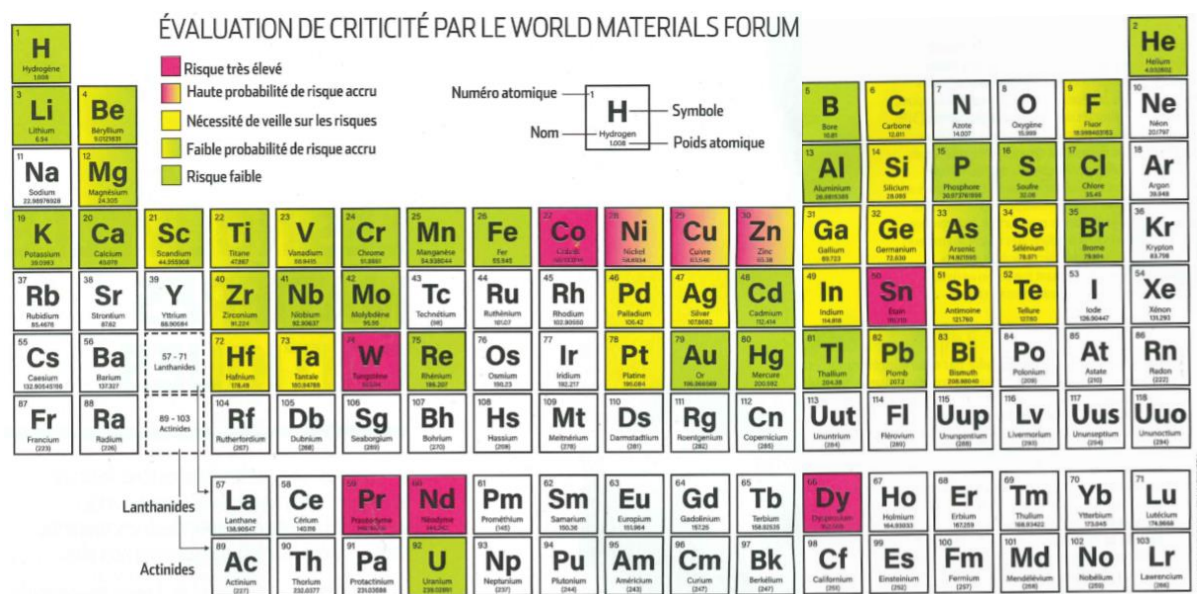


Figure 7 : Liste des matières premières critiques selon la définition établis par le BRGM, McKinsey et le CRU lors du World Material Forum 2018

- Enfin, (Graedel, Barr, Chandler, & Chase, 2011) a développé un cadre pour identifier les métaux critiques pour une entreprise, un pays ou encore une région. Basé sur une étude du US National Research Council, la méthodologie prend en compte trois dimensions clés :
 - o Le risque d'approvisionnement ;
 - o L'impact environnemental du matériau considéré (selon la méthodologie endpoint ReCiPe) ;
 - o La vulnérabilité aux restrictions d'approvisionnement, dépendante de la cible considérée (entreprise, pays, région).

Ainsi, la notion de « criticité » est très relative. Il apparaît cependant que les tensions concernent principalement les métaux : dans la suite de cette étude, nous les classerons en deux catégories afin d'étudier leurs caractéristiques et enjeux :

- Les « **petits** » **métaux** sont plus disséminés dans la croûte terrestre. Ils sont mélangés aux « grands » métaux dans des proportions moindres : « Le sol recèle 1200 fois moins de néodyme et 2650 fois moins de gallium que de fer » (Pitron, 2018). Ce sont souvent des sous-produits ou co-produits des grands métaux. Le marché de ces petits métaux est réduit (en-dessous de 200 000 tonnes annuelles produites). Les terres rares font partie de ces petits métaux : leurs réserves sont estimées à 115 millions de tonnes pour une consommation annuelle de l'ordre de 150 à 200 000 tonnes (ANCRE, 2015). Enfin, les petits métaux ne font pas l'objet d'une cotation sur les places de marché, sauf pour le cobalt et le molybdène, introduit récemment au London Metal Exchange (LME) (Geldron, 2017).
- Les « **grands** » **métaux**, ou métaux de base, sont abondants (en proportion) dans la croûte terrestre mais surtout en termes d'usage (abondance « économique »), et ce sont les métaux pour lesquels des mines sont ouvertes (métaux principaux, c'est-à-dire qu'ils ne sont pas des sous-produits). Il s'agit des métaux « usuels », connus et traditionnellement utilisés : fer, aluminium, cuivre, plomb, zinc, etc.

Ces 10 dernières années, les « petits » métaux ont attiré l'attention de nombreuses études. En cause, leur présence dans les technologies de la transition énergétique, mais surtout les limitations des exportations chinoises pour les terres rares en 2011 qui ont souligné leur importance économique croissante.

❖ Les petits métaux : une modélisation difficile et une stratégie de substitution annoncée

Les petits métaux, utilisés à grande échelle depuis une vingtaine d'années seulement, ne bénéficient pas de l'historique de production des grands métaux (Vidal, 2018). Intégrés récemment aux technologies de la transition énergétique, il est difficile de connaître précisément l'évolution des besoins de celles-ci, notamment car on ne connaît pas l'évolution des parts de marché des différentes technologies, mais également car plusieurs constructeurs choisissent progressivement de ne pas intégrer ce type de métaux dans leurs produits (Lepesant, 2018). Citons notamment Nordex et Enercon, fabricants d'éoliennes, qui n'utilisent pas d'aimants permanents (contenant des terres rares), ou encore Vestas qui a choisi de réduire les quantités nécessaires de néodyme et de dysprosium dans ses éoliennes offshore.

Cette tendance se confirme également dans le secteur automobile : Renault a opté pour un moteur électrique dépourvu de terres rares dans la « Zoé ». Nissan continue d'utiliser des terres rares mais est parvenu à diminuer de 40% la quantité de dysprosium utilisé. Enfin, Toshiba a supprimé le dysprosium, introduit du cuivre et doublé le pourcentage de fer dans ses aimants. Un revirement est à noter chez Tesla : depuis 2017, la marque a introduit des aimants permanents à base de néodyme et de dysprosium dans son Model 3 RWD, ceux-ci permettant une meilleure accélération, une réduction du poids du véhicule et permet de laisser un espace plus important pour les autres composants (Roskill, 2017).

De même, dans le secteur des panneaux photovoltaïques, les fabricants tentent de plus en plus de limiter les quantités de tellure et d'indium dans leurs produits, en ayant recours à des polymères organiques par exemple. Ainsi, non seulement **la modélisation des besoins en petits métaux est difficile** mais en plus **ces métaux sont fortement substituables**.

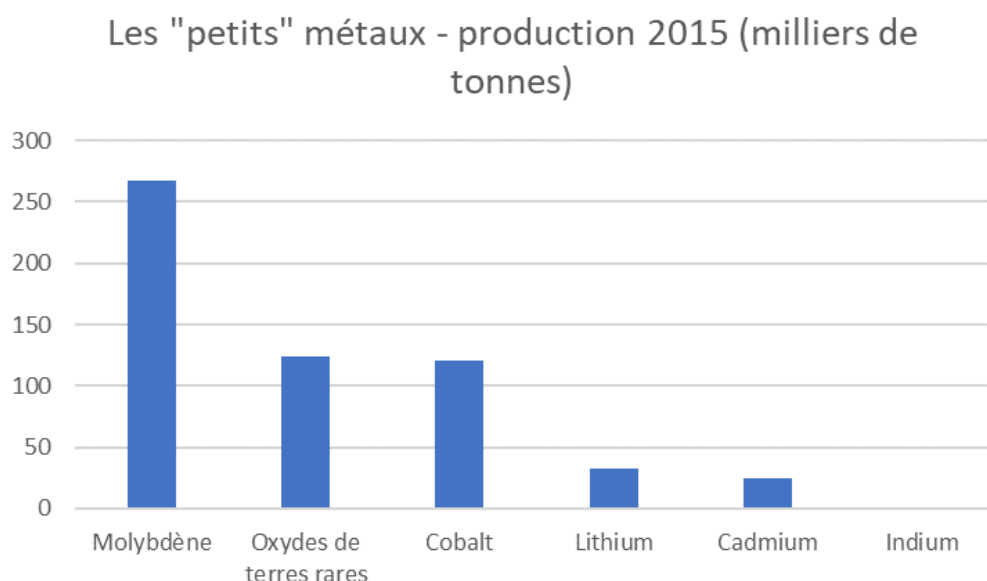


Figure 8 : Production mondiale de grands métaux en 2015, en milliers de tonnes (USGS, 2016)

Les terres rares constituent un cas particulier des petits métaux. Produites à 95% par la Chine (European Commission, 2018b), qui s'est imposée grâce à des coûts salariaux bas et à l'absence d'une législation environnementale contraignante, les terres rares ont subi des restrictions à l'exportation entre 2011 et 2015. Cette période a coïncidé avec la réouverture de mines dans d'autres pays (Etats-Unis, Australie, Afrique du Sud notamment) (Pitron, 2018) (Vidal et al., 2013). Cet exemple montre qu'en plus d'être substituables, les terres rares peuvent être extraites dans d'autres régions du monde dans lesquelles de nouveaux projets miniers peuvent voir le jour. Ceci est dû à une rentabilité momentanée, induite dans ce cas par la flambée des prix provoquée par la restriction des exportations. Ce type de situation conduit à une forte volatilité des prix, qui s'observe également sur de nombreux petits métaux (hors terres rares): gallium (chute des cours en 2017 liée à une production trop importante),

platinoïdes (chute en cours à cause de l'affaiblissement du véhicule thermique), etc. (Comité des Métaux Stratégiques, 2018)

Finalement, les petits métaux sont caractérisés par :

- Leur faible quantité sur le marché ;
- Des gisements difficilement estimables ;
- Une forte volatilité des cours ;
- Leur substituabilité.

Leur faible quantité sur le marché et leur utilisation relativement récente font que les filières de recyclage de ces petits métaux ne sont aujourd'hui pas structurées. En effet, les faibles quantités disponibles, les ruptures technologiques fréquentes, la volatilité des cours ne garantissent pas aux unités de recyclage des conditions de rentabilité satisfaisantes (Lepesant, 2018). Ces mêmes raisons conduisent à alerter sur la potentielle trop grande importance accordée aux petits métaux, qui sont mal connus et mal modélisés et qui pourtant ont été le centre de l'attention ces dernières années à cause de leur utilisation dans les technologies de la communication (téléphone portables, ordinateurs, etc.), ou à cause de l'embargo de la Chine sur les terres rares en 2011 (Vidal et al., 2013). Il faut cependant garder à l'esprit que la généralisation de technologies pointues comme les panneaux TeCd ou CIGS se heurterait à une disponibilité très faible du Tellurium ou de l'Indium (sous-produits respectivement du Cuivre et du Zinc) y compris géologique.

- ❖ **Les grands métaux : une faible substituabilité ainsi qu'une longue durée d'immobilisation laissent présager des tensions à l'horizon 2050**

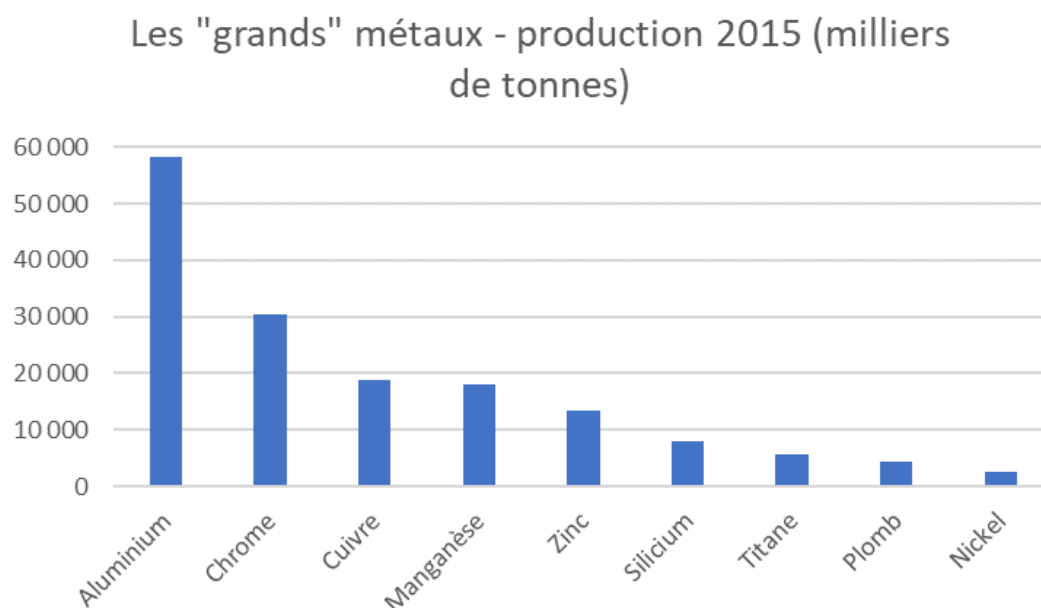


Figure 9 : production mondiale de grands métaux en 2015, en milliers de tonnes. Le fer et l'acier ne sont pas représentés pour rendre le graphique plus lisible (USGS, 2016).

En se basant sur les projections des scénarios de l'AIE et d'Ecofys (WWF) à 2050, les quantités de grands métaux utilisées en 2050 sont estimées à 3 200 Mt d'acier, 310 Mt d'aluminium et 40 Mt de cuivre, correspondant à une augmentation de la production annuelle de 5 à 18% pour les 40 prochaines années. Comme indiqué précédemment, la demande en métaux de base augmente actuellement de 5% par an, et si cette tendance se poursuit, la quantité de métal à produire dans les 15 prochaines années sera équivalente à celle produite entre le début de l'humanité et 2013 (Vidal et al., 2013). Ces

Enfin, comme déjà mentionné, les grands métaux sont peu substituables. Ce sont pour la plupart des métaux utilisés dans les infrastructures, ayant des propriétés physiques particulières. Par exemple, aucun substitut n'a été trouvé pour certaines fonctions du fer, et le cuivre n'est substituable que par l'aluminium dans les câbles et équipement électriques, ou par la fibre optique dans les applications de télécommunication. Dans les usages structuraux ou de transport, l'aluminium peut être remplacé par le magnésium, l'acier ou le titane (World Bank Group, 2017).

Ainsi, les grands métaux sont caractérisés par :

- Une demande cumulée très importante (au moins jusqu'en 2050) ;
- Une longue durée d'immobilisation dans les infrastructures ;
- Un taux de recyclage élevé dont la contribution ne permet pas de satisfaire l'accroissement de la demande ;
- Une faible substituabilité.

L'ensemble de ces caractéristiques des grands métaux conduit plusieurs auteurs à alerter sur les possibles tensions à venir sur certains d'entre eux : le risque de tension est très probable sur le cuivre et le nickel (Geldron, 2017; Vidal, 2018), le zinc (Geldron, 2017). Des tensions sont également à envisager sur l'or et l'argent (qui ne sont pas des grands métaux, mais des métaux précieux).

Conclusion

Ainsi, les besoins en matières premières pour la transition énergétique sont quantifiés de manière robuste pour les grands métaux, mais pas de manière complète : aucune publication estimant les besoins totaux de matières et prenant en compte de manière spécifique et détaillée l'ensemble des secteurs consommateurs de ressources n'a été identifiée. Cependant, pour les grands métaux, certains auteurs comme Vidal estiment les besoins en grands métaux d'une économie par point de croissance du PIB, ce qui donne une approximation des besoins en considérant l'ensemble de l'économie. Ces estimations sont basées sur des données historiques d'extraction ainsi que sur des données de croissance économique dans les pays développés.

Les leviers de réduction de la demande en matière vierge sont différents selon le groupe du métal : pour les petits métaux, la substitution apparaît aujourd'hui comme étant une solution tandis que les filières de recyclage ne sont pas encore constituées. A l'inverse, les grands métaux ne sont pas substituables mais recyclables, même si le recyclage est difficilement quantifiable à moyen et long terme. D'après la littérature, il semble que l'épuisement des ressources minérales avant 2100 soit peu probable pour la plupart des matières premières minérales étudiées. Mais cela reste des estimations basées sur des modèles, en considérant le développement du recyclage pour venir soutenir la demande en matières premières.

Par contre, des pénuries sur des durées importantes pourraient être envisagées, faute d'une mise en exploitation suffisamment rapide de nouveaux gisements. Des tensions sont susceptibles d'exister d'ici la fin du siècle sur le zinc, le cuivre, le nickel, l'or et l'argent. Les prévisions sont beaucoup moins fiables pour les petits métaux, pour lesquels il est aujourd'hui difficile d'estimer non seulement les stocks mais aussi l'évolution de la demande et donc finalement de tirer des conclusions sur des possibles tensions et épuisement des stocks.

3. Evaluation environnementale des scénarios de transition énergétique

3.1. Un besoin d'évaluation identifié

Dans un contexte de développement d'un grand nombre de scénarios de transition énergétique publiés par différents acteurs, qui ont tous pour objectif de diminuer les émissions de gaz à effet à horizon 2050 ou 2060, la problématique de l'impact environnemental, au sens large, de ces scénarios est rarement abordée. Pourtant, comme expliqué à la section précédente, les conséquences sur d'autres enjeux environnementaux que le climat (épuiement des ressources par exemple) peuvent être importantes et il est donc essentiel d'évaluer les politiques publiques mises en œuvre sous un angle multicritères (Patouillard, 2018; Sala, Farioli, & Zamagni, 2013).

Dans ce contexte, la directive n°2001/42/CE du Parlement européen et du Conseil du 27 juin 2001 relative à « l'évaluation des incidences de certains plans et programmes sur l'environnement » (Parlement Européen et Conseil de l'Union Européenne, 2001), impose une évaluation environnementale renforcée de certains plans et programmes et introduit la consultation spécifique d'une autorité environnementale. L'objectif de cette directive est donc de qualifier toute incidence environnementale négative engendrée par la mise en œuvre d'un programme, c'est-à-dire les « effets notables probables » du programme sur des thèmes comme la diversité biologique, la santé humaine, les sols, les eaux, l'air, etc.

En France, la mise en application de cette Directive se traduit par la présence de dispositions réglementaires dans le Code de l'Environnement définissant l'ensemble de plans, schémas, ou programmes soumis à une évaluation environnementale dite « stratégique ». Pour encadrer cette évaluation, le Commissariat Général au Développement Durable a publié un guide (Delduc, Phelep, & CEREMA, 2015) détaillant la démarche à adopter à travers, notamment, les différentes étapes suivantes :

- Etat initial de l'environnement ;
- Hiérarchisation des enjeux environnementaux ;
- Analyse des effets sur l'environnement des options retenues dans le plan/schéma/ programme ;
- Mise en place de mesures pour éviter, réduire ou compenser les effets potentiels.



Figure 17 : Illustration du principe itératif de la démarche d'évaluation environnementale
(Delduc et al., 2015)

Ainsi, dans le cadre de la révision de la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC), qui est une feuille de route donnant les grandes orientations pour mettre en œuvre, dans tous les secteurs d'activité, la transition vers une économie bas-carbone et durable en France, une évaluation environnementale stratégique (EES) est actuellement conduite (réalisée par I Care & Consult). Cette EES comporte un état initial de l'environnement et les effets (positifs ou négatifs) des actions envisagées sur ce dernier et préconise les mesures d'accompagnement pour éviter, réduire, voire compenser les effets négatifs du projet sur l'environnement et la santé publique. Il est important de noter ici que l'évaluation des incidences se fait sur une base principalement qualitative afin de servir d'outil d'aide à la décision quant au choix des alternatives.

	ORIENTATIONS/DISPOSITIONS/PROJETS									
	A1	A2	B1	B2	B3	B4	...	G1	G2	G3
enjeu 1	+									
enjeu 2		-		++				-	+	
enjeu 3	++							+/-	++	
...						--				
		--		++		-		--		
									+	
	+/-			+		?				
		+/-		+/-				-		
		-		-					+	
	?					+				
						+/-				
enjeu n										

Incidences cumulées de l'ensemble des orientations pour un enjeu

Incidences cumulées d'une orientation pour différents enjeux

Figure 18 : Matrice d'analyse ou grille multicritère (Delduc et al., 2015)

3.2. L'Analyse du Cycle de Vie : un outil d'évaluation quantitative de l'impact des politiques publiques

Comme mentionné précédemment, les évaluations des scénarios de transition conduites dans le cadre réglementaire sont constituées principalement d'analyse qualitative des impacts sur l'environnement. Cependant, l'Analyse du Cycle de Vie (ACV), outil d'évaluation quantitative multicritère standardisé, apparaît également aujourd'hui comme un outil utilisable pour accompagner la construction de politique publique et évaluer leurs impacts et bénéfices (Reale, Cinelli, & Sala, 2017). A ce titre, l'ACV est citée comme une des méthodologies de référence dans la « *Better regulation toolbox* » de la Commission Européenne (European Commission, 2018a).

Cependant, l'utilisation de l'ACV à l'échelle de politique publique pose certains problèmes méthodologiques dus notamment au changement d'échelle de l'évaluation : de l'échelle produit (micro) à l'échelle d'un système (macro). Ainsi, un premier atelier de travail a été organisé par le Joint Research Center (JRC) en décembre 2016 afin d'établir une feuille de route sur les travaux de recherche à mener pour renforcer la pertinence de l'utilisation de l'ACV dans le contexte de politique publique (Reale et al., 2017). Les principaux challenges identifiés lors de cet atelier s'articulent autour des questions de recherche suivantes :

- Quels développements méthodologiques sont nécessaires pour faire face à la complexité de l'évaluation de politique publique ?
- En quoi la modélisation de scénarios et les études prospectives peuvent-elles enrichir l'ACV ?
- Comment mieux présenter les résultats d'ACV afin d'améliorer leur compréhension et leur interprétation pour éclairer la construction de politique publique ?

Il est important de noter que l'ACV a déjà permis par le passé d'amener une réflexion concernant certains éléments de politique publique, notamment en ce qui concerne la durabilité des bioénergies (Dandres, 2012; Patouillard, 2018; Reale et al., 2017). Il ne s'agit pas ici d'ouvrir un débat sur ce sujet spécifique mais bien de mentionner que l'ACV est déjà un outil d'évaluation de politique publique, en amont et en aval de la décision politique, notamment à travers l'utilisation de l'ACV conséquentielle (Dandres, 2012; Guiton & Benetto, 2013).

3.3. L'évaluation de scénarios de transition énergétique par l'Analyse du Cycle de Vie

A première vue, l'évaluation environnementale de scénarios de transition énergétique apparaît complexe. En effet, il s'agit d'évaluer un système global, dynamique dans le temps et dont les processus interagissent entre eux. Ainsi, les scénarios de transition ne prennent généralement pas en compte le cycle de vie des technologies énergétiques et les ACV étudient majoritairement une seule technologie à la fois (Hertwich et al., 2015). Pourtant, l'utilisation de l'ACV pour l'étude des scénarios de transition énergétique permet d'évaluer les potentiels transferts d'impacts, que ce soit en terme de pollution ou de consommation de ressources non-renouvelables (Hammond, Howard, & Jones, 2013; Hertwich et al., 2015) par rapport à l'objectif de diminution des émissions de GES des scénarios.

Ainsi, lorsque le périmètre d'analyse est restreint à une seule technologie, ce sont les panneaux photovoltaïques sans silicium (Cadmium-Telluride [CdTe] ou Cuivre-Indium-Gallium-Selenide [CIGS]) qui sont principalement étudiés (Marini, Blanc, sinha, & wade, 2014; Stamp, Wäger, & Hellweg, 2014), avec des variabilités fortes sur la quantité d'Indium utilisée. Cependant, l'objectif varie d'une publication à l'autre. Marini et al. (2014) cherche à évaluer l'impact sur le changement climatique de la production d'électricité à partir de panneaux photovoltaïque CdTe (exprimé en kg CO₂eq/kWh), à horizon 2050, en fonction de leur provenance (prise en compte de l'évolution du mix énergétique pour la fabrication des panneaux dans les pays à l'étude) et selon trois scénarios d'évolution de la technologie. Ainsi, l'impact sur les ressources ou sur un autre indicateur environnemental n'est pas considéré.

D'un autre côté, Stamp et al. (2014) cherche à estimer la consommation en Indium primaire due au développement de la technologie de panneaux photovoltaïque CIGS dans différents scénarios de transition énergétique (Energy[r]evolution de Greenpeace, Technology Roadmap Solar de l'AIE, et Solar Generation de l'European Photovoltaic Industry Association) à partir d'une analyse MFA. Ils intègrent également dans leur analyse une estimation de la consommation en Indium par d'autres technologies, telles que les écrans plats ou les LED à horizon 2050. L'objectif de leur étude n'est pas d'estimer quelle part de la production d'électricité peut être assurée par la technologie CIGS en considérant une ressource en Indium limitée, mais plutôt de quantifier globalement le besoin et de proposer des pistes pour répondre à l'accroissement de la demande.

Ainsi, la quantité cumulée d'Indium primaire nécessaire à la transition énergétique à horizon 2050 varie de **789 tonnes** (scénario de référence publié par Greenpeace et basé sur le scénario de référence de l'AIE en 2004) avec une contribution inférieure à 1% du photovoltaïque à la production d'électricité au niveau mondial, à **30 556 tonnes** (scénario Solar generation publié par Greenpeace et l'European Photovoltaic Industry Association) qui prévoit une contribution du photovoltaïque à la production d'électricité au niveau mondial autour de 20%. Par ailleurs, Stamp et al. (2014) estime une demande en Indium primaire pour les autres industries entre 17000 et 39000 tonnes, selon les scénarios de développement de ces industries. La transition énergétique pourrait donc contribuer à doubler la demande en Indium primaire, ce qui n'apparaît pas faisable compte tenu des quantités exploitées actuellement (Stamp et al., 2014). Différentes pistes sont donc proposées et discutées pour aboutir à une telle capacité de production, à savoir :

- Augmentation de l'exploitation annuelle du Zinc (l'Indium est un sous-produit de l'extraction du Zinc) entre 12% et 24% à horizon 2050 suivant les scénarios : dans ce cas, ce ne sont pas les réserves estimées de Zinc le problème (estimées autour de 250 millions de tonnes) mais bien l'augmentation de la consommation de Zinc, qui est liée à la croissance économique de certains secteurs (automobile, bâtiment) ;
- Amélioration de l'efficacité d'extraction de l'Indium lors de l'exploitation du Zinc, qui ne peut cependant que doubler dans le meilleur des cas ;
- Extraction de l'Indium comme co-produit de l'extraction d'autres métaux, comme le cuivre, le plomb ou l'étain (déjà initiée) ;
- Exploitation d'anciens sites pour extraire l'Indium (cette piste peut cependant paraître illusoire sauf dans le cas de nouvelles réserves de zinc).

L'élargissement du périmètre d'analyse à l'ensemble du secteur énergétique, c'est-à-dire à l'ensemble des technologies de production présentes dans le mix énergétique actuellement et dans un horizon futur, nécessite une collecte de données plus importante pour mener à bien une ACV (Hammond et al., 2013; Harmsen, Roes, & Patel, 2013; Hertwich et al., 2015). Ainsi, à l'échelle du Royaume-Uni,

Hammond et al. (2013) présente une évaluation énergétique et environnementale de trois scénarios de transition (Foxon, Hammond, & Pearson, 2010), en considérant le cycle de vie des différentes technologies de production d'électricité. Cette analyse, réalisée avec la méthode Eco-indicator 99, met en avant un potentiel transfert d'impact concernant les émissions de particules et leurs effets sur la santé dans le cas du scénario de transition le moins ambitieux. Aucune analyse spécifique n'est menée sur l'impact sur les ressources.

Deux autres études sont conduites sur le système énergétique et sur son évolution à travers les scénarios de transition, à l'échelle globale (Harmsen et al., 2013; Hertwich et al., 2015). L'objectif de l'étude menée par Harmsen et al. (2013) est double : ils cherchent, à la fois, à évaluer les besoins énergétiques futurs pour extraire le cuivre nécessaire à la transition énergétique dans un contexte de diminution de la concentration des gisements, mais aussi, ils proposent de se servir de l'énergie d'extraction (Gross energy requirement, en MJ/kg) comme facteur de caractérisation de l'épuisement des ressources. En effet, les estimations des réserves mondiales de cuivre, actuellement utilisées pour évaluer l'épuisement des ressources, ont peu évolué ces dernières décennies malgré l'augmentation de la production (Harmsen et al., 2013). Attention cependant, cette méthodologie est très délicate à appliquer à des métaux qui sont des sous-produits d'autres métaux.

A titre d'exemple pour le cuivre, qui est l'objet de leur cas d'étude, ils comparent :

- La valeur moyenne de l'énergie nécessaire à l'extraction et à la transformation du cuivre primaire dans la base de données ecoinvent, à savoir **45,6 MJ/kg** (en moyenne dans ecoinvent v2.0) ;
- L'évolution dans le temps, à mesure qu'on extrait le cuivre, de l'énergie nécessaire pour obtenir du cuivre primaire (entre **150 et 230 MJ/kg**, suivant le scénario de transition considéré).

Après Harmsen, la deuxième publication à traiter de l'impact de l'ensemble du système énergétique est la publication de Hertwich. Comme mentionné au début de cette section, la réalisation d'une ACV sur un scénario de transition énergétique est un exercice complexe. Hertwich et al. (2015) ont réalisé une ACV complète multicritères sur deux scénarios de l'AIE, à savoir :

- Le scénario de référence du document Energy Technology Perspective 2010 (AIE, 2010)
- Le scénario BLUE Map (AIE, 2010) qui prévoyait une réduction de 50% des émissions de CO₂ à horizon 2050 du secteur de la production d'énergie.

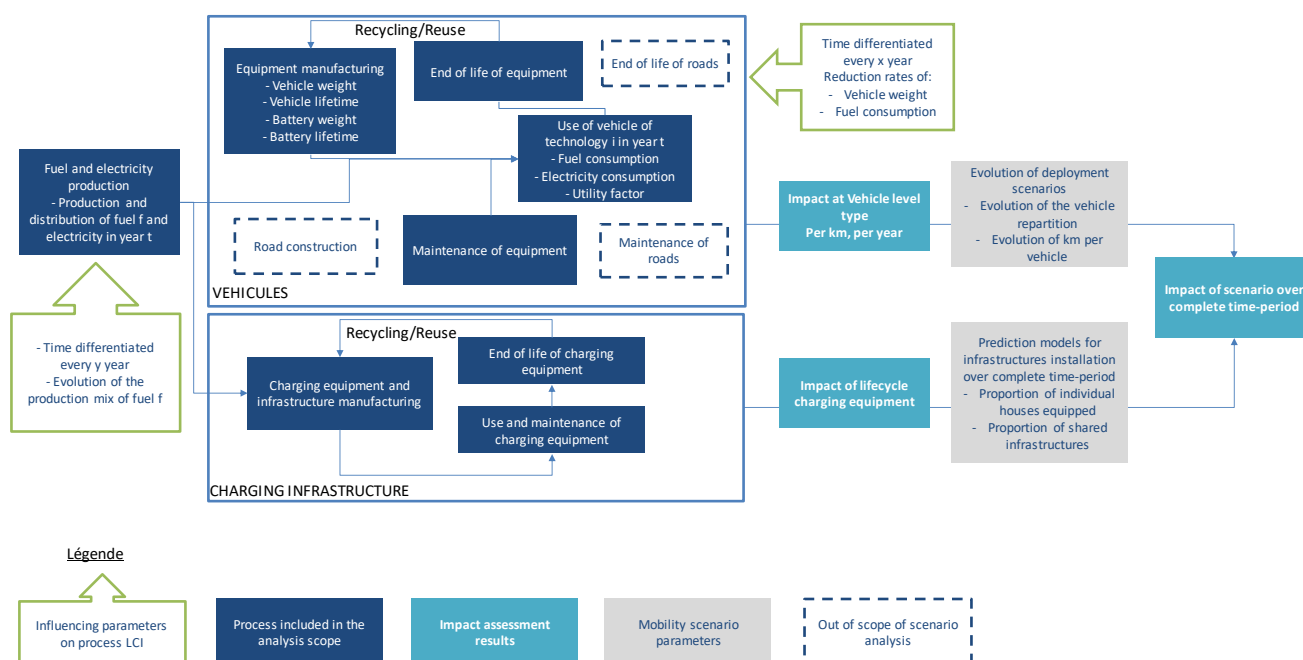
L'étude propose à la fois une évaluation des impacts environnementaux à l'aide de la méthodologie Recipe (Goedkoop, Heijungs, De Schryver, Struijs, & van Zelm, 2013) et une quantification des besoins en grands matériaux (fer, ciment, cuivre et aluminium) pour chaque technologie de production d'énergie. Ainsi, Hertwich et al. (2013) estiment que la quantité de cuivre nécessaire par kWh produit est 11 à 40 fois plus élevée pour les systèmes photovoltaïques par rapport à des technologies conventionnelles, tandis que la consommation de fer est 6 à 14 fois plus élevée dans le cas des éoliennes.

A l'échelle du scénario, et notamment dans le cas du BLUE Map, c'est-à-dire le plus ambitieux en termes de réduction des émissions de GES à horizon 2050, les auteurs estiment que les besoins en cuivre pour la transition correspondent à 200% de la production cuivre pour la seule année 2011. En d'autres termes, la production de cuivre était de 0,013 Gt en 2011 et les besoins cumulés pour la transition représentent 0,029 Gt à horizon 2050 (Hertwich et al., 2015). Ils concluent donc en mettant en avant une potentielle tension sur ce matériau, comme également mis en avant par Harmsen et al. (2013).

Enfin, la recherche bibliographique a également mis en avant deux études menées sur le secteur de la mobilité (Bohnes, Gregg, & Laurent, 2017; Patouillard, 2018). L'approche méthodologique conduite dans ses deux travaux est relativement similaire, étant donné que :

- Patouillard (2018) réalise une Analyse du Cycle de Vie conséquentielle sur un scénario de mobilité durable, tel que décrit dans la Loi de Transition Énergétique (15% d'énergie renouvelable dans le secteur des transports et une réduction de 30% de la consommation d'énergie primaire fossile d'ici 2030 par rapport au niveau de 2012)
- Bohnes (2017) réalise une Analyse du Cycle de Vie conséquentielle sur plusieurs scénarios de mobilité durable, pour la ville de Copenhague, à horizon 2030.

L'utilisation de l'ACV conséquentielle est justifiée par la nécessité de prendre en compte les interactions avec des systèmes extérieurs au périmètre de leurs études.



Ainsi, les travaux de Patouillard ont principalement pour objectif de tester sa méthode de priorisation de l'effort en termes de régionalisation. Ils sont intéressants d'un point de vue méthodologique mais ne présentent pas de résultats sur l'enjeu ressources. A contrario, les travaux de Bohnes et al. (2017) évaluent les différents scénarios de mobilité avec les indicateurs de l'ILCD (2011), et en particulier l'indicateur d'épuisement des ressources. Si les auteurs n'évaluent pas de pression sur les ressources, contrairement à Hertwich et al. (2015) par exemple, ils estiment que le scénario le moins impactant sur les ressources est celui privilégiant le développement du véhicule électrique. Ces conclusions sont toutefois à considérer avec prudence étant donné le fort taux de recyclage des batteries considéré dans ce scénario.

En synthèse, l'utilisation de l'ACV pour l'évaluation d'un scénario de transition est encore peu présente dans la littérature, de par sa nature complexe. Certains auteurs prennent en compte l'enjeu ressources (Bohnes et al., 2017) mais sans faire de lien avec leur épuisement potentiel. Deux études sont particulièrement intéressantes dans le cadre de cette mission, il s'agit de Hertwich et al. (2015) qui a réalisé une ACV multicritère détaillée sur deux scénarios de l'AIE, et dont certaines données pourraient venir alimenter notre ACV (paramètres d'inventaire par exemple) et Harmsen et al. (2013) qui propose une approche intéressante pour la caractérisation de l'épuisement des ressources à travers l'énergie d'extraction d'un matériau (évoluant au cours du temps).

II. Application : Modélisation ACV d'un scénario de transition énergétique

1. Objectif

A travers le cas d'étude, il s'agit d'explorer la capacité de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) à être utilisée pour faire le bilan environnemental complet (multi-indicateurs) d'un scénario de transition énergétique. Néanmoins, l'objectif de l'étude se limite à l'évaluation de la consommation de ressources minérales pour assurer un scénario de transition énergétique. De ce point de vue, l'objectif est donc de se focaliser sur l'indicateur « ressources », plus que sur tout autre indicateur, et en particulier les ressources abiotiques. Les ressources eau, énergie et agro-ressources ne sont pas considérées dans l'analyse.

Note : Dans la suite du rapport, le terme « ressources » désignera les ressources abiotiques.

Ainsi, afin de répondre à l'objectif de cette étude, il s'agira d'explorer deux problématiques principales, à savoir :

- Quel est le bilan matière (ou intensité matière) de la transition énergétique ? Et peut-elle être réalisée compte-tenu des matières premières disponibles ?
- Quelles informations supplémentaires sont apportées par l'Analyse du Cycle de Vie, et la caractérisation de l'impact sur les ressources, par rapport à cette question de disponibilité des matières pour la transition énergétique ?

2. Périmètre d'étude

Comme présenté dans la partie I, un scénario de transition est défini par un point de départ (contexte technico-économique actuel par exemple), un point d'arrivée souhaitable (contexte technico-économique permettant de limiter le réchauffement climatique) et une trajectoire de transition, qui est constituée d'un ensemble de paramètres qui varient en fonction du contexte (géographique, politique, démographique, etc...).

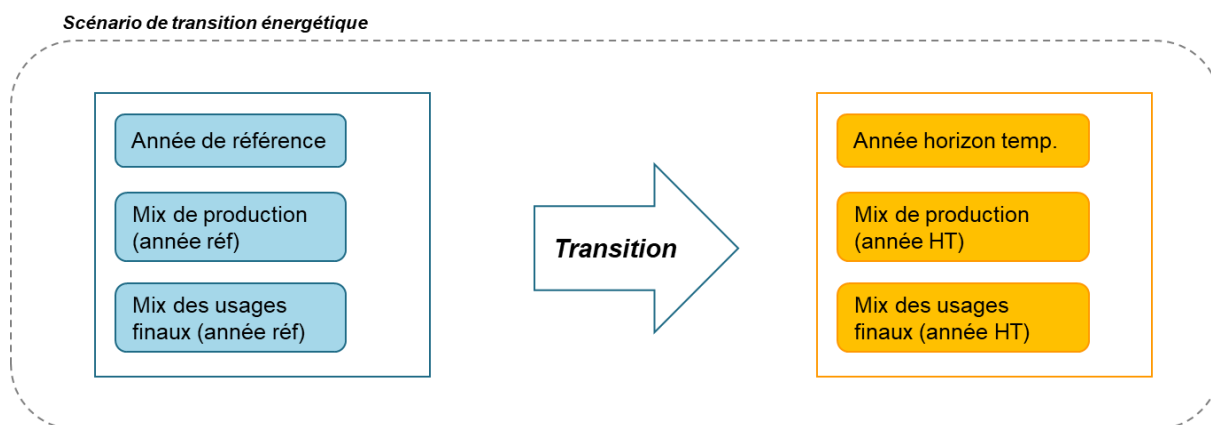


Figure 20 : Représentation schématique d'un scénario de transition énergétique

Dans le cadre de cette étude, le **scénario de transition retenu pour la réalisation de l'ACV est le scénario ETP 2017 2DS de l'AIE**. En effet, ce scénario est particulièrement détaillé en ce qui concerne les trajectoires énergétiques et les émissions de GES de différents secteurs d'activité. Il est également utilisé comme scénario 2°C de référence par plusieurs initiatives, comme l'initiative *Science-Based Targets*.

