

RECOMMANDATIONS PRATIQUES POUR L'ACV PROSPECTIVE / REFERENCES ET EXEMPLES DANS LE DOMAINE DE L'ENERGIE

RAPPORT FINAL

Janvier 2017

Responsables scientifiques :

- Florent QUERINI

Ecostatis - 5, rue Royale
69001 LYON



- Frédérique BOUVART, Emmanuel HACHE, Stéphane
TCHUNG-MING

IFP Energies nouvelles - 1 et 4 avenue de Bois Préau
92852 Rueil-Malmaison Cedex



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, Recommandations pratiques pour l'ACV prospective / Références et exemples dans le domaine de l'énergie, 2017, 107 pages, n°2015-07.
- ✓ 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 : Jade Garcia – SCORE LCA, Anne-Sophie Herbert – EDF, Alexandra Lebert – CSTB, Denis Le Boulch – EDF, Elodie Lecadre – ENGIE, Séverine Méhler – VEOLIA, Koji Negishi – CSTB, Philippe Osset – SCORE LCA, Anne Prieur-Vernat – ENGIE, Christèle Wojewodka – Saint Gobain.

SOMMAIRE

1	Préambule	9
2	État de l'art	9
2.1	Prospective pour l'énergie et les ressources	9
2.1.1	Résumé	9
2.1.2	Aux sources de la prospective : « chocs » technologiques, politiques et sociétaux à travers l'histoire	15
2.1.3	Le monde de l'après-guerre : les temps moderne de la prospective	17
2.1.4	Aperçu des méthodes de la prospective pour l'énergie et les ressources	26
2.1.5	Analyse de quelques études prospectives	45
2.2	ACV prospectives	48
2.2.1	Résumé	48
2.2.2	Littérature scientifique	48
2.2.3	Études multisectorielles	63
2.2.4	Synthèse	63
2.3	Instituts	65
2.3.1	ACV prospectives	65
2.3.2	Etudes prospectives sur l'énergie et les ressources	65
3	Typologies des ACV prospectives	69
3.1	Résumé	69
3.2	ACV existantes : objectifs	69
3.3	Éléments convergents et divergents	70
3.3.1	Méthode prospective en fonction des objectifs	70
3.3.2	Horizons temporels	71
3.4	Définitions : ACV conséquentielle et ACV prospective	72
4	Résultats de l'enquête	73
4.1	Panel 1 – chercheurs / praticiens ACV	73
4.1.1	Généralités	73
4.1.2	Scénarios	74
4.1.3	Données	76
4.2	Panel 2 – Experts prospective	83
4.2.1	Interactions praticiens ACV - prospectivistes	83
4.2.2	Objet des études prospectives : sujet et horizons temporels	84
4.2.3	Usage des modèles	85
4.2.4	Données et incertitudes	86
4.2.5	Voies d'amélioration et recommandations d'usage	88
5	Méthodologie	90
5.1	Objectifs et cadre de l'étude	91

5.1.1	Objectifs.....	91
5.1.2	Nature des changements	92
5.1.3	Horizon temporel de l'étude.....	92
5.1.4	Produit et système de produits	93
5.1.5	Unité fonctionnelle	93
5.1.6	Périmètre de l'étude / premier et arrière-plan.....	93
5.1.7	Choix des impacts environnementaux pour la caractérisation	94
5.1.8	Validité des méthodes d'allocation	94
5.2	Inventaire de cycle de vie.....	94
5.2.1	Etape 1 : Identification des paramètres à projeter à l'horizon temporel considéré	94
5.2.2	Etape 2 : choix des données	97
5.3	Consolidation des données, cohérence et interprétation.....	100
5.3.1	Consolidation des données et construction des scénarios	100
5.3.2	Analyse critique	100
5.4	Exemple pratique : cas d'étude n°1	101
6	Conclusions	102
7	Bibliographie.....	104

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Exemple de boucle de rétroaction sur la population	10
Figure 2 : Représentation d'un système socio-économique national. Source : Schmalensee (2012)	12
Figure 3 : Structure de la typologie de scénarios prospectifs	13
Figure 4 : Exemple de boucle de rétroaction sur la population (Meadows et al., 1972)	20
Figure 5 : Exemple de boucle de rétroaction entre les variables de population, de capital et de ressources naturelles (Meadows et al., 1972)	21
Figure 6: World2: simulation de base (Forrester, 1971)	21
Figure 7 : World2, simulation avec hypothèses optimistes sur les ressources et la pollution (Forrester, 1971)	22
Figure 8 : World3 : Modèle global dans l'hypothèse du maintien des tendances observées (Meadows et al. (1972), p.124.)	23
Figure 9 : World3 : simulation du modèle mondial avec un doublement des réserves de ressources naturelles (Meadows et al. (1972), p.127.)	24
Figure 10 : World3 : simulation avec des hypothèses de croissance nulle de la production industrielle et de la population (Meadows et al. (1972), p.162.)	24
Figure 11 - Les forces constitutives du changement	27
Figure 12 - Système socio-économique "local"	28
Figure 13 - Système socio-économique global	28
Figure 14 - Typologie de scénarios prospectifs. Adaptée de Van Notten et al. (2003) & auteurs	31
Figure 15 – Scénarios : champ des possibles, champ des souhaitables et options stratégiques	32
Figure 16 - Modèle mental, modèle formel	34
Figure 17 - La démarche de modélisation. Adapté de Remme (2008)	35
Figure 18 - Processus prospectifs	35
Figure 19 - Le modèle World 3 : exemple sectoriel	38
Figure 20 - Schéma de l'équilibre général calculable	39
Figure 21 - Modèle MARKAL d'équilibre partiel	40
Figure 22 - MARKAL-MACRO	40
Figure 23 - Typologie des modèles énergie – économie – environnement	41
Figure 24 - Cadre pour l'ACV prospective par scénarios (Fukushima et al., 2002)	49
Figure 25 - Procédé fixe (gauche) et procédé dynamique (droite) tels que définis par Fukushima et al. (2002) pour la réalisation d'ACV prospectives	50
Figure 26 – Résultats d'ACV prospective d'après Fukushima et al. (2002) : remplacement de la flotte de véhicules au Japon	50
Figure 27 - Procédé de construction des scénarios retenu par Contadini et al. (2002)	50
Figure 28 - Méthode Delphi utilisée par Contadini et al. (2002) pour définir les paramètres des scénarios à partir d'avis d'experts	51
Figure 29 - Méthode de recueil d'avis d'experts utilisées par Contadini et al. (2002)	51
Figure 30 – Méthodologie hybride ACV / analyse prospective développée par Rasmussen et al. (2005)	54
Figure 31 – Méthodologie de TE-LCA (Mendivil et al. 2006)	56
Figure 32 – Emissions de GES en fonction de la pénétration des véhicules alternatifs dans la flotte de véhicules légers de 2005 à 2030 (Schäfer et al., 2006)	57

Figure 33 – Evolution de la production d'aluminium primaire liée à l'augmentation des véhicules hybrides et à hydrogène (Schäfer et al., 2006)	57
Figure 34 – Scénarios de production de l'hydrogène à partir du gaz naturel aux horizons 2015 et 2030 (Dufour et al., 2009)	58
Figure 35 - Résultats d'ACV prospective : impacts des technologies de panneaux photovoltaïques (Raugei et al., 2009).....	59
Figure 36 – Résultats des scénarios de production d'éthanol lignocellulosique (Mu et al. 2010)	60
Figure 37 – Emissions de GES des scénarios de transports chinois à l'horizon 2050 (Ou et al., 2010) ..	60
Figure 38 - Comparaison entre différents t-shirts (conventionnel, avec triclosan, avec particules d'argent) et entre version de développement et version commercialisée prospective	61
Figure 39 – Méthode utilisée en macro-ACV (Dandres et al. 2012)	62
Figure 40 : Etudes prospectives 1981-2016 - citations /pays	67
Figure 41 : Etudes prospectives 1981-2016 - fréquence /pays	68
Figure 42 – Typologies d'ACV prospective : Présentation de la méthode	69
Figure 43 – horizons temporels des différentes ACV prospectives	71
Figure 44 – Profil des répondants de l'enquête	73
Figure 45 – Part des chercheurs / praticiens en ACV ayant déjà réalisé une ACV prospective	74
Figure 46 – Horizons temporels considérés par le panel ACV	74
Figure 47 – Faut-il considérer un ou plusieurs scénarios en ACV prospective ? Point de vue du panel ACV	74
Figure 48 – Comment construire un scénario et choisir des données ? Réponses du panel ACV.....	76
Figure 49 – Données pour la modélisation de l'ICV – réponses du panel ACV	77
Figure 50 – Faut-il mixer les sources de données pour réaliser l'ICV ? Réponses du panel ACV	77
Figure 51 – Sources de données utilisées par les chercheurs et praticiens en ACV	78
Figure 52 – Transparence des études prospectives – point de vue du panel ACV	79
Figure 53 – Analyse d'incertitude et pratiques du panel ACV	79
Figure 54 – Est-il nécessaire d'adapter les facteurs de caractérisation dans le cadre d'une ACV prospective ? Réponses du panel ACV	80
Figure 55 – Connaissez-vous l'ACV ? Réponses du panel des experts en prospective.....	83
Figure 56 – Avez-vous déjà collaboré avec des praticiens ACV ? Réponses du panel des experts en prospective.....	83
Figure 57 – Connaissances des usages de résultats d'études prospectives en ACV : réponses du panel des experts en prospective	84
Figure 58 – Horizons temporels considérés dans les études : réponses du panel des experts en prospective.....	84
Figure 59 – Champs des études prospectives : réponses du panel des experts en prospective	85
Figure 60 – Usages des modèles : réponses du panel des experts en prospective	86
Figure 61 – Types de modèles utilisés : réponses du panel des experts en prospective	86
Figure 62 – Avez-vous déjà participé à des analyses multi-modèles ? Réponses du panel des experts en prospective.....	86
Figure 63 – Réalisez-vous des analyses d'incertitudes ? Réponses du panel des experts en prospective	88

Figure 64 – Pensez-vous que les études existantes soient suffisamment transparentes ? Réponses du panel des experts en prospective	88
Figure 65 – Pensez-vous qu'il soit faisable et souhaitable d'augmenter la transparence des études prospectives ? Réponses du panel des experts en prospective	89
Figure 66 – Qualification de la nature des résultats / enseignements délivrés par les études prospectives : réponses du panel des experts en prospective	89
Figure 67 - Arbre décisionnel pour l'élaboration d'ICV prospectifs.....	96
Figure 68 –Exemple d'extrapolation de valeurs passées	98
Figure 69 – Valeurs passées d'émissions de CO ₂ des véhicules (EEA)	98
Figure 70 – évolution du poids des véhicules, calculs d'experts (Ferreira Pinto, 2009).....	99

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Phases de structuration de la discipline	11
Tableau 2 : Polarité et éléments structurels des 3 axes de la typologie de scénarios proposée	14
Tableau 3 : Phases de structuration de la discipline (Adapté de Son (2015) & auteurs)	26
Tableau 4 – Méthodes d'élaboration de scénarios	33
Tableau 5 - Modélisation énergétique dans les années 1970. Source : Beaujean et Charpentier (1978)	38
Tableau 6 – Vue d'ensemble des études prospectives analysées	47
Tableau 7 – Caractéristiques des scénarios « et si ? » et pivots (Pesonen et al. 2000)	49
Tableau 8 - Classification des données manquantes en ACV prospective dans le domaine de l'énergie (Pehnt et al. 2003a) (P = passé, Pr = présente, F = futur)	52
Tableau 9 - Critères pour choisir une méthode de prospective en ACV (Pehnt et al. 2003a)	52
Tableau 10 - Paramètres et méthodes prospectives utilisés par Pehnt et al. (2003) pour leur ACV des piles à combustible.....	52
Tableau 11 - Points de divergence entre analyse prospective et ACV (Rasmussen et al. 2005)	53
Tableau 12 – Paramètres retenus dans l'ACV du bus de Spielmann et al. (2005)	55
Tableau 13 – Matrice d'impact de l'analyse structurelle de l'ACV du bus (Spielmann et al. 2005).....	55
Tableau 14 – Matrice de cohérence des paramètres de l'ACV prospective du bus (Spielmann et al. 2005)	56
Tableau 15 - Evolution des paramètres utilisés dans l'étude de Raugei et al. (2009)	58
Tableau 16 - Scénarios énergétiques pour l'Espagne en 2030 (Dominguez-Ramos et al., 2010)	59
Tableau 17 - Paramètres technologiques retenus pour l'ACV prospective des panneaux photovoltaïques en Espagne entre 2007 et 2030 (Dominguez-Ramos et al. 2010)	59
Tableau 18 – Valeurs des paramètres utilisées dans les scénarios de production d'éthanol (Da Silva et al. 2014)	62
Tableau 19 – Parts de marché des différentes sources de production d'électricité en Europe selon le scénario (ISIS, 2009)	63
Tableau 20 – Classement des ACV prospectives en fonction de leurs objectifs	70
Tableau 21 – Classement des ACV prospectives en fonction de leur typologie d'objectif et de la méthodologie prospective mise en œuvre	71
Tableau 22 – Comment réduire le nombre de scénarios – résultats du panel ACV	76
Tableau 23 - Faut-il mixer les sources de données pour réaliser l'ICV ? Réponses détaillées du panel ACV	78
Tableau 24 - Comment pensez-vous que nous puissions améliorer la fiabilité des résultats des ACV prospectives ? Réponses du panel ACV	81
Tableau 25 – Quels usages pour l'ACV prospective ? Résultats du panel ACV.....	83

1 Préambule

Les objectifs d'émissions de gaz à effet de serre (GES) en Europe à l'horizon 2050, le développement des stratégies via l'ACV conséquentielle, les études de produits ou systèmes à longue durée de vie (bâtiment, transport) nécessitent une vision prospective des flux d'énergie et de matières. Ainsi, pour appuyer des calculs prospectifs au sein d'ACV, les données d'inventaires devraient représenter des horizons de temps adaptés et lointains.

Des organismes spécialisés réalisent des simulations prospectives concernant les énergies (ex. mix-énergétiques possibles, impacts associés à la production de telle ou telle énergie, introduction de solutions innovantes ...) ou les ressources (ex. disponibilité possible, consommations possibles, mode d'exploitation et impacts associés) à des horizons lointains (2030, 2050). D'autres organismes (ou les mêmes) en déduisent des inventaires de cycle de vie associés à ces énergies et ces ressources... Cependant, ces études sont fondées sur des choix et méthodologies complexes, mal connues et difficilement prévisibles.

Dans ce cadre, SCORE LCA souhaite réaliser une étude afin de :

- Etablir un état des lieux des inventaires existants et faire une analyse de ces inventaires
- Etablir des recommandations pour utiliser ces inventaires en ACV
- Illustrer avec des exemples concrets

Ce document correspond au rapport final (Livrable L3) tel que défini dans le programme de travail. Conformément à celui-ci, il contient les sections suivantes :

- Etat de l'art ;
- Spécificités des ACV prospectives ;
- Méthodologie.

2 État de l'art

2.1 Prospective pour l'énergie et les ressources

2.1.1 Résumé

L'histoire retient généralement la création, en 1946, de la RAND et de sa constitution en *think tank* indépendant comme le point de départ de la prospective moderne. Toutefois, il semble que les sources de la discipline sont à rechercher beaucoup plus loin dans l'histoire. En effet, avec les premières utopies (*La République* de Platon, *Utopia* de Thomas More, *Thélème* de François de Rabelais, *La nouvelle Atlantide* de Francis Bacon) certains auteurs ont, dans l'histoire, élaboré des constructions du monde bâties sur des réflexions philosophiques, morales, sociologiques ou politiques. Les économistes, et la théorie économique plus généralement, ne sont pas en reste dans la construction de la discipline. La notion de prospective n'apparaît certes pas dans les grands ouvrages de la pensée économique des 18^{ème} et 19^{ème} siècles, mais les préoccupations de certains économistes (Malthus, Jevons, Marx), la formulation de leurs hypothèses et les conclusions délivrées dessinent les réflexes de la méthodologie prospective, notamment sur la question des ressources naturelles et de leur possible épuisement. La révolution industrielle a certes permis de poser les jalons des questions constituant le cœur de l'activité de la prospective (trajectoires de consommation, épuisement des ressources, approche technico-économique), notamment porté par les considérations liées aux trajectoires de demande de matières premières. Toutefois, elle n'a pas permis de structurer de manière globale une discipline scientifique relative à la prospective. En effet, le processus de révolution industrielle s'est étalé en Europe sur près d'un siècle, ce morcellement n'encourageant pas la prise en compte d'une problématique globale et/ou géographique commune. Il faudra ainsi attendre l'après deuxième guerre mondiale et un mouvement commun de reconstruction, de besoin de planification et/ou de besoins stratégiques et sectoriels (militaires notamment) pour que la prospective moderne se structure scientifiquement au niveau international. La deuxième guerre mondiale constitue une rupture pour la discipline prospective. Rupture méthodologique tout d'abord puisque la période d'après-guerre va correspondre à une certaine forme de

rationalisation de l'activité. Rupture géographique puisque deux foyers de perspectives vont progressivement s'imposer aux Etats-Unis (Rand Corporation, Hudson Institute) et en France (Centre d'Etudes Prospectives, Futuribles International).

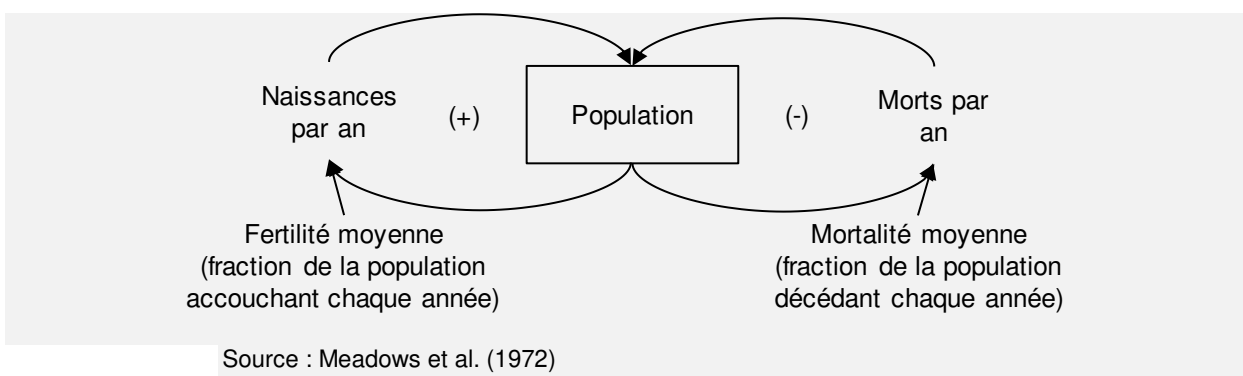
D'un point de vue méthodologique, la période 1945-1960 correspond à une forme de rationalisation et de développement d'une discipline scientifique « de construction des futurs » fondée sur des méthodes scientifiques d'élaboration. Cette rationalisation s'effectuera de trois manières : (i) la prévalence des scénarios technologiques, (ii) : la construction de scénarios alternatifs dans la majeure partie des études, (iii) : la professionnalisation de la discipline. La prospective américaine financée en grande partie par le complexe militaire commença ainsi à structurer différentes méthodologies inhérentes à ces évolutions : théorie des jeux, modélisation, matrices d'impacts, méthode Delphi. En parallèle, deux évolutions majeures vont renforcer ces pratiques : le développement et le déploiement de nouvelles technologies telles que la bombe nucléaire et l'usage massif des pesticides et un certain catastrophisme démographique.

Le deuxième foyer de développement de la prospective se situe en France où deux « familles » de prospectivistes (Gaston Berger, Bertrand et Hélène de Jouvenel) mettent en place leurs propres organisations et leurs propres périodiques. La prospective française est plutôt centrée sur les questions de planification nationale de long terme et, à la différence d'une prospective technologique, la discipline française et plus globalement européenne s'oriente elle vers une vision plus humaniste, utopiste et en rupture avec le passé.

Si les préoccupations environnementales apparaissent dès 1945 aux Etats-Unis en raison notamment des débats sur le nucléaire et sur l'usage des pesticides, ce n'est qu'à la fin des années 1950 et au début des années 1960 que s'élèvent en Europe des discours alarmistes sur ces questions. Et dès la fin des années 1960, la préoccupation de l'épuisement des ressources naturelles se généralise dans le débat économique et sociétal international comme en témoigne la conférence de Stockholm en 1972 et la constitution du Club de Rome, véritable catalyseur de la prise de conscience environnementale internationale. Publié en 1972, le rapport du Club de Rome, *The Limits to Growth*, utilisant un modèle de simulation du *Massachusetts Institute of Technology* (M.I.T), expose, pour la première fois, un risque de pénurie mondiale de matières premières sur la base de scénarii à long terme. Les auteurs du rapport ne donnent pas de projections précises pour les différentes matières premières, mais s'alarment d'un possible effondrement du modèle de production et de consommation observé depuis les années d'après-guerre.

Le modèle utilisé dans le rapport *The Limits to Growth* est structuré autour de variables de stocks (investissement en capital, population, ressources naturelles, terre, ratio d'investissement effectif du capital et pollution) et de variables de flux (évolution du standard de vie matériel, ratio de production alimentaire par tête, investissement par tête). La dynamique des systèmes a pour principe de base d'introduire des boucles dites de rétroaction entre les différentes variables du système, ces effets feedback pouvant être de nature positive, négative ou stabilisatrice.

Figure 1 : Exemple de boucle de rétroaction sur la population



Source : Meadows et al. (1972)

Les années 1990 verront apparaître une forme de fragmentation de la discipline de prospective, marquée par une prospective plutôt orientée projet et moins globalisante. Même après plusieurs décennies de

structuration, la prospective manque encore cruellement de standardisation. La terminologie anglo-saxonne n'est pas normée et ce que l'on appelle prospective peut se relater à *Futures Studies*, *Futures Research*, *Foresight*, *Futurology*, *Futuring*... Cette absence de vocabulaire commun tient notamment à la multiplicité des backgrounds éducatifs des personnes impliquées dans les travaux de prospective : économistes, ingénieurs, mathématiciens, physiciens, sociologues, designers etc.

Temps ancien : réflexion intellectuelle	Prédiction magique, divination, prophétie Utopie
1945-1960 : rationalisation et mise en place des cadres méthodologiques	Prévalence de la prospective technologique aux Etats-Unis Prospective planificatrice et normative en France Construction de scénarios alternatifs de manière systématique Professionnalisation, mise en place d'établissements en France et aux Etats-Unis Diffusion des travaux, écriture d'ouvrages
1970-1980 : structuration internationale et industrialisation de la discipline	Mondialisation des problématiques et de l'activité prospective : environnement, énergie Généralisation de la prospective normative Développement de la prospective stratégique en entreprise et implication marquée des entreprises dans cette activité Perspectives managériales de la prospective
1990-2000 : fragmentation de la discipline et monde unipolaire	Prédominance de la prévision Montée des études critiques Fragmentation en différents champs disciplinaires, diminution de la pluridisciplinarité Marginalisation de la discipline
2000- : réunification dans un monde multipolaire et instable	Retour aux préoccupations des années 1970 : énergie et environnement Mondialisation des contraintes et besoin du politique d'évocation des futurs Prospective stratégique et créativité en entreprises Intégration R&D, stratégie, marketing

Tableau 1 : Phases de structuration de la discipline

Les éléments historiques évoqués précédemment illustrent comment de nombreux auteurs se sont attachés, depuis toujours, à définir et étudier des futurs possibles. En complément de cette analyse, une autre revue de la littérature a été menée de sorte à recenser et expliciter les différentes pratiques, approches et outils en matière de prospective.

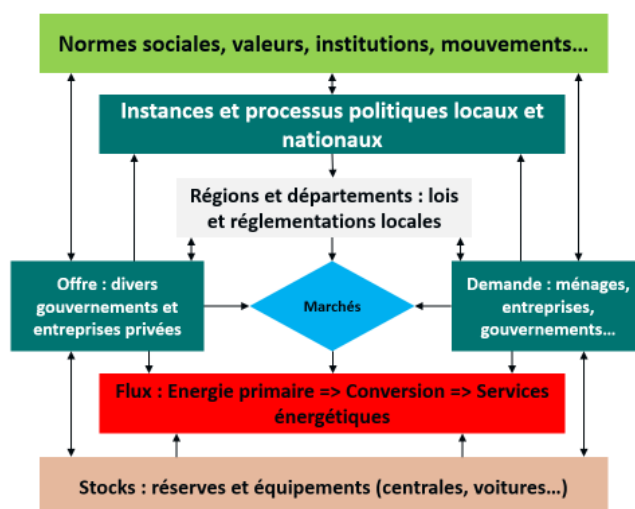
Cette seconde étude détaillée de la bibliographie révèle - au-delà de la confusion entourant la terminologie soulignée précédemment (rappelons qu'il n'existe en effet pas de définition claire, précise et partagée des concepts de prospective ou encore de scénarios) - une grande diversité de méthodes associées à la prospective et de multiples façons de les présenter.

Toutefois, il existe un certain consensus sur la philosophie générale encadrant ces exercices. La prospective est vue comme une discipline fondamentalement transverse qui vise à définir et étudier des futurs possibles afin d'éclairer des décisions et actions. Les praticiens s'accordent sur le fait qu'il « ne s'agit pas de prédire l'émergence d'événements futurs, mais de mettre en lumière les grandes forces qui peuvent amener le futur dans différentes directions ». On distingue deux ensembles de forces qui contribuent à façonner le futur des systèmes socio-économiques :

- les forces du changement : « propulseurs » correspondant à des évolutions techniques (nouvelles technologies, progrès...), économiques (prix, politiques...), sociales (modes de vie, comportements...) qui contribuent à éloigner le système de son état initial ;
- et les forces d'inertie : forces « de rappel » d'ordre techniques (progrès technique limité, coûts élevés ...), économiques, politiques ou structurelles (bureaucratie, intérêts particuliers..) qui ramènent le système à son état initial.

L'enjeu de la prospective consiste à appréhender les effets cumulés de ces ensembles. Or ces forces constitutives sont d'une part individuellement difficiles à cerner - avec des effets d'autant plus incertains que les futurs sont lointains – et d'autre part de plus en plus complexes dans leurs interactions. Cette complexité croissante et la « non-prédictabilité » des systèmes se situe au cœur de la démarche et justifie le besoin de prospective ainsi que les efforts de structuration méthodologiques associés.

Figure 2 : Représentation d'un système socio-économique national. Source : Schmalensee (2012)



Pour les besoins de l'étude, certaines définitions de la prospective et des scénarios ont été proposées à des fins de clarification. La distinction entre prospective et scénarios pose d'ailleurs encore problème : pour certains les scénarios correspondent à une technique de prospective, pour d'autres ces deux notions se confondent ou se recouvrent partiellement. Pour Mutombo et al. (2007), par exemple, la prospective englobe toutes les techniques et processus de construction de scénarios mais ne s'y résume pas. Dans la suite de l'étude, il a été choisi de se concentrer sur la notion de scénarios car elle occupe une place centrale pour l'énergie et est souvent utilisée lorsque l'on évoque le long terme.

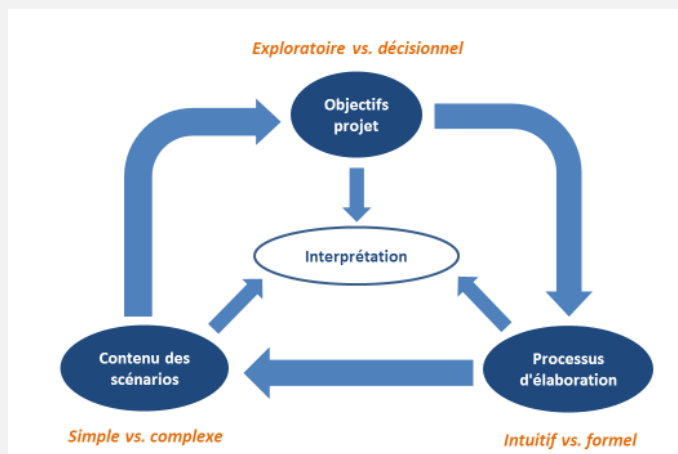
Afin de fournir un cadre pour la compréhension et la comparaison des résultats d'exercices prospectifs, une typologie de scénarios a été développée à partir des éléments les plus consensuels de la littérature - essentiellement repris de van Notten et al. (2003), Börjeson et al. (2006) et Mai et al. (2013). Cette typologie constitue un support permettant de développer une analyse critique en vue d'un usage ultérieur des données disponibles, par exemple dans le cadre d'une ACV prospective (cf. section 5 du rapport).

Rappelons qu'il n'y a pas de présentation univoque des typologies de scénarios. Par rapport à d'autres propositions, l'approche retenue présente les avantages suivants : i) être suffisamment large pour adresser un grand nombre d'études ; ii) expliciter la place de la méthodologie dans le processus de scénarisation ; iii) être suffisamment pragmatique et opérationnelle pour fournir des clés d'entrée pratiques ; iv) être relativement analogue à la pratique ACV, notamment au sens des normes ISO.

Globalement, cette typologie se décline en trois axes principaux, qui recouvrent les étapes principales du développement des scénarios : la définition des objectifs, suivie du processus de construction des scénarios, et enfin de l'élaboration de leur contenu (Figure 3). Cette vision dynamique du processus traduit la forte influence de la définition des objectifs de l'étude (axe 1) sur les choix de méthodes et données d'entrée (axe 2) qui eux-mêmes influent sur le contenu des scénarios (axe 3). Le processus peut également être circulaire si l'étude est récurrente, ou encore si les résultats de l'analyse conduisent à revoir la question posée. Chacun des axes présente une « polarité » et comporte une liste non exhaustive d'éléments structurels correspondant à des caractéristiques des scénarios (cf. Tableau 2).

Notons que la plupart de ces caractéristiques ne suggèrent pas de catégorisation binaire, mais plutôt des éléments d'évaluation qualitative, donc en partie subjective.

Figure 3 : Structure de la typologie de scénarios prospectifs



Cette typologie offre une grille de lecture relativement fine permettant à un praticien de prendre conscience des choix de données et méthodes auxquels il adhère implicitement en utilisant les résultats d'une étude prospective. Sur cette base, il lui est alors possible d'argumenter ses choix lors de l'établissement d'un inventaire de cycle de vie prospectif (ICV) en sélectionnant l'(les) étude(s) lui permettant de satisfaire au mieux une cohérence d'ensemble (cohérence des études entre elles et cohérence des cadres de réalisation de ces études avec le contexte d'étude propre à l'ACV). Les principales implications associées à chaque axe sont les suivantes :

- **Axe 1 :** Les objectifs et contexte propres à l'étude (identité des commanditaires et réalisateurs de l'étude notamment) sont des éléments importants à prendre en compte pour la sélection de données prospectives (mix énergétique par exemple). Les études exploratoires peuvent, du fait de leur ambition de générer la réflexion, produire des scénarios « extrêmes ». Leur plausibilité peut être limitée, ce qui n'altère pas forcément l'intérêt de l'exercice car la portée du message réside dans ses enseignements qualitatifs. A l'inverse, les scénarios plus décisionnels revêtent en général une dimension plus « opérationnelle ».
- **Axe 2 :** La (les) méthode(s) utilisée(s) pour générer les scénarios sont des éléments structurants de leur interprétation, et donc de leur potentielle utilisation dans un autre contexte. Les valeurs brutes dérivées de différents scénarios n'ont pas de valeur positive intrinsèque – elles sont essentiellement fausses. Il est donc a priori difficile de discriminer des résultats sur de telles bases. Par contre, le processus de design est un élément constitutif du « cadre anticipatif » du scénario, auquel on adhère en utilisant les résultats associés. Notons que lorsque des études de sensibilité sont nécessaires, il peut être intéressant de se reposer sur des travaux ayant des bases quantitatives plus marquées. Ceux-ci offrent en général une cohérence interne plus élevée.
- **Axe 3 :** L'analyse menée autour du troisième axe doit permettre de mieux cerner la « valeur d'usage » (i.e. pour l'utilisateur) des scénarios utilisés pour intégrer des données prospectives dans l'ICV. De manière générale, la comparaison des différences entre des scénarios contient plus d'informations que les scénarios absolus. De la même façon qu'un décideur cherche à identifier la valeur comparative des scénarios qu'on lui présente, le chargé d'étude à la recherche de données doit - en préalable à l'extraction - estimer le potentiel de variation des données d'intérêt en i) identifiant les possibilités avec des scénarios multiples ; ii) utilisant autant que possible l'analyse de sensibilité ; iii) adaptant les outils sollicités aux questions posées ; iv) recourant à des méthodes alternatives, notamment non quantitatives, pour élargir le champ avec des opinions d'experts...

	Axe 1 – Objectifs projet <i>Expliciter la ou les questions posées, et le contexte dans lequel elle(s) s'insère(nt)</i>	Axe 2 – Processus d'élaboration <i>Caractériser la nature des données utilisées et les méthodes de scénarisation employées</i>	Axe 3 – Contenu des scénarios <i>Qualifier le contenu des scénarios en analysant son niveau d'intégration</i>
Polarité	Scénarios exploratoires (que peut-il advenir ?) vs. décisionnels (comment atteindre un objectif donné ?)	Approche intuitive (reposant surtout sur connaissance qualitative / idées des participants) vs. formelle (reposant sur des outils rationnels et analytiques)	Complexe (scénarios avec réseau imbriqué de relations causales, illustrant des schémas de développement alternatifs basés sur un large nombre d'acteurs, secteurs et échelles temporelles et spatiales étendues) vs. simple (scénarios ayant une couverture plus limitée)
Caractéristiques scénarios	Le sujet S'agit-il d'une question de société ? L'étude porte-t-elle sur un secteur ou une région donnée ? Le questionnement est-il propre à un groupement (institutionnel, privé...) ? « Le client » Quelle est la finalité de l'étude (réflexion créative, décision stratégique, communication...) ? Quel est le point de vue adopté (opérateur industriel, collectivité, décideur public...) ? Quelle diffusion est envisagée (interne, restreinte, grand public, spécifique à un événement...) ? Qui est impliqué dans le design des scénarios ? Le point de vue S'agit-il d'un scénario de type forecasting (dessiner des futurs à partir d'un point de départ contemporain, donc plutôt exploratoire) ? ou d'un scénario de type backcasting (identifier des chemins compatibles avec un futur défini au départ, donc plutôt normatif) ? S'agit-il de dessiner un futur « ponctuel » sans envisager de trajectoire permettant de l'atteindre (point figé / « photographie » d'une année future donnée) ? Les échelles Quelle est l'échelle temporelle retenue, et avec quelle granularité ? Quelle est l'échelle spatiale retenue, et avec quelle granularité ?	Nature des données : part quantitatif / qualitatif Données qualitatives = fondées sur des jugements et dires d'experts (modèles mentaux) Données quantitatives = fondées sur l'utilisation d'outils quantitatifs / modèles formels : simulation, forecasting, analyses systèmes etc. La quantification peut intervenir à divers stades de la démarche : pour trier, quantifier et harmoniser la connaissance fournie par des experts (approche dans ce cas mixte intuitive & formelle) ou encore pour construire des trajectoires de long terme à l'aide d'outils dédiés (modèles fondés sur théorie économique). Type de modèle et usage Un ou plusieurs modèles ont-ils été utilisés pour générer le(s) scénario(s) ? Si oui, de quel(s) type(s) : - modèles de simulation, d'optimisation (sur quel(s) critère(s) ?) ou approche récurrente ? - modèles <i>top-down</i> (modèles macro-économétriques, modèles d'équilibre général calculable, modèles d'équilibre général ultra-rationnels), <i>bottom-up</i> (équilibre partiel avec couverture sectorielle à préciser) ou <i>hybride</i> (modèle intégré économie-énergie-environnement par ex.) Organisation et moyens Collecte des données : démarche participative (groupes d'experts ou enquête par ex.) ou centralisée (recherche bibliographique réalisée par un ou nombre restreint d'auteurs) ? Moyens : Ressources extensives (moyens conséquents dédiés à l'étude) vs. limitées ? Orientations/contraintes liées au contexte d'étude Y-a-t-il un/plusieurs « parti pris » influençant les choix de données (par ex. : division par 4 des émissions de GES à horizon 2050, scénario 100% ENR, prise en compte des objectifs actés dans les politiques énergie-climat nationales ou européennes etc.) ?	La dimension temporelle S'agit-il d'une trajectoire ou d'un point figé dans le futur ? Quel est le niveau de détail infra-annuel du scénario ? Pour les modèles quantitatifs : nature des anticipations des agents ? taux d'actualisation retenu ? La dimension spatiale S'agit-il d'un scénario régional, national, multi-national, et avec quel niveau de désagrégation ? Le niveau de détail spatial est-il construit par imbrication dans une échelle plus large ? Ce choix est-il compatible avec les phénomènes étudiés ? La dimension sectorielle L'étude porte-t-elle sur un ou plusieurs secteurs ? Comment sont-ils interconnectés ? Les secteurs d'intérêts sont-ils décrits de façon cohérente par rapport à leur importance dans l'étude ? Nature des variables et conditions aux limites Les variables du scénario font-elles partie du même champ (p.ex. hypothèses sur technologies) ou sont-elles hétérogènes (économie, démographie, technologies etc.) ? Peut-on identifier la présence d'hypothèses structurantes aux frontières du scénario (juridiques, comportementales...) ? Dynamique et niveau de déviation Les scénarios extrapolent-ils des tendances passées, ou illustrent-ils des scénarios contrastés, éventuellement comportant des changements rapides voire des bifurcations ? Incertitude dans les modèles quantitatifs L'incertitude est-elle prise en compte de façon exogène dans les scénarios (analyse de sensibilité, simulation de Monte-Carlo...) ? Les outils mis en œuvre incluent-ils un traitement endogène de l'incertitude (programmation stochastique, robuste...) ?

Tableau 2 : Polarité et éléments structurels des 3 axes de la typologie de scénarios proposée

Afin d'illustrer l'usage de la typologie de scénarios, une douzaine d'études prospectives de référence ont été passées au crible de cette grille. Cela a par ailleurs permis de mettre en lumière d'une part la diversité des approches et d'autre part le relatif manque de transparence de certains travaux : il est souvent difficile de relever toute l'information voulue sur le contexte d'étude, les méthodes et les outils utilisés pour produire les scénarios ou encore sur la nature des données d'entrée.

2.1.2 Aux sources de la prospective : « chocs » technologiques, politiques et sociétaux à travers l'histoire

La prospective est « la science ayant pour objet l'étude des causes techniques, scientifiques, économiques et sociales qui accélèrent l'évolution du monde moderne, et la prévision des situations qui pourraient découler de leurs influences conjuguées » (Larousse, 1990). Cette définition a la vertu d'inscrire la prospective dans un caractère pluridisciplinaire et d'imposer un cadre méthodologique et scientifique la différenciant de pratiques de prédiction antérieures telles que la prophétie ou la divination.

Hugues de Jouvenel, président-délégué général de Futuribles International, écrivait en 1993 dans un guide de prospective : « Ni prophétie ni prévision – concept théologique réservé à la connaissance que seul Dieu aurait de l'avenir, disait Voltaire – la prospective n'a pas pour objet de prédire l'avenir – de nous le dévoiler comme s'il s'agissait d'une chose déjà faite – mais de nous aider à le construire¹ ».

L'histoire retient généralement la création, en 1946, de la RAND, dont le nom est tiré de la contraction des termes *Research and Development*, et de sa constitution en *think tank* indépendant après sa séparation de la compagnie Douglas Aircraft en 1948, comme le point de départ de la prospective moderne. Toutefois, il semble que les sources de la discipline sont à rechercher beaucoup plus loin dans l'histoire. En effet, des premières utopies avec *La République* de Platon (-380 av J.C) ou du célèbre *Utopia* de Thomas More (1516), de François de Rabelais avec *Thélème* (1532) ou de Francis Bacon avec *La nouvelle Atlantide* (1624), certains auteurs ont, dans l'histoire, élaboré des constructions du monde bâties sur des réflexions philosophiques, morales, sociologiques ou politiques. Ces projections satiriques et/ou normatives s'inscrivent dans la construction historique d'une partie de la discipline², leur élaboration contenant certains ingrédients nécessaires à un travail de prospective : une analyse de l'existant (la société dans de nombreux cas), un ou plusieurs facteurs déterminants de changement du monde (l'éducation dans *Thélème*, la justice dans *La République*, l'égalité dans *Utopia*...) et une vision d'un monde souhaitable³. Plus tardivement, la littérature d'anticipation (Jules Verne -1828-1905-, Herbert Georges Wells -1866-1946- Aldous Huxley -1894-1963...) développera des fictions futuristes fondées, elles, notamment sur le rapport entre l'homme et la technologie (son introduction, sa généralisation), mais également sur les chaînes de causalités amenant à un ou plusieurs futurs possibles.

Les économistes, et la théorie économique plus généralement, ne sont pas en reste dans la construction de la discipline. De manière sémantique, la notion de prospective (ou de *Future Studies* en anglais) n'apparaît pas dans les grands ouvrages de la pensée économique des 18^{ème} et 19^{ème} siècles, toutefois les préoccupations de certains économistes (Malthus, Jevons, Marx), la formulation de leurs hypothèses et les conclusions délivrées dessinent les réflexes de la méthodologie prospective, notamment sur la question des ressources naturelles et de leur possible épuisement.

H. Siebert écrivait ainsi en 1981⁴ : « De la rente de rareté chez Adam Smith, de la loi de la fertilité qualitative décroissante des terres arables chez Ricardo, du scénario de Malthus jusqu'à l'état stationnaire de Mill et jusqu'à la problématique des ressources en charbon chez Jevons, la formation de la pensée économique a toujours suivi les concepts de rareté ». Si la prospective ne serait être ramenée à la seule question des ressources et de leurs évaluations quantitatives, ces questions se situent au cœur de certaines problématiques de la discipline. Toutefois, il est important de noter qu'il existe une rupture manifeste dans la pensée économique avec l'empreinte laissée par l'école néoclassique autour des années 1870, la nature et les ressources naturelles (leurs évaluations et

¹ Hugues de Jouvenel, La démarche prospective. Un bref guide méthodologique, 1993.

² Nous verrons dans une section suivante qu'il existe deux types de prospective : la prospective exploratoire et la prospective stratégique, plus normative.

³ Les utopies prennent plutôt la forme de prospective normative.

⁴ Ökonomische Theorie natürlicher Ressourcen. Ein Überblick », Zeitschrift für Wirtschaft- und Sozialwissenschaften, 101, 3, p. 267-298.

leurs projections) étant progressivement et paradoxalement marginalisées après la révolution industrielle.

R. Passet (1979) aborde la question des rapports entre l'économie, en tant que science constituée, et les ressources naturelles. D'une phase de soumission aux ressources naturelles, la science économique aurait ainsi connu une forme de repliement tout au long du 19^{ème} siècle jusqu'à devenir une science de gestion des choses mortes⁵ par la suite. Il évoque ainsi « une forme de réduction du champ de la pensée économique⁶ » à partir du milieu du 19^{ème} siècle que Potier (2015) appelle la *dématérialisation* de l'analyse économique⁷. En effet, au 18^{ème} siècle, les ressources naturelles et leurs évaluations comptables restent primordiales puisqu'à l'époque, la question centrale de l'économie est celle de la richesse tirée des activités agricoles, de leur reproduction et d'un éventuel surplus permettant la sortie d'un état stationnaire. Constituée autour des Physiocrates (Cantillon, Quesnay, Mirabeau) au milieu du 18^{ème} siècle, la théorie économique entretient dès lors un rapport étroit avec la question des ressources naturelles et de leur évaluation physique. En parallèle d'un ordre naturel et de lois régissant l'économie, l'activité économique est établie à travers les seuls flux physiques⁸ de l'agriculture, seule source de richesse de la nation. Les prémises de l'industrialisation progressive des sociétés vont contribuer à faire évoluer cette relation avec les ressources, ces dernières n'étant plus les seules sources de richesses et d'activités des nations. La notion d'ordre naturel va notamment disparaître chez Adam Smith (1723-1790), remplacée par celle de main invisible et d'intérêts particuliers permettant d'assurer un bien-être collectif.

