

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

SYNTHESE

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



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.

- ✓ 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.

Introduction

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. Cependant, malgré le développement de scénarios de transition énergétique sophistiqués, il apparaît difficile d'appréhender la problématique de l'épuisement des ressources.

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. Des questions de méthodologies et de données doivent cependant être résolues, que ce soit sur les indicateurs d'épuisement de ressource utilisés 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 ont souhaité 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.

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.

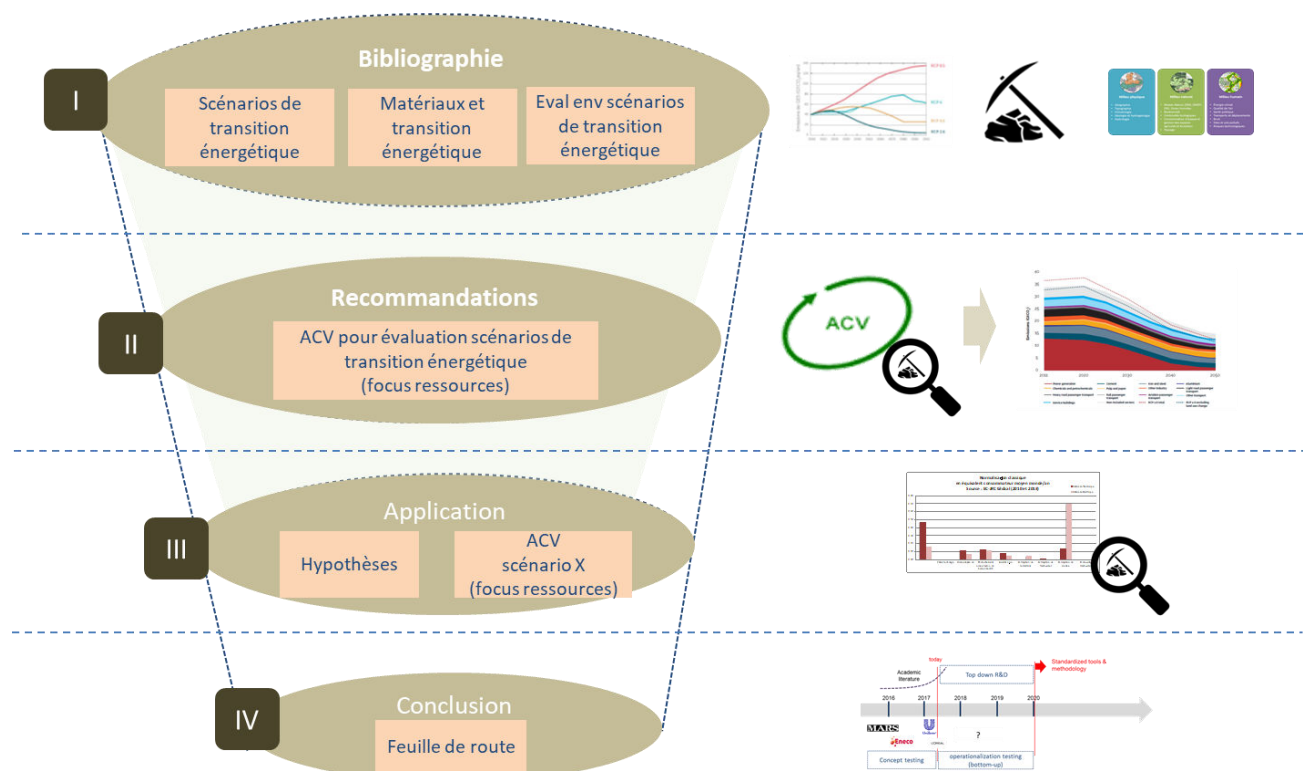


Figure 1 : Approche méthodologique pour l'étude

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.