Cependant, la difficulté de l'étude réside dans le fait que le scénario ETP est construit pour assurer un bouclage énergétique entre la demande en énergie et les moyens de productions disponibles (avec une contrainte sur les émissions de GES), pour chaque année du scénario. C'est pourquoi, d'un point de

vue consommation de ressources, il a été nécessaire de définir des critères de sélection pour identifier les secteurs à étudier dans le cadre de l'ACV, à savoir :

- Le secteur est-il un secteur fortement consommateur de ressources ?
- Est-ce que les principales ressources consommées par le secteur sont des ressources en tension connues ?
- Est-ce qu'il est prévu que le secteur connaisse des évolutions technologiques qui changent le mix de ressources consommées ?
- Est-ce des données concernant les ressources sont disponibles ?

A partir de ces critères, le périmètre suivant a pu être établi, avec différents niveaux d'intégration dans l'analyse

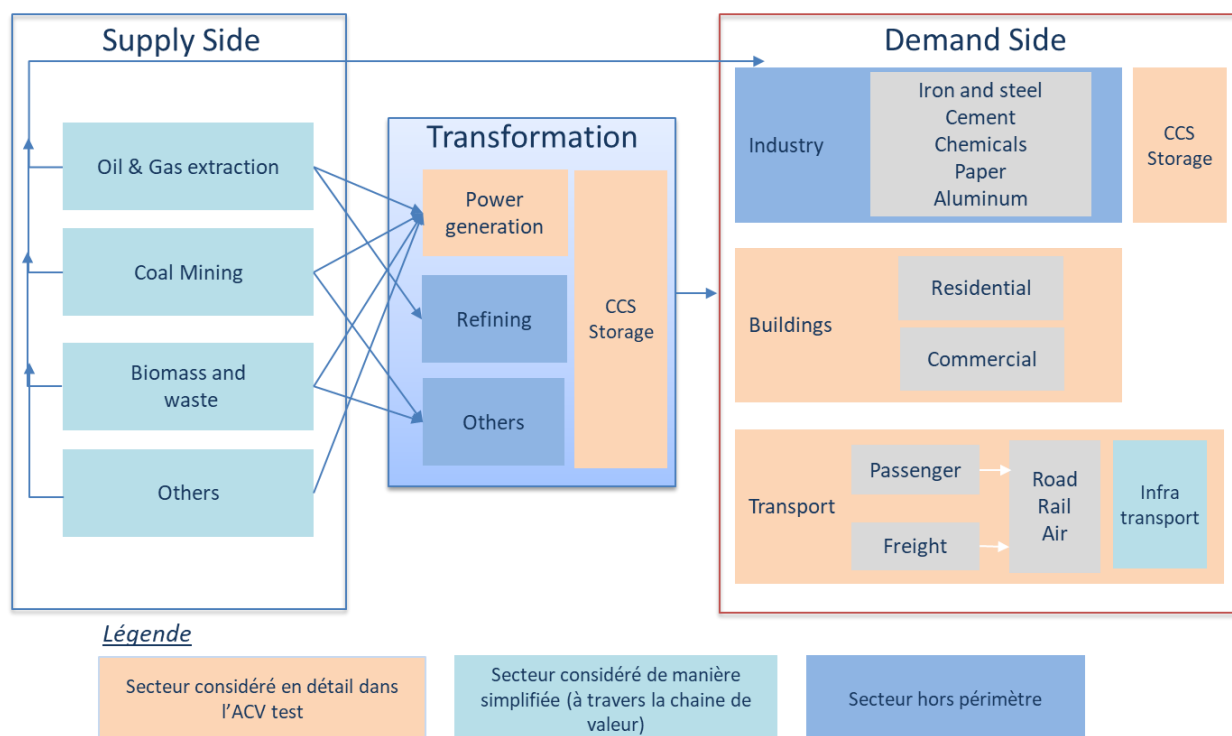


Figure 21 : Périmètre retenu pour l'ACV test

Les secteurs considérés en détail dans l'ACV ont été modélisés en prenant en compte les évolutions des mix technologiques, tels que présentés dans le scénario ETP, et donc les nouvelles mises sur le marché (que ce soit pour les nouvelles infrastructures de production d'énergie, les nouveaux véhicules, etc.)

- Le secteur « Power generation » analysé comprend la construction des principaux types de centrales de production d'électricité telles que détaillées dans le scénario AIE
- Le secteur « Building » analysé comprend la construction de bâtiments neufs pour le segment résidentiel et tertiaire
- Le secteur « Transport » analysé comprend à la fois le transport de passagers et le fret, en termes de construction de flottes de véhicules, et ce sur les 4 modes (routier, ferroviaire, aérien, maritime).
- Le CCS Storage (Carbon Capture and Storage) ne représente pas un secteur à part entière, mais implique l'utilisation de conduits, ce qui peut avoir un impact sur la consommation de matière. C'est pourquoi, il a été mis en évidence au niveau du périmètre d'étude.

Les secteurs considérés de manière simplifiée ont été inclus dans l'analyse sans modification du mix technologique existant (chaîne de valeur du secteur Oil & Gas par exemple). Pour les infrastructures de transport, seul l'amortissement des infrastructures existantes a été considéré à travers les données déjà présentes dans la base de données Ecoinvent (rails pour les trains par exemple). Aucune infrastructure

additionnelle n'a été modélisée, ce qui est une représentation moins précise que pour le secteur Power où les capacités additionnelles de production d'électricité ont été modélisées année après année.

Enfin certains secteurs n'ont pas été retenus pour cette ACV test car ne remplissant pas les conditions listées plus haut.

3. Approche méthodologique

Dans ce contexte d'étude, il conviendrait d'appliquer une démarche d'ACV Conséquentielle (ACV-C) au scénario de transition énergétique puisque les conséquences du système étudié (en l'occurrence le système énergétique dans sa globalité - offre/demande) affectent l'ensemble du système économique et ne peuvent être considérées comme des changements marginaux, ce qui est le critère de décision pour une ACV-C.

En pratique, l'ACV-C de scénarios de transition énergétique s'avèrerait impossible à réaliser par manque de connaissance, et donc par manque de données pour la modélisation, des scénarios prospectifs futurs appliqués à l'ensemble des secteurs économiques. C'est pourquoi une approche d'ACV attributionnelle a été considérée dans cette étude.

4. Unité fonctionnelle

Dans le cadre de cette étude, la définition de l'unité fonctionnelle se rapporte à l'ensemble des données d'activités du scénario, dans le périmètre défini précédemment, pour une année donnée. Ainsi, l'évaluation est conduite pour 4 années distinctes :

- 2015
- 2025
- 2040
- 2060.

L'unité fonctionnelle pourrait donc être exprimée de la manière suivante : « mettre en place les moyens techniques et opérationnels à l'année 20XX pour respecter les objectifs fixés par le scénario ETP 2017 2DS de l'AIE aux différents horizons de temps ».

Les principaux résultats représenteront la consommation de matières et/ou l'impact sur les ressources pour une année donnée.

5. Définition des hypothèses de référence pour l'ACV du scénario ETP 2017 2DS

Pour pouvoir construire l'inventaire et réaliser une telle ACV, il faudra d'abord extraire les principaux éléments du scénario ETP, pour chaque année étudiée, en termes de :

- Composition du mix énergétique et électrique ;
- Données d'activités pour chaque secteur étudié (nombre de véhicules du parc, nombre de m2 de bâtiment construit, etc...) ;
- Evolution technologique (lorsque disponible).

Il est clair que les données qui peuvent être extraites du scénario ETP n'ont pas toutes la granularité nécessaire à la réalisation d'une telle étude. Ainsi, d'autres sources de données ont été mobilisées afin de compléter les éléments du scénario ETP (Annexe 3).

Tableau 2 : Identification des données d'activités issues du scénario ETP 2017 et autres sources de données mobilisées

	Production d'électricité	Transport	Bâtiment	Industrie
Données d'activité disponible dans le scénario ETP et utilisée dans l'étude	Puissance installée (GW) et production d'énergie (TWh) par type de moyen de production (PV, nucléaire, éolien en mer et terrestre, etc...) Quantité de CO2 captée par les systèmes CCS	Pour le secteur routier : taille du parc pour les véhicules automobiles et le fret routier (millions), et typologie de véhicule (essence, diesel, hybride, électrique, etc...) Pour le secteur ferroviaire, les données d'activités sont le nombre de passager.km effectués par année du scénario et le nombre de t.km transporté pour le fret Pour le secteur aérien, les données du scénario sont le nombre de passager.km par an Pour le secteur maritime, les données sont le nombre de t.km transporté	Nombre de m2 additionnel construit par an (les matériaux nécessaires à la rénovation énergétique du parc ne sont pas pris en compte)	Quantité de CO2 captée par les systèmes CCS
Autres sources mobilisées	Les données complémentaires utilisées sont issues de la Banque Mondiale et concernent la quantité de matériaux par MW installé pour le solaire CSP et le nucléaire	Pour le secteur aérien, des données complémentaires sur l'évolutions de la flotte, en nombre d'appareils, sont issues d'une publication d'Airbus	Les ratios (kg de matériaux/m2) sont tirés de la publication d'Heeren et al. 2018	L'estimation de la quantité de mètre linéaire de pipeline par tonne de CO2 captée est issue d'une étude du Global CCS Institute

Par ailleurs, afin de prendre en compte le rôle que joue l'aluminium pour la transition énergétique du secteur des Transports à travers l'allègement des structures (substitution de l'acier dans les véhicules par de l'aluminium), l'inventaire du corps des véhicules automobiles a été modifié au cours du temps dans le scénario. Les phénomènes similaires sur les autres modes (aérien, ...) n'ont pas été pris en compte. Ainsi, à partir de données issues du Center for Automotive Research (CAR), les modifications d'inventaires suivantes ont été réalisées :

- Part de l'aluminium dans un 1 kg {d'acier+aluminium} pour un véhicule automobile (hors motorisation et batterie) en 2015 : 1%
- Part de l'aluminium dans un 1 kg {d'acier+aluminium} pour un véhicule automobile (hors motorisation et batterie) en 2025 : 13%
- Part de l'aluminium dans un 1 kg {d'acier+aluminium} pour un véhicule automobile (hors motorisation et batterie) en 2040 : 25%

6. Méthodologie d'évaluation des impacts sur les ressources

6.1. Terminologie

Les ressources d'hydrocarbures désignent l'ensemble des volumes d'hydrocarbures contenus dans le sous-sol terrestre. Les réserves d'hydrocarbures désignent les volumes récupérables d'hydrocarbures aux conditions techniques et économiques définies dans des gisements. Par conséquent, les réserves ne constituent qu'une partie des ressources estimées. Cet exemple s'applique sur toutes les ressources abiotiques.

Le **taux de récupération** d'un gisement est égal au rapport entre les volumes de réserves produites et les volumes d'hydrocarbures en place. Une **augmentation du taux de récupération**, c'est-à-dire une optimisation des mécanismes de drainage dans le réservoir, entraîne une **augmentation des réserves** au fil du temps.

6.2. Concept de réserves

Comme indiqué précédemment, le focus de cette étude est l'évaluation de l'impact sur les ressources d'un scénario de transition énergétique. Le premier résultat issu de cette ACV est la quantification de l'inventaire, pour chaque année du scénario. Il s'agit ici d'agréger l'ensemble des quantités de ressources mises en œuvre dans les données d'inventaire utilisées pour modéliser le scénario ETP.

Ensuite, il est possible de caractériser l'impact de la consommation de ressources en termes d'épuisement des ressources. Comme le précise Van Oers et al. 2016, l'épuisement des ressources abiotiques est l'une des catégories d'impact les plus débattues parce qu'il n'existe pas de méthode scientifiquement "correcte" pour dériver les facteurs de caractérisation. Il y a plusieurs raisons à cela :

- L'épuisement abiotique est un problème qui concerne les sphères de l'économie et de l'environnement, puisque les réserves de ressources dépendent des technologies futures pour les extraire, ainsi que du contexte géopolitique ;
- Il existe différentes façons de définir le problème de l'épuisement, et toutes peuvent être justifiées sous différents angles ;
- Il y a différentes façons de quantifier l'épuisement, et aucune d'entre elles ne peut être vérifiée de manière empirique, puisqu'ils dépendent tous de la disponibilité et de la demande supposées de ressources dans l'avenir et de l'évolution des technologies futures.

Idéalement fondée sur la définition de l'épuisement des ressources abiotiques, la ressource disponible devrait englober à la fois les stocks naturels et les stocks de l'économie. Le tableau ci-dessous, adapté de la publication Van Oers et al. 2016, présente les différents types de réserves et leurs définitions.

Tableau 3 : Définition des différents types de réserves

Terminologie utilisée en ACV	Définition : approche géologique et minière	Définition : approche ACV
« ultimate reserve » ou ressources ultimes	Les ressources ultimes : volumes générés au cours des temps géologiques, qu'ils aient déjà été exploités, soient en passe de l'être ou encore inexploités. Elle est généralement calculée en multipliant le volume de la croûte continentale terrestre par une concentration moyenne. Il ne peut s'agir que d'un ordre de grandeur.	Quantité d'une ressource (comme un élément ou un composé chimique) qui est finalement disponible, estimée en multipliant la concentration moyenne naturelle de la ressource dans la croûte terrestre par la masse ou le volume de celle-ci
« ultimately extractable reserve » ou ressources ultimement extractibles	Ces ressources sont généralement estimées en appliquant une raréfaction sur les réserves ultimes. Elles peuvent aussi être calculées en utilisant la probabilité de trouver de nouveaux gisements suivant les régions et les contextes géologiques.	Ces ressources ultimement extractibles se situent entre les ressources ultimes et la base des réserves (reserve base).

Ressources	La notion de ressources dans le domaine minier fait l'objet de guides pour leur reportage dans la plupart des pays miniers. Un guide international est réalisé par le CRIRSCO (Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards, 2014). Il est aussi fait souvent référence au document de l'US Geological Survey : Principles of resource/reserve classification for minerals. Cette notion porte sur la définition des ressources découvertes par l'exploration (les ressources non découvertes sont incluses dans les ressources ultimes extractibles). Elles sont qualifiées de déduites, indicatives ou mesurées suivant des critères de finesse de l'exploration du gisement.	
« economic reserve » ou réserves économiquement exploitables	La notion de réserve dans le domaine minier fait l'objet de guides pour leur reportage dans la plupart des pays miniers. Un guide international est réalisé par le CRIRSCO (Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards, 2014). Il est aussi fait souvent référence au document de l'US Geological Survey : Principles of resource/reserve classification for minerals.⁶ Il s'agit de la part des ressources exploitable dans les conditions techniques et économiques du moment. Elles sont soit probables pour la part des ressources indicatives, soit prouvées sur la base des ressources mesurées. Ce sont ces données qui sont le plus souvent communiquées et suivies.	Part de la base de réserves pouvant être extraites de façon économiquement rentable aujourd'hui. Ces réserves sous-estiment les stocks parce qu'elles ne représentent que la situation actuelle de connaissance du gisement et de l'extraction rentable alors que la réserve rentable est susceptible d'augmenter avec la poursuite de l'exploration d'un gisement et avec l'augmentation des prix, pendant la durée de vie d'une mine.
« reserve base » ou la base de réserves	Base de réserves : ces réserves considèrent les réserves accessibles actuellement et les réserves qui ont un potentiel de devenir économiquement rentables dans un avenir proche, soit sur un espace de temps s'apparentant à la durée de vie de l'exploitation d'un gisement. Il s'agit donc des réserves plus d'une partie sub-économique des ressources. Cette notion est abandonnée dans les chiffres de l'USGS depuis une dizaine d'année.	Partie d'une ressource qui répond aux exigences physiques et chimiques minimales relatives à l'extraction minière actuelle. La base de réserves (ou reserve base) peut englober les parties des ressources qui ont un potentiel raisonnable de devenir économiquement disponible à un horizon de temps, au-delà des technologies éprouvées, et de l'économie actuelle. La base des réserves comprend les ressources qui sont actuellement disponibles d'un point de vue économique (réserves) ou les réserves marginales et certaines réserves qui pourraient être économiquement disponibles (ressources sous-économiques)

La base des réserves telle que définie par le U.S. Geological Survey fournit peu d'information sur la disponibilité géologique, car ces chiffres sont extrêmement dépendants de l'économie. Les réserves économiques et leur utilisation (extraction) sont interdépendantes, puisque la recherche de nouvelles réserves dépend de la probabilité d'exploration et d'utilisation des ressources.

⁶ Principles of a resource/reserve classification for minerals, Circular 831, U.S. Bureau of Mines and U.S. Geological Survey, 1980.

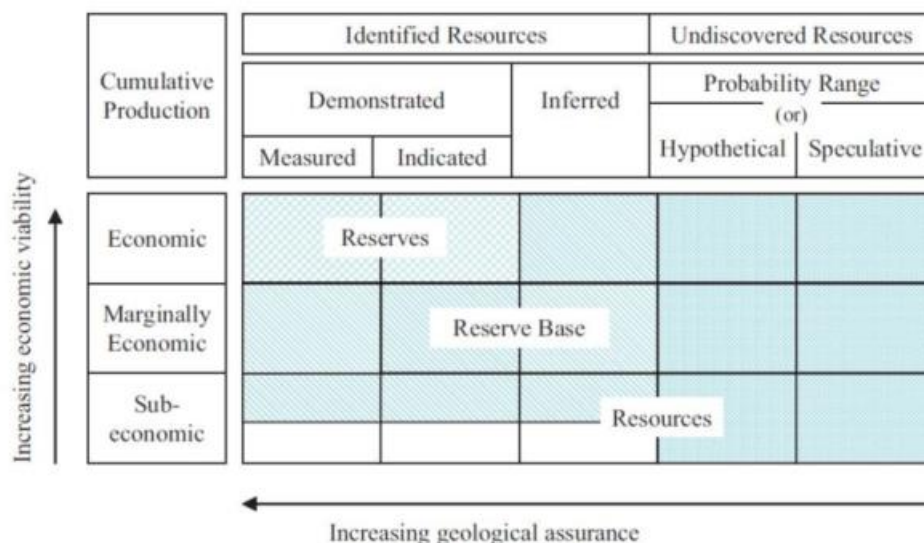


Figure 22 : Diagramme de Mc Kelvey (1972) modifié par Gordon et al. (2007) (Fizaine, 2014)

6.3. Méthodes de caractérisation

La méthode d'épuisement des ressources abiotiques ADP (Guinée et al. 2002) est recommandée par le guide méthodologique ILCD 2011 et par l'empreinte environnementale du produit au niveau européen (Product Environmental Footprint - PEF) comme étant la meilleure méthode midpoint disponible pour évaluer l'épuisement des ressources (toutefois classée en niveau II, i.e. « recommandée mais nécessitant des améliorations »). Elle se décline selon deux approches :

- CML-IA baseline, abiotic depletion, ultimate reserve;
- CML-IA non baseline, abiotic depletion, reserve base.

Pour rappel, les facteurs de caractérisation de la méthode CML se calculent selon :

$$ADP_{i,geologic\ stock} = \frac{extraction\ rate_i}{geologic\ stock^2} * \frac{geologic\ stock\ antimony^2}{extraction\ rate\ antimony}$$

Une des limites majeures de ces indicateurs est leur aspect « figé dans le temps ». En effet, les facteurs de caractérisation pour les deux méthodologies CML ont été construits à partir de données d'extraction et de réserves des années 2000, ce qui n'apparaît pas adapté pour l'évaluation d'un scénario de transition à horizon 2060.

Schneider et al. soulignent l'importance d'étudier les ressources abiotiques pour la fonction qu'elles remplissent dans la société plutôt que leur disponibilité naturelle en tant que telle : en plus des stocks géologiques, les stocks anthropiques doivent être pris en compte pour tirer des conclusions. Avec leur méthode AADP (*Anthropogenic stock-extended Abiotic Depletion Potential*), les réserves géologiques ultimes extractibles doivent être définies pour permettre une évaluation combinée des stocks de ressources géologiques et anthropogéniques afin de déterminer la disponibilité physique des ressources.

Ainsi, une des pistes poursuivies dans cette étude est la construction de facteurs de caractérisation basée sur la méthode AADP de Schneider. Dans ce projet, 3 méthodes existantes et applicables ont été comparées, et la méthode qui nous semble la plus complète aujourd'hui (AADP) a été modifiée afin de voir les effets de ces modifications sur les résultats. Les trois méthodes retenues sont :

- Méthode CML-IA baseline (v4.8), abiotic depletion, ultimate reserve ;
- Méthode CML-IA non baseline (v4.8), abiotic depletion, reserve base ;
- Méthode AADP Schneider 2015.

6.4. Mise à jour de la méthode Schneider et al. (AADP 2015)

Pour évaluer la disponibilité des ressources à long terme, la part des ressources abiotiques finalement disponibles pour l'extraction humaine a été déduite de la quantité d'éléments disponibles dans la croûte terrestre. D'après les données existantes sur les concentrations dans l'écorce terrestre et les hypothèses concernant la quantité maximale de ressources extractibles, trois options différentes sont comparées par Schneider (Schneider, Berger, & Finkbeiner, 2015) pour la détermination de la concentration maximale extractible des réserves :

- Option 1 : hypothèse de 0,01% de la quantité totale des éléments contenus dans la croûte jusqu'à 3 km de profondeur seront finalement disponibles ;
- Option 2 : hypothèse de 0,08% de la quantité totale des éléments contenus dans la croûte jusqu'à 3 km de profondeur seront finalement disponibles ;
- Option 3 : hypothèse de 0,01 % de la quantité totale des éléments principaux dans la croûte jusqu'à 3 km de profondeur seront finalement disponibles et 0,001 % pour les co-éléments.

Pour faire des estimations fiables, Schneider et al. 2015 indiquent qu'il faudrait évaluer toutes les ressources qui pourraient être extraites à l'avenir. Les auteurs proposent dans leur publication une mise à jour de l'évaluation des concentrations minérales dans la croûte continentale ainsi qu'une procédure pour la détermination des réserves ultimes extractibles basée sur des pratiques et des hypothèses existantes.

Ainsi, les auteurs ont évalué les réserves ultimes extractibles par une approche supposant que 0,01 % de la quantité totale de ressources dans la croûte jusqu'à une profondeur de 3 km⁷ sera finalement disponible pour l'extraction des métaux et 0,001% pour les co-éléments. La détermination du stock anthropique dans la publication de Schneider et al. est calculée à partir du taux d'extraction cumulé depuis le début des suivis (vers 1900) jusqu'en 2010 sur la base des données de l'*U.S. Geological Survey* et considérant un taux de dissipation par défaut de 20 % (Schneider et al. 2011). Dans le contexte spécifique d'un taux d'extraction en constante augmentation, Schneider souligne l'importance de la fréquente mise à jour de ces taux d'extraction. Une mise à jour des facteurs de caractérisation est proposée ici sur la base de taux d'extraction et de stock anthropogénique recalculés et adaptés à chaque horizon.

Le facteur de caractérisation d'une ressource se calcule par la formule suivante :

$$AADP_{i, \text{ultimately extractable reserves}} = \frac{\text{extraction rate } i}{(\text{extractable geologic stock } i + \text{anthropogenic stock } i)^2} \times \frac{(\text{extractable geologic stock antimony} + \text{anthropogenic stock antimony})^2}{\text{extraction rate antimony}}$$

1) Mise à jour des taux d'extraction sur la base des données de flux de l'ACV « test »

Sur la base des scénarios modélisés à partir des données présentées dans l'annexe 3 *Inventaires de cycle de vie des scénarios de transition énergétique*, le calcul de flux des substances permet d'obtenir pour chaque horizon de temps l'extraction annuelle des ressources. Ces chiffres nous ont permis de mettre à jour les facteurs de caractérisation puisque les taux d'extraction sont pris en compte directement dans la formule de facteur de caractérisation et également indirectement dans le stock anthropogénique et les ressources ultimement extractibles.

⁷ Aujourd'hui l'opération minière la plus profonde au monde est réalisée à 3,9km de profondeur (Mine d'or de TauTona en Afrique du Sud)

Ressource (t/an)	2015		2025		2040		2060
Aluminium	1,79E+10		2,13E+10		2,84E+10		4,42E+10
Cadmium	2,82E+07		2,44E+07		2,79E+07		3,26E+07
Chromium	7,20E+09		6,95E+09		6,39E+09		7,24E+09
Cobalt	6,70E+04		7,81E+04		8,09E+04		8,23E+04
Cuivre	8,09E+09		8,48E+09		9,65E+09		1,23E+10
Fer	3,98E+11		3,86E+11		3,85E+11		4,20E+11
Plomb	6,91E+08		6,38E+08		7,30E+08		8,88E+08
Lithium	9,36E+06		7,14E+07		1,88E+08		2,57E+08
Manganèse	1,18E+09		2,15E+09		4,08E+09		5,31E+09
Molybdène	1,34E+08		1,41E+08		1,62E+08		2,03E+08
Nickel	5,07E+09		4,91E+09		4,57E+09		5,18E+09
Rhénium	2,70E+01		3,30E+01		3,85E+01		4,63E+01
Vanadium	7,15E+03		7,15E+03		1,22E+04		5,62E+03
Zinc	1,14E+09		1,03E+09		1,18E+09		1,43E+09

2) Mise à jour des ressources ultimes extractibles

Les ressources ultimes extractibles ont été recalculées sur la base des scénarios de transition énergétique pour chaque horizon de temps. L'équation ci-dessous illustre le calcul pour la mise à jour des ressources ultimes extractibles :

$$\begin{aligned}
 & \text{Ressources ultimes extractibles}_i(\text{Année } B) \\
 &= \text{Ressources ultimes extractibles}_i(\text{Année } A) \\
 &- ((\text{Moyenne}(\text{taux d'extraction}_i \text{ Année } A; \text{taux d'extraction}_i \text{ Année } B)) \\
 &\times \text{Pas de temps}(\text{Année } A; \text{Année } B))
 \end{aligned}$$

Où :

Année A < Année B

i : la ressource

Tableau 4 : Ressources ultimes extractibles selon les différents horizons de temps

Ressource	2015 (conservé de Schneider et al 2015) en tonnes	2025	2040	2060
Aluminium	1,34E+13	1,32E+13	1,28E+13	1,21E+13
Cadmium	1,49E+06	-2,61E+08	-6,54E+08	-1,26E+09
Chromium	1,52E+10	-5,56E+10	-1,56E+11	-2,92E+11
Cobalt	2,86E+08	2,85E+08	2,84E+08	2,82E+08
Cuivre	4,63E+09	-7,82E+10	-2,14E+11	-4,34E+11
Fer	6,46E+12	2,54E+12	-3,25E+12	-1,13E+13
Plomb	2,81E+09	-3,83E+09	-1,41E+10	-3,03E+10
Lithium	3,47E+09	3,07E+09	1,12E+09	-3,32E+09
Manganèse	1,27E+10	-3,94E+09	-5,06E+10	-1,45E+11
Molybdène	1,82E+08	-1,20E+09	-3,47E+09	-7,12E+09
Nickel	7,76E+09	-4,22E+10	-1,13E+11	-2,11E+11
Rhénium	3,27E+03	2,97E+03	2,43E+03	1,58E+03

Vanadium	1,60E+09	1,60E+09	1,60E+09	1,60E+09
Zinc	1,11E+10	2,50E+08	-1,64E+10	-4,25E+10

Les valeurs négatives sont présentées sur fond rouge ; Ces valeurs négatives signifient que les stocks théoriques de ressources ultimes pour les ressources considérées sont épuisés. C'est le cas dès 2025 pour 7 ressources : cadmium, chrome, cuivre, plomb, manganèse, molybdène et nickel. Le fer et le zinc présentent elles aussi des ressources ultimes extractibles négatives (donc épuisées) à partir de 2040. Ces valeurs négatives sont « contrebalancées » dans la formule des facteurs de caractérisation par la prise en compte des stocks anthropogéniques.

3) Mise à jour des stocks anthropogéniques

Dans la publication de Schneider et al., la détermination du stock anthropogénique est basée sur la quantité extractible théorique dans la société et est calculée au moyen du taux d'extraction cumulé depuis le début des enregistrements (vers 1903) jusqu'en 2010 sur la base des données du U.S. Geological Survey, et considérant un taux de dissipation par défaut de 20 % (Schneider, Berger, & Finkbeiner, 2011).

Les stocks anthropogéniques calculés dans la publication Schneider et al. 2015 ont été conservés pour l'horizon 2015. Les stocks anthropogéniques pour les horizons 2025 à 2060 ont été mis à jour par la formule suivante :

$$\begin{aligned} \text{Stock Anthr.}_i (\text{Année } B) \\ = \text{Stock Anthr.}_i (\text{Année } A) + \text{Taux d'extraction annuel (Année } A) \\ \times \text{Pas de temps (Année } A; \text{Année } B) \times \text{Taux de dissipation} \end{aligned}$$

Où :

Année A < Année B

i : la ressource

taux de dissipation = 20%

Tableau 5 : Stocks anthropogéniques selon les différents horizons de temps

Ressource	2015 (conservé de Schneider et al 2015) en tonnes	2025	2040	2060
Aluminium	8,34E+08	3,66E+10	1,01E+11	2,14E+11
Cadmium	8,57E+05	5,72E+07	1,30E+08	2,42E+08
Chromium	1,52E+08	1,45E+10	3,54E+10	6,09E+10
Cobalt	1,63E+06	1,76E+06	2,00E+06	2,32E+06
Cuivre	4,47E+08	1,66E+10	4,21E+10	8,07E+10
Fer	4,95E+10	8,45E+11	2,00E+12	3,55E+12
Plomb	1,80E+08	1,56E+09	3,47E+09	6,39E+09
Lithium	8,20E+05	1,95E+07	2,34E+08	9,84E+08
Manganèse	4,37E+08	2,80E+09	9,24E+09	2,56E+10
Molybdène	4,87E+06	2,74E+08	6,98E+08	1,35E+09
Nickel	4,06E+07	1,02E+10	2,49E+10	4,32E+10
Rhenium	8,05E+02	8,59E+02	9,58E+02	1,11E+03
Vanadium	1,20E+06	1,21E+06	1,24E+06	1,28E+06
Zinc	3,45E+08	2,62E+09	5,72E+09	1,05E+10

4) Mise à jour des facteurs de caractérisation

Les facteurs de caractérisation de la publication Schneider et al. 2015 sont basés sur les taux d'extraction de 2010 (USGS, 2010), cette méthode sera dénommée *AADP 2015* dans la suite du rapport. Pour chaque horizon de temps, les facteurs de caractérisation ont été mis à jour à partir des

calculs présentés précédemment. Nous testons ici une méthode par horizon de temps, soit la construction de 4 méthodes AADP mises à jour :

- AADP mise à jour des facteurs de caractérisation de 14 ressources⁸ à horizon 2015, dénommée **AADP updated 2015** dans la suite du rapport
- AADP mise à jour des facteurs de caractérisation de 14 ressources à horizon 2025, dénommée **AADP updated 2025** dans la suite du rapport
- AADP mise à jour des facteurs de caractérisation de 14 ressources à horizon 2040, dénommée **AADP updated 2040** dans la suite du rapport
- AADP mise à jour des facteurs de caractérisation de 14 ressources à horizon 2060, dénommée **AADP updated 2060** dans la suite du rapport

Les facteurs de caractérisation de 14 ressources ont été mis à jour. Ces 15 ressources ont été retenues pour la mise à jour puisque :

- Elles font partie des ressources les plus consommées aux différents horizons de temps ;
- Les données concernant leurs stocks de ressources ultimement extractibles et leurs stocks anthropogéniques issues de la publication Schneider et al., 2015 sont disponibles.

Tableau 6 : Facteurs de caractérisation utilisés dans l'étude

	ADP CML baseline (ULT reserve)	ADP CML non baseline (reserve base)	AADP (Schneider 2015)	AADP adapté H2015	AADP adapté H2025	AADP adapté H2040	AADP adapté H2060
Aluminium	1,09E-09	2,53E-05	3,00E-10	8,75E-08	8,47E-08	7,85E-08	6,57E-08
Antimony	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00
Arsenic	2,97E-03	3,17E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Barium	6,04E-06	3,37E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Beryllium	1,26E-05	0	0	0	0	0	0
Bismuth	4,11E-02	4,49E+00	8,35E-01	8,35E-01	8,35E-01	8,35E-01	8,35E-01
Boron	4,27E-03	5,28E-03	2,44E-02	2,44E-02	2,44E-02	2,44E-02	2,44E-02
Bromine	4,39E-03	0	0	0	0	0	0
Cadmium	1,57E-01	1,11E+00	3,08E+00	4,50E+03	4,07E-01	4,72E-02	7,12E-03
Cerium	0	0	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05
Chlorine	2,71E-05	0	0	0	0	0	0
Chromium	4,43E-04	1,96E-05	9,03E-05	2,68E-02	2,88E-03	2,05E-04	3,06E-05
Cobalt	1,57E-05	2,56E-02	1,04E-03	7,12E-04	6,60E-04	4,58E-04	2,29E-04
Copper	1,37E-03	2,50E-03	5,41E-04	2,76E-01	1,56E-03	1,51E-04	2,22E-05
Dysprosium	0	0	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05
Erbium	0	0	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05
Europium	0	0	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05
Gadolinium	0	0	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05
Gallium	1,46E-07	0	0	0	0	0	0
Germanium	6,52E-07	1,95E+04	1,84E-04	1,84E-04	1,84E-04	1,84E-04	1,84E-04
Gold et autres	5,20E+01	3,60E+01	1,59E+00	1,59E+00	1,59E+00	1,59E+00	1,59E+00
Helium	0	9,42E-02	0	0	0	0	0
Holmium	0	0	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05
Indium	6,89E-03	5,55E+02	7,48E-01	7,48E-01	7,48E-01	7,48E-01	7,48E-01
Iodine	2,50E-02	2,22E-03	0	0	0	0	0
Iron	5,24E-08	1,66E-06	2,75E-08	8,24E-06	2,35E-05	1,15E-04	1,57E-06
Lanthanum	0	0	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05
Lead	6,34E-03	1,50E-02	4,80E-04	6,79E-02	8,61E-02	3,00E-03	3,51E-04
Lithium	1,15E-05	1,33E-02	2,42E-06	6,83E-04	5,22E-03	4,71E-02	1,06E-02
Lutetium	0	0	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05
Magnesium	2,02E-09	0	0	0	0	0	0

⁸ Facteurs de caractérisation de la méthode Schneider et al. 2011 conservés pour les autres substances

SCENARIOS DE TRANSITION ENERGETIQUES : FORCES ET FAIBLESSES DE L'ACV DANS UNE PERSPECTIVE DE RESSOURCES LIMITEES

Manganese	2,54E-06	2,35E-05	7,57E-05	6,02E-03	1,15E+00	1,10E-03	8,46E-05
Mercury	9,22E-02	2,62E+00	9,34E-01	9,34E-01	9,34E-01	9,34E-01	9,34E-01
Molybdenum	1,78E-02	7,11E-02	6,17E-03	3,38E+00	1,16E-01	9,75E-03	1,37E-03
Neodymium	0	0	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05
Nickel	6,53E-05	4,18E-03	3,03E-05	7,32E-02	3,35E-03	2,71E-04	4,16E-05
Niobium	1,93E-05	6,55E-02	1,05E-03	1,05E-03	1,05E-03	1,05E-03	1,05E-03
Palladium	5,71E-01	9,36E+00	6,93E+00	6,93E+00	6,93E+00	6,93E+00	6,93E+00
Phosphorus	5,52E-06	6,21E-05	0	0	0	0	0
Platinum	2,22E+00	9,09E+00	6,93E+00	6,93E+00	6,93E+00	6,93E+00	6,93E+00
Potassium	1,60E-08	9,00E-06	0	0	0	0	0
Praseodymium	0	0	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05
Rhenium	6,03E-01	3,19E+01	2,54E+03	1,43E+03	1,57E+03	1,55E+03	1,43E+03
Ruthenium	0	0	6,93E+00	6,93E+00	6,93E+00	6,93E+00	6,93E+00
Samarium	0	0	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05
Scandium	0	0	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05
Selenium	1,94E-01	7,35E+00	0	0	0	0	0
Silicon	1,40E-11	0	0	0	0	0	0
Silver	1,18E+00	8,42E+00	2,28E-01	2,28E-01	2,28E-01	2,28E-01	2,28E-01
Sodium	5,50E-08	0	0	0	0	0	0
Strontium	7,07E-07	1,77E-01	6,77E-06	6,77E-06	6,77E-06	6,77E-06	6,77E-06
Sulfur	1,93E-04	3,91E-04	0	0	0	0	0
Tantalum	4,06E-05	1,15E+01	2,52E-03	2,52E-03	2,52E-03	2,52E-03	2,52E-03
Tellurium	4,07E+01	7,21E+00	0	0	0	0	0
Terbium	0	0	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05
Thallium	2,43E-05	2,98E+03	3,77E-05	3,77E-05	3,77E-05	3,77E-05	3,77E-05
Thulium	0	0	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05
Tin	1,62E-02	1,15E-01	1,52E-03	1,52E-03	1,52E-03	1,52E-03	1,52E-03
Titanium	2,79E-08	1,52E-03	9,15E-09	9,15E-09	9,15E-09	9,15E-09	9,15E-09
Tungsten	4,52E-03	2,54E-01	5,51E-02	5,51E-02	5,51E-02	5,51E-02	5,51E-02
Uranium	1,40E-03	6,56E-02	0	0	0	0	0
Vanadium	7,70E-07	4,93E-03	2,40E-05	2,45E-06	1,94E-06	2,21E-06	4,94E-07
Ytterbium	7,70E-07	4,93E-03	2,40E-05	2,45E-06	1,94E-06	2,21E-06	4,94E-07
Yttrium	0	0	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05
Zinc	5,69E-07	8,16E-01	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05	1,19E-05
Zirconium	5,38E-04	3,65E-03	8,60E-05	7,62E-03	8,77E-02	4,82E-03	3,14E-04

Légende :

- En gris : ressources dont le facteur de caractérisation est nul : ressource non caractérisée par la méthode ;
- En bleu : facteurs de caractérisation de la méthode Schneider et al. 2015 conservés pour les méthodes mise à jour ;
- En vert : ressources et facteurs de caractérisation pour lesquels les facteurs de caractérisation de la méthode Schneider et al. 2015 ont été mis à jour tel que présenté précédemment.

6.5. Résumé des différences entre méthodes

Le tableau ci-dessous présente les principales différences entre méthodes dans les données sources pour le calcul des facteurs de caractérisation.