Economiste de l'école classique Thomas Robert Malthus (1766-1834) posera les premiers jalons d'une pensée causale entre la démographie et les ressources naturelles dans son célèbre ouvrage *Essai sur le Principe de Population*⁹. Ce dernier est intéressant dans notre approche historique sur la prospective car il aborde les questions de reproduction et d'effondrement du système en s'appuyant sur des principes méthodologiques des mathématiques. Dans la pensée de Malthus, la population devrait connaître une croissance exponentielle ou géométrique quand les ressources naturelles augmenteraient de manière arithmétique. Cette divergence constitue une trajectoire dangereuse selon l'économiste et ce dernier identifie deux types de politiques permettant de prévenir la surpopulation : les préventives œuvrant à la limitation de la natalité par la contrainte morale (chasteté, mariage tardif) ou les destructives notamment les conséquences des guerres ou des maladies infectieuses. Malthus s'intéresse plus particulièrement aux premières pour modifier les trajectoires de surpopulation et pour ramener un certain équilibre entre les tendances démographiques et la production alimentaire.

Alors que la pensée économique enregistre un bouleversement majeur avec la première révolution néoclassique de 1870¹⁰, W.S. Jevons va produire l'un des tout premiers ouvrages consacrés à l'épuisement d'une ressource énergétique. Dans *The Coal Question*¹¹, il prend le parti d'une approche malthusienne de la problématique énergétique, avec une consommation de charbon croissant à un rythme géométrique, en raison de la diffusion des usages charbonniers, alors que la production de charbon, avec une hypothèse de réserves limitées, évolue dans un contexte de rendements décroissants. Dans cet ouvrage, Jevons a tout d'abord synthétisé le travail de nombreux économistes ou géologues, inquiets du déséquilibre croissant entre le niveau des réserves et la hausse de la consommation charbonnière.

Avant *The Coal Question*, John Williams (1789) a écrit sur la faible disponibilité de la ressource et les risques de pénurie sur l'économie de la Grande-Bretagne, tout comme Robert Bald (1812) ou Edward Hull (1860) qui relatait, dans un contexte de doublement de la consommation de charbon de 1840 à 1860, que « si elle continuait à doubler tous les vingt ans, nos approvisionnements seraient épuisés

⁵ Par chose morte, l'auteur entend la seule étude du capital comme facteur de production.

⁶ René Passet, L'économie et le vivant, Payot, 1979.

⁷ Pottier, A. Théories de la croissance et environnement: la dématérialisation de l'analyse économique. Séminaire du LIED Modèles énergétiques et transition économique, 20 octobre 2015, Paris.

⁸ Voir notamment le Tableau Economique de Quesnay (1758), ou tableau zigzag, ancêtre des matrices *Input-Output* de V. Leontief et précurseur de la comptabilité nationale moderne.

⁹ Essai sur le principe de population (1805) est la traduction française d'un travail commencé et publié anonymement en 1798 sous le titre : *An Essay on the Principle of Population, as it Affects the Future Improvement of Society with Remarks on the Speculations of Mr. Godwin, M. Condorcet, and Other Writers* » et de « *An essay on the Principle of Population; or, a view of its past and present effects on human happiness; with an enquiry into our prospects respecting the future removal or mitigation of the evils which it occasions.* » publié en 1803.

¹⁰ Les bases de la théorie néoclassique vont être simultanément jetées entre 1870 et 1874 à Lausanne par Léon Walras, à Vienne par Karl Menger et à Londres par William Stanley Jevons.

¹¹ La question charbonnière (1865). Disponible sur : http://oilcrash.net/media/pdf/The_Coal_Question.pdf

avant l'an 2034¹² ». Dans son approche méthodologique, Jevons va approfondir le sujet en intégrant notamment les incertitudes concernant le sous-sol minier britannique et en associant dans sa méthodologie les aspects purement économiques du secteur : coûts d'extraction, concurrence avec les charbons étrangers, limites physiques d'extraction en profondeur, intérêt commercial des mines à ciel ouvert, impact sur les OPEX et les CAPEX, rentabilité. Jevons associe ainsi une approche technico-économique de la question à laquelle il ajoute une étude poussée de la demande en charbon et des substituts possibles à ce dernier. L'ouvrage de Jevons reçut un accueil considérable, notamment auprès d'économistes comme John Stuart Mill, mais également par le Chancelier de l'Echiquier de l'époque, William Ewart Gladstone. En effet, Jevons n'aborde pas la question charbonnière sous le simple angle des ressources mais discute également dans son ouvrage des conséquences de l'épuisement des mines de charbon en Grande-Bretagne et notamment de l'impact de ce mouvement sur le déclin du pays : « Nous ne pourrions jamais progresser jusqu'à des niveaux élevés de consommation supposés. Mais cela signifie seulement que le freinage de notre progrès doit devenir fortement perceptible d'ici un siècle ; que le coût du combustible doit augmenter, peut-être en une génération, à un taux menaçant notre suprématie industrielle et commerciale. La conclusion est inévitable, que notre état progressif et heureux d'aujourd'hui est une chose de durée limitée¹³ ». Le travail de Jevons raisonne ainsi pour tous ceux qui s'évertuent à penser le monde comme un système complexe et à identifier les conséquences possibles de l'évolution d'un facteur. Et ainsi pour lui d'évoquer les politiques susceptibles de modifier la trajectoire pour éviter le déclin : remise en cause du libre-échange, droits de douane, prix des énergies, recherche de substituts. En outre, Jevons jettera les premiers jalons des relations entre les processus d'accélération technologique et de diminution des coûts. Il formalisera cette intuition à travers ce que les économistes appellent le paradoxe de Jevons qui veut que « l'accroissement de l'efficacité technologique dans l'utilisation d'une ressource naturelle comme le charbon ne réduit pas la demande pour cette ressource, mais l'accroît au contraire¹⁴ ». Cette intuition sera par la suite reprise et développée par de nombreux économistes au premier rang desquels Hotelling et Ramsay.

La révolution industrielle a certes permis de poser les jalons des questions constituant le cœur de l'activité de la prospective (trajectoires de consommation, épuisement des ressources, approche technico-économique), notamment porté par les considérations liées aux trajectoires de demande de matières premières. Toutefois, elle n'a pas permis de structurer de manière globale une discipline scientifique relative à la prospective. En effet, le processus de révolution industrielle s'est étalé en Europe sur près d'un siècle, ce morcellement n'encourageant pas la prise en compte d'une problématique globale et/ou géographique commune. Il faudra ainsi attendre l'après deuxième guerre mondiale et un mouvement commun de reconstruction, de besoin de planification et/ou de besoins stratégiques et sectoriels (militaires notamment) pour que la prospective moderne se structure scientifiquement au niveau international.

2.1.3 Le monde de l'après-guerre : les temps modernes de la prospective

2.1.3.1 Deux foyers, deux logiques : une rationalisation des études prospectives et la constitution progressive d'études sur les futurs

La deuxième guerre mondiale constitue une rupture pour la discipline prospective. Rupture méthodologique tout d'abord puisque la période d'après-guerre va correspondre à une certaine forme de rationalisation de l'activité. Rupture géographique puisque deux foyers de prospectives vont progressivement s'imposer aux Etats-Unis (Rand Corporation, Hudson Institute) et en France (Centre d'Etudes Prospectives, Futuribles Internationales).

D'un point de vue méthodologique, la période 1945-1960 correspond à une forme de rationalisation et de développement d'une discipline scientifique « de construction des futurs » fondée sur des méthodes scientifiques d'élaboration (Son, 2015). Cette rationalisation s'effectuera de trois manières : (i) la prévalence des scénarios technologiques, (ii) : la construction de scénarios alternatifs dans la majeure partie des études, (iii) : la professionnalisation de la discipline. De nombreux facteurs ont influencé cette dynamique : la recherche de nouveaux marchés et de diversification, la volonté de moderniser les systèmes économiques, politiques et sociaux et le contexte géopolitique de la guerre

¹² Robine, M. La question charbonnière de William Stanley Jevons. In: Revue économique, volume 41, n°2, 1990. pp. 369-394.

¹³ The Coal Question, p.215 ; Cité par Robine, M ; Op.Cit.

¹⁴ The Coal Question, p.75. « But the economy of coal in manufactures is a different matter. It is wholly a confusion of ideas to suppose that the economical use of fuel is equivalent to a diminished consumption. The very contrary is the truth. »

froide. Ce dernier facteur a largement influencé les fondements de la prospective aux Etats-Unis, le complexe militaro-stratégique cherchant à scénariser les évolutions possibles des acteurs dans un monde bipolaire (Etats-Unis *versus* URSS). La prospective américaine financée en grande partie par le complexe militaire commença ainsi à structurer différentes méthodologies inhérentes à ces évolutions : théorie des jeux, modélisation, matrices d'impacts, méthode Delphi¹⁵. En parallèle, deux évolutions majeures vont renforcer ces pratiques (Nicolas, 2016) : le développement et le déploiement de nouvelles technologies telles que la bombe nucléaire et l'usage massif des pesticides et un certain catastrophisme démographique.

Vieille-Blanchard (2011) met ainsi en exergue le catastrophisme démographique de l'après-guerre comme catalyseur du mouvement prospectif outre-Atlantique. En 1948, la sortie du livre de William Vogt, *La Faim du monde*¹⁶, portera sur le devant de la scène un courant de pensées porté par l'auteur et par Julian Huxley et Fairfield Osborn, respectivement Directeur Général de l'UNESCO et Directeur de la Société Zoologique de New-York. Pour ces derniers, fortement influencés par les thèses malthusiennes, l'optimisme des agences onusiennes quant aux progrès techniques des rendements agricoles doit être relativisé face à la croissance exponentielle de la population mondiale.

En définitive, cet ensemble de visions catastrophiques d'évolution du monde conduit le mouvement prospectiviste américain à développer des *Futures Studies* pour faire face à l'anxiété de la guerre froide ou à l'apocalypse nucléaire (Tolon, 2012). En URSS, à la même période, la prospective se développe également et se focalise sur les questions de planification et d'affirmation de modèle. Contrairement aux Etats-Unis où les questions de pénurie de ressources, d'apocalypse nucléaire et d'externalités environnementales sont centrales, l'URSS élabore des scénarios utopistes d'un monde sans limites avec, néanmoins, des trajectoires d'effondrement du modèle capitaliste face au triomphe communiste.

La Rand corporation est née de ces préoccupations au lendemain de la première guerre mondiale. Elle s'est d'abord constituée en un simple groupe de travail au sein de la *Douglas Aircraft Company* pour réaliser, à la demande de Franklin Roosevelt, un inventaire des progrès technologiques pouvant influencer le secteur militaire. Cela donna lieu notamment à la publication de Théodore Van Karman, *Towards New Horizons* en 1947. Par la suite, la RAND s'orienta vers la constitution d'un groupe de réflexion indépendant et pluridisciplinaire composé de mathématiciens, de physiciens, d'économistes, de sociologues et de psychologues (Projet Recherche et Développement – RAND) dès 1948. Elle développa, par la suite, sous l'impulsion d'Olaf Helmer, de Theodore J. Gordon et de Herman Kahn, les méthodes formalisées de prospective comme la méthode Delphi ou la méthode dites des scénarios¹⁷. Certains membres de la RAND Corporation vont créer leurs propres organismes de recherche prospective, notamment Herman Kahn¹⁸ qui fonde le *Hudson Institute*¹⁹ en 1961 et Olaf Helmer, qui fonde l'*Institute for the Future*²⁰ en 1968. Ces instituts vont avoir une influence politique importante comme en témoigne la mise en place d'une « *Materials Policy commission* » par le président Truman suite à la crainte de pénurie de matières premières durant la guerre de Corée en 1953 (Vieille-Blanchard, 2011).

Le deuxième foyer de développement de la prospective se situe en France où deux « familles » de prospectivistes mettent en place leurs propres organisations et leurs propres périodiques. En 1957, Gaston Berger met en place le *Centre International de Prospectives* et publie dès 1958 le journal *Prospective*. Selon Vieille-Blanchard (2011) : « Il crée le néologisme « prospective » afin d'exprimer l'idée de l'étroite union qui existe entre action et avenir, ainsi que la pertinence d'appréhender le futur pour prendre les décisions qui concernent le présent²¹ ». En 1960, Bertrand et Hélène de Jouvenel créent *Futuribles Internationales* et le périodique *Analyse et Prévision* en 1966. La prospective française est plutôt centrée sur les questions de planification nationale de long terme et, à la différence d'une prospective technologique, la discipline française et plus globalement européenne s'oriente elle vers une vision plus humaniste, utopiste et en rupture avec le passé : « Notre civilisation

¹⁵ La méthode Delphi sera explicitée dans une prochaine section.

¹⁶ Road to survival, William Sloane Associates, New York, 355 p.

¹⁷ La recherche et l'innovation en France, sous la direction de Jacques Lesourne et Denis Randet, Editions Odile Jacob, 2007.

¹⁸ Herman Kahn est notamment connu pour ses écrits et ses scénarios de guerre nucléaire (*On Thermonuclear war*, Princeton University Press, 1961 ; *The nature and feasibility of war and deterrence*, Rand Corporation, 1960).

¹⁹ Plus d'informations sur le site de l'Hudson Institute : <http://www.hudson.org/> (Consulté le 19 juin 2016).

²⁰ Plus d'informations sur le site d'Institute for the Future : <http://www.iff.org/home/> (Consulté le 19 juin 2016).

²¹ Op. Cit p.297.

s'arrache avec peine à la fascination du passé. De l'avenir, elle ne fait que rêver et, lorsqu'elle élabore des projets qui ne sont plus de simples rêves, elle les dessine sur une toile où c'est encore le passé qui se projette. Elle est rétrospective, avec entêtement. Il lui faut devenir « prospective²² ». ». Par rapport à l'approche militaro-stratégique américaine, l'objectif des prospectivistes européens est ainsi plus normatif à travers la recherche d'orientations politiques permettant de construire et d'organiser un monde meilleur. Elle n'en oublie pas le caractère technologique des futurs mais envisage ces derniers non sous l'angle de la menace comme aux Etats-Unis, mais sous l'angle du progrès. En outre, Gaston Berger et les prospectivistes français sont largement influencés par une logique constructiviste des futurs en insistant sur l'importance des choix politiques dans les scénarios à opérer : « L'anthropologie prospective veut donner à nos actions un cadre précis, des fins valables et des bases solides. Elle ne prétend pas nous épargner la responsabilité de choisir. Malgré ses efforts, bien des choses resteront toujours obscures, bien des choses aussi dépendront de ce que nous aurons décidé ». Enfin, l'école française de futurologie²³ insiste sur la nécessité de laisser l'imagination créatrice guider certains scénarios : « L'imagination et la rigueur ne s'excluent pas. Il est bien évident qu'elles se combinent et se complètent. L'imagination doit nourrir la rigueur, et la rigueur donner à l'imagination l'ossature, cela va de soi. Il y a d'ailleurs un exemple. Un homme a pratiqué la rigueur imaginative, c'est Paul Valéry. C'était un esprit prospectif. (Jacques de Bourbon-Busset, in Etapes de la prospective, P.U.F. 1967) »

Futuribles Internationales deviendra la première organisation dépassant le cadre strictement national pour ses activités et elle représenta un véritable socle pour l'internationalisation progressive de l'activité. Elle permit notamment l'établissement du premier colloque international des recherches sur les *Future Studies* en 1967 à Oslo et la création d'une fédération scientifique internationale basée à Paris dès 1973. En parallèle de ce mouvement de globalisation, la publication d'une douzaine d'ouvrages fondamentaux pour la discipline permettra de réellement poser les jalons de la discipline au niveau international (Son, 2015) durant les années 1960 : *The Image of the Future* (Polak, 1961), *Profiles of the Future* (Clarke, 1962), *The Technological Society* (Ellul, 1964), *Inventing the Future* (Gabor, 1964), *The Meaning of the Twentieth Century* (Boulding, 1965), *The Year 2000* (Kahn & Wiener, 1967), *The Next 500 Years* (Beckwith, 1967), *The Most Probable World* (Chase, 1968), *Population Bomb* (Paul, 1968), *Mankind 2000* (Jungk & Galtung, 1969), *The Future of the Future* (McHale, 1969), and *Future Shock* (Toffler, 1970b).

Si les préoccupations environnementales apparaissent dès 1945 aux Etats-Unis en raison notamment des débats sur le nucléaire et sur l'usage des pesticides, ce n'est qu'à la fin des années 1950 et début des années 1960 que s'élèvent en Europe des discours alarmistes sur ces questions. Et dès la fin des années 1960, la préoccupation de l'épuisement des ressources naturelles se généralise dans le débat économique et sociétal international comme en témoigne la conférence de Stockholm en 1972 et la constitution du Club de Rome, véritable catalyseur de la prise de conscience environnementale internationale.

Dans le contexte des Trente Glorieuses (1945-1973) qui verra une hausse rapide du niveau de vie dans les pays développés, et suite à l'utilisation massive des ressources dans le processus de reconstruction et d'urbanisation, les préoccupations du Club de Rome²⁴ vont, en premier lieu, apparaître comme divergentes du paradigme économique d'abondance des matières premières, négociables à faible coût au niveau international. Publié en 1972, le rapport du Club de Rome, *The Limits to Growth*²⁵, utilisant un modèle de simulation du *Massachusetts Institute of Technology* (M.I.T), expose, pour la première fois, un risque de pénurie mondiale de matières premières sur la base de scénarii à long terme. Les auteurs du rapport ne donnent pas de projections précises pour les différentes matières premières, mais s'alarment d'un possible effondrement du modèle de production et de consommation observé depuis les années d'après-guerre.

2.1.3.2 Le Club de Rome : point de départ d'une industrialisation des questions de perspectives liées aux problématiques énergétiques et environnementales

En 1968, sous l'impulsion d'Aurelio Peccei, industriel italien membre du conseil d'administration de FIAT et d'Alexander King, scientifique écossais et ancien directeur scientifique de l'Organisation de Coopération et de Développement Economique (OCDE), une trentaine de scientifiques, économistes et industriels se rencontrèrent à Rome pour évoquer les questions relatives au développement socio-économique mondial, notamment les problèmes de dégradations environnementales. L'histoire

²² Gaston Berger, Sciences Humaines et prévision, in Etapes de la prospective, P.U.F, 1967.

²³ Autre nom donné à la prospective dans les années 1960.

²⁴ Créé en avril 1968 à Rome.

²⁵ "Halte à la croissance" dans sa traduction française ou également appelé "Rapport Meadows".

retiendra que cette conférence ne rencontra pas le succès escompté mais un nombre restreint²⁶ de conférencier décida de poursuivre ces discussions en créant Le Club de Rome²⁷. Diverses rencontres (H. Ozbekhan, E. Pestel) et conférences structureront le groupe, puis leur rencontre avec Jay Forrester, père de la Dynamique des Systèmes, à la conférence de Berne de 1970, leur permettra d'envisager la réalisation d'une approche quantitative de leur problématique avec le modèle World3. Il est intéressant de constater que la Dynamique des systèmes a suivi la même évolution que la discipline des Futures Studies après la deuxième guerre mondiale. Développée dans le cadre de contrats avec le complexe militaro-industriel, elle évoluera vers une théorie de l'évolution des systèmes complexes et plus précisément vers une théorie du comportement des systèmes sociaux après l'arrivée de J. Forrester au MIT au milieu des années 1950. Forrester publiera notamment un ouvrage consacré à la dynamique urbaine (Urban dynamics) en 1969, fruit de travaux de simulation réalisés sur les processus de croissance urbaine, qui constitue d'un point de vue méthodologique, les fondations²⁸ des travaux des années 1970, World Dynamics en 1971 issu du modèle World2 et The Limits to growth en 1972 avec le modèle World 3.

Le modèle World 2 est structuré autour de variables de stocks (investissement en capital, population, ressources naturelles, terre, ratio d'investissement effectif du capital et pollution) et de variables de flux (évolution du standard de vie matériel, ratio de production alimentaire par tête, investissement par tête). La dynamique des systèmes a pour principe de bases d'introduire des boucles dites de rétroaction entre les différentes variables du système, ces effets feedback pouvant être de nature positive, négative ou stabilisatrice.

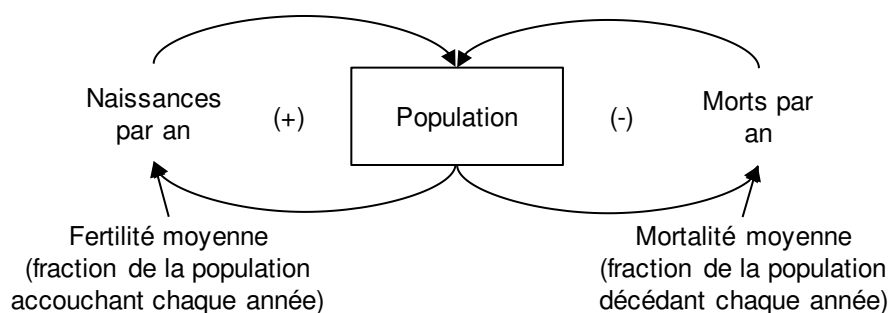


Figure 4 : Exemple de boucle de rétroaction sur la population (Meadows et al., 1972)

²⁶ On dénombre six participants parmi l'ensemble des conférenciers : les deux initiateurs, Eric Jantsch, Max Kohnstamm, Jean Saint-Geours et Hugo Thiemann, puis Kohnstamm et Saint Geours quitteront le groupe constitué.

²⁷ Plus d'informations sur le site du Club de Rome : <http://www.clubofrome.org/about-us/history/>

²⁸ Forrester écrira dans conférence en 1989 à Stuttgart : « *Urban Dynamics was the key that led to both the System Dynamics National Model, and the World Dynamics and Limits to Growth projects* ».

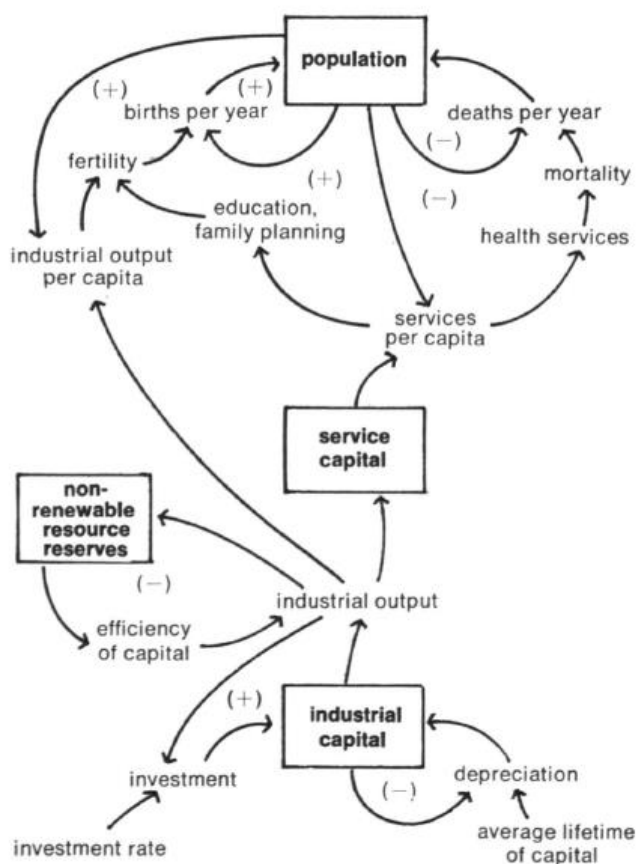


Figure 5 : Exemple de boucle de rétroaction entre les variables de population, de capital et de ressources naturelles (Meadows et al., 1972)

Les travaux réalisés dans le cadre de *World Dynamics* vont permettre de simuler différentes hypothèses sur les variables clés du système (Figure 6 & Figure 7).

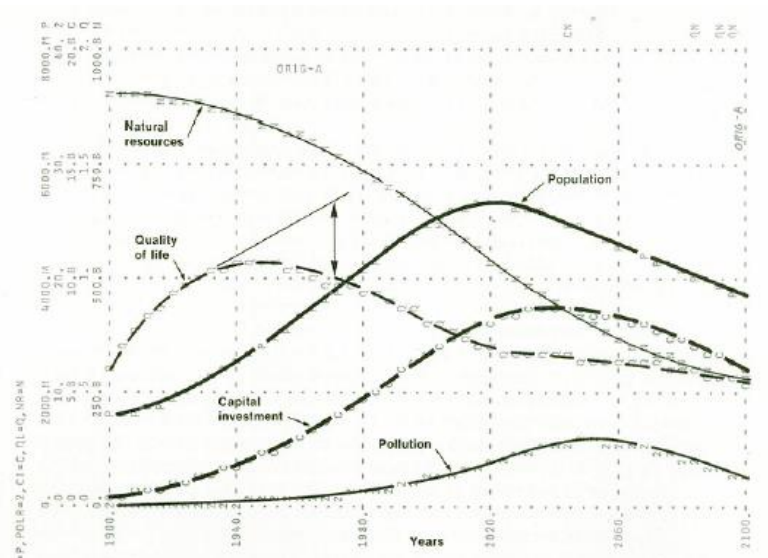


Figure 6: World2: simulation de base (Forrester, 1971)

Comprendre les résultats du modèle du Club de Rome : Les figures proposées dans cette section exposent les résultats de différentes simulations réalisées dans le cadre du rapport *The Limits to Growth*. La Figure 6 présente les résultats de la simulation de base du modèle. Dans cet exercice la population atteint un pic autour de 2020 et les investissements en capital autour de 2030. Les pressions exercées par la démographie ont des conséquences sur le stock de ressources naturelles qui diminue de manière marquée jusqu'en 2100. La qualité de vie décline rapidement et la pollution issue de la croissance économique et de l'utilisation des ressources fossiles dans le modèle atteint un pic autour de 2040. La Figure 7 propose une simulation optimiste dans laquelle les ressources n'enregistrent pas de diminution marquée (plateau légèrement dégressif) et une stabilité de la pollution. Dans ce scénario, la qualité de vie reste stable et la société repousse l'effondrement. Les Figure 8 et Figure 9 proposent des scénarios clivants. Le premier expose un scénario poursuivant les tendances de consommation de ressources, de pression démographique et d'investissements observés depuis l'après guerre. Elles conduisent à une explosion de la population, une hausse de la pollution et un effondrement du système. Le second (doublement des ressources naturelles) conduit essentiellement à une hausse exponentielle de la pollution. La Figure 10 émet l'hypothèse d'une croissance économique et de la population nulle. Seules ces deux hypothèses permettent d'éviter l'effondrement du système selon le modèle. C'est ce dernier scénario qui conduira à populariser le rapport du Club de Rome et qui fondera les théories de la décroissance développée à partir des années 1970.

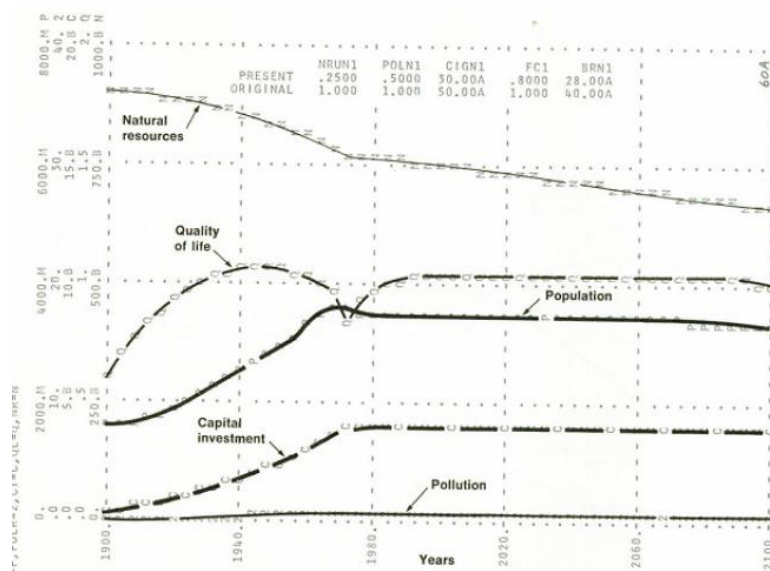


Figure 7 : World2, simulation avec hypothèses optimistes sur les ressources et la pollution (Forrester,1971)

Le travail de modélisation des dynamiques mondiales va se poursuivre avec Denis Meadows et l'équipe du MIT et le Club de Rome avec le soutien de la Fondation Volkswagen. Le rapport *The Limits to Growth*, publié en mars 1972, est réalisé avec le modèle World3²⁹. Si la complexité du modèle est étendue (doublement du nombre de variables, différents groupes de population, intégration de retard sur certaines variables...), la méthodologie de Forrester est équivalente à celle de *World Dynamics*. Dans la simulation « standard » définie par les auteurs de la manière suivante: « The "standard" world model run assumes no major change in the physical, economic, or social relationships that have historically governed the development of the world system. All variables plotted here follow historical values from 1900 to 1970. Food, industrial output, and population grow

²⁹ La structure du modèle World3 plus complexe que celle de World2 ne peut être reproduite ici avec clarté. Elle est beaucoup plus complexe et peut être analysée directement sur l'ouvrage en ligne à la page 102 de l'ouvrage disponible à cette adresse : <http://www.donellameadows.org/wp-content/userfiles/Limits-to-Growth-digital-scan-version.pdf> (Consulté le 20 juin 2016).

exponentially until the rapidly diminishing resource base forces a slowdown in industrial growth. Because of natural delays in the system, both population and pollution continue to increase for some time after the peak of industrialization. Population growth is finally halted by a rise in the death rate due to decreased food and medical services », le modèle va adopter un comportement de type "Overshoot and collapse" (Vieille-Blanchard, 2011, p.405) (Figure 8). La deuxième simulation est effectuée en supposant un doublement des réserves naturelles (Figure 9). Si le phénomène d'effondrement est quelque peu retardé, le niveau de pollution atteint des niveaux inégalés montrant ainsi les externalités environnementales marquées du processus de croissance et les limites d'absorption de la planète dans ce modèle. D'autres simulations sont réalisées sur le modèle global – ressources illimitées, ressources illimitées et contrôle de la pollution, ressources illimitées, contrôle de la pollution et hausse des rendements agricoles, ressources illimitées, contrôle de la pollution et contrôle parfait de natalité... – mais dans tous les cas, le modèle suit une trajectoire d'effondrement, la technologie ne faisant que repousser la date de ce dernier. Le rapport va ainsi à l'encontre de l'optimisme technologique régnant aux Etats-Unis à cette période.

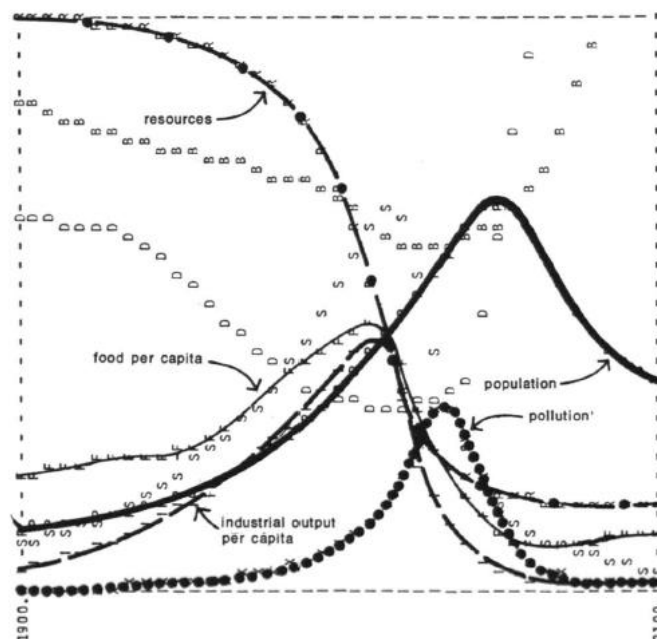


Figure 8 : World3 : Modèle global dans l'hypothèse du maintien des tendances observées (Meadows et al. (1972), p.124.)

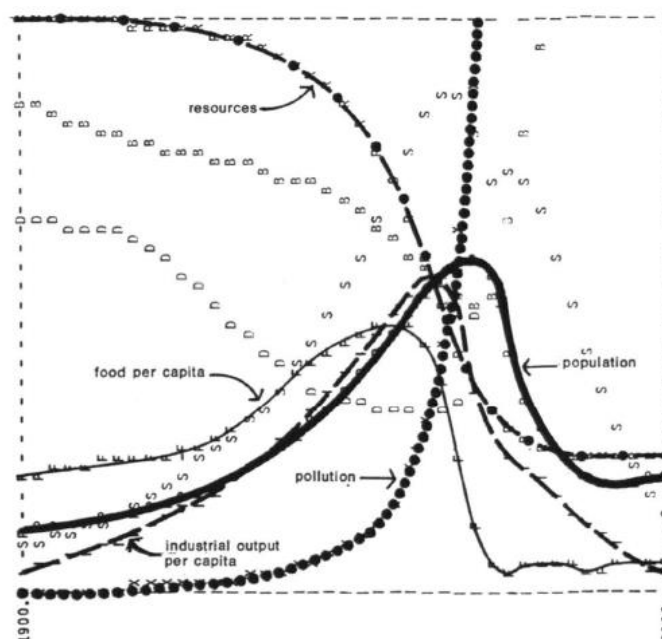


Figure 9 : World3 : simulation du modèle mondial avec un doublement des réserves de ressources naturelles (Meadows et al. (1972), p.127.)

Ce point amène les équipes de Meadows à imaginer des scénarios très hétérodoxes pour l'époque, à savoir fondés notamment sur une stabilisation de la population et/ou sur des hypothèses de croissance nulle de la production industrielle. Ainsi, selon les auteurs du rapport, l'effondrement de la société peut être évité en prônant une croissance zéro des richesses et une croissance nulle de la population au niveau mondial (**Figure 10**). Ces dernières hypothèses participeront à la forte médiatisation du rapport et à un déferlement de critiques tant du point de vue des messages véhiculés que la méthodologie employée.

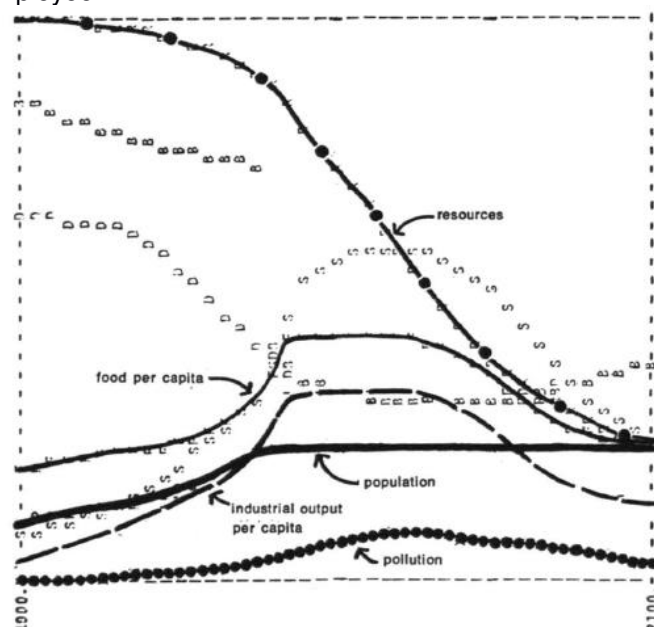


Figure 10 : World3 : simulation avec des hypothèses de croissance nulle de la production industrielle et de la population (Meadows et al. (1972), p.162.)

D'un point de vue méthodologique, les critiques porteront essentiellement sur l'absence d'un mécanisme de prix dans le modèle, sur une vision pessimiste du progrès technique, sur l'impossibilité

de corriger les trajectoires en supposant l'application de décisions politiques et économiques, sur l'absence de validité empirique des modèles et sur un certain parti pris initial des modélisateurs. Le rapport aura un retentissement important au sein de la communauté scientifique et ses conclusions toucheront le monde politique de manière hétérogène, les Etats-Unis les reléguant assez rapidement au second plan alors qu'en Europe, la lettre de Mansholt aura des conséquences plus importantes. Dans cette dernière, le Commissaire européen chargé des questions agricoles, expose une réponse européenne à ces problèmes globaux basée sur l'abandon du Produit Intérieur Brut (PIB) comme instrument de mesure, sur la stabilisation de la population et sur une politique affichée de décroissance.

Si la sortie de deux ouvrages *Road to Survival* de W. Vogt et *Our Plundered planet* de F. Osborn avait permis dès 1948 d'alerter sur la menace globale environnementale, l'invention politique de l'environnement global³⁰ sera largement portée par la publication de *The Limits to growth*. Le premier choc pétrolier fera particulièrement caisse de résonances au rapport en 1973, et ce d'autant plus que le département prospective de la compagnie pétrolière Shell, véritable pionnière en matière de Futures Studies, a adopté dès 1972 la méthode des scénarios pour explorer différentes possibilités de crises pétrolières. La prospective connaîtra ainsi une triple évolution marquée par la globalisation de ses enjeux : la nécessité d'évaluer les impacts globaux sur la société, une progression marquée au sein des entreprises dans le cadre des plans stratégiques d'activités et une activité plus soutenue des réflexions de prospective normative. Sur ce dernier point, les travaux de Touraine (1971) sur la société post-industrielle³¹ ou de Nora et Minc (1978) sur l'informatisation des sociétés³² auront des répercussions importantes pour le seul cas français.

a. Le Yo-Yo prospectiviste des années 1990-2000 :

Son (2015) évoque un retournement néolibéral dans les années 1990 et une forme de fragmentation de la discipline de prospective. Il considère notamment que la décennie 1990 a été marquée par une prospective plutôt orientée projet et moins globalisante. Si ce mouvement est à rattacher notamment au contexte géopolitique issu de la chute du Mur de Berlin et à une certaine unipolarité du monde à partir de la fin des années 1980, force est de constater que les années 2000 ont montré l'importance des approches globales. D'une part, la prise en compte des questions environnementales et la médiatisation plus importante des Conférences of Parties (COP) depuis la première réalisée à Berlin en 1995 - notamment grâce aux travaux du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) - montrent à quel point le caractère global de la prospective est fondamental pour la compréhension des évolutions économiques et écologiques.

D'autre part, il existe une forme de demande sociétale internationale pour la réalisation de ce type de travaux de prospective. Enfin, les bouleversements marqués des années 2000 que ce soit d'un point de vue économique (émergence de la Chine et des BRICS³³, choc pétrolier et supercycle sur les marchés de matières premières...), technologique (ubérisation du monde, révolution industrielle dans le numérique...), sociologique (société de services, nouveaux usages, rapport à la propriété, éducation à distance) et géopolitique (monde multipolaire, irrationalité des acteurs, risques) laissent le champ libre à de nouvelles approches globales pour la discipline.

Certes, même après plusieurs décennies de structuration, la prospective manque encore cruellement de standardisation. La terminologie anglo-saxonne n'est pas normée et ce que l'on appelle prospective peut se relier à Futures Studies, Futures Research, Foresight, Futurology, Futuring.... Cette absence de vocabulaire commun tient notamment à la multiplicité des backgrounds éducatifs des personnes impliquées dans les travaux de prospective : économistes, ingénieurs, mathématiciens, physiciens, sociologues, designers...

³⁰ Termes empruntés à Mahrane et al. (2012).

³¹ Touraine, A. (1971). *The Post-Industrial Society. Tomorrow's Social History: Classes, Conflicts and Culture in the Programmed Society*. New York: Random House.

³² Simon Nora, Alain Minc, *L'informatisation de la Société*, Paris, La Documentation française, 1978.

³³ Acronyme inventé en 2001, par l'économiste Jim O'Neill, pour désigner cet ensemble de pays émergents à fort potentiel de croissance, à savoir le Brésil, la Russie, l'Inde, la Chine et l'Afrique du sud.

2.1.3.3 Synthèse : Objet de la prospective : le lointain et l'incertain

Cette première partie nous a permis d'identifier les fondements historiques et les différentes phases de structuration de l'activité prospective au niveau international. Elle a notamment permis d'observer les différentes ruptures - après-guerre, *Club de Rome* – qui ont permis de globaliser les problématiques des ressources et de l'environnement. Avec une demande de plus en plus importante de la sphère politique et environnementale d'évaluation des conséquences du dérèglement climatique pour notamment anticiper les désordres futurs et /ou pour prévenir et s'adapter grâce à la mise en place de politiques ciblées, la prospective offre la possibilité d'observer différentes trajectoires à des horizons lointains (2050, 2100) dans un environnement de plus en plus incertain.

Temps ancien : réflexion intellectuelle	Prédiction magique, divination, prophétie Utopie
1945-1960 : rationalisation et mise en place des cadres méthodologiques	Prévalence de la prospective technologique aux Etats-Unis Prospective planificatrice et normative en France Construction de scénarios alternatifs de manière systématique Professionnalisation, mise en place d'établissements en France et aux Etats-Unis Diffusion des travaux, écriture d'ouvrages
1970-1980 : structuration internationale et industrialisation de la discipline	Mondialisation des problématiques et de l'activité prospective : environnement, énergie Généralisation de la prospective normative Développement de la prospective stratégique en entreprise et implication marquée des entreprises dans cette activité Perspectives managériales de la prospective
1990-2000 : fragmentation de la discipline et monde unipolaire	Prédominance de la prévision Montée des études critiques Fragmentation en différents champs disciplinaires, diminution de la pluridisciplinarité Marginalisation de la discipline
2000- : réunification dans un monde multipolaire et instable	Retour aux préoccupations des années 1970 : énergie et environnement Mondialisation des contraintes et besoin du politique d'évocation des futurs Prospective stratégique et créativité en entreprises Intégration R&D, stratégie, marketing

Tableau 3 : Phases de structuration de la discipline (Adapté de Son (2015) & auteurs)

2.1.4 Aperçu des méthodes de la prospective pour l'énergie et les ressources

2.1.4.1 L'irréductible complexité

A défaut de suggérer une définition précise de la prospective et des scénarios, les éléments historiques discutés dans les sections précédentes illustrent comment de nombreux auteurs se sont

attachés, depuis toujours, à définir et étudier des futurs possibles. Ceux-ci étant en partie en gestation dans les situations présentes, l'objectif de tels travaux est de mettre en lumière les choix possibles dans le présent, les bifurcations potentielles etc... afin d'éclairer les décisions et les actions. Les exemples « historiques » de réflexions prospectives illustrent la prégnance de ces préoccupations. C'est le cas de Jevons, qui pose dès le milieu du XIXe siècle la question du devenir de l'économie anglaise dans une perspective d'épuisement de la ressource charbonnière.