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

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%	669 EJ (lecture graphique) [Energie primaire] 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%	Aucun chiffre mais doublement de la consommation énergétique mondiale d'ici 2070	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

Il faut noter que le niveau de détail des données accessibles pour les différents scénarios n'est pas le même. Ainsi, 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. De plus, les différents scénarios sont également très sensibles aux hypothèses technologiques retenues (diffusion de technologies de séquestration du dioxyde de carbone *Carbon Capture and Storage-CCS*) à partir de 2030 dans le scénario AIE par exemple).

Ainsi, le scénario retenu pour l'application de l'ACV à un scénario de transition est le scénario Energy Technology Perspectives (ETP) 2DS de l'AIE, notamment car les trajectoires énergétiques et d'émissions de GES des secteurs sont très détaillées et permettent de réaliser des analyses plus précises. De plus, ce scénario est souvent utilisé comme scénario 2°C de référence par plusieurs initiatives internationales comme la *Science-Based Targets initiative* (SBT) ou ACT (Assessing low-Carbon Transition).

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

La question de la disponibilité des matériaux nécessaires à la transition énergétique n'est pas complètement nouvelle. La transition énergétique va, en effet, 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.

Selon le scénario *Energy Technology Perspectives* de l'AIE, 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. 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 d'extraction de certains métaux ne sont pas disponibles, ce qui ne permet pas de construire des modèles fiables de prévision de l'évolution de la demande en matériaux.

Ainsi, la revue de littérature existante a permis de mettre en évidence qu'un grand nombre d'auteurs (ANCRE, 2015; Bonnet, Carcanague, Hache, Seck, & Simoen, 2018; Geldron, 2017; Hache, Simoen, & Seck, 2018; L'Usine Nouvelle, 2018; Lepesant, 2018; Vidal, 2018; Vidal, Goffé, & Arndt, 2013; World Bank Group, 2017) s'intéressent à l'évolution des différents paramètres constituant le marché de ces ressources et essayent de répondre à certaines inquiétudes, 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 ?

L'étude de Vidal (Vidal et al., 2013) 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, les auteurs estiment les quantités suivantes nécessaires pour les 40 prochaines années, toujours pour la production d'électricité éolienne et solaire :

- 3 200 millions de tonnes d'acier
- 310 millions de tonnes d'aluminium
- 40 millions de tonnes de cuivre
- Ces estimations représentent une augmentation annuelle de la production globale de ces métaux de 5 à 18%.

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 et non sur un scénario de transition énergétique. **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.

Ainsi, il n'existe pas de 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. Des projets de recherche, notamment en France (SURFER et GENERATE), ont été lancés de manière à approfondir cette question de la quantification des besoins en matières premières pour la transition énergétique.

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 : « 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, Dos Reis, & Vuille, 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, le déterminant majeur est économique et lié aux conditions géopolitiques (Lepesant, 2018) mais l'incertitude reste forte.

La figure ci-dessous synthétise le cadre d'analyse de la question des matériaux pour la transition énergétique et place les différentes publications étudiées selon leur thématique.