Tableau 7 : Principales différences dans les données sources dans les méthodes de caractérisation de l'impact sur les ressources

	CML-IA baseline, abiotic depletion, ultimate reserve	CML-IA non baseline, abiotic depletion, reserve base	AADP Schneider 2015	AADP mise à jour
Taux d'extraction	USGS 1999 ⁹	USGS 1999	USGS 2013 ¹⁰ , 2014a ¹¹	Scenario IEA 2017 et calculs ACV
Stocks géologiques	USGS 1999	USGS 1999	UNEP 2011 et Rankin 2011 : Volume de la croûte terrestre et concentration	Basé sur AADP Schneider pour 2015 puis mise à jour par horizon de temps
Stock anthropogénique	Non pris en compte	Non pris en compte	USGS 2013, 2014a et facteur de 20%	Basé sur AADP Schneider pour 2015 puis mise à jour par horizon de temps

Les sources de données différentes et notamment les taux d'extraction ou les ressources et réserves peuvent avoir un impact important sur la diversité de résultats. En effet, les estimations font l'objet de révisions constantes à la lumière de changements techniques, de l'évolution des prix et des coûts, et de nouvelles connaissances. Comme le souligne Crowson (Crowson, 2011), les ressources en cuivre ont été estimées à 1,6 milliard de tonnes en 2000 et à plus de 3 milliards de tonnes en 2011.

7. Résultats de l'ACV « test »

7.1. Comparaison du périmètre couvert par l'étude avec les données USGS

Une première analyse cohérence des résultats a été menée dans cette étude en comparant les données modélisées en 2015 avec le scénario ETP et les données d'extraction issues du bureau d'études géologiques des Etats-Unis (USGS). En effet, l'USGS publie chaque année un état de l'art des ressources, réserves et quantités produites pour chaque minéral (USGS, 2015).

Cette première comparaison permet d'évaluer dans quelle mesure l'ACV permet de rendre compte de la consommation de ressources, à une année de référence donnée, à savoir 2015. En effet, les inventaires dans les bases de données ACV permettent d'évaluer la quantité de métal, contenu dans les différents minerais, qui est extrait pour chaque processus de la base de données ecoinvent. La comparaison peut donc être effectuée sur les données d'extraction proposées par l'USGS.

Il est important de rappeler ici que tous les secteurs d'activité n'ont pas été modélisés dans l'ACV : une estimation de la part des quantités mondiales concernées par les trois secteurs modélisés (énergie, transport, bâtiment) a été réalisée. Cette estimation des quantités de matières allouées à nos trois secteurs d'étude n'a été réalisée que sur une sélection de matières premières principales, au vu des données bibliographiques disponibles.

Tableau 8 : Evaluation comparative de la consommation de ressources entre l'étude ACV et les données de l'USGS 2015

	Données de consommation mondiale (USGS, 2015 en Mt)	Part des secteurs couverts dans l'ACV dans la consommation mondiale (USGS, 2015, %)	Part des secteurs couverts dans l'ACV dans la consommation mondiale (USGS, 2015 en Mt)	Données de consommation d'après l'ACV (2015 en Mt)	Part des flux de l'ACV dans les secteurs couverts (%)
Aluminium	58,3	65%	37,9	17,9	47%
Copper	18,7	60%	11,2	8,1	72%

⁹ United States Geological Survey. Commodity Statistics and Information, Statistics and information 1999

¹⁰ USGS (2013) Mineral commodity summaries. U.S. Geological Survey, Department of the Interior, Reston

¹¹ USGS (2014a) Mineral commodity summaries. U.S. Geological Survey, Department of the Interior, Reston

Iron ore	3320	68%	2258	397,7	18%
Lithium	0,033	25%	0,008	0,009	117%
Zinc	13,4	61%	8,2	1,1	14%
Nickel	2,5	68%	1,7	5,1	298%
Lead	4,7	80%	3,8	0,7	18%

A titre d'exemple, pour l'Aluminium, la consommation mondiale selon les données de l'USGS (2015) est de 58,3 Mt. Or, l'aluminium est utilisé dans d'autres secteurs que les trois secteurs modélisés (énergie, transport, bâtiment). Les trois secteurs représentent 65% de la consommation mondiale. La consommation d'aluminium couverte par l'étude ACV représente ainsi seulement 37,9 Mt et non 58,3 Mt. Les résultats de l'étude donnant une consommation de 17,9 Mt, les flux de l'ACV ne représentent que 47% des secteurs couverts.

La modélisation des flux par l'« ACV test » semble relativement correspondre aux quantités USGS pour le cuivre et le lithium mais ce n'est pas le cas pour d'autres ressources minérales. Quelques éléments d'explication peuvent être apportés :

- Aluminium : les données de l'USGS sont plus importantes que celles modélisées en ACV car, dans ce cas précis, l'USGS donne les données de consommation de métaux (primaire et secondaire) et non la quantité d'aluminium primaire extrait à partir de la bauxite. Il est donc logique que les données issues de l'ACV soient significativement inférieures à la valeur de l'USGS.
- Minerai de fer : la part de fer (et d'acier) dans la construction et les infrastructures est importante (autour de 50% de la consommation mondiale). Etant donné que les infrastructures additionnelles (notamment ferroviaires) n'ont pas été modélisées dans l'ACV test, c'est un des facteurs qui explique le faible taux de couverture de l'ACV test. Par ailleurs une surestimation par rapport à la réalité de la part d'acier recyclé dans les différents marchés finaux pourrait aussi expliquer l'écart entre le résultat de la modélisation ACV test et les statistiques USGS.
- Nickel : la tendance est complètement différente pour cet élément. Il apparaît que la modélisation ACV évalue une donnée de consommation de métal primaire beaucoup plus importante que celle fournie par l'USGS. Ceci pourrait peut-être partiellement s'expliquer par le fait que dans la base de donnéesecoinvent, l'utilisation de cuivre entraîne l'extraction de nickel en tant que sous-produit d'extraction, ce qui entraîne un double-comptage. Il faudrait une étude approfondie des différentes données d'inventaire pour quantifier plus précisément le double-comptage potentiel.

Il faut noter que la modélisation par l'ACV test prend souvent en compte à travers les inventaires une part de métal recyclé, qui, si elle est différente de celle constatée réellement sur le marché, peut aussi être source d'écart entre les données extraites d'après l'USGS et la modélisation par l'ACV test.

7.2. Evolution de la consommation en 2025, 2040 et 2060

La deuxième évaluation réalisée consiste à compiler les besoins en matières premières pour pouvoir mettre en œuvre le scénario ETP, par année du scénario étudiée. Ainsi, la modélisation de l'évolution des flux de matières consommées à horizon 2025, 2040 et 2060 par rapport à l'année de référence 2015 met en évidence plusieurs groupes de matières premières :

- o Le lithium et le néodyme, pour lesquels la demande explose : 27 fois plus de lithium demandé en 2060 par rapport à 2015, 309 fois plus de néodyme ;
- o Le manganèse, le cobalt et l'or, pour lesquels la demande entre 2015 et 2060 augmente très fortement (facteur 3,2 pour le manganèse à facteur 4,8 pour le cobalt) ;
- o L'aluminium, le cuivre, l'argent et le molybdène, dont la demande connaît une croissance significative (entre 0 et 100% à horizon 2060) ;
- o Le fer, le chrome et le nickel pour lesquels la demande diminue entre 2015 et 2060. Comme nous le verrons par la suite, ce résultat contre-intuitif est expliqué par la baisse à long-terme de la demande de construction de bâtiment, et donc de consommation d'acier associée et de ses différents alliages.

Tableau 9 : Consommation en 2015 et différence de consommation par matière première entre deux années du scénario

	Consommation en 2015 d'après l'ACV (Mt)	Delta de consommation annuelle entre 2015 et 2025 (%)	Delta de consommation entre 2015 et 2040 (%)	Delta de consommation entre 2015 et 2060 (%)
Aluminium	17,9	19%	36%	85%
Cuivre	8,1	5%	19%	52%
Fer	397,7	-3%	-2%	2%
Chrome	7,2	-3%	-11%	1%
Lithium	0,009	662%	1903%	2646%
Zinc	1,1	-9%	4%	9%
Manganèse	1,2	82%	246%	329%
Nickel	5,1	-3%	-9%	-4%
Plomb	0,7	-8%	5%	354%
Néodyme	0,001	385%	1154%	30872%

De manière générale, une forte hausse des besoins en matières premières est observée au global, sur la période étudiée. Pour le groupe des « grands métaux », la consommation est à la hausse tout au long du scénario, hormis le fer. Pour le groupe des « petits métaux » et des métaux précieux, l'évolution de la consommation la plus importante concerne le néodyme, avec une consommation de 37 000 tonnes en 2060 contre 112 tonnes en 2015. Les analyses suivantes vont détailler l'origine de la consommation de ressources par secteur et technologies.

7.3. Analyse de la contribution des différents secteurs (et technologies) sur la consommation de métaux : effet volume et effet transition

7.3.1. Contribution des différents secteurs à la consommation de ressources

Comme indiqué dans le périmètre de l'étude, trois grands secteurs ont été modélisés dans cette ACV test, à savoir :

- Le secteur de la production d'électricité ;
- Le secteur transport (passager et fret) ;
- Le secteur du bâtiment.

Dans le secteur du bâtiment, il n'y a qu'une modification marginale du mix de matériaux utilisés par m2 supplémentaire construit en 2025, 2040 et 2060. Comme indiqué précédemment, les données à disposition viennent d'une publication de Heeren et al. (2018), appliqué au cas particulier de la Suisse. Les études de l'AIE, prévues courant 2019 sur le sujet de l'évolution des matériaux dans le bâtiment, devraient amener des éléments complémentaires à ce sujet. Par contre, pour le secteur de la production d'électricité et du transport, il y a une réelle transformation du mix de technologies.

Tableau 10 : Contribution des principaux macro-secteurs au delta de consommation entre 2015 et 2040 en millions de tonnes

	Delta consommation (Mt) 2040-2015	Production d'électricité	Transport	Bâtiment
Aluminium	6,2	23%	122%	-46%
Copper	1,6	17%	189%	-106%
Iron	-8,8	124%	525%	-749%
Lead	0,0	113%	120%	-133%
Lithium	0,2	0%	100%	0%
Manganese	2,9	2%	98%	0%
Nickel	-0,5	20%	91%	-211%
Zinc	0,0	160%	85%	-145%

Cobalt	0,0	38%	108%	-46%
Indium	0,0	689%	-539%	-50%
Neodymium	0,0	3%	97%	0%
Silver	0,0	26%	113%	-38%

Tableau 11 : Contribution des principaux macro-secteurs au delta de consommation entre 2015 et 2040 en kilo tonnes

	Delta consommation (kt) 2040-2015	Production d'électricité	Transport	Bâtiment
Aluminium	6 244,07	23%	122%	-46%
Copper	1 571,78	17%	189%	-106%
Iron	-8 771,03	124%	525%	-749%
Lead	37,70	113%	120%	-133%
Lithium	178,18	0%	100%	0%
Manganese	2 910,37	2%	98%	0%
Nickel	-480,20	20%	91%	-211%
Zinc	46,21	160%	85%	-145%
Cobalt	0,01	38%	108%	-46%
Indium	0,01	689%	-539%	-50%
Neodymium	12,90	3%	97%	0%
Silver	1,26	26%	113%	-38%

La contribution négative du secteur du bâtiment est due à un effet volume (quantité plus faible de m2 construits en 2040 qu'en 2015). La contribution du macro-secteur du transport est principalement positive, ainsi que du secteur production d'électricité.

Certaines ressources sont principalement stimulées par un secteur spécifique (lithium, manganèse, cuivre, aluminium par le macro-secteur Transport et notamment les motorisations électriques, cobalt et néodyme par le secteur Power pour les installations d'électricité renouvelable), tandis que d'autres sont multi-sectorielles (argent, plomb).

Cette analyse se focalise sur l'écart de consommation annuelle entre 2040 et 2015 et comporte nécessairement des effets de « bord » liés aux hypothèses spécifiques du scénario AIE concernant ces années. Elle est complétée par une analyse cumulée des consommations annuelles entre 2015 et 2040 afin d'évaluer l'impact cumulé de la transition énergétique sur la consommation des matières premières minérales. Le delta cumulé représente ainsi la consommation de matières supplémentaire entre 2040 et 2015 en comparaison à un scénario où on continuerait de consommer autant qu'en 2015. On observe ainsi que la hausse des consommations de matériaux est essentiellement due au secteur des transports tandis qu'à l'inverse le secteur du bâtiment implique une baisse de la consommation.

Tableau 12 : Delta cumulé 2040 par rapport à 2015

	Delta cumulé 2040 vs. 2015 (Mt)	Production d'électricité	Transport	Building
Aluminium	107,21	11,05	47,38	-19,67
Cuivre	10,76	2,28	19,98	-11,45
Fer	-94,45	74,53	339,71	-452,01
Chrome	-5,48	0,95	3,82	-10,08

Lithium	1,18	0,00	1,18	0,00
Zinc	0,62	0,55	0,54	-0,49
Manganèse	19,30	0,33	19,11	-0,02
Nickel	-3,34	0,68	3,13	-6,97
Plomb	0,43	0,32	0,46	-0,36

7.3.2. La consommation de ressources : un effet volume ou un effet transition ?

Il s'agit dans cette partie de l'analyse d'essayer de déterminer quelle part de la consommation additionnelle de ressources provient de la transition (« **effet transition** »), c'est-à-dire de la modification du mix de technologies (secteur production électrique ou secteur transport), par rapport à un **effet volume**, c'est-à-dire un effet d'augmentation de la consommation de matière de par l'augmentation des besoins finaux (consommation d'énergie, parc de véhicules individuels, ...).

On peut distinguer l'effet transition de l'effet volume dans le delta cumulé de consommation présenté précédemment. Cela nous permet alors d'observer l'impact de la transition sur la consommation globale de matériaux. On observe ainsi que la hausse de consommation d'aluminium, de manganèse et de lithium est principalement due à un effet transition. Pour le cuivre, on observe que l'effet transition est minoré par l'effet volume, négatif. Enfin, pour les matériaux comme le fer, le chrome, le zinc, le nickel ou le plomb, l'effet transition est négatif.

Tableau 13 : Effet volume et effet transition du delta cumulé entre 2015 et 2040

	Delta cumulé 2040 vs. 2015 (Mt)	Production d'électricité	Transport	Building	Effet volume (Mt)	Effet transition (Mt)
Aluminium	107,21	11,05	47,38	-19,67	1,75	37,01
Cuivre	10,76	2,28	19,98	-11,45	-6,28	17,08
Fer	-94,45	74,53	339,71	-452,01	87,01	-124,78
Chrome	-5,48	0,95	3,82	-10,08	-4,32	-0,99
Lithium	1,18	0,00	1,18	0,00	0,01	1,17
Zinc	0,62	0,55	0,54	-0,49	3,12	-2,52
Manganèse	19,30	0,33	19,11	-0,02	3,38	16,04
Nickel	-3,34	0,68	3,13	-6,97	-2,54	-0,65
Plomb	0,43	0,32	0,46	-0,36	1,67	-1,26

Afin d'affiner l'étude, cette analyse sera menée sur les macro-secteurs du Transport et de la production d'Electricité car le scénario 2°C utilisé pour ce test ne décrit pas d'effet « mix technologies » dans le macro-secteur du Bâtiment qui puisse être pris en compte.

- **Secteur de la production d'électricité**

Le scénario ETP permet de calculer la puissance additionnelle installée en 2040. Sur la base des données de 2015, il est possible de construire la puissance additionnelle installée théorique en 2040, en considérant une absence d'effet transition, c'est-à-dire en considérant que la part des différentes technologies dans les infrastructures installées est la même qu'en 2015.

Les données obtenues sont présentées dans le tableau suivant. La puissance additionnelle théorique correspond ainsi à la puissance additionnelle qui aurait été installée durant l'année 2040 si le mix (en puissance installée) était resté le même qu'en 2015.

Tableau 14 : Comparaison des données du scénario avec un mix de puissance installée sans transition (unité : GW)

	Puissance additionnelle 2015	Part de chaque moyen de production dans la puissance additionnelle 2015	Puissance additionnelle théorique 2040 (même mix qu'en 2015)	Puissance additionnelle ETP 2040 (mix 2040)	Variation entre $P_{THEORIQUE\ ET}$ $P_{ETP2040}$
OIL + COAL	3,60	1%	3,46	0	-100%
GAS POWERPLANT	30,40	12%	29,21	2,13	-93%
NUCLEAIRE	13,10	5%	12,59	20,4	62%
BIOMASSE	16,00	6%	15,38	15,6	1%
HYDROELECTRIQUE	36,90	15%	35,46	27,87	-21%
GEOTHERMAL	2,00	1%	1,92	3,6	87%
EOLIEN ONSHORE	70,27	28%	67,53	86,13	28%
EOLIEN OFFSHORE	4,82	2%	4,63	13,6	194%
PV SOLAIRE	64,27	26%	61,76	97,93	59%
PV CSP	5,30	2%	5,09	23,13	354%
TOTAL PUISSANCE (GW)	246,66		237,03	290,39	23%
TOTAL ENERGIE (TWh)	510		490,20	490,20	

Le scénario ETP prévoit ainsi une puissance additionnelle installée supérieure de 23% à la puissance additionnelle théorique, et ce pour fournir la même énergie que dans le cas théorique. Cette augmentation est due à l'effet transition. En effet, pour fournir une même énergie avec les technologies « de transition », il est nécessaire d'avoir une puissance installée supérieure, du fait du facteur de charge de ces énergies, inférieur aux technologies « conventionnelles ». On observe ainsi une diminution forte de la puissance installée du gaz, ainsi que de l'hydroélectricité, compensée en partie par le nucléaire, mais surtout par les énergies renouvelables intermittentes que sont l'éolien et le photovoltaïque. Cela suppose ainsi une puissance installée supérieure.

Tableau 15 : Comparaison de l'effet volume et de l'effet transition pour le secteur de la production d'électricité entre 2015 et 2040

	Delta consommation 2040 vs. 2015 (Mt)	Effet volume (Mt)	Effet transition (Mt)
Aluminium	1,45	-0,1	1,6
Cuivre	0,27	-0,05	0,32
Fer	10,87	-1,94	12,81
Chrome	0,14	-0,03	0,17
Lithium	1E-07	-1E-08	1E-07
Zinc	0,07	-0,01	0,08
Manganèse	0,04	-0,01	0,06
Nickel	0,10	-0,02	0,12

SCENARIOS DE TRANSITION ENERGETIQUES : FORCES ET FAIBLESSES DE L'ACV DANS UNE PERSPECTIVE DE RESSOURCES LIMITEES

Plomb	0,04	0,00	0,05
-------	------	------	------

Ainsi, comme on le constate, l'effet volume est systématiquement négatif (ce qui est logique car la puissance installée diminue à modalités technologiques identiques) tandis que l'effet transition est positif ou négatif suivant les ressources minérales considérées.

Si l'on décompose le delta de consommation 2015-2040 (effet volume et effet transition cumulés) par technologie, on voit apparaître principalement la contribution positive de la technologie PV ainsi que la contribution négative de la technologie hydro-électrique, résultant directement des hypothèses de modification des capacités annuelles installées.

	Delta de consommation 2040-2015 de matières premières du secteur Power (Mt)	Centrales fuel et charbon	Eolien onshore	Eolien offshore	PV Solaire	PV CSP	Nucléaire	Centrale gaz	Biomasse	Hydroélectricité	Géothermie	CCS
Aluminium	1,45	-7%	2%	1%	94%	0%	0%	9%	0%	-1%	0%	1%
Chromium	0,14	10%	30%	16%	28%	0%	3%	7%	-1%	-47%	16%	40%
Copper	0,27	-21%	10%	5%	69%	0%	0%	36%	0%	-11%	3%	7%
Iron	10,87	-44%	13%	7%	14%	0%	0%	10%	0%	-15%	30%	85%
Lead	0,04	6%	2%	1%	76%	0%	0%	9%	0%	-2%	2%	6%
Lithium	0,00	82%	0%	0%	-3%	0%	0%	1%	0%	-1%	1%	20%
Manganese	0,04	-117%	33%	17%	76%	0%	0%	11%	-1%	-42%	34%	88%
Nickel	0,10	-8%	26%	14%	27%	0%	2%	10%	-1%	-41%	20%	52%
Zinc	0,07	7%	2%	1%	76%	0%	0%	8%	0%	-2%	2%	6%
Cobalt	0,00	71%	2%	1%	16%	0%	0%	8%	0%	-2%	2%	3%
Indium	0,00	7%	1%	0%	56%	0%	27%	3%	0%	-1%	1%	5%
Neodymium	0,00	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Silver	0,00	-1%	2%	1%	18%	50%	22%	9%	0%	-2%	1%	1%

On peut effectuer le même travail sur la part du delta dû à « l'effet transition », qui permet de voir apparaître indépendamment de l'effet volume, les basculements technologiques.

	Delta de consommation 2040-2015 effet transition secteur Power (Mt)	Centrales fuel et charbon	Centrale gaz	Nucléaire	Biomasse	Hydroélectricité	Géothermie	Eolien onshore	Eolien offshore	PV Solaire	PV CSP	CCS
Aluminium	1,60	-2%	8%	0%	0%	-1%	0%	3%	1%	90%	0%	0%
Copper	0,34	-14%	31%	0%	0%	-8%	3%	10%	5%	67%	0%	6%
Chromium	0,18	15%	5%	2%	0%	-32%	13%	28%	13%	24%	0%	32%
Iron	12,84	-28%	9%	0%	0%	-11%	26%	12%	6%	13%	0%	73%
Neodymium	0,02	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%
Lithium	0,00	80%	1%	0%	0%	-1%	1%	0%	0%	1%	0%	18%
Zinc	0,08	8%	8%	0%	0%	-2%	2%	2%	1%	75%	0%	5%
Manganese	0,16	-79%	9%	0%	0%	-27%	27%	29%	14%	60%	0%	67%
Nickel	0,15	1%	8%	2%	0%	-28%	16%	24%	11%	23%	0%	42%
Plomb	0,05	8%	9%	0%	0%	-2%	2%	3%	1%	75%	0%	5%

Cette analyse se focalise sur l'écart de consommation annuelle entre 2040 et 2015. Elle est complétée par une analyse cumulée des consommations annuelles entre 2015 et 2040 afin d'évaluer l'impact cumulé de la transition énergétique sur la consommation des matières premières minérales. Le tableau ci-dessous présente la part de l'effet volume et de l'effet transition dans le delta de consommation cumulé entre 2040 et 2015.

Tableau 16 : Part de l'effet transition et de l'effet volume du delta cumulé 2040 vs 2015 pour le secteur Power

	Delta cumulé 2040 vs. 2015 (Mt)	Effet volume (Mt)	Effet transition (Mt)
Aluminium	11,04	-1,08	12,12
Cuivre	2,42	-0,34	2,75
Fer	74,46	-14,89	89,35
Chrome	1,01	-0,26	1,28
Lithium	0,00	0,00	0,00
Zinc	0,55	-0,04	0,59
Manganèse	1,08	-0,11	1,19
Nickel	0,91	-0,18	1,09
Plomb	0,32	-0,03	0,35

On peut alors analyser la contribution de chaque technologie à l'effet transition du delta cumulé.

Tableau 17 : Contribution de chaque technologie à l'effet transition du delta cumulé pour le secteur Power

	Delta cumulé 2040-2015 effet transition secteur Power (Mt)	Centrales fuel et charbon	Centrale gaz	Nucléaire	Biomasse	Hydroélectricité	Géothermie	Eolien onshore	Eolien offshore	PV Solaire	PV CSP	CCS
Aluminium	12,12	-2%	8%	0%	0%	-1%	0%	2%	1%	91%	0%	0%
Copper	2,75	-12%	27%	0%	0%	-7%	3%	9%	4%	66%	0%	10%
Chromium	1,28	10%	5%	2%	0%	-32%	14%	28%	13%	24%	0%	35%
Iron	89,35	-33%	10%	0%	0%	-12%	28%	13%	6%	14%	0%	73%
Neodymium	0,10	0%	0%	0%	0%	0%	0%	84%	16%	0%	0%	0%
Lithium	0,00	70%	1%	0%	0%	-1%	2%	0%	0%	9%	0%	18%
Zinc	0,59	7%	8%	0%	0%	-2%	2%	2%	1%	77%	0%	5%
Manganese	1,19	-27%	3%	0%	0%	-10%	10%	11%	5%	22%	0%	86%
Nickel	1,09	-2%	7%	2%	0%	-23%	14%	20%	9%	20%	0%	54%
Plomb	0,35	6%	9%	0%	0%	-2%	2%	3%	1%	77%	0%	5%

L'analyse du cumulé confirme les résultats de l'analyse 2040 vs 2015. On voit apparaître principalement la contribution positive du PV solaire et de l'éolien et la contribution négative de l'hydroélectricité.

Note : les batteries éventuellement associées à l'augmentation de la pénétration de l'électricité renouvelable ne sont pas ici chiffrées car non disponibles dans le scénario AIE 2DS.

- Secteur Transport

Ce type d'analyse a également été menée sur le secteur du Transport afin de déterminer si la consommation de matières du secteur provenait d'un « effet volume » ou d'un « effet transition ». On a ainsi séparé l'effet accroissement des volumes de l'effet transition (modification du mix technologique). Au sein du secteur transport, on distingue le secteur automobile et le reste du transport comprenant le fret routier, le fret ferroviaire ainsi que le transport de passager par le rail.

Secteur automobile

A noter que dans le cas du secteur automobile, à l'effet d'évolution du mix de technologies vers les technologies hybrides et électriques a été aussi rajouté l'effet substitution acier par aluminium.

Tableau 18 : Comparaison de l'effet volume et de l'effet transition pour les véhicules automobiles entre 2015 et 2040

	Véhicules automobiles		
	Delta consommation 2040 vs. 2015 (Mt)	Effet volume (Mt)	Effet transition (Mt)
Aluminium	6,0	1,6	4,4
Cuivre	2,4	0,4	2,0
Fer	1,5	30,7	-29,2
Chrome	0,1	0,4	-0,3
Lithium	0,2	0,0	0,2
Zinc	-0,1	0,4	-0,4
Manganèse	2,3	0,2	2,1
Nickel	0,1	0,3	-0,2
Plomb	0,0	0,2	-0,2

Il en ressort que l'effet transition est principalement responsable du delta de consommation pour l'aluminium (effet allègement), le cuivre (câblage électrique des véhicules), le lithium (batteries) ainsi que pour le manganèse (batteries).

Si l'on décompose le delta de consommation 2015-2040 (effet volume et effet transition cumulés) par technologie, on voit apparaître logiquement le basculement des véhicules thermiques vers les véhicules électriques comme principal facteur d'évolution des consommations.

Tableau 19 : Contribution de chaque technologie au delta de consommation pour le secteur Automobile

	Delta de consommation 2040-2015 de matières premières du secteur Automobile (Mt)	Véhicules légers - Essence et gaz naturel	Véhicules légers - Diesel	Véhicules légers - Hybrides	Véhicules légers - Electriques rechargeables	Véhicules légers - Pile à combustible	Point de recharge - Véhicules électriques
Aluminium	6,0	-22%	-8%	40%	87%	2%	0%
Chromium	0,1	-294%	-95%	136%	330%	22%	1%

Copper	2,4	-15%	-5%	30%	87%	1%	2%
Iron	1,5	-1905%	-608%	792%	1754%	67%	0%
Lead	-0,01	-1250%	-459%	698%	884%	18%	9%
Lithium	0,2	0%	0%	28%	72%	0%	0%
Manganese	2,3	-8%	-3%	31%	79%	0%	0%
Nickel	0,1	-243%	-79%	121%	284%	17%	1%
Zinc	-0,1	-517%	-190%	276%	321%	7%	3%

Tableau 20 : Contribution des différentes technologies à la part du delta de consommation due à l'effet transition entre 2040 et 2015

	Delta de consommation 2040-2015 effet transition du secteur Automobile (Mt)	Véhicules légers - Essence et gaz naturel	Véhicules légers - Diesel	Véhicules légers - Hybrides	Véhicules légers - Electriques rechargeables	Véhicules légers - Pile à combustible	Point de recharge - Véhicules électriques
Aluminium	4,4	-35%	-42%	55%	119%	3%	0%
Chromium	-0,3	-156%	-162%	59%	148%	10%	0%
Copper	2,0	-21%	-22%	35%	104%	1%	2%
Iron	-29,2	-114%	-117%	39%	89%	3%	0%
Lead	-0,23	-90%	-107%	42%	54%	1%	1%
Lithium	0,2	0%	0%	27%	73%	0%	0%
Manganese	2,1	-10%	-11%	33%	87%	0%	0%
Nickel	-0,2	-170%	-178%	69%	168%	10%	1%
Zinc	0,0	-152%	-153%	55%	145%	5%	0%

Cette analyse se focalise sur l'écart de consommation annuelle entre 2040 et 2015. Elle est complétée par une analyse cumulée des consommations annuelles entre 2015 et 2040 afin d'évaluer l'impact cumulé de la transition énergétique sur la consommation des matières premières minérales. Le tableau ci-dessous présente la part de l'effet volume et de l'effet transition dans le delta de consommation cumulé entre 2040 et 2015 pour le secteur automobile.

Tableau 21 : Comparaison de l'effet volume et de l'effet transition du delta cumulé pour le secteur Automobile

	Delta cumulé 2040 vs. 2015 (Mt)	Effet volume (Mt)	Effet transition (Mt)
Aluminium	35,8	12,7	23,1
Cuivre	15,8	3,2	12,6
Fer	28,5	238,5	-210,0
Chrome	1,1	3,4	-2,3
Lithium	1,0	0,0	1,0

Zinc	-0,2	3,0	-3,2
Manganèse	15,2	1,7	13,5
Nickel	1,0	2,6	-1,6
Plomb	0,0	1,7	-1,7

On observe ainsi un effet transition très important du fait de l'allègement des véhicules via la substitution de l'acier par de l'aluminium, notamment, ou encore pour le cuivre ou le manganèse du fait du basculement vers les technologies hybrides et électriques. On peut en effet analyser la contribution de chaque technologie au delta cumulé de l'effet transition.

Tableau 22 : Contribution de chaque technologie du secteur Automobile à l'effet transition du delta cumulé

	Delta cumulé 2040-2015 effet transition du secteur Automobile (Mt)	Véhicules légers - Essence et gaz naturel	Véhicules légers - Diesel	Véhicules légers - Hybrides	Véhicules légers - Electriques rechargeables	Véhicules légers - Pile à combustible	Point de recharge - Véhicules électriques
Aluminium	23,1	-56%	-62%	66%	148%	4%	0%
Chromium	-2,26	-135%	-155%	51%	130%	9%	0%
Copper	12,6	-21%	-25%	36%	107%	1%	2%
Iron	-210,0	-102%	-117%	35%	81%	3%	0%
Lead	-1,66	-81%	-106%	37%	49%	1%	1%
Lithium	1,0	0%	0%	27%	73%	0%	0%
Manganese	13,5	-10%	-12%	33%	88%	0%	0%
Nickel	-1,6	-145%	-169%	59%	145%	9%	1%
Zinc	-0,2	-132%	-146%	47%	127%	4%	0%

On voit alors clairement apparaître le basculement technologique, les principaux contributeurs étant les véhicules électriques et hybrides tandis qu'on note une baisse forte de la contribution des véhicules essence et gaz naturel ainsi que des véhicules diesels. La substitution de l'acier par l'aluminium de manière progressive apparaît ici, on observe une chute importante de la consommation de fer et une hausse de la consommation d'aluminium.

Secteur Autre transport

Le reste du secteur transport est le principal contributeur au delta global du secteur transport, notamment pour le fer. Afin de déterminer si cette augmentation est due à un « effet volume » ou un « effet transition », une analyse par technologie a été menée.

Tableau 23 : Contribution des différentes technologies au delta de consommation entre 2040 et 2015

	Delta consommation 2040 vs 2015 (Mt)	Fret routier - Véhicules thermiques	Fret routier - Véhicules hybrides	Fret routier - Véhicules électriques	Ferroviaire (passager)	Ferroviaire (fret)
Aluminium	1,65	-50%	81%	8%	18%	45%
Chromium	0,40	-20%	29%	3%	11%	78%
Copper	0,60	-31%	81%	8%	10%	31%

Iron	44,57	-57%	75%	7%	15%	61%
Lead	0,06	-118%	172%	16%	9%	21%
Lithium	0,02	0%	89%	11%	0%	0%
Manganese	0,58	-8%	59%	7%	6%	37%
Nickel	0,31	-23%	34%	3%	13%	73%
Zinc	0,10	-124%	177%	16%	9%	22%

On voit apparaître ci-dessus que le secteur ferroviaire présente une contribution positive importante (76% pour le fer). Cette hausse de consommation matière est ici uniquement due à un effet volume, aucune modification de « mix » n'ayant été effectuée sur ce secteur. On observe de la même manière que sur le secteur automobile un basculement des poids lourds thermiques vers les poids lourds hybrides.

Tableau 24 : Comparaison de l'effet volume et de l'effet transition pour le fret routier entre 2015 et 2040

	Fret routier		
	Delta consommation 2040 vs. 2015 (Mt/an ?)	Effet volume (Mt)	Effet transition (Mt)
Aluminium	0,6	0,4	0,3
Cuivre	0,4	0,1	0,3
Fer	10,8	11,3	-0,5
Chrome	0,0	0,0	0,0
Lithium	0,0	0,0	0,0
Zinc	0,1	0,1	0,0
Manganèse	0,3	0,0	0,3
Nickel	0,0	0,0	0,0
Plomb	0,0	0,0	0,0

On peut alors analyser la contribution de chaque technologie au delta de consommation de l'effet transition. On voit alors apparaître la contribution du basculement des véhicules thermiques vers les véhicules hybrides et électriques. Si la consommation de l'aluminium est ainsi essentiellement due au basculement vers les véhicules hybrides, on remarque que pour le cuivre ou encore le manganèse, ce sont les véhicules électriques qui participent le plus à l'augmentation de la consommation matière.

Tableau 25 : Contribution de chaque technologie à l'effet transition du delta de consommation 2040-2015 du secteur fret

	Delta de consommation 2040-2015 de l'effet transition du secteur fret (Mt)	Fret routier - Véhicules thermiques	Fret routier - Véhicules hybrides	Fret routier - Véhicules électriques
Aluminium	0,3	-473%	423%	149%
Chromium	0,0	-1578%	1414%	265%
Copper	0,3	-99%	88%	110%
Iron	-0,5	-7143%	6398%	646%
Lead	0,01	-1183%	1058%	225%

Lithium	0,0	0%	0%	100%
Manganese	0,3	-23%	20%	102%
Nickel	0,0	-962%	862%	200%
Zinc	0,0	-122%	110%	113%

Cette analyse se focalise sur l'écart de consommation annuelle entre 2040 et 2015. Elle est complétée par une analyse cumulée des consommations annuelles entre 2015 et 2040 afin d'évaluer l'impact cumulé de la transition énergétique sur la consommation des matières premières minérales. Le tableau ci-dessous présente la part de l'effet volume et de l'effet transition dans le delta de consommation cumulé entre 2040 et 2015 pour le secteur « autre transport ».

Tableau 26 : Delta cumulé 2040-2015 et part de l'effet volume et de l'effet transition pour le secteur Autre Transport

	Autre transport		
	Delta cumulé 2040 vs. 2015 (Mt)	Effet volume (Mt)	Effet transition (Mt)
Aluminium	11,6	9,8	1,8
Cuivre	4,2	2,3	1,9
Fer	311,2	315,1	-3,9
Chrome	2,7	2,6	0,1
Lithium	0,1	0,0	0,1
Zinc	0,8	0,7	0,1
Manganèse	3,9	1,8	2,2
Nickel	2,1	2,0	0,1
Plomb	0,5	0,4	0,1

On remarque ainsi un effet volume prépondérant, notamment pour le fer, du fait de la consommation importante du secteur ferroviaire (Même si les infrastructures n'ont pas été considérées).

L'analyse de la contribution des technologies au delta cumulé de l'effet transition, soit des différentes technologies de fret routier, l'impact du ferroviaire étant uniquement un effet volume, est présenté ci-dessous.

Tableau 27 : Contribution des différentes technologies à l'effet transition du delta cumulé 2040-2015 du secteur fret

	Delta cumulé 2040-2015 de l'effet transition du secteur transport (Mt)	Fret routier - Véhicules thermiques	Fret routier - Véhicules hybrides	Fret routier - Véhicules électriques
Aluminium	1,8	-477%	417%	160%
Chromium	0,05	-1612%	1427%	284%
Copper	1,9	-99%	81%	118%
Iron	-3,9	-6666%	5939%	627%
Lead	0,06	-1199%	1059%	240%

Lithium	0,1	0%	-7%	107%
Manganese	2,2	-23%	13%	110%
Nickel	0,1	-976%	861%	214%
Zinc	0,0	-123%	102%	121%

7.4. Impact sur l'épuisement des ressources du scénario ETP 2017 (2DS)

Comme présenté au paragraphe II-6, quatre méthodes de caractérisation ont été comparées pour chaque horizon de temps.

7.4.1. Analyse des facteurs de caractérisation (FC)

Le graphique ci-dessous présente les facteurs de caractérisation avec les méthodes AADP. Ce graphique est réalisé sur la base d'une échelle logarithmique ($\log_{10}$) afin de permettre une meilleure visualisation graphique puisqu'elle est particulièrement adaptée pour rendre compte des ordres de grandeur. Les valeurs des facteurs de caractérisation **en kg Sb_{eq}/kg** sont présentées sous le tableau.

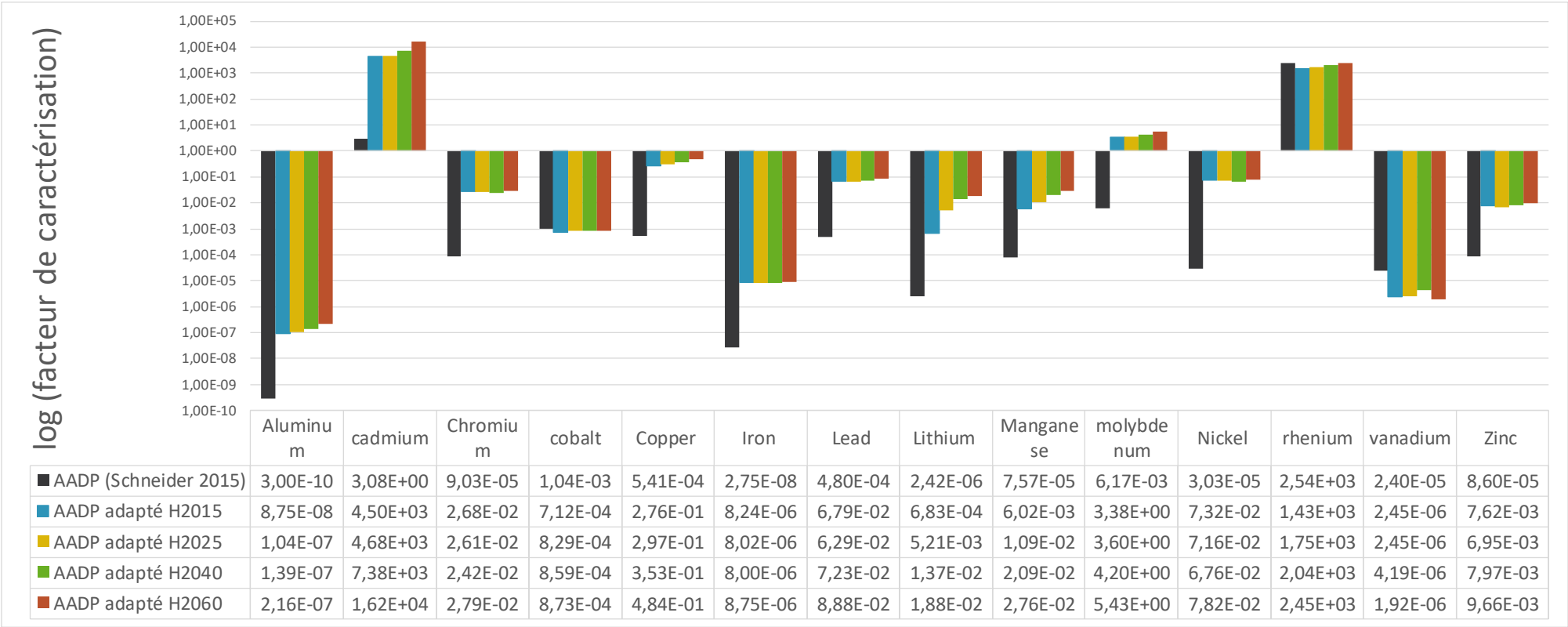


Figure 23 : Comparaison du facteur de caractérisation original (Schneider et al. 2015) par rapport aux facteurs mis à jour

Tableau 28 : Comparaison des facteurs de caractérisation (FC) entre les méthodes AADP Schneider et la méthode AADP mise à jour aux différents horizons de temps

Ressource	FC mis à jour : 2015	FC mis à jour : 2025	FC mis à jour : 2040	FC mis à jour : 2060
Aluminium		FC Schneider < FC mis à jour		
Cadmium		FC Schneider < FC mis à jour		
Chromium		FC Schneider < FC mis à jour		
Cobalt		FC Schneider > FC mis à jour		
Copper		FC Schneider < FC mis à jour		
Iron		FC Schneider < FC mis à jour		
Lead		FC Schneider < FC mis à jour		
Lithium		FC Schneider < FC mis à jour		
Manganese		FC Schneider < FC mis à jour		
Molybdenum		FC Schneider < FC mis à jour		
Nickel		FC Schneider < FC mis à jour		
Rhenium		FC Schneider > FC mis à jour		
Vanadium		FC Schneider > FC mis à jour		
Zinc		FC Schneider < FC mis à jour		

Le tableau ci-dessus illustre la comparaison de la valeur du facteur de caractérisation publiée par Schneider et al. 2015 à celle des FC mis à jour aux différents horizons de temps.