Nous pouvons déjà, à ce stade, nous appuyer sur un consensus au sein des praticiens et des parties prenantes de ce type de démarches. Tous reconnaissent naturellement qu'il « ne s'agit pas de prédire l'émergence d'événements futurs, mais de mettre en lumière les grandes forces qui peuvent amener le futur dans différentes directions ». On peut distinguer deux ensembles de forces qui contribuent à façonner le futur (Figure 11). D'une part, les forces du changement contribuent à éloigner le système de son état initial à travers des changements techniques (progrès, nouvelles technologies), économiques (coûts, prix, politiques, richesse...) et sociaux (modes de vie, cultures, croyances...). Elles sont les « propulseurs » du système étudié. A contrario, les forces d'inertie concourent à laisser le système dans son état initial. Elles peuvent être techniques et économiques (progrès technique limité, coûts élevés, défaillances des marchés...) politiques ou structurelles (bureaucratie, intérêts particuliers...) ; ce sont des « forces de rappel » qui ramènent le système à son état initial³⁴.

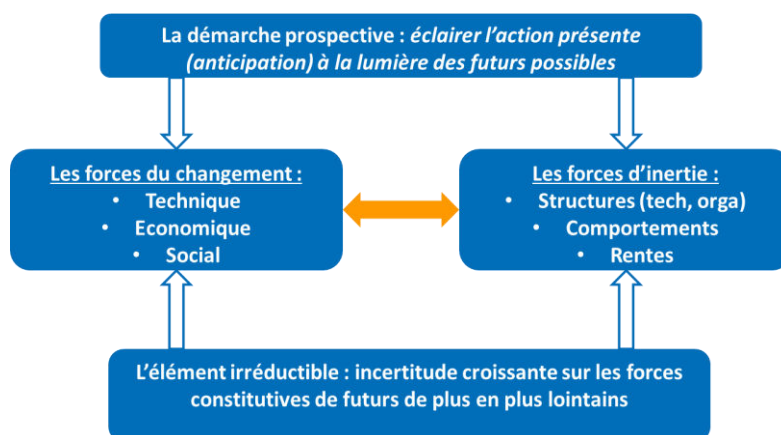


Figure 11 - Les forces constitutives du changement

Le problème posé est alors le suivant : comment appréhender les effets cumulés de ces deux types de forces, d'autant plus incertains que les futurs sont lointains ?

Ceci suggère que les forces constitutives des systèmes socio-économiques sont (i) individuellement difficiles à cerner et (ii) complexes dans leurs interactions. La notion de complexité est polysémique (voir par exemple Nicolas, 2016) ; nous retiendrons ici les acceptations suivantes : « constitué de parties interconnectées et entrelacées ³⁵ » et « présentant dans toute analyse des incertitudes significatives et de tous ordres, si bien qu'il existe de nombreuses perspectives légitimes au problème » (Funtowicz et al, 1999). Il s'agit donc de systèmes multi-problèmes, multi-dimensionnels et multi-échelles. La complexité et la « non-prédictabilité » des systèmes se situent donc bien au cœur de la prospective. Schmalensee (2012) propose un schéma stylisé d'un tel système (Figure 12), incluant les dimensions technique, économique, politique et sociale.

³⁴ Cette analogie avec les systèmes physiques – et en particulier la mécanique – renvoie directement au développement mathématique des équations différentielles ordinaires, notamment par Newton, Leibniz et Bernoulli. La mécanique newtonienne est elle-même constituée d'un ensemble d'EDO d'ordre 2. Le parallèle rappelle ainsi les premières approches quantitatives des modèles tels que Worldx, supportés également par le calcul aux dérivées partielles.

³⁵ Merriam Dictionary and Thesaurus, www.merriam-webster.com

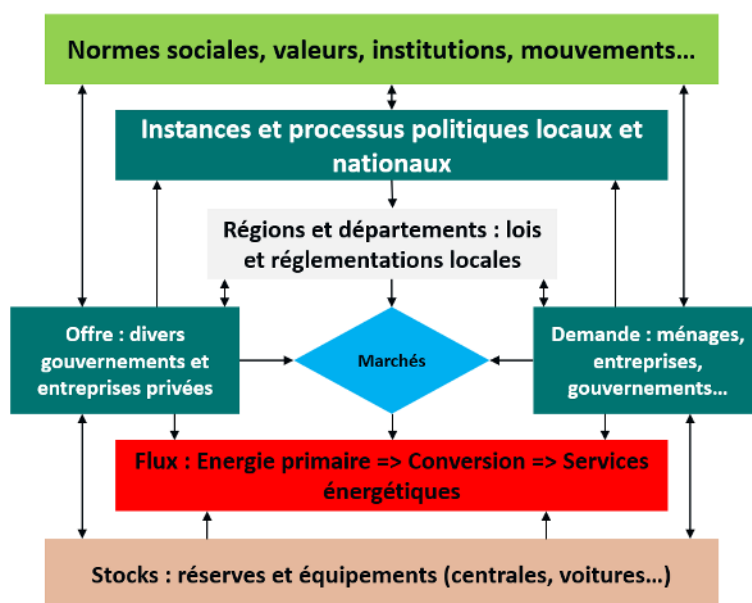


Figure 12 - Système socio-économique "local"

Pour autant, ce schéma n'illustre pas encore l'entière complexité des objets réels. Le monde moderne se caractérisant par une intégration de plus en plus importante (économique, environnementale), la dimension internationale ajoute une couche de complexité. Si la Figure 12 représente un système national, on pourrait alors envisager un système plus global (Schmalensee, 2012 ; Figure 13).

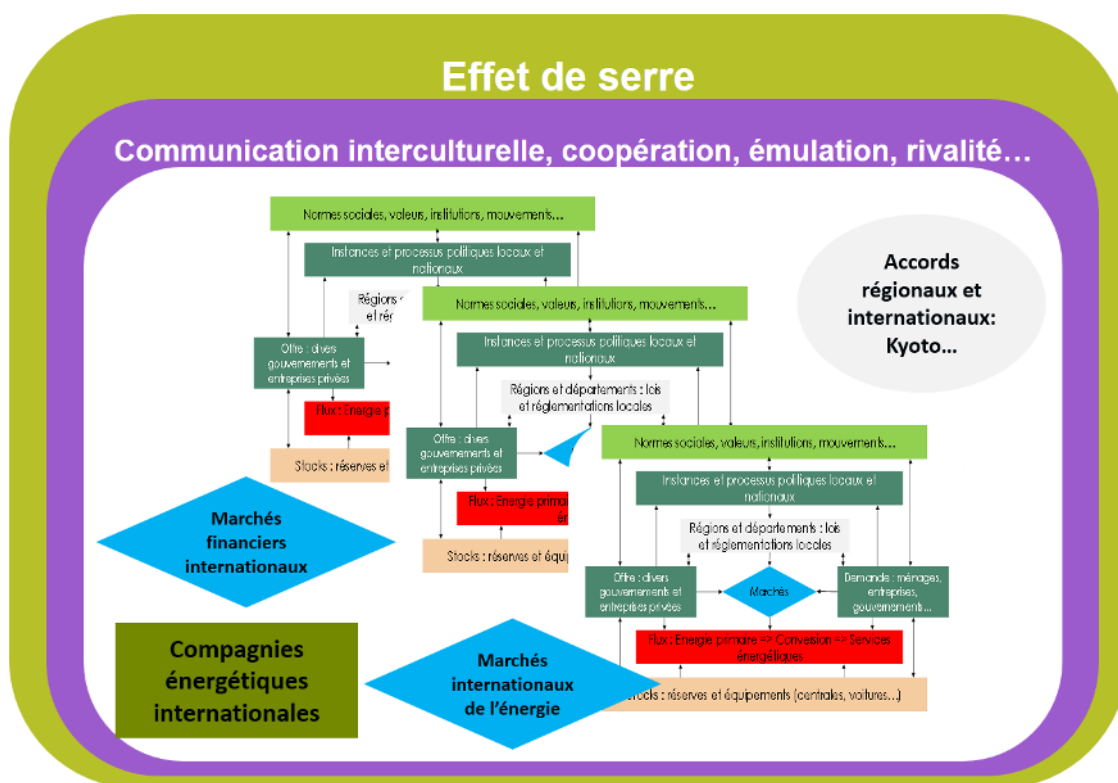


Figure 13 - Système socio-économique global

Dans ce cas, les systèmes nationaux se juxtaposent ; des éléments tels que la présence de firmes internationales, les marchés internationaux ou la problématique de l'effet de serre couplent les différentes composantes. Les différences culturelles, les coopérations ou rivalités internationales – la géopolitique – jouent alors un rôle majeur.

Cette complexité croissante des systèmes socio-économiques justifie en grande partie le besoin de prospective, et les efforts de structuration méthodologiques sous-jacents. Avant la première révolution industrielle, le capital humain et la force motrice animale sont les principaux facteurs de production. La création de richesse est mesurée et distribuée de façon assez inégalitaire ; elle provient essentiellement de l'utilisation et de la taxation des terres. La croissance démographique est stable à des niveaux faibles. C'est après la première révolution industrielle que la croissance s'accélère, que la population augmente beaucoup plus rapidement, que simultanément l'espérance de vie augmente et que des classes moyennes émergent. Ce tableau, beaucoup plus complexe, donne déjà naissance à des réflexions de long terme sur l'énergie. À ce moment, les démarches sont plutôt sectorielles ; la littérature existante est suffisamment rare pour ne pas pouvoir dégager de quelconques régularités méthodologiques. Cette description historique contraste largement avec la vision actuelle d'un monde multipolaire, caractérisé par un fort degré de globalisation, et pour lequel les marchés physiques et financiers occupent un rôle central.

2.1.4.2 Discussion autour de quelques concepts

Prospective Dès lors, comment définir la prospective ? Si une forme de consensus existe quant à la philosophie générale, une analyse plus détaillée de la littérature révèle une certaine confusion, qui commence par la terminologie. De nombreux termes se rattachent plus ou moins directement à la thématique : prospective, *futures studies*, *foresight*, prévision, prédiction, *forecast*, *futurology*. Selon Mutombo et al (2007), il s'agit « d'autant de termes qui font référence à l'étude du futur. Leur signification est d'autant plus difficile à saisir qu'ils sont issus de divers courants, ayant forgé leur propre conception de l'étude du futur, et qui ne se laissent pas forcément traduire l'un par l'autre³⁶. La confusion s'accroît si l'on y ajoute les différents « outils » et « instruments » tels que les modèles, la systémique, les scénarios, le backcasting, dont certains sont à la fois perçus comme des instruments mobilisables par l'une ou l'autre école ou comme des méthodes plus ou moins cadencées ». Concrètement, les visions américaine et française de la prospective se recouvrent partiellement, sans toutefois se confondre.

Une analyse détaillée des courants, de leurs implications et de leurs relations dépasse largement le cadre de ce travail, car elle nécessiterait une étude épistémologique approfondie. A titre de proposition, nous retiendrons ici la définition proposée par Mutombo et al (2007), qui approche la prospective du terme *Futures Studies*, et suggère que la « *prospective* » indique l'ensemble des recherches et études concernant le futur et l'évolution des systèmes, fondées sur la réflexion, la prévision et l'anticipation, et visant à identifier et comprendre les mutations en cours et à venir, et les formes possibles de l'organisation d'un système dans un futur éloigné, afin d'informer les décisions et actions du présent ». Des définitions approchantes sont proposées par exemple par Godet (1986), Börjeson et al (2006) ou Robinson (1988). Sardar (2010) propose 4 « lois » des futures studies qui complètent utilement la définition ci-dessus :

- Les futures studies sont des problèmes pernicieux/ardus : complexes, interconnectés, contradictoires, dans un environnement incertain et des paysages en mutation rapide. Pour Sardar, une conséquence importante de ce constat se situe dans la nature épistémologique des futures studies. S'il est généralement accepté que ces études sont pluridisciplinaires, l'auteur va plus loin en constatant que cette discipline est fondamentalement non-disciplinaire : les frontières entre les pratiques sont au mieux floues ; voire, elles n'existent pas ;
- La diversité est ancrée dans les futures studies ;
- Les futures studies sont « sceptiques » ;
- Les études futures sont « sans futur » : puisqu'il n'est pas possible d'avoir de connaissance réelle du futur, l'impact de ce travail exploratoire ne peut être évalué de façon pertinente que dans le présent – c'est là qu'il est censé avoir un impact. Deux implications majeures de ce point sont que (i) les anticipations peuvent (doivent ?) être en partie autodestructrices et (ii) l'important n'est pas de tenter d'avoir raison (en cela, la prospective s'écarte de la prévision).

Scénarios Dans la confusion sémantique entourant la notion de prospective ou futures studies, la distinction avec certains outils joue un rôle important. C'est le cas des scénarios, qui apparaissent

³⁶ Par exemple, dans certaines publications en anglais (Godet, 2000), M. Godet utilise le terme '*La prospective*' sans le traduire.

souvent comme une technique de prospective (Godet, 2000). Dans le domaine de l'énergie et des ressources, on parle la plupart du temps de scénarios quand on évoque le long terme. Savoir si prospective et scénarios sont confondus pose donc encore problème. La définition du Grand Robert évoque notamment pour le scénario la « façon dont on envisage que se déroule un processus », ce qui renvoie à l'idée de dynamique. Dans le domaine de la prospective, le terme de scénario (introduit par Kahn au début des années 1960), englobe initialement des « formes littéraires permettant d'illustrer une idée à portée prospective ». Pour affiner cette définition très générique, les compléments suivants sont utiles :

- « séquences d'événements hypothétiques construites pour mettre en évidence des processus causaux et les enjeux de décisions » ;
- « descriptions archétypales d'images alternatives du futur issues de représentations mentales ou de modèles qui reflètent des appréhensions différentes du passé, du présent et du futur » (Van Asselt et al, 1998).

Pour Mutombo et al (2007), la prospective englobe toutes les techniques et processus de construction de scénarios, mais ne s'y résume pas. Dans la suite de ce document, nous nous concentrons sur cette notion de scénarios, qui occupe une place centrale pour l'énergie.

2.1.4.3 Scénarios – proposition de typologie

L'élaboration d'une typologie des scénarios est utile en tant que cadre pour la compréhension et la comparaison des résultats des exercices prospectifs. Il existe de nombreuses typologies dans la littérature. L'approche proposée ici repose en grande partie sur van Notten et al (2003), complétée par des éléments suggérés notamment par Börjeson et al (2006) et Mai et al (2013). Ce choix permet d'explicitier la place de la méthodologie dans le processus de scénarisation. C'est par ailleurs une approche qui (i) est suffisamment pragmatique et opérationnelle pour fournir des clés d'entrée pratiques et (ii) présente une certaine proximité avec la pratique ACV, notamment au sens des normes ISO.

Présentation générale de la typologie

La typologie de van Notten et al (2003) repose sur une analyse extensive de scénarios provenant de champs différents de la littérature. Selon les auteurs, ce travail peut être utilisé aussi bien dans un cadre analytique – pour analyser des scénarios construits – que dans une perspective décisionnelle, pour préciser le type de scénario nécessaire à la réalisation d'une étude donnée.

Globalement, cette typologie se décline en trois axes principaux, qui recouvrent les étapes principales du développement des scénarios : la définition des objectifs, suivie du processus de design des scénarios, et enfin de l'élaboration du contenu (Figure 14).

Cette vision dynamique du processus traduit la forte influence de la définition des objectifs de l'étude sur son design, qui eux-mêmes influent sur son contenu. Le processus peut également être circulaire si l'étude est récurrente, ou encore si les résultats de l'analyse conduisent à revoir la question posée. Chacun des axes regroupe un ensemble de caractéristiques des scénarios.

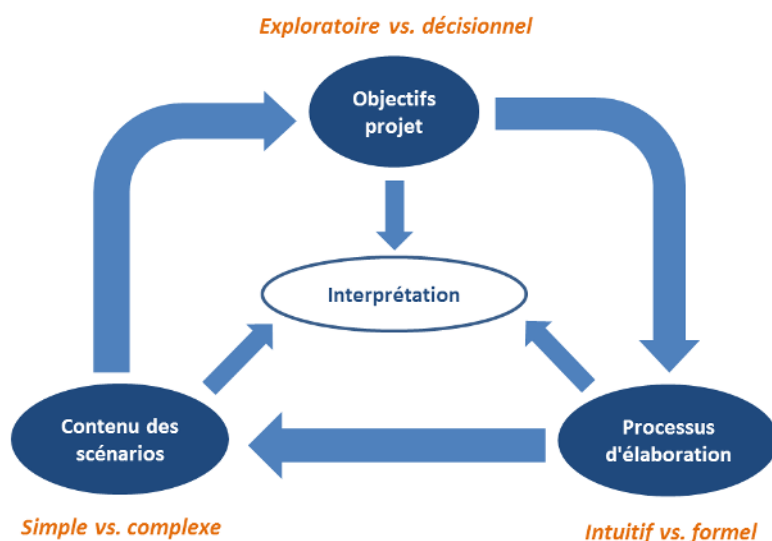


Figure 14 - Typologie de scénarios prospectifs. Adaptée de Van Notten et al. (2003) & auteurs

Axe 1 – L'objectif du projet : exploration vs aide à la décision

La première étape de la construction de scénarios consiste à expliciter la ou les questions posées, et le contexte dans lequel elle(s) s'insère(nt). Cet axe repose, à l'une de ses extrémités, sur l'approche exploratoire ; à l'autre extrémité, on trouve les scénarios à but décisionnel. Les scénarios exploratoires répondent essentiellement à la question *que peut-il advenir ?* (Börjeson et al, 2006). Ils proposent des visions du futur considérées comme possibles, selon des points de vue variés – on les retrouve donc souvent présentés dans la littérature comme un ensemble de scénarios, évoquant un large ensemble de possibilités. Les objectifs de ces études peuvent inclure la prise de conscience et l'élaboration de visions collectives, ou l'explicitation des mécanismes structurels reliant des phénomènes socio-économiques. Il s'agit donc de balayer, de façon large et sans a priori, un éventail de futurs possibles – idéalement, l'enveloppe de ces futurs possibles. On s'intéresse donc souvent au temps long. Ces approches sont également appelées *positives*. En général, dans ce type de scénarios, le processus de génération est au moins aussi important que le produit final. Ces scénarios sont en général caractérisés par un fort degré de généralité des questions abordées et un haut niveau d'intégration des phénomènes : la place des femmes dans le monde au XXI^e siècle, le rôle de l'énergie dans les sociétés modernes... Börjeson et al (2006) définissent des sous-catégories de scénarios exploratoires, selon que les variables d'intérêt soient dans le champ d'action des variables de l'étude (scénarios *stratégiques*) ou non (scénarios *externes*).

De l'autre côté du spectre des objectifs, se situent les scénarios *décisionnels*. Ils sont utilisés pour définir des sentiers vers des points futurs classés selon leur degré de désirabilité et leur compatibilité avec une certaine vision du monde, définie par le commanditaire de l'étude. Ceci implique la définition d'un critère, par exemple économique ou environnemental. Ils s'intéressent donc principalement à quelques situations ou objectifs futurs, et à des séquences d'actions permettant de les atteindre. Les scénarios décisionnels répondent principalement à la question *comment atteindre un objectif donné ?* ; on les qualifie également de normatifs. Par exemple, il s'agit d'un ensemble de scénarios de l'économie mondiale conciliables avec la finitude des ressources naturelles terrestres, qu'il s'agisse des hydrocarbures, des ressources minérales, du climat (par exemple limiter l'élévation de la température moyenne terrestre à 2°C à l'horizon 2100)... Ils peuvent parfois se décliner en options stratégiques (décisions de mise en œuvre de politiques, choix d'investissement...), qui impliquent, en plus de l'élaboration d'un critère, la définition d'un plan d'intentions et d'une logique d'implémentation. Ce champ est parfois appelé « planification stratégique » (Godet, 2000) et est clairement tourné vers l'action. Des scénarios souhaitables ne sont pas forcément possibles, car on peut savoir déjà au moment de la réalisation de l'étude qu'ils sont inatteignables. Les options stratégiques se situent alors

à l'intersection des possibles et des souhaitables (Figure 15). Enfin, des scénarios décisionnels peuvent être précédés d'une phase de scénarisation exploratoire.

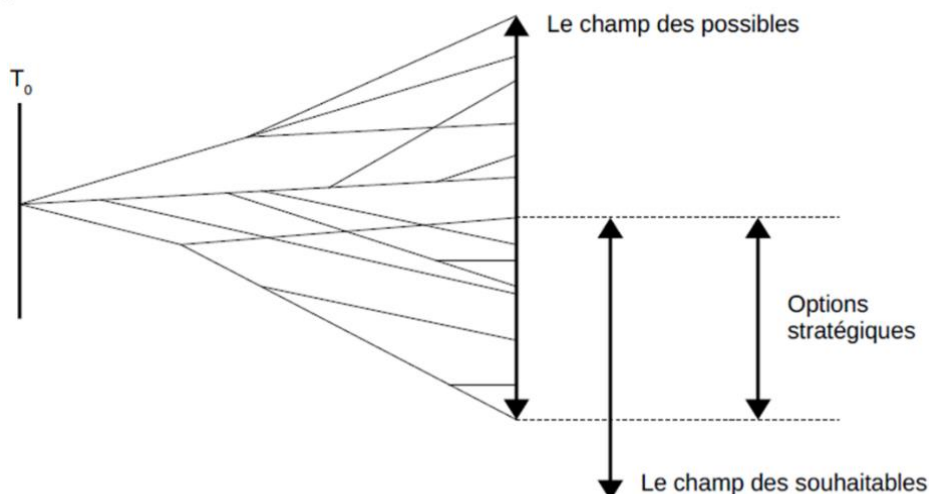


Figure 15 – Scénarios : champ des possibles, champ des souhaitables et options stratégiques

Börjeson et al (2006) distinguent deux catégories de scénarios normatifs, qui se différencient par leur propension à intégrer des évolutions incrémentales (*scénarios préservants*) ou plus radicales (*scénarios transformants*) par rapport à la situation actuelle.

Une troisième catégorie de scénario ne fait pas explicitement partie de la typologie proposée par van Notten et al (2003) ; nous la mentionnons néanmoins pour mémoire. Certains scénarios traitent de questions du type *que va-t-il advenir ?* (Börjeson et al, 2006). En cela, ils s'approchent plus de la conjoncture que de la scénarisation prospective. Ils suggèrent en effet un objectif prédictif, qui pour la majorité des auteurs n'est pas assimilable à de la prospective (Dator, 1996).

En pratique, la distinction entre un objectif exploratoire ou décisionnel n'est pas binaire ; il faut envisager cet axe de différenciation de scénarios comme un objet continu. Les caractéristiques suivantes permettent de différencier les scénarios selon le premier axe « objectif » :

1. **Le sujet**
 - a. S'agit-il d'une question de société ?
 - b. L'étude porte-elle sur un secteur ou une région précise ?
 - c. Le questionnement est-il propre à un groupement (institutionnel, privé...) ?
2. **« Le client »**
 - a. Quelle est la finalité de l'étude (réflexion créative, décision stratégique, communication...) ?
 - b. Quel est le point de vue adopté (celui d'un opérateur industriel, celui de la collectivité, d'un décideur public...) ?
 - c. Quelle diffusion est envisagée (interne, restreinte, grand public, spécifique à un événement...) ?
 - d. Qui est impliqué dans le design des scénarios ?
3. **Le point de vue**
 - a. S'agit-il d'un scénario de type forecasting (dessiner des futurs à partir d'un point de départ contemporain, donc plutôt exploratoire) ?
 - b. S'agit-il d'un scénario de type backcasting (identifier des chemins compatibles avec un futur défini au départ, donc plutôt normatif) ?
 - c. S'agit-il de dessiner un futur « ponctuel » sans envisager de trajectoire permettant de l'atteindre (point figé / « photographie » d'une année future donnée)
4. **Les échelles**
 - a. Quelle est l'échelle temporelle retenue, et avec quelle granularité ?
 - b. Quelle est l'échelle spatiale retenue, et avec quelle granularité ?

Implications pour l'élaboration d'ICV prospectifs : la philosophie générale de l'étude est un élément important à prendre en compte pour la sélection de données prospectives. L'extraction de données (mix énergétique...) suppose une adhésion implicite au cadre dans lequel elles ont été élaborées. Les études exploratoires peuvent, du fait de leur ambition de générer la réflexion, produire des scénarios « extrêmes ». Leur plausibilité peut être limitée, ce qui n'altère pas forcément l'intérêt de l'exercice car la portée du message réside dans ses enseignements qualitatifs. Certains scénarios peuvent même être fondés sur un postulat idéologique (par exemple : pas de réduction des émissions de GES sans changement drastique de comportement), le contenu de l'étude étant construit spécifiquement pour illustrer ce point. A l'inverse, les scénarios plus décisionnels revêtent en général une dimension plus « opérationnelle ». Dans tous les cas, l'identité des commanditaires et réalisateurs de l'étude sont importants, car ils peuvent traduire une certaine subjectivité et/ou la prévalence d'intérêts particuliers.

Axe 2 –Le processus d'élaboration : intuitif vs formel

Le second thème principal de la typologie recouvre un ensemble d'aspects relatifs au processus d'élaboration des scénarios. On y inclut des éléments portant sur la nature des données utilisées et sur les méthodes de scénarisation. Toujours selon van Notten et al (2003), cet axe présente à ses deux extrémités l'approche intuitive et l'approche formelle. Les **processus intuitifs** de génération de scénarios reposent essentiellement sur la connaissance qualitative et les idées des participants. Dans ce cadre, il existe des méthodes spécifiques de création et d'explicitation de connaissances pour la production de scénarios et d'histoires. Souvent, ces processus reposent sur l'animation de groupes de personnes de compétences variées. Les **approches formelles** reposent quant à elles sur des outils rationnels et analytiques. La quantification peut intervenir à différents stades de la démarche, par exemple pour trier, quantifier et harmoniser la connaissance fournie par des experts, ou encore pour construire des trajectoires de long terme avec des outils de simulation. Sur ce dernier point, les économistes ont et continuent de développer depuis de nombreuses années des outils basés sur la théorie économique. De plus en plus complexes, ils peuvent intégrer des millions d'équations et de variables. La prospective énergie – économie – environnement repose aujourd'hui en grande partie sur ces approches quantitatives (voir section dédiée ci-après pour une présentation plus détaillée). Le tableau 2 présente quelques méthodes regroupées selon cette polarité et le type (GAO, 1990).

Polarité	Type	Exemples
Intuitive	Jugementales	Opinions d'experts; Méthodes DELPHI
Formelle	Actuelles	Tests expérimentaux (ex.: marché de prédiction); Programmes de démonstration
	Empiriques	Simulation; Projections
	Logiques	Analyses de risques; Modélisation et analyse des systèmes

Tableau 4 – Méthodes d'élaboration de scénarios

Il existe en pratique de nombreuses méthodes de prospective, parfois très proches les unes des autres, dont quelques-unes sont présentées en annexe. Si elles sont parfois difficiles à catégoriser, une illustration de leur utilisation dans le processus global de scénarisation peut donner une idée plus concrète de leur intérêt. Pour ce faire, introduisons tout d'abord un cadre conceptuel simple.

Si l'on se réfère aux définitions de la prospective énoncées plus haut, une étude consiste à identifier, pour une question donnée, des « images partielles du monde réel, des relations entre des parties de ce monde, et de l'influence que nos actions peuvent avoir sur lui » (Stermann, 1990). De cela, doivent découler des « images » du futur. La distinction faite plus haut entre les approches intuitive et formelle est pratique ; néanmoins, à un plus haut degré de généralité, ces deux approches ne s'opposent pas.

En réalité, les opinions d'expert, tout comme les approches quantitatives, reposent sur des modèles ; *mentaux* dans le premier cas, *formels* dans le second. Considérons le formalisme stylisé suivant :

- y est un ensemble (vecteur) de variables d'intérêt du système, il constitue l'objet de l'étude ;
- x est un ensemble (vecteur) de variables-clés (internes) du système en jeu, elles influencent son état sous le contrôle des décideurs ;
- a est un ensemble (vecteur) de paramètres (externes) qui caractérisent le système, elles influencent son état sans que les acteurs d'intérêt puissent exercer un contrôle sur elles ;
- Enfin, f est une fonction, éventuellement très complexe, non représentable, qui traduit la nature des interdépendances entre les éléments ci-dessus.

Dans ce cadre, on peut représenter schématiquement un modèle mental ou formel de façon équivalente (Figure 16).

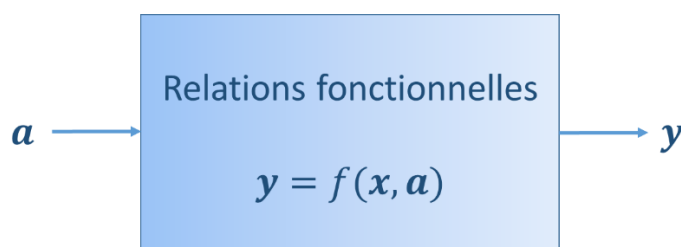


Figure 16 - Modèle mental, modèle formel

Dans un modèle mental, la plupart des composants (en particulier x , a et f) sont intuitifs, fondés sur l'expérience et/ou l'apprentissage. Ces modèles sont en général très flexibles : ils peuvent intégrer de grandes quantités d'informations de toutes formes, ou s'adapter à de nouvelles situations. Cependant, leurs frontières sont mal connues et ils se communiquent difficilement puisqu'ils sont souvent implicites : les entrées et les relations fonctionnelles (x , a et f) sont imparfaitement connus du sujet. Les approches intuitives se reposent en grande partie sur ces modèles mentaux, en tentant d'agréger des perspectives proposées par différents experts, et en utilisant des outils de concertation ou d'agrégation d'opinion.

La plupart des méthodes quantitatives reposent sur une explicitation progressive des modèles mentaux des participants. La définition du champ de l'étude est généralement suivie d'une étape d'identification des variables ; de nombreuses techniques permettent de préciser les variables internes x et externes a pour un scénario (analyses structurelles...). On peut ensuite s'intéresser au développement de ces variables en regard des variables de sortie. On commence alors à qualifier les relations du modèle, f . C'est ainsi que l'on peut concevoir différents scénarios dans le champ des possibles, en s'appuyant sur diverses méthodes. Dans l'école française de prospective, il existe de nombreuses techniques, notamment probabilistes, permettant de parcourir l'espace des variables et des états du monde (stratégies d'acteurs, analyses morphologiques...).

Les modèles formels reposent sur un système complet (c.à.d. simulable) et explicite de variables x , y , paramètres a et relations fonctionnelles f . Ceux-ci sont sélectionnés sur la base d'une théorie économique, qui peut être plus ou moins appuyée par des faits stylisés. Il existe donc, de la même manière que pour un modèle mental, une forme de subjectivité. Cependant, l'histoire racontée dans le scénario repose sur des bases différentes. Tous les attributs du modèle sont ensuite calibrés/estimés pour refléter autant que possible une situation passée. On peut alors quantifier, de façon reproductible, les conséquences logiques de relations simultanées et multifactorielles. Ces étapes sont décrites dans la Figure 17.

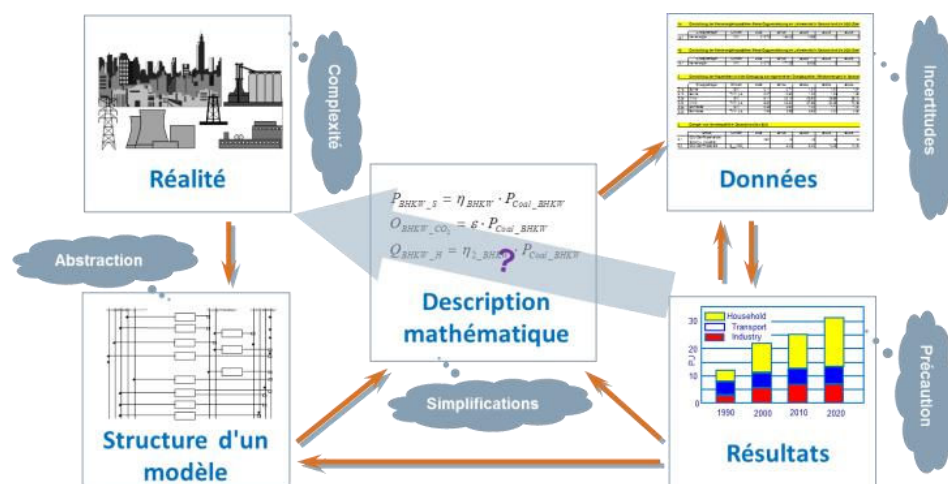


Figure 17 - La démarche de modélisation. Adapté de Remme (2008)

Néanmoins, les modèles quantitatifs pèchent souvent par un défaut de documentation, une complexité d'utilisation et l'impossibilité de prendre en compte des phénomènes non quantifiables. Ce dernier point implique notamment le fait que tous les travaux quantifiés ne sont jamais complètement explicites : les hypothèses à la frontière des périmètres retenus, ou encore les données manquantes, sont parfois complétées à dire d'expert, voire de manière ad hoc.

Les similarités entre les processus intuitifs, quantifiés et modélisés sont représentés dans la Figure 18 (inspirée de Godet (1986)). Elles illustrent une différence de degré, plutôt qu'une différence de nature, entre ces grandes catégories. Néanmoins, les approches formelles permettent souvent de réaliser des analyses de sensibilité (plus) éclairantes, car moins sujettes au manque de reproductibilité.

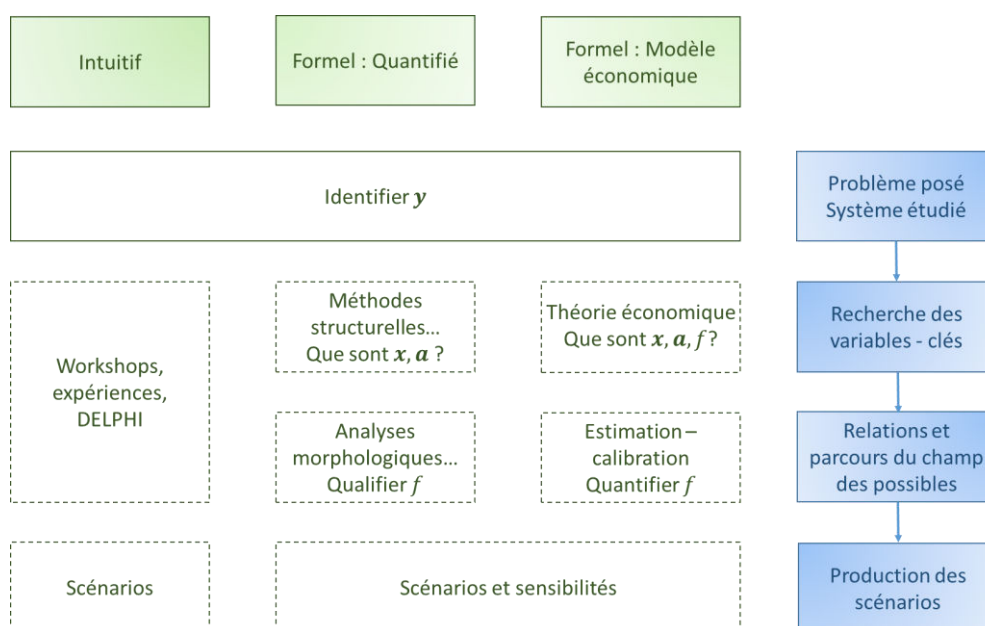


Figure 18 - Processus prospectifs

Dans la Figure 18, les cadres en pointillés représentent les étapes « perméables » des processus ; dans la pratique, il est en effet fréquent que les études utilisent des techniques différentes à différentes étapes de leur réalisation. Selon van Notten et al (2003), les éléments structurants de ce second axe sont les suivants :

1. **La nature des données**
 - a. Qualitatives
 - b. Quantitatives
2. **La collecte des données**

- a. Méthodes participatives
- b. Recherche bibliographique
- 3. Les ressources disponibles**
 - a. Extensives
 - b. Limitées
- 4. Les conditions institutionnelles**
 - a. Ouvertes
 - b. Contraintes

En pratique, ces informations ne sont pas nécessairement disponibles.

Implications pour l'élaboration d'ICV prospectifs : la (les) méthode(s) utilisée(s) pour générer les scénarios sont des éléments structurants de leur interprétation, et donc de leur potentielle utilisation dans un autre contexte. Les valeurs brutes dérivées de différents scénarios n'ont pas de valeur positive intrinsèque – elles sont essentiellement fausses. Il est donc a priori difficile de discriminer des résultats sur de telles bases. Par contre, le processus de design est un élément constitutif du « cadre anticipatif » du scénario, auquel on adhère implicitement en sélectionnant des données. De plus, lorsque des études de sensibilité sont nécessaires, il peut être intéressant de se reposer sur des travaux ayant des bases quantitatives plus marquées. Ceux-ci offrent en général une cohérence interne plus élevée.

Axe 3 – Le contenu du (des) scénario(s) : simplicité vs complexité

Le troisième axe de la typologie découle directement des deux premiers ; il porte sur la qualification du contenu du ou des scénarios, en analysant son niveau d'intégration. Ce thème couvre la nature et le nombre des variables qui composent l'analyse ainsi que leurs interconnexions. Les acteurs, les secteurs retenus et la dynamique des scénarios sont également pris en compte. Par ailleurs, le design de l'étude, et notamment la réalisation d'analyses de sensibilité ou la prise en compte de l'incertitude vont également déterminer l'interprétation et la portée des résultats ; elles seront d'autant plus nécessaires que le périmètre de l'étude est large. Van Notten et al (2003) polarisent cet axe selon le degré de complexité de l'exercice à analyser, de simple à complexe. **Les scénarios complexes** présentent un réseau imbriqué de relations causales éventuellement rétroactives (positives ou négatives). Ils illustrent des schémas de développement alternatifs sur la base d'un large nombre d'acteurs, de secteurs et d'échelles temporelles et spatiales étendues. **Les scénarios simples** ont une couverture beaucoup plus limitée : il peut s'agir d'un zoom sur une technologie ciblée d'un secteur, ou encore d'extrapolation de tendances pour l'élaboration de baseline.

Le degré de complexité contient les éléments de nature temporelle, spatiale, et sectorielle des scénarios, dont il s'agit essentiellement d'identifier les frontières. En effet, les éléments non-techniques et non-économiques influent souvent sur les résultats ; il est d'autant plus important d'essayer de les identifier que ces hypothèses sont souvent implicites. On peut distinguer les éléments suivants (van Notten et al, 2003 ; Mai et al, 2013) :

- 1. La dimension temporelle**
 - a. S'agit-il d'une trajectoire ou d'un point figé dans le futur ?
 - b. Quel est le niveau de détail infra-annuel du scénario (postes horosaisonniers pour l'électricité etc...) ?
 - c. Pour les modèles quantitatifs : quelle est la nature des anticipations des agents, et quel est le taux d'actualisation retenu ?
- 2. La dimension spatiale**
 - a. S'agit-il d'un scénario régional, national, multi-national, et avec quel niveau de désagrégation ?
 - b. Le niveau de détail spatial est-il construit par imbrication dans une échelle plus large ? Ce choix est-il compatible avec les phénomènes étudiés (par ex. renouvelables) ?
- 3. La dimension sectorielle**
 - a. L'étude porte-t-elle sur un ou plusieurs secteurs ? Comment sont-ils interconnectés ?
 - b. Les secteurs d'intérêts sont-ils décrits de façon cohérente par rapport à leur importance dans l'étude ?
- 4. Nature des variables et conditions aux limites**
 - a. Les variables du scénario font-elles partie du même champ (par ex. hypothèses sur les technologies) ou sont-elles hétérogènes (économie, démographie, technologies etc...) ?

- b. Peut-on identifier la présence d'hypothèses structurantes aux frontières du scénario (juridiques, comportementales...) ?
- 5. **Dynamique et niveau de déviation**
 - a. Les scénarios extrapolent-ils des tendances passées, ou illustrent-ils des scénarios contrastés, comportant éventuellement des changements rapides voire des bifurcations ?
- 6. **Incertitude dans les modèles quantitatifs**
 - a. L'incertitude est-elle prise en compte de façon exogène dans les scénarios (analyse de sensibilité, simulation de Monte-Carlo...) ?
 - b. Les outils mis en œuvre incluent-ils un traitement endogène de l'incertitude (programmation stochastique, robuste...) ?

Implications pour l'élaboration d'ICV prospectifs : L'analyse menée autour du troisième axe doit permettre de mieux cerner la « valeur d'usage » (c'est-à-dire pour les utilisateurs) de scénarios utilisés pour intégrer des données prospectives dans un ICV. En plus de leur existence dans le scénario, leur positionnement par rapport aux frontières du système et la cohérence structurelle du scénario par rapport aux données d'intérêt doivent être analysés. La nature des trajectoires retenues doit également être cohérente avec le système étudié en ACV.

De manière générale, la comparaison des différences entre des scénarios contient plus d'informations que les scénarios absolus. De la même façon qu'un décideur cherchant à identifier la valeur comparative des scénarios qu'on lui présente, le chargé d'étude à la recherche de données doit - en préalable à l'extraction - estimer le potentiel de variation des données d'intérêt en :

- Identifiant les possibilités avec des scénarios multiples ;
- Utilisant autant que possible l'analyse de sensibilité ;
- Adaptant les outils sollicités aux questions posées ;
- Recourant à des méthodes alternatives, notamment non quantitatives, pour élargir le champ avec des opinions d'experts...

2.1.4.4 Zoom : modèles économiques pour les ressources, l'énergie et l'environnement

En ce qui concerne l'énergie et des ressources, un grand nombre de scénarios sont produits à partir de modèles économiques. Le domaine est aujourd'hui comparable à une petite industrie, tant les laboratoires universitaires, les instituts de recherche et les industriels investissent dans la construction et/ou la réalisation d'études prospectives de ce type. L'éventail des outils est aujourd'hui très vaste, si bien que les résultats peuvent diverger considérablement. Cette complexité est à la fois une source de confusion pour les non-initiés, et une richesse analytique car elle permet de balayer et d'expliquer plus largement le champ des possibles.

2.1.4.4.1 Eléments historiques

D'un point de vue historique, le développement des modèles énergie – ressources s'insère dans une perspective récente. D'un point de vue méthodologique, cet essor date du début des années 1970, et repose sur deux facteurs principaux, (i) le développement de la recherche opérationnelle à partir de la Seconde Guerre mondiale et (ii) la révolution informatique, qui va progressivement démocratiser l'accès aux moyens de calcul et de simulation. Vieille-Blanchard (2011) ou Nicolas (2016) contiennent des historiques détaillés du développement de la discipline. Nous rappelons ici quelques étapes importantes :

a. 1972 : Le rapport « The Limits to Growth » (Meadows et al, 1971)

Jusqu'au début des années 1970, les secteurs de l'énergie et des ressources sont très stables. Les prix de l'énergie fluctuent peu, les considérations environnementales n'ont pas encore leur prégnance actuelle et le contexte économique global est porté par une forte croissance dans la zone OCDE. L'incertitude perçue est donc faible, et les problématiques de long terme sont globalement absentes. C'est dans ce contexte que naît le Club de Rome en 1969, avec comme objectif principal de s'intéresser aux grandes problématiques de long terme de nos sociétés. Le rapport de Meadows et al. (1971) est la première commande du Club ; il s'intéresse à l'évolution à long terme de la société dans un contexte de finitude des ressources énergétiques, minérales et environnementales. Meadows et al

(1971) remettent principalement en cause le paradigme de la croissance exponentielle (économique, population) dans un monde fini. Pour cela, ils mettent en œuvre un modèle de simulation fondé sur les systèmes dynamiques, qui repose essentiellement sur les travaux de Jay Forrester. World 3 est composé d'un ensemble d'équations différentielles, qui traduisent des évolutions non linéaires (des rendements croissants ou décroissants) entre les variables (voir Figure 19 pour un exemple sectoriel).