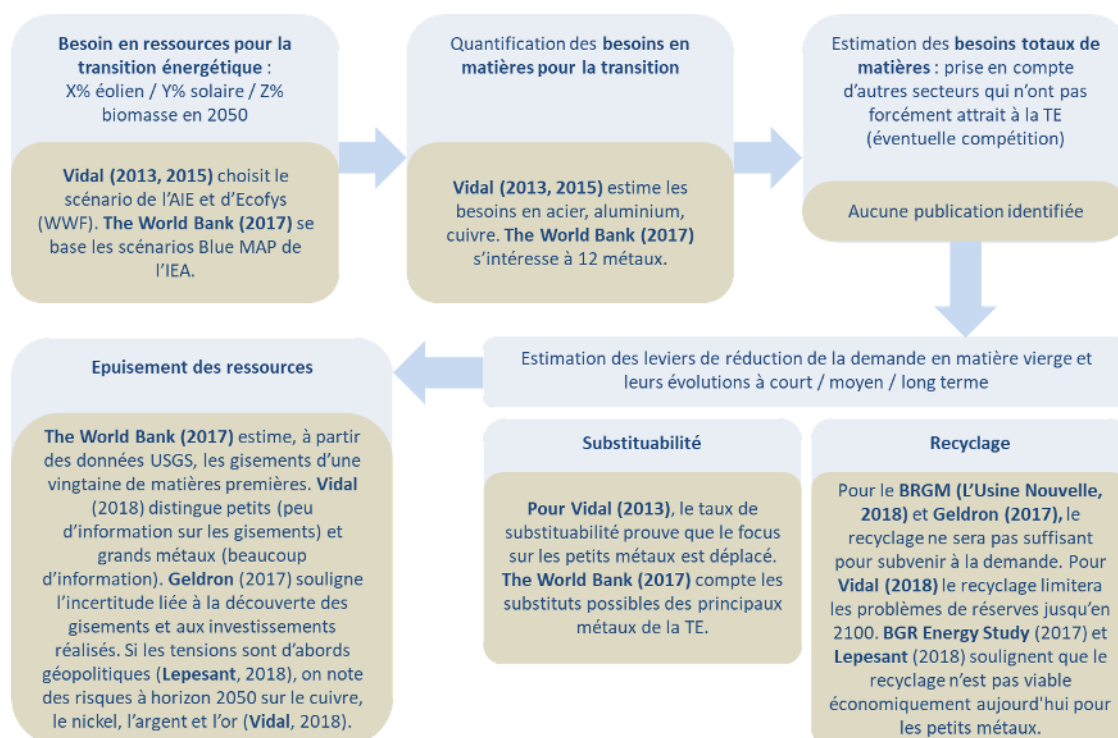


Figure 2 : Synthèse de l'analyse bibliographique sur l'enjeu ressources dans la transition énergétique

3. Evaluation environnementale des scénarios de transition énergétique

Dans un contexte de développement d'un grand nombre de scénarios de transition énergétique, la problématique de l'impact environnemental, au sens large, de ces scénarios est rarement abordée. Pourtant, les conséquences sur d'autres enjeux environnementaux que le climat (épuisement 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).

L'évaluation environnementale de scénarios de transition énergétique apparaît complexe du fait du grand nombre de données à collecter. 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; Harmsen, Roes, & Patel, 2013; Hertwich et al., 2015) par rapport à l'objectif de diminution des émissions de GES des scénarios.

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, Gregg, & Laurent, 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 ce 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. Les ressources eau, énergie et agro-ressources ne sont pas considérées dans l'analyse.

2. Périmètre d'étude

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.

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.