On observe que le FC de la publication de Schneider est :

- Inférieur à ceux recalculés pour 11 ressources sur 14,
- Supérieur à ceux recalculés pour 3 : ressources cobalt, rhénium et vanadium.

Ces tendances s'expliquent par le fait que les taux d'extraction pris en compte dans les calculs de mise à jour sont supérieurs ou inférieurs à ceux utilisés par Schneider et al. 2015 qui proviennent des rapports publiés par l'USGS de 2013 et 2014¹².

Tableau 29 : Evolution des nouveaux facteurs de caractérisation

	2015→2025	2025→2040	2040→2060
Aluminium	Augmentation		
Cadmium	Augmentation		
Chromium	Diminution		Augmentation
Cobalt	Augmentation		
Copper	Augmentation		
Iron	Diminution		Augmentation
Lead	Diminution	Augmentation	
Lithium	Augmentation		
Manganese	Augmentation		
Molybdenum	Augmentation		
Nickel	Diminution		Augmentation
Rhenium	Augmentation		
Vanadium	Diminution	Augmentation	Diminution
Zinc	Diminution	Augmentation	

¹² Mineral commodity summaries. U.S. Geological Survey, Department of the Interior, Reston

Le tableau ci-dessus illustre l'évolution des facteurs de caractérisation au cours du temps (sur les 4 horizons de temps considérés). On observe :

- Que les valeurs des FC augmentent de 2015 à 2060 pour 8 ressources : aluminium, cadmium, cobalt, cuivre, lithium, manganèse, molybdène, rhénium,
- Que les valeurs des FC diminuent sur le premier horizon de temps de 2015 à 2025 pour 6 ressources :
 - pour 2 de ces 6 ressources les FC augmentent ensuite à partir de 2025 (Plomb et zinc)
 - pour 2 autres les FC augmentent ensuite à partir de 2040 (Chrome, fer et nickel)
 - pour le vanadium le FC diminue de 2015 à 2025 et de 2040 à 2060 et augmente entre ces deux pas de temps

La diminution des FC d'un horizon à un autre s'explique par le fait que sur ces différents horizons, même si le taux d'extraction augmente, ce dernier augmente de façon moindre que le carré de la somme des ressources ultimes extractibles et du stock anthropogénique¹³.

En conclusion, la mise à jour des facteurs de caractérisation de la méthode Schneider et al. 2015 a un impact non négligeable sur les valeurs des facteurs de caractérisation, de façon positive ou négative selon les ressources.

7.4.2. Analyse des résultats comparatifs des scénarios selon les méthodes

La figure ci-dessous présente les résultats d'impact sur la diminution des ressources avec les 4 méthodes utilisées pour chacun des 4 horizons. Ce graphique est réalisé sur la base d'une échelle logarithmique (log10) afin de permettre une meilleure visualisation graphique puisqu'elle est particulièrement adaptée pour rendre compte des ordres de grandeur.



Figure 24 : Analyse des résultats comparatifs des scénarios selon les méthodes

Les résultats en valeur absolue sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 30 : Résultats des scénarios selon les méthodes

	2015	2025	2040	2060
ADP CML baseline : ultimate reserve (kg Sbeq)	4,37E+07	4,65E+07	6,18E+07	8,43E+07

¹³ Dénominateur dans la formule pour calculer le facteur de caractérisation

ADP CML non baseline : reserve base (kg Sbeq)	4,74E+08	4,34E+08	5,22E+08	6,45E+08
AADP Schneider et al. 2015 (kg Sbeq)	9,59E+07	8,43E+07	9,66E+07	1,14E+08
AADP mise à jour (kg Sbeq)	1,30E+11	1,18E+11	2,10E+11	5,37E+11

On observe que l'impact sur les ressources a tendance à augmenter de 2015 à 2060 avec toutes les méthodes. L'analyse des scénarios avec la méthode CML baseline - ultime reserve présente une tendance constante à la hausse de l'impact sur les différents horizons de temps, alors que pour les 3 autres méthodes il y a une légère baisse de l'impact entre 2015 et 2025 puis une augmentation constante jusqu'à 2060. L'analyse par la méthode AADP mise à jour présente les taux de variation sur les résultats les plus élevés parmi les 4 méthodes (cf. Tableau 31). Enfin avec cette dernière, les résultats ont 3 à 4 ordres de grandeur supérieurs par rapport aux résultats des 3 autres méthodes.

Tableau 31 : Taux de variation des impacts sur les différents horizons de temps

	Taux de variation des résultats 2015→ 2025	Taux de variation des résultats 2025→2040	Taux de variation des résultats 2040→2060
ADP CML baseline: ultime reserve (%)	6%	33%	36%
ADP CML non baseline : reserve base (%)	-9%	20%	23%
AADP Schneider et al. 2015 (%)	-12%	15%	18%
AADP mise à jour (%)	-10%	79%	155%

La caractérisation des scénarios par la méthode AADP mise à jour présente les valeurs les plus élevées pour tous les horizons. Pour l'horizon 2015 où l'ensemble des valeurs de la publication Schneider et al. 2015 ont été conservées exceptées les taux d'extraction, cela s'explique par des taux d'extraction plus élevés que ceux pris en compte dans la publication Schneider et al. 2015. Pour les autres horizons de temps l'ensemble des termes de calcul présents dans la formule du facteur de caractérisation mis à jour ont été modifié et adapté par rapport aux scénarios énergétiques étudiés ce qui explique la variation à la hausse des impacts : taux d'extraction plus élevés, ressources ultimes extractibles plus faibles.

L'analyse des scénarios avec la méthode ADP base de réserve présente les résultats les plus élevés derrière la méthode AADP mise à jour. Cela s'explique par le fait que cette méthode prend en compte le stock géologique comme étant égal à la base de réserves (plus faible que le stock de réserves ultimes). Pour rappel la formule de calcul des facteurs de caractérisation est :

$$ADP_{i,geologic\ stock} = \frac{extraction\ rate_i}{geologic\ stock^2} * \frac{geologic\ stock\ antimony^2}{extraction\ rate\ antimony}$$

Dans le calcul des facteurs de caractérisation des méthodes ADP et AADP, les stocks de matières ont une importance comparativement plus élevée que les taux d'extraction en raison du carré du dénominateur. Néanmoins, dans la méthode AADP l'intégration au dénominateur du taux d'extraction via le stock anthropogénique (pour 20% seulement) atténue sa prédominance. Dans un contexte de forte évolution prévisible des consommations de ressources, l'évolution du taux d'extraction doit être tout autant considéré, d'autant que la mise à jour proposée intègre un re-calcul des stocks en fonction de ces taux d'extractions basés sur les scénarios de transition énergétique.

7.4.3 Analyse de contribution des différentes ressources à l'impact d'épuisement des ressources selon les méthodes

PREAMBULE : Les graphiques ci-dessous présentent les résultats d'impacts sur l'épuisement des ressources par horizon de temps avec les 4 méthodes retenues, la contribution des ressources à cet impact est précisée dans les graphiques en barre sous la figure principale. L'explication de la source de la contribution d'une ressource (secteur concerné) n'est pas l'objet de ce paragraphe, par ailleurs cette analyse a déjà été menée dans les paragraphes précédents de résultats : se reporter paragraphe Erreur ! Source du renvoi introuvable..

HORIZON 2015

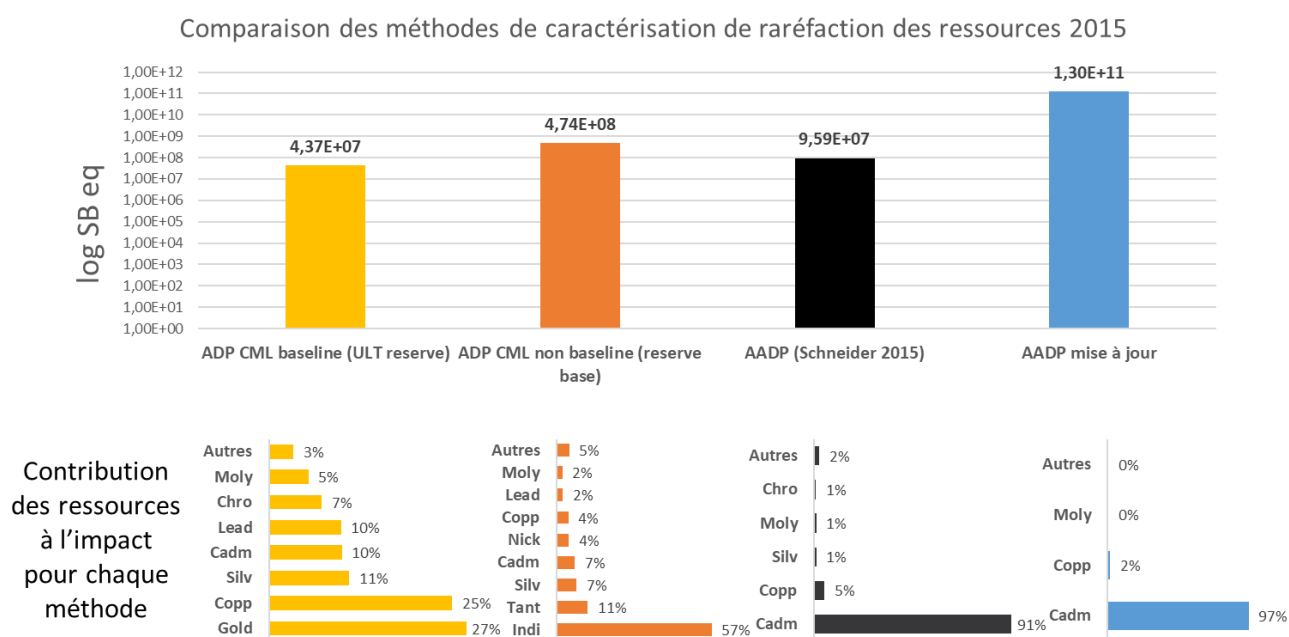


Figure 25 : Comparaison des méthodes de caractérisation et contribution à horizon 2015

En 2015, on observe que l'impact sur les ressources avec la méthode Schneider mise à jour est bien plus important qu'avec les autres méthodes. La consommation de cadmium contribue à 97% de cet impact, hors l'ordre de grandeur du CF est passé d'un ordre de grandeur 1 avec la méthode Schneider originale à 10^3 avec la méthode mise à jour (respectivement 3,08 kg Sbeq/kg et $4,50 \cdot 10^3$ kg Sbeq/kg).

Tableau 32 : Quelles ressources les plus extraites (top 10 selon le scénario IEA ETP 2017 modélisé et analysé) à horizon contribuent à plus de 2% en termes d'impact sur les ressources selon les méthodes en 2015

Top 10 des ressources	Taux d'extraction 2015 ¹⁴ (kg/an)	ADP UR	ADP RB	AADP Schneider	AADP maj
Iron	3,98E+11				
Aluminium	1,79E+10				
Copper	8,09E+09	x	x	x	x
Chromium	7,20E+09	x			
Nickel	5,07E+09		x		

¹⁴ Taux d'extraction calculé à partir de l'inventaire construit à partir du scénario IEA ETP 2017 et de la modélisation réalisée dans le logiciel Simapro avec la base de données ecoinvent v3

Manganese	1,18E+09				
Zinc	1,14E+09				
Lead	6,91E+08	x	x		
Molybdenum	1,34E+08	x	x		
Zirconium	6,77E+07				

Il est intéressant de souligner que l'analyse par les méthodes AADP originale ou mise à jour ne présente qu'une seule ressource (le cuivre) du top 10 des ressources les plus extraites qui contribue à 2% ou plus de l'impact sur les ressources alors que les autres méthodes font ressortir 3 à 4 ressources.

Analyse de contribution avec la méthode ADP ultimate reserve

Tableau 33 : Analyse croisée des facteurs et taux d'extraction des principales ressources identifiées par la méthode CML UR en 2015

Principales ressources	INVENTAIRE		CARACTERISATION		
	Taux d'extraction 2015	Part de la ressource extraite sur la quantité totale de ressources extraites	Facteur de caractérisation issu de la méthode	Résultat sur l'indicateur ressource	Contribution à l'impact sur l'épuisement des ressources
Formule de calcul ou source	Basé sur le bilan des flux du scénario IEA ETP 2017 modélisé	(Masse extraite ressource _i / Somme des masses des ressources extraites) x100	Source méthode ADP UR v4.2 (avril 2013)	Taux d'extraction ressource _i x FC ressource _i	Impact pour la ressource _i / Somme des Impact des ressources) x100
Unité	kg/an	% massique	kg Sbeq/kg	kg Sbeq	%
Gold	2,29E+05	0,00005%	5,20E+01	1,19E+07	27%
Silver	4,12E+06	0,001%	1,18E+00	4,86E+06	11%
Cadmium	2,82E+07	0,01%	1,57E-01	4,43E+06	10%
Molybdenum	1,34E+08	0,03%	1,78E-02	2,39E+06	5%
Lead	6,91E+08	0,14%	6,34E-03	4,38E+06	10%
Copper	8,09E+09	1,68%	1,37E-03	1,11E+07	25%
Chromium	7,20E+09	1,50%	4,43E-04	3,19E+06	7%
Totaux	4,81E+11			4,37E+07	

L'analyse de contribution révèle que l'or contribue à environ un tiers des impacts (CF le plus élevé 5,2.101 kg Sbeq/kg qui compense le taux d'extraction faible ne représentant que 5.10-5% des tonnages extraits) de même que le cuivre (CF de 1,37.10-3 kg Sbeq/kg et un taux d'extraction représentant 1,68% des tonnages extraits).

Analyse de contribution avec la méthode ADP reserve base

Tableau 34 : Analyse croisée des facteurs et taux d'extraction des principales ressources identifiées par la méthode CML RB en 2015

Principales ressources	INVENTAIRE		CARACTERISATION		
	Taux d'extraction 2015	Part de la ressource extraite sur la quantité totale de ressources extraites	Facteur de caractérisation issu de la méthode	Résultat sur l'indicateur ressource	Contribution à l'impact sur l'épuisement des ressources
Formule de calcul ou source	Basé sur le bilan des flux du scénario IEA ETP 2017 modélisé	(Masse extraite ressource _i / Somme des masses des ressources extraites) x100	Source méthode ADP RB v4.1 (octobre 2012)	Taux d'extraction ressource _i x FC ressource _i	Impact pour la ressource _i / Somme des Impact des ressources) x100

Unité	kg/an	% massique	kg Sbeq/kg	kg Sbeq	%
Gold	2,29E+05	0,00005%	3,60E+01	8,26E+06	2%
Silver	4,12E+06	0,006%	8,42E+00	3,47E+07	7%
Cadmium	2,82E+07	0,01%	1,11E+00	3,13E+07	7%
Molybdenum	1,34E+08	0,03%	7,11E-02	9,55E+06	2%
Nickel	5,07E+09	1,05%	4,18E-03	2,12E+07	4%
Copper	8,09E+09	1,68%	2,50E-03	2,02E+07	4%
Indium	4,89E+05	0,0001%	5,55E+02	2,71E+08	57%
Tantalum	4,70E+06	0,001%	1,15E+01	5,40E+07	11%
Totaux	4,81E+11			4,74E+08	

Le profil de contribution révèle que l'indium contribue à environ 60% des impacts (CF le plus élevé 5,55.10² kg Sbeq/kg qui compense le taux d'extraction faible ne représentant que 1.10⁻⁴% des tonnages extraits) et le tantale contribuant à 11% (2^e CF le plus élevé 1,15.10¹ kg Sbeq/kg et un taux d'extraction représentant 1.10⁻³ % des tonnages extraits).

Analyse de contribution avec la méthode AADP Schneider

Tableau 35 : Analyse croisée des facteurs et taux d'extraction des principales ressources identifiées par la méthode AADP (Schneider et al. 2015) en 2015

Principales ressources	INVENTAIRE		CARACTERISATION		
	Taux d'extraction 2015	Part de la ressource extraite sur la quantité totale de ressources extraites	Facteur de caractérisation issu de la méthode	Résultat sur l'indicateur ressource	Contribution à l'impact sur l'épuisement des ressources
Formule de calcul ou source	Basé sur le bilan des flux du scénario IEA ETP 2017 modélisé	(Masse extraite ressource _i / Somme des masses des ressources extraites) x100	Source méthode AADP Schneider et al. 2015	Taux d'extraction ressource _i x FC ressource _i	Impact pour la ressource _i / Somme des Impact des ressources) x100
Unité	kg/an	% massique	kg Sbeq/kg	kg Sbeq	%
Silver	4,12E+06	0,001%	2,28E-01	9,39E+05	1,0%
Cadmium	2,82E+07	0,006%	3,08E+00	8,68E+07	90,6%
Molybdenum	1,34E+08	0,03%	6,17E-03	8,29E+05	0,9%
Chromium	7,20E+09	1,50%	9,03E-05	6,50E+05	0,7%
Copper	8,09E+09	1,68%	5,41E-04	4,37E+06	4,6%
Totaux	4,81E+11			9,59E+07	

Le profil révèle que le cadmium domine la contribution à l'impact (à 91%) (CF le plus élevé 3,08 kg Sbeq/kg qui compense le taux d'extraction faible ne représentant que 0,006% des tonnages extraits).

Analyse de contribution avec la méthode AADP mise à jour

Tableau 36 : Analyse croisée des facteurs et taux d'extraction des principales ressources identifiées par la méthode AADP mise à jour en 2015

Principales ressources	INVENTAIRE		CARACTERISATION		
	Taux d'extraction 2015	Part de la ressource extraite sur la quantité totale de ressources extraites	Facteur de caractérisation issu de la méthode	Résultat sur l'indicateur ressource	Contribution à l'impact sur l'épuisement des ressources
Formule de calcul ou source	Basé sur le bilan des flux du scénario IEA ETP 2017 modélisé	(Masse extraite ressource _i / Somme des masses des ressources extraites) x100	Source méthode AADP Schneider mise à jour H2015	Taux d'extraction ressource _i x FC ressource _i	Impact pour la ressource _i / Somme des Impact des ressources) x100
Unité	kg/an	% massique	kg Sbeq/kg	kg Sbeq	%
Cadmium	2,82E+07	0,006%	4,50E+03	1,27E+11	98%

Molybdenum	1,34E+08	0,03%	3,38E+00	4,54E+08	0%
Copper	8,09E+09	1,68%	2,76E-01	2,23E+09	2%
Totaux	4,81E+11			1,3E+11	

Le profil révèle que le cadmium domine la contribution à l'impact à 98% (CF le plus élevé : $4,05.10^3$ kg Sbeq/kg, qui compense le taux d'extraction faible ne représentant que 0,006% des tonnages extraits).

HORIZON 2025

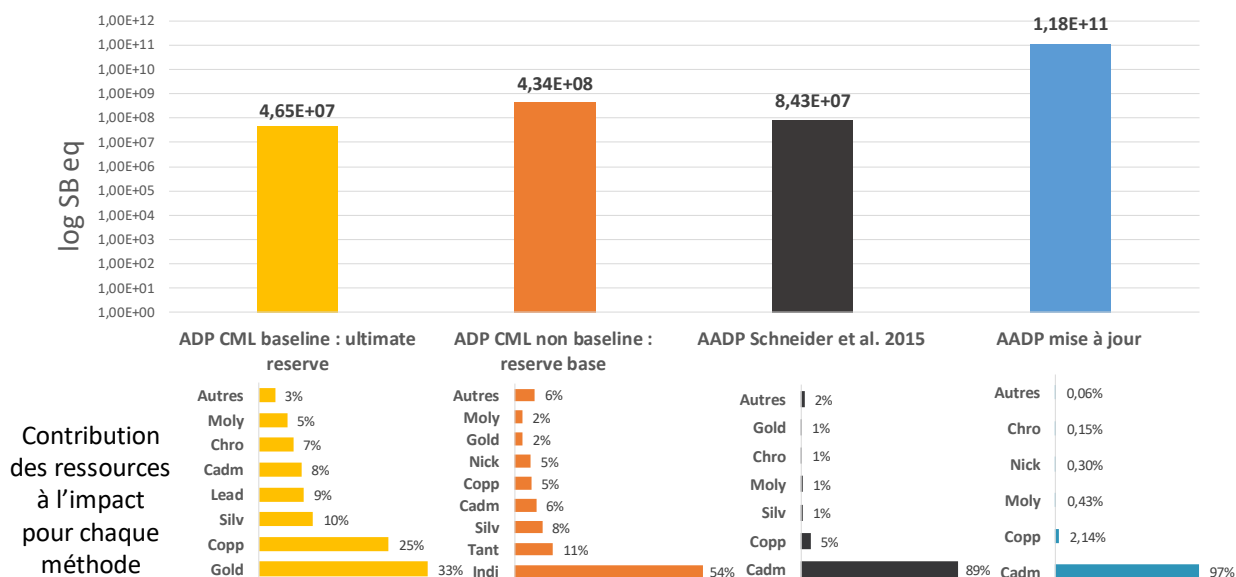


Figure 26 : Comparaison des méthodes de caractérisation et contribution à horizon 2025

En 2025, on observe que l'impact sur les ressources avec la méthode Schneider mise à jour est plus important qu'avec les autres méthodes. Le principal contributeur à l'impact sur les ressources est le cadmium avec la méthode Schneider originale ainsi qu'avec la méthode mise à jour. La consommation de cadmium en 2025 est de $2,44.10^7$ tonnes et son CF est passé de 3,08 avec la méthode Schneider originale à $4,68.10^3$ kg Sbeq/kg avec la méthode mise à jour. Par ailleurs on observe qu'avec la méthode AADP mise à jour, l'argent et l'or sont des ressources dont la contribution à l'impact est plus faible qu'avec la méthode AADP Schneider originale. Ceci s'explique par le fait que les facteurs de caractérisation des autres ressources sont plus importantes avec la méthode mise à jour : leur contribution à l'impact total est donc plus importante ce qui réduit celle de ressources dont les FC sont inchangés (dont l'argent et l'or).

Tableau 37 : Quelles ressources les plus extraites (top 10 selon le scénario IEA ETP 2017 modélisé et analysé) contribuent à plus de 2% en termes d'impact sur les ressources selon les méthodes en 2025

Top 10 des ressources	Taux d'extraction 2025 ¹⁵ (kg/an)	ADP UR	ADP RB	AADP Schneider	AADP maj
Iron	3,86E+11				
Aluminium	2,13E+10				
Copper	8,48E+09	x	x	x	x
Chromium	6,95E+09	x			
Nickel	4,91E+09		x		
Manganese	2,15E+09				
Zinc	1,03E+09				

¹⁵ Taux d'extraction calculé à partir de l'inventaire construit à partir du scénario IEA ETP 2017 et de la modélisation réalisée dans le logiciel Simapro avec la base de données ecoinvent v3

Lead	6,38E+08	x			
Molybdenum	1,41E+08	x	x		
Colemanite	1,06E+08				

Il est intéressant de souligner que l'analyse par les méthodes AADP originale ou mise à jour ne présente qu'une seule ressource (le cuivre) du top 10 des ressources les plus extraites qui contribue à 2% ou plus de l'impact sur les ressources alors que les autres méthodes font ressortir 3 à 4 ressources.

Analyse de contribution avec la méthode ADP ultimate reserve

Tableau 38 : Analyse croisée des facteurs et taux d'extraction des principales ressources identifiées par la méthode CML UR en 2025

	INVENTAIRE		CARACTERISATION		
Principales ressources	Taux d'extraction 2025	Part de la ressource extraite sur la quantité totale de ressources extraites	Facteur de caractérisation issu de la méthode	Résultat sur l'indicateur ressource	Contribution à l'impact sur l'épuisement des ressources
Formule de calcul ou source	Basé sur le bilan des flux du scénario IEA ETP 2017 modélisé	(Masse extraite ressource _i / Somme des masses des ressources extraites) x100	Source méthode ADP UR v4.2 (avril 2013)	Taux d'extraction ressource _i x FC ressource _i	Impact pour la ressource _i / Somme des Impact des ressources) x100
Unité	kg/an	% massique	kg Sbeq/kg	kg Sbeq	%
Gold	2,91E+05	0,0001%	5,20E+01	1,51E+07	33%
Silver	4,11E+06	0,001%	1,18E+00	4,86E+06	10%
Cadmium	2,44E+07	0,01%	1,57E-01	3,83E+06	8%
Molybdenum	1,41E+08	0,03%	1,78E-02	2,52E+06	5%
Lead	6,38E+08	0,13%	6,34E-03	4,04E+06	9%
Copper	8,48E+09	1,79%	1,37E-03	1,16E+07	25%
Chromium	6,95E+09	1,46%	4,43E-04	3,08E+06	7%
Totaux	4,75E+11			4,65E+07	

Le profil de contribution révèle que l'or contribue à environ un tiers des impacts (CF le plus élevé 5,2.10¹ kg Sbeq/kg qui compense le taux d'extraction faible ne représentant que 1.10⁻⁴% des tonnages extraits) de même que le cuivre (CF de 1,37.10⁻³ kg Sbeq/kg et un taux d'extraction représentant 1,79% des tonnages extraits).

Analyse de contribution avec la méthode ADP reserve base

Tableau 39 : Analyse croisée des facteurs et taux d'extraction des principales ressources identifiées par la méthode CML RB en 2025

	INVENTAIRE		CARACTERISATION		
Principales ressources	Taux d'extraction 2025	Part de la ressource extraite sur la quantité totale de ressources extraites	Facteur de caractérisation issu de la méthode	Résultat sur l'indicateur ressource	Contribution à l'impact sur l'épuisement des ressources

Formule de calcul ou source	Basé sur le bilan des flux du scénario IEA ETP 2017 modélisé	(Masse extraite ressource _i / Somme des masses des ressources extraite) x100	Source méthode ADP RB v4.1 (octobre 2012)	Taux d'extraction ressource _i x FC ressource _i	Impact pour la ressource _i / Somme des Impact des ressources) x100
Unité	kg/an	% massique	kg Sbeq/kg	kg Sbeq	%
Gold	2,91E+05	0,0001%	3,60E+01	1,05E+07	2%
Silver	4,11E+06	0,001%	8,42E+00	3,46E+07	8%
Cadmium	2,44E+07	0,01%	1,11E+00	2,71E+07	6%
Molybdenum	1,41E+08	0,03%	7,11E-02	1,00E+07	2%
Nickel	4,91E+09	1,03%	4,18E-03	2,05E+07	5%
Copper	8,48E+09	1,79%	2,50E-03	2,12E+07	5%
Indium	4,25E+05	0,0001%	5,55E+02	2,36E+08	54%
Tantalum	4,16E+06	0,001%	1,15E+01	4,78E+07	11%
Totaux	4,75E+11			4,34E+08	

Le profil de contribution révèle que l'indium contribue à 54% des impacts (CF le plus élevé 5,55.10² kg Sbeq/kg qui compense le taux d'extraction faible ne représentant que 1.10⁻⁴% des tonnages extraits) et le tantale contribuant à 11% (2e CF le plus élevé 1,15.10¹ kg Sbeq/kg et un taux d'extraction représentant 1.10⁻³ % des tonnages extraits).

Analyse de contribution avec la méthode AADP Schneider

Tableau 40 : Analyse croisée des facteurs et taux d'extraction des principales ressources identifiées par la méthode AADP (Schneider et al. 2015) en 2025

Principales ressources	INVENTAIRE		CARACTERISATION		
	Taux d'extraction 2025	Part de la ressource extraite sur la quantité totale de ressources extraites	Facteur de caractérisation issu de la méthode	Résultat sur l'indicateur ressource	Contribution à l'impact sur l'épuisement des ressources
Formule de calcul ou source	Basé sur le bilan des flux du scénario IEA ETP 2017 modélisé	(Masse extraite ressource _i / Somme des masses des ressources extraite) x100	Source méthode AADP Schneider et al. 2015	Taux d'extraction ressource _i x FC ressource _i	Impact pour la ressource _i / Somme des Impact des ressources) x100
Unité	kg/an	% massique	kg Sbeq/kg	kg Sbeq	%
Silver	5,00E+05	0,0001%	2,28E-01	1,14E+05	0,1%
Cadmium	2,44E+07	0,01%	3,08E+00	7,51E+07	89,1%
Molybdenum	1,41E+08	0,03%	6,17E-03	8,72E+05	1,0%
Chromium	6,95E+09	1,46%	9,03E-05	6,28E+05	0,7%
Copper	8,48E+09	1,79%	5,41E-04	4,59E+06	5,4%
Totaux	4,75E+11			8,43E+07	

Le profil révèle que le cadmium domine la contribution à l'impact à 90% (CF le plus élevé : 3,08 kg Sbeq/kg qui compense le taux d'extraction faible ne représentant que 0,01% des tonnages extraits).

Analyse de contribution avec la méthode AADP mise à jour

Tableau 41 : Analyse croisée des facteurs et taux d'extraction des principales ressources identifiées par la méthode AADP mise à jour en 2025

	INVENTAIRE		CARACTERISATION		
Principales ressources	Taux d'extraction 2025	Part de la ressource extraite sur la quantité totale de ressources extraites	Facteur de caractérisation issu de la méthode	Résultat sur l'indicateur ressource	Contribution à l'impact sur l'épuisement des ressources
Formule de calcul ou source	Basé sur le bilan des flux du scénario IEA ETP 2017 modélisé	(Masse extraite ressource _i / Somme des masses des ressources extraites) x100	Source méthode AADP Schneider mise à jour H2025	Taux d'extraction ressource _i x FC ressource _i	Impact pour la ressource _i / Somme des Impact des ressources) x100
Unité	kg/an	% massique	kg Sbeq/kg	kg Sbeq	%
Cadmium	2,44E+7	0,01%	4,68E+03	1,14E+11	97%
Molybdenum	1,41E+08	0,03%	3,60E+00	5,09E+08	0,4%
Copper	8,48E+09	1,79%	2,97E-01	2,52E+09	2%
Totaux	4,75E+11			1,18E+11	

Le profil révèle que le cadmium domine la contribution à l'impact à 97% (CF le plus élevé : $4,68.10^3$ kg Sbeq/kg qui compense le taux d'extraction faible ne représentant que 0,01% des tonnages extraits). Le taux d'extraction du cadmium a diminué de 2015 à 2025 passant de $2,82.10^7$ à $2,44.10^7$ kg/an et son facteur de caractérisation a également évolué passant de $4,50.10^3$ à $4,68.10^3$ kgSbeq/kg.

HORIZON 2040

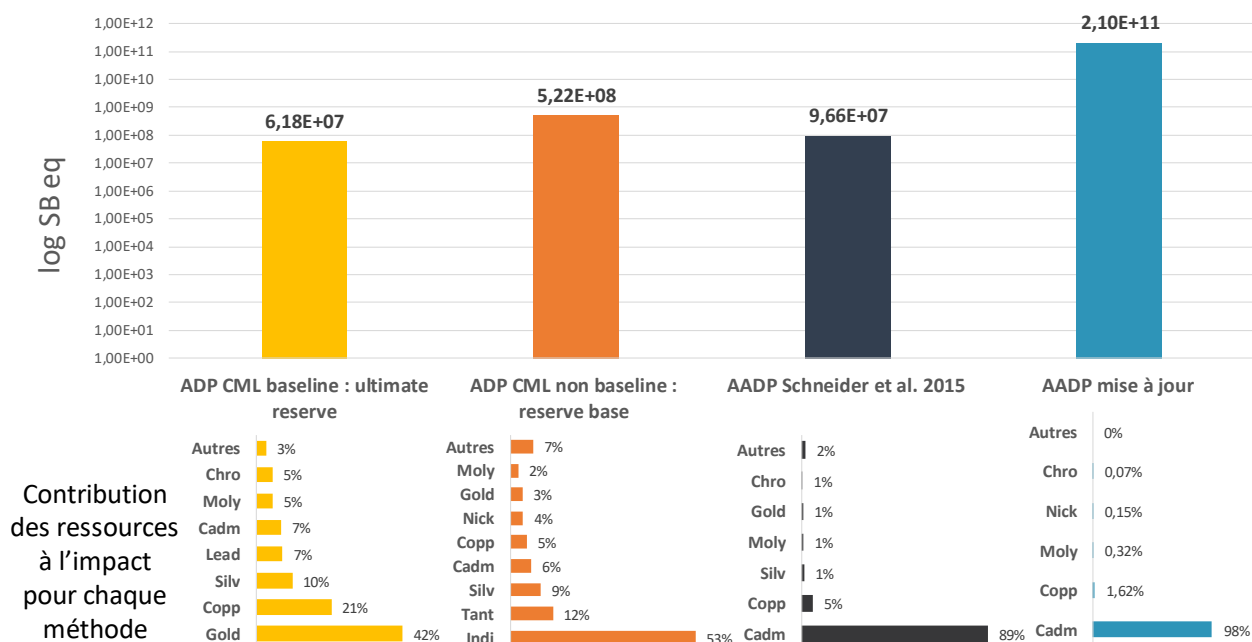


Figure 27 : Comparaison des méthodes de caractérisation et contribution à horizon 2040

En 2040, on observe que l'impact sur les ressources avec la méthode Schneider mise à jour est plus important qu'avec les autres méthodes. Le principal contributeur à l'impact sur les ressources est le cadmium avec la méthode Schneider originale ainsi qu'avec la méthode mise à jour. En 2040, on observe à nouveau qu'avec la méthode AADP mise à jour, l'argent et l'or sont des ressources dont la contribution à l'impact est plus faible qu'avec la méthode AADP Schneider originale (cf. explications apportées à l'horizon 2025).

Tableau 42 : Quelles ressources les plus extraites (top 10 selon le scénario IEA ETP 2017 modélisé et analysé) à horizon contribuent à plus de 2% en termes d'impact sur les ressources selon les méthodes en 2040

Top 10 des ressources	Taux d'extraction 2040 ¹⁶ (kg/an)	ADP UR	ADP RB	AADP Schneider	AADP maj
Iron	3,85E+11				
Aluminium	2,84E+10				
Copper	9,65E+09	x	x	x	
Chromium	6,39E+09	x			
Nickel	4,57E+09		x		
Manganese	4,08E+09				
Zinc	1,18E+09				
Lead	7,30E+08	x			
Lithium	1,88E+08				
Molybdenum	1,62E+08	x	x		

Il est intéressant de souligner que l'analyse par la méthode AADP mise à jour ne présente aucune ressource du top 10 des ressources les plus extraites qui contribue à 2% ou plus de l'impact sur les ressources alors que les autres méthodes font ressortir 1 à 4 ressources.

Analyse de contribution avec la méthode ADP ultimate reserve

Tableau 43 : Analyse croisée des facteurs et taux d'extraction des principales ressources identifiées par la méthode CML UR en 2040

	INVENTAIRE		CARACTERISATION		
Principales ressources	Taux d'extraction 2040	Part de la ressource extraite sur la quantité totale de ressources extraites	Facteur de caractérisation issu de la méthode	Résultat sur l'indicateur ressource	Contribution à l'impact sur l'épuisement des ressources
Formule de calcul ou source	Basé sur le bilan des flux du scénario IEA ETP 2017 modélisé	(Masse extraite ressource _i / Somme des masses des ressources extraite) x100	Source méthode ADP UR v4.2 (avril 2013)	Taux d'extraction ressource _i x FC ressource _i	Impact pour la ressource _i / Somme des Impact des ressources) x100
Unité	kg/an	% massique	kg Sbeq/kg	kg Sbeq	%
Gold	4,97E+05	0,0001%	5,20E+01	2,59E+07	42%
Silver	5,37E+06	0,001%	1,18E+00	6,34E+06	10%
Cadmium	2,79E+07	0,01%	1,57E-01	4,38E+06	7%
Molybdenum	1,62E+08	0,03%	1,78E-02	2,88E+06	5%
Lead	7,30E+08	0,15%	6,34E-03	4,63E+06	7%
Copper	9,65E+09	1,97%	1,37E-03	1,32E+07	21%
Chromium	6,39E+09	1,30%	4,43E-04	2,83E+06	5%
Totaux	4,90E+11			6,18E+07	

Le profil de contribution révèle que l'or contribue à plus d'un tiers des impacts (CF le plus élevé 5,2.10¹ kg Sbeq/kg qui compense le taux d'extraction faible ne représentant que 1.10⁻⁴% des tonnages extraits) de même que le cuivre (CF de 1,37.10⁻³ kg Sbeq/kg et un taux d'extraction représentant 1,97% des tonnages extraits).