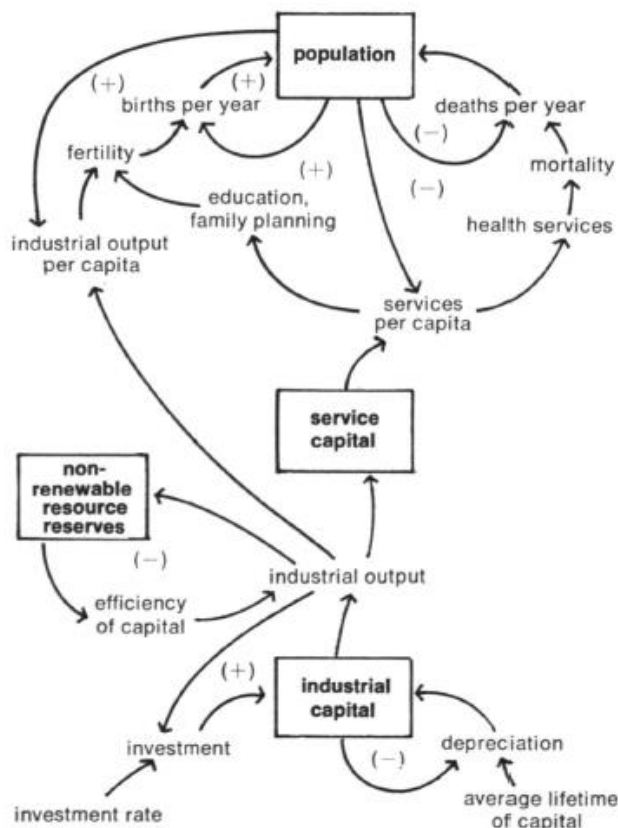


Figure 19 - Le modèle World 3 : exemple sectoriel

Outre les réactions très contrastées qu'a générées la publication du rapport, c'est aussi la controverse scientifique générée par le recours aux systèmes dynamiques qui a incité les économistes à se pencher sur ces questions.

b. Les années 1970 : quelques travaux éparés

Dans les années 1970, quelques équipes s'engagent dans la construction de modèles pour adresser des questionnements autour de l'énergie et de l'environnement. Ces initiatives dispersées sont hétérogènes d'un point de vue méthodologique : on y trouve aussi bien de l'équilibre partiel que de l'équilibre général, ou encore des approches heuristiques. A la fin des années 1970, Beaujean et Charpentier (1978) recensent et classent une quinzaine de modèles (Tableau 3).

Champ d'application		National	International
Energie (l'énergie est le champ d'étude principal)	Une énergie	4	1
	Plusieurs énergies	3	0
Lien entre l'énergie et l'économie globale		3	3

Tableau 5 - Modélisation énergétique dans les années 1970. Source : Beaujean et Charpentier (1978)

c. La fin des années 1970 : l'apparition de l'équilibre général et de l'équilibre partiel

Dans les années 1970, les économistes commencent à traiter le problème de l'énergie et du climat. Ces efforts interviennent notamment en réponse aux limites méthodologiques perçues dans le travail

de Meadows et al (1971). En effet, leur modèle est considéré par la communauté des économistes comme beaucoup trop phénoménologique. Ces derniers vont donc tenter d'introduire de nouveaux paradigmes de modélisation, prenant notamment en compte :

- La rationalité des agents économiques et leur préférence pour le présent ;
- Le concept de marché à l'équilibre, et les hypothèses attenantes concernant le fonctionnement desdits marchés ;
- L'intégration explicite des choix de consommation et de production : utilité, fonction de production traduisant des complémentarités et/ou substituabilités entre les biens.

L'introduction de ces principes traduit l'une des préoccupations principales des économistes : l'allocation optimale des ressources rares. Nordhaus (1977, 1980) est l'un des premiers à introduire l'équilibre général pour les questions climatiques, avec le modèle DICE, dans un cadre ultra-rationnel : la production est décrite par une simple fonction Cobb-Douglas, le consommateur est représenté par une fonction d'utilité à élasticité constante de la consommation, et le raisonnement est conduit en information parfaite. L'équilibre général calculable (EGC) suivra ; il s'agira alors de décrire les agents économiques individuellement, et de déterminer des systèmes de prix équilibrant (i) l'offre et la demande pour tous les biens intermédiaires et finaux produits, échangés et consommés (ii) les profits et revenus des agents (Figure 20).

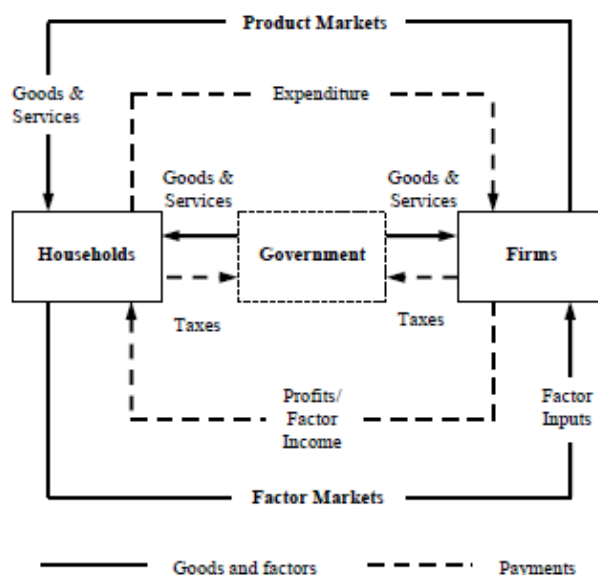


Figure 20 - Schéma de l'équilibre général calculable

Parallèlement à ces travaux, quelques équipes commencent à examiner les questions énergétiques non plus à partir de la description de l'économie dans son ensemble, mais à partir du détail du secteur énergétique. Toujours fondés sur la rationalité etc... ces modèles se proposent plutôt d'étudier les décisions d'investissement et de production d'énergie. A partir du milieu des années 1970, 17 nations se regroupent sous l'égide de l'AIE pour mutualiser des travaux dans ce sens, ce qui donnera naissance au modèleur MARKet ALlocation (MARKAL ; Fishbone et Abilock (1981)). L'objectif est alors d'étudier le comportement de futurs systèmes énergétiques (contraintes climatiques, sécurité d'approvisionnement). Ces modèles souvent linéaires, inspirés de l'analyse d'activité, décomposent les systèmes énergétiques en briques élémentaires (centrales, raffineries etc... dont on définit les rendements, coûts opératoires et d'investissement etc...). Ils s'intéressent souvent à l'énergie, indépendamment du reste de l'économie et déterminent les prix et quantités échangés pour les biens décrits dans le modèle : on les qualifie d'équilibres partiels.

On en déduit l'allocation optimale des facteurs (extraction de ressources, capital), leur prix et les choix technologiques.

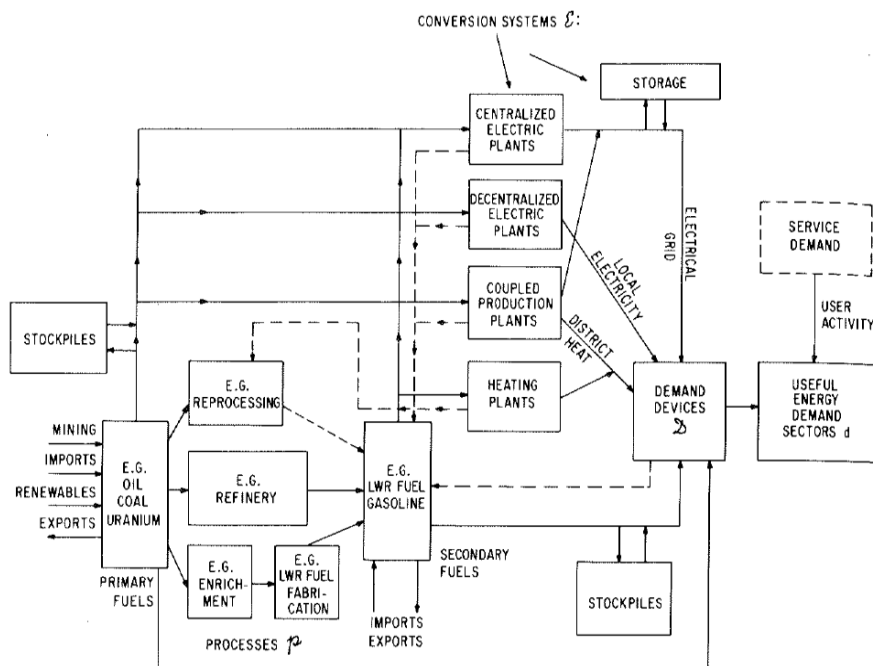


Figure 21 - Modèle MARKAL d'équilibre partiel

d. Le début des années 1990 : l'hybridation

Dans les années 1980 émerge l'idée de combiner les forces des modèles d'équilibre général (prise en compte de l'économie dans son ensemble) et de l'équilibre partiel (la prise en compte explicite de la dimension technologique) pour pallier à leurs faiblesses respectives. Manne (1992) réalise un travail fondateur en combinant dans une procédure itérative les modèles MARKAL et MERGE. C'est le début des modèles « hybrides » qui vont beaucoup se développer par la suite.

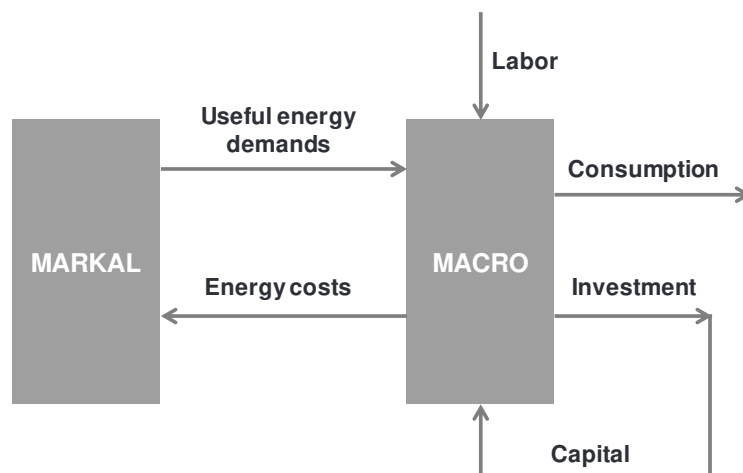


Figure 22 - MARKAL-MACRO

e. Depuis les années 2000 : progrès en RO et explosion des moyens de calcul

A partir des années 2000, les progrès réalisés en recherche opérationnelles (nouveaux formalismes, prise en compte de l'incertitude, algorithmes de résolution) et le développement des moyens de calcul vont alimenter la progression des modèles. Ceux-ci reposent globalement toujours sur les mêmes principes, avec des degrés de sophistication de plus en plus importants : ils incorporent de plus en plus de secteurs, sont de plus en plus détaillés d'un point de vue spatial et temporel, permettent d'identifier des stratégies d'acteurs sur les marchés ou des comportements de couverture... En

contrepartie, ils sont de plus en plus complexes, nécessitent des équipes pluridisciplinaires, des temps de développement longs, et des analyses de sensibilité extensives.

2.1.4.4.2 *Typologie des modèles*

La littérature regorge de classifications des nombreux modèles utilisés dans le domaine de l'énergie et des ressources (Percebois et Hansen (2010) ; Bhattacharrya et Timilsina (2010) ; Vieille-Blanchard (2011) ; Nicolas (2016) ...). Toutes sont différentes, mais s'accordent néanmoins sur des éléments essentiels à inclure dans toute typologie : l'approche analytique retenue (modèle d'ingénieur ou modèle économique / bottom-up ou top-down / équilibre partiel ou équilibre général), et la méthodologie « numérique » (optimisation ou simulation). La figure 21 présente les principaux modèles selon ces deux premiers axes. Lorsque l'on intègre une description, plus ou moins complexe, du cycle du carbone et du système climatique, on parle de modèle d'évaluation intégrée (voir Nicolas (2016) pour plus de détails).

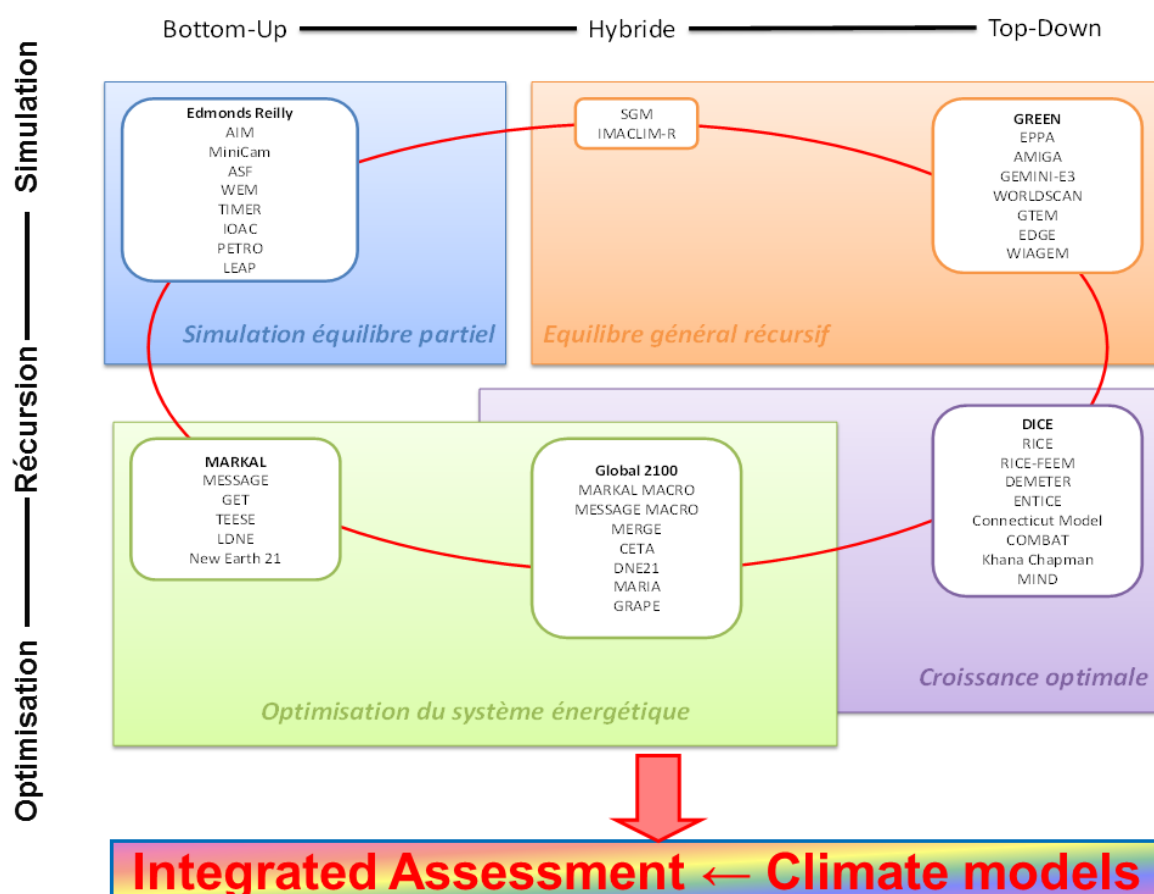


Figure 23 - Typologie des modèles énergie – économie – environnement

Une présentation simple des méthodes de résolution des modèles peut s'appuyer sur le formalisme précédent, $y = f(x, a)$, en indiquant les variables par le temps, $t \in T$.

Les **modèles de simulation** sont construits pour reproduire un système réel afin de pouvoir étudier son comportement. Ils ne permettent pas de calculer ce qui devrait être fait pour obtenir un résultat donné, mais illustrent ce qui pourrait se passer dans une situation prédéfinie.

L'évolution des variables d'intérêt est régie par un ensemble de lois explicites prédéfinies par le modélisateur. Ce fonctionnement est analogue à celui de modèles physiques pour lesquels, par exemple, on détermine le mouvement des corps en fonction des forces auxquelles ils sont soumis.

Les paramètres a sont estimés/calibrés à partir de données historiques, et les variables internes x sont définies de manière exogène (scénarios) ou déduits du calcul par le même type de formules. On a donc un système d'équations, $y_t = f(x_t, a)$, à résoudre séquentiellement. Les modèles de systèmes dynamiques font partie de cette catégorie, de même que les modèles économétriques – qui sont à proprement parler des techniques de simulation. Ces dernières ont la particularité de se reposer sur la théorie économique (des marchés, du consommateur... qui peuvent être fondées sur des hypothèses de rationalité et d'optimisation) pour spécifier un ensemble d'équations dont les paramètres sont estimés statistiquement sur la base de données historiques. Souvent, il s'agit d'élasticités-prix ou d'élasticités-revenus.

Ces modèles n'incluent pas de méthode de recherche d'un équilibre à travers l'optimisation ; les équilibres entre l'offre et la demande sont assurés à travers le système d'équations décrit ou implicitement.

A l'opposé, les modèles d'optimisation supposent la définition d'une fonction-objectif : c'est une grandeur à minimiser ou maximiser (somme des coûts, bien-être collectif etc...). Le processus d'optimisation permet de déterminer le sentier optimal des variables de décision x et y , qui correspond à la meilleure valeur de la fonction objectif. Un ensemble de contraintes, paramétrées par a , définit des limites physiques inhérentes au système, et donc un ensemble de solutions réalisables, U_a . Notons $z_a(y_t, x_t)$ la fonction-objectif à maximiser du problème ; c'est une grandeur que l'on peut déterminer à partir des variables du problème. On cherche donc des valeurs optimales, (y_t^*, x_t^*) telles que, par définition, $z_a(y_t^*, x_t^*) \geq z_a(y_t, x_t)$, avec $z_a(y_t, x_t) \in U_a$. On note alors $(y_t^*, x_t^*) = \operatorname{argmax}_{(y_t, x_t) \in U_a} z_a(y_t, x_t)$. Une telle caractérisation n'existe pas pour les modèles de simulation, puisque le système d'équations gouvernant la dynamique du système n'est pas muni d'une métrique. Enfin, ces modèles ne permettent pas, sauf exception, de déterminer les relations f . En principe, cette approche se prête bien aux exercices normatifs, pour lesquels un critère objectif de désirabilité des scénarios a été défini. Ils souffrent par contre d'un nombre de simplifications et hypothèses théoriques parfois peu représentatives (souvent convexes voire linéaires, manque de feedbacks... ; cf. Sterman, 1990). Les modèles de systèmes énergétiques ainsi que les modèles d'équilibre général ultra-rationnels reposent souvent sur l'optimisation.

Enfin, **l'approche récursive** se situe à l'intersection des deux techniques précédentes. Du fait de leur taille, ces modèles peuvent être construits en simplifiant le processus de décision : les agents économiques optimisent une fonction objective de façon récursive. Les résultats de l'optimisation pour les différents agents à la période t sont intégrés comme des inputs des programmes à la période $t + 1$. Les agents ont donc des capacités d'anticipations limitées, qu'ils remettent à jour à chaque étape ; elles sont adaptatives. Dans ce cas, on peut écrire $(y_t^*, x_t^*) = \operatorname{argmax}_{(y_t, x_t) \in U_a(y_{t-1}, x_{t-1})} z_a(y_{t-1}, x_{t-1}) (y_t, x_t)$. Les conséquences économiques de ces processus sont importantes. Lorsque les connaissances des agents sont imparfaites (ce qui est le cas dans la réalité), on introduit des coûts de désadaptation, dans la mesure où les choix de long terme s'avèrent en partie inappropriés. Schématiquement, ces techniques de résolution – localement optimales – s'approchent également de la simulation.

En ce qui concerne l'approche analytique, on distingue canoniquement deux grandes approches, top-down et bottom-up. Les premiers considèrent l'économie comme un agrégat de grandes variables interdépendantes, les relations étant progressivement désagrégées. Ils sont construits pour capturer les relations économiques. Les seconds sont construits selon un raisonnement microscopique, puisqu'ils considèrent les systèmes productifs dans le détail des stocks et flux, avant de les agréger au niveau du ou des marchés. Ils sont donc fondés sur le détail technologique. En règle générale, les modèles top-down, également qualifiés de modèles d'économistes, sont des modèles macroéconomiques d'équilibre général, qui considèrent l'économie dans son ensemble. Mais il peut également s'agir de modèles d'équilibre partiel (on ne décrit qu'une partie de l'économie, c'est-à-dire un nombre fini de marchés). Les modèles bottom-up – également appelés modèles d'ingénieurs en raison de leurs fondements technologiques – sont par contre essentiellement des modèles d'équilibre partiel. Ils sont toutefois souvent insérés ou reliés à des outils décrivant plus largement l'économie ; on parle alors de modèles hybrides.

Les *modèles top-down* spécifient le système économique à partir du comportement des marchés et des préférences des acteurs. Ils partent généralement d'un équilibre macroéconomique qui est progressivement désagrégé. A priori, ils décrivent donc le système énergétique et les ressources de façon très agrégée à travers des fonctions de production. L'énergie et les ressources vont être substituables ou complémentaires d'autres inputs (capital, travail) et des biens intermédiaires. En

général, ces modèles sont assez agrégés. Les résultats obtenus vont dépendre des substitutions, des délais, de la flexibilité des prix et des effets de revenus et de richesse.

Ces modèles permettent d'analyser les mécanismes de propagation des coûts à l'ensemble de l'économie liés à une politique énergétique ou climatique. On distingue trois sous-classes en fonction du mode de résolution (Percebois et Hansen, 2010) :

- Les *modèles macro-économétriques* (HERMES, NEMESIS...) sont estimés à partir de données chronologiques ou de données de panels. Ils calculent à tous les niveaux la production, les prix, la compétitivité, l'emploi et le chômage global ;
- Les *modèles d'équilibre général calculable* (GEM-E3, GEMINI, EPPA, IMAGE...), sont généralement fondés sur des anticipations adaptatives et résolus par récursion. Ils sont composés d'agents hétérogènes ayant leur propre fonction objectif (maximisation de l'utilité pour le consommateur, maximisation du profit pour les producteurs) ;
- Les *modèles d'équilibre général ultra-rationnels* (MERGE, DICE...) sont fondés, à l'inverse des précédents, sur les anticipations rationnelles et l'information parfaite : l'optimisation se fait en général simultanément sur toute la période de projection.

Les *modèles bottom-up* ont pour objectif principal l'évaluation des coûts techniques ou sectoriels, obtenus grâce à des représentations détaillées des potentiels technologiques et des contraintes physiques pesant sur les systèmes socio-économique et naturel. Ils représentent des biens spécifiques (à la différence des modèles macroéconomiques, qui peuvent décrire la consommation comme un unique bien agrégé) et les technologies sous-jacentes permettant de les produire et de les consommer. Ils capturent donc les concurrences entre les technologies et intègrent des considérations autour du progrès technique. Cette dimension technico-économique requiert des hypothèses sur les coûts des technologies, leurs rendements de conversion etc... Les résultats portent sur l'offre et la demande d'énergie, les prix de l'énergie ou encore les coûts de réduction des émissions. Par contre, il n'est pas possible avec ces modèles, du fait de leur manque de cohérence globale, d'analyser par exemple l'impact d'une politique climatique sur l'ensemble de l'économie (croissance, secteurs autres que l'énergie etc...).

On distingue deux grandes classes de modèles bottom-up sur la base du mode de résolution (Percebois et Hansen, 2010) :

- Les modèles de simulation tels que POLES ou MEDEE s'appuient sur une description des processus de décision et de fonctionnement des marchés ; l'objectif de maximisation est en général remplacé par la recherche d'un niveau de satisfaction désiré ;
- Les modèles d'optimisation (PRIMES, TIMES) s'appuient sur des comportements rationnels de maximisation des profits ou de minimisation des coûts. On peut ainsi simuler la recherche de prix et quantités équilibrant les marchés ; on parle alors de modèle d'équilibre partiel.

Enfin, les *modèles hybrides* réalisent la synthèse entre les deux approches précédentes, en empruntant au bottom-up son réalisme technologique et au top-down la possibilité d'inclure des rétroactions macroéconomiques (Hourcade et al, 2006). Ces modèles hybrides peuvent être conçus de différentes façons, dont les trois principales sont (Böhringer et Rutherford, 2008) :

- Le couplage « soft-link » de deux modèles existants qui s'échangent des informations : les sorties de l'un sont des entrées pour l'autre. En général il s'agit de prix et quantités ;
- Mettre l'accent sur l'une des deux approches, en incluant une description simplifiée de l'autre. Il peut s'agir d'un modèle bottom-up augmenté d'un module macroéconomique stylisé (MARKAL-MACRO), ou d'un modèle macroéconomique intégrant une forme bottom-up réduite (p.ex. MERGE) ;
- Enfin, les modèles peuvent être conçus de façon intégrée dès le départ (IMACLIM, WITCH...).

2.1.4.5 Synthèse

Au sein d'une discipline fondamentalement transverse et parfois revendiquée comme étant non normalisée, il n'existe pas de présentation univoque des méthodologies et typologies de scénarios. Si ce polymorphisme conceptuel et méthodologique peut s'avérer une force pour les praticiens, il est certainement une barrière culturelle et analytique importante pour des non-initiés.

La synthèse présentée dans cette section reprend les éléments les plus consensuels de la littérature pour proposer une typologie des scénarios. Celle-ci se veut à la fois éclairante vis-à-vis des objets étudiés et relativement opérationnels quant à la réalisation de choix méthodologiques. Les trois axes de cette typologie – le champ de l'étude, la méthodologie et le contenu des scénarios – sont suffisamment larges pour adresser un grand nombre d'exercices. Dans un second temps, la liste non exhaustive des éléments structurels propres à chaque axe permet d'affiner l'analyse. La plupart de ces caractéristiques ne suggère pas de catégorisation binaire, mais plutôt des éléments d'évaluation qualitative (donc en partie subjective).

Dans le domaine de l'énergie et les ressources, de nombreux scénarios reposent sur des modèles quantitatifs. Nous proposons ici un aperçu méthodologique de ce champ d'études et de recherche ; une description détaillée des pratiques de ce champ d'une grande technicité dépasse le cadre de ce travail. Dans une étude sur les principes d'évaluation des scénarios énergétiques, Mai et al (2013) proposent dix règles de base qui résument bien les éléments abordés dans cette section.

Implications pour l'élaboration d'ICV prospectifs (Mai et al., 2013)

1. Les modèles énergétiques ne prédisent pas le futur
2. Adapter le (choix du) modèle à la question
3. Communiquer de façon transparente autour des hypothèses, autant que possible
4. Comprendre les limitations du modèle sur la représentation du comportement humain
5. Appréhender la problématique de l'incertitude à travers différentes approches
6. Analyser la description des énergies renouvelables
7. Communiquer de manière appropriée
8. S'attendre à des biais, apprendre à les identifier
9. Considérer des scénarios alternatifs, peu ou pas modélisés
10. Mener des analyses rétrospectives pour mieux cerner les forces et faiblesses des scénarios

2.1.5 Analyse de quelques études prospectives

Comme nous l'avons déjà mentionné, la littérature relative aux études prospectives est abondante, recouvrant des milliers d'études. Il est dès lors déraisonnable d'envisager une analyse exhaustive de cette littérature et de vouloir par là même recenser toutes les informations disponibles en vue de la réalisation d'ACV prospectives.

L'identification et l'analyse d'un nombre restreint d'études de référence - récentes et représentatives des principales méthodes de prospective - a donc été privilégiée, avec pour objectif d'illustrer la typologie de scénarios proposée en section 2.1.4.3; et donc aider le lecteur à mieux appréhender la diversité des études prospectives pour in fine faciliter la compréhension et la comparaison des résultats.

Une vue d'ensemble des 12 études retenues est fournie dans le tableau 6 en page suivante. Cette sélection comprend des travaux portant essentiellement sur le secteur énergétique à 2030-2050 mais toutefois très diversifiés à plusieurs égards, notamment :

- Contexte de travail : études commanditées par des institutionnels (ADEME, Commission européenne, Agence internationale de l'énergie), des opérateurs industriels (BP, ExxonMobil) ou académiques (Energy Modelling Forum / EMF) ;
- Couverture géographique et résolution : échelle nationale avec maille régionale dans certains cas (cas de la France dans les études ADEME et scénarios de l'Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Energie (ANCORE)) ou échelle continentale à mondiale avec désagrégation par pays ou groupes de pays (cas des scénarios Energy Technology Perspectives (ETP) et World Energy Outlook (WEO) de l'AIE ou encore de la Commission européenne) ;
- Couverture sectorielle et résolution : certains travaux se concentrent sur un sous-secteur (secteur électrique par exemple dans les travaux du Réseau de Transport d'Electricité (RTE)), d'autres englobent l'ensemble du secteur énergétique (cas des travaux de l'ANCORE, d'Enerdata, ou encore de l'AIE) ou couvrent plus largement l'économie mondiale (cas de certains exercices de l'EMF).
- Approche : le type de prospective n'est pas systématiquement mentionné mais peut être déduit du cadre et des objectifs de l'étude. Les scénarios « mix électrique 100 % ENR » de l'ADEME ou encore les scénarios énergétiques de BP, ExxonMobil, RTE, du World Energy Council (WEC) ou d'Enerdata sont des exemples de prospective exploratoire. Les scénarios de l'ANCORE et certains scénarios de l'AIE (scénario 450 ppm du WEO) s'inscrivent quant à eux plutôt dans une approche normative (scénarios visant une forte diminution des émissions de GES ou une limitation de la hausse des températures).
- Point de vue : si certains scénarios reposent sur l'étude d'un futur « ponctuel » sans étudier de chemins possibles permettant de l'atteindre (cas de l'étude ADEME portant sur un mix électrique 100 % ENR) ; la plupart reposent toutefois sur l'étude de trajectoires. Dans ce second cas de figure, différents points de vue sont adoptés : scénarios de type forecasting (correspondant à des trajectoires définies à partir d'un point de départ contemporain, donc plutôt exploratoires) tels que ceux publiés par BP, ExxonMobil, RTE, la Commission européenne ou le WEC ; ou scénarios de type backcasting (trajectoires compatibles avec un ou plusieurs objectifs futurs à atteindre s'apparentant donc plutôt à des scénarios normatifs) tels que certains scénarios AIE (scénarios 450ppm du WEO et scénarios 2DS / 4DS / 6DS de l'ETP) ou encore les scénarios de transitions énergétiques produits par l'ANCORE.
- Processus d'élaboration des scénarios : la sélection d'études illustre bien la diversité des méthodes de construction de scénarios énergétiques. Certains exercices sont essentiellement fondés sur des processus intuitifs (cas des visions énergétiques ADEME 2030-2050 ou encore des scénarios de transition énergétique de l'ANCORE construits à partir de dires d'experts sollicités au travers d'ateliers et groupes de travail) alors que les autres font appel à la fois à des processus formels et intuitifs dans des proportions variables (des outils / modèles quantitatifs sont utilisés pour la construction des scénarios mais sont bien souvent associés à une collecte de données via consultations d'experts et/ou recherche bibliographique). Notons que dans certains cas, la méthodologie de conception des scénarios n'est que peu voire pas explicitée (scénarios BP et ExxonMobil).

- Usage de modèles quantitatifs : Si certains travaux ne font pas appel à des modèles pour la construction de scénarios, ils peuvent y recourir a posteriori pour évaluer la cohérence d'ensemble des scénarios énergétiques produits à dire d'experts (cas des visions énergétiques ADEME à 2030 pour lesquelles un modèle technico-économique et un modèle macro-économique ont été employés à ces fins) ou encore évaluer les conséquences de ces scénarios ; en termes d'émissions ou d'investissements par exemple (cas des scénarios de l'ANCRE). Quant aux scénarios fondés sur l'usage de modèles, on retrouve dans cette sélection de références à peu près tous les types de modèles présentés en section 2.1.4.4. : modèles de simulation (travaux du RTE, d'Enerdata et WEO de l'AIE notamment) et optimisation (modèle de système électrique pour l'étude ADEME mix 100% ENR, modèles mondiaux de systèmes énergétiques pour l'étude ETP de l'AIE ou encore pour les travaux du WEC) ; modèles top-down (partie des modèles utilisés dans les travaux pour la Commission européenne d'une part et dans le cadre de l'EMF d'autre part) et modèles bottom-up (différents modèles du secteur énergétique mondial utilisés pour l'étude ETP de l'AIE, les travaux du WEC, d'Enerdata ou encore de l'EMF par exemple).
- Nombre de scénarios : Certaines études ne présentent qu'un unique scénario, qualifié de « référence » (travaux pour la Commission Européenne) ou « de plus probable » (BP Energy Outlook, ExxonMobil), avec parfois quelques variantes associées tenant lieu d'analyse de sensibilité (BP). La plupart des références incluent cependant plusieurs scénarios, construits sur des bases contrastées (2 scénarios dans les travaux du WEC, 3 dans l'ETP de l'AIE, 4 dans les travaux du RTE et dans le WEO de l'AIE, 5 dans ceux de l'ANCRE, des dizaines dans les travaux de l'EMF).

L'analyse comparative de ces études est largement développée dans un fichier Excel (joint à ce rapport) comportant 3 onglets correspondant aux 3 axes constitutifs de la typologie de scénarios. Dans chaque onglet sont recensées les informations relatives aux éléments structurants de l'axe considéré, et ce pour chaque étude.

Notons que cet exercice permet de mettre en lumière le relatif manque de transparence de certains travaux: il est souvent difficile de relever toute l'information voulue sur le contexte d'étude, l'approche retenue, les outils utilisés pour produire les scénarios ou encore sur la nature des données d'entrée. Dans la mesure du possible, nous avons toutefois renseigné le fichier en se fondant sur notre compréhension de l'étude, ce qui introduit donc une part de subjectivité.

Enfin, il convient de souligner que ce travail de synthèse porte sur les méthodes et pratiques en prospective et ne vise pas une comparaison à proprement parler des résultats de ces études. Nous ne nous sommes donc pas attachés à relever les valeurs de données d'entrée ou encore de résultats ; ce travail fastidieux de méta analyse des scénarios sortant du cadre de notre étude.

Recommandations pratiques pour l'ACV prospective/ Références et exemples dans le domaine de l'énergie

	Auteur	Pays	Utilisation modèle(s) ?	Scénarios			
				Couverture géographique	Couverture sectorielle	Horizon temporel	Trajectoires ?
ADEME <i>Visions énergétiques 2030 - 2050 de l'ADEME</i>	Institutionnel	France	Non	France	Secteur énergétique : offre et demande	2050	Non
ADEME <i>Mix électrique 100% ENR ?</i>	Institutionnel	France	Oui	France + pays frontaliers	Production, stockage, consommation et échanges électricité	2050	Non
BP <i>BP Energy Outlook</i>	Privé	UK	?	Monde	Secteur énergétique : offre et demande	2035	Oui
ExxonMobil <i>The outlook for Energy : A View to 2040</i>	Privé	US	?	Monde	Secteur énergétique : offre et demande	2040	Oui
RTE <i>Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France</i>	Privé pour institutionnels	France	Oui	Europe de l'Ouest (12)	Production, stockage, consommation et échanges électricité	2030	Non
Agence Nationale de la Coordination de la Recherche pour l'Energie <i>Scénarios de l'ANCRE pour la transition énergétique</i>	Académiques et centres techniques / recherche	France	Non	France	Secteur énergétique : offre et demande	2050	Oui
Enerdata <i>Global Energy Scenarios to 2040 / Understanding our energy futur</i>	Privé	France	Oui	Monde	Secteur énergétique : offre et demande	2040	Oui
AIE <i>World Energy Outlook</i>	Institutionnel	International	Oui	Monde	Secteur énergétique : offre et demande	2040	Oui
Commission Européenne <i>EU energy, transport and GHG emissions trends to 2050 / Reference scenario 2013</i>	Académiques et centres recherche pour institutionnels	Europe	Oui	Europe des 28	Secteur énergétique : offre et demande	2050	Oui
AIE <i>Energy Technology Perspectives 2015 - Mobilising Innovation to Accelerate Climate Action</i>	Institutionnel	International	Oui	Monde	Secteur énergétique : offre et demande	2050	Oui
World Energy Council <i>World Energy Scenarios Composing energy futures to 2050</i>	Mixte (alliance)	International	Oui	Monde	Secteur énergétique : offre et demande	2050	Oui
Energy Modelling Forum <i>Publications relatives aux exercices de l'EMF</i>	Académiques essentiellement	International	Oui	Variable selon exercice	Variable selon exercice : Economie globale ou secteur énergétique	2050+	Oui

Tableau 6 – Vue d'ensemble des études prospectives analysées

2.2 ACV prospectives

2.2.1 Résumé

De manière générale, les études prospectives se basent sur une évolution des paramètres technico-économique des procédés de premier plan (c'est-à-dire qui appartiennent directement à l'objet de l'étude), tandis que les données d'arrière-plan n'évoluent pas avec l'horizon temporel. Par exemple, si le rendement des panneaux photovoltaïques retenus dans différentes études s'améliore entre l'état initial et l'état futur, l'électricité, les carburants et les matériaux utilisés pour leur fabrication ont des inventaires qui ne varient pas.

Seuls Fukushima et al. (2002) ont proposé une approche permettant de faire varier dynamiquement l'inventaire en fonction du temps via LCML. Néanmoins, du fait de sa complexité de mise en œuvre, notamment l'impossibilité de l'implanter dans les logiciels d'ACV commerciaux les plus utilisés, la méthode proposée n'a pas fait l'objet d'utilisation ultérieure dans la littérature.

Les objectifs, points de convergence et divergence des ACV présentées dans les sections précédentes sont synthétisés et discutés dans la section 3 - Typologies des ACV prospectives.

2.2.2 Littérature scientifique

Cette section présente les différentes études prospectives de la littérature. Dans la mesure du possible, cette revue de la littérature est exhaustive concernant les études présentant des développements méthodologiques. De nombreuses études sont prospectives sans se revendiquer comme telles ou sont des ACV conséquentielles utilisant des éléments prospectifs. Dans le premier cas, il n'est pas possible d'être exhaustif compte-tenu du fait que la nature prospective des études n'est pas mise en avant. Dans la mesure du possible, les études retenues permettent d'apporter des éléments de réflexion sur l'ACV prospective. Enfin, concernant l'ACV conséquentielle, compte-tenu de l'existence de l'étude SCORELCA 2012-01 sur le sujet, nous n'avons pas repris ici les nombreuses ACV conséquentielles de la littérature.

2.2.2.1 Pesonen et al. (2000)

La première approche d'ACV prospective a été proposée par **Pesonen et al. (2000)** qui ont publié leurs travaux résultant d'un groupe de travail de la SETAC sur le développement des scénarios en ACV. Pesonen et al. définissent un scénario comme « *une description d'une possible future situation, pertinente pour des applications spécifiques de l'ACV, basés sur des hypothèses spécifiques concernant l'avenir et incluant une présentation du développement de maintenant à l'état futur* ».

Pesonen et al. proposent deux approches selon l'objectif de l'ACV :

1. Scénarios « et si ? » (*what-if scenarios*) : utilisés pour comparer une ou plusieurs alternatives dans un environnement connu, pour un horizon temporel proche et pour lesquelles le praticien est compétent pour formuler des hypothèses sur la base de données existantes ;
2. Scénarios pivots (*cornerstone scenarios*) : utilisés pour le long-terme, apportent de nouvelles façons de voir le monde et servent de base de futures recherches plus spécifiques basées sur des scénarios « et si ? ». Les scénarios pivots sont décrits en détails dans Spielmann et al. 2005 (Cf. section 2.2.2.7).

Ces deux approches sont résumées dans le tableau suivant :

WHAT-IF SCENARIOS	CORNERSTONE SCENARIOS
- Field of research is well known; researcher is familiar with the object of the research - Research object is simple - Well defined research plan, standardised research - Purpose of the study is to investigate consequences of specific, discrete assumptions and uncertainties, which do not have any long-term implications - Comparison of existing systems (process alternatives, product modifications, etc.) - Operational or tactical information	- Field of research is new, unknown to the researcher - Research object is complex - Open research plan, scenarios are developed in the course of the study - Purpose of the research is to increase understanding about the studied object - Design and development (of new products, technologies, etc.) - Strategic information - Often serve as a base for further, more specific research with What-if scenarios

Tableau 7 – Caractéristiques des scénarios « et si ? » et pivots (Pesonen et al. 2000)

2.2.2.2 Fukushima et al. (2002)

Fukushima et al. (2002) ont ensuite proposé une formalisation de l'ACV prospective basée sur des scénarios. Reprenant le schéma des étapes de l'ACV telles que définies par la norme ISO 14040, ils proposent le cadre suivant :

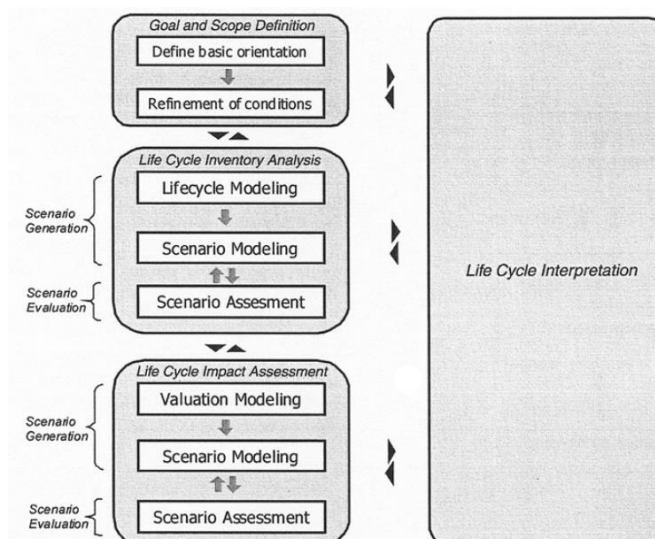
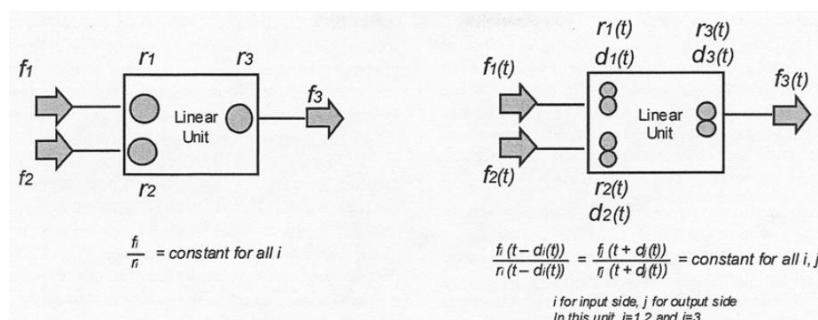


Figure 24 - Cadre pour l'ACV prospective par scénarios (Fukushima et al., 2002)

La mise en place de leur méthode implique de définir les différents paramètres utilisés dans l'ACV puis de les classer, selon que leur valeur est fixe ou évolue dans le temps. Les procédés sont ensuite modélisés de manière dynamique en fonction du temps. La figure suivante illustre le concept en présentant un procédé statique dans le temps (figure de gauche) et un procédé dont la valeur des paramètres change.