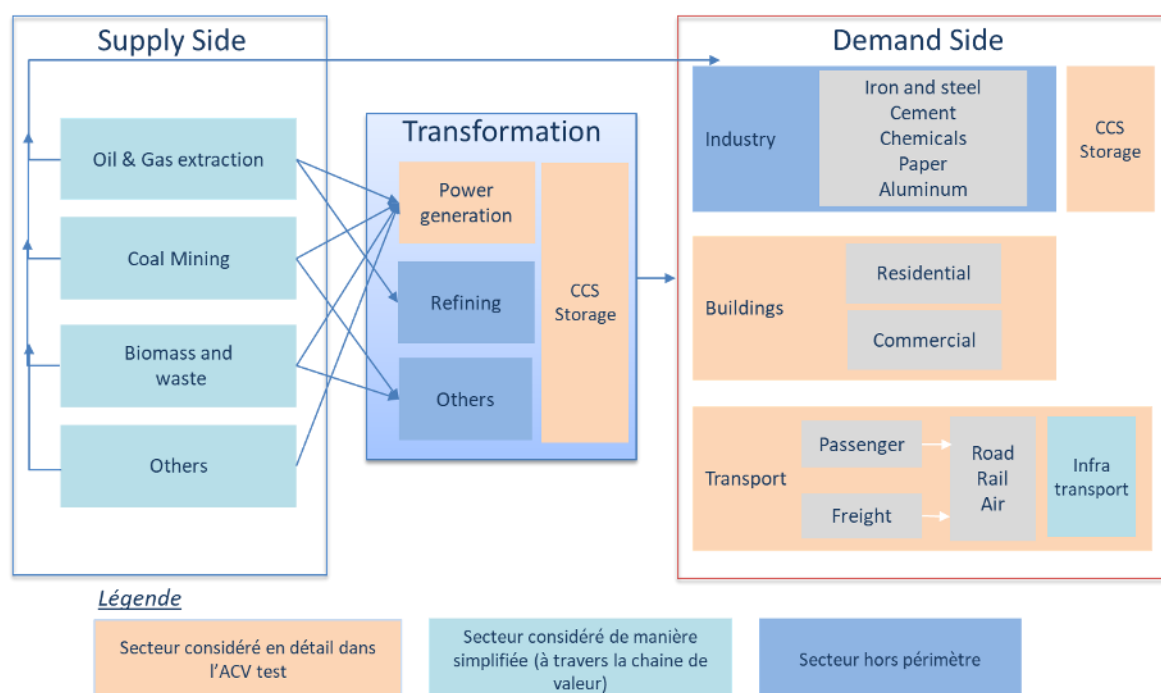


Figure 3 : Périmètre retenu pour l'ACV test

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 (nouvelles infrastructures de production d'énergie, nouveaux véhicules, etc.) :

- Le secteur « Power generation » : comprend la construction des principaux types de centrales de production d'électricité telles que détaillées dans le scénario AIE
- Le secteur « Building » : comprend la construction de bâtiments neufs pour le segment résidentiel et tertiaire
- Le secteur « Transport » : 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.

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).

3. 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 ».

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

4. 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.

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 passager et aérien, les données d'activités sont le nombre de passager.km Pour le fret ferroviaire, c'est le nombre de t.km transporté par an Pour le secteur maritime, les données sont le nombre de t.km transporté	Nombre de m2 additionnel construit par an (matériaux nécessaires à la rénovation énergétique du parc non pris en compte)	Quantité de CO2 captée par les systèmes CCS
Autres sources mobilisées	Données complémentaires issues de la Banque Mondiale (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	Ratios (kg de matériaux/m2) issus 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

Une hypothèse sur l'allègement des voitures (substitution de l'acier par l'aluminium) a également été considérée.

5. Méthodologie d'évaluation des impacts

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 (PEF) comme étant la méthode midpoint à utiliser pour évaluer l'épuisement des ressources (toutefois classée en niveau II, ie « 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.

Ainsi, une des pistes poursuivies dans cette étude est la construction de facteurs de caractérisation basée sur la méthode AADP de Schneider (Schneider, Berger, & Finkbeiner, 2011). En effet, cet auteur souligne 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. Ainsi, dans ce projet, 3 méthodes existantes et applicables ont été utilisées, et la méthode qui nous semble la plus complète intitulée *Anthropogenic stock-extended Abiotic Depletion Potential* (AADP) a été modifiée afin de voir les effets de ces modifications sur les résultats. Les trois méthodes retenues sont :

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

Une mise à jour de la méthode proposée par Schneider a été réalisée 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. Une mise à jour des facteurs de caractérisation est proposée dans cette étude sur la base de taux d'extraction et de stock anthropogénique recalculés et adaptés à chaque horizon de temps du scénario. Le nouveau facteur de caractérisation pour une ressource se calcule donc par la formule suivante :

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

6. Résultats de l'ACV test réalisée

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

Une première analyse de 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, 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.

Comme 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.

Tableau 3 : 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%
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%

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 s'expliquer partiellement par le fait que dans la base de données ecoinvent, l'utilisation de cuivre entraîne l'extraction de nickel en tant que sous-produit d'extraction, ce qui entraîne un double-comptage.