¹⁶ Taux d'extraction calculé à partir de l'inventaire construit à partir du scénario IEA ETP 2017 et de la modélisation réalisée dans le logiciel Simapro avec la base de données ecoinvent v3

Analyse de contribution avec la méthode ADP reserve base

Tableau 44 : Analyse croisée des facteurs et taux d'extraction des principales ressources identifiées par la méthode CML RB en 2040

	INVENTAIRE		CARACTERISATION		
Principales ressources	Taux d'extraction 2040	Part de la ressource extraite sur la quantité totale de ressources extraites	Facteur de caractérisation issu de la méthode	Résultat sur l'indicateur ressource	Contribution à l'impact sur l'épuisement des ressources
Formule de calcul ou source	Basé sur le bilan des flux du scénario IEA ETP 2017 modélisé	(Masse extraite ressource _i / Somme des masses des ressources extraites) x100	Source méthode ADP RB v4.1 (octobre 2012)	Taux d'extraction ressource _i x FC ressource _i	Impact pour la ressource _i / Somme des Impact des ressources) x100
Unité	kg/an	% massique	kg Sbeq/kg	kg Sbeq	%
Gold	4,97E+05	0,0001%	3,60E+01	1,79E+07	3%
Silver	5,37E+06	0,001%	8,42E+00	4,53E+07	9%
Cadmium	2,79E+07	0,01%	1,11E+00	3,10E+07	6%
Molybdenum	1,62E+08	0,03%	7,11E-02	1,15E+07	2%
Nickel	4,57E+09	0,93%	4,18E-03	1,91E+07	4%
Copper	9,65E+09	1,97%	2,50E-03	2,41E+07	5%
Indium	4,97E+05	0,0001%	5,55E+02	2,76E+08	53%
Tantalum	5,50E+06	0,001%	1,15E+01	6,33E+07	12%
Totaux	4,90E+11			5,22E+08	

Le profil de contribution révèle que l'indium contribue à 53% des impacts (CF le plus élevé 5,55.10² kg Sbeq/kg qui compense le taux d'extraction faible ne représentant que 1.10⁻⁴% des tonnages extraits) et le tantale contribuant à 12% (2e CF le plus élevé 1,15.10¹ kg Sbeq/kg et un taux d'extraction représentant 1.10⁻³ % des tonnages extraits).

Analyse de contribution avec la méthode AADP Schneider

Tableau 45 : Analyse croisée des facteurs et taux d'extraction des principales ressources identifiées par la méthode AADP (Schneider et al. 2015) en 2040

	INVENTAIRE		CARACTERISATION		
Principales ressources	Taux d'extraction 2040	Part de la ressource extraite sur la quantité totale de ressources extraites	Facteur de caractérisation issu de la méthode	Résultat sur l'indicateur ressource	Contribution à l'impact sur l'épuisement des ressources
Formule de calcul ou source	Basé sur le bilan des flux du scénario IEA ETP 2017 modélisé	(Masse extraite ressource _i / Somme des masses des ressources extraites) x100	Source méthode AADP Schneider et al. 2015	Taux d'extraction ressource _i x FC ressource _i	Impact pour la ressource _i / Somme des Impact des ressources) x100
Unité	kg/an	% massique	kg Sbeq/kg	kg Sbeq	%
Silver	5,37E+06	0,001%	2,28E-01	1,23E+06	1,3%
Cadmium	2,79E+07	0,01%	3,08E+00	8,59E+07	88,9%
Molybdenum	1,62E+08	0,03%	6,17E-03	9,99E+05	1,0%
Chromium	6,39E+09	1,30%	9,03E-05	5,77E+05	0,6%
Copper	9,65E+09	1,97%	5,41E-04	5,22E+06	5,4%
Totaux	4,90E+11			9,66E+07	

Le profil révèle que le cadmium domine la contribution à l'impact à 89% (CF le plus élevé : 3,08 kg Sbeq/kg qui compense le taux d'extraction faible ne représentant que 0,01% des tonnages extraits).

Analyse de contribution avec la méthode AADP mise à jour

Tableau 46 : Analyse croisée des facteurs et taux d'extraction des principales ressources identifiées par la méthode AADP mise à jour en 2040

	INVENTAIRE		CARACTERISATION		
Principales ressources	Taux d'extraction 2040	Part de la ressource extraite sur la quantité totale de ressources extraites	Facteur de caractérisation issu de la méthode	Résultat sur l'indicateur ressource	Contribution à l'impact sur l'épuisement des ressources
Formule de calcul ou source	Basé sur le bilan des flux du scénario IEA ETP 2017 modélisé	(Masse extraite ressource _i / Somme des masses des ressources extraites) x100	Source méthode AADP Schneider mise à jour H2040	Taux d'extraction ressource _i x FC ressource _i	Impact pour la ressource _i / Somme des Impact des ressources) x100
Unité	kg/an	% massique	kg Sbeq/kg	kg Sbeq	%
Cadmium	2,79E+7	0,006%	7,38E+03	2,06E+11	98%
Molybdenum	1,62E+08	0,033%	4,20E+00	6,80E+08	0,32%
Copper	9,65E+09	1,97%	3,53E-01	3,41E+09	1,62%
Totaux	4,90E+11			2,10E+11	

L'analyse révèle que le cadmium domine la contribution à l'impact à 98% (CF le plus élevé : 7,38.10³ kg Sbeq/kg qui compense le taux d'extraction faible ne représentant que 0,006% des tonnages extraits). Le taux d'extraction du cadmium a augmenté de 2025 à 2040 passant de 2,44.10⁷ à 2,79.10⁷ kg/an et son facteur de caractérisation a également évolué passant de 4,68.10³ à 7,38.10³ kgSbeq/kg.

HORIZON 2060

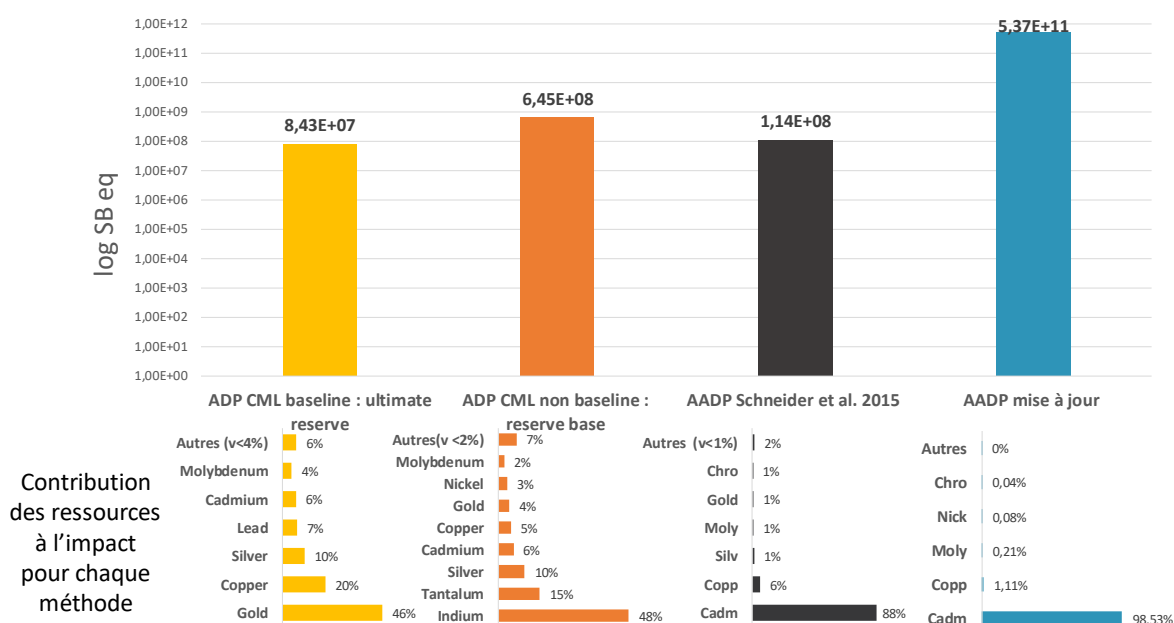


Figure 28 : Comparaison des méthodes de caractérisation et contribution à horizon 2060

En 2060, on observe que l'impact sur les ressources avec la méthode Schneider mise à jour est plus important qu'avec les autres méthodes. Le principal contributeur à l'impact sur les ressources est le cadmium avec la méthode Schneider originale ainsi qu'avec la méthode mise à jour. En 2060, on observe à nouveau qu'avec la méthode AADP mise à jour, l'argent et l'or sont des ressources dont la contribution à l'impact est plus faible qu'avec la méthode AADP Schneider originale (cf explications apportées à l'horizon 2025).

Tableau 47 : Quelles ressources les plus extraites (top 10 selon le scénario IEA ETP 2017 modélisé et analysé) à horizon contribuent à plus de 2% en terme d'impact sur les ressources selon les méthodes en 2060 ?

Top 10 des ressources	Taux d'extraction 2060 ¹⁷ (kg/an)	ADP UR	ADP RB	AADP Schneider	AADP maj
Iron	4,20E+11				
Aluminium	4,42E+10				
Copper	1,23E+10	x	x	x	
Chromium	7,24E+09				
Manganese	5,31E+09				
Nickel	5,18E+09		x		
Zinc	1,43E+09				
Lead	8,88E+08	x			
Lithium	2,57E+08				
Molybdenum	2,03E+08	x	x		

Il est intéressant de souligner que l'analyse par la méthode AADP mise à jour ne présente aucune ressource du top 10 des ressources les plus extraites qui contribue à 2% ou plus de l'impact sur les ressources alors que les autres méthodes font ressortir 1 à 3 ressources (cf. tableau précédent).

Analyse de contribution avec la méthode ADP ultimate reserve

Tableau 48 : Analyse croisée des facteurs et taux d'extraction des principales ressources identifiées par la méthode CML UR en 2060

	INVENTAIRE		CARACTERISATION		
Principales ressources	Taux d'extraction 2060	Part de la ressource extraite sur la quantité totale de ressources extraites	Facteur de caractérisation issu de la méthode	Résultat sur l'indicateur ressource	Contribution à l'impact sur l'épuisement des ressources
Formule de calcul ou source	Basé sur le bilan des flux du scénario IEA ETP 2017 modélisé	(Masse extraite ressource _i / Somme des masses des ressources extraite) x100	Source méthode ADP UR v4.2 (avril 2013)	Taux d'extraction ressource _i x FC ressource _i	Impact pour la ressource _i / Somme des Impact des ressources) x100
Unité	kg/an	% massique	kg Sbeq/kg	kg Sbeq	%
Gold	7,49E+05	0,0001%	5,20E+01	3,90E+07	46%
Silver	7,40E+06	0,001%	1,18E+00	8,73E+06	10%
Cadmium	3,26E+07	0,01%	1,57E-01	5,12E+06	6%
Molybdenum	2,03E+08	0,04%	1,78E-02	3,61E+06	4%
Lead	8,88E+08	0,16%	6,34E-03	5,63E+06	7%

¹⁷ Taux d'extraction calculé à partir de l'inventaire construit à partir du scénario IEA ETP 2017 et de la modélisation réalisée dans le logiciel Simapro avec la base de données ecoinvent v3

Copper	1,23E+10	2,22%	1,37E-03	1,68E+07	20%
Chromium	7,24E+09	1,31%	4,43E-04	3,21E+06	4%
Totaux	5,53E+11			8,43E+07	

Le profil de contribution révèle que l'or contribue à 46% des impacts (CF le plus élevé : $5,2 \cdot 10^1$ kg Sbeq/kg qui compense le taux d'extraction faible ne représentant que $1 \cdot 10^{-4}$ % des tonnages extraits) et le cuivre qui contribue à 20% (CF de $1,37 \cdot 10^{-3}$ kg Sbeq/kg et un taux d'extraction représentant 2,22% des tonnages extraits).

Analyse de contribution avec la méthode ADP reserve base

Tableau 49 : Analyse croisée des facteurs et taux d'extraction des principales ressources identifiées par la méthode CML RB en 2060

	INVENTAIRE		CARACTERISATION		
Principales ressources	Taux d'extraction 2060	Part de la ressource extraite sur la quantité totale de ressources extraites	Facteur de caractérisation issu de la méthode	Résultat sur l'indicateur ressource	Contribution à l'impact sur l'épuisement des ressources
Formule de calcul ou source	Basé sur le bilan des flux du scénario IEA ETP 2017 modélisé	(Masse extraite ressource _i / Somme des masses des ressources extraites) x100	Source méthode ADP RB v4.1 (octobre 2012)	Taux d'extraction ressource _i x FC ressource _i	Impact pour la ressource _i / Somme des Impact des ressources) x100
Unité	kg/an	% massique	kg Sbeq/kg	kg Sbeq	%
Gold	7,49E+05	0,0001%	3,60E+01	2,70E+07	4%
Silver	7,40E+06	0,001%	8,42E+00	6,23E+07	10%
Cadmium	3,26E+07	0,01%	1,11E+00	3,62E+07	6%
Molybdenum	2,03E+08	0,04%	7,11E-02	1,44E+07	2%
Nickel	5,18E+09	0,94%	4,18E-03	2,17E+07	3%
Copper	1,23E+10	2,22%	2,50E-03	3,07E+07	5%
Indium	5,59E+05	0,0001%	5,55E+02	3,10E+08	48%
Tantalum	8,56E+06	0,002%	1,15E+01	9,84E+07	15%
Totaux	5,53E+11			6,45E+08	

Le profil de contribution révèle que l'indium contribue à 48% des impacts (CF le plus élevé $5,55 \cdot 10^2$ kg Sbeq/kg qui compense le taux d'extraction faible ne représentant que $1 \cdot 10^{-4}$ % des tonnages extraits) et le tantale contribuant à 15% (2e CF le plus élevé $1,15 \cdot 10^1$ kg Sbeq/kg et un taux d'extraction représentant $2 \cdot 10^{-3}$ % des tonnages extraits).

Analyse de contribution avec la méthode AADP Schneider

Tableau 50 : Analyse croisée des facteurs et taux d'extraction des principales ressources identifiées par la méthode AADP (Schneider et al. 2015) en 2060

	INVENTAIRE		CARACTERISATION		
Principales ressources	Taux d'extraction 2060	Part de la ressource extraite sur la quantité totale de ressources extraites	Facteur de caractérisation issu de la méthode	Résultat sur l'indicateur ressource	Contribution à l'impact sur l'épuisement des ressources
Formule de calcul ou source	Basé sur le bilan des flux du scénario IEA ETP 2017 modélisé	(Masse extraite ressource _i / Somme des masses des ressources extraites) x100	Source méthode AADP Schneider et al. 2015	Taux d'extraction ressource _i x FC ressource _i	Impact pour la ressource _i / Somme des Impact des ressources) x100

Unité	kg/an	% massique	kg Sbeq/kg	kg Sbeq	%
Silver	7,40E+06	0,001%	2,28E-01	1,69E+06	1,5%
Cadmium	3,26E+07	0,01%	3,08E+00	1,01E+08	88,2%
Molybdenum	2,03E+08	0,04%	6,17E-03	1,25E+06	1,1%
Chromium	7,24E+09	1,31%	9,03E-05	6,54E+05	0,6%
Gold	7,49E+05	0,0001%	1,59E+00	1,19E+06	1,0%
Copper	1,23E+10	2,22%	5,41E-04	6,65E+06	5,8%
Totaux	5,53E+11			1,14E+08	

Le profil révèle que le cadmium domine la contribution à l'impact à 88% (CF le plus élevé 3,08 kg Sbeq/kg qui compense le taux d'extraction faible ne représentant que 0,01% des tonnages extraits).

Analyse de contribution avec la méthode AADP mise à jour

Tableau 51 : Analyse croisée des facteurs et taux d'extraction des principales ressources identifiées par la méthode AADP mise à jour en 2060

	INVENTAIRE		CARACTERISATION		
Principales ressources	Taux d'extraction 2060	Part de la ressource extraite sur la quantité totale de ressources extraites	Facteur de caractérisation issu de la méthode	Résultat sur l'indicateur ressource	Contribution à l'impact sur l'épuisement des ressources
Formule de calcul ou source	Basé sur le bilan des flux du scénario IEA ETP 2017 modélisé	(Masse extraite ressource _i / Somme des masses des ressources extraites) x100	Source méthode AADP Schneider mise à jour H2060	Taux d'extraction ressource _i x FC ressource _i	Impact pour la ressource _i / Somme des Impact des ressources) x100
Unité	kg/an	% massique	kg Sbeq/kg	kg Sbeq	%
Cadmium	3,26E+07	0,01%	1,62E+04	5,29E+11	98,53%
Molybdenum	2,03E+08	0,04%	5,43E+00	1,10E+09	0,21%
Copper	1,23E+10	2,22%	4,84E-01	5,95E+09	1,11%
Totaux	5,53E+11			5,37E+11	

L'analyse révèle que le cadmium domine la contribution à l'impact à 98% (CF le plus élevé : 1,62.10⁴ kg Sbeq/kg qui compense le taux d'extraction faible ne représentant que 0,01% des tonnages extraits). Le taux d'extraction du cadmium a augmenté de 2040 à 2060 passant de 2,79.10⁰⁷ à 3,26.10⁷ kg/an et son facteur de caractérisation a également évolué passant de 7,38.10³ à 1,62.10⁴ kgSbeq/kg.

7.5. Conclusion

Conclusions sur les méthodes :

- Les résultats obtenus avec les 4 méthodes étudiées présentent un profil de contribution des ressources quasiment invariant.
- Avec les méthodes AADP Schneider et al. 2015 et AADP mise à jour, le cadmium représente la grande majorité de l'impact sur les 4 horizons de temps. Ceci est dû au fait que son facteur de caractérisation est le plus élevé sur les différents horizons (allant de 4,50E+03 à 41,62E+04 kg Sb_{eq}/kg pour la méthode AADP mise à jour) bien que son taux d'extraction ne représente pas plus de 0,006% des ressources extraites sur les 4 horizons de temps. On peut questionner la cohérence

de valeur élevée du facteur de caractérisation du cadmium avec d'autres facteurs de caractérisation de différentes ressources reconnues comme très rares tels que l'indium.

- La méthode AADP mise à jour présente l'avantage de faire évoluer les facteurs de caractérisation en fonction de l'évolution des ressources ce qui est un élément méthodologique intéressant si on se penche sur des horizons de temps lointains et prospectifs. Cette mise à jour des facteurs de caractérisation ne semble pas modifier les profils de contribution à l'impact (le cadmium reste le contributeur majoritaire) mais la valeur absolue des résultats d'impact. En effet les impacts évalués avec la méthode AADP mise à jour sont supérieurs de 3 ordres de grandeurs aux résultats issus des autres méthodes.
- La méthode ADP Reserve base ne semble pas adaptée pour évaluer la rareté des ressources sur des scénarios à horizon de temps distants. En effet, les réserves estimées dépendent de nombreux facteurs qui peuvent changer en très peu de temps (p. ex. les technologies disponibles, les prix des ressources). Ainsi, l'évaluation de la base de réserves est volatile et ne semble pas appropriée pour évaluer la disponibilité des ressources.

Enseignements :

Afin d'identifier si l'ACV peut ou non permettre de réaliser un bilan matière, un travail sur 4 horizons de temps a été réalisé. Chaque scénario de transition énergétique a été construit à partir de données collectées par le scénario AIE ETP 2017 et complété par diverses sources de données (Annexe 3). Il est important de souligner la difficulté de construction d'inventaire et de modélisation dû à un manque de disponibilité des données ou à des données d'entrée de nature trop macroscopique rendant complexe l'adaptation des jeux de données des bases de données ACV.

A partir de cet inventaire chaque scénario a été modélisé dans un logiciel expert ACV afin d'identifier si un bilan matière peut ou non être établi. Ce travail a permis de mettre en lumière que la modélisation dans un logiciel expert ACV semble répondre à cet objectif, cependant la praticité de sortie des résultats est assez faible car ce type de logiciel est peu adapté à la réalisation d'études de type Material Flow Analysis (MFA). Un travail post sortie des résultats est obligatoire et chronophage afin de pouvoir interpréter les résultats bruts.

La réalisation d'une ACV de scénario de transition énergétique est un travail nécessitant un investissement important en termes de temps. La collecte des données, leur analyse et leur traitement, la recherche de données manquantes, la construction de scénarios, la détection des doubles comptages, la sollicitation d'experts pour valider les hypothèses, etc. sont des étapes chronophages.

L'ACV a permis de voir les conséquences de la prise en compte de l'évolution de la disponibilité des ressources dans le temps par la méthode Schneider et al. 2015 mise à jour. Il est à noter que l'incertitude des données prises en compte dans les scénarios entre dans le calcul des facteurs de caractérisation puisqu'ils prennent en compte les taux d'extraction par horizon de temps ainsi que les stocks anthropogéniques (calculés à partir des taux d'extraction). La robustesse des résultats ACV des scénarios de transitions énergétique dépend du choix des données d'inventaire de cycle de vie pour modéliser les scénarios de transition énergétique. Par ailleurs, bien que les scénarios prospectifs soient des trajectoires choisies par le modélisateur dont l'objectif n'est nullement de faire de la prévision chiffrée mais d'expliquer les trajectoires technologiques, il apparaît que l'évaluation d'impacts environnementaux potentiels engendrés par ces scénarios sont basés sur une incertitude fondamentale : la modélisation de technologies immatures ou inexistantes aujourd'hui qui seront utilisées dans plusieurs décennies, la quantification des effets des futures dégradations environnementales sur la future technosphère (p. ex. changement de l'irradiance solaire directe normale à horizon 2060).

Cette étude vise à démontrer la faisabilité de l'application de l'ACV à l'étude de scénarios de transition énergétique. Il en ressort que la conduite d'une ACV est possible, cependant les résultats obtenus sont soumis à de fortes incertitudes. Ces dernières n'ont pu être évaluées du fait de la difficulté de quantifier cette incertitude puisque les hypothèses peuvent concerner des périmètre temporels et spatiaux prospectifs. Comme le soulignait le rapport Vandepaer et Gibon 2018 (Vandepaer & Gibon, 2018), l'incertitude est peu étudiée dans les modèles prospectifs, cependant certains travaux sont en cours tels que présenté dans l'article Nicolas et al. 2016 (Nicolas, Tchung-Ming, & Hache, 2016). C'est un réel

challenge que d'évaluer la qualité des données prospectives. Cette étude souligne la nécessité de développements à venir sur les 4 étapes de l'ACV pour pouvoir prétendre à évaluer l'aspect environnemental des scénarios de transition énergétique par la méthode ACV de façon plus robuste. Le chapitre suivant aborde ces recommandations.

III. Recommandations pour l'application de l'ACV à l'évaluation d'un scénario de transition énergétique

1. Problématiques associées à l'étude

Les questions qui se posent dans le cadre de l'étude sont les suivantes :

- Quelles sont les limitations de l'ACV pour l'évaluation des scénarios de transition énergétique ?
- Quelles sont les adaptations à apporter à l'ACV pour l'évaluation de scénarios de transition énergétique ?

Afin d'évaluer les adaptations à réaliser pour la modélisation de scénarios de transition énergétique, nous repartons du déroulement prévu par la norme ISO 14040 de l'ACV, et nous mettons en regard de chacune des étapes les questions qui se posent (limitations) puis nous proposons des adaptations. L'ACV est classiquement structurée selon 4 phases itératives définies dans la norme ISO 14040 :2006. Ces 4 phases sont rappelées ci-dessous :

1. Définition des objectifs et du champ de l'étude

- Périmètre technologique et économique
- Représentativité
- Période de référence
- Zone géographique de référence
- Qualité des données
- Indicateurs et méthodes d'évaluation,
- Etc.

2. Analyse de l'inventaire

3. Evaluation de l'impact

4. Interprétation

Il s'agit ici d'identifier les questions qui se posent lorsque l'on considère l'évaluation de scénarios de transition énergétique avec l'ACV. Notamment, ce qui semble caractériser un scénario de transition énergétique au regard des questions qui peuvent se poser à un praticien ACV s'exprime dans les points suivants :

- Un horizon temporel étendu (quelques dizaines d'années)
- Des scénarios très largement prospectifs, reposant sur des hypothèses probables mais avec un haut niveau d'incertitudes
- Un manque de connaissances et donc de caractérisation des technologies futures, des niveaux de performances des différentes technologies/filières, des différents échanges de flux, stocks, etc.

Le tableau ci-dessous résume les questions qui se posent pour l'application de l'ACV aux scénarios de transition énergétique.

Tableau 52 : Application de l'ACV à un scénario de transition

Phase de l'ACV	Questions/problématiques qui se pose pour l'application aux scénarios de transition énergétique
Définition des objectifs et du champ de l'étude	• Analyse du Cycle de Vie Attributionnelle (ACVA) ou Analyse du Cycle de Vie Conséquentielle (ACVC) ? • ACV statique ou ACV dynamique ?
Analyse de l'inventaire	• Adaptation de la collecte de données à l'aspect prospectif des scénarios futurs

Evaluation des impacts	Adaptation de l'indicateur ressources aux objectifs de l'étude
Interprétation	Prendre en compte l'incertitude liée à l'inventaire et aux facteurs de caractérisation

Ces questions sont explicitées ci-après ainsi que les adaptations proposées (justification des choix). Suite à l'exposé des questions et problématiques posées par l'application de l'ACV aux scénarios de transition énergétique, nous proposons le filtre suivant pour les adaptations méthodologiques à envisager :



Pour chacune des questions ou problématiques identifiées ci-dessus, les adaptations respectives sont proposées en justifiant autant que possible la discrimination entre solutions théoriques et solutions faisables.

2. Etape 1 : définition des objectifs et du champ de l'étude

2.1. ACV attributionnelle ou conséquentielle ?

Compte-tenu du caractère prospectif des scénarios de transition énergétique et de leur implication sur l'ensemble de l'économie, la question de choisir entre ACV attributionnelle (ACVA) ou conséquentielle (ACVC) se pose. Théoriquement, étant donné que les conséquences générées par une transition énergétique affecteront l'ensemble des secteurs économiques (changements non marginaux), il conviendrait de réaliser une ACVC. Une ACV attributionnelle permet d'étudier un système technologique à un instant T figé dans le temps, c'est-à-dire le système en état de statuquo.

Logiquement, il conviendrait d'appliquer aux scénarios de transition énergétique une démarche ACVC car les conséquences du système étudié (en l'occurrence le système énergétique dans sa globalité offre/demande) affectent l'ensemble du système économique et ne peuvent être considérées comme des changements marginaux, ce qui est le critère de décision pour une ACVC.

Limitations

Dans une ACVC, il est primordial de définir de manière corrélée le contexte spatial, l'horizon temporel, ainsi que l'ampleur du changement et les mécanismes de substitution associés afin de pouvoir délimiter le champ d'étude et identifier les processus affectés par le changement, à prendre en compte dans l'inventaire. Comme abordé dans l'étude Score LCA A2012_01 (Guiton & Benetto, 2013), le fait d'associer la notion de « conséquentielle » à l'évaluation d'un changement implique que les résultats de l'ACV conséquentielle ne sont pas proportionnels à l'UF. Le fait de prendre en compte l'ampleur réelle du changement est donc primordiale et représente le premier élément distinctif de l'ACV conséquentielle. Cette notion peut être davantage précisée lorsqu'on considère le deuxième élément distinctif de l'ACV conséquentielle : la prise en compte des conséquences générées par le changement étudié. Pour réaliser une ACVC, il est indispensable de disposer des informations nécessaires concernant le contexte socio-économique et environnemental dans lequel il a lieu.

Influence des limitations sur les résultats obtenus

S'agissant de scénarios de transition, la dichotomie ACVA/ACVC n'a probablement pas lieu d'être car la définition de scénarios prospectifs inclut par construction (du moins devrait inclure) une étude conséquentielle.

Recommandations

En pratique, l'ACVC des scénarios de transition énergétique s'avère difficile à réaliser par manque de connaissances, et donc par manque de données pour la modélisation, des scénarios prospectifs futurs appliqués à l'ensemble des secteurs économiques. Cependant il est toujours possible de poser des hypothèses (même de faible qualité) et de réaliser un arbre de conséquences (choix des données qui seront considérées ou pas dans l'analyse) pour mener une ACVC.

Cependant comme expliqué précédemment la dichotomie ACVA/ACVC n'a pas lieu d'être car la définition de scénarios prospectifs inclut par construction une étude conséquentielle.

Adaptation et développements nécessaires

Il existe des couplages de modèle Input-Output à l'ACV qui sont prometteurs et qui permettraient de s'affranchir partiellement des contraintes de la collecte de données portant sur les effets indirects du scénario de transition énergétique. Cependant les données Input-Output ne sont pas détaillées au niveau des technologies, ni même des sous-secteurs et présentent une limite à l'utilisation pour évaluer les ressources consommées par les scénarios de transition énergétique.

2.2. Statique ou dynamique ?

L'étude SCORELCA 2015-01 (Alexandre & Bagard, 2016) a permis d'identifier les limites de la prise en compte du temps en ACV et notamment que "la réalisation d'une ACV dynamique n'est pas possible avec les logiciels ACV actuels".

L'ACV dynamique nécessite 2 éléments :

- La segmentation temporelle d'un jeu de données d'inventaire (cf. III. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**)
- La différenciation temporelle d'une méthode de caractérisation (cf. III. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**)

La question se pose de savoir si l'ACV doit être statique (i.e. modéliser un différentiel entre deux états à 2 périodes de temps différentes) ou dynamique (i.e. modélisant la phase de transition).

Limitations pratiques et méthodologiques

Une modélisation dynamique s'avère difficile voire impossible à réaliser pour trois raisons :

- D'une part la difficulté de modéliser un (des) scénario(s) d'évolution (dynamique de l'inventaire)
- D'autre part, le problème de la dynamique de la caractérisation des impacts (cf. les problématiques liées aux facteurs de caractérisation décrits ci-dessous)
- Enfin, le problème de la capacité des logiciels à intégrer cette modélisation dynamique. Les logiciels commerciaux ACV actuels ne permettent pas de réaliser une telle modélisation. Il faudrait avoir recours à des logiciels permettant cette approche dynamique (Brightway 2 ou OpenLCA...)

Cependant l'approche dynamique a en partie été appliquée due aux limitations pratiques et méthodologiques, on peut parler d'approche hybride :

- Segmentation temporelle d'un jeu de données d'inventaire : Découpage d'un jeu de données d'inventaire en intervalle de temps afin d'associer chaque émission à sa date d'émission. On peut parler de segmentation temporelle de l'inventaire à l'échelle du scénario de transition énergétique puisque que le scénario est donné pour un horizon de temps, une segmentation de l'inventaire année par année est alors nécessaire pour exprimer les impacts sur les années retenues.
- Différenciation temporelle partielle d'une méthode de caractérisation : Détermination de facteurs de caractérisation dépendant du temps écoulé depuis la date de d'émission/de consommation d'une ressource.

La figure ci-dessous, adaptée de l'étude SCORELCA 2015-01 (Alexandre & Bagard, 2016), présente les aspects temporels pris en compte dans la limite des possibilités actuelles où

(f) : flux de référence

(A) : échanges entre procédés/processus (exemple : consommation de x kg de pétrole)

(B) : échanges avec l'environnement (exemple : émissions dans les différents compartiments de l'environnement)

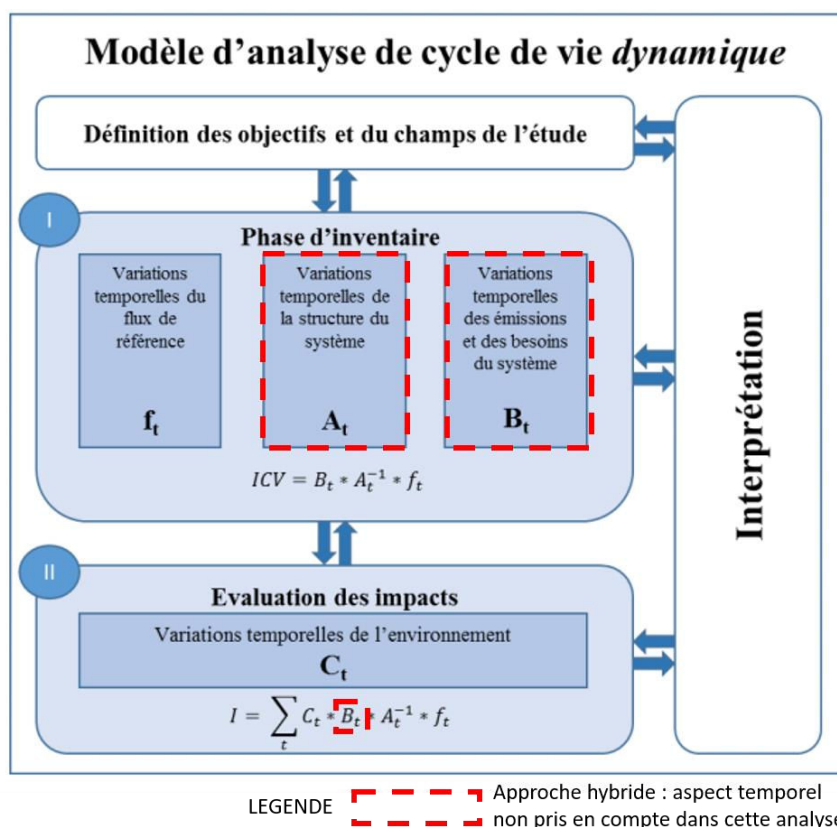


Figure 29 Segmentation temporelle des modèles de caractérisation utilisés lors de la phase de caractérisation

Influence des limitations sur les résultats obtenus

La non-prise en compte des aspects temporels est une source d'incertitude bien reconnue en Analyse du Cycle de Vie et trouve son origine dans 2 étapes d'une ACV. Elle est mentionnée comme une source de biais au sein de nombreux articles de revues scientifiques et même au sein de la norme ISO 14040. La problématique temporelle a deux grandes origines correspondant à deux grandes étapes du calcul des impacts du cycle de vie : l'inventaire et la caractérisation.

Recommandations

Il conviendrait logiquement, d'après les objectifs de l'étude, de réaliser une modélisation dynamique afin de vérifier l'absence d'éventuelles périodes de « rupture » dans la disponibilité des ressources (ruptures qui ne seront pas forcément observées avec une modélisation statique). Comme rappelé dans l'étude Score LCA A2012_01, l'approche dynamique permet de représenter l'évolution spécifique du système au cours du temps. Ainsi les impacts associés aux conséquences de l'évolution du système sont évalués à travers la considération de séries temporelles. Les séries temporelles représentent une suite d'observations du système, indexées par le temps. Elles peuvent être discrètes ou continues. On parlera de série temporelle discrète lorsque des paliers temporels intermédiaires sont fixés sur la période sur laquelle l'évolution du système est étudiée. Pour répondre pleinement à la question posée par l'étude, il conviendrait, en théorie de recourir à une approche dynamique de la modélisation ACV. Dans le cas de cette ACV nous avons réalisé l'analyse sur une série temporelle discrète avec 4 horizons de temps différents.

La solution envisagée ici serait d'avoir recours à une modélisation de plusieurs états, correspondants à des années distinctes dans le scénario de transition (série temporelle discrète).

Adaptation et développements nécessaires

Même si l'étude SCORELCA 2015-01 souligne la difficulté actuelle à prendre en compte la dimension temps avec les logiciels ACV actuels, il serait cependant possible de le faire par couplage avec d'autres logiciels. Par ailleurs, l'intérêt pour la prise en compte de l'aspect temporel connaît une importance

grandissante qui de facto va entraîner les bases de données et les logiciels ACV à adapter leur structuration et leur moteur de calcul. La réalisation d'un d'outil facilitant la réalisation d'ACV dynamique à moyen terme (5-10 ans) est très probable.

Coupler l'ACV et les modèles dynamiques permettrait de prendre en compte l'évolution technologique (amélioration technologique en énergie et consommation matière) et de pouvoir l'observer sur les impacts potentiels en résultant.

3. Etape 2 : analyse de l'inventaire

3.1. Ampleur de la collecte de données

L'ampleur de la collecte de données pour un scénario de transition énergétique dépend de la finesse avec laquelle la collecte est réalisée. L'ACV étant « goal-dependent », le choix de la qualité des données doit être fait en fonction des objectifs de l'étude. La modélisation d'un scénario de transition énergétique peut nécessiter des simplifications dans les choix méthodologiques (délimitation temporelle et spatiale du système) et dans l'inventaire. Cependant l'utilisation de modèle Input-Output pourrait permettre de pallier le manque de connaissances sur les technologies futures pour les scénarios de transition énergétique (ICV des technologies).

Comme le souligne l'étude SCORELCA 2014-04 (Majeau-Bettez et al., 2015), les méthodes ACV et Input-Output sont complémentaires et leur complémentarité peut être valorisée par hybridation : détail des produits et des technologies, meilleure couverture des enjeux environnementaux pour l'ACV, absence de troncature et d'exclusion pour l'EEIO. Cependant les données Input-Output ne sont pas détaillées au niveau des technologies, ni même des sous-secteurs.

Limitations pratiques et méthodologiques

Le couplage est relativement chronophage. La mise en œuvre de l'hybridation, en regard de l'analyse EEIO, est significativement plus longue. Si la correction pour le double comptage est partiellement automatisée, le processus d'hybridation devient plus accessible et le « retour sur l'investissement » s'avère proportionnellement plus intéressant. Attention aux doubles comptages lors de l'hybridation. Cependant l'utilisation de modèle Input-Output ne permet pas une différenciation par matériau et donc ne permettrait pas une caractérisation de la raréfaction des ressources.

Influence des limitations sur les résultats obtenus

Le temps passé à réaliser l'hybridation peut être une limite à son application. Par ailleurs les phénomènes de double comptage sont à éviter et pourraient surestimer les impacts de l'analyse. Enfin le manque de finesse des inventaires Input-Output (pas de flux par matériau) est une limite à son utilisation car ne répond pas à l'objectif de l'étude qui est l'analyse de scénarios de transition énergétique sur la raréfaction des ressources.

Recommandations

Le couplage n'est pas recommandé pour toutes les limitations précédemment citées.

3.2. Régionalisation de l'inventaire

Comme expliqué dans l'étude SCORELCA 2013-05 (Patouillard, Bulle, Maxime, Patreau, & Querleu, 2015), en ACV, la prise en compte de la dimension géographique peut se faire :

- Au niveau de l'inventaire (régionalisation de l'inventaire pour avoir une meilleure représentativité géographique des systèmes étudiés et spatialisation des flux élémentaires),
- Au niveau de l'évaluation des impacts pour prendre en compte la variabilité spatiale des milieux récepteurs pour caractériser l'impact (régionalisation de l'impact).

L'ILCD recommande de spatialiser les flux élémentaires dont l'impact dépend du lieu d'émission pour pouvoir ensuite utiliser des facteurs de caractérisation régionalisés. Pour l'ACV des scénarios de transition énergétique, la question de la régionalisation doit se poser dès le départ de l'étude (définition des objectifs). La régionalisation peut avoir un sens pour l'évaluation des scénarios de transition énergétique sur l'aspect ressource, si la question de la criticité est intégrée (localisation des

approvisionnements, etc.) pour cibler/localiser les risques potentiels (mais pas forcément de sens sur la question de la disponibilité de la ressource au niveau global).

Limitations pratiques et méthodologiques

Bien que l'intérêt de régionaliser l'approvisionnement en ressources (pays/site d'extraction) est évident dans un contexte géopolitique de raréfaction des ressources, il est cependant complexe d'accéder aux données détaillées. Aussi bien le lieu d'extraction que la chaîne de transformation, qui peut être multi-pays, peuvent rendre complexe la régionalisation.

Influence des limitations sur les résultats obtenus

Le problème d'accès aux données de la localisation de l'approvisionnement en ressources à l'étape d'inventaire que peut rencontrer le praticien ACV est une limite suffisante pour l'empêcher d'introduire une spatialisation des flux.

Recommandations

Pour les praticiens ACV : tant que des méthodes de caractérisation régionalisée des ressources n'existent pas, la différenciation spatiale des flux de ressources n'est pas nécessaire. Cependant l'information spatiale, si disponible, peut être recueillie dès à présent et en prévision de méthode applicable à moyen-long terme. Pour l'application de la spatialisation se référer au logigramme concernant la mise en œuvre réaliste par un praticien ACV de la régionalisation et la spatialisation de l'inventaire en ACV de l'étude SCORELCA 2013-05.