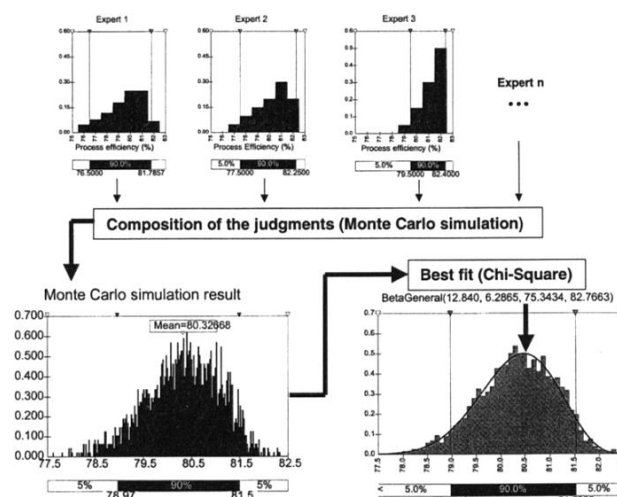


Figure 28 - Méthode Delphi utilisée par Contadini et al. (2002) pour définir les paramètres des scénarios à partir d'avis d'experts

Par ailleurs, 3 méthodes ont été utilisées pour recueillir l'avis des experts lors des discussions de groupe. Ces méthodes se distinguent par le nombre de tours effectués et par la connaissance des experts des avis des autres experts. La combinaison d'une méthode adaptée de la méthode de Delphi avec la recherche de données d'inventaires de cycle de vie pour la production d'hydrogène est nommée FUEEM (*Fuel Upstream Energy and Emissions Model*) par les auteurs.

FUEEM Delphi Procedures		Information Type		
Forecast Procedure	Detail	Scenario Construction	Technical Design	Literature Adaptation
Amalgamated	Each result's round is the composition of the majority's vote	⊕ New scenarios may be generated to support conflicting opinions	⊕ Modified by the weighting process and possible elimination of extraneous information	X
Polling	Several rounds. Each participant is polled at least twice	X	X	X
Feedback	The group consensus predictions are made known to the panel members prior to repolling	X With extra focus on comments to support extreme opinions	X With extra focus on the technical details of the comments	X With extra focus on new data and examples provided

X = Always used; ⊕ = Partially used

Figure 29 - Méthode de recueil d'avis d'experts utilisées par Contadini et al. (2002)

2.2.2.4 Pehnt et al. (2003)

Pehnt et al. (2003a, 2003b) ont réalisé l'ACV des futurs systèmes de transport utilisant des piles à combustibles. Pehnt et al. (2003a) indiquent que la réalisation d'ACV énergétiques prospectives présentent les difficultés méthodologiques suivantes :

- *Besoin accru d'un recours à l'allocation ou à l'extension des frontières du système* du fait du durcissement des normes environnementales induisant de plus en plus des procédés tels que la cogénération ou la valorisation des déchets.
- *Distinction entre procédés de premier plan et d'arrière-plan de plus en plus complexe*. En effet, si le sujet étudié est un carburant ou de l'électricité, l'évolution de leur production doit aussi influencer les procédés d'arrière-plan.
- *Besoin accru de considérer les infrastructures* du fait du développement des énergies renouvelables décentralisées, des techniques de dépollution de plus en plus complexes et recourant à des matériaux exotiques, et du déplacement des impacts de la combustion vers des émissions indirectes (production des panneaux photovoltaïques, batteries de véhicules électriques, etc.).
- *Augmentation de la quantité de données manquantes* due à la nature prospective de l'ACV. Pehnt et al. (2003a) ont ainsi classé les données manquantes selon la typologie suivante :

Type	Cause for data gap	Description	Time	Application (Example)
1	Confidentiality of data	Data is known, but not fully available due to confidentiality	P,Pr,F	Innovative products/ competitive markets (fuel cells), military applications
2	Complexity of data	Complex processes for which data acquisition is too time consuming or causal relationships are not known	P,Pr,F	Integrated industrial processes (separation of platinum group metals)
3	Products at an early stage of market development	Processes or technologies not yet fully developed	F	New products (membrane electrode assembly in SOFCs)
4	Context of product unknown	Background system difficult to forecast	F	Evolving markets (deregulated electricity market)
5	Lack of knowledge	Due to lack of knowledge processes, components etc. cannot be considered	P,Pr,F	

Tableau 8 - Classification des données manquantes en ACV prospective dans le domaine de l'énergie (Pehnt et al. 2003a) (P = passé, Pr = présente, F = futur)

Pehnt et al. proposent une méthode en 2 temps : (i) ACV préliminaire du système au statuquo (état initial) ; (ii) identification des données manquantes ; (iii) analyse de pertinence (importance des données manquantes sur le résultat final) ; (iv) utilisation de plusieurs méthodes prédictives pour calculer les résultats. Pehnt et al. préconisent donc de ne pas utiliser une méthode unique mais de s'appuyer sur différentes techniques de prospective pour chacun des paramètres pour ensuite comparer les résultats et déterminer la plus adaptée. Leur étude retient 6 familles de méthodes prédictives pouvant être utilisées en ACV, en fonction de l'horizon temporel retenu :

Criteria	Method	Subjective	Adaption	I/O coeff.	Regression	Modelling	Scenario
Time horizon		SML	SM	SM	SM	SML	SML
Required ressources	Required information	+	-/o	+	-/+ *	o	-
	Required user qualification	-	o	+	+	-	-
	Speed of usage	+/- *	+	+	o	-	-
Quality of results	Reliability	-	-/o	+	+	+	irr
	Information content	+	+/o	o	+/o	+	+
	Systematic errors?	o/+	o	-	+	+	+
Flexibility	Spectrum of applicability	+	+	+	o	+	+
	Adaptability towards changes	+/o	+	+	o	o	o

S short term; M medium term; L long term

+ advantage of the method • o neutral • - disadvantage of the method • irr: not relevant

* + for single expert interviews, - for Delphi method

+ if regression equation is available in literature, - if regression equation needs to be researched

Tableau 9 - Critères pour choisir une méthode de prospective en ACV (Pehnt et al. 2003a)

Ainsi, dans leur étude sur les piles à combustibles, Pehnt et al. ont choisi les méthodes suivantes pour les différents paramètres utilisés (lorsque cela est possible, 2 méthodes sont retenues afin de s'assurer de la robustesse des résultats obtenus) :

Parameter	Forecasting method	Cross check forecasting method
Platinum content in PEFC	Trend extrapolation	Experts' consultation; included in sensitivity analysis
Energy consumption of future H ₂ liquefaction	Regression analysis using experimental data for large-scale systems	Maximum thermodynamic efficiency to determine optimal performance
Methanol distribution paths	Different distribution scenarios	
Electrical efficiency of future power plants	Transfer of BAT data	Experts' consultation; included in sensitivity analysis
Natural gas import mix	Opinion survey	
Future ICE fuel consumption	Modelling of lab-scale combustion engines	Transfer of BAT data
Fuel cell fuel consumption	Power train modelling	Experts' consultation (target data); included in sensitivity analysis
Balance of plant of SOFC and PEFC	Transfer of PAFC data	

Tableau 10 - Paramètres et méthodes prospectives utilisés par Pehnt et al. (2003) pour leur ACV des piles à combustible

2.2.2.5 Rasmussen et al. (2005)

Rasmussen et al. (2005) ont proposé un cadre pour réaliser des ACV prospectives qui puisse être applicable à la fois à petite échelle (développement d'une nouvelle technologie), à moyenne échelle (secteur industriel) et à grande échelle (politique nationale). Dans un premier temps, Rasmussen et al. (2005) ont identifié les points de divergence entre analyse prospective et ACV :

<i>Issue</i>	<i>Life cycle assessment</i>	<i>Technology foresight</i>
Concept of time	Present and near future	Future, long term perspective
Procedural focus	Analysis, assessment, interpretation	Synthesis, reflection, interpretation, elucidation
Data sources	Data, information, records, <i>etc.</i>	Information, opinions, questionnaires, statements, <i>etc.</i>
Analysis object	Products	Functionality of technologies and systems
Delimitation of analysis	Life cycle perspective, environmental impacts	Many issues and themes
Key results	Objectified results, certainties	Sketches, scenarios, strategies and uncertainties

Tableau 11 - Points de divergence entre analyse prospective et ACV (Rasmussen et al. 2005)

À partir de cela, Rasmussen et al. (2005) ont défini une méthode en 7 étapes, hybride entre ACV et analyse prospective :

1. *Définir les objectifs et la portée de l'analyse* : discussion et détermination du raisonnement et des objectifs, décisions sur l'approche et les méthodes, établissement de l'équipe projet, planification des ressources et horizon temporel ;
2. *Cartographier le système technologique* : définition et aperçu du système, délimitation du domaine technologique, identification des parties prenantes et experts dans le domaine technologique, structure et cadre préliminaires de l'analyse stratégique ;
3. *Rechercher les informations et tendances du système technologique* : recherche des sources d'informations relatives au système étudié, nomination des experts et parties prenantes, recherche des technologies critiques à horizon 5/10/20 ans ;
4. *Identification des facteurs de changement* : identification des tendances de développements scientifiques et sociétaux, discussion des effets de ces changements ;
5. *Évaluation* : évaluation des résultats par un groupe d'experts plus large, classement / priorisation des résultats, interprétation, discussion des impacts prospectifs et des incertitudes ;
6. *Réflexion et interprétation* : interprétation et systématisation des futurs alternatifs ;
7. *Synthèse, conclusion et action stratégique* : préparation et priorisation des scénarios, préparation des conclusions, présentation des résultats.

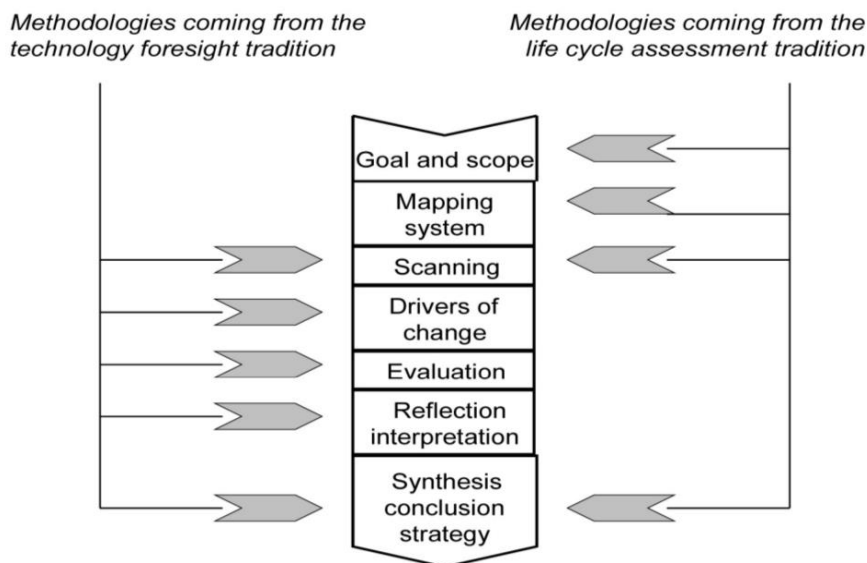


Figure 30 – Méthodologie hybride ACV / analyse prospective développée par Rasmussen et al. (2005)

Rasmussen et al. ont appliqué leur méthode sur deux cas pratiques : développement de l'énergie éolienne et développement des cultures OGM.

2.2.2.6 Spatari et al. (2005)

Spatari et al. (2005) ont étudié les émissions de GES de l'éthanol lignocellulosique produit à partir de *switchgrass* et de parties non comestibles du maïs. Leur étude considère deux scénarios, un premier à court terme en 2010 et un second à l'horizon 2020 (horizon temporel de 15 ans). L'éthanol obtenu est utilisé par la flotte de véhicules légers circulant en Ontario, Canada.

Pour modéliser le scénario 2020, Spatari et al. (2005) ont modifié les paramètres suivants :

- utilisation exclusive de *switchgrass* qui devient la culture dominante ;
- culture de *switchgrass* OGM avec un contenu en cellulose et hémicellulose plus élevé ;
- meilleur rendement de production d'éthanol ;
- efficacité énergétique du procédé améliorée ;
- consommation des véhicules plus faible.

Les données permettant le scénario 2020 sont issues de différentes sources de la littérature et le choix des paramètres à faire varier est arbitraire. Une analyse de sensibilité a été effectuée uniquement sur les rendements de production de biomasse et d'éthanol.

2.2.2.7 Spielmann et al. (2005)

Spielmann et al. (2005) ont utilisé l'approche des scénarios pivots et de l'analyse formative de scénarios pour évaluer différents scénarios de mobilité à l'horizon 2020 (soit un horizon temporel de 15 ans). Leur publication constitue la première application des travaux de Pesonen et al. (2000). Leur étude permet de mieux appréhender l'approche développée par Pesonen et al. (2000). Leur méthode suit les 6 « mouvements » suivants, répartis en 2 étapes (exemple pour le transport par bus) :

Etape 1 – Mouvement 1 : Sélection des variables de scénarios. À partir d'études externes et d'expertise interne, Spielmann et al. (2005) dérivent une liste de paramètres susceptibles d'avoir une influence sur l'ACV du bus :

Name	Description	Future levels (levels)
Technology Impact Variable (d_t)		
Fuel Type	Fuel used for the operation of bus	Compressed Natural Gas (CNG) Diesel
Emission Reduction Technology	Technical measures to meet. EURO-Norms	PM-Kat/ Euro 4 Particle-filter/ Euro 5 DeNOx (SCR)/ Euro 5
Operating Conditions	Operation mode depending on type of road and traffic conditions (trip composition: 20% urban; 80% rural)	Urban: constant travel Rural: constant travel. Urban: stop and go (S&G) Rural: constant travel. Urban: 50% S&G and 50% constant travel Rural: Constant Travel
Socio-Economic Impact Variable (d_s)		
Significance of Env. Issues	Orientation of environmental awareness and policy	Unimportant Global Global and local
Fuel Prices	Prices for conventional fossil fuels (diesel and petrol)	Decrease Slight increase Significant increase
Transport Policy	Promotion of certain means of transport.	Promotion of rail & road Promotion of rail Promotion of road
Mobility Lifestyle	Mobility demand; total amount of passenger kilometres	Constant Slight increase Sign. increase
Combined Mobility	Measures such as park & ride and car sharing	Excluded in Step 1, Move 2
Passenger Transport	Modal split of public and individual transport	Excluded in Step 1, Move 2
Electricity Prices	End-consumer prices of electricity	Excluded in Step 1, Move 2

Tableau 12 – Paramètres retenus dans l'ACV du bus de Spielmann et al. (2005)

Étape 1 – mouvement 2 : Analyse structurelle. Dans cette étape, l'influence mutuelle des paramètres les uns envers les autres est quantifiée selon 3 valeurs : 0 (pas ou peu d'impact), 1 (impact modéré), 2 (impact important). Par exemple, le prix des carburants (FP) possède un impact modéré sur le prix de l'électricité (EP), un impact fort sur le type de carburant utilisé par les bus (FT) et aucun impact sur les technologies de dépollution (ERT).

Impact Variables	PT	TP	EP	FP	CM	SoEI	ML	ERT	OC	FT	Activity
Passenger Transport (PT)	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	3
Transport Policy (TP)	2	0	0	0	2	1	1	1	0	0	7
Electricity Prices (EP)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fuel Prices (FP)	1	0	1	0	1	0	1	0	0	2	6
Combined Mobility (CM)	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	3
Sign. of Environ. Issues (SoEI)	1	1	1	1	1	0	0	2	0	2	9
Mobility Lifestyle (ML)	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0	3
Emission Reduction Technology (ERT)	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Operating Conditions (OC)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fuel Type (FT)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Passivity	5	3	2	1	4	2	3	3	5	4	32

Scores: 0 = no or little impact; 1 = medium impact; 2 = high impact

Tableau 13 – Matrice d'impact de l'analyse structurelle de l'ACV du bus (Spielmann et al. 2005)

Étape 1 – mouvement 3 : construction des procédés unitaires des scénarios. Chaque paramètre qualitatif est associé à différentes valeurs possibles. Par exemple, pour le prix des carburants, trois valeurs ont été retenues : diminution, augmentation faible, augmentation importante.

Étape 1 – mouvement 4 : quantification des procédés unitaires des scénarios. Chaque paramètre quantitatif est associé à différentes valeurs possibles. Par exemple, les différentes technologies de dépollution possibles sont associées à des émissions de polluants.

Étape 2 – mouvement 5 : sélection des scénarios-pivots. L'ensemble des valeurs des paramètres sont étudiées pour vérifier leur compatibilité entre elles. Par exemple, la valeur « *global* » du paramètre « Importance des problématiques environnementales » (SoEI) est considérée comme incompatible avec la valeur « promotion de la route » du paramètre « politique de transport » (TP). L'ensemble des combinaisons est étudiée dans la matrice de cohérence, qui attribue une valeur de 1 pour les paramètres liés et de -1 pour les paramètres incompatibles.

Impact Variable	Level ^{a)}	Transport Policy			Significance of Environmental Issues (SoEI)			Fuel Price (FP)		
		Ro	Ro & Ra	Ra	v	g	g&l	-	+	+++
SoEI	v	1	0	0						
	g	-1	1	-1						
	g&l	-1	1	1						
FP	-	1	0	0	1	-1	-1			
	+	0	0	0	-1	1	1			
	+++	-1	1	0	-1	1	2			

^{a)} The following abbreviations are used for the future levels of the impact variables:
Transport policy: Ro = Promotion of road; Ro & Ra = Directed promotion of road & rail; Ra = Promotion of rail
Significance of Environmental Issues (SoEI): v = vanished; g = global focus; g&l = global and local focus
Fuel Prices (FP): - = decrease; + = slight increase; +++ = significant increase

Tableau 14 – Matrice de cohérence des paramètres de l'ACV prospective du bus (Spielmann et al. 2005)

La matrice de cohérence aboutit à 100 scénarios cohérents. Sachant que les scénarios pivots doivent partager au minimum 5 variables identiques, les auteurs aboutissent à 4 scénarios.

Étape 2 – mouvement 6 : quantification des scénarios pivots. Les valeurs des paramètres sont introduites dans le modèle d'ACV et les résultats sont calculés.

2.2.2.8 Mendivil et al. (2006)

Mendivil et al. (2006) ont proposé une approche, nommée TE-LCA (*technology evolution life cycle assessment*) permettant d'étudier l'ACV d'une technologie ou d'un produit en tenant compte des progrès techniques. Leur publication utilise la production d'ammoniac comme cas d'étude et la méthode proposée est la suivante :

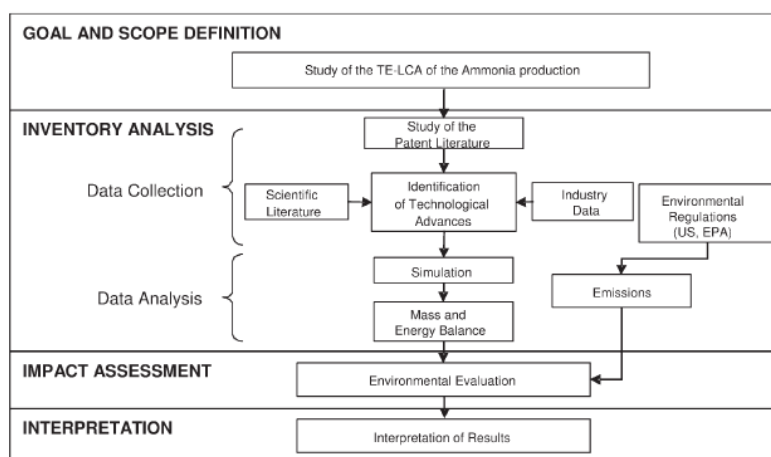


Figure 31 – Méthodologie de TE-LCA (Mendivil et al. 2006)

La méthode se base sur l'identification des progrès technologiques, à partir de données de la littérature et industrielles, ainsi que de la prise en compte du contexte réglementaire. Bien que leur approche puisse être utilisée en ACV prospective, Mendivil et al. (2006) ont testé leurs données sur la production d'ammoniac de 1950 à 2000.

2.2.2.9 Schäfer et al. (2006)

Schäfer et al. (2006) ont étudié l'ACV des véhicules à pile à combustible aux Etats-Unis à l'horizon 2030. Pour cela, les auteurs ont utilisé différentes sources de la littérature afin d'identifier l'ensemble des améliorations possibles pour la production de l'hydrogène, des piles à combustibles et des groupes motopropulseurs électriques. En outre, les auteurs ont aussi considéré l'amélioration des véhicules conventionnels et de la production d'essence et de diesel.

Pour élaborer leur scénario prospectif, Schäfer et al. (2006) ont cherché dans la littérature l'ensemble des paramètres susceptibles d'être améliorés d'ici 2025, sans nécessiter de révolution technologique inattendue (découverte d'un nouveau matériau par ex.). Leur scénario reprend l'ensemble des développements technologiques et cherche ainsi à anticiper le développement maximal possible des véhicules à hydrogène. En outre, leur scénario reprend différents éléments d'études économiques sur le prix des carburants, l'évolution des consommations automobiles, etc., afin d'envisager un taux de

pénétration des véhicules à hydrogène entre 2005 et 2030. Schäfer et al. obtiennent ainsi le graphe suivant, présentant les émissions de GES en fonction de la pénétration des véhicules alternatifs dans la flotte :

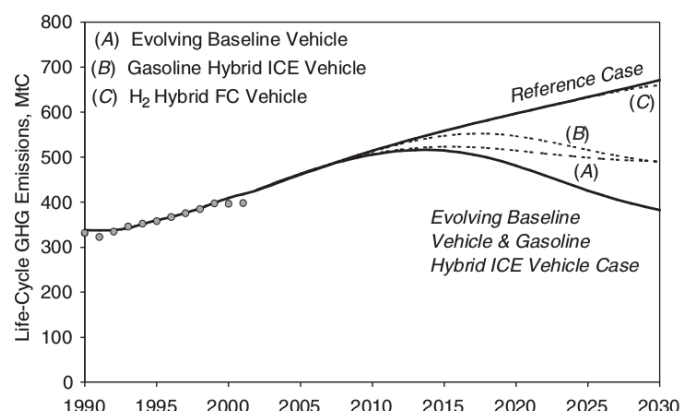


Figure 32 – Emissions de GES en fonction de la pénétration des véhicules alternatifs dans la flotte de véhicules légers de 2005 à 2030 (Schäfer et al., 2006)

Par ailleurs, Schäfer et al. ont aussi calculé les effets du déploiement des véhicules à hydrogène sur la demande d'aluminium, ce qui tend à rapprocher la démarche de l'ACV conséquentielle.

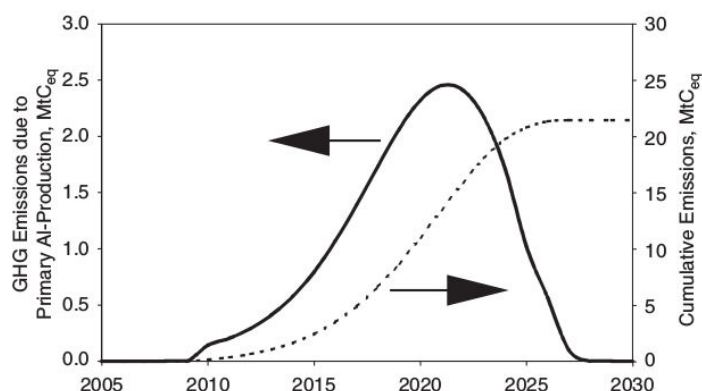


Figure 33 – Evolution de la production d'aluminium primaire liée à l'augmentation des véhicules hybrides et à hydrogène (Schäfer et al., 2006)

2.2.2.10 Macedo et al. (2008)

Macedo et al. (2008) ont étudié l'ACV de la production d'éthanol à partir de canne à sucre produite au Brésil à l'horizon 2020. Pour construire leur scénario, les auteurs ont compilé différentes interviews et points de vue d'experts et de décideurs afin de déterminer les valeurs les plus probables pour chacun des paramètres de la production agricole. Ces interviews sont couplées aux décisions réglementaires ayant un impact sur l'ACV, telles que par ex. la limitation de la taille des camions. À partir de ces données, un scénario dit « conservatif », car ne faisant aucune hypothèse optimiste, est utilisé pour estimer les impacts de l'éthanol issu de la canne à sucre.

2.2.2.11 Dufour et al. (2009)

Dufour et al. (2009) ont étudié la production d'hydrogène à partir de gaz naturel en utilisant différents process, avec et sans couplage avec la capture et séquestration du carbone. Leur ACV étudie aussi l'impact de ces différents process aux horizons 2015 et 2030 afin de voir dans quelle mesure leur impact environnemental diminue. Pour cela, les sources d'énergies utilisées (chaleur et électricité) sont modifiées afin de correspondre aux projections du *World Energy Outlook* de l'AIE.

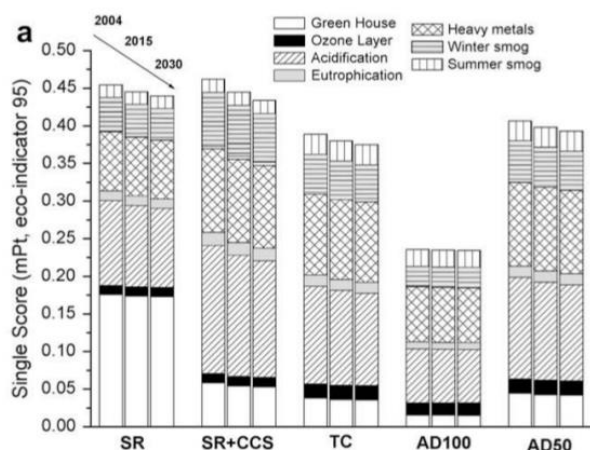


Figure 34 – Scénarios de production de l'hydrogène à partir du gaz naturel aux horizons 2015 et 2030 (Dufour et al., 2009)

2.2.2.12 Weinzettel et al. (2009)

Weinzettel et al. (2009) ont effectué l'ACV d'un système d'éolienne offshore flottante qui n'est pas encore commercialisée. Pour évaluer l'impact environnemental de cette technologie, leur étude s'appuie sur les données issues de l'industriel produisant l'éolienne et d'extrapolations de la base de données ecoinvent pour les éléments manquants. L'éolienne obtenue est comparée à une éolienne offshore « standard » et les incertitudes associées ne permettent pas de déduire la supériorité environnementale d'une technologie sur l'autre. Néanmoins, l'étude ne présente ni analyse de sensibilité, ni analyse d'incertitude robuste.

2.2.2.13 Raugei et al. (2009)

Raugei et al. (2009) ont réalisé l'ACV des systèmes photovoltaïques : leur étude propose à la fois un état de l'art de la situation actuelle ainsi que 3 scénarios futurs : *pessimiste*, *optimiste/réaliste*, *très optimiste*. Ces trois scénarios se basent sur différentes études publiées par l'Agence Internationale de l'Énergie, le CAES ou le European Energy Council, combinées à partir de savoirs d'experts pour fournir un ensemble cohérent. Afin d'obtenir une ACV prospective du photovoltaïque jusqu'en 2050, les auteurs se sont appuyés sur l'évolution des parts de marché des différentes technologies disponibles (en particulier le développement des panneaux à couches minces) ainsi que sur les gains de rendement estimés à horizon 2050.

Year	2025		2050		
Technology	c-Si ribbon	CdTe	c-Si ribbon	CdTe	DSC
c-Si layer thickness (μm)	150	–	100	–	–
Efficiency (%)	20	13	22	16	17
Lifetime	35	35	40	40	15

Tableau 15 - Evolution des paramètres utilisés dans l'étude de Raugei et al. (2009)

Les auteurs obtiennent ainsi des résultats d'ACV pour chaque filière de panneaux (Cf. Figure 35) qui, couplés à des parts de marchés prospectives, permettent d'évaluer l'impact environnemental des trois scénarios envisagés.

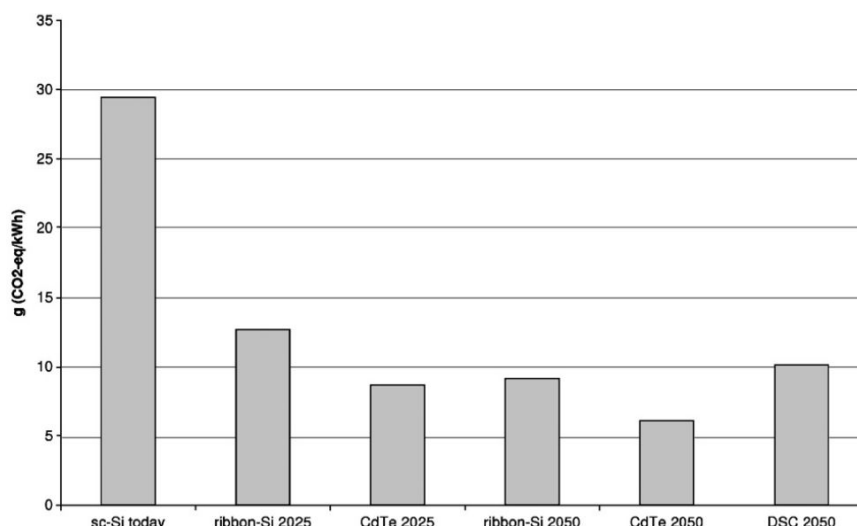


Figure 35 - Résultats d'ACV prospective : impacts des technologies de panneaux photovoltaïques (Raugei et al., 2009)

2.2.2.14 Dominguez-Ramos et al. (2010)

Dans le même secteur d'application que Raugei et al. (2009), **Dominguez-Ramos et al. (2010)** ont réalisé l'ACV prospective des systèmes photovoltaïques utilisés en Espagne à l'horizon 2030 comparé au mix électrique moyen. Pour cela, neuf scénarios énergétiques ont été définis à partir d'études déjà publiées par différents organismes tels que l'EPIA (*European Photovoltaics Industry Association*) ou Greenpeace. Comme pour Raugei et al. (2009), les scénarios sont construits à partir d'une analyse qualitative d'avis d'experts des différentes études externes retenues. Le Tableau 16 présente ces neuf scénarios.

Technology	Ref. 2007	MUS-NGP	NE-NGP	MPW-NGP	CC-NE-NGP	MUS-CP	NE-CP	MPW-CP	CC-CP	CC-NE-CP
Nuclear	18.6	14.1	24.6	14.0	18.3	14.1	24.6	14.0	14.1	18.3
Natural gas	24.4	42.3	32.0	26.4	34.4	41.6	31.1	25.5	31.0	31.1
Heat and power	5.7	6.3	6.3	6.2	6.3	6.3	6.3	6.2	6.3	6.3
Hard coal	20.7	0.2	0.1	0.0	4.0	1.0	0.9	0.9	11.5	7.3
Lignite	4.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Hydro	10.3	9.2	9.2	10.0	9.2	9.2	9.2	10.0	9.2	9.2
Heavy fuel oil	4.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Wind on shore	9.1	20.8	20.8	29.7	20.8	20.8	20.8	29.7	20.8	20.8
Wind off shore	0.0	3.5	3.5	10.2	3.5	3.5	3.5	10.2	3.5	3.5
Photovoltaic	0.2	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
Biomass	0.8	1.6	1.6	1.5	1.6	1.6	1.6	1.5	1.6	1.6
Waste Inc	0.8	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Industrial gas	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Values expressed as percentage

Tableau 16 - Scénarios énergétiques pour l'Espagne en 2030 (Dominguez-Ramos et al., 2010)

De la même manière que Raugei et al. (2009), les auteurs ont défini différentes parts de marché pour les différentes technologies de panneaux photovoltaïques possibles en fonction des scénarios ainsi que des évolutions technologiques entre 2007 et 2030 (rendements et durées de vie).

Table 4 Main PV parameters in 2007 and 2030

		2007				2030			
		E_f	PR	LT_{PV}	LT_{INV}	E_f	PR	LT_{PV}	LT_{INV}
Values of module efficiency and performance ratio expressed as percentage. Values of lifetime of modules and inverters expressed as years	c-Si	15	78	30	20	25	83	35	30
	mc-Si	13	78	30	20	25	83	35	30
	Ribbon-Si	12	78	30	20	20	83	35	30
	a-Si	7	78	30	20	15	83	30	30
	CIGS	10	78	30	20	15	83	30	30
E_f module efficiency, PR performance ratio, LT_{PV} PV module lifetime, LT_{INV} inverter lifetime									
	CdTe	9	78	30	20	15	83	30	30

Tableau 17 - Paramètres technologiques retenus pour l'ACV prospective des panneaux photovoltaïques en Espagne entre 2007 et 2030 (Dominguez-Ramos et al. 2010)

2.2.2.15 Mu et al. (2010)

Mu et al. (2010) ont comparé la production d'éthanol lignocellulosique en 2012 et en 2020. Leur publication étudie deux voies de production d'éthanol, biochimique et thermochimique, et cherche à déterminer lequel présente les impacts environnementaux les plus faibles. Pour effectuer l'ACV en 2020, l'étude change uniquement le rendement des deux procédés à partir de valeurs trouvées dans d'autres études de la littérature. Les résultats obtenus permettent de comparer les procédés en 2010, 2012 et 2020 :

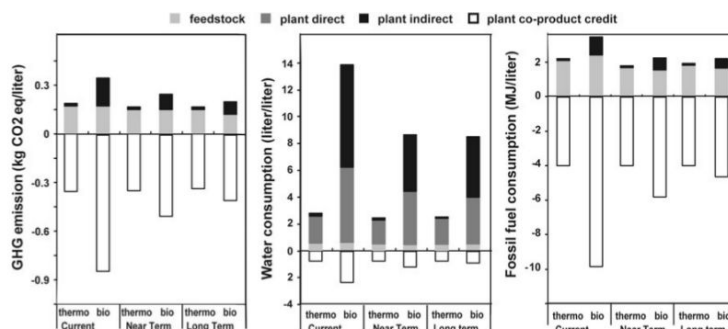


Figure 36 – Résultats des scénarios de production d'éthanol lignocellulosique (Mu et al. 2010)

2.2.2.16 Ou et al. (2010)

Ou et al. (2010) ont estimé les impacts du transport routier en Chine à l'horizon 2050. Leur étude couple données d'ACV issues d'études externes, modèle de déploiement des véhicules, extrapolation de données antérieures et objectifs fixés par l'état Chinois.

L'étude utilise 6 scénarios dont les paramètres sont issus de différentes données de la littérature et combinés à partir des réflexions des auteurs. Ces derniers obtiennent ainsi les scénarios suivants, chacun devant représenter un ensemble de paramètres plausibles cherchant à atteindre un objectif de déploiement d'une énergie / technologie donnée :

- BAU : *business as usual*, basé sur les tendances et politiques actuelles ;
- SBF : *second generation biofuel*, scénario dont les paramètres visent à développer les agrocarburants de deuxième génération
- CBF : *coal based fuel*, scénario où le CtL (carburant de synthèse issu du charbon) se développe ;
- PEV : scénario où les véhicules électriques et hybrides se développent ;
- CCS : déploiement de la capture et séquestration du carbone ;
- BC : *best case*, déploiement des 4 scénarios précédents simultanément.

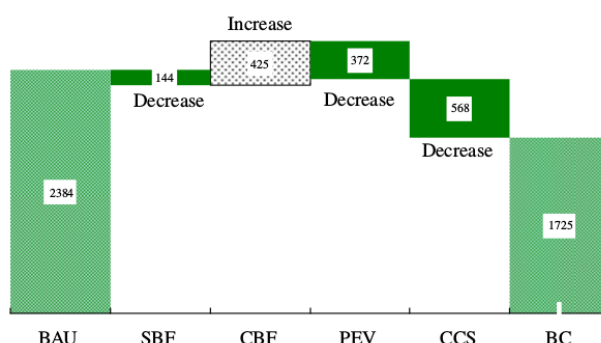


Figure 37 – Emissions de GES des scénarios de transports chinois à l'horizon 2050 (Ou et al., 2010)

2.2.2.17 Rettenmeier et al. (2010)

Rettenmeier et al. (2010) ont réalisé l'ACV de 13 futures cultures énergétiques en Europe à l'horizon 2020. Pour chacune des 13 cultures les auteurs ont réalisé une revue de la littérature couplée à des

interviews d'expert afin d'évaluer l'évolution des rendements entre 2010 et 2020. Seuls les rendements sont considérés par l'étude, les autres paramètres possibles (transport, production des engrais, etc.) sont arbitrairement écartés.

2.2.2.18 Walser et al. (2011)

Walser et al. (2011) ont réalisé l'ACV prospective de t-shirts utilisant des nanoparticules d'argent. L'étude compare ces t-shirts avec des t-shirts non-traités et estime les impacts environnementaux liés à leur commercialisation croissante via six scénarios d'utilisation possibles. L'exercice prospectif consiste donc ici à "imaginer" l'usage du produit lorsqu'il sera développé. En outre, la prospective porte aussi sur l'estimation de l'efficacité de la production industrielle par rapport à la production pilote. Par exemple, la Figure 38 présente l'évolution des impacts écotoxiques entre t-shirt à l'étape de la conception et à l'étape commercialisation de masse (en comparant le t-shirt utilisant des nanoparticules d'argent aux t-shirt conventionnels et utilisant du triclosan).

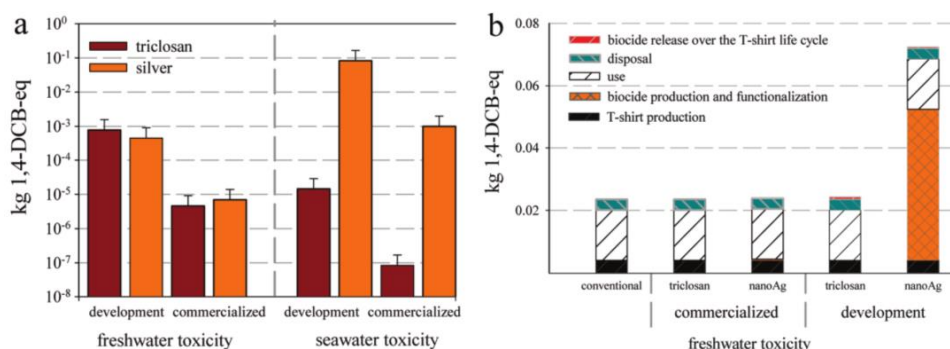


Figure 38 - Comparaison entre différents t-shirts (conventionnel, avec triclosan, avec particules d'argent) et entre version de développement et version commercialisée prospective

2.2.2.19 Wender et al. (2011)

Wender et al. (2011) ont étudié l'ACV prospective de nanotubes de carbone pour batteries lithium-ion. Les nanotubes étudiés ne sont pas encore commercialisés et sont développés à l'échelle du laboratoire. L'étude cherche à extrapoler ces essais de laboratoires à l'échelle industrielle afin d'évaluer l'impact environnemental, en particulier la toxicité du nouveau nanomatériau, avant sa mise sur le marché.

Les incertitudes étant importantes, l'étude utilise des données de la littérature pour définir deux scénarios, un optimiste et un pessimiste, sans scénario intermédiaire.

2.2.2.20 Dandres et al. (2012)

Dandres et al. (2012) ont publié une ACV prospective ambitieuse des politiques européennes en faveur des bioénergies de 2005 à 2025. La méthode de Dandres et al. (2012) est nommée M-LCA (macro ACV) et résulte, selon les auteurs, d'une approche mixte entre ACV conséquentielle et ACV prospective. De fait, l'étude se base sur le modèle d'équilibre général calculable GTAP pour modéliser les changements dans les différents secteurs économiques liés à l'adoption des politiques en faveur des bioénergies. Cette approche est couplée à une analyse prospective permettant de renseigner dans GTAP les différentes innovations technologiques et sociétales à venir. Les différents paramètres renseignés dans GTAP sont issus de recherches dans la littérature et sont regroupés sous forme de scénarios. Les résultats obtenus dans GTAP sont ensuite entrés dans Simapro afin de calculer l'ACV de chaque scénario.

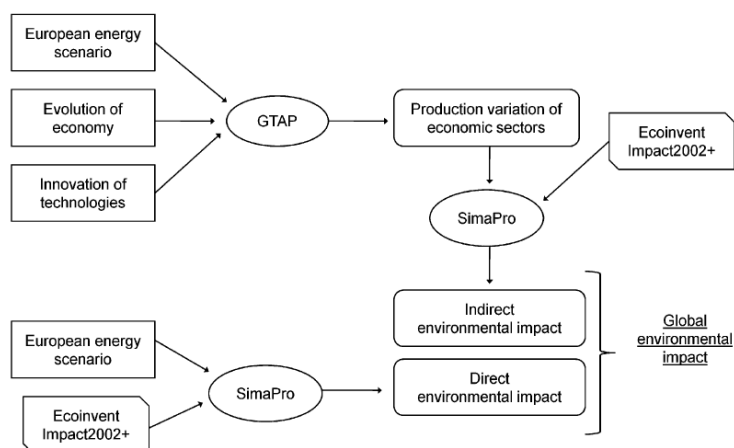


Figure 39 – Méthode utilisée en macro-ACV (Dandres et al. 2012)

2.2.2.21 Da Silva et al. (2014)

Da Silva et al. (2014) ont publié une ACV prospective de l'éthanol produit à partir de la canne à sucre. 4 scénarios ont été définis de la manière arbitraire : (i) avec labour, bagasse utilisée pour la chaleur et l'électricité ; (ii) sans labour, bagasse utilisée pour la chaleur et l'électricité ; (iii) avec labour, production combinée 1^{ère} et 2^{ème} génération ; (iv) sans labour, production combinée 1^{ère} et 2^{ème} génération. Les différentes valeurs associées à ces scénarios ont été élaborés à partir d'avis d'expert, sans qu'une méthode particulière soit utilisée.

item	unit	scenarios				
		s0 ^a	s1	s2	s3	s4
cane productivity	t cane ha ⁻¹	83.1	110	132	110	132
straw (dry basis) ^b	% cane stalks	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0
sugar cane preharvesting burning	% area	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
mechanized harvesting	% area	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
diesel consumption	L ha ⁻¹	161.4	131.0	74.7	131.0	74.7
straw sent to the mill	%	0.0	50.0	50.0	50.0	50.0
sugar cane transportation by tumpike doubles ^c	%	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
sugar cane TRS	kg t ⁻¹ cane	140.0	160.0	160.0	160.0	160.0
ethanol yield ^d	kg t ⁻¹ cane	68.1	75.8	75.8	96.1	96.1
electricity surplus ^e	kWh kg ⁻¹ EtOH	1.2	2.6	2.6	1.1	1.1
mill capacity	Mt year ⁻¹	2.0	3.0	3.0	4.0	4.0
ethanol distribution—truck ^f	%	100.0	80.0	80.0	80.0	80.0
ethanol distribution—pipeline	%	0.0	20.0	20.0	20.0	20.0

^aBased on ref 27. ^bReference 42. ^cDistance from the field to the mill: 25.1 km (scenario s0), 26.6 km (future scenarios). ^dLower heating value: 24.8 MJ EtOH-1. ^e3.6 MJ kWh⁻¹. ^fAverage distance of 340 km.⁴¹

Tableau 18 – Valeurs des paramètres utilisées dans les scénarios de production d'éthanol (Da Silva et al. 2014)

2.2.2.22 Hertwich et al. (2015)

Hertwich et al. (2015) ont comparé les scénarios BLUE Map (scénarios visant à diminuer les émissions de gaz à effet de serre de la production d'électricité à l'échelle mondiale) au scénario conventionnel de l'AIE à l'horizon 2050. Pour cela, Hertwich et al. ont couplé l'ACV des différentes filières de production d'électricité aux différentes parts de marché des scénarios de l'AIE.

En outre, compte-tenu des évolutions de demande en ressources associées à ces différents scénarios, Hertwich et al. ont utilisé les inventaires de cycle de vie issus du projet NEEDS afin de mettre à jour les inventaires des procédés d'arrière-plan.

2.2.3 Études multisectorielles

2.2.3.1 NEEDS (2009)

NEEDS est un projet Européen terminé en 2009 dont l'objectif était d'évaluer les coûts et bénéfices des politiques énergétiques et des futurs systèmes énergétiques en Europe. Parmi les coûts évalués, NEEDS s'est focalisé sur les coûts externes, entre autres liés aux émissions polluantes.