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.

6.2 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 :

- 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 ;
- 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) ;
- L'aluminium, le cuivre, l'argent et le molybdène, dont la demande connaît une croissance significative (entre 0 et 100% à horizon 2060) ;
- Le fer, le chrome et le nickel pour lesquels la demande diminue entre 2015 et 2060. 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.

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.

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

6.4.1. Analyse des facteurs de caractérisation (FC)

Le graphique ci-dessous présente les facteurs de caractérisation avec les méthodes AADP (base et mise à jour). Ce graphique est réalisé avec une échelle logarithmique ($\log_{10}$) afin de permettre une meilleure visualisation graphique.

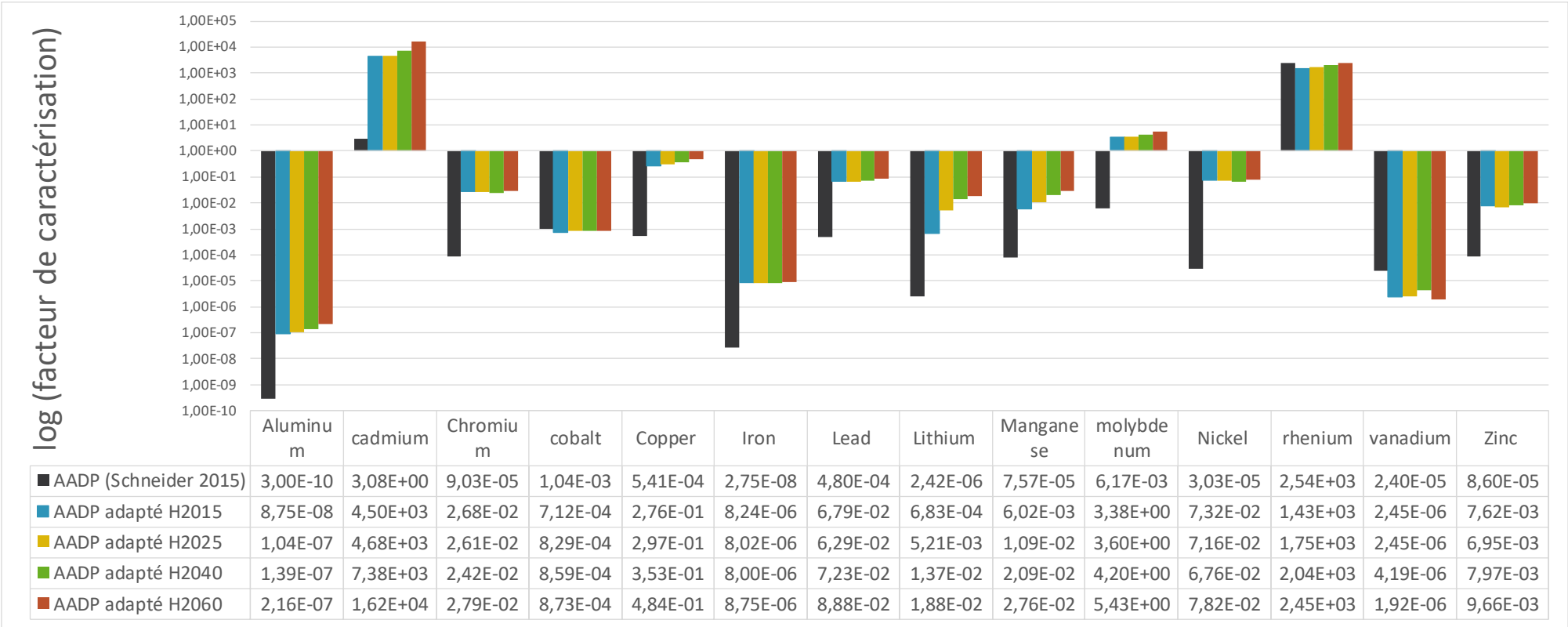


Figure 4 : Comparaison du facteur de caractérisation original (Schneider et al. 2015) par rapport aux facteurs mis à jour dans cette étude