Adaptation et développements nécessaires

Pour les développeurs de logiciels ACV : proposer des logiciels ACV permettant de faciliter la spatialisation de flux, en permettant par exemple d'appliquer automatiquement le champ géographique d'un processus à ses flux élémentaires.

3.3. Cohérence des technologies décrites par le scénario de transition énergétique et les technologies disponibles dans la base de données ACV

Les inventaires scénarios de transition énergétique sont souvent rendus publics sous forme agrégée : toutes les technologies d'un même secteur ou d'un même groupe technologique. Les solutions technologiques des scénarios prospectifs et les classes technologiques des bases de données coïncident rarement.

Limitations pratiques et méthodologiques

Comme souligné dans le rapport du workshop « Integration of energy scenarios into LCA » (Vandepaer & Gibon, 2018), la correspondance des technologies se fait à la main et s'appuie sur le nom similaire des technologies de la base de données de l'ACV à celui donné dans le scénario de transition énergétique. Les modélisateurs de systèmes énergétiques, d'une part, et les praticiens d'ACV, d'autre part, n'ont généralement pas une connaissance approfondie de chaque technologie analysée et ne sont pas toujours en mesure de justifier correctement l'appariement. Les détails technologiques et géographiques sont parfois plus détaillés dans les bases de données d'ACV que les résultats des modèles prospectifs, ce qui nécessite une désagrégation. Ce travail peut prendre beaucoup de temps et il manque souvent des données adéquates.

De plus, la répartition entre diverses technologies d'une même typologie de production d'énergie peut être floue (ex : différentes technologies de panneaux solaires pour la production d'énergie photovoltaïque) comme indiqué par Vandepaer et Gibon 2018.

Il peut être dans certains cas complexe de faire les correspondances entre les ICV de technologies des modèles prospectifs agrégés avec des données détaillées de l'ICV.

Exemple

Scénario de transition énergétique	Données de la base de données ecoinvent 3.4
Hydro	Hydro, reservoir, alpine region Hydro, reservoir, non-alpine region Hydro, reservoir, tropical region Hydro, run-of-river

L'une des méthodes de désagrégation des données pouvant être appliquée par les praticiens peut être basée sur les parts de marché actuelles (basé par exemple sur les répartitions marché proposées dans la base de données ecoinvent), cependant cette désagrégation peut être chronophage, fautive pour des scénarios prospectifs (puisque les parts de marché de la base de données ecoinvent sont basées sur la situation actuelle et sont amenées à évoluer au fil des ans).

L'une des limites identifiées par le rapport du groupe de travail de Vandepaer et Gibon (Vandepaer & Gibon, 2018) concernant l'intégration de scénarios énergétiques prospectifs en ACV est également applicable à l'ACV de scénarios de transition énergétique et concerne plus globalement l'inconsistance des données d'inventaire : les hypothèses varient d'une publication à une autre (d'un scénario à un autre), certains secteurs sont considérés statiques alors qu'ils représentent de fortes contributions d'impacts et des évolutions potentielles importantes à long terme (ex : agriculture) , des technologies dans certains pays ne sont pas disponibles dans les bases de données actuelles alors que ces technologies y seront présentes dans le futur

Influence des limitations sur les résultats obtenus

Lorsque la correspondance est réalisée cela sous-entend l'introduction d'hypothèses par le praticien. Ces hypothèses augmentent le degré d'incertitude des résultats.

Recommandations

Il conviendra de rechercher des correspondances et des clés de répartitions sur les différentes alternatives énergétiques qui correspondent à une cohérence vis-à-vis du scénario proposé.

Aujourd'hui il n'existe pas de recommandations faisant consensus sur la correspondance des technologies des scénarios avec celles des bases de données. Le praticien choisira de façon manuelle et arbitraire la ou les technologies qui lui semblent le plus adaptées à son inventaire initial.

Adaptation et développements nécessaires

A court terme

- Création d'un référentiel avec des ensembles de données d'ICV sur les technologies émergentes, nouvelles et futures.
- Création d'un référentiel commun de métadonnées sur l'appariement des noms d'activités et de produits pour diverses sources de données : énergie, cuivre, matériaux de construction, émissions futures des technologies de production d'énergie ...
- La communauté scientifique travaillant sur les modèles prospectifs de scénario énergétique pourrait fournir des résultats plus désagrégés.

A moyen terme

En faisant l'hypothèse que l'étape court-terme a été réalisée et les partages et capitalisations l'ont également été, un groupe de travail pourrait mener à la définition de lignes directrices pour la correspondance des flux des modèles prospectifs avec les données des bases de données ACV comme proposé par Vandepaer et Gibon 2018, et au développement de logiciels pouvant modifier des ICVs à partir de modèles externes et des différents scénarios qu'ils contiennent (les logiciels openLCA et Brightway 2 sont cités pour leur type de licence open-source et leur transparence par la publication de Vandepaer et Gibon 2018).

3.4. Adapter la collecte de données pour la modélisation de technologies futures mal connues aujourd'hui

Limitations pratiques et méthodologiques

Un scénario de transition énergétique se caractérise par la définition de moyens de production/distribution/consommation d'énergie qui seront mis en œuvre dans le futur proche ou moyen, et dont certaines technologies sont encore mal définies voire non connues. De ce fait, leur modélisation ACV pose problème car, pour l'objectif considéré, elle requiert de connaître le contenu matière de ces moyens technologiques, ainsi que leur niveau de performance. En l'absence de connaissance de ces données, il convient d'adapter la collecte des données à l'aspect prospectif des scénarios en faisant appel à des dires d'experts, des méthodes d'extrapolation, des données de la littérature, des données de type Tableaux Entrées Sorties, etc.). Par ailleurs, le périmètre global (i.e. mondial) des scénarios de transition énergétique nécessite d'avoir accès à des données sur l'ensemble des régions considérées pour les différentes technologies. Pour cela le croisement de logiciel ACV avec des modèles Input/Output peut être un plus (par exemple Exiobase dans Hertwich et al., 2015).

Influence des limitations sur les résultats obtenus

La non prise en compte des technologies futures introduit une incertitude sur les résultats de l'ACV, potentiellement une surestimation des impacts puisque l'efficacité matière et énergie semble être en amélioration au cours du temps comme le montre la figure présentée par Olivier Vidal lors du workshop SCORELCA de cette étude.

Utiliser les processus et technologies actuelles pour estimer les impacts environnementaux n'est pas juste scientifiquement.

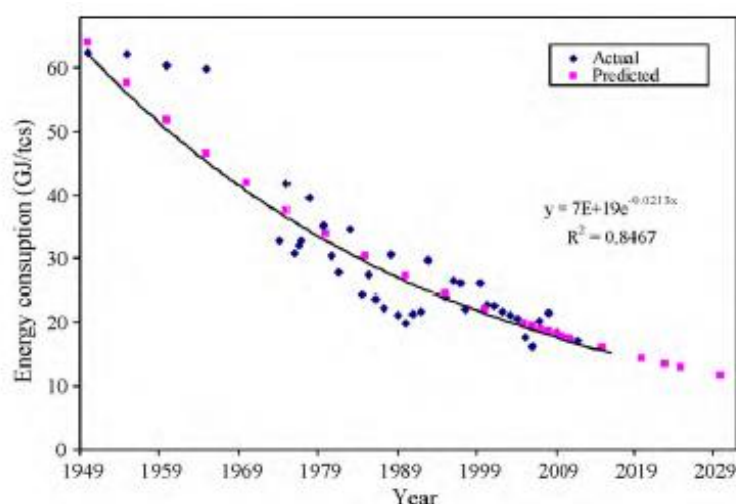


Fig. 5. Actual and projected specific energy consumption in the steel industry (world average).

Figure 30 : Consommation d'énergie dans l'industrie de l'acier : état actuel et projection (source Intervention workshop ScoreLCA, O. Vidal)

Recommandations

Face à la problématique de caractériser les technologies futures du point de vue de leur contenu matière et de leurs rendements, deux solutions semblent envisageables :

- Utiliser les données de la littérature existante sur les technologies futures (études prospectives, base de données NEEDS (ESU Services, 2008)...)
- Utiliser des données et règles d'extrapolation à dire d'expert

Adaptation et développements nécessaires

Coupler l'ACV et les modèles dynamiques permettrait de prendre en compte l'évolution technologique (amélioration technologique en énergie et consommation matière) et de pouvoir l'observer sur les impacts potentiels en résultant.

4. Etape 3 évaluation de l'impact : amélioration des méthodes de caractérisation

Limitations pratiques et méthodologiques

Les méthodes de caractérisation de l'indicateur « ressources » traitant de la disponibilité des réserves ne sont pas assez robustes et complètes pour répondre correctement à la question posée (l'état des stocks des différentes ressources permet-il d'envisager un scénario de transition énergétique ?) :

- Indicateur incomplet (couverture de l'ensemble des ressources)
- Indicateur non robuste (ne prend pas en compte toutes les dimensions de l'impact)
- Indicateur statique d'un point de vue temporel
- Indicateur non spatialisé

Il conviendrait donc d'adapter les méthodes de caractérisation des ressources en introduisant notamment dans les méthodes les notions de criticité, de stock anthropique, et de substituabilité.

Influence des limitations sur les résultats obtenus

Par exemple les enjeux de substituabilité et de recyclabilité ne sont généralement pas couverts et introduisent des biais dans l'étude.

Comme rappelé par Vandepaer et Gibon 2018, les méthodes de caractérisation ne sont pas valides scientifiquement pour des impacts ayant lieu dans le futur, les indicateurs avec horizon de temps devraient être réadaptés, les états de références réadaptés (ex concentration atmosphérique pour réchauffement climatique), de même que la pondération devrait être réadaptée.

Recommandations

Complétude des facteurs de caractérisation

Pour le praticien : il doit s'assurer que les substances ou matériaux couverts par l'inventaire le sont également par les facteurs de caractérisation de la méthode (surtout pour les ressources dites sensibles pour éviter des interprétations biaisées). Si ce n'est pas le cas, il est important autant que faire se peut de créer de nouveaux facteurs de caractérisation lorsqu'ils sont manquants.

Prise en compte du recyclage

La complexité du devenir des minéraux et des métaux (boucles de recyclages, stockage...) conduit à une mauvaise quantification des impacts puisque l'ensemble des flux du système n'est pas capturé : cela conduit à des erreurs d'interprétation quant à la raréfaction des ressources. Une approche plus détaillée telle que celle proposée par Graedel (Graedel, Allwood, et al., 2011b) permettrait de quantifier le recyclage selon trois indices et d'avoir une vision plus précise de l'influence du recyclage sur la raréfaction de la ressource.

Stock anthropogénique

Comme le précise Schneider et al. 2011, le stock anthropogénique de ressource est souvent négligé en ACV alors qu'il est déterminant pour un grand nombre de ressources.

Intégration de la criticité

L'étude ADEME-Payet 2015 (Cycleco, 2015) montre à quel point il est difficile d'intégrer une analyse de criticité dans une étude ACV. Il n'y a aucune corrélation entre l'information portée par l'analyse de criticité (basée sur l'étude de la criticité des matériaux publiés par la Commission Européenne en 2010

qui prend en compte les trois critères de criticité¹⁸) et la comparaison des impacts en termes de raréfaction des ressources (basé sur la méthode CML 2002). Ceci résulte principalement du fait que les deux approches ne couvrent pas le même périmètre, n'adressent pas les mêmes substances, et répondent à des questionnements différents. La méthode COMPOSITE développée et appliquée sur un cas d'étude dans l'étude ADEME-Payet 2015 apporte une solution à cette limite en introduisant la composante de stabilité des approvisionnements qui prend en considération des enjeux de criticité.

Régionalisation des facteurs de caractérisation

La régionalisation des impacts est le fait de calculer pour un même flux élémentaire des facteurs de caractérisation (FC) régionalisés représentatifs d'une zone géographique en prenant en compte la variabilité spatiale des paramètres et des mécanismes les plus influents pour un impact donné.

La régionalisation peut avoir un sens pour l'évaluation des scénarios de transition énergétique sur l'aspect ressource, si la question de la criticité est intégrée (localisation des approvisionnements, etc.) pour cibler/localiser les risques potentiels (mais pas forcément de sens sur la question de la disponibilité de la ressource au niveau global).

Adaptation et développements nécessaires

A court terme – amélioration continue

- **Complétude des facteurs de caractérisation :**
 - Pour les praticiens : choisir la méthode de caractérisation ayant la couverture la plus cohérente par rapport au périmètre de l'étude.
- **Lisibilité et communication des résultats :**

Les indicateurs ADP/AADP des méthodes étudiées dans ce rapport apportent des résultats difficilement interprétables et communicables pour des décideurs ou des politiques. Ces indicateurs sont avant tout utilisés par des scientifiques spécialistes de la méthode ACV. Il serait intéressant de mettre en place une échelle de valeurs de références pour l'interprétation et de travailler à d'autres approches de l'épuisement des ressources.

A court terme – travaux de recherche

- Afin de donner une vision plus réaliste de la disponibilité réelle d'une ressource, l'indicateur « ressource » (décrivant la disponibilité des ressources) pourrait être adapté pour intégrer 3 dimensions supplémentaires qui varient avec le temps et l'espace : la criticité de la ressource, le stock anthropique de la ressource, et sa substituabilité. En fonction de l'état des connaissances géologiques, économiques, et stratégiques, cela s'avère plus ou moins réalisable selon les ressources considérées. Il sera essentiel de définir en amont les termes criticité et stock anthropique (i.e. in use, hibernating, deposited et dissipated) (Schneider et al., 2011).
- **Facteurs de caractérisation dynamiques** : l'évaluation de scénarios de transition énergétique impose par définition de considérer des périodes temporelles relativement larges (plusieurs dizaines d'années). Du fait de l'évolution des différents stocks de ressources sur ces périodes, il conviendrait donc d'adapter les facteurs de caractérisation de disponibilité des ressources pour intégrer la dimension temporelle. Ce point est théoriquement réalisable mais se heurtera en pratique à deux écueils : d'une part la connaissance des données permettant la caractérisation temporelle, et d'autre part les difficultés calculatoires pour les logiciels (logiciels d'ACV commerciaux).
- **Régionalisation :**
 - Pour les praticiens : privilégier les méthodes de caractérisation régionalisées si l'inventaire est disponible pour l'exploiter.

¹⁸ 3 critères de criticité selon la Commission Européenne : l'importance économique, le risque d'approvisionnement et le risque environnemental.

- Pour les développeurs de méthodes de caractérisation : proposer des facteurs de caractérisation régionalisés si disponibles
- **Criticité et régionalisation** : l'intégration de la notion de criticité d'une ressource pour construire des facteurs de caractérisations (FC) plus robustes impose de régionaliser les inventaires et les FC, car la criticité est liée à la spécificité de chaque gisement en fonction de sa situation géopolitique. De même, la disponibilité d'un stock anthropique peut être liée à une zone géographique. Cette adaptation est faisable théoriquement mais se heurte à des problèmes de développement logiciel (pour les logiciels ACV commerciaux). On peut imaginer dans un premier temps de développer et d'utiliser des facteurs de criticité moyens représentatifs d'une situation mondiale.
- **Complétude des facteurs de caractérisation** : les facteurs de caractérisation pour la disponibilité des ressources étant pour l'instant limités à quelques ressources (une vingtaine), il conviendrait de compléter les FC pour toutes les ressources (Mancini et al., 2015; Schneider et al., 2011). D'un point de vue pratique, même si les données permettant de construire ces facteurs sont actuellement lacunaires, on peut toutefois raisonnablement imaginer le développement de facteurs de caractérisation « complets » (disponibilité géologique, stock anthropique, criticité, substituabilité) pour quelques ressources.

A moyen terme – amélioration continue

- Dans le rapport ADEME Payet 2015 la méthode COMPOSITE ne comporte que 8 facteurs de caractérisation et n'a été testée que sur un cas d'étude éolien. Il conviendrait d'attendre les développements méthodologiques futurs de cette méthode qui semble prometteuse face aux limitations abordées plus haut avant de recommander aux praticiens de l'appliquer. Cependant nous pouvons recommander aux praticiens de **rester en veille sur l'ensemble des développements méthodologiques concernant la caractérisation des ressources minérales en ACV**.
- Pour les praticiens : lors de l'interprétation des résultats, réaliser une analyse d'incertitudes sur la base des incertitudes associées aux facteurs de caractérisation

A moyen terme – travaux de recherche

- Pour les développeurs de méthodes de caractérisation : calculer et rendre disponible aux praticiens de façon transparente les incertitudes liées aux facteurs de caractérisation
- Afin d'améliorer la prise de décisions, il s'avère essentiel d'utiliser d'autres outils en complément pour combler les lacunes identifiées par l'évaluation de l'épuisement des ressources par l'ACV, ceci permettrait de prendre en compte des préoccupations relatives aux stocks, aux opportunités et aux risques et ainsi s'assurer que les décisions contribuent réellement à un avenir plus durable. L'évaluation de l'épuisement des ressources n'appartient pas au seul domaine de l'ACV - une approche intrinsèquement environnementale ne peut pas rendre justice à un problème qui est de nature sociopolitique et économique (van der Voet 2013). Comme le souligne Drielsma (Drielsma et al., 2016), l'approvisionnement durable est un enjeu socio-économique - affecté par les changements soudains de la demande, l'instabilité politique, les progrès de la technologie minière, les nouvelles découvertes de gisements, l'accès à la terre, etc. - qu'il est difficile de saisir dans les méthodes de caractérisation ACV.

5. Etape 4 interprétation : Incertitudes liées aux hypothèses

Limitations pratiques et méthodologiques

A priori il n'y a pas de difficulté méthodologique sur cette dernière étape, si ce n'est l'interprétation quant à la robustesse des résultats. Au mieux les ACV réalisent des analyses d'incertitudes sur la qualité de l'inventaire. Cependant sur des ACV de scénarios de transition énergétique il peut s'avérer difficile de quantifier cette incertitude puisque les hypothèses peuvent concerner des périmètre temporels et spatiaux prospectifs. Comme le soulignait le rapport Vandepaer et Gibon 2018, l'incertitude est très peu étudiée dans les modèles prospectifs, au mieux la variabilité l'est. C'est un réel challenge que d'évaluer la qualité des données prospectives.

Influence des limitations sur les résultats obtenus

La prise en compte des incertitudes permet d'apporter une interprétation des résultats plus juste en prenant du recul selon les incertitudes identifiées. La non intégration des incertitudes peut conduire à des interprétations erronées.

Recommandations

Aujourd'hui il n'existe aucune adaptation spécifique pour l'ACV de scénarios de transition énergétique. Pour les praticiens : conserver le suivi de l'inventaire des données afin de pouvoir quantifier l'incertitudes sur un maximum de données.

Adaptation et développements nécessaires

Dans l'hypothèse de la création d'un référentiel avec des ensembles de données d'ICV sur les technologies émergentes, nouvelles et futures (cf. III **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), les incertitudes de chaque jeu de données pourraient y être associées.

6. Synthèse

Le tableau ci-dessous reprend en synthèse l'ensemble des éléments exposés précédemment selon trois approches possibles pour améliorer l'évaluation d'un scénario de transition énergétique par l'ACV.

Tableau 53 : Recommandations pour l'amélioration de l'évaluation environnementale d'un scénario de transition par l'ACV

	Amélioration continue	Travaux de recherche court terme	Travaux de recherche moyen terme
Piste 1 : ACV attributionnelle ou conséquentielle	Réaliser une ACV attributionnelle : circonscrire l'objectif de l'étude à la question des technologies pour le STE et interpréter les résultats « toute chose égale par ailleurs ».	/	/
Piste 2 : Statique ou dynamique	Inventaire sur une série temporelle discrète et adaptation de quelques facteurs de caractérisation	Inventaire dynamique et utilisation d'un d'outil facilitant la réalisation d'ACV dynamique	/
Piste 3 : Ampleur de la collecte de données	Périmètre limité à la faisabilité actuelle de collecte de donnée	/	/
Piste 4 : Régionalisation de l'inventaire	Définition des échelles spatiales pertinentes et recueil des informations	Couplage SIG et ACV SI les méthodes de caractérisation et les outils permettent la réalisation à plein potentiel	/
Piste 5 : Cohérence des technologies entre le STE et les bases de données ACV	Recherche, choix et appariement manuel	Création d'un référentiel avec des ensembles de données d'ICV sur les technologies émergentes, nouvelles et futures. Création d'un référentiel commun de métadonnées sur l'appariement des noms d'activités et de produits Obtenir des modèles prospectifs avec des résultats plus désagrégés.	Définition de lignes directrices pour la correspondance des flux Développement de logiciels permettant de modifier des ICVs à partir de modèles externes et des différents scénarios qu'ils contiennent
Piste 6 : Recherche de données sur technologies futures mal connues aujourd'hui	Utiliser les données de la littérature existante Utiliser des données et règles d'extrapolation à dire d'expert	Coupler l'ACV et les modèles dynamiques permettrait de prendre en compte l'évolution technologique	/

Piste 7 : amélioration des méthodes de caractérisation	Choisir la méthode de caractérisation ayant la couverture la plus cohérente Rester en veille sur l'ensemble des développements méthodologiques concernant la caractérisation des ressources minérales en ACV	Utiliser d'autres outils en complément pour combler les lacunes identifiées par l'évaluation de l'épuisement des ressources par l'ACV Réaliser une analyse d'incertitudes sur la base des incertitudes qui seront associées aux futurs facteurs de caractérisation	Adapter l'indicateur « ressource » pour intégrer la criticité, le stock anthropique, et sa substituabilité dans le temps (Piste 2) et dans l'espace (Piste 4) Développer des facteurs de caractérisation manquants Développer les interprétations associées aux résultats d'impacts relatifs à l'épuisement des ressources, tel que considéré dans l'ACV
Piste 8 : Incertitudes liées aux hypothèses	Conserver le suivi de l'inventaire des données afin de pouvoir quantifier l'incertitude sur un maximum de données	Le référentiel commun (cf. piste 5) pourrait associer les incertitudes de chaque jeu de données	/

Ces éléments sont repris dans la figure ci-dessous selon une échelle de temps.

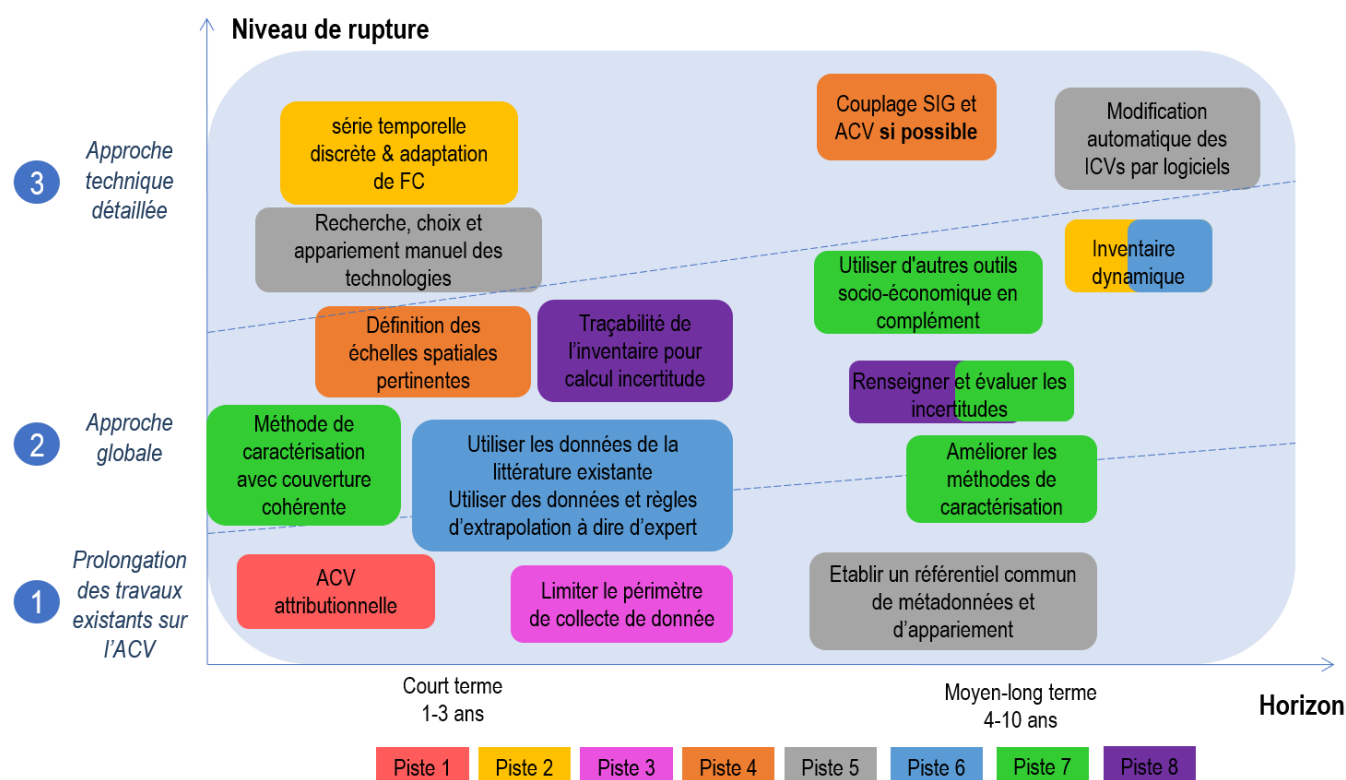


Figure 31 : Pistes de recherches à court et moyen terme pour l'amélioration de l'évaluation ACV d'un scénario de transition énergétique

IV. Conclusions

Face aux enjeux du développement durable et de lutte contre le réchauffement climatique, les stratégies se sont multipliées, à l'échelle internationale comme régionale, avec pour ambition d'élaborer des scénarios d'évolution permettant (en théorie) de limiter l'augmentation globale des températures. Les différents scénarios de transition énergétique ne représentent pas des prédictions, mais bien les actions à entreprendre pour atteindre un objectif fixé. Il apparaît que les différents scénarios disponibles à l'échelle internationale ont le même « grand objectif », à savoir limiter le réchauffement climatique, mais que les résultats attendus et les moyens pour y parvenir sont assez différents, que ce soit en termes d'émissions de CO₂ résultantes à l'horizon de chaque scénario, de consommation énergétique finale, d'intégration des énergies renouvelables, etc.

Dans ce contexte, le scénario de l'Agence Internationale de l'Energie intitulé *Energy Technology Perspectives 2017 (2DS)*, fait figure de référence au niveau international car il prend en compte de manière détaillée les émissions de différents secteurs d'activités. Il prévoit notamment une réduction de 70% des émissions annuelles de CO₂ du secteur énergétique par rapport au niveau actuel d'ici à 2060. Cependant, malgré le développement de scénarios de transition énergétique sophistiqués, il apparaît difficile d'appréhender la problématique de l'épuisement des ressources, notamment dans ce contexte de fort développement des énergies renouvelables. Les principaux enjeux pour évaluer les risques d'épuisement se concentrent autour de :

- L'évaluation du besoin en ressources, que ce soit pour les secteurs concernés par les transitions, mais aussi les autres secteurs d'activité ;
- L'évaluation des leviers de réduction de la demande en matière vierge (recyclage, substituabilité) ;
- L'identification de l'épuisement des gisements.

Ainsi, il est aujourd'hui difficile d'estimer s'il y a un réel risque d'épuisement des ressources dans les prochaines années, malgré une littérature grandissante sur le sujet. Les études identifient des séries de minerais pour lesquels des tensions semblent être prévisibles d'ici 2050, cependant ces minerais diffèrent selon les études. C'est pourquoi, il apparaît que l'Analyse du Cycle de Vie (ACV), en tant que méthodologie multicritère, a un rôle clé à jouer pour évaluer les impacts environnementaux des scénarios de transition, et notamment l'épuisement des ressources. L'ACV permet de « coupler » de manière précise, extensive et quantifiée les scénarios de transition et les flux de matière et d'énergie nécessaires à cette transition, et donc d'apporter une contribution importante au débat sur l'enjeu des ressources limitées.

Cependant, l'application de l'ACV au scénario ETP 2017 a mis en lumière différents freins à l'utilisation de l'ACV dans ce contexte prospectif de scénario de transition, à la fois méthodologique (ACV attributionnelle ou conséquentielle ?), relatifs à la disponibilité des données d'inventaire (évolution des technologies à horizon 2060 ?) ou encore à la caractérisation des impacts environnementaux (fiabilité des indicateurs d'épuisement des ressources disponibles dans un contexte prospectif ?).

Ainsi, bien que l'ACV permette aujourd'hui une première évaluation quantitative des besoins en ressources pour la transition et une caractérisation des impacts concernant leur épuisement, différents travaux complémentaires seront nécessaires afin de fiabiliser ce type d'analyse.

Annexe 1 - Bibliographie

- Alexandre, C., & Bagard, R. (2016). *Prise en compte de la dimension temps en ACV: état de l'art, recommandations et solutions pour une meilleure mise en oeuvre.*
- ANCRE. (2015, June). Ressources minérales et énergie - Rapport du groupe "Sol et sous-sol" de l'Alliance Ancre.
- BGR Energy Study. (2017, December). Data and developments concerning German and global energy supplies.
- Bohnes, F. A., Gregg, J. S., & Laurent, A. (2017). Environmental impacts of future urban deployment of electric vehicles : Assessment framework and case study of Copenhagen for 2016-2030
Environmental impacts of future urban deployment of electric vehicles : Assessment framework and case study of Copenhagen. *Environmental Science & Technology*.
<http://doi.org/10.1021/acs.est.7b01780>
- Bonnet, C., Carcanague, S., Hache, E., Seck, G. S., & Simoen, M. (2018). *Vers une géopolitique de l'énergie plus complexe?*
- BP. (2018). BP Energy Outlook 2018 edition, 12–15, 24–29, 34, 46–48, 120–121.
<http://doi.org/10.1088/1757-899X/342/1/012091>
- Comité des Métaux Stratégiques. (2018, April). Note de position sur la criticité des métaux pour l'économie française.
- Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards. (2014). *The SME guide for reporting exploitation results, mineral resources and mineral reserves*. Retrieved from
http://www.criirco.com/docs/2014_sme_guide_june_10_2014_appendix_a_update_march_2016.pdf
- Crowson, P. (2011). Mineral reserves and future minerals availability. *Mineral Economics*, 24(1), 1–6.
- Cycleco. (2015). *Analyse du cycle de vie de la production d'électricité d'origine éolienne en France.*
- Dandres, T. (2012). *Développement d'une méthode d'Analyse du Cycle de Vie conséquentielle prospective macroscopique: Evaluation d'une politique de bioénergie dans l'Union Européenne à l'horizon 2025.* Ecole Polytechnique de Montréal - Université de Montréal.
- Delduc, P., Phelep, M., & CEREMA. (2015). *Préconisations relatives à l'évaluation environnementale stratégique - Note méthodologique (hors document d'urbanisme).*
- Drielsma, J. A., Russell-Vaccari, A. J., Drnek, T., Brady, T., Weihed, P., Mistry, M., & Simbor, L. P. (2016). Mineral resources in life cycle impact assessment---defining the path forward. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(1), 85–105. <http://doi.org/10.1007/s11367-015-0991-7>
- ESU Services. (2008). *LCA of background processes. Deliverable D15.1, New Energy Externalities Developments for Sustainability (NEEDS) Integrated Project. (European Union Sixth Framework Programme, Brussels).*
- European Commission. (2018a). Better regulation toolbox. Retrieved from
https://ec.europa.eu/info/better-regulation-toolbox_en
- European Commission. (2018b, January). Report on Critical Raw Materials and the Circular Economy.
- Fizaine, F. (2014). *Analyses de la disponibilité économique des métaux rares dans le cadre de la transition énergétique.* Université de Bourgogne. Retrieved from <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01127141/document>
- Foxon, T., Hammond, G., & Pearson, P. (2010). Developing transition pathways for a low carbon electricity system in the UK. *Technological Forecasting and Social Change*, 77(8), 1203–1213.
- Geldron, A. (2017). L'épuisement des métaux et minéraux : faut-il s'inquiéter ?, 23.
- Goedkoop, M., Heijungs, R., De Schryver, A., Struijs, J., & van Zelm, R. (2013). *ReCiPe 2008: A LCIA method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. A life cycle impact* <http://doi.org/http://www.lcia-recipe.net>
- Graedel, T. E., Allwood, J., Birat, J.-P., Buchert, M., Hagelüken, C., Reck, B. K., ... Sonnemann, G. (2011a). *Recycling rates of metals: a status report.*
- Graedel, T. E., Allwood, J., Birat, J.-P., Buchert, M., Hagelüken, C., Reck, B. K., ... Sonnemann, G. (2011b). What Do We Know About Metal Recycling Rates? *Journal of Industrial Ecology*, 15(3), 355–366. <http://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00342.x>
- Graedel, T. E., Barr, R., Chandler, C., & Chase, T. (2011). Methodology of Metal Criticality Determination.
- Greenpeace. (2015). *Energy [R] Evolution. Energy [R]Evolution.* [http://doi.org/Energ \[R\]evolution](http://doi.org/Energ [R]evolution)
Greenpeace
- Guiton, M., & Benetto, E. (2013). *Analyse du Cycle de Vie conséquentielle: Identification des*

conditions de mise en oeuvre et des bonnes pratiques.

- Hache, E., Seck, G. S., Simoen, M., Bonnet, C., & Carcanague, S. (2019). Critical raw materials and transportation sector electrification: A detailed bottom-up analysis in world transport. *Applied Energy*, 240, 6–25. <http://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.02.057>
- Hache, E., Simoen, M., & Seck, G. S. (2018). *Electrification du parc automobile mondial et criticité du lithium à l'horizon 2050*.
- Hammond, G. P., Howard, H. R., & Jones, C. I. (2013). The energy and environmental implications of UK more electric transition pathways : A whole systems perspective. *Energy Policy*, 52, 103–116. <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.08.071>
- Harmsen, J. H. M., Roes, A. L., & Patel, M. K. (2013). The impact of copper scarcity on the efficiency of 2050 global renewable energy scenarios. *Energy*, 50, 62–73. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2012.12.006>
- Hertwich, E. G., Gibon, T., Bouman, E. A., Arvesen, A., Suh, S., & Heath, G. A. (2015). Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112(20). <http://doi.org/10.1073/pnas.1312753111>
- IFPEN, & IRIS. (2018). Développement des EnR: vers une géopolitique de l'énergie - L'IFPEN et l'IRIS lancent le projet GENERATE. Retrieved from <https://anr.fr/fileadmin/documents/2018/CP-Generate-IFPEN-IRIS-ANR-avril-2018.pdf>
- International Energy Agency. (2017). *Energy Technology Perspectives 2017*. IEA.
- L'Usine Nouvelle. (2018). *Les nouvelles matières critiques*. N°3569.
- Lepesant, G. (2018). La transition énergétique face au défi des métaux critiques, 56.
- Maïzi, N., & Assoumou, E. (2007). Exercices prospectifs via le modèle MARKAL : spécificités françaises ? *Energie et Développement Durable*, 89–96.
- Majeau-Bettez, G., Maxime, D., Patreau, V., Wood, R., Ivanova, D., & Arvesen, A. (2015). *La méthode Input-Output et son utilisation en ACV*.
- Mancini, L., Sala, S., Recchioni, M., Benini, L., Goralczyk, M., & Pennington, D. (2015). Potential of life cycle assessment for supporting the management of critical raw materials. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(1), 100–116. <http://doi.org/10.1007/s11367-014-0808-0>
- Marini, C., Blanc, I., sinha, parikh, & wade, andreas. (2014). A Prospective Mapping of Environmental Impacts of Large Scale Photovoltaic Ground Mounted Systems Based on the CdTe Technology at 2050 Time Horizon. In *29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition* (pp. 3394–3395). Amsterdam, Netherlands. <http://doi.org/10.4229/EUPVSEC20142014-5DV.3.38>
- Moreau, V., Dos Reis, P., & Vuille, F. (2019). Enough Metals? Resource Constraints to Supply a Fully Renewable Energy System. *Resources*, 8(1), 29. <http://doi.org/10.3390/resources8010029>
- Nicolas, C., Tchung-Ming, S., & Hache, E. (2016). *Energy transition in transportation under cost uncertainty- an assessment based on robust optimization*. Retrieved from <https://econpapers.repec.org/RePEc:drm:wpaper:2016-29>
- OCDE. (2018). *Global Material Resources Outlook to 2060: Economic drivers and environmental consequences*.
- Parlement Européen et Conseil de l'Union Européenne. (2001). Directive 2001/42/CE du Parlement européen et du Conseil du 27 juin 2001 relative à l'évaluation des incidences de certains plans et programmes sur l'environnement. Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:32001L0042&from=FR>
- Patouillard, L. (2018). *Régionalisation en Analyse du Cycle de vie: Analyse conséquentielle des filières alternatives pour le transport en France*. Ecole Polytechnique de Montréal - Université de Montréal et Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement (AgroParisTech).
- Patouillard, L., Bulle, C., Maxime, D., Patreau, V., & Querleu, C. (2015). *Prise en compte de la dimension géographique en ACV: intérêt et mise en oeuvre*.
- Pitron, G. (2018). *La guerre des métaux rares - La face cachée de la transition énergétique et numérique* (Les liens).
- Reale, F., Cinelli, M., & Sala, S. (2017). Towards a research agenda for the use of LCA in the impact assessment of policies. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 1477–1481. <http://doi.org/10.1007/s11367-017-1320-0>
- Roskill. (2017). Rare Earths: Tesla to use permanent magnet motors in Model 3 Long Range models. Retrieved from <https://roskill.com/news/rare-earths-tesla-use-permanent-magnet-motors-model-3-long-range-models/>
- Sala, S., Farioli, F., & Zamagni, A. (2013). Life cycle sustainability assessment in the context of

- sustainability science progress (part 2). *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(9), 1686–1697. <http://doi.org/10.1007/s11367-012-0509-5>
- Schneider, L., Berger, M., & Finkbeiner, M. (2011). The anthropogenic stock extended abiotic depletion potential (AADP) as a new parametrisation to model the depletion of abiotic resources. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16, 929–936.
- Schneider, L., Berger, M., & Finkbeiner, M. (2015). Abiotic resource depletion in LCA — background and update of the anthropogenic stock extended abiotic depletion potential (AADP) model. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(5), 13. <http://doi.org/10.1007/s11367-015-0864-0>
- Shell. (2018). Shell Scenarios: Sky - Meeting the goals of the Paris agreement, 72.
- Stamp, A., Wäger, P. A., & Hellweg, S. (2014). Linking energy scenarios with metal demand modeling – The case of indium in CIGS solar cells. *Resources, Conservation & Recycling*, 93, 156–167. <http://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.10.012>
- The Conversation. (2018). Pourquoi parle-t-on de « criticité » des matériaux ? Retrieved from <https://theconversation.com/pourquoi-parle-t-on-de-criticite-des-materiaux-105258>
- US Energy Information Administration. (2019). The basic metals industry is one of the world's largest industrial energy users. Retrieved from <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=38392>
- USGS. (2010). *Mineral Commodity Summaries*.
- USGS. (2015). *Mineral commodity summaries*. Washington: U S Govt. Printing Office.
- Vandepaer, L., & Gibon, T. (2018). The integration of energy scenarios into LCA. In *LCM2017 Conference Workshop, Luxembourg, September 5, 2017*.
- Vidal, O. Les besoins en ressources minérales pour la transition énergétique (2018).
- Vidal, O., Goffé, B., & Arndt, N. (2013). Metals for a low-carbon society. *Nature Geoscience*, 6(11), 894–896. <http://doi.org/10.1038/ngeo1993>
- World Bank Group. (2017, June). The Growing Role of Minerals and Metals for a Low Carbon Future. World Bank.
- World Energy Council. (2016). World Energy Scenarios 2016. *World Energy Council*, 1–138. <http://doi.org/ISBN: 978 0 946121 57 1>
- WWF. (2013). The energy report: 100% Renewable Energy by 2050.