De fait, NEEDS a développé 3 scénarios : pessimiste, réaliste-optimiste et très optimiste. Le scénario pessimiste correspond à un scénario *business as usual*, pour lequel les conditions socio-économiques ne stimulent pas l'adoption par le marché de nouvelles technologies. Dans le scénario réaliste-optimiste, les conditions socio-économiques permettent l'adoption de développements technologiques impliquant des gains pour le secteur de l'électricité. Le scénario très optimiste considère que les énergies renouvelables deviennent la source de production majoritaire :

	today	2050		
	UCTE	business as usual	440 ppm CO ₂	enhanced renewables
fossil	46.8	55.3	47.6	19.7
nuclear	35.7	22.0	24.4	0.0
hydro	15.7	13.6	14.5	23.3
new renewables and waste	1.8	8.6	12.8	56.1
applied on technology scenario	-	PE	RO	VO

Table 1: Fuel shares (in %) in the European electricity mix today and in 2050

Tableau 19 – Parts de marché des différentes sources de production d'électricité en Europe selon le scénario (ISIS, 2009)

L'ensemble des résultats du projet NEEDS ont été publiés sous forme d'inventaires de cycle de vie. 795 inventaires ont ainsi été développés, pour chacun des scénarios proposés. En outre, les inventaires couvrent à la fois les différentes sources de production d'électricité mais aussi différents secteurs industriels tels que la production de l'aluminium, du cuivre, du clinker, du verre, etc.

Le principal inconvénient du projet NEEDS est son âge. Ainsi, le projet s'étant terminé en 2008, la base de données utilisée pour les procédés d'arrière-plan est ecoinvent 1.3, ce qui complique l'intégration des inventaires développés dans NEEDS avec d'autres projets plus récents.

2.2.3.2 EIPRO (2006) – IMPRO (2008)

En 2006, l'IPTS (*Institute for Prospective Technological Studies*) a publié une ACV des différents secteurs industriels en Europe nommée EIPRO (*environmental impact of products*). EIPRO se base sur différentes études précédemment publiées ainsi que sur une analyse input/output.

Par la suite, une série de rapports intitulés IMPRO (*environmental improvement potential of products*), chacun pour un secteur dédié : véhicules particuliers, textiles, viande et produits laitiers, bâtiments résidentiels. Ces rapports présentent les possibilités d'amélioration des différents secteurs à l'horizon 2020. Les études se basent sur la littérature pour évaluer les différents postes pouvant être améliorés. Par exemple, pour les véhicules particuliers, l'étude identifie les axes suivants : réduction de la masse, amélioration de l'aérodynamisme et diminution de la résistance des pneus, air conditionné, dépollution des gaz d'échappement, amélioration des groupes motopropulseurs, développement des agrocarburants, recyclage, limitation de la vitesse maximale sur autoroute, comportement au volant et diminution de la taille des véhicules.

À partir de la littérature et d'avis d'experts, les études quantifient les gains possibles pour chaque poste et comparent le résultat d'ACV obtenu avec celui de l'état initial.

2.2.4 Synthèse

Le tableau qui suit reprend les principales informations contenues dans les études présentées.

Recommandations pratiques pour l'ACV prospective/ Références et exemples dans le domaine de l'énergie

Auteurs / étude	Année	Institut	Horizon	Secteur	Objectifs	Méthode prospective
Contadini et al.	2002	Univ. Californie	2010	Mobilité	ACV véhicules PàC	Delphi
Fukushima et al.	2002	Univ. Tokyo	2040	Mobilité	ACV nouveau véhicule	Scénarios + procédés dynamiques
Pehnt et al.	2003	Heidelberg IFEU	2010	Énergie	ACV PàC	Scénarios pivots
Rasmussen et al.	2005	Risø Nat. Lab.	2025	Énergie	ACV futures éoliennes	Littérature + experts + scénarios
Spatari et al.	2005	Univ. Toronto	2020	Mobilité	ACV futur éthanol 2020	Paramètres arbitraires
Spielmann et al.	2005	ETHZ	2020	Mobilité	ACV transports 2020	Scénarios pivots
Schäfer et al.	2006	Univ. Cambridge	2030	Mobilité	ACV véhicules hydrogène 2030	Paramètres arbitraires
Mendivil et al.	2006	ETHZ	2000	Ammoniac	ACV retrospective ammoniac	TE-LCA
IMPRO	2008	JRC-IPST	2020	Mobilité, bâtiment, textile, alimentation	ACV gains potentiels différents secteurs	I/O, littérature, avis d'experts
Macedo et al.	2008	Univ. Campinas	2020	Mobilité	ACV éthanol canne à sucre	Avis d'experts + réglementations
NEEDS	2009	JRC	2050	Énergie	ACV électricité future	Scénarios
Dufour et al.	2009	Univ. Madrid	2030	Énergie	ACV hydrogène	Scénarios AIE
Raugei et al.	2009	Univ. Pompeu Fabra	2050	Énergie	ACV panneaux PV	Scénarios AIE + experts
Weinzettel et al.	2009	Univ. Tech. Prague	-	Énergie	ACV future éolienne	Données industrielles
Dominguez-Ramos et al.	2010	Univ. Cantabria	2030	Énergie	ACV panneaux PV	Scénarios externes
Mu et al.	2010	Purdue University	2020	Mobilité	ACV éthanol 2020	Paramètres arbitraires
Ou et al.	2010	Univ. Tsinghua	2050	Mobilité	ACV transports 2050	Scénarios avec objectifs
Rettenmeier et al.	2010	IFEU	2020	Énergie	ACV futures cultures énergétiques	Littérature + experts
Walser et al.	2011	ETHZ	2020	Textile	ACV t-shirts nanoparticules	Extrapolation labo -> industrie
Wender et al.	2011	Univ. Arizona	-	Énergie	ACV batteries nanotubes	Extrapolation labo -> industrie
Dandres et al.	2012	CIRAIG	2025	Énergie	ACV politiques bioénergie	GTAP + littérature
Da Silva et al.	2014	Univ. Campinas	2030	Mobilité	ACV éthanol	Scénarios arbitraires
Hertwich et al.	2015	NTNU	2050	Énergie	ACV scénario électriques AIE	Scénarios AIE

2.3 Instituts

Les sections qui suivent regroupent l'ensemble des acteurs identifiés durant les sections précédentes. En outre, l'ensemble de ces acteurs (avec les informations contenues dans les tableaux) ont été positionnés sur une carte interactive en ligne accessible à l'adresse suivante :

<https://drive.google.com/open?id=1-z9XbmJfzAnNk4YSoSuu2ye-PV4&usp=sharing>



2.3.1 ACV prospectives

Le tableau en page suivante présente les instituts ayant réalisé les ACV prospectives présentées au paragraphe 2.2.

2.3.2 Etudes prospectives sur l'énergie et les ressources

Le nombre d'acteurs et d'instituts ayant réalisé par le passé des études prospectives est trop important pour pouvoir en établir une liste exhaustive. Nous avons donc choisi d'en répertorier un sous ensemble en se fondant sur une recherche ciblée dans la base de données Scopus (plus importante base de données d'articles et ouvrages à comité de lecture) en spécifiant les mots clé « scenario » et « energy » et en relevant les publications sur la période 1981-2016. Environ un millier de références ont été trouvées. L'affiliation des auteurs correspondant est reportée dans la base de données des instituts.

Recommandations pratiques pour l'ACV prospective/ Références et exemples dans le domaine de l'énergie

Institut	Pays	Etude	Auteurs	Nature
Ecole polytechnique fédérale de Zürich	Suisse	Pesonen et al. (2000), Spielmann et al. (2005), Mendivil et al. (2006), Walser et al. (2011)	C. Jahn, T. Walser, E. Demou, S. Hellweg, D. Lang, M. Spielmann, R. Scholz, O. Tietje, P. de Haan, R. Mendivil, U. Fischer, K. Hungerbühler	Université
Jyväskylä University	Finlande	Pesonen et al. (2000)	HL. Pesonen	Université
Université de Leiden	Pays-Bas	Pesonen et al. (2000), Da Silva et al. (2014)	G. Huppel, L. van Oers, E ; van der Voet	Université
Syddansk Universitet	Danemark	Pesonen et al. (2000)	H. Wenzel	Université
Université technique de Prague	Rép. Tchèque	Weinzettel et al. (2009)	J. Weinzettel	Université
Université norvégienne de sciences et de technologie (NTNU)	Norvège	Weinzettel et al. (2009), Hertwich et al. (2015)	M. Reenaas, C. Solli, E. Hertwich, T. Gibon, A. Bouman, A. Arvesen	Université
University of Toronto	Canada	Spatari et al. (2005)	S. Spatari, Y. Zhang, H. McLean	Université
Chalmers Industriteknik	Suède	Pesonen et al. (2000)	T. Ekvall	Université
Université technique de Berlin	Allemagne	Pesonen et al. (2000)	G. Fleisher	Université
Poznan University of Technology	Pologne	Pesonen et al. (2000)	Z. Klos	Université
Universitat Rovira i Virgili	Italie	Pesonen et al. (2000)	G. Sonnemann	Université
ENI	Italie	Pesonen et al. (2000)	A. Tintinelli	E.privée
Université technique du Danemark	Danemark	Pesonen et al. (2000)	B. Weidema	Université
Universidad de Cantabria	Espagne	Dominguez-Ramos et al. (2010)	A. Dominguez-Ramos, R. Aldaco, A. Irabien	Université
Universität Stuttgart	Allemagne	Dominguez-Ramos et al. (2010)	M. Held, M. Fischer	Université
DTU Risø Campus	Danemark	Rasmussen et al. (2005)	B. Rasmussen, M. Borup, K. Borch, P. Andersen	Université
Arizona State University, Tempe Campus	USA	Wender et al. (2011)	B. Wender, T. Seager	Université
University Of Cambridge	Royaume-Uni	Schäfer et al. (2006)	A. Schäfer	Université
Massachusetts Institute of Technology	USA	Schäfer et al. (2006)	J. Heywood, M. Weiss	C. recherche
Purdue University	USA	Mu et al. (2010)	D. Mu, P. Rao, F. Zhao	Université
Rochester Institute of Technology	USA	Mu et al. (2010)	T. Seager	C. recherche
Tsinghua University	Chine	Ou et al. (2010)	W. Ou, X. Zhang, S. Chang, L ; Shi	Université
Universidad Rey Juan Carlos	Espagne	Hertwich et al. (2010)	J. Dufour, D. Serrano, J. Moreno	Université
Instituto Nacional Técnica Aeroespacial	Espagne	Dufour et al. (2009)	J. Gálvez, C. García	C. recherche
Unicamp	Brésil	Macedo et al. (2008), Da Silva et al. (2014)	I. Macedo, J. Seabra. C. Da Silva,	Université
CTC-Centro de Tecnologia Canavieira	Brésil	Macedo et al. (2008)	J. Silva	C. recherche
Polytechnique Montréal	Canada	Dandres et al. (2012)	T. Dandres, P. Tirado-Seco, R. Samson	Université
Université de Californie à Santa Barbara	USA	Hertwich et al. (2015)	S. Suh, J. Bergesen	Université
National Renewable Energy Laboratory	USA	Hertwich et al. (2015)	G. Heath	C. recherche
Utrecht University	Pays-Bas	Hertwich et al. (2015)	A. Ramirez	Université
Universidad de Concepción	Chili	Hertwich et al. (2015)	M. Vega	Université
ESCI-UPF	Espagne	Raugei et al. (2009)	M. Raugei	Université
International Energy Agency	France	Raugei et al. (2009)	P. Frankl	Agence
ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH	Allemagne	Pehnt et al. (2003)	M. Pehnt	C. recherche
University of California, Davis	USA	Contadini et al. (2002)	J. Contadini, R. Moore, P ; Mokhtarian	Université
Lab. Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol	Brésil	Da Silva et al. (2014)	C. Franco, T. Junqueira	C. recherche
Université de Tokyo	Japon	Fukushima et al. (2002)	Y. Fukushima, M ; Hirao	Université

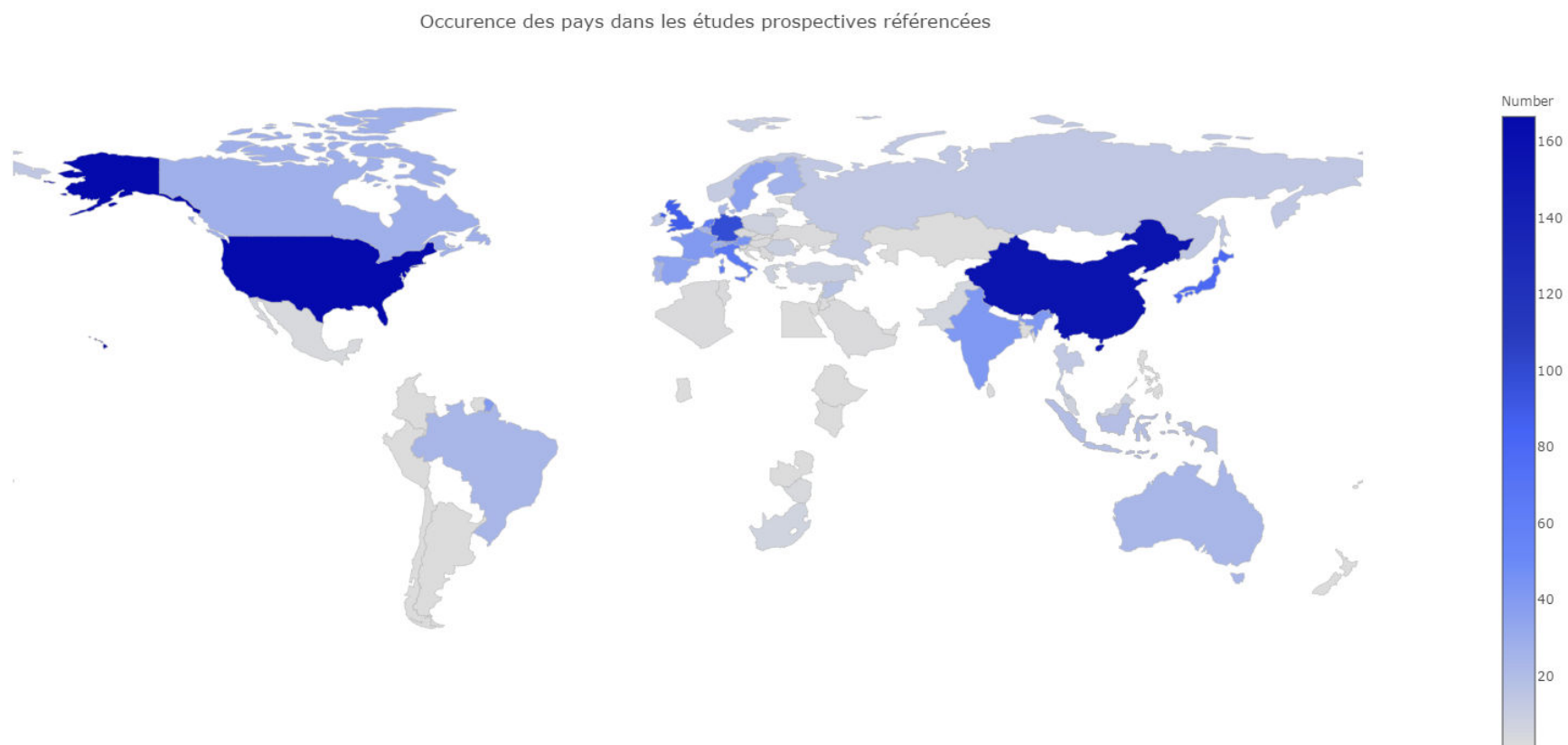


Figure 40 : Etudes prospectives 1981-2016 - citations /pays

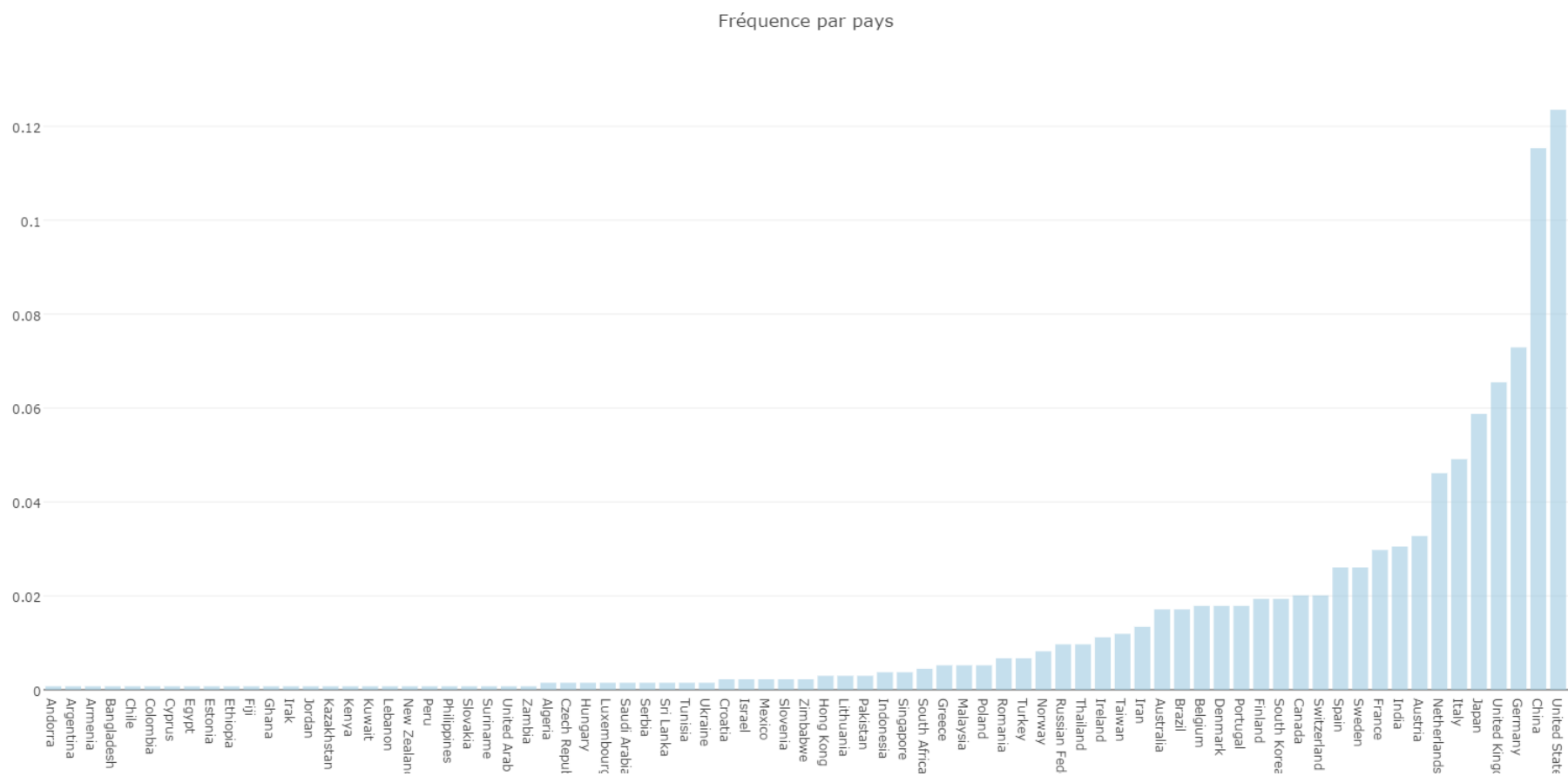


Figure 41 : Etudes prospectives 1981-2016 - fréquence /pays

3 Typologies des ACV prospectives

3.1 Résumé

L'objectif de cette seconde partie est d'établir les spécificités des ACV prospectives étudiées dans l'état de l'art afin de dégager des typologies. Cette partie s'articule de la manière suivante :

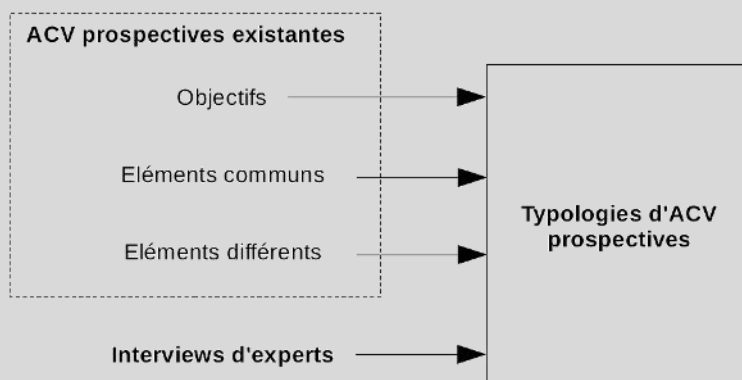


Figure 42 – Typologies d'ACV prospective : Présentation de la méthode

Basée sur la revue de la littérature et sur les résultats de l'enquête en ligne, les éléments suivants de typologie ont été envisagés :

- Objectifs :
 - ACV d'un produit ou d'une gamme de produits existant à un horizon temporel éloigné ;
 - ACV d'un produit extrapolé du laboratoire au déploiement commercial ;
 - ACV d'un secteur entier (par ex. transport, énergie) associé à des scénarios prospectifs.
- Horizons temporels :
 - 2020 ;
 - 2050 ;
 - 2030 ;
 - Autres
- Méthodologies utilisées :
 - Scénarios existants
 - Littérature et dires d'experts
 - Modélisation ;
- Aspect temporel :
 - « photographie » d'une situation dans le futur ;
 - évolution sur une période de temps donnée.

3.2 ACV existantes : objectifs

Les ACV peuvent être regroupées selon les 4 typologies préliminaires suivantes, basées sur leurs objectifs :

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

Le tableau qui suit présente, pour chaque ACV présentée dans l'état de l'art, l'objectif suivi ainsi que l'ébauche d'une première typologie possible en fonction des objectifs.

Étude	Objectif	Typologie
Contadini et al. (2002)	ACV des futurs véhicules utilisant une pile à combustible.	(a)
Fukushima et al. (2002)	ACV d'un nouveau modèle de véhicule remplaçant un ancien	(c)
Pehnt et al. (2003)	ACV des futurs véhicules utilisant une pile à combustible	(a)
Rasmussen et al. (2005)	ACV des futures technologies d'éolienne	(a)
Spatari et al. (2005)	ACV éthanol en 2020	(a)
Spielmann et al. (2005)	ACV des futurs transports	(c)
Schäfer et al. (2006)	ACV des futurs véhicules à pile à combustible	(a)
IMPRO (2008)	ACV des améliorations futures de différents secteurs industriels	(c)
Macedo et al. (2008)	ACV de l'éthanol de canne à sucre en 2020	(a)
NEEDS (2009)	Externalités du futur secteur de l'électricité sous différents scénarios	(c)
Dufour et al. (2009)	ACV de la production d'hydrogène en 2030	(a)
Raugei et al. (2009)	ACV des futurs systèmes photovoltaïques	(a)
Weinzettel et al. (2009)	ACV d'une nouvelle technologie d'éolienne offshore	(b)
Dominguez-Ramos et al. (2010)	ACV des futurs panneaux PV par rapport au mix conventionnel	(a)
Rettenmeier et al. (2010)	ACV de futures cultures énergétiques en 2020	(a)
Mu et al. (2010)	ACV de la production d'éthanol en 2020	(a)
Ou et al. (2010)	ACV des transports en 2050	(c)
Walser et al. (2011)	ACV de t-shirts utilisant des nanomatériaux	(b)
Wender et al. (2011)	ACV de batteries Li-Ion avec nanotubes de carbone	(b)
Dandres et al. (2012)	ACV des politiques de bioénergies en Europe	(c)
Da Silva et al. (2014)	ACV prospective de l'éthanol de canne à sucre	(a)
Hertwich et al. (2015)	ACV des scénarios de production d'électricité de l'AIE	(c)

Tableau 20 – Classement des ACV prospectives en fonction de leurs objectifs

3.3 Éléments convergents et divergents

3.3.1 Méthode prospective en fonction des objectifs

Le tableau suivant présente les différentes techniques prospectives utilisées en fonction des typologies d'objectif retenues dans la section précédente.

Typologie d'objectif (a)	
Étude	Méthode prospective
Contadini et al. 2002 Pehnt et al. 2003	Scénarios, basés sur littérature et avis d'experts (méthode Delphi) Méthode en 4 temps : (i) ACV préliminaire (ii) identification des données manquantes (iii) analyse de pertinence des données manquantes (iv) utilisation de plusieurs méthodes prédictives selon les paramètres
Spatari et al. 2005	Paramètres techniques modifiés de manière arbitraire à partir de données de la littérature
Rasmussen et al. (2005) Schäfer et al. (2006)	Scénarios, basés sur littérature et avis d'experts (pas de méthode particulière) Paramètres techniques modifiés de manière arbitraire à partir de données de la littérature
Macedo et al. (2008)	Scénarios, basés sur littérature, réglementations et avis d'experts (pas de méthode particulière)
Dufour et al. (2009) Raugei et al. 2009	Scénarios de la littérature (AIE) Scénarios, basés sur littérature (AIE) et avis d'experts (pas de méthode particulière)
Dominguez-Ramos et al. 2010 Mu et al. (2010)	Scénarios, basés sur littérature et avis d'experts (pas de méthode particulière) Paramètres techniques modifiés de manière arbitraire à partir de données de la littérature
Rettenmeier et al. (2010)	Paramètres techniques modifiés de manière arbitraire à partir de données de la littérature et experts
Dominguez-Ramos (2010)	Scénarios basés sur des scénarios publiés (Greenpeace, EPIA, etc.) et avis d'experts (pas de méthode particulière)
Da Silva et al. 2014	Scénarios, basés sur avis d'experts (pas de méthode particulière)
Typologie d'objectif (b)	
Rasmussen et al. 2005	Littérature et avis d'experts (méthode Delphi)

Weinzettel et al. 2009	Littérature et avis d'experts
Walser et al. 2011	Scénarios, basés sur littérature et avis d'experts (pas de méthode particulière)
Typologie d'objectif (c)	
Fukushima et al. 2002	Littérature et avis d'experts + ICV dynamique
Spielmann et al. 2005	Analyse formative de scénarios
IMPRO 2008	Quantification des gains technologiques possibles
NEEDS 2008	Scénarios, basés sur littérature et avis d'experts (pas de méthode particulière)
Dandres et al. 2012	Scénarios de la littérature + modèle d'équilibre économique partiel (GTAP)
Hertwich et al. 2015	Scénarios de la littérature (AIE)

Tableau 21 – Classement des ACV prospectives en fonction de leur typologie d'objectif et de la méthodologie prospective mise en œuvre

De manière générale, les ACV (a) et (c) se basent sur la méthode des scénarios comme technique prospective. Dans le cas de la typologie (a), les scénarios sont généralement basés sur des données de la littérature et des avis d'experts. Le recueil des avis d'expert ne suit généralement pas une méthode formalisée, à l'exception de Contadini et al. (2002). Par ailleurs, seuls Pehnt et al. (2003) préconisent d'utiliser différentes techniques prospectives en fonction des paramètres variant.

À l'exception de Walser et al. (2011), les ACV de type (b) n'utilisent généralement pas des scénarios formellement définis mais comparent plutôt un statut initial avec un statut futur, dont les données sont établies à partir d'avis d'expert. À nouveau, le recueil des avis d'expert ne suit généralement pas de méthode formalisée.

Enfin, les ACV de type (c) n'utilisent pas de méthodes similaires. Soit elles sont simplement la transcription en ACV de scénarios existants (Hertwich et al. 2015), soit elles utilisent des scénarios de la littérature couplés à un modèle économique (Dandres et al. 2012), soit elles génèrent elles-mêmes leurs scénarios par la méthode d'analyse formative (Spielmann et al. 2005). Dans tous les cas, les ACV de type (c) utilisent des approches moins arbitraires que les types (a) et (b).

3.3.2 Horizons temporels

La figure qui suit présente les horizons temporels des différentes études retenues. La couleur est fonction du type d'objectif (a : vert, b : orange, c : violet).

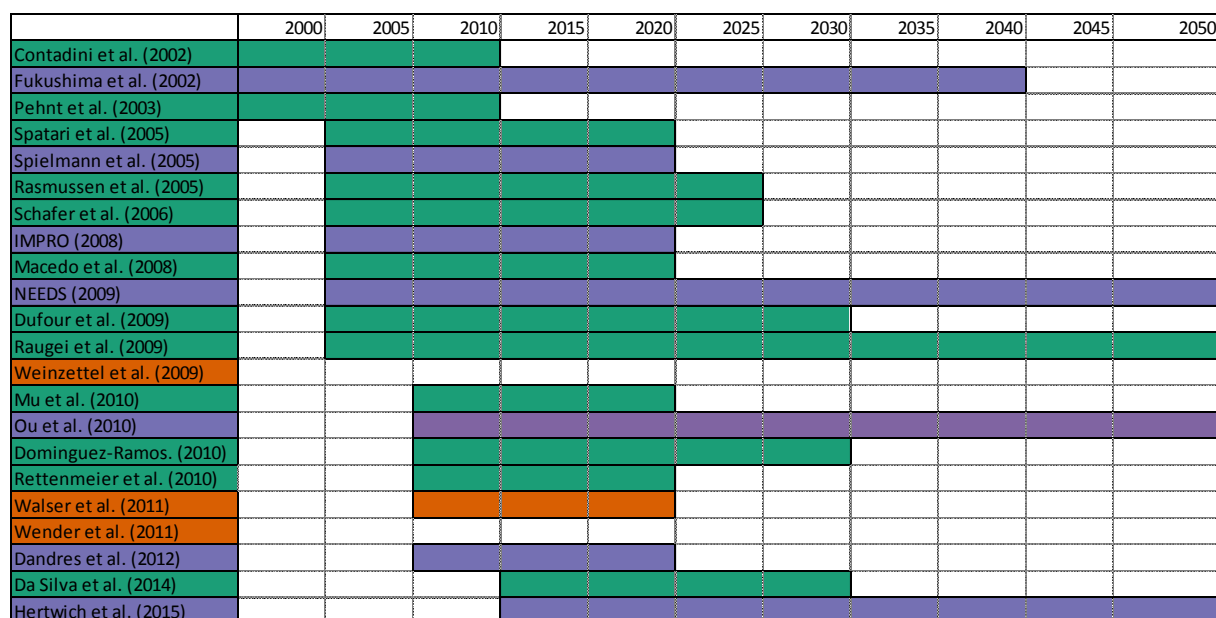


Figure 43 – horizons temporels des différentes ACV prospectives

De manière générale, l'horizon temporel moyen retenu semble être fonction de la typologie d'objectif : pas d'horizon temporel pour (b), 18 ans pour (a) et 29 pour (c).

En outre, les principaux horizons temporels retenus sont les suivants :

- 2020 : 8 études ;

- 2050 : 4 études ;
- 2030 : 3 études ;
- 2010 : 2 études ;
- 2025 : 2 études ;
- 2040 : 1 étude.

3.4 Définitions : ACV conséquentielle et ACV prospective

Suite à l'analyse de la littérature ainsi qu'aux interviews d'experts (cf. section 4 ci-après), il apparaît que la frontière entre ACV conséquentielle et ACV prospective est floue. Ainsi, plusieurs sondés font ressortir le besoin d'une définition de l'ACV prospective, tandis que certaines études de la littérature, telles Schäfer et al. (2006) ou Hedegaard et al. (2008), incorporent des éléments d'ACV conséquentielle sans le mentionner explicitement. Enfin, cette confusion se retrouve dans le rapport SCORE-LCA 2012-01, où l'ACV conséquentielle a pour synonyme « ACV orientée changement » et « ACV prospective », par opposition à l'ACV attributionnelle « descriptive ». Toutefois, Dandres et al. (2012) ont bien identifié la différence entre ACV prospective et conséquentielle en proposant une méthode hybride entre les deux.

Par conséquent, il apparaît fondamental de proposer une définition de l'ACV prospective avant même d'en dégager les typologies.

ACV conséquentielle (verbatim de la définition SCORELCA 2012-01) : *Approche d'évaluation des impacts environnementaux générés par la chaîne de conséquences (directes et indirectes) induites par un changement subi par le système étudié, associé à une (ou plusieurs) décision(s) et aux actions respectives. Le CLCA est lié à un contexte spatial et un horizon temporel précis. La majorité des experts en ACV interrogés concordent sur ce point essentiel de la définition de l'approche conséquentielle.*

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

ACV prospective et conséquentielle se distinguent ainsi par la portée des changements mesurés ; l'ACV conséquentielle exige ainsi des données spécifiques reflétant l'impact des changements. Néanmoins, les deux types d'ACV possèdent de nombreux points communs, tels que l'usage de données prospectives ou l'utilisation de scénarios.

4 Résultats de l'enquête

Une enquête en ligne a été construite afin d'apporter des éléments d'information complémentaire sur l'ACV prospective. Cette enquête a été disséminée le 23 mai pour une période de réponse d'un mois (jusqu'au 24 juin). L'enquête a été rédigée en anglais afin de toucher le public le plus large possible et en particulier de pas limiter les résultats aux régions francophones. L'enquête est composée de 3 sections, selon le profil du répondant :

1. *Researcher / practitioner in the field of LCA*
2. *Researcher / practitioner in the field of prospective system analysis*
3. *I'm not a practitioner in these fields but I am using outcomes of prospective (LCA) studies for decision making purpose.*

Les résultats d'enquêtes seront présentés pour chaque type de répondant puis analysés de manière groupée. Le groupe 3, qui devait concerner les personnes n'ayant ni expérience en ACV, ni en prospective, n'a reçu qu'une seule réponse et ne pourra donc pas être exploité. L'échec de cette section est très probablement lié à la méconnaissance du sujet des personnes qui ne sentent ainsi pas concernées par l'enquête. Dans l'ensemble, 68 personnes ont répondu à l'enquête et se définissent de la manière suivante :

Who are you (68 responses)

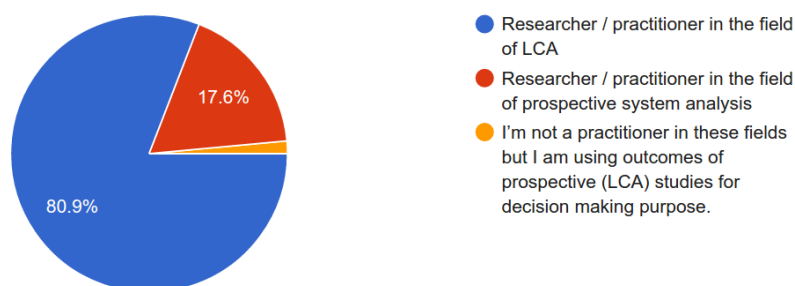


Figure 44 – Profil des répondants de l'enquête

4.1 Panel 1 – chercheurs / praticiens ACV

4.1.1 Généralités

55 personnes ont répondu à l'enquête en se définissant comme chercheur ou praticien de l'ACV. Parmi celles-ci, 71% reconnaissent avoir déjà réalisé une ACV prospective. Ces chiffres peuvent paraître élevés compte-tenu du faible nombre d'ACV se revendiquant comme « prospectives » dans la littérature. Il est possible que les répondants aient effectué des ACV de futurs systèmes sans revendiquer l'aspect prospectif ou futur de l'étude (comme indiqué dans la section 2.2.2), que les études n'aient pas été publiées.

Have you ever conducted an LCA in a prospective context? (55 responses)

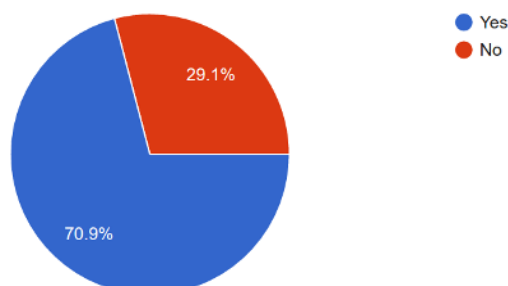


Figure 45 – Part des chercheurs / praticiens en ACV ayant déjà réalisé une ACV prospective

Les principaux horizons temporels retenus sont 2020, 2030 et 2050, tandis que 2040 est peu étudié et 2100 jamais retenu. Cela peut s'expliquer par le fait que la majorité des objectifs réglementaires sont fixés à 2020, 2030 et 2050. Pour 2100, aucun commentaire n'a été fourni mais l'on peut supposer que les incertitudes sont considérées comme trop importantes pour pouvoir réaliser une ACV. Ces horizons temporels correspondent à ceux relevés au paragraphe 3.3.2.

If Yes, which time horizon have you ever considered? (40 responses)

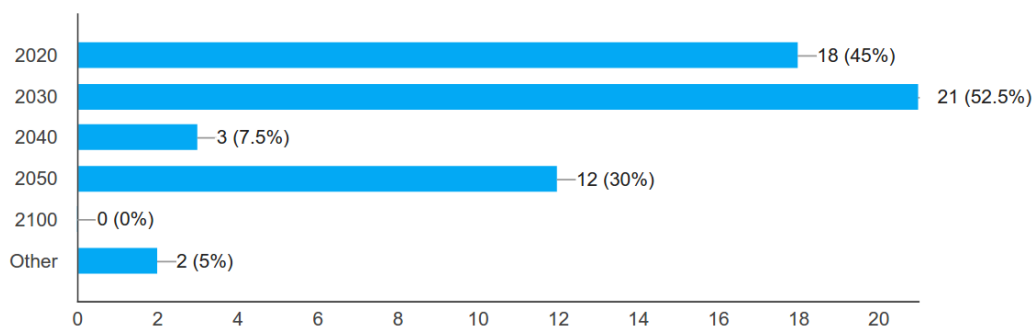


Figure 46 – Horizons temporels considérés par le panel ACV

4.1.2 Scénarios

Seuls 7,3% des sondés considèrent qu'il est parfois possible de ne modéliser qu'un seul scénario tandis que la majorité considère qu'il est toujours nécessaire de modéliser plusieurs scénarios et que leur nombre dépend du contexte de l'étude.

When modeling future systems, do you think that (55 responses)

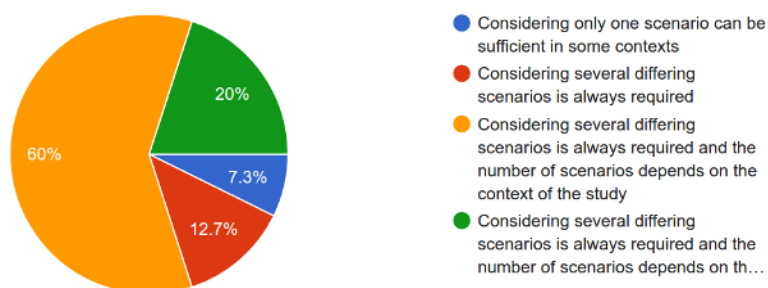


Figure 47 – Faut-il considérer un ou plusieurs scénarios en ACV prospective ? Point de vue du panel ACV

Néanmoins, lorsque les répondants sont interrogés sur les moyens de réduire le nombre de scénarios, les opinions sont largement divergentes. Ainsi, sur les 42 personnes ayant accepté de donner leur opinion, les avis peuvent être regroupés selon les idées suivantes :

Ne calculer que les scénarios extrêmes : minimum et maximum (7 réponses)

1. Only look at the two extremes
2. Usually, observing how a system behaves in extreme scenarios already provides you the answers you are looking for.
3. Identify worst and best case scenarios and just consider baseline and 1 or 2 more scenarios
4. trying to conduct "extreme" scenarios (very very positive - very very negative - and maybe something like the most probable) ... resulting ideally in 3 scenarios that span up the range of the possible results ...
5. I think it is very unlikely to use LCA to identify totally "new stories". The setting of the scenarios should be based to the present/past experiences. Probably, considering extreme scenarios would help to have a general estimation of the range of variability of the studied system
6. Using higher and lower bounds
7. scenarios should always cover the BaU scenario, the optimistic scenario and the pessimistic scenario (at least)

Analyse de sensibilité – identification des hotspots – identification des paramètres les plus influents (6 réponses)
1. From the present situation, develop previously sensitivity analysis taking into account processes with high contribution. Analyse the range of variability of results in each sensitivity analysis. Establish a % range of variability and select activities/processes with high ranges. From these results, eliminate scenarios which only consider variations similar to the sensitivity analysis with low variability. Combine results of sensitivity analysis with prediction of technology development. Scenarios with no economic viability could be described but eliminated from analysis. 2. Only considered the most probable scenario that will have a significant incidence on the context, by first considering one scenario and evaluate the potential contribution of various options. 3. By identifying the most relevant parameters (through e.g. hotspot analysis of the current system) but also considering the main expected deviations in the future 4. I don't know that it is always necessary to have a minimally reduced number of scenarios, as long as they are reported/presented in a clear and non-convoluted manner. However, uncertainty analyses can be used to identify the most sensitive parameters of the study and only the most influential of those parameters can be focused on. 5. With the identification of environmental hot spots in the analysed system 6. define a basis scenario and evaluate factors one by one
Affiner / réduire la portée et les objectifs de l'étude (6 réponses)
1. First keep focus on The study goal Identify in each scenario who are the critical actors and the probability that their maturity allow the scenario to have good probability to happen 2. Choose scenarios/stories that are relevant for the goal of the study and the decision-making context. For most technologies, a few main environmental impacts are in focus, so there is no need to include the whole potential list of impacts. 3. Restricting the goal and scope of the study is probably the least complicated way to do this. If that is not possible, then perhaps an expert panel can be used to identify the most plausible future scenarios. 4. Fine-tune the Goal & Scope to identify most relevant scenarios 5. Well conceived goals and scopes 6. by defining specific case studies that do not have the ambition to address all possible outcomes
Faire appel à des experts extérieurs et / ou aux décideurs (6 réponses)
1. Talk to stakeholders, involve them in scenario building workshops based on narratives-development 2. By defining them with experts in the field and economic models 3. The number of scenarios can be reduced through collaboration with decision-makers (at policy, company or research level), evaluation of their preferences and clear definition of objectives 4. Restricting the goal and scope of the study is probably the least complicated way to do this. If that is not possible, then perhaps an expert panel can be used to identify the most plausible future scenarios. 5. Study scenarios that are more realistic than others: technical experts idea is needed Study scenarios that generate the less uncertainty. 6. I guess there is a variability on the suitable number of scenarios that should be investigated. A high number of scenarios is expected to better capture the uncertainty of the future. Ultimately, the risk of taking a wrong decision due to uncertainty is handled by the decision maker, so ideally the decision maker should state his risk tolerance so the number of scenarios can be adapted.
Améliorer la qualité des données utilisées (4 réponses)
1. Getting better databases in order to reduce sensitivity 2. Reducing uncertainty through the modelled system, by improving data quality 3. the more precise the data will be for the future (example: source of the materials, which energies to be used ...), the more little the number of scenarios will be. 4. By obtaining more accurate future trends / By using multi-agent models to reduce the possibilities
Choix arbitraire / subjectif (2 réponses)
1. Decide Maximum number;-) 2. yes, the number of scenarios can be reduced. however, it is not easy to select scenarios without subjective decision.
Autres
Use archetypes? Clever and scientific scenario building. The larger future studies by Shell, Greenpeace, IEA also do not use a lot of different scenarios In terms of the likelihood of their occurrence - less likely outcomes can be omitted By applying other requirements ei : economic or geographical Eliminate those which would most affect environmental and the social sustainability Make a distinction between external factors and internal factors. External factors map megatrends in the world; scenarios like High-Tech, Regional Collaboration, Collapse, etc. And internal factors depend on the sphere of influence of the study commissioner. If it is EU, these are policy scenarios, if it is a business, these are strategy scenarios. with a clear definition of assumptions such as perfect competition

a selection of scenario must be done, with two factors : 1 adequation to the context of the study 2 availability and robustness of the data describing the scenrio

With a mix of experimental design and iterative approach.