La comparaison entre le facteur de caractérisation (FC) publiée par Schneider par rapport à celle des FC mis à jour aux différents horizons de temps montre que:

- La valeur du FC de Schneider est inférieure à celle recalculée pour 11 ressources sur 14,
- La valeur du FC de Schneider est 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 mis à jour sont supérieurs ou inférieurs à ceux utilisés par Schneider qui proviennent des rapports publiés par l'USGS en 2013 et 2014¹.

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

6.4.2. Analyse des résultats comparatifs des scénarios selon les méthodes

La figure ci-dessous présente les résultats d'impact sur l'épuisement des ressources avec les 4 méthodes utilisées pour chacun des 4 horizons (échelle logarithmique log10).



Figure 5 : Analyse des résultats comparatifs des scénarios selon les méthodes

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 - ultimate 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 des résultats qui sont 3 à 4 ordres de grandeur supérieurs par rapport aux résultats des 3 autres méthodes.

Tableau 4 : 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 : ultimate reserve (%)	+6%	+33%	+36%
ADP CML non baseline : reserve base (%)	-9%	+20%	+23%
AADP Schneider et al. 2015	-12%	+15%	+18%

¹ Mineral commodity summaries. U.S. Geological Survey, Department of the Interior, Reston

(%)			
AADP mise à jour (%)	-10%	+79%	+155%

Ainsi, en résumé, les éléments suivants concernant la méthodologie de caractérisation des impacts peuvent être mis en évidence par l'analyse conduite dans cette étude, à savoir :

- 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 (son facteur de caractérisation est le plus élevé sur les différents horizons bien que son taux d'extraction ne représente pas plus de 0,006% des ressources extraites sur les 4 horizons de temps). On peut donc questionner la cohérence de valeur élevée du facteur de caractérisation du cadmium.
- 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.
- La méthode ADP reserve base ne semble pas adaptée pour évaluer la rareté des ressources sur des scénarios à horizon de temps distants (les réserves estimées dépendent de nombreux facteurs qui peuvent changer en très peu de temps).

Par ailleurs, les enseignements suivants peuvent être tirés de cette première ACV « test » conduite sur le scénario de transition ETP 2DS :

- Chaque horizon de temps a été construit à partir de données collectées dans le scénario AIE ETP 2017 et complété par diverses sources de données, mais la construction d'inventaire reste un point de difficulté.
- La modélisation a été réalisée dans un logiciel ACV afin d'identifier si un bilan matière peut ou non être établi. Mais il est apparu peu pratique de sortir l'ensemble des résultats 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.
- L'ACV a permis de montrer 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.
- La robustesse des résultats ACV des scénarios de transitions énergétique dépend en partie du choix des données d'inventaire. Ainsi, 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.

Il ressort donc de cette étude que la conduite d'une ACV est possible. Cependant les résultats obtenus sont soumis à de fortes incertitudes. Ces dernières n'ont pu être estimées (difficulté de quantification) comme les hypothèses peuvent concerner des périmètre temporels et spatiaux prospectifs. 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 l'ACV de façon plus robuste.

Le schéma ci-dessous présente trois approches possibles pour améliorer l'évaluation d'un scénario de transition énergétique par l'ACV.