Annexe 2 - Fiches des scénarios de transition énergétique

Energy Technology Perspective 2DS – AIE

Ambitions du Scénario																																																																																																																																																																																									
Le 2°C (2DS) est le scénario phare de "Energy Technology Perspectives" de l'AIE. Le 2DS établit une trajectoire de développement du système énergétique et une trajectoire d'émissions compatibles avec une probabilité d'au moins 50% de limiter l'augmentation moyenne de la température globale à 2°C avant 2100 . D'ici 2060 , les émissions annuelles de CO2 du secteur de l'énergie seront réduites de 70% par rapport aux niveaux actuels, avec des émissions cumulées d'environ 1 170 gigatonnes de CO2 (GtCO2) entre 2015 et 2100 (y compris les émissions des procédés industriels). Pour information, il existe également un autre scénario B2DS (trajectoire 1,5°C) plus ambitieux. [1]																																																																																																																																																																																									
Caractéristiques principales																																																																																																																																																																																									
Nature du développeur	☐ ONG	☒ Organisme international	☐ Organisme gouvernemental	☐	Secteur privé																																																																																																																																																																																				
Type de modélisation utilisé	☐ Top Down	☒ Bottom Up	☐ Hybride																																																																																																																																																																																						
Modèle utilisé	ETP-TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System) : <i>modèle technologique et dynamique d'optimisation sous contrainte</i> permettant d'examiner sur le long terme des technologies déjà disponibles ou en développement (de production, de transformation et de demande) pour 4 secteurs différents (Conversion de l'énergie, Industrie, Bâtiment, Transport), pour étudier leur impact sur l'offre, et la demande en énergie et les émissions de GES. [2] Il est ainsi possible à partir de données technico-économiques et d' hypothèses exogènes (demande, prix des ressources, taux d'actualisation, etc.) de fournir les évolutions des principaux déterminants du système énergétique : l'impact des prix de l'énergie à moyen et long terme, l'estimation des émissions de polluants, la simulation de différentes compétitions technologiques et économiques, les conséquences de politiques énergétiques ou encore l'effet de ruptures technologiques. [3]																																																																																																																																																																																								
Approche analytique	La modélisation et l'analyse ont pour objectif d'identifier la trajectoire économique pour que la société puisse arriver à ses fins, mais pour de nombreuses raisons, les résultats du scénario ne reflètent pas nécessairement l'idéal des coûts les plus bas : ce ne sont pas les technologies les moins coûteuses qui sont prises en compte. Aussi, l'analyse ne prend pas en compte les effets secondaires du changement climatique comme les coûts d'adaptation.																																																																																																																																																																																								
Horizon et pas temporel	Horizon 2060 . Le pas de temps entre les analyses est de 5 ans, sauf pour la classe « Conversion de l'énergie » qui est analysée toutes les 2 heures pour 4 journées types en fonction des saisons.																																																																																																																																																																																								
Périmètre géographique	Périmètre global avec 28 principaux pays et régions traités séparément : ASEAN, Brésil, Chine, UE, Inde, Mexique, Russie, Afrique du Sud et Etats-Unis etc...																																																																																																																																																																																								
Hypothèses du scénario																																																																																																																																																																																									
Hypothèses du scénario	La croissance économique et la croissance démographique sont deux hypothèses structurantes : elles sont constantes dans tous les scénarios. Le PIB mondial est multiplié par 3 entre 2017 et 2060. La population atteint 10 milliards d'habitants en 2060, contre 7,2 milliards en 2014.																																																																																																																																																																																								
	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="5">Croissance PIB (TCAM %)</th> <th colspan="6">Population en millions</th> </tr> <tr> <th>2014-20</th> <th>2020-30</th> <th>2030-40</th> <th>2040-60</th> <th>2014-60</th> <th>2014</th> <th>2020</th> <th>2030</th> <th>2040</th> <th>2050</th> <th>2060</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Monde</td> <td>4.2</td> <td>4.2</td> <td>3.5</td> <td>2.2</td> <td>2.9</td> <td>Monde</td> <td>7 255</td> <td>7 747</td> <td>8 490</td> <td>9 146</td> <td>9 714</td> <td>10 173</td> </tr> <tr> <td>OCDE</td> <td>2.4</td> <td>2.1</td> <td>1.9</td> <td>1.6</td> <td>1.8</td> <td>OCDE</td> <td>1 258</td> <td>1 297</td> <td>1 348</td> <td>1 381</td> <td>1 400</td> <td>1 407</td> </tr> <tr> <td>Non-OCDE</td> <td>5.5</td> <td>5.5</td> <td>4.2</td> <td>2.4</td> <td>3.5</td> <td>Non-OCDE</td> <td>5 997</td> <td>6 450</td> <td>7 143</td> <td>7 765</td> <td>8 314</td> <td>8766</td> </tr> <tr> <td>ASEAN</td> <td>5.8</td> <td>5.1</td> <td>3.9</td> <td>2.4</td> <td>3.4</td> <td>ASEAN</td> <td>623</td> <td>664</td> <td>721</td> <td>763</td> <td>788</td> <td>799</td> </tr> <tr> <td>Brésil</td> <td>-0.6</td> <td>3.3</td> <td>3.5</td> <td>2.0</td> <td>2.1</td> <td>Brésil</td> <td>206</td> <td>216</td> <td>229</td> <td>236</td> <td>238</td> <td>236</td> </tr> <tr> <td>Chine</td> <td>7.5</td> <td>5.7</td> <td>3.5</td> <td>1.6</td> <td>3.3</td> <td>Chine</td> <td>1 372</td> <td>1 405</td> <td>1 418</td> <td>1 398</td> <td>1 351</td> <td>1280</td> </tr> <tr> <td>UE</td> <td>2.3</td> <td>1.8</td> <td>1.6</td> <td>1.4</td> <td>1.5</td> <td>UE</td> <td>510</td> <td>513</td> <td>514</td> <td>511</td> <td>505</td> <td>495</td> </tr> <tr> <td>Inde</td> <td>9.1</td> <td>7.8</td> <td>6.0</td> <td>3.0</td> <td>5.0</td> <td>Inde</td> <td>1 295</td> <td>1 389</td> <td>1 528</td> <td>1 634</td> <td>1 705</td> <td>1745</td> </tr> <tr> <td>Mexique</td> <td>3.3</td> <td>3.9</td> <td>3.2</td> <td>1.9</td> <td>2.6</td> <td>Mexique</td> <td>120</td> <td>129</td> <td>142</td> <td>151</td> <td>156</td> <td>159</td> </tr> <tr> <td>Russie</td> <td>0.0</td> <td>2.9</td> <td>2.8</td> <td>1.7</td> <td>1.9</td> <td>Russie</td> <td>144</td> <td>143</td> <td>139</td> <td>133</td> <td>129</td> <td>125</td> </tr> <tr> <td>Afrique du Sud</td> <td>2.0</td> <td>3.1</td> <td>3.3</td> <td>2.2</td> <td>2.4</td> <td>Afrique du Sud</td> <td>54</td> <td>57</td> <td>60</td> <td>63</td> <td>66</td> <td>67</td> </tr> <tr> <td>Etats Unis</td> <td>2.8</td> <td>2.2</td> <td>2.2</td> <td>1.9</td> <td>2.0</td> <td>Etats Unis</td> <td>319</td> <td>333</td> <td>355</td> <td>373</td> <td>388</td> <td>403</td> </tr> </tbody> </table>							Croissance PIB (TCAM %)					Population en millions						2014-20	2020-30	2030-40	2040-60	2014-60	2014	2020	2030	2040	2050	2060	Monde	4.2	4.2	3.5	2.2	2.9	Monde	7 255	7 747	8 490	9 146	9 714	10 173	OCDE	2.4	2.1	1.9	1.6	1.8	OCDE	1 258	1 297	1 348	1 381	1 400	1 407	Non-OCDE	5.5	5.5	4.2	2.4	3.5	Non-OCDE	5 997	6 450	7 143	7 765	8 314	8766	ASEAN	5.8	5.1	3.9	2.4	3.4	ASEAN	623	664	721	763	788	799	Brésil	-0.6	3.3	3.5	2.0	2.1	Brésil	206	216	229	236	238	236	Chine	7.5	5.7	3.5	1.6	3.3	Chine	1 372	1 405	1 418	1 398	1 351	1280	UE	2.3	1.8	1.6	1.4	1.5	UE	510	513	514	511	505	495	Inde	9.1	7.8	6.0	3.0	5.0	Inde	1 295	1 389	1 528	1 634	1 705	1745	Mexique	3.3	3.9	3.2	1.9	2.6	Mexique	120	129	142	151	156	159	Russie	0.0	2.9	2.8	1.7	1.9	Russie	144	143	139	133	129	125	Afrique du Sud	2.0	3.1	3.3	2.2	2.4	Afrique du Sud	54	57	60	63	66	67	Etats Unis	2.8	2.2	2.2	1.9	2.0	Etats Unis	319	333	355	373	388	403
		Croissance PIB (TCAM %)						Population en millions																																																																																																																																																																																	
2014-20		2020-30	2030-40	2040-60	2014-60	2014	2020	2030	2040	2050	2060																																																																																																																																																																														
Monde	4.2	4.2	3.5	2.2	2.9	Monde	7 255	7 747	8 490	9 146	9 714	10 173																																																																																																																																																																													
OCDE	2.4	2.1	1.9	1.6	1.8	OCDE	1 258	1 297	1 348	1 381	1 400	1 407																																																																																																																																																																													
Non-OCDE	5.5	5.5	4.2	2.4	3.5	Non-OCDE	5 997	6 450	7 143	7 765	8 314	8766																																																																																																																																																																													
ASEAN	5.8	5.1	3.9	2.4	3.4	ASEAN	623	664	721	763	788	799																																																																																																																																																																													
Brésil	-0.6	3.3	3.5	2.0	2.1	Brésil	206	216	229	236	238	236																																																																																																																																																																													
Chine	7.5	5.7	3.5	1.6	3.3	Chine	1 372	1 405	1 418	1 398	1 351	1280																																																																																																																																																																													
UE	2.3	1.8	1.6	1.4	1.5	UE	510	513	514	511	505	495																																																																																																																																																																													
Inde	9.1	7.8	6.0	3.0	5.0	Inde	1 295	1 389	1 528	1 634	1 705	1745																																																																																																																																																																													
Mexique	3.3	3.9	3.2	1.9	2.6	Mexique	120	129	142	151	156	159																																																																																																																																																																													
Russie	0.0	2.9	2.8	1.7	1.9	Russie	144	143	139	133	129	125																																																																																																																																																																													
Afrique du Sud	2.0	3.1	3.3	2.2	2.4	Afrique du Sud	54	57	60	63	66	67																																																																																																																																																																													
Etats Unis	2.8	2.2	2.2	1.9	2.0	Etats Unis	319	333	355	373	388	403																																																																																																																																																																													

L'impact du changement climatique sur la croissance économique n'est pas traité par l'analyse ETP. Aussi, la structure économique ne varie que très peu entre les scénarios.

La variable principale du scénario est le **prix des énergies** notamment des ressources fossiles, qui augmente tout au long de la période à cause de la **demande énergétique mondiale croissante**. Les technologies et politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre ont cependant un impact considérable sur la demande, particulièrement en énergie fossiles.

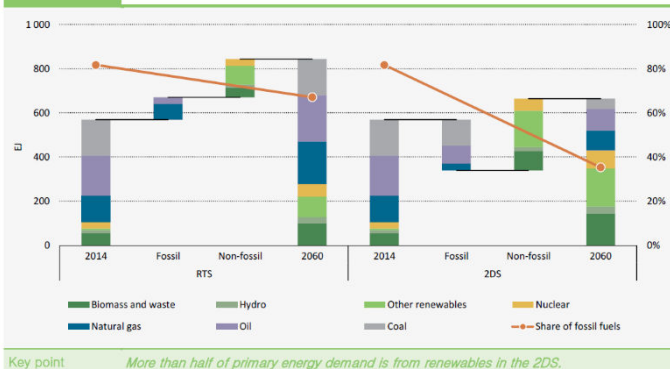
Table A.3. Fossil fuel prices by scenario

Oil (2015 USD/bbl)	Scenario	2015	2020	2030	2040	2050	2060
IEA crude oil import price	RTS	51	79	111	124	137	148
	2DS	51	73	85	78	72	67
	B2DS	51	73	66	64	62	60
Coal (2015 USD/t)	Scenario	2015	2020	2030	2040	2050	2060
OECD steam coal import price	RTS	64	72	83	87	90	92
	2DS	64	66	64	57	55	53
	B2DS	64	66	63	54	52	51
Gas (2015 USD/MBtu)	Scenario	2015	2020	2030	2040	2050	2060
United States price	RTS	2.6	4.1	5.4	6.9	8.9	10.7
	2DS	2.6	3.9	4.8	5.4	5.9	6.3
	B2DS	2.6	3.8	4.2	4.1	4.0	3.8
Europe import price	RTS	7.0	7.1	10.3	11.5	12.2	12.6
	2DS	7.0	6.9	9.4	9.9	10.2	10.5
	B2DS	7.0	6.7	8.2	7.7	7.2	6.9
Japan import price	RTS	9.7	9.6	11.9	12.4	12.8	13.2
	2DS	9.7	9.0	10.8	10.9	11.0	11.1
	B2DS	9.7	8.9	9.9	9.2	8.6	8.2

Notes: bbl = barrel; t = tonne; MBtu = million British thermal units.

Evolution de la demande en énergie primaire entre 2014 et 2060

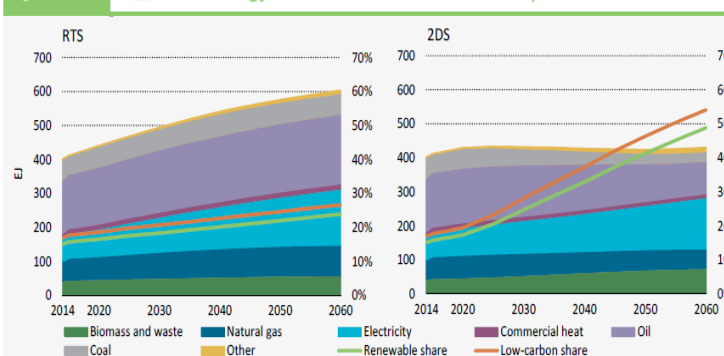
Figure 1.4. Global primary energy demand in the RTS and 2DS, 2014-60



Les sources d'énergie sont : les **énergies renouvelables** hors hydraulique et biomasse à **35%** (contre 1% en 2014), la **biomasse** à **29%** (contre 10% en 2014), le **pétrole** à **20%** (contre 32% en 2014), le gaz naturel à **18%** (contre 22% en 2014), le **nucléaire** à **17%** (contre 5% en 2014), le **charbon** à **9%** (contre 30% en 2014) et l'**hydraulique** à **6%** (contre 2,5% en 2014). Les énergies fossiles représentent 35% de la demande en énergie primaire en 2060, contre 82% en 2014.

Mix énergétique mondial en 2060

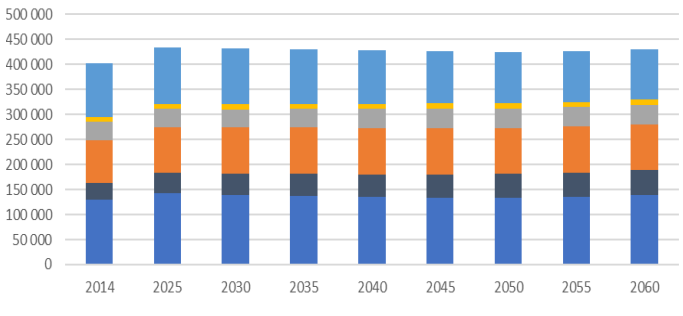
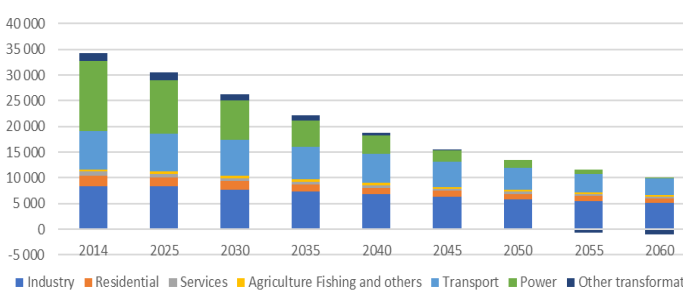
Figure 1.5. Final energy demand in the RTS and 2DS, 2014-60



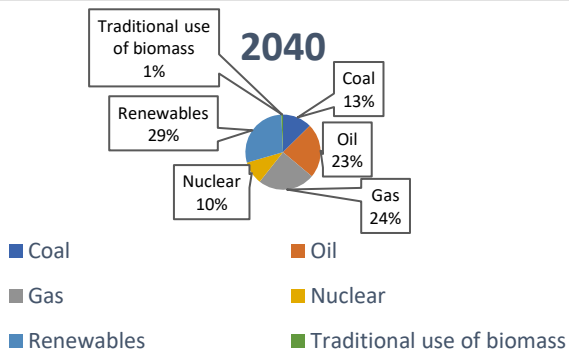
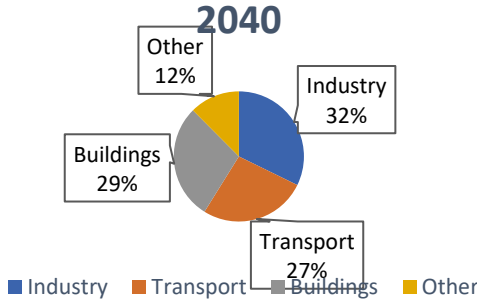
Dans le scénario 2°C, plus de la moitié (**56%**) de la **demande énergétique finale mondiale est satisfaite par des sources bas-carbone** (dont énergies renouvelables) en 2060, alors qu'en 2014 cette part était d'environ 17%. Les énergies fossiles représentent 44% du mix d'énergie finale consommée.

Trajectoires énergétiques et d'émissions par secteur

SCENARIOS DE TRANSITION ENERGETIQUES : FORCES ET FAIBLESSES DE L'ACV DANS UNE PERSPECTIVE DE RESSOURCES LIMITEES

Final Energy Demand (PJ)  ■ Industry ■ Industry non energy use ■ Residential ■ Services ■ Agriculture Fishing and others ■ Transport	Dans le scénario 2°C, la consommation globale d'énergie en 2060 (430 457 PJ), serait 6% plus élevée qu'en 2014 (401 817 PJ) principalement à cause de l'augmentation de l'usage de produits pétroliers comme matières premières dans la pétrochimie et à la consommation d'énergie dans l'industrie pour satisfaire la demande croissante des produits industriels (ciment, acier, papier etc.).
Direct CO2 emissions (Mt CO2)  ■ Industry ■ Residential ■ Services ■ Agriculture Fishing and others ■ Transport ■ Power ■ Other transform	Dans le scénario 2°C, les émissions globales de CO₂ diminueraient de 61% entre 2014 (34 254 MtCO₂) et 2060 (8 975 MtCO₂), principalement grâce à la décarbonation de l'électricité (- 89%), du transport (-42%) et de l'industrie (-31%). Une grande partie de cette réduction serait obtenue grâce à l'utilisation de technologies de capture et de stockage du carbone (6 645 MtCO₂ stockés en 2060) dans l'industrie et la production de l'électricité.
Références [1] <u>Energy Technology Perspectives 2017</u>, International Energy Agency, 2017 [2] <u>Exercices prospectifs via le modèle MARKAL : spécificités françaises ?</u>, Nadia Maïzi et Edi Assoumou, ENS Cachan, 2007 [3] <u>Modélisation MARKAL pour la planification énergétique long terme dans le contexte français</u>, Edi Assoumou, 2006	

Sustainable Development Scenario (SDS) – AIE

Ambitions du Scénario				
Ce scénario est compatible avec les objectifs de l'Accord de Paris , avec un pic d'émissions atteint dès que possible (SDG13). Un de ses objectifs principaux est de permettre un accès universel à l'énergie grâce notamment à des technologies bas-carbone (SDG7). C'est la première fois que ce scénario est publié dans le World Energy Outlook (WEO).				
Caractéristiques principales				
Nature du développeur	☐ ONG	☒ Organisme International	☐ Organisme gouvernemental	☐ Secteur privé
Type de modélisation utilisé	☐ Top Down	☒ Bottom Up	☐ Hybride	
Modèle utilisé	World Energy Model			
Horizon/Périmètre	2040 avec point de passage en 2025. Périmètre global.			
Hypothèses du scénario				
Hypothèses du scénario	La population mondiale atteint 9,1 milliards d'habitants en 2040. La croissance annuelle du PIB mondiale est estimée à 3,7% entre 2016 et 2025 et 3,3% entre 2025 et 2040.			
Mix énergétique mondial en 2040				
 2040 - Coal 13% - Oil 23% - Gas 24% - Nuclear 10% - Renewables 29% - Traditional use of biomass 1%		En 2040, les énergies renouvelables représenteraient près de 29% du mix énergétique (37% pour l'hydraulique, 32% pour l'éolien, 20% pour le solaire photovoltaïque, 7% pour la biomasse, 3% pour la géothermie et une infime part d'énergie marine) tandis que la part pour les énergies fossiles serait de 61% (24% pour le gaz, 23% pour le pétrole, et 13% pour le charbon).		
Consommation d'énergie finale par secteur en 2040				
 2040 - Industry 32% - Buildings 29% - Transport 27% - Other 12%		Le secteur consommant le plus d'énergie finale est le secteur de l'industrie une part à 32%, suivi du secteur du bâtiment (résidentiel et tertiaire) à 29%, et des transports à 27%.		
Références				
[1] <u>World Energy Outlook 2017</u> , International Energy Agency, 2017				

Faster transition (2018) – BP

Ambitions du Scénario																																															
Issu du « BP's Energy Outlook 2018 », ce scénario considère une hausse rapide des prix du carbone, avec des mesures politiques qui encourageant des gains d'efficacité d'énergétique à court-terme et une moindre utilisation des énergies fossiles.																																															
Caractéristiques principales																																															
Nature du développeur	☐ ONG	☐ Organisme International	☐ Organisme gouvernemental	☒	Secteur privé																																										
Type de modélisation utilisé	☐ Top Down	☒ Bottom Up	☐ Hybride																																												
Modèle	Non spécifié.																																														
Horizon/Périmètre	2040. Périmètre global avec détail par région (Afrique, Chine, Inde, Autres pays d'Asie, OCDE, et Autres).																																														
Hypothèses du scénario																																															
Hypothèses du scénario	Le scénario est porté par les politiques climatiques et les avancées concernant les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique.																																														
Mix énergétique primaire mondial en 2040																																															
<table border="1"><caption>Primary Energy Mix 2040 (Billion tonnes of oil equivalent)</caption><thead><tr><th>Scenario</th><th>Oil</th><th>Gas</th><th>Coal</th><th>Nuclear</th><th>Hydro</th><th>Other</th></tr></thead><tbody><tr><td>Actual energy mix 2016</td><td>33%</td><td>24%</td><td>28%</td><td>4%</td><td>7%</td><td>4%</td></tr><tr><td>Evolving transition 2040</td><td>27%</td><td>26%</td><td>21%</td><td>21%</td><td>2%</td><td>2%</td></tr><tr><td>Faster transition 2040</td><td>25%</td><td>22%</td><td>13%</td><td>7%</td><td>8%</td><td>5%</td></tr><tr><td>Even faster transition 2040</td><td>22%</td><td>19%</td><td>10%</td><td>8%</td><td>8%</td><td>5%</td></tr></tbody></table>			Scenario	Oil	Gas	Coal	Nuclear	Hydro	Other	Actual energy mix 2016	33%	24%	28%	4%	7%	4%	Evolving transition 2040	27%	26%	21%	21%	2%	2%	Faster transition 2040	25%	22%	13%	7%	8%	5%	Even faster transition 2040	22%	19%	10%	8%	8%	5%	Les trois sources d'énergie principales sont : le pétrole à 25% (contre 33% en 2016), les énergies renouvelables à 25% (contre 4% en 2016), et le gaz naturel à 22% (contre 24% en 2016). Les autres sources sont le charbon à 13% (contre 28% en 2016), l'hydraulique à 8% (contre 4% en 2016) et enfin le nucléaire à 7% (contre 4% actuellement).									
Scenario	Oil	Gas	Coal	Nuclear	Hydro	Other																																									
Actual energy mix 2016	33%	24%	28%	4%	7%	4%																																									
Evolving transition 2040	27%	26%	21%	21%	2%	2%																																									
Faster transition 2040	25%	22%	13%	7%	8%	5%																																									
Even faster transition 2040	22%	19%	10%	8%	8%	5%																																									
Emissions de GES en 2040																																															
<table border="1"><caption>Carbon Emissions (Billion tonnes CO2)</caption><thead><tr><th>Year</th><th>ET</th><th>ICE ban</th><th>Less gas switching</th><th>RE push</th><th>FT</th><th>EFT</th></tr></thead><tbody><tr><td>1970</td><td>15</td><td>15</td><td>15</td><td>15</td><td>15</td><td>15</td></tr><tr><td>2010</td><td>30</td><td>30</td><td>30</td><td>30</td><td>30</td><td>30</td></tr><tr><td>2020</td><td>33</td><td>33</td><td>33</td><td>33</td><td>33</td><td>33</td></tr><tr><td>2030</td><td>35</td><td>35</td><td>35</td><td>35</td><td>35</td><td>25</td></tr><tr><td>2040</td><td>35</td><td>35</td><td>35</td><td>35</td><td>35</td><td>18</td></tr></tbody></table>			Year	ET	ICE ban	Less gas switching	RE push	FT	EFT	1970	15	15	15	15	15	15	2010	30	30	30	30	30	30	2020	33	33	33	33	33	33	2030	35	35	35	35	35	25	2040	35	35	35	35	35	18	Le scénario FT table sur une réduction importante des émissions de GES d'ici à 2040, de 33 GtCO2 actuellement à 25 GtCO2.		
Year	ET	ICE ban	Less gas switching	RE push	FT	EFT																																									
1970	15	15	15	15	15	15																																									
2010	30	30	30	30	30	30																																									
2020	33	33	33	33	33	33																																									
2030	35	35	35	35	35	25																																									
2040	35	35	35	35	35	18																																									
Références																																															
[1] Advancing the energy transition, BP, 2018																																															

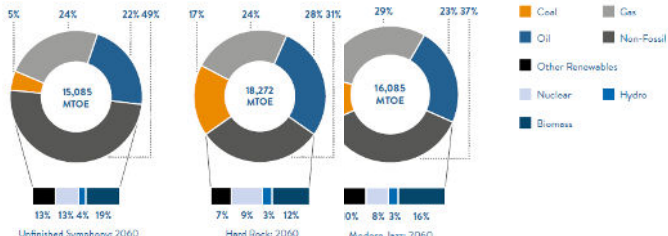
Energy [R]evolution (E[R])- Greenpeace

Ambitions du Scénario	
L'objectif principal de ce scénario est de décarboner autant que possible le système énergétique global d'ici 2050.	
Caractéristiques principales	
Nature du développeur	☒ ONG ☐ Organisme International ☐ Organisme gouvernemental ☐ Secteur privé
Type de modélisation utilisé	☐ Top Down ☒ Bottom Up ☐ Hybride
Modèle utilisé	Mesap/PlaNet.
Horizon/Périmètre	2050. Périmètre global avec détail pour les régions suivantes : Amérique Latine, Afrique, Asie-Océanie OCDE, Chine, Inde, Autres pays d'Asie, Europe de l'Est/Eurasie, Europe OCDE, Moyen-Orient, et Amérique du Nord OCDE
Hypothèses du scénario	
Hypothèses du scénario	La population atteint 9,5 milliards d'habitants en 2050 et la croissance économique est de 3,1%/an en moyenne sur la période 2012-2050.
Mix énergétique primaire mondial en 2050	
FIGURE 6.1.14 GLOBAL: PROJECTION OF TOTAL PRIMARY ENERGY DEMAND (PED) BY ENERGY CATEGORY - REFERENCE, ENERGY [R]EVOLUTION, ADVANCED ENERGY [R]EVOLUTION SCENARIOS	En 2050, la consommation d'énergie primaire diminue de 19% par rapport à la consommation de 2012, et est divisée par 2 par rapport au scénario de référence pour la même année. La part d'énergie renouvelable en 2050 est de 76% et est principalement composée de géothermie, solaire photovoltaïque, de biomasse et d'éolien. Aucune centrale nucléaire n'est construite sur la période dans le scénario Energy [R]evolution.
Consommation d'énergie finale par secteur en 2050	
FIGURE 6.1.2 GLOBAL: PROJECTION OF TOTAL FINAL ENERGY DEMAND BY SECTOR - REFERENCE, ENERGY [R]EVOLUTION, ADVANCED ENERGY [R]EVOLUTION SCENARIOS WITHOUT NON-ENERGY USE AND HEAT FROM CHP AUTOPRODUCTION	La consommation d'énergie finale diminue de 19% par rapport à la consommation de référence de 2012 d'ici à 2050.
Références	
[1] Energy [r]evolution, A sustainable World Energy Outlook 2015, 100% Renewable Energy For All, Greenpeace, GWEC, Solar Power Europe, 2015 [2] https://www.energyplan.eu/othertools/national/mesap-planet/	

Sky – Shell

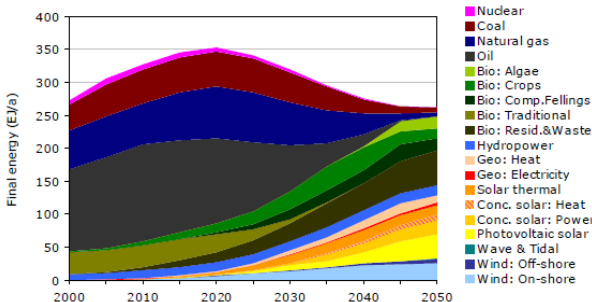
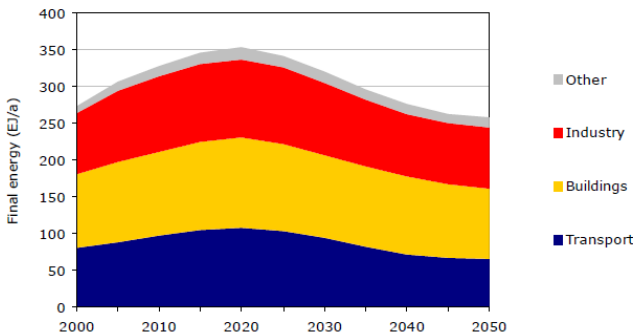
Ambitions du Scénario						
Le scénario Sky est le plus récent et le plus ambitieux des 3 scénarios principaux de Shell avec Mountains et Oceans. Il considère que la société agit suffisamment pour atteindre les objectifs de l'Accord de Paris . La neutralité carbone du système énergétique serait atteinte d'ici 2070 afin de limiter la hausse de température à moins de 2°C d'ici 2100 .						
Caractéristiques principales						
Nature du développeur	☐ ONG	☐ Organisme International	☐ Organisme gouvernemental	☒	Secteur privé	
Type de modélisation utilisé	☐ Top Down	☒ Bottom Up	☐ Hybride			
Modèle utilisé	Integrated Global System Modelling (IGSM) du MIT : il est utilisé afin d'analyser les changements environnementaux globaux causés par les humains.					
Horizon/Périmètre	Horizon 2070. Le périmètre géographique du scénario est global avec un détail par zone géographique (Europe, Asie, Afrique, et Amérique du Nord).					
Hypothèses du scénario						
Hypothèses du scénario	L'hypothèse principale du scénario est l'atteinte de l'objectif de l'Accord de Paris de ne pas dépasser 2°C de hausse de température globale d'ici 2100 .					
Mix énergétique primaire mondial en 2070						
IN A NET-ZERO EMISSIONS WORLD IN 2070, SOLAR, BIOENERGY, AND WIND DOMINATE RENEWABLES SUPPLY WHILST OIL REMAINS THE LARGEST FOSSIL ENERGY SOURCE. Source: Shell analysis				La principale source d'énergie primaire en 2070 est l'énergie solaire avec une part à 32% du mix énergétique mondial, suivi de la biomasse représentant 14%, de l'éolien 13% puis du nucléaire avec une part à 11%. Les énergies fossiles représentent 22% du mix : 10% pour le pétrole, 6% pour le gaz naturel et 6% pour le charbon. Les centrales thermiques fossiles sont dotées de technologies de CCS (Carbon Capture & Storage) : en 2070, 12 Gt CO2 seraient séquestrées et stockées.		
Consommation d'énergie finale par secteur en 2070						
WORLD TOTAL FINAL ENERGY CONSUMPTION BY SECTOR IN SKY Source: Shell analysis				Le secteur consommant le plus énergie et le secteur du bâtiment (résidentiel et tertiaire) à 30%, suivi des transports à 28,5% et de l'industrie à 27%.		
Références						
[1] Sky, Shell Scenarios, Meeting the goals of the Paris agreement, Shell, 2018						

World Energy Scenarios - World Energy Council

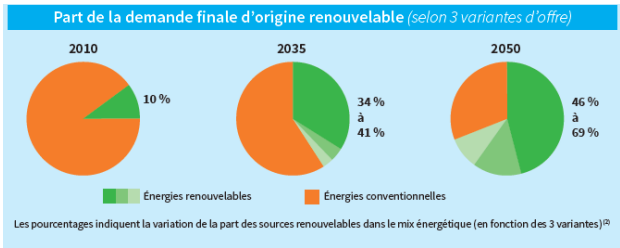
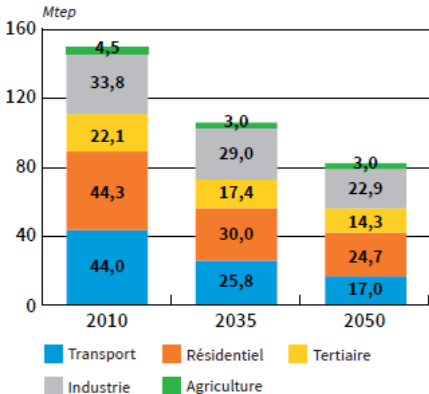
Ambitions du Scénario																																					
Le World Energy Council a développé 3 scénarios compatibles avec la limitation de la température à moins de 2°C d'ici à 2100 (1000 GtCO2 évitées), avec 3 manières différentes d'y parvenir : Modern Jazz, Unfinished Symphony, et Hard Rock.																																					
Caractéristiques principales																																					
Nature du développeur	☐ ONG	☒ Organisme International	☐ Organisme gouvernemental	☐ Secteur privé																																	
Type de modélisation utilisé	☐ Top Down	☒ Bottom Up	☐ Hybride																																		
Modèle utilisé	Global Multi-Regional MARKAL Model (GMM), développé par le World Energy Council. Il fait partie des modèles MARKAL, permettant d'identifier la combinaison de technologies les moins coûteuses permettant à l'offre de répondre à la demande, en utilisant un algorithme d'optimisation.																																				
Horizon/Périmètre	2060. Global avec détail pour 15 régions du Monde dont Brésil, Chine, Union Européenne, Inde, Russie et Etats-Unis.																																				
Hypothèses des 3 scénarios																																					
Hypothèses des 3 scénarios	La population augmente de 40% d'ici à 2060 par rapport à 2014. Modern Jazz (croissance économique de +3,3%) : Economie ouverte et libérale, numérique levier de croissance important, technologie omniprésente, et mondialisation complexe Unfinished Symphony (croissance économique de +2,9%) : Croissance intelligente, économie circulaire, coopération internationale et régionale forte, politiques centrées sur le climat Hard Rock (croissance économique de +1.7%) : Développement local, croissance plus faible, et sécurité énergétique enjeu majeur des énergies renouvelables																																				
Mix énergétique primaire mondial en 2060																																					
 <table border="1"><thead><tr><th>Scenario</th><th>Coal</th><th>Oil</th><th>Gas</th><th>Other Renewables</th><th>Nuclear</th><th>Biomass</th><th>Hydro</th></tr></thead><tbody><tr><td>Unfinished Symphony 2060</td><td>5%</td><td>24%</td><td>22%</td><td>49%</td><td>13%</td><td>4%</td><td>19%</td></tr><tr><td>Hard Rock 2060</td><td>17%</td><td>24%</td><td>28%</td><td>31%</td><td>7%</td><td>9%</td><td>12%</td></tr><tr><td>Modern Jazz 2060</td><td>29%</td><td>23%</td><td>37%</td><td>0%</td><td>8%</td><td>3%</td><td>16%</td></tr></tbody></table>			Scenario	Coal	Oil	Gas	Other Renewables	Nuclear	Biomass	Hydro	Unfinished Symphony 2060	5%	24%	22%	49%	13%	4%	19%	Hard Rock 2060	17%	24%	28%	31%	7%	9%	12%	Modern Jazz 2060	29%	23%	37%	0%	8%	3%	16%	La demande en énergie primaire croît dans les 3 scénarios, dans cet ordre croissant : Unfinished Symphony (+10%), Modern Jazz (+18%) et Hard Rock (+34%). Pour le scénario Unfinished Symphony, les sources décarbonées représentent 50% de la demande en énergie primaire, tandis que les énergies fossiles et notamment gaz naturel occupe une place plus importante dans le scénario Modern Jazz (29% du mix total), et encore davantage dans le scénario Hard Rock où le charbon continue d'occuper une place importante (17% du mix total).		
Scenario	Coal	Oil	Gas	Other Renewables	Nuclear	Biomass	Hydro																														
Unfinished Symphony 2060	5%	24%	22%	49%	13%	4%	19%																														
Hard Rock 2060	17%	24%	28%	31%	7%	9%	12%																														
Modern Jazz 2060	29%	23%	37%	0%	8%	3%	16%																														

Consommation d'énergie finale par secteur en 2060 (scénario Unfinished Symphony)																									
FIGURE 37: HARD ROCK TOTAL FINAL CONSUMPTION OF ENERGY BY SECTOR (MTOE) <table><thead><tr><th>Year</th><th>Industry (%)</th><th>Transport (%)</th><th>Residential/Commercial (%)</th><th>Non Energy Use (%)</th><th>Total (MTOE)</th></tr></thead><tbody><tr><td>2014</td><td>28%</td><td>29%</td><td>34%</td><td>9%</td><td>9,395</td></tr><tr><td>2030</td><td>28%</td><td>31%</td><td>32%</td><td>9%</td><td>11,625</td></tr><tr><td>2060</td><td>28%</td><td>31%</td><td>30%</td><td>11%</td><td>13,717</td></tr></tbody></table> ■ Industry ■ Transport ■ Residential/Commercial ■ Non Energy Use Source: The World Energy Council, Paul Scherrer Institute, Accenture Strategy	Year	Industry (%)	Transport (%)	Residential/Commercial (%)	Non Energy Use (%)	Total (MTOE)	2014	28%	29%	34%	9%	9,395	2030	28%	31%	32%	9%	11,625	2060	28%	31%	30%	11%	13,717	La consommation d'énergie finale est de 13 717 Mtoe, soit une hausse de 46% par rapport à 2014. Le secteur le plus énergivore en 2060 est le secteur de l'industrie avec 31%, suivi du résidentiel/tertiaire avec 30%, des transports avec 28% et enfin les usages non énergétiques représentent 11%.
Year	Industry (%)	Transport (%)	Residential/Commercial (%)	Non Energy Use (%)	Total (MTOE)																				
2014	28%	29%	34%	9%	9,395																				
2030	28%	31%	32%	9%	11,625																				
2060	28%	31%	30%	11%	13,717																				
Références																									
[1] <u>World Energy Scenarios, The Grand Transition</u>, World Energy Council, 2016																									

Ecofys Energy Scenario – WWF

Ambitions du Scénario						
Le scénario a pour objectif d’atteindre un mix énergétique où les énergies renouvelables occuperaient 95% d’ici à 2050. L’électrification du mix énergétique est un facteur-clé de ce scénario.						
Les trois objectifs principaux sont : réduire la demande en énergie au minimum permettant de fournir un service énergétique suffisant, fournir de l’énergie par de l’énergie renouvelable si possible localement, et fournir le reste de l’énergie par des sources les plus propres possibles.						
Caractéristiques principales						
Nature du développeur	☒ ONG	☐ Organisme International	☐ Organisme gouvernemental	☐ Secteur privé		
Type de modélisation utilisé	☐ Top Down	☒ Bottom Up	☐ Hybride			
Modèle	Modèle interne.					
Horizon/Périmètre	2050. Global avec détail pour 10 régions du Monde : Europe, Amérique du Nord, Amérique Latine, Russie/Autres pays d’Eurasie, Moyen-Orient, Pacifique OCDE, Chine, Inde, Autres pays d’Asie et Afrique.					
Hypothèses du scénario						
Hypothèses du scénario	La population atteint près de 9 milliards d’habitants en 2050. Le PIB mondial est quasiment multiplié par 3 entre 2010 et 2050.					
Mix énergétique mondial en 2050						
				La consommation d’énergie finale passe de 327,6 EJ/an en 2010 à 261,4 EJ/an en 2050, soit une diminution de 20%. Les principales sources utilisées en 2050 sont la biomasse (40%), le solaire photovoltaïque et thermodynamique (22%) et l’éolien (12%). Les énergies fossiles sont devenues minoritaires (5%).		
Consommation d’énergie finale par secteur en 2050						
				<i>Les données brutes de ce graphique ne sont pas disponibles.</i> Ce scénario montre qu’il est possible de réduire la demande en énergie tout en fournissant davantage de services énergétiques à une population croissante, grâce à des technologies de plus en plus efficace énergétiquement. La demande énergie est stabilisée puis réduite pour atteindre un niveau proche des années 2000.		
Figure 3 - 1 Global energy demand across all sectors, from 2000 to 2050.						
Références						
[1] The Energy Report, 100% Renewable Energy By 2050, WWF, Ecofys, 2011						

Visions 2050 – ADEME

Ambitions du Scénario	
Le scénario a pour objectif d'atteindre la division par quatre des émissions de gaz à effet de serre sur le périmètre France en 2050 (Facteur 4). Un ensemble de solutions technologiques et organisationnelles sont mises en œuvre pour atteindre l'objectif du Facteur 4 en fonction de critères de performance technique et de maturité des technologies. Le levier « social » ou « mode de vie » a été mobilisé sur les sujets socio-économiques afin de poser des hypothèses « normatives » raisonnables.	
Caractéristiques principales	
Nature du développeur	☐ ONG ☐ Organisme International ☒ Organisme gouvernemental ☐ Secteur privé
Type de modélisation utilisé	☒ Top Down ☐ Bottom Up ☐ Hybride
Modèle	ThreeME : modèle macroéconomique multisectoriel d'évaluation des politiques énergétiques et environnementales, développé par l'OFCE dans le cadre des travaux avec la DGEC.
Horizon/Périmètre	2050. Périmètre France uniquement.
Hypothèses du scénario	
Hypothèses du scénario	La croissance annuelle du PIB entre 2010 et 2050 varie entre 1,4% et 1,7% : elle reste donc modérée et à long terme, elle ne retrouve pas le niveau d'avant crise. La population totale évolue entre +0.2 et +0.5% par année, donc à un rythme plus faible sous l'effet du vieillissement.
Mix énergétique français en 2050	
 Part de la demande finale d'origine renouvelable (selon 3 variantes d'offre) 2010: 10 % 2035: 34 % à 41 % 2050: 46 % à 69 % ■ Énergies renouvelables ■ Énergies conventionnelles Les pourcentages indiquent la variation de la part des sources renouvelables dans le mix énergétique (en fonction des 3 variantes)^[2]	Sur l'ensemble du mix énergétique, en fonction des sous-scénarios, les énergies renouvelables représentent entre 46 et 69% de la demande d'énergie finale en 2050. Les énergies renouvelables électriques sont prépondérantes dans ce mix : éolien et solaire photovoltaïque sont les principales sources. La biomasse (agricole, forestière et déchets) est aussi très sollicitée pour la production d'énergie thermique. Le stockage inter-saisonnier (grâce au Power To Gas, procédé utilisant l'hydrogène injecté sur les réseaux de gaz), permet d'atteindre des taux d'énergies renouvelables dans le mix électrique pouvant atteindre 80% dans l'un des 3 scénarios.
Consommation d'énergie finale par secteur en 2050	
 Mtep 2010: 44,0 (Transport), 44,3 (Résidentiel), 22,1 (Tertiaire), 33,8 (Industrie), 4,5 (Agriculture) 2035: 25,8 (Transport), 30,0 (Résidentiel), 17,4 (Tertiaire), 29,0 (Industrie), 3,0 (Agriculture) 2050: 17,0 (Transport), 24,7 (Résidentiel), 14,3 (Tertiaire), 22,9 (Industrie), 3,0 (Agriculture) ■ Transport ■ Résidentiel ■ Tertiaire ■ Industrie ■ Agriculture	La demande d'énergie finale diminue de 45% entre 2050 et 2010, notamment grâce une baisse très importante de la consommation d'énergie du secteur des transports (forte décarbonation grâce à l'électrification des véhicules et les carburants renouvelables) et du résidentiel/tertiaire.
Références	
[1] <i>Visions 2030-2050</i>, Document Technique, ADEME, 2013 [2] <i>Actualisation du scénario énergie-climat 2035-2050</i>, ADEME, 2017	

Annexe 3 – Inventaire du cycle de vie pour l'ACV test

Légende couleur

	Données issues de la bibliographie ou hypothèses : données initiales
	Données calculées : données intermédiaires
	Données calculées et servant à la modélisation : données finales

Mix énergétiques

Les technologies de la BDD ecoinvent ont été conservées sans modifier les inventaires (pas de WB2017). Aucune donnée "ocean " n'a pu être modélisée : pas de données disponibles dans les BDD

Source : Données IEA ETP 2017	2015	2025	2040	2060	
Oil	1033	579	219	76	TWh
Coal	9697	7135	727	8	TWh
Coal with CCS*	0	51	2025	1944	TWh
Natural gas	5155	6 669	5 095	2 067	TWh
Natural gas with CCS*	0	4	779	1 437	TWh
Nuclear	2535	3 750	6 110	7 545	TWh
Biomass and waste	496	1 341	2 575	2 538	TWh
Biomass with CCS*	0	4	181	1030	TWh
Hydro (excl. pumped storage)	3895	5 157	6 618	8 512	TWh
Geothermal	77	223	619	1 229	TWh
Wind onshore	692	2484	5431	7458	TWh
Wind offshore	25	222	1052	2678	TWh
Solar PV PV Silicium	190	1140	3254	8736	TWh
Solar PV PV non Silicium					TWh
Solar CSP	8	146	1572	4527	TWh
Ocean	1	7	121	876	TWh
Other		0	0	0	TWh
Total (TWh)	23804	28912	36378	50661	TWh
Total (hors ocean) (Twh)	23803	28905	36257	49785	TWh

On crée alors un mix électrique pour chaque horizon en fonction des données précédentes

	2015	2025	2040	2060
	Pour 1 kWh fournit en 2015	Pour 1 kWh fournit en 2025	Pour 1 kWh fournit en 2040	Pour 1 kWh fournit en 2060
Oil	4%	2%	1%	0%
Coal	41%	25%	2%	0%
Coal with CCS*	0%	0%	6%	4%
Natural gas	22%	23%	14%	4%
Natural gas with CCS*	0%	0%	2%	3%
Nuclear	11%	13%	17%	15%
Biomass and waste	2%	5%	7%	5%
Biomass with CCS*	0%	0%	0%	2%

Hydro (excl. pumped storage)	16%	18%	18%	17%
Geothermal	0%	1%	2%	2%
Wind onshore	3%	9%	15%	15%
Wind offshore	0%	1%	3%	5%
Solar PV PV Silicium	1%	4%	9%	18%
Solar PV PV non Silicium	0%	0%	0%	0%
Solar CSP	0%	1%	4%	9%
Ocean	0%	0%	0%	2%
Other	0%	0%	0%	0%

Consommation électrique annuelle pour chaque horizon

	2015	2025	2040	2060
Total en TWh	23 804	28 912	36 378	50 661

CO₂ capture par technologie CCS

Quantité de CO2 capturé par la techno CCS					Source : Données ETP IEA 2017
CO2 captured (Mt CO2)	2 015	2 025	2 040	2 060	Commentaires
Industry	0	292	981	1 620	le CO2 capturé par l'industrie et "other transformation" est pris en compte directement dans le processus scénario, celui du secteur power l'est dans le processus dédié au secteur power
Power	0	50	2 157	3 234	
Other transformation	0	73	649	1 792	

Calcul des longueurs de pipeline additionnelles par année pour le CCS

L'hypothèse du Global CCS Institute a été retenue pour calculer les distances de pipelines nécessaires

	Global CCS insitute	IEA GHG average (hypothèse non retenue)
Pipeline lenght per stored CO2 (km/MtCO2)	96	78

secteur Power	2015	2 025	2 040	2 060
CO2 capt (Mt)	0	50	2 157	3 234
infra necessaire (km)	0	4 804	206 181	309 086
infra pipeline additionnelle par an (km)	0	480	13 425	5 145

secteur industriel + "other transformation"	2015	2 025	2 040	2 060
co2 capt (Mt)	0	366	1 631	3 412
infra necessaire	0	34 984	155 872	326 109
infra pipeline additionnelle par an (km)	0	3 498	8 059	8 512

Secteur Power :Infrastructure additionnelles

Les infrastructures des sources de production d'énergie ont été modélisées de 2 façons différentes:

- Pour les données d'énergie éolienne, solaire, provenant de la biomasse, du nucléaire, du gaz, de la géothermie et de l'hydroélectrique les infrastructures additionnelles ont été modélisées à part (cf colonne processus ecoinvent appelés (sur la base des capacités additionnelles calculées ci-dessous)).
- Pour les données d'énergie provenant de "coal, lignite, peat et oil" les infrastructures additionnelles sont directement appelées par l'amortissement faisant parti de la fiche processus du kwh d'énergie issu de ces sources (cf. colonne processus ecoinvent)

	Source : Données IEA ETP 2017	Données ETP pour 2015	Données ETP pour 2025	Données ETP pour 2040	Données ETP pour 2060	Commentaires
Oil	Capacité installée (GW)	442,00	397,00	204,00	391,00	lorsque la valeur est négative cela signifie qu'il n'y a pas de nouvelles infrastructures: une valeur nulle a été prise en compte dans la modélisation
	Capacité additionnelle (GW)	-4,50	-4,50	-12,87	9,35	
Coal	Capacité installée (GW)	1760,00	1796,00	523,00	25,00	
	Capacité additionnelle (GW)	3,60	3,60	-84,87	-24,90	
Natural gas	Capacité installée (GW)	1639,00	1943,00	1975,00	1899,00	
	Capacité additionnelle (GW)	30,40	30,40	2,13	-3,80	
Nuclear	Capacité installée (GW)	398,00	529,00	835,00	1022,00	
	Capacité additionnelle (GW)	13,10	13,10	20,40	9,35	
Biomass and waste	Capacité installée (GW)	131,00	291,00	525,00	858,00	
	Capacité additionnelle (GW)	16,00	16,00	15,60	16,65	
Hydro (excl. pumped storage)	Capacité installée (GW)	1044,00	1413,00	1831,00	2386,00	
	Capacité additionnelle (GW)	36,90	36,90	27,87	27,75	
Geothermal	Capacité installée (GW)	12,00	32,00	86,00	12,00	
	Capacité additionnelle (GW)	2,00	2,00	3,60	-3,70	
Wind onshore	Capacité installée (GW)	341,00	1114,00	2406,00	3376,00	
	Capacité additionnelle (GW)	70,27	70,27	86,13	48,50	
Wind offshore	Capacité installée (GW)	9,00	62,00	266,00	656,00	
	Capacité additionnelle (GW)	4,82	4,82	13,60	19,50	
Solar PV	Capacité installée (GW)	178,00	885,00	2354,00	6394,00	
	Capacité additionnelle (GW)	64,27	64,27	97,93	202,00	
Solar CSP	Capacité installée (GW)	7,00	60,00	407,00	1033,00	
	Capacité additionnelle (GW)	5,30	5,30	23,13	31,30	
Ocean	Capacité installée (GW)	1,00	3,00	37,00	279,00	<i>Non pris en compte</i>

	Capacité additionnelle (GW)					
--	-----------------------------	--	--	--	--	--

capacité installée GW	2015	2 025	2 040	2 060	Commentaires
Oil	Infrastructure modélisée par les infrastructures amorties dans les procédés de consommation d'énergie				
Coal					
Natural gas					
Nuclear	13,10	13,10	20,40	9,35	cf données ci-dessous partie "Nucléaire"
Biomass and waste	16,00	16,00	15,60	16,65	"Furnace, wood chips, with silo, 5000kW {GLO} market for Cut-off, U" et "Heat and power co-generation unit, organic Rankine cycle, 1000kW electrical {GLO} market for Cut-off, U"
Hydro (excl. pumped storage)	36,90	36,90	27,87	27,75	47% de "Hydropower plant, réservoir {CA_QC} market for Cut-off, U" et 53% de "Hydropower plant, run-of-river {CA-QC} hydropower plant construction, run-of-river Cut-off, U" pourcentage basé sur hypothèse ecoinvent
Geothermal	2,00	2,00	3,60	-3,70	
Wind onshore	70,27	70,27	86,13	48,50	Donnée IEA ETP 2017 corrigée par ADEME sur terres rares cf ci-dessous partie "Wind"
Wind offshore	4,82	4,82	13,60	19,50	
Solar PV	64,27	64,27	97,93	202,00	Adaptation des procédés ci-dessous (énergie mise à zéro): Photovoltaic slanted-roof installation, 3kWp, single-Si, laminated, integrated, on roof {CH} photovoltaic slanted-roof installation, 3kWp, single-Si, laminated, integrated, on roof Cut-off, U Photovoltaic slanted-roof installation, 3kWp, multi-Si, panel, mounted, on roof {CH} photovoltaic slanted-roof installation, 3kWp, multi-Si, panel, mounted, on roof Cut-off, U Photovoltaic slanted-roof installation, 3kWp, a-Si, panel, mounted, on roof {CH} photovoltaic slanted-roof installation, 3kWp, a-Si, panel, mounted, on roof

					Cut-off, U Photovoltaic slanted-roof installation, 3kWp, CdTe, laminated, integrated, on roof {CH} photovoltaic slanted-roof installation, 3kWp, CdTe, laminated, integrated, on roof Cut-off, U Photovoltaic slanted-roof installation, 3kWp, CIS, panel, mounted, on roof {GLO} photovoltaic slanted-roof installation, 3kWp, CIS, panel, mounted, on roof Cut-off, U
Solar CSP	5,30	5,30	23,13	31,30	from data primarily from Moss et al 2011, only silver content estimated : basé sur composition matière kg/MW IEA
Ocean	Non pris en compte				

Nucléaire

Ratio kg/MW source data primarily from Moss et al. 2011, cited in Needs	
	kg/MW
Cadmium	0,50
Chromium	427,00
cobalt	0,00
copper	5906,00
hafnium	0,50
indium	1,60
lead	4,30
molybdenum	20 à 71
nickel	256,00
niobium	2,00
silver	8,30
steel	
tin	4,60
titanium	1,50
tungsten	5,00
vanadium	0,60
yttrium	0,50
zirconium	30,50

Eolien

Source : Données IEA ETP 2017

Capacité installée (MW)	2014	2 025	2030	2 035	2040	2045	2050	2055	2060
Wind onshore	340,80	1 114,06	1 713,58	2 142,00	2 405,68	2 590,48	2 869,67	3 101,35	3 376,19
Wind offshore	8,76	62,49	125,94	196,96	265,75	334,73	410,26	516,22	655,52

On calcule les infrastructures additionnelles par année (en MW)

Scénario (différence)	2015	2025	2040	2060
Wind onshore (MW)	70	70	86,11	48,53
Wind offshore (MW)	5	5	13,55	19,49

On détermine la composition matière des éoliennes

Plusieurs sources de données :	https://www.vestas.com/~media/vestas/about/sustainability/pdfs/lca_v112_study_report_2011.pdf				
Material classification data for 33 wind turbines of 3 MW	Ratio per MW	unité	Câbles pour le parc éolien, le poste de transformation et pour la connexion au réseau électrique (pour 100 MW)	Ratio per MW	unité
Steel and iron materials (+ alloyed)	81,7	tonnes	Steel and iron materials (+ alloyed)	0,46	tonnes
Iron	21,9	tonnes			
Aluminium	1,1	tonnes	Aluminium	0,951	tonnes
Copper (and alloys)	1,6	tonnes	Copper	0,2	tonnes
Zinc alloys	0,0001	tonnes			
Special metals	30,3	grammes			

Polymer	7,3	tonnes	Polymer	0,194	tonnes
Modified organic natural materials	0,1	tonnes	Modified organic natural materials	0,03	tonnes
Ceramic/glass	8,0	tonnes	Ceramic/glass	0,005	tonnes
Other materials and material compounds	1,0	tonnes	Lubricants	0,13	tonnes
Electronics	0,3	tonnes			
Electrics	0,3	tonnes			
Magnets	0,2	tonnes			
Lubricants	0,4	tonnes			

Autre source de données : IEA ETP 2017

https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Wind_2013_Roadmap.pdf

TABLE A.1 Metals Used in Wind Turbine Manufacturing

Metal	Range of estimates (kilograms/megawatt)	Notes
Aluminum (Al)	Unknown	—
Boron (B)	0.8–7.0	Lower estimate is for high–medium speed turbines; higher estimate is for low-speed turbines.
Chromium (Cr)	789–902	—
Copper (Cu)	1,140–3,000	—
Dysprosium (Dy)	2.8–25.0	Lower estimate is for high–medium speed turbines; higher estimate is for low-speed turbines.
Iron (in magnet)	52–455	Lower estimate is for high–medium speed turbines; higher estimate is for low-speed turbines.
Iron (cast)	20,000–23,900	—
Lead (Pb)	Unknown	—
Manganese (Mn)	32.5–80.5	—
Molybdenum (Mo)	116–136	—
Neodymium (Nd)	0–186	Lower estimate is for current-generation onshore turbine; higher estimate is for 2025 mix of direct-drive and hybrid-drive turbines.
Nickel (Ni)	557–663	—
Praseodymium (Pr)	4–35	Lower estimate is for high–medium speed turbines; higher estimate is for low-speed turbines
Steel	103,000–115,000	—
Terbium (Tb)	0.8–7.0	Lower estimate is for high–medium speed turbines; higher estimate is for low-speed turbines
Zinc (Zn)	5,150–5,750	Estimated based on the amount of zinc used for galvanizing engineering steel.

Hypothèses EVEA ICARE issues des échanges au copil

	2025	2040	2060	Commentaires explicatifs
--	------	------	------	--------------------------

le cerium remplace à x% le neodyme	0,25	0,5	1	Les dernières évolutions de la recherche laissent envisager un remplacement possible du néodyme par le cérium. Hypothèse EVEA-ICARE : le cerium remplace à 25, 50 et 100% le neodyme aux Horizons respectifs 2025, 2040 et 2060
le dysprosium diminue à x%	0,25	0,5	1	Les dernières évolutions de la recherche laissent envisager une diminution forte du dysprosium voir sa disparition. Hypothèse EVEA-ICARE : le dysprosium diminue à hauteur de 25, 50 et 100% aux Horizons respectifs 2025, 2040 et 2060.

Eolienne off shore

	2015	2025	2040	2060	Unité
Steel and iron materials (+ alloyed)	81,6566	idem	idem	idem	tonnes/MW
Iron	21,9192	idem	idem	idem	tonnes/MW
Aluminium	1,1414	idem	idem	idem	tonnes/MW
Copper (and alloys)	1,6192	idem	idem	idem	tonnes/MW
Zinc alloys	0,00010101	idem	idem	idem	tonnes/MW
Polymer	7,2549	idem	idem	idem	tonnes/MW
Modified organic natural materials	0,0505	idem	idem	idem	tonnes/MW
Ceramic/glass	8,0000	idem	idem	idem	tonnes/MW
béton	425	idem	idem	idem	M3/MW
Terbium	0,0039	idem	idem	idem	tonnes/MW
Neodymium	0,1880	0,141	0,094	0	tonnes/MW
Praseodymium	0,0195	idem	idem	idem	tonnes/MW
Dysprosium	0,0260	0,0195	0,013	0	tonnes/MW
cerium	0	0,047	0,094	0,188	tonnes/MW

Eolienne on shore

	2015	2025	2040	2060	Unité
Steel and iron materials (+ alloyed)	81,6566	idem	idem	idem	tonnes/MW
Iron	21,9192	idem	idem	idem	tonnes/MW

Aluminium	1,1414	idem	idem	idem	tonnes/MW
Copper (and alloys)	1,6192	idem	idem	idem	tonnes/MW
Zinc alloys	0,00010101	idem	idem	idem	tonnes/MW
Polymer	7,2549	idem	idem	idem	tonnes/MW
Modified organic natural materials	0,0505	idem	idem	idem	tonnes/MW
Ceramic/glass	8,0000	idem	idem	idem	tonnes/MW
béton	425	idem	idem	idem	M3/MW
Terbium	0,0000	idem	idem	idem	tonnes/MW
Neodymium	0,0000	idem	idem	idem	tonnes/MW
Praseodymium	0,0000	idem	idem	idem	tonnes/MW
Dysprosium	0,0000	idem	idem	idem	tonnes/MW
cerium	0	idem	idem	idem	tonnes/MW

Hypothèse EVEA ICARE : pas de terres rares dans éoliennes onshore : En France seuls 3% des éoliennes terrestre ont des aimants permanents

Solaire photovoltaïque

Source : Données IEA ETP 2017

Capacité installée (GW)	2014	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060
Solar PV	178,00	885,09	1 321,26	1 845,99	2 354,16	3 177,38	4 018,67	5 039,55	6 394,43

On calcule les infrastructures additionnelles par année (en GW)

Scénario (différence)	2015	2025	2040	2060
solar PV (GW)	64,28	64,28	97,94	202,01
solar PV (kW)	64 281 145	64 281 145	97 938 062	202 013 597

On évalue le marché prospectif des technologies		hypothèse basée sur les données prospectives de NEEDS		
Répartition marché	2 015	2 025	2 040	2 060
Crystalin (sc-si + multi Si+ribbon Si)	84%	75%	60%	50%
a Si (thin films)	11%	18%	28%	35%
Cdte(thin films)	2%	4%	6%	8%

CIS(thin films)	2%	4%	6%	8%
-----------------	----	----	----	----

On évalue l'évolution des matériaux pour les technologies

Repartition matériaux (scénario realistic optimistic NEEDS)	2 015	2 025	2 040	2 060
Crystalin (sc-si + multi Si+ribbon Si)		"-20% process material requirement"	"-20% process material requirement"	"-20% process material requirement"
a Si (thin films)				
Cdte(thin films)		"-20% process material requirement"	"-20% process material requirement"	"-30% process material requirement"
CIS(thin films)		"-25% process material requirement "	"-25% process material requirement "	"-35% process material requirement"

Solaire CSP

L'infrastructure a été modélisée à partir des données ci-dessous :

TABLE A.3 Metals Used in Concentrating Solar Power (CSP) Installations

Metal	Range of estimates (kilograms/megawatt)	Notes
Aluminum (Al)	Unknown	Used for CSP structures.
Silver (Ag)	3.75–13.75	Lower estimates are for parabolic troughs; the higher end is for Fresnel reflectors.
Steel	Unknown	Used for CSP structures.

Source: Data primarily from Moss, et al. (2011).

Bâtiment

Source : Données Global Status Report - UN Environment - 2017							Source : Données IEA ETP 2017
billion M2	Current floor (stock 2015)	2017-2030	2030 – 2040	2040 – 2050	2050 - 2060	Total additional m2/area	2040-2060 pour retomber sur etp
Africa	25,00	5,00	10,00	35,00	36,47	87,00	

SCENARIOS DE TRANSITION ENERGETIQUES : FORCES ET FAIBLESSES DE L'ACV DANS UNE PERSPECTIVE DE RESSOURCES LIMITEES

China	55,00	23,00	10,00	7,00	8,00	48,00	
India	20,00	7,00	13,00	13,00	12,00	45,00	
North America	40,00	13,00	6,00	6,00	8,00	33,00	
Europe	33,00	10,00	4,00	4,00	6,00	24,00	
ASEAN	17,00	8,00	4,00	5,00	6,00	23,00	
Latin America	18,00	8,00	3,00	3,00	3,00	17,00	
Other Asia	13,00	3,00	4,00	4,00	4,00	15,48	
Middle East	10,00	5,00	2,00	2,00	2,00	11,00	
OECD Pacific	15,00	5,00	1,00	2,00	2,00	10,00	
Russia and Caspian region	0,00	3,00	1,00	0,50	0,50	5,00	
milliards m2 additionnels sur périmètre monde sur période temporelle		90,00	58,00	81,50	87,97	318,48	99,87
milliards m2 additionnels /an sur période temporelle		6,92	5,80	8,15	8,80		4,99

Ratio kg/m2	Données suisses, Source : Tracking Construction Material over Space and Time: Prospective and Geo-referenced Modeling of Building Stocks and Construction Material Flows, Heeren, Hellweg, ETH Material input and output for residential buildings for the years 2015, 2035, and 2055 and all scenarios					
Base	2015	2025	2035	2055	commentaires	commentaires
Concrete	821,41	812,54	803,66	751,77		
Wood	39,59	71,88	104,18	173,49		
Brick	257,31	247,72	238,12	231,31		
Mineral	306,79	428,73	550,66	925,26	Non pris en compte	
Metal	31,67	29,23	26,79	34,70		
Acier et acier inox (inclus ds metal)	29,33	27,07	24,81	32,13	hypothèse 90 % acier et 10% d'acier inoxydable fixée par EVEA et Icare	Proportions de répartition des métaux de 2015 conservées pour les autres horizons de temps

Aluminium (inclus ds metal)	1,18	1,09	1,00	1,29	Données Icare USGS 2015	Proportions de répartition des métaux de 2015 conservées pour les autres horizons de temps
Cuivre (inclus ds metal)	1,16	1,07	0,98	1,27	Données Icare USGS 2015	Proportions de répartition des métaux de 2015 conservées pour les autres horizons de temps

On calcule les quantités de matériaux additionnels par année à partir des ratio kg/m2 et des m2 additionnels construits

	2015	2025	2040	2060
billion m2 (milliards de m2)	6,92E+00	6,92E+00	5,80E+00	4,99E+00
m2	6,92E+09	6,92E+09	5,80E+09	4,99E+09
Concrete (kg)	5,69E+12	5,63E+12	4,66E+12	3,75E+12
Wood (kg)	2,74E+11	4,98E+11	6,04E+11	8,66E+11
Brick (kg)	1,78E+12	1,71E+12	1,38E+12	1,16E+12
Metal(kg) Acier et acier inox	2,03E+11	1,87E+11	1,44E+11	1,60E+11
Metal(kg) Alu	8,16E+09	7,53E+09	5,78E+09	6,45E+09
Metal(kg) Cuivre	8,04E+09	7,42E+09	5,70E+09	6,35E+09

	2015	2025	2040	2060
Concrete (ton)	5,69E+09	5,63E+09	4,66E+09	3,75E+09
Wood (ton)	2,74E+08	4,98E+08	6,04E+08	8,66E+08
Brick (ton)	1,78E+09	1,71E+09	1,38E+09	1,16E+09
Metal(ton) Acier et acier inox	2,03E+08	1,87E+08	1,44E+08	1,60E+08
Metal(ton) Alu	8,16E+06	7,53E+06	5,78E+06	6,45E+06
Metal((ton)) Cuivre	8,04E+06	7,42E+06	5,70E+06	6,35E+06

Transport routier : light road

Hypothèse EVEA ICARE : On considère que les infrastructures routières n'évoluent pas

	poids vehicule (kg)	Processus EcolInvent voiture	poids batterie (kg)	Processus EcolInvent batterie	Commentaires
Gasoline ICE	1234	Passenger car, petrol/natural gas {GLO} production Cut-off, U	non concerné	non concerné	
Diesel ICE	1314	Passenger car, diesel {GLO} production Cut-off, U	non concerné	non concerné	
CNG/LPG	1234	Passenger car, petrol/natural gas {GLO} production Cut-off, U	non concerné	non concerné	
Hybrids	1234	Passenger car, petrol/natural gas {GLO} production Cut-off, U	393	Battery, Li-ion, rechargeable, prismatic {GLO} production Cut-off, U	hypothese vehicule petrol/gn + battery
Plug-in electric	918,22	Passenger car, electric, without battery {GLO} production Cut-off, U	393	Battery, Li-ion, rechargeable, prismatic {GLO} production Cut-off, U	Assuming a life expectancy for the car of 150000km and an average lifetime for the battery of 100000, it is expected that about every second battery will require substitution. A default value of $(150000\text{km}/100000\text{km}) \times 262$ kg of batteries is taken into account including the maintenance.
Battery electric	918,22	Passenger car, electric, without battery {GLO} production Cut-off, U	393	Battery, Li-ion, rechargeable, prismatic {GLO} production Cut-off, U	
Fuel cell	918,22	Passenger car, electric, without battery {GLO} production Cut-off, U	1,5	Fuel cell, polymer electrolyte membrane, 2kW electrical, future {GLO}	

				market for Cut-off, U	
Ratio Poids vehicule gasoline / electrique	74%				

On calcule les véhicules additionnels par année

Nombre de véhicules par technologie											
Source : ETP 2017 - LDV (Million vehicule)											
Urban											
MIDDLE graph											
	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060
Gasoline ICE	549	617	628	656	647	602	552	495	424	346	257
Diesel ICE	119	146	157	164	163	155	141	125	105	81	55
CNG/LPG	16	24	26	27	29	35	42	45	43	35	26
Hybrids	4	12	25	47	77	121	167	202	226	249	259
Plug-in electric	0	0	7	24	56	100	155	225	310	410	520
Battery electric	0	1	10	30	58	92	135	193	264	346	438
Fuel cell	0	0	0	1	3	6	9	13	17	22	28
Non-urban											
LDVs											
MIDDLE graph											
	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060
Gasoline ICE	204	244	298	322	324	304	283	248	206	164	118
Diesel ICE	50	61	75	87	96	100	96	88	75	58	38
CNG/LPG	10	15	19	22	25	26	26	23	18	13	7
Hybrids	1	2	5	13	26	43	57	69	80	92	97
Plug-in electric	0	0	3	11	26	48	73	107	144	181	220
Battery electric	0	0	3	9	18	29	41	59	78	95	113

Fuel cell	0	0	0	0	1	2	3	5	7	8	10
------------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

Total (Million véhicule)	2 015	2 025	2 040	2 060
Gasoline/CNG LPG ICE	24,20	11,32	0,00	0,00
Diesel ICE	7,48	3,72	0,00	0,00
Hybrids	1,81	5,68	12,07	3,12
Plug-in/battery electric	0,39	10,01	26,87	51,87
Fuel cell	0,00	0,26	0,87	1,44

Pour les infrastructures de charge :

Hypothèse 40 millions d'infrastructures en 2030 pour charger 158 million de véhicules à batterie (<https://www.pv-magazine.com/2018/08/02/ev-charging-infrastructure-market-to-reach-18-billion-by-2030/>) soit :

- 0,253 point de charge par véhicule à batterie
- 8 kg de cuivre/point de charge (Source (Copper Alliance, 2017))

	2 015	2 025	2 040	2 060
point de charge	98 176	2 533 894	6 801 297	13 130 870
quantité Cuivre (ton)	785	20 271	54 410	105 047

On évalue également l'évolution des matériaux pour les voitures. Le processus « Passenger car, electric, without battery {GLO}| production | Cut-off, U » est composé de « Glider, passenger car {GLO}| production | Cut-off, U » et de « Powertrain, for electric passenger car {GLO}| market for | Cut-off, U », l'inventaire « Glider, passenger car {GLO}| production | Cut-off, U », qui représente le corps du véhicule a été modifié :

- Augmentation de « Aluminium, wrought alloy {GLO}| market for | Cut-off, U »
- Diminution de « Reinforcing steel {GLO}| market for | Cut-off, U »

	2 015	2 025	2 040	2 060	Unité
Aluminium, wrought alloy {GLO} market for Cut-off, U	0,0013545	0,1013545	0,2013545	0,3013545	kg/kg "glider, passenger car"
Reinforcing steel {GLO} market for Cut-off, U	0,805779	0,705779	0,605779	0,505779	kg/kg "glider, passenger car"

Transport routier : heavy road

Evolution de la flotte en million de véhicule
2DS-MFTs Urban

	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060
Gasoline ICE	3,51	3,83	3,53	3,24	2,96	2,26	1,23	0,49	0,22	0,12	0,07
Diesel ICE	22,09	29,36	30,99	33,29	34,58	29,57	20,12	12,35	8,00	5,17	3,18
CNG/LP G	0,14	0,22	0,38	0,51	0,72	1,02	1,37	1,75	2,15	2,50	2,79
Hybrids	0,00	0,00	0,86	3,47	8,47	17,83	28,93	35,76	37,45	35,40	30,49
Plug-in / CAT-ERS electric	0,00	0,00	0,03	0,15	0,39	0,89	1,87	3,78	7,21	12,50	19,19
Battery electric	0,00	0,00	0,01	0,06	0,17	0,41	0,89	1,83	3,47	5,90	8,83
Fuel cell	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
2DS-MFTs Non-Urban											
	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060
Gasoline ICE	1,71	1,71	1,67	1,48	1,37	1,11	0,73	0,41	0,22	0,12	0,06
Diesel ICE	16,34	19,29	21,16	20,39	19,86	17,04	12,60	8,63	5,87	3,85	2,36
CNG/LP G	0,13	0,23	0,42	0,50	0,56	0,63	0,69	0,75	0,80	0,82	0,81
Hybrids	0,00	0,00	0,43	1,59	3,50	6,73	10,58	13,24	14,27	13,80	11,98
Plug-in / CAT-ERS electric	0,00	0,00	0,02	0,08	0,21	0,43	0,83	1,59	2,94	5,03	7,66
Battery electric	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fuel cell	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2DS HFTs non urban											
	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060
Gasoline ICE	0,23	0,15	0,11	0,11	0,11	0,10	0,07	0,05	0,03	0,02	0,01
Diesel ICE	18,15	24,32	30,50	36,45	41,77	43,56	40,84	34,80	27,01	18,99	12,22
CNG/LP G	0,02	0,19	0,65	0,98	1,20	1,36	1,53	1,69	1,87	2,05	2,21
Hybrids	0,00	0,00	0,39	1,57	3,84	8,30	15,76	25,09	33,67	38,07	36,10
Plug-in electric	0,00	0,00	0,01	0,06	0,18	0,49	1,28	3,25	7,76	16,65	30,77
Battery electric	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fuel cell	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01

A partir des données précédentes, on calcule les véhicules additionnels par année pour les grandes catégories				
MFT Million vehicule additionnels / an	2015	2025	2040	2060
normal	2,14E+00	2,51E-01	0,00E+00	0,00E+00
Hybrids	0,00E+00	7,53E-01	2,99E+00	0,00E+00
electric	3,92E-12	4,51E-02	3,73E-01	2,45E+00
HFT Million vehicule additionnels / an	2015	2025	2040	2060
normal	1,25E+00	1,25E+00	0,00E+00	0,00E+00
Hybrids	0,00E+00	2,35E-01	1,49E+00	0,00E+00
electric	2,32E-12	9,15E-03	1,59E-01	2,82E+00

Transport aérien

On a le nombre d'avions construits entre 2018 et 2037 et on a le nombre de passager par km. Cependant entre 2020 et 2060 on n'a que le nb de passagers. On calcule le ratio et on l'applique pour calculer le nombre d'avions construits entre 2060 et 2018.

trillion passenger .km	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060
2DS	2,93	3,86	4,73	6,32	7,32	8,56	9,98	11,57	13,31	15,21	17,05	18,84	20,75

	2020 vers 2040 (ou 2018 vers 2038)	2040 vers 2060
ratio evo des passanger/km	1,82	1,56
nb avion construits	37 389	32 045
nb avion cstruit/an	1869,45	1602,25

Hypothèses de modélisation EVEA ICARE :

- Catégories LONG/ MOYEN COURRIER : « La catégorie « Small » regroupe les monocouloirs d'une capacité allant de 100 à 230 sièges, dont l'autonomie maximale avoisine des 3.000 NM. La catégorie « Medium » englobe les avions jusqu'à 300 sièges et 5.000 NM. La catégorie « Large », concernent les avions jusqu'à 350 sièges et 10.000 NM, et enfin la catégorie supérieure « Extra Large », les plus de 350 sièges et jusqu'à 10.000 NM. »
- On considère un moyen-courrier pour des places <200 donc catégories small de Airbus :
 - o 76% des avions considérés sont des moyen-courrier,
 - o Le reste ce sont des long courrier.

On calcule les avions additionnels par année					
	2015	2025	2040	2060	Process
Moyen courrier	1420,78	1420,78	1217,71	1217,71	Aircraft, medium haul {GLO} market for Cut-off, U
long courrier	448,67	448,67	384,54	384,54	Aircraft, long haul {GLO} market for Cut-off, U

Transport maritime

Dans le scénario ETP, on a les tonnes transportées mais aucune donnée sur les distances (km) ou le nombre de navires.

nb navires frets en 2017	45 400
Ratio d'évolution des tonnes transportées	1,6
Nb navires en fonctionnement en 2035	72 640
Nb navires à construire d'ici 2035	27 240
Nb navires additionnels par an	1513

D'après les graphes on a

- En 2017 : 45 400 navires de fret pour 10 Millions de tonnes transportées
- En 2035 16 millions de tonnes à transporter==> il faudra donc 72640 navires de fret. Ce qui revient à construire 27 240 navires d'ici 2035.

Transport ferroviaire

trillion passengers km				
ETP 2017 2DS	2 015	2 025	2 040	2 060
Rail transport de passager	4,1 558	5,5 533	9,2 299	15,6 173
ETP 2017 2DS				
tkm_milliards	2014	2025	2040	2060
Rail, fret	10827	15512	21815	28217

Dans la modélisation les infrastructures ferroviaires sont appelées par l'amortissement lié à 1 t.km ou 1 p.km transporté.