Scenarios must be determined considering economical constraints and prospective alternatives. It is not in the hands of LCA researchers to determine them but to judge their scientific robustness and evaluate uncertainties.

Tableau 22 – Comment réduire le nombre de scénarios – résultats du panel ACV

De manière étonnante, sur les 42 propositions une seule propose d'extrapoler des tendances passées. Les techniques proposées restent très proches de celles envisagées en ACV attributionnelles classiques : analyse de sensibilité, min et max, affinage de la portée et des objectifs et qualité des données. Une autre méthode fréquemment citée consiste à s'en remettre aux décideurs ou aux experts en prospective et en économie, ce qui implique que les scénarios prospectifs sont en dehors du champ d'étude de l'expert en ACV.

Lorsque les sondés sont interrogés sur la meilleure façon de construire les scénarios afin de collecter les données d'inventaires, seuls 7,4% pensent qu'il faut réutiliser directement des scénarios existants. Ceci peut impliquer deux éléments :

1. une défiance vis-à-vis des études existantes (confirmée par la Figure 52 qui montre que les études ne sont pas considérées comme suffisamment transparentes) ;
2. une mauvaise adéquation entre les données fournies par les études prospectives et les données nécessaires en ACV (la Figure 49 et la Figure 50 confirment que les données ne sont pas suffisantes).

What, in your view, would be the best way to proceed to build up scenario(s) and select data for LCI modeling when considering mid-long term time horizon (2030+)?

(54 responses)

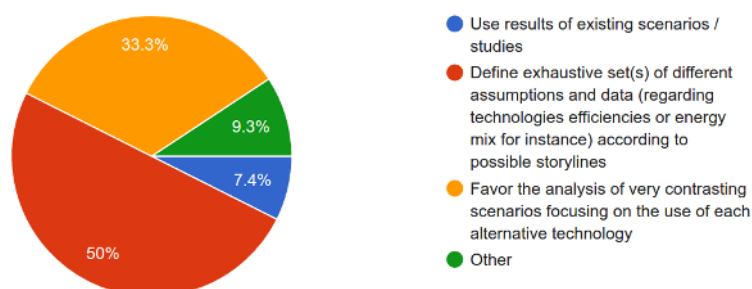


Figure 48 – Comment construire un scénario et choisir des données ? Réponses du panel ACV

4.1.3 Données

Les sections qui suivent regroupent diverses questions relatives aux données en ACV prospective. Il est intéressant de noter ici que le nombre de personnes répondant est supérieur au nombre de personnes ayant déclaré réaliser des ACV prospectives. Cela implique qu'une partie des réponses (entre 10 et 15) sont le fait d'*apriori* plus que de réels constats nés de la pratique.

Une première question permet de mettre en évidence le manque de données pour réaliser des ICV prospectifs. Ainsi, seul 1,9% des sondés considère que le praticien ACV est noyé sous la quantité d'informations et 9,4% considèrent que les données sont suffisantes. De manière générale, le manque de données serait majoritairement lié à des données trop spécifiques à un secteur ou à une politique et ne permettrait pas de réaliser un ICV prospectif de qualité.

When collecting data for prospective LCI modeling regarding energy technologies & supply, do you feel that

(53 responses)

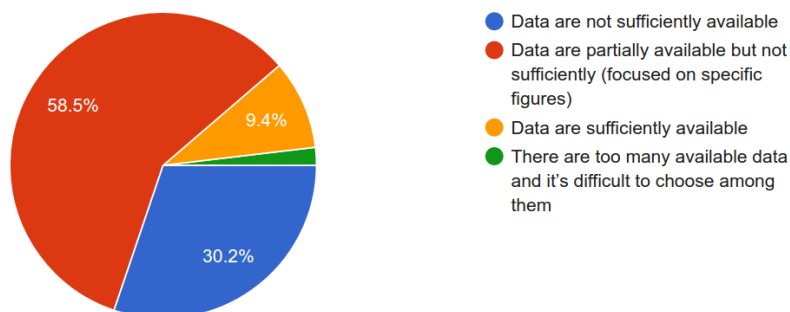


Figure 49 – Données pour la modélisation de l'ICV – réponses du panel ACV

A la question « est-il nécessaire de mixer des sources de données pour réaliser un ICV prospectif prenant en compte technologies et ressources ? », les sondés répondent massivement oui. Seuls 15,4% des sondés pensent qu'il est nécessaire et /ou faisable de n'utiliser qu'une seule source.

When collecting data for prospective LCI modeling regarding energy technologies & supply in the one hand and resource supply in the other hand, would you rather

(52 responses)

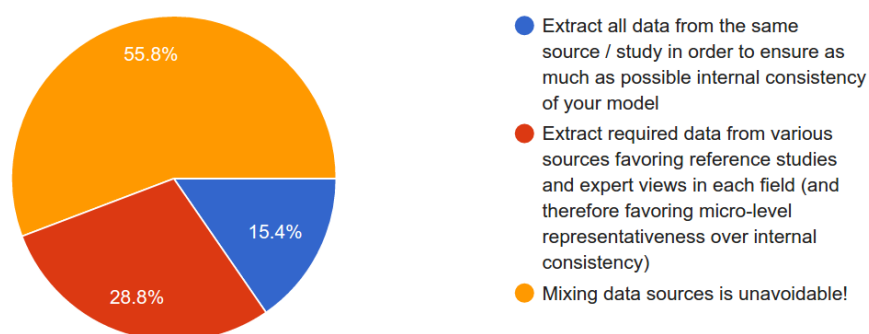


Figure 50 – Faut-il mixer les sources de données pour réaliser l'ICV ? Réponses du panel ACV

Néanmoins, une étude plus fine des commentaires données par les répondants permet de séparer les partisans du mélange des sources en 2 groupes : ceux qui préféreraient utiliser une source unique mais ne peuvent pas par manque de données et ceux qui pensent que mixer différentes sources apporte des informations supplémentaires :

Préférerait avoir une source unique (9 réponses)

1. But preference for single source high credibility data
2. Ideally A) but C) is more realistic
3. Sometimes mixing data sources is unavoidable
4. "Mixing data sources is unavoidable" because of data gaps.
5. Good data from a single source is the best option, but generally not feasible, especially when focusing on new technologies and new materials. Prospective studies could apply two scenarios as: 1) consistent data form the same source, but with a lower technological representativeness; 2) more representative data, from different sources. Successively these results could be compared, in different scenarios.
6. Ideally, the first option. Sometimes the second options is just needed (which is reflected more or less the third option as well).
7. As far as possible, I would use the same "recognized source", but it is true that expert views could add value, and I would use them to fine-tune the first data
8. use the best data available as far as it is consistent methodologically speaking (e.g. do not consider technological development in one country and not in the other)

9. <i>in fact : if I know the system and the data, answer 2 ; if no, answer 1</i>
Considère qu'utiliser plusieurs sources améliore l'étude (5 réponses)
1. <i>Different data sources can even be valuable for validation.</i> 2. <i>cross-checking different data sources is a good way to improve the models used</i> 3. <i>At least, if we want to present a comprehensive picture of the life cycle</i> 4. <i>As far as possible, I would use the same "recognized source", but it is true that expert views could add value, and I would use them to fine-tune the first data</i> 5. <i>in fact : if I know the system and the data, answer 2 ; if no, answer 1</i>
Autres commentaires (2 réponses)
1. <i>Using an exclamation point for one response may be influencing your results to this question.</i> 2. <i>In a consistent data aggregation framework in which economic science and other types of overall systems analysis is used, overall consistency should be relatively easy to achieve. Data should always come from state of the art micro models.</i>

Tableau 23 - Faut-il mixer les sources de données pour réaliser l'ICV ? Réponses détaillées du panel ACV

Les sources les plus utilisées par les chercheurs et praticiens en ACV sont les différents travaux académiques, suivis par les scénarios institutionnels et les publications de l'AIE. Les travaux publiés par les industriels, tels que BP ou Exxon, ne sont utilisés que parfois, voire jamais. Ces résultats montrent une certaine défiance probablement liée à une mise en question de l'objectivité de ces travaux.

Parmi les autres sources possibles, les personnes sondées proposent : Eurostat, des blogs et journaux spécialisés et des brevets.

Which of these publications do you use to extract useful information / data related to future energy or resource supply for your LCI modeling?

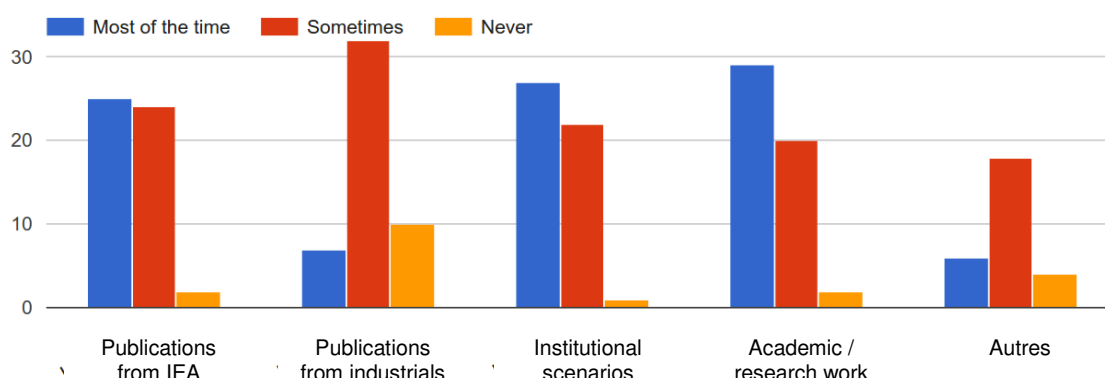


Figure 51 – Sources de données utilisées par les chercheurs et praticiens en ACV

Enfin, une dernière question porte sur la transparence des études prospectives. La grande majorité des sondés s'accorde sur le fait que ces études ne sont pas suffisamment transparentes. Parmi ceux qui ne partagent pas ce point de vue, nombreux sont ceux à indiquer que même si le niveau de transparence est suffisant, leurs compétences ne leur permettent pas d'utiliser les données de manière convaincante.

What is your view about transparency of existing prospective studies that provide useful figures and information for LCI modeling? Do you think that underlying methodologies, assumptions and data

(49 responses)

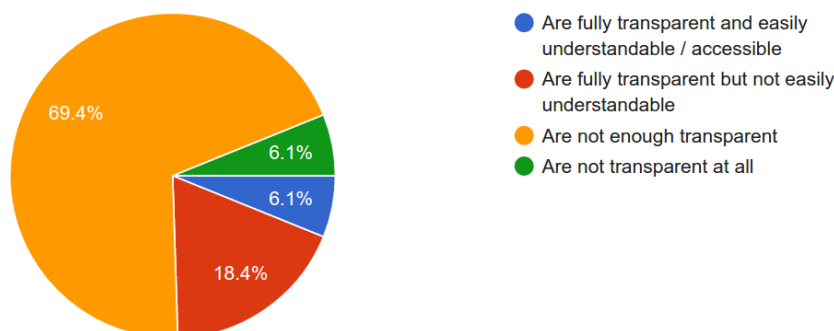


Figure 52 – Transparence des études prospectives – point de vue du panel ACV

4.1.3.1 Incertitudes

En dépit des incertitudes inhérentes à l'ACV prospective, la majeure partie des sondés avoue ne pas effectuer d'analyse de sensibilité globale mais se contente de modifier la valeur de certains paramètres (65,4%).

When conducting LCA in a prospective context, do you perform uncertainty analysis?

(52 responses)

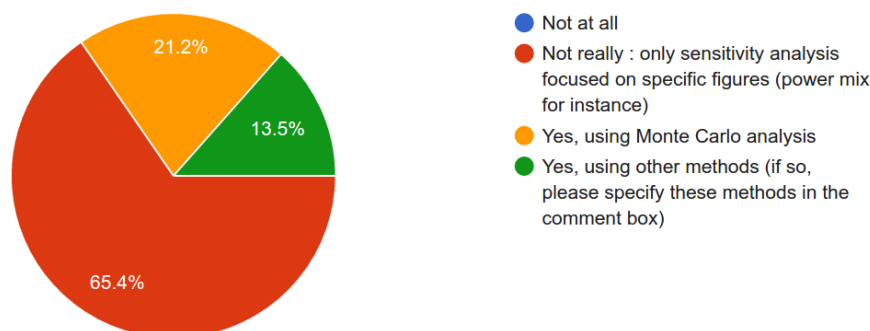


Figure 53 – Analyse d'incertitude et pratiques du panel ACV

De manière générale, les travaux doivent porter d'abord sur la qualité des données et la modélisation de l'inventaire avant de mettre à jour les facteurs de caractérisation. Ainsi, même s'il est évident que certains facteurs sont probablement inadaptés à l'ACV prospective à l'horizon 2030 (en particulier l'épuisement des ressources abiotiques, dont les facteurs sont déjà obsolètes), les sondés reconnaissent majoritairement que ce point faible (seuls 13,7% pensent que les méthodes n'ont pas à être adaptées) n'est pas le principal biais des ACV prospectives. Ce constat est confirmé par l'analyse de la littérature où les facteurs de caractérisation ne sont jamais abordés.

Do you think impact characterization models and factors should be adjusted when conducting LCA in a prospective context (mid-long term time horizon i.e. 2030+)?

(51 responses)

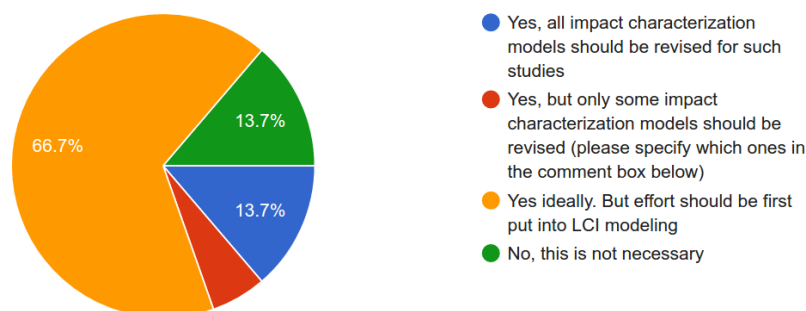


Figure 54 – Est-il nécessaire d'adapter les facteurs de caractérisation dans le cadre d'une ACV prospective ? Réponses du panel ACV

4.1.3.2 Voies d'amélioration

A la question « comment pensez-vous que nous puissions améliorer la fiabilité des résultats des ACV prospectives », les sondés sont nombreux (37 sur 55) à proposer des pistes. Celles-ci peuvent être groupées de la manière suivante :

Inventaires plus disponibles (en particulier de la part des industriels), avec plus de données et de meilleure qualité (11 réponses)

1. developing more reliable LCI.
2. Improving inventories
3. Improving current and future LCI modelling by ameliorating the connectivity of databases.
4. by starting to have a collaborative effort in collecting all data on a gate-to-gate level and to integrate the same dataset for one technology / one material into several different databases & tools
5. It is necessary to build inventories able to adapt to the evolution of technologies (i.e., inventories that take into account, for instance, changes in the efficiency of energy systems). Thus the results of characterization evolve accordingly to technological development
6. The use of reliable data covering all of the system under assessment should be fundamental.
7. with more exhaustive, reliable and transparent LCI databases
8. More data, updated LCIA methods and simplifying the sharing of experts' knowledge.
9. with access to a common database of costs and LCI,
10. Better publicly available data regarding production by industrial sectors (the sort of data usually kept secret by industrial branch associations).
11. With transparency and data sharing between industrial and researchers...

Améliorer la transparence (9 réponses)

1. Improved transparency plus uncertainty analysis on scenarios and results.
2. sensitivity analysis and uncertainty analysis should be presented with results. Limits of the study should be explicit. Results should be presented with humility.
3. More transparency in data and modelling assumption, stronger use of sensitivity analysis
4. Always using uncertainty analysis and always testing the contribution of uncertain inputs (or assumptions) to the output of the model. If all assumptions are transparent and enough meaningful scenarios are considered, the decision-maker would certainly have an easier time using the results of the analysis.
5. with more exhaustive, reliable and transparent LCI databases
6. simplicity, transparency, clear research questions
7. Display clearly all assumptions for each scenario before interpretation, Use uncertainty within interpretation graph to identify the range(s) of relevancy of each scenario
8. By improving the background method with transparency and benefit from expert group panel discussion, not taking only mathematic view.
9. transparency, which is nowadays a problem in most of the studies and publication. It is difficult to replicate any current study

Faire appel à des experts hors ACV et aux décideurs

1. By trying to identify all influencing factors (technical and socio-economic drivers) with experts and stakeholders and modelling them with economic models. It is very important to communicate on the uncertainty of these results with detailed analysis (including sensitivity analysis) to be fully transparent.

2. *Show the study to someone without LCA background but with a good understanding of the topic studied*
3. *As an LCA practioner, I cannot work without sector and technology experts. The LCA world should open up: enable experts to provide their input through consistent interaction and aggregation methods, and provide LCA as an easy to use tool to spark experts' interest.*
4. *More data, updated LCIA methods and simplifying the sharing of experts' knowledge.*
5. *By improving the background method with transparency and benefit from expert group panel discussion, not taking only mathematic view.*

Développer une méthodologie unique pour l'ACV prospective (3 réponses)

1. *A single consistent universally accepted methodology for consequential LCA and stop inventing new terms like Prospective LCA for some contingent to latch their careers/egos onto. The subject is hard enough without gratuitously complicating terminology.*
2. *There needs to be a reference or guidance document in place for this type of LCA. The logic, assumptions and methods of a prospective LCA are not always intuitive or obvious, and this can lead to either a lack of researchers willing to carry out such an LCA or a lack of robust/appropriate prospective LCAs.*
3. *well defined rules*

Humilité et simplicité (3 réponses)

1. *Prospective LCA should be used for what they can bring : highlight potential hotspots and identify the way they can be avoided.*
2. *simplicity, transparency, clear research questions*
3. *By being humble, and test a number of different relevant scenarios that capture the relevant range. "Better to be approximately right than exactly wrong".*

Autres

1. *Consensuating the models among studies.If this is not possible, inclusion of different points of view in the same study.*
2. *Considering time in impact assessment (evaluating over millions of years or treating emissions at significantly different points in time with Equal CF, is meaningless)*
3. *Nothing is impossible!*
4. *Check ex-post that the results were precise enough! Then, adjust the method, data, approaches, etc. Or identify the key issues. From a learning point of view, it would be interesting to have the exercise of past-prospective studies. This means, putting back in the past (e.g. in 2000?) and do a prospective study up to 2016, using data and knowledge of 2000. Then today, check if these estimations would have been realistic.*
5. *By having prospective modules*
6. *By integrating uncertainties in comparative LCA of prospective system analysis. But it becomes tedious as by definition working in the future in always uncertain...*
7. *no answer : it's impossible to predict the future !*
8. *Improving the regional analysis / trying to define energy scenarios*
9. *By merging different models for the considered system.*
10. *Study scenario whose data uncertainty can be mastered or hypothesis can be trusted.*

Tableau 24 - Comment pensez-vous que nous puissions améliorer la fiabilité des résultats des ACV prospectives ? Réponses du panel ACV

4.1.3.3 Utilité de l'ACV prospective

Cette dernière section s'intéresse à l'usage de l'ACV prospective tel qu'il est perçu dans la communauté d'experts en ACV. Ainsi, le premier usage qui ressort est la prise de décision, ce qui implique des points de convergences / confusion entre ACV prospective et ACV conséquentielle. Le second usage majoritaire est le développement de nouveaux produits et de technologies innovantes. Par ailleurs, 3 sondés insistent sur le fait que l'ACV prospective est intéressante mais *ne doit pas* être utilisée pour prendre des décisions stratégiques, du fait des incertitudes trop élevées. Ces réponses signifient qu'implicitement ces sondés pensent que l'ACV prospective n'est pas suffisamment mature. Enfin, nombreux sont les sondés qui ne répondent pas à la question qui était peut-être trop vague.

Politiques / Prise de décision (13 réponses)

1. *Necessary for decision-making for a company or a public institution.*
2. *Decision support in policy making*
3. *If you mean consequential LCA, then the domain is large scale policymaking and planning where the decisions themselves cannot be easily bounded because they significantly perturb the system that is being measured especially over longer timescales*
4. *Most decisions that we make have consequences for the enviroment, now and in the future. I think prospective LCA, especially for early-phase decision support in planning of society, will continue to grow and be Integrated into national planning frameworks and regulations.*
5. *prospective assessment can generate useful information that can be use to support decision making. However, the usefulness of information generated is depended on quality of LCI and potential scenarios.*
6. *LCA studies of this sort show some insight in the future. The results are unavoidably wrong, but can still give valuable information to decision-makers if supported by adequate characterization of uncertainty.*

7. <i>It is one of the elements to give you a more broad / more in-depth picture of such a future technology applications but the decision making can't take this as the only issue (input) for a decision</i> 8. <i>Developp new products/services, Developp new public policy (ei : city planning, energetic mix)</i> 9. <i>Domain of validity highly depends on the study goal. Start with prospective LCA screening and then fine-tune scenario modelling to reach a quality sufficient to support decision making (i.e. No overlapping uncertainties)... It may be challenging though depending on the maturity of the state of play</i> 10. POLICY ORIENTATION 11. <i>Prospective LCA results can be significantly useful in a context of decision-making (at policy or company level). However I think this kind of analysis should not focus only on environmental aspects, but also integrate life-cycle economic and social indicators in order to cover the three dimensions of sustainability in balance</i> 12. <i>Domain: Strategic technology choice. There, I think prospective LCA has an important role to play.</i> 13. <i>The domain of appropriate use would be for big stakes which could disrupt the habits and obviously prevent from reducing pollution.</i>
Pas de réponse générique – cela dépend du contexte et du commanditaire (7 réponses) 1. <i>It really depends on the context of the study. I can't provide a generic answer.</i> 2. <i>Almost all LCAs are to some extent prospective since a residual fraction of material ends up in landfill. The domain of validity is function of the amount of resources and the skill of the personnel (analysts, quality assurance and reviewers) who are working on the problem.</i> 3. <i>This is a tricky question. There are so many assumptions in current prospective modelling, that I am not sure whether one result in one study can be used in others!</i> 4. <i>It completely depends on the goal and scope definition of the study.</i> 5. <i>wide. Assuming that the emissions of the background do not change and will not bias comparisons is a strong assumption</i> 6. <i>It will depend on how the scenarios are define. It is a good question but I have no good answer</i> 7. <i>quite the same as the domain of validity of prospective results !</i>
Développement de nouveaux produits / innovations stratégiques (5 réponses) 1. <i>Prospective studies are a great tool for understanding and studying emerging technologies. Their results should never be used for decision making at the policy or regulatory level, however such results should be used to guide the development of processes, products and technology decisions. Prospective LCAs should also be made synonymous with uncertainty analyses such as Monte Carlo Analysis, in order to not only appropriately carry out the LCA but also so that the assumptions, data and methods of the approach are not taken for-granted (i.e. interpreted out of context, misunderstood, mis-communicated, stretched beyond its validity).</i> 2. <i>Developp new products/services, Developp new public policy (ei : city planning, energetic mix)</i> 3. <i>Very valuable. Prospective LCA is quite uncertain often, but even more structured than other types of scenario studies, which sometimes lack a quantitative base, or fail to integrate quantitative projections in a consistent framework. However, LCA should improve to integrate macroeconomic projections, since micro level innovations only have real consequences through innovation diffusion and second order macroeconomic effects. At LEI Wageningen UR, we are starting to make this combination, but it is a very early and hesitant start with many uncertainties.</i> 4. <i>It depends on the types of assessed system, but new technologies (i.e. not yet produced outside of the lab) and systems with long lifetimes (e.g. buildings, cities, etc.) will need prospective LCA studies. Uncertainty assessment is probably the key to find the domain of validity.</i> 5. <i>Could be used to compare 2 solutions together, but difficult to use and interpret as such</i>
Ne pas utiliser les ACV prospectives pour accompagner la prise de décision (3 réponses) 1. <i>Prospective studies are a great tool for understanding and studying emerging technologies. Their results should never be used for decision making at the policy or regulatory level, however such results should be used to guide the development of processes, products and technology decisions. Prospective LCAs should also be made synonymous with uncertainty analyses such as Monte Carlo Analysis, in order to not only appropriately carry out the LCA but also so that the assumptions, data and methods of the approach are not taken for-granted (i.e. interpreted out of context, misunderstood, mis-communicated, stretched beyond its validity).</i> 2. <i>LCA is already affected by several uncertainties, which undermine the results and hinder the reliability of the methodology itself. For the moment, adding new level of uncertainties would undermine more LCA in the opinion of e.g. policy makers and industries. Prospective LCA should be first further investigated theoretically, before being stably used in practical applications.</i> 3. <i>Thinking about decision making in politics, I am not very optimistic, if the results do not also transmit economic advantages. In my opinion, this is also valid for corporate decision making in most emerging and developing countries, if not in some of the developed countries.</i>
Identifier les hotspots – pour et contre (2 réponses) 1. <i>Similarly to economic studies, providing tendency for different scenarios and/or detect hotspots scenarios</i> 2. <i>It can be a useful tool to give an idea of different trends and give pros and cons of different scenarios compared to each other</i>
Autres <i>Results should be taken with caution and defining clearly the economic and social situation for which the study was develop. Economic and social changes can have dramatic environmental impacts, therefore, several escenarios for potential economic and social changes should be considered.</i> <i>They should be coupled with economic - feasibility analyses</i> <i>Dataset shall be parametrise with key socio economic data so that it can be regularly updated for various timeframe</i>

*Models and results should be fully transparent, and the study should discuss its validity and potential further use
I would say a prospective LCA can be valid over mid term horizons (15 to 20 years), unless specific innovative or truly disruptive technologies are available within that time range.*

Tableau 25 – Quels usages pour l'ACV prospective ? Résultats du panel ACV

4.2 Panel 2 – Experts prospective

4.2.1 Interactions praticiens ACV - prospectivistes

Les répondants du panel des experts en prospective sont au nombre d'une douzaine.

Leurs réponses aux premières questions de l'enquête témoignent d'une bonne connaissance du domaine ACV dans ce panel et d'interactions existantes entre praticiens ACV et prospectivistes. En effet, près de 92% des répondants déclarent avoir a minima des connaissances basiques sur l'ACV et plus de 80% d'entre eux disent avoir déjà collaboré avec des praticiens ACV. Notons qu'une proportion plus faible d'entre eux (67%) est au fait de l'usage des résultats d'études prospectives en ACV.

Attention toutefois à ne pas généraliser ces premiers constats. Compte tenu de la diffusion large du questionnaire auprès d'experts en prospective et du nombre de répondants relativement faible, il y a effectivement fort à parier que les répondants sont ceux qui se sont sentis le plus concernés par l'enquête, car déjà familiarisés à l'ACV. La majorité des experts consultés a probablement été freinée par l'intitulé du questionnaire, du fait de leur méconnaissance en matière d'ACV.

Do you know LCA? (12 responses)

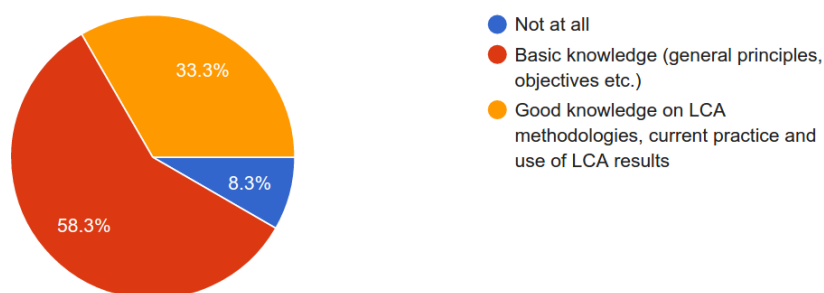


Figure 55 – Connaissez-vous l'ACV ? Réponses du panel des experts en prospective

Have you ever collaborated with LCA practitioners ? (12 responses)

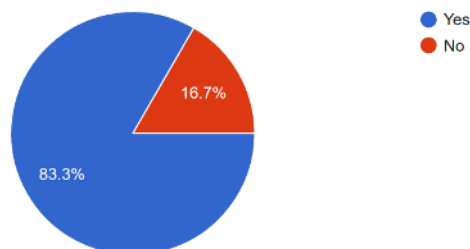


Figure 56 – Avez-vous déjà collaboré avec des praticiens ACV ? Réponses du panel des experts en prospective

Do you know that results from prospective system analysis are sometimes used to carry out Life Cycle Assessment?

(12 responses)

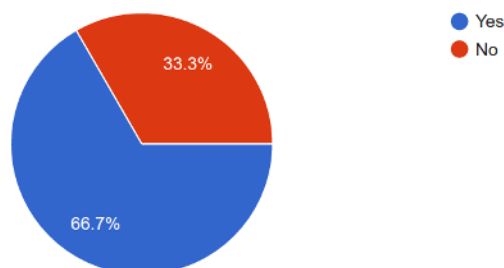


Figure 57 – Connaissances des usages de résultats d'études prospectives en ACV : réponses du panel des experts en prospective

4.2.2 Objet des études prospectives : sujet et horizons temporels

Les travaux réalisés par le panel d'experts portent essentiellement sur l'énergie et les ressources énergétiques (respectivement 83% et 75% des répondants ont traité ces problématiques). Peu d'entre eux ont en revanche mené des études sur les autres ressources (25%).

Les principaux horizons temporels retenus dans ces travaux sont le plus souvent 2050 (plus de 90%) et 2030 (64%). L'horizon de plus court terme (2020) est toutefois parfois retenu (27% des répondants) et celui de très long terme également (2100 : 36%). On peut supposer que ce dernier cas de figure correspond à des travaux portant sur les interactions énergie-climat et l'impact climatique long terme.

Which time horizons have you considered in your work / analysis ?

(11 responses)

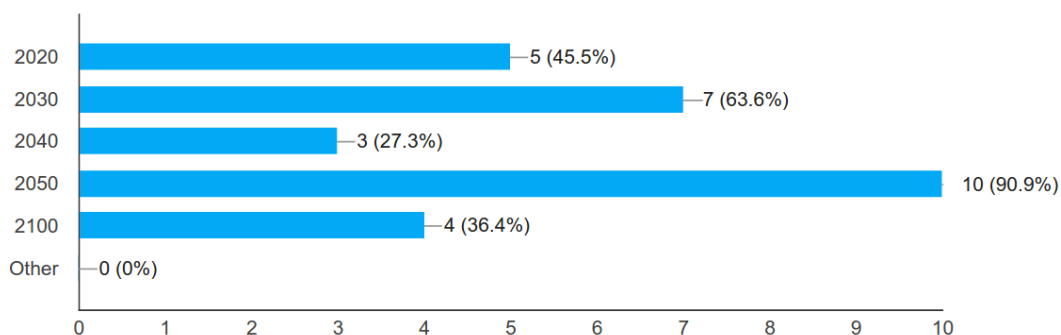


Figure 58 – Horizons temporels considérés dans les études : réponses du panel des experts en prospective

Do your current or previous work provide outcomes regarding

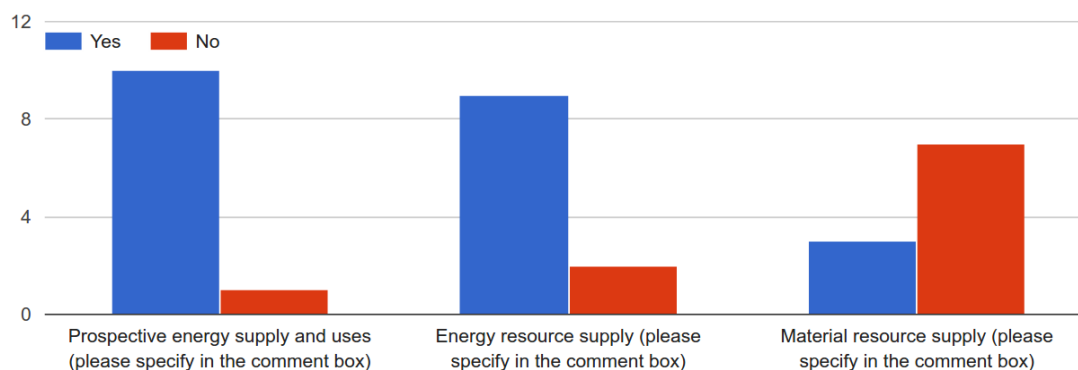


Figure 59 – Champs des études prospectives : réponses du panel des experts en prospective

Commentaires
<i>I use prospective tools to evaluate the environmental viability of different development pathways of technology. The goal is also to provide environmental insight parallel to development stages rather than waiting for a mature product.</i> <i>Efficiency - Lifestyle - Behaviours - Biomass -</i> <i>About Energy: Papers and book on Marien renewable energies (2009); on deep sea minerals, papers and book (2011)</i> <i>Economy wide prospective analysis (I created the LIGHTEnUP Tool with DOE's AMO). I have also done prospective techno-economic analysis of bioenergy pathways. I have also worked on prospective carbon fiber reinforced composites net energy forecasts.</i>

4.2.3 Usage des modèles

La grande majorité des experts du panel ont recours à des modèles pour développer leurs analyses et scénarios (un seul répondant déclare ne pas utiliser de modèle).

On constate une certaine diversité dans le type de modèles utilisés : modèles de simulation (60% des répondants), modèles d'équilibre partiel (50%), modèles d'équilibre général (30%), modèles d'évaluation intégrée (20%). Trois experts mentionnent utiliser d'autres outils qui - on peut le supposer à la lecture des commentaires - relèvent en partie de méthodes moins formelles et non de modèles à proprement parler (méthodes de création et d'explicitation de connaissances pour la production de scénarios telles que la méthode Delphi). Par ailleurs, compte tenu du nombre de répondants à cette question, on peut noter que certains experts font usage de plusieurs types de modèles.

Enfin, près de 60% des répondants ont déjà participé à des exercices multi-modèles, consistant soit à utiliser en parallèle différents modèles (50% du panel) - pour in fine probablement en comparer les résultats (exemple des travaux de l'Energy Modelling Forum / EMF) - soit à utiliser de façon complémentaire différents modèles pour traiter une problématique donnée.

Do you use any kind of models to build your prospective analysis / scenarios?
(12 responses)

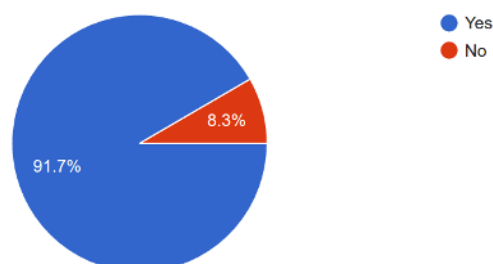
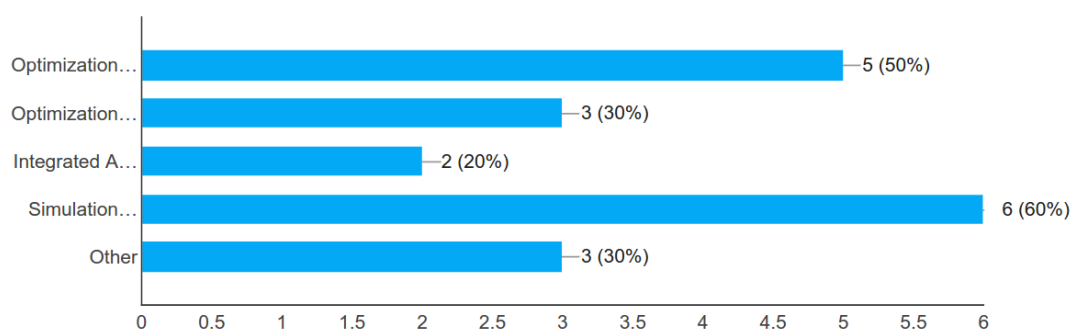


Figure 60 – Usages des modèles : réponses du panel des experts en prospective

Commentaires
<i>Thermodynamic/stoichiometric limits, technology learning curves</i>
<i>Integrated Assessment Models</i>
<i>Numerous different models: scenarios method, DEGEST; Metaplan; Delphi...</i>
<i>TIMES</i>
<i>I created the LIGHTEnUP Tool (economy wide prospective LCA) for DOE's AMO.</i>

If yes, what type of models do you use? (10 responses)



(légende coupée : optimization models : partial equilibrium models, optimization models :computable general equilibrium models, integrated assessment methods, simulation models, other)

Figure 61 – Types de modèles utilisés : réponses du panel des experts en prospective

Have you ever been involved in a multi-model analysis (joint analysis gathering several modeling teams using different kinds of models)?

(12 responses)

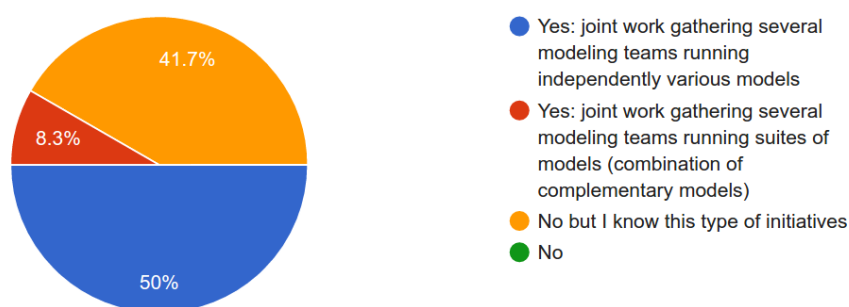


Figure 62 – Avez-vous déjà participé à des analyses multi-modèles ? Réponses du panel des experts en prospective

4.2.4 Données et incertitudes

Selon les répondants, la question de l'élaboration de la base de données est bien essentielle. Les revues de littérature et le recours aux projections d'experts sont fréquemment utilisés. Les experts ont conscience de la « fragilité » de ces projections, et à un degré supérieur, lorsqu'il s'agit de données manquantes qu'il faut néanmoins renseigner.

Cette problématique se rapproche donc de celle de l'incertitude, pour la plupart des répondants ont recours à des traitement allant de l'analyse de sensibilité à la programmation stochastique, en passant par les méthodes de Monte-Carlo.

Conducting prospective system analysis always require data choices relative to future efficiencies and costs of technologies. According to you, how the evolution of such values should be appraised?

(11 responses)

Commentaires

Important to perform a sensitivity analysis and later assess whether these boundaries are feasible or not. This way, it is possible to gather a set of constraints or conditions for a certain outcome to occur, rather than trying to predict. Analyzing sectoral reports or obtaining them from economic and energetic integrated modeling tools (TIMES, MARKAL, LEAP, etc.)

Accounting for uncertainty

Through the discussions of different communities, not only with engineers and "technicians", including other topics (energy policy inc.)

Long term decarbonization of economy

We use common data bases for future evolution of costs and efficiencies of key energy technologies and then two factor learning curves

Scenario modeling - important to have a model where uncertainty can be estimated properly - keep in mind that it is not going to give you an exact forecast of the future, it only gives you more perspectives on what the future could be than a non-prospective analysis.

Expert based evaluation + disruptive scenarios

By putting a lot of uncertainty on those variables

Literature

Transparent, clearly defined, assumptions (in reports or journal papers)

When conducting long term prospective analysis, there is no situation for which all needed input data are available. According to you, how do you think one can fill in the gaps in input data? Moreover, if models are used, how the analyst should specify what happens at the model coverage limits / boundaries?

(10 responses)

Commentaires

It depends on crossing with qualitative datas which are not measurable! (opinion surveys for example)

Some data gaps can be filled using existing studies of prospective usually available for bigger scale (national scale if you are doing a regional scale analysis or European scale perspectives if you are doing a national scale analysis, etc.) and scaling down using the proportionalities of the most relevant factors between both scales.

Transparency to document assumptions and limits; explicitly incorporating uncertainty

I recommend to use stochastic methods

Thru trends and rupture analysis

uncertainty - sensitivity analysis

Choose a value and then do sensitivity analysis. If the value is very sensitive refine it. It should be really clear that when boundaries are reached the model is "useless", maybe make it infeasible or impossible to run

Gaps can be filled by considering variables as highly uncertain and investigating whether or not the value of these variables have an impact on the decisions to be made

Targeted sensitivity if too many independent uncertainties

This is the fundamental question. In my work, I start with assuming the world does not change (BAU), then carefully specify the range of possible outcomes. For the CGE, Optimizations, etc. sensitivity analysis is essential.

Do you usually perform uncertainty analysis when conducting prospective system analysis?

(12 responses)

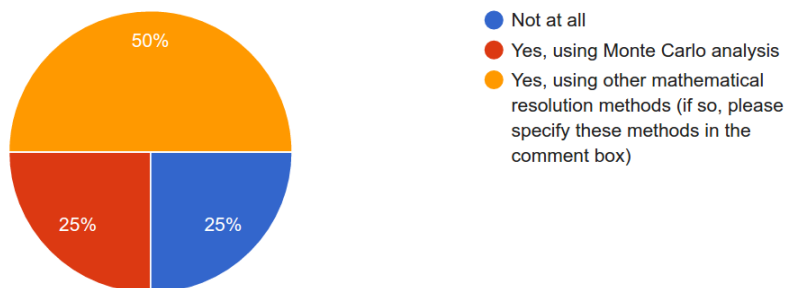


Figure 63 – Réalisez-vous des analyses d'incertitudes ? Réponses du panel des experts en prospective

Commentaires

*Morris method, scenario discovery methods
Monte Carlo, multi scenarios, robust optimization
I use methods such as robust decision making, decision scaling or adaptation pathways -- i.e. methods that do not attribute probabilities to the values of the uncertain parameters.
manually adjusting each variable and analysing the range of results. And sometime monte carlo analysis (although the results often simply report our assumptions about variable probability distributions.*

4.2.5 Voies d'amélioration et recommandations d'usage

Dans ce domaine, le constat global porte sur un manque de transparence des modèles et données utilisés pour produire les scénarios ; les améliorations dans ce domaine semblent à la fois importantes et possibles pour les répondants. La qualité des travaux serait ainsi améliorée. Enfin, un consensus global émerge autour d'une lecture nécessairement qualitative des résultats quantitatifs produits.

Do you think existing prospective studies are transparent enough regarding



Figure 64 – Pensez-vous que les études existantes soient suffisamment transparentes ? Réponses du panel des experts en prospective

Commentaires

Very difficult questions. It requires a lot of time to really understand what a model is. It is not only a question of information (but also practice).

*This is clearly a huge weakness of current models, they are huge black box
I try to make mine transparent. But I often find it difficult to find documentation of other peoples models.*

Do you think it is feasible and valuable to increase transparency of prospective studies?

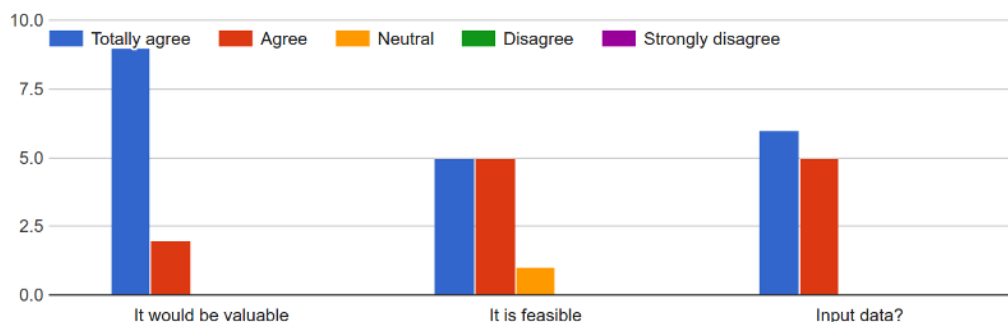


Figure 65 – Pensez-vous qu'il soit faisable et souhaitable d'augmenter la transparence des études prospectives ? Réponses du panel des experts en prospective

According to you, what should be the nature of prospective analysis results?

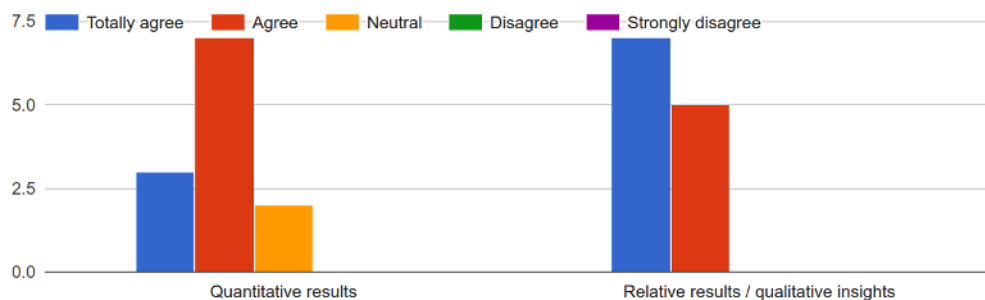


Figure 66 – Qualification de la nature des résultats / enseignements délivrés par les études prospectives : réponses du panel des experts en prospective

How do you think we can improve the reliability of the results of prospective systems analysis?

(10 responses)

Commentaires

*sensitivity and uncertainty analysis and to be very clear on the modelling choices and how these may influence results
By sharing with stake-holders at the beginning, in the middle and at the end of the process. Need more explanations because prospective is a complex discipline and we have to teach it whatever level people are (even high leaders!).
With a good calibration work in the model (it could be considered a validation of the model)
account for uncertainty, and report robust results, or determining factors of results
Through benchmarking and external evaluation
Yes, by using more experts, not only in OECD countries but all over the world
involve stakeholders in building the models
What do you mean by reliability of the results?
By focusing on the decisions to be made thanks to the analysis instead of focusing on the "correct" future value of some parameters (or the probability of their value
keep doing them !*

How would you briefly define the domain of validity (appropriate use) of prospective analysis results? To what extent do you think such results can be used in further frameworks / studies, in particular to support decision making at various scales?

(10 responses)

Commentaires

We have to focus on strategies immediately, without waiting for the achievement of prospective's exercise. Step by step is the right way.

It should be used to provide criteria (with some quantitative values for the tendencies) to decision makers at different scales. Global, European, National and regional. In the case of city scale analysis the data needed for the definition of models for the prospective are not reliable enough for decision making under uncertainty

Very difficult question. Prospective can be used to help to understand which technologies may be used and where, and principally when. They can use to organize roadmaps over time

The domain of validity is defined by time horizon, territorial limits and the scope of the issue. Prospective analysis have to be regularly assessed in order to check the recommendations and/or conclusions and the reality. This benchmarking should be part of the process, 10; 15, 20 years after publication.

Energy and climate policies for example - Very important for decision making - global scale but possibly also local scale

Inform the DM. I think the range of validity of prospective exercise results is really narrow and can accompany a more profound and global decision-making exercise but as it can not integrate fairness and moral issues or questions linked to choices of society, it can not be used alone for policy making. "Industrial" prospective scope is certainly less limited, and its use for long term planning could be central as it forces to bring together future industrial visions of the various entities of the company.

These studies should inform decision making by highlighting the vulnerabilities of different strategies instead of trying to find the best strategy in the most likely future. Doing so would help decision making in many different contexts and scales.

*Identifying limits of conventional thinking
the sky is the limit.*

5 Méthodologie

Cette section présente la méthodologie développée au terme de cette étude pour guider les praticiens ACV dans la réalisation d'évaluations prospectives.

Précisons tout d'abord que la finalité de l'approche proposée n'est pas de préconiser, au gré des questions et besoins, un ou plusieurs jeux de données tirés de la littérature ; littérature si vaste qu'il est impossible de recenser de façon exhaustive les valeurs ou même les références associées. L'objet est ici plutôt d'aider l'utilisateur à préciser son besoin puis à comprendre, caractériser et comparer les données disponibles afin de développer une analyse critique et in fine argumenter au mieux son choix de données prospectives lors de la phase d'inventaire de cycle de vie. Compte tenu de la complexité inhérente à l'étude de systèmes socio-économiques futurs (systèmes multi-problèmes, multi-dimensionnels et multi-échelles), de leur « non-prédictabilité », de l'abondance croissante de scénarios sur l'énergie et les ressources, de la diversité des méthodes sous-jacentes et de la disparité des résultats qui en découlent, réduire a priori la base bibliographique en recommandant un nombre restreint de jeux de données prospectives ne peut faire sens. La sélection d'un sous ensemble de scénarios ne peut se faire qu'au cas par cas, au regard de la question posée et des contextes et objectifs propres à l'étude ACV. La méthodologie exposée dans les paragraphes suivants constitue un cadre pratique visant à supporter un chargé d'étude ACV dans ce travail d'analyse et de tri de l'information disponible.

La démarche proposée se présente sous la forme d'une série de questions suivie d'un arbre décisionnel. Elle se base sur les éléments suivants :

- Les normes ISO 14040-44 d'un point de vue structurel. La méthode suit un déroulement en trois étapes : 1. Définition des objectifs et de la portée de l'étude ; 2. Inventaire de cycle de vie ; 3. Interprétation. Notons que nous ne nous attacherons pas à passer en revue tous les éléments constitutifs de chaque étape au sens ISO 14040-44. Le champ des questions et recommandations est borné aux points de vigilance et spécificités liés à la dimension prospective de l'étude ACV.
- Les typologies de scénarios prospectifs et d'ACV prospectives présentées respectivement en sections 2.1.4.3 et 3 ;
- L'enquête effectuée auprès des praticiens de l'ACV et de la prospective (cf. section 4).

Chaque étape de la méthodologie est, dans la mesure du possible, illustrée par des cas concrets tirés des deux cas d'études didactiques présentés lors de la réunion intermédiaire du 16/09/16. Les intitulés de ces cas d'études sont les suivants :

- ACV d'un véhicule électrique de segment B commercialisé en France en 2030, dans une hypothèse *business as usual* ;
- ACV de la flotte de véhicules particuliers en Europe entre 2016 et 2050.

5.1 Objectifs et cadre de l'étude



L'ensemble des étapes ci-dessous **doivent** être renseignées par le praticien afin d'assurer la transparence nécessaire à l'interprétation des résultats obtenus. A défaut, lorsque le praticien ne sait pas répondre à une question, il doit à minima préciser qu'il n'a pas les compétences ou le temps nécessaire pour traiter cette question et que cela sera pris en compte dans l'interprétation.

5.1.1 Objectifs

Comme pour toute étude ACV, les objectifs et le contexte de l'étude doivent être clairement définis à cette étape.

À quelle typologie d'objectifs l'étude répond-elle ?

- (a) ACV d'un produit ou d'une gamme de produits existant à un horizon temporel éloigné ; par ex. ACV des véhicules produits par un constructeur en 2030 ;
- (b) ACV d'un produit extrapolé du laboratoire au déploiement commercial ; par ex. ACV d'une nouvelle technologie de batterie développée en laboratoire ;
- (c) ACV d'un secteur entier (par ex. transport, énergie) dans un contexte prospectif ; par ex. ACV de la mobilité de passagers en France à 2050 ;

Dans quel contexte l'étude s'inscrit-elle ? Le décideur / commanditaire et le praticien de l'ACV sont-ils la même personne ? Le décideur souhaite-t-il restreindre le champ à un ou plusieurs scénarios tendanciels ou souhaite-t-il voir étudier des scénarios intégrant des déviations ou ruptures par rapport aux tendances passées (si oui, les identifier au préalable) ?

Le contexte d'étude est-il marqué par un parti pris explicite ou sous-jacent (choix politique ou stratégique voire idéologique) ? Cherche-t-on à calculer le moyen d'atteindre un objectif prédéfini ou explore-t-on le domaine des possibles ? Dans le cas de ruptures et déviations, quels sont les drivers qui les génèrent (par ex. politiques climatique / technologique / industrielle, évolutions de comportements drastiques, etc.) ?

Cette étape doit être définie de la manière la plus transparente possible car elle conditionne la collecte des données ainsi que la validité et l'interprétation des résultats obtenus.

Exemples d'objectifs :

- ACV du véhicule électrique en 2030, dans une hypothèse *business as usual*, sans rupture majeure. Etude réalisée en interne chez un constructeur automobile et ayant pour finalité de supporter une stratégie interne (éventuels changements des lignes de production).
- ACV des transports de passagers en Europe à l'horizon 2050, dans une hypothèse de diminution des émissions de GES permettant de limiter le réchauffement climatique à 2°C. Etude réalisée à la demande des pouvoirs publics européens par un consortium pluridisciplinaire d'équipes académiques européennes avec pour finalité d'éclairer le choix de politiques de transport.
- ACV du véhicule particulier en 2040, dans une optique d'imaginer l'ensemble des évolutions possibles et des ruptures technologiques (nouvelles batteries, nouveaux modes de propulsion, etc.), politiques (interdiction d'un type de propulsion, taxation/incitation sur un type d'énergie particulier, etc.) et comportementaux (développement de l'autopartage, rejet d'un mode de propulsion). Etude

commanditée par un consortium de constructeurs automobiles et réalisée par une équipe de consultants en ACV.

5.1.2 Nature des changements

La question porte-t-elle sur une décision ou un changement ? Si oui, le changement est-il interne ou s'étend-il au-delà du système étudié ?

Lorsque le changement s'étend en dehors du système étudié, l'ACV n'est plus simplement prospective mais demande de recourir à des méthodes propres à l'ACV conséquentielle (cf. section 3.4).

Exemples :

- ACV du véhicule électrique en 2030, dans une hypothèse *business as usual*, sans rupture majeure → l'ACV est prospective (paramètres évoluant entre maintenant et 2030) mais non conséquentielle car on ne souhaite pas intégrer et étudier dans ce cadre les changements éventuels dans les autres systèmes (par ex. évolution du mix électrique)
- ACV des transports en Europe à l'horizon 2050, dans une hypothèse de diminution des émissions de GES permettant de limiter le réchauffement climatique à 2°C → L'étude peut être conséquentielle si l'on considère que le développement de certaines technologies de véhicules (électriques, hydrogène) influe sur le mix énergétique ou uniquement prospective si les mix énergétiques retenus ne dépendent pas des hypothèses sur les transports.

5.1.3 Horizon temporel de l'étude

Cette étape précise l'horizon temporel de l'étude. On peut regrouper trois catégories : court, moyen et long terme. Ces trois niveaux se définissent plus par le degré de visibilité et d'incertitude sur les données relatives au(x) secteur(s) que par un horizon temporel dans l'absolu. Ainsi, on peut proposer les trois définitions suivantes :

- Court-terme : les caractéristiques du système peuvent facilement être connues, par une extrapolation des données existantes. Les politiques ayant un impact sur le système sont connues ;
- Long terme : les données sont très incertaines et l'extrapolation n'est pas directe. Le système risque de subir des ruptures technologiques ou des changements radicaux de comportements. Les orientations futures (politiques économique / industrielle / fiscale / énergétique etc.) sont vagues ou inconnues ;
- Moyen terme : entre le court terme et le long terme.

L'appartenance à l'une des définitions précédentes dépend :

- des caractéristiques du secteur : durée de vie des équipements et des infrastructures sous-jacentes (bâtiment : plusieurs dizaines d'années, voiture : 15 ans environ, infrastructure de réseau électrique : en place pour une durée indéterminée, centrale nucléaire : 60 ans, téléphone : 1-3 ans etc.), dynamique de la demande (parc automobile stable, demande en équipements électroniques croissante, etc.), progrès technologique (lent pour l'électricité, rapide pour l'électronique), niveau de dépendance aux politiques et normes ;
- du niveau de certitude lié à la visibilité sur les politiques.

Exemples :

- ACV du véhicule électrique en 2020 : court terme ;
- ACV du véhicule électrique en 2030 : moyen terme ;
- ACV des transports en Europe à l'horizon 2050 : long terme ;
- ACV du téléphone moyen en 2019 : court terme ;
- ACV du téléphone moyen en 2030 : long terme ;

- ACV de l'électricité nucléaire en 2030 : court terme.

5.1.4 Produit et système de produits

Cette étape permet de préciser la nature et le volume de données à obtenir. En effet, dans le cas où un seul produit/service est étudié, les données prospectives à obtenir seront principalement de nature technique. Dans le cas où le système étudié regroupe un ensemble de produits ayant des caractéristiques différentes mais répondant à un besoin défini et soumis à différentes contraintes, le périmètre étudié sera plus large et des données économiques et politiques, relatives à la répartition des différents produits, devront être étudiées.

Exemples :

- ACV d'un véhicule électrique à l'horizon 2030 : produit simple, seule des données techniques sont nécessaires.
- ACV des transports en Europe en 2050 : le système étudié regroupe différents modes de transport : véhicules thermiques, véhicules électriques, bus, métro, etc. Par conséquent, des données supplémentaires sont nécessaires pour notamment établir les parts de marché prospectives de ces différents produits (par exemple : données macroéconomiques pour établir la demande de mobilité à l'horizon souhaité, coûts relatifs des technologies et variantes, politiques d'incitation visant tout ou partie des nouvelles technologies, prix des énergies etc.)

5.1.5 Unité fonctionnelle

Dans cette étape se pose la question de la validité de l'unité fonctionnelle (UF) dans le temps. En effet, les usages d'un produit sont susceptibles d'évoluer, d'autant plus que l'horizon temporel de l'étude est éloigné. La pertinence de l'UF doit donc être vérifiée. Pour une étude à long terme, l'UF peut être scénarisée, c.-à-d. que plusieurs UF peuvent être définies en fonction de différents scénarios.

En outre l'UF doit préciser si l'ACV est de type « photographie » à un horizon temporel donné ou si son objet d'étude est une évolution entre maintenant et un horizon temporel donné (trajectoire).

Exemples :

- ACV d'un véhicule électrique à l'horizon 2030 : l'UF classique (150 000 km parcouru sur 10 ans) est probablement amenée à être peu modifiée à cette échéance ;
- ACV des transports en Europe en 2050 : le développement du télétravail, l'interdiction de certains véhicules dans les centres-villes, les changements comportementaux (moins ou plus de déplacements), etc., sont susceptibles de modifier l'UF de l'étude. Différentes UF peuvent être définies pour correspondre à plusieurs scénarios de demande de mobilité.

5.1.6 Périmètre de l'étude / premier et arrière-plan

Le périmètre de l'étude permet de discerner les données dites de « premier plan », pour lesquelles le praticien doit chercher des données, des données d'arrière-plan pour lesquelles le praticien a recours à des données existantes (bases de données telles qu'ecoinvent ou GaBi). Dans une approche prospective, il faut aussi tenir compte des étapes susceptibles de varier dans le temps et pour lesquelles des données prospectives sont nécessaires. Ces données sont liées à l'horizon temporel et à la dynamique du secteur. Ainsi, des données prospectives seront nécessaires lorsque la dynamique du système implique des changements à l'horizon temporel donné.

En outre, des données prospectives peuvent aussi s'avérer nécessaires lorsque la dynamique des systèmes d'arrière-plan est plus rapide que celle du système principal.

Exemple :

- ACV d'un bâtiment sur l'ensemble de sa durée de vie. Le système de premier plan possède une dynamique faible mais les données d'arrière-plan concernant l'électricité utilisée doivent être modélisées de manière prospective car leur dynamique est plus rapide que celle du premier plan.

5.1.7 Choix des impacts environnementaux pour la caractérisation

Le choix des impacts environnementaux peut être influencé par la nature prospective de l'étude. En effet, certains impacts peuvent voir leur pertinence diminuer lorsque l'horizon temporel est lointain. Il s'agit en particulier :

- des impacts basés sur un modèle de rareté : CML2001 Abiotic Depletion Potential, Water scarcity ;
- des impacts basés sur des modèles économiques : ReCiPe resources, externalités
- des impacts basés sur des dommages : méthodes endpoints
- des impacts normalisés : européen équivalent

5.1.8 Validité des méthodes d'allocation

Les méthodes et facteurs d'allocation des coproduits employées peuvent s'avérer obsolètes. Deux situations sont possibles :

- Coproduit traité comme un déchet à t initial et devenant un produit ayant une valeur économique à l'horizon temporel envisagé ;
- Allocations économiques valables uniquement à t initial.

Exemples :

- ACV d'ampoules LED → se pose la question de l'allocation des impacts au gallium (sous-produit de l'aluminium lors du raffinage de la bauxite en alumine) intervenant dans la fabrication des LED, Les perspectives de croissance de la demande en Ga a en effet conduit à une très forte augmentation des capacités entre 2005 et 2015 (>20%/an), à un taux de croissance qui est même supérieur à celui de la demande.
- ACV de véhicules électriques ou d'éoliennes → se pose notamment la question de l'allocation des impacts du néodyme (appartenant à la famille des Terres Rares et coproduit des autres Terres-Rares, elles-mêmes partiellement un sous-produit du fer) intervenant dans la fabrication de génératrices et moteurs électriques. Une forte croissance de la consommation de cette ressource est en effet attendue (+7%/an), tirée par la demande d'appareils utilisant des aimants permanents Nd-Fe-B.

5.2 Inventaire de cycle de vie

La méthodologie proposée pour la réalisation de l'inventaire de cycle de vie prospectif suit un arbre décisionnel en 3 étapes et 6 questions, présenté sur la figure en page suivante. Les différentes sections qui suivent visent à expliciter les différentes étapes de l'arbre.

5.2.1 Etape 1 : Identification des paramètres à projeter à l'horizon temporel considéré



Cette étape constitue une recommandation pour sélectionner les paramètres prospectifs à étudier. Le praticien est évidemment libre de choisir les paramètres qu'il retient mais l'étape ci-dessous permet de les justifier plutôt que d'effectuer un choix arbitraire qui pourrait être remis en question par de potentiels détracteurs de l'étude.

Deux méthodes sont proposées pour identifier les paramètres à projeter :

- Réaliser une première ACV attributionnelle à t initial et identifier les hotspots (« points chauds » correspondant aux contributions majoritaires dans les impacts évalués) pour chacun des impacts retenus. Si ces hotspots correspondent à des paramètres susceptibles de varier

à l'horizon considéré (cf. §5.1.6), retenir un sous-ensemble *E1* de paramètres sensibles *p* à faire varier.

- Si des scénarios non tendanciels doivent être étudiés, identifier les ruptures et déviations possibles et élargir la recherche de données à des paramètres supplémentaires (non compris dans *E1*).

Exemples :

- Cas d'étude 1 (véhicule électrique 2030) : parmi les hotspots → production de la batterie, mix électrique utilisé, production de l'acier de la caisse, consommation du véhicule, etc. Hotspots susceptibles de varier (E1) : technologie de batterie, mix électrique, consommation unitaire du véhicule ; E2 (scénarios non tendanciels) : émergence d'une nouvelle technologie de batterie (par exemple lithium air).
- Cas d'étude 2 (flotte de véhicules entre 2016 et 2050) : parmi les hotspots → parts de marché des différents véhicules (technologies et gammes), kilométrage durant la phase d'utilisation et durée de vie, consommations unitaires des véhicules / progrès technique, quantités de matériaux intervenant dans la fabrication des véhicules (hypothèses sur « allègement des véhicules ») etc. E2 : changement d'approvisionnement des matières premières et/ou mix électriques pour la production des composants des véhicules

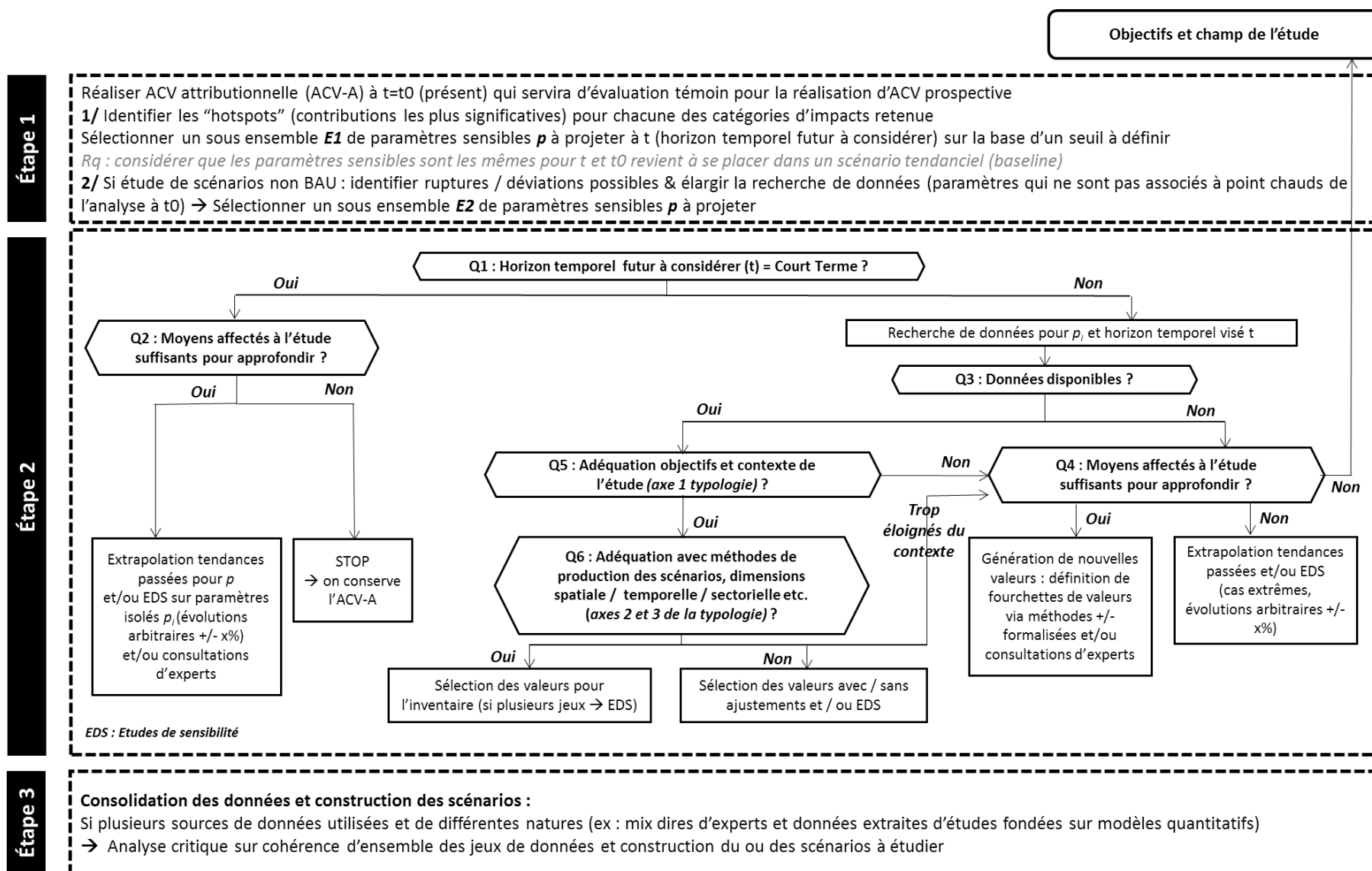


Figure 67 - Arbre décisionnel pour l'élaboration d'ICV prospectifs

5.2.2 Etape 2 : choix des données



Au même titre que l'étape précédente, l'arbre méthodologique proposé est constitué de recommandations que le praticien est libre de suivre pour faciliter la construction de son ACV prospective. L'utilisation de la démarche proposée ici permet d'identifier et caractériser les données prospectives disponibles, d'en analyser la pertinence compte tenu des besoins propres à l'étude. Ceci est utile voire crucial pour la phase d'interprétation des résultats de l'étude.

L'obtention des données prospectives peut nécessiter beaucoup de temps et est généralement l'étape la plus longue de l'étude. Pour faciliter ce travail, il est recommandé :

- *Pour les données relatives à l'énergie* : consulter les études présentées dans la section « état de l'art » du présent rapport puis éventuellement approfondir par des recherches sur Internet (mises à jour éventuelles des études présentées dans l'état de l'art et compléments issus d'autres sources bibliographiques).
- *Pour les données relatives aux métaux et matières premières* : se rendre sur les sites des associations de producteurs et faire une recherche académique (par ex. via Scopus ou Google Scholar). Par exemple :
 - Aluminium : The Aluminum Association (www.aluminum.org), European Aluminium (www.european-aluminium.eu/), Association Française de l'Aluminium (<http://www.aluminium.fr/industrie/associations/afa>), World Aluminium (www.world-aluminium.org), etc.
 - Acier : World Steel Association (<https://www.worldsteel.org>), Steel Manufacturers Association (steelnet.org/), Eurofer (www.eurofer.org/), etc.
 - Matières premières minérales : National Mining Association (<http://nma.org/>), International Minerals & Mining Association (<http://www.iom3.org/international-mining-minerals-association>), International Council on Mining and Metals (<https://www.icmm.com/en-gb>), etc.
- *Pour l'extrapolation de données passées* : utiliser les sites institutionnels tels que l'INSEE, Eurostat, Data.gouv.fr, etc.

5.2.2.1 Q1 : Horizon temporel de l'étude

En fonction de l'horizon temporel de l'étude, le praticien se reportera à la question Q2 (court terme) ou à la question Q3 (moyen – long terme).

Exemple :

- Cas d'étude 1 (véhicule électrique en 2030) : court / moyen terme → Q2
- Cas d'étude 2 (flotte de véhicule entre 2016 et 2050) : long terme → Q3

5.2.2.2 Q2 : Moyens affectés à l'étude suffisants pour approfondir

Si les moyens ne sont pas suffisants, il est recommandé de réaliser uniquement l'ACV attributionnelle à t initial tout en ayant une analyse critique qualitative des résultats obtenus.

Dans le cas où le praticien dispose de temps pour approfondir l'étude, trois approches peuvent être envisagées et combinées :

- **Extrapolations tendances passées pour p.** Si suffisamment de données passées sont disponibles, il est possible de les extrapoler dans le temps. Cette méthode n'est valable que si l'on considère que les tendances passées sont susceptibles de se prolonger dans le futur. En outre, cette méthode implique qu'aucune rupture ou incident ne soit envisagé dans l'avenir. La figure suivante présente une extrapolation linéaire de données (réalisée avec Excel) :

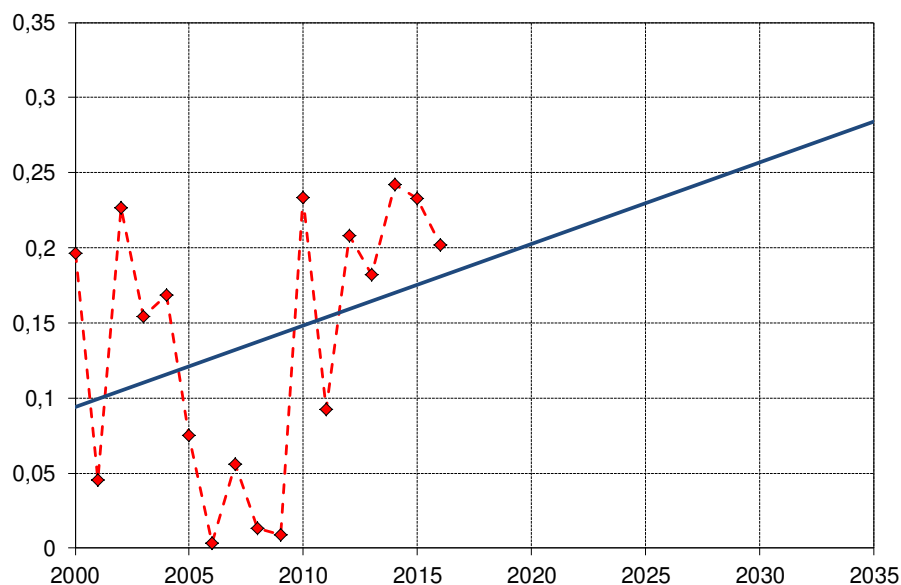


Figure 68 –Exemple d'extrapolation de valeurs passées

- Consultation d'experts. Dans le cas où l'on ne peut extrapoler des tendances passées ou si l'on souhaite introduire des événements ou ruptures dans les prévisions, il est possible de faire appel à un jugement expert extérieur afin de fournir une (des) valeur(s) de paramètre.
- **Etudes de sensibilité sur des paramètres isolés p_i , en prenant des évolutions arbitraires (+/- x %).** Cette méthode consiste à réaliser plusieurs fois l'ACV, en introduisant à chaque fois une variation d'un paramètre. L'ACV est ensuite calculée et le praticien peut observer dans quelle mesure la variation du paramètre introduit une variation dans le résultat final.

Exemple :

Pour le cas d'étude 1, le paramètre consommation du véhicule peut être obtenu à partir d'extrapolation d'émissions de CO₂ passées :

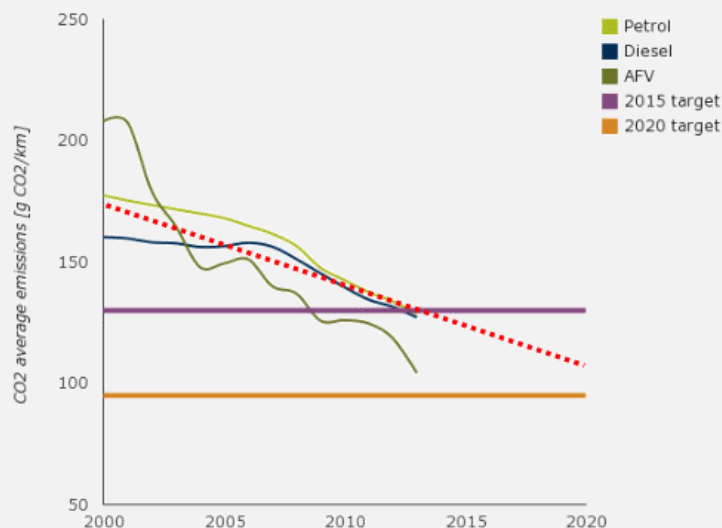


Figure 69 – Valeurs passées d'émissions de CO₂ des véhicules (EEA)

Le poids du véhicule peut être obtenu à partir de dires d'experts (consultation des experts au sein des constructeurs automobiles, points de vue des producteurs d'acier et d'aluminium et travaux universitaires). La figure suivante montre une diminution prévue du poids des véhicules qui correspond à une inversion des tendances passées. Ces valeurs correspondent à une augmentation de la part des matériaux visant à alléger les véhicules (Ferreira Pinto, 2009)

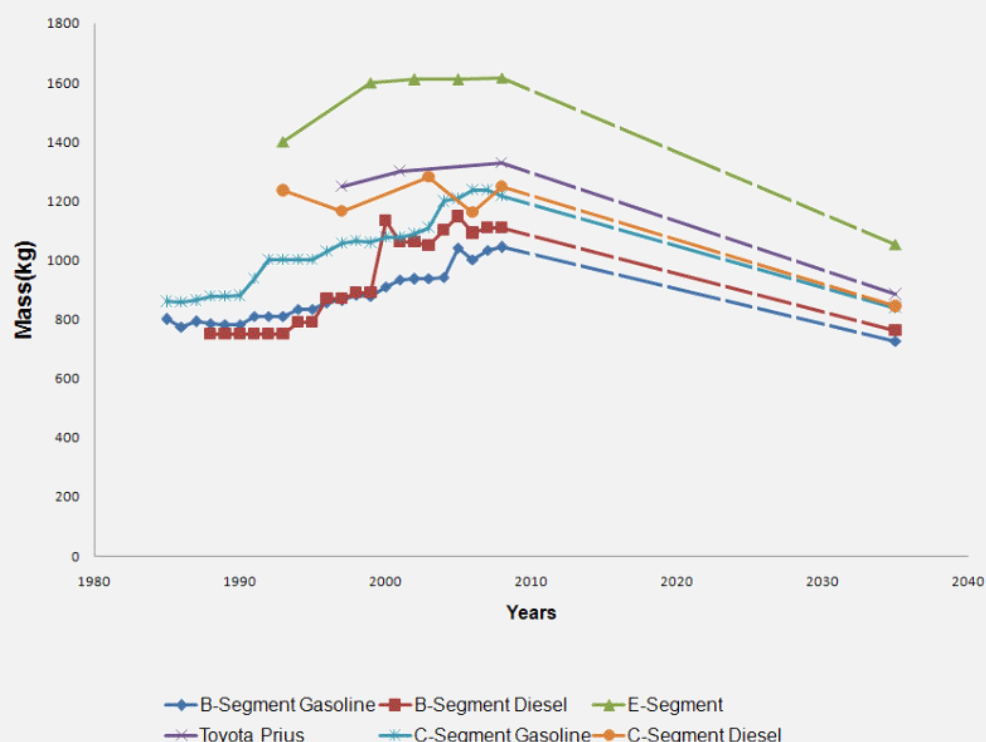


Figure 70 – évolution du poids des véhicules, calculs d'experts (Ferreira Pinto, 2009)

La part du roulage urbain / route / autoroute étant une variable pour laquelle une extrapolation de données peut être difficile, une analyse de sensibilité arbitraire (par exemple 0% urbain pour le diesel en 2030, 100% urbain pour le véhicule électrique, etc.) peut être effectuée.

5.2.2.3 Q3 : Données disponibles pour p_i à l'horizon temporel visé

Si les données ne sont pas disponibles → Q4

Si des données sont disponibles → Q5

5.2.2.4 Q4 : Moyens affectés à l'étude suffisants pour approfondir

Si les moyens affectés à l'étude ne permettent pas d'approfondir la recherche de données, deux possibilités sont proposées :

- Extrapolation de tendances passées, études de sensibilité et consultations d'experts de manière similaire à Q2 :
- Révision des objectifs et du champ de l'étude si les données ne peuvent être estimées ou extrapolées.

Si les moyens affectés à l'étude le permettent, les données peuvent être générées en utilisant des méthodes formelles (telles que la méthode Delphi, cf. section 2.1.4) et/ou des méthodes plus intuitives (dires d'experts).

5.2.2.5 Q5 : Adéquation des données avec les objectifs et le contexte de l'étude

Cette question renvoie à l'axe 1 de la typologie de scénarios prospectifs : les hypothèses sous-jacentes à la donnée correspondent-elles aux objectifs et au contexte du projet ? Si oui, le praticien peut répondre à la question Q6. Dans le cas contraire, le praticien est invité à répondre à la question Q4.

Exemples pour le cas d'étude n°2:

- Utilisation de scénarios de mix électriques à portée idéologique pour un cadre et contexte de l'étude se voulant neutre : scénarios négawatt (très volontariste en termes de sobriété et d'efficacité énergétique ainsi que développement des énergies renouvelables), scénarios de mix

électrique ADEME 100% énergie renouvelable ou scénarios produits par une compagnie pétrolière (BP).

- Utilisation de données possédant une hypothèse incompatible. Par ex. utilisation dans un scénario « Baseline » tendanciel (business as usual) de consommations des véhicules extraites d'une étude évaluant le progrès technique nécessaire pour limiter l'augmentation des températures à 2°C.

5.2.2.6 Q6 : Adéquation des données avec les méthodes de production des scénarios, dimensions spatiale / temporelle / sectorielle

Cette question renvoie aux axes 2 et 3 de la typologie de scénarios prospectifs. Si plusieurs jeux de données sont adaptés, le praticien peut les utiliser directement et éventuellement réaliser différents scénarios et / ou analyses de sensibilité. Dans le cas où elles ne correspondent pas, soit il est possible de les adapter au contexte en les modifiant, soit le praticien peut se rendre à la question Q4.

- Adéquation temporelle : utilisation de données annuelles pour des énergies intermittentes (résolution temporelle insuffisante si la question des conditions d'émergence de ces technologies est centrale dans l'étude), données à l'horizon 2030 pour une ACV prospective à l'horizon 2050 ;
- Adéquation spatiale : mix électrique européen pour une étude en France (biais important) scénarios de mix énergétiques extraits des travaux de l'AIE pour une étude sur véhicule électrique en France (scénario trop macroscopique / résolution inadaptée), kilométrage moyen européen pour une étude en France (biais faible) ;
- Adéquation sectorielle : Utilisation de modèles dont la résolution sectorielle n'est pas adaptée aux objectifs d'étude, par exemple modèle intégrant une description très simplifiée / agrégée d'un secteur central pour l'analyse (ex d'un modèle vectoriel de raffinage utilisé dans une étude portant sur l'évaluation des impacts de nouvelles formulations de carburants pétroliers). Par ailleurs, si les scénarios couvrent plusieurs secteurs / sous-secteurs et que la collecte des données et construction des scénarios ont été réalisées en parallèle pour chacune de ces « briques » (cas des scénarios de transition énergétique de l'ANCRE ou encore des visions énergétiques ADEME 2030 par exemple); il faudra veiller à la cohérence d'ensemble de ces sous scénarios dans le(s) scénario(s) plus global(aux).

5.3 Consolidation des données, cohérence et interprétation

5.3.1 Consolidation des données et construction des scénarios



Cette étape est recommandée, en particulier lorsque les données utilisées sont nombreuses. En effet, bien qu'a priori un suivi scrupuleux de l'étape précédente permet d'éviter les incohérences, il peut toujours être utile d'effectuer une vérification, en particulier si plusieurs personnes ont contribué à l'étude.

Plusieurs sources de données ont pu être utilisées durant les étapes précédentes. On s'assurera dans cette étape qu'elles n'entrent pas en contradiction entre elles, par exemple des dires d'experts optimistes avec une étude utilisant des hypothèses plus conservatrices.

Dans le cas où plusieurs données sont disponibles pour tout ou partie des paramètres, on tâchera de construire des scénarios fondés sur des associations cohérentes de ces paramètres. La méthode d'analyse formative des scénarios (cf. 2.2.2.1) peut aussi être utilisée pour s'assurer de cela.

5.3.2 Analyse critique



Au même titre que la définition des objectifs et des champs de l'étude, cette étape **doit** être réalisée afin d'assurer la qualité de l'étude. A défaut, lorsque le praticien n'est pas certain de son interprétation, il doit a minima préciser qu'il n'a pas les compétences ou le temps nécessaire pour approfondir la question. L'interprétation **doit** être réalisée au regard de la définition des objectifs.

En plus de l'interprétation des résultats similaire à une ACV conventionnelle, l'interprétation d'une ACV prospective doit faire attention aux points suivants :

- Expliciter clairement les hypothèses afin de prendre en compte les limites de l'étude dans la lecture des résultats (transparence) ;
- Comparer la contribution des résultats entre t initial et t final. De grandes disparités doivent faire redoubler de vigilance par rapport aux hypothèses formulées et aux données retenues ;
- Analyser les résultats en tenant compte de la possible obsolescence de certains indicateurs environnementaux ;
- Utiliser des données externes à l'étude pour juger de la pertinence des données retenues : par ex. hypothèses sur la croissance, sur le prix du pétrole, etc.

5.4 Exemple pratique : cas d'étude n°1

Cette section reprend les différents éléments présentés précédemment pour le cas d'étude n°1 afin de donner un exemple pratique.

1. Objectif

L'ensemble des huit étapes définies par la méthodologie doit être abordé afin d'assurer la transparence nécessaire.

1.1 Objectifs de l'étude : ACV du véhicule électrique en 2030, dans une hypothèse *business as usual*, sans rupture majeure. Etude réalisée en interne chez un constructeur automobile et ayant pour finalité de supporter une stratégie interne (éventuels changements des lignes de production). D'après la section 5.1.1, la typologie de l'étude est (a) ACV d'un produit ou d'une gamme de produits existant à un horizon temporel éloigné.

1.2 Nature des changements : La question porte-t-elle sur une décision ou un changement et si oui, ce changement est-il interne ou s'étend-il au-delà du système étudié ? Ici l'ACV est prospective (paramètres évoluant entre maintenant et 2030) mais non conséquentielle car on ne souhaite pas intégrer et étudier dans ce cadre les changements éventuels dans les autres systèmes (par ex. évolution du mix électrique ou des modes de production des matériaux rentrant dans la composition du véhicule). Si l'on avait souhaité étudier les effets du développement du véhicule électrique sur la production d'électricité (par ex., quel serait l'impact de 10% ou 20% de véhicules électriques sur la demande de pointe), le changement porterait sur un système externe et la méthodologie est alors conséquentielle. Il serait recommandé dans ce cas de se reporter au rapport *SCORE LCA 2012-01*.

1.3 Horizon temporel de l'étude : En reprenant la section 5.1.3, il apparaît ici que l'étude est à court-moyen terme. En effet, certaines politiques sont bien connues (objectifs de consommation de carburant et d'émissions de CO₂, incorporation d'aluminium pour atteindre ces objectifs) mais le système n'est pas à l'abri de changement radicaux de comportements et des ruptures technologiques sur les batteries sont susceptibles de se produire.

1.4 Produit et système de produit : On étudie ici un produit (un véhicule) et non un système de différents produits. Seules des données techniques seront donc nécessaires, permettant de faire l'impasse sur la recherche de données de parts de marché par exemple.

1.5 Unité fonctionnelle : On se pose ici la question de la pertinence de l'UF dans un contexte prospectif. L'UF choisie à t₀ serait 150 000 km parcourus par le véhicule en 10 ans. Ne disposant pas d'élément venant à impliquer que cette UF serait différente en 2030 (ainsi, même si un changement d'usage en faveur de l'autopartage se développe, il n'affecte pas la durée de vie du véhicule), elle peut être considérée comme valide dans notre étude.

1.6 Périmètre de l'étude / premier et arrière-plan : On retiendra dans les processus de premier plan la fabrication des composants de la voiture (chassis, batterie notamment), son utilisation et la fin de vie ainsi que la production / approvisionnement en électricité. Dans la mesure où l'on ne souhaite pas prendre en compte les modifications éventuelles des modes de production des matériaux intervenant dans la fabrication des composants (acier, aluminium etc.), ces processus seront intégrés à l'analyse mais en second plan.

1.7 Choix des impacts environnementaux pour la caractérisation : on fait le choix ici d'utiliser les indicateurs midpoints basés sur les recommandations de l'ILCD. Conformément à la section 5.1.7, les impacts les plus susceptibles d'être obsolètes en 2030 sont ceux basés sur les ressources : CML 2001 Abiotic Depletion Potential et Water scarcity. En particulier, notre système utilise des matériaux tels que le lithium, le néodyme et le cobalt, dont la demande pour les années à venir risque d'augmenter. Par conséquent, une attention particulière devra être portée sur l'analyse de cet impact, en particulier vis-à-vis des matériaux cités précédemment.

1.8 Validité des méthodes d'allocation : Aucune méthode d'allocation particulière ne semble susceptible de changer pour les processus de premier-plan. Néanmoins, les terres rares étant extraites simultanément, il faudra veiller aux allocations effectuées par ecoinvent, en particulier si elles sont de nature économique.

2 Inventaire de cycle de vie

2.1 Indentification des paramètres à projeter à l'horizon temporel considéré : Lors de la réunion intermédiaire, les participants ont considéré spontanément comme paramètre à projeter le mix électrique. Cette pratique correspondrait à un cas de figure où le praticien ne dispose pas du temps nécessaire pour suivre