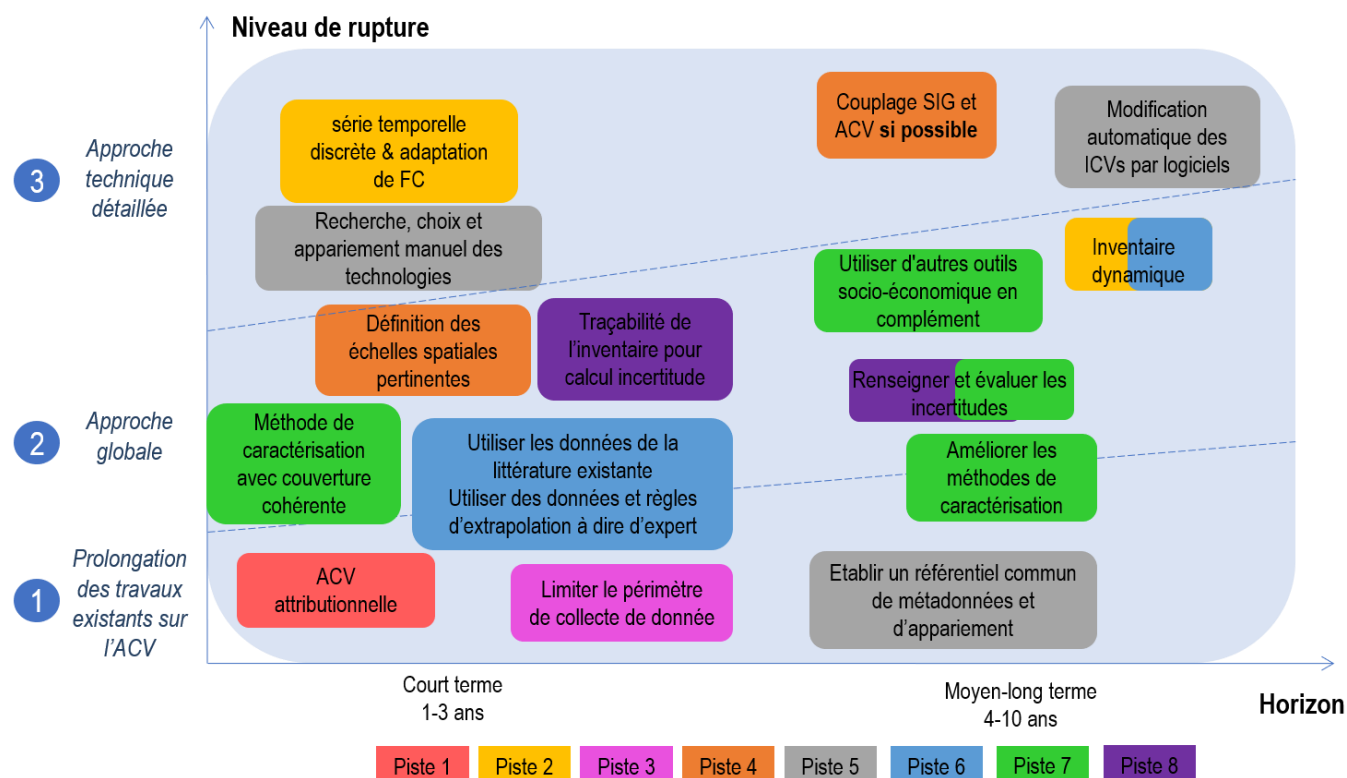


Figure 6 : Pistes de recherches à court et moyen terme pour l'amélioration de l'évaluation ACV d'un scénario de transition énergétique

Conclusions

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, 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.

Bibliographie

- ANCRE. (2015, June). Ressources minérales et énergie - Rapport du groupe "Sol et sous-sol" de l'Alliance Ancre.
- 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?*
- Geldron, A. (2017). L'épuisement des métaux et minéraux : faut-il s'inquiéter ?, 23.
- 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>
- L'Usine Nouvelle. (2018). *Les nouvelles matières critiques*. N°3569.
- Lepesant, G. (2018). La transition énergétique face au défi des métaux critiques, 56.
- 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>
- OCDE. (2018). *Global Material Resources Outlook to 2060: Economic drivers and environmental consequences*.
- 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).
- 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.
- USGS. (2015). *Mineral commodity summaries*. Washington: U S Govt. Printing Office.
- 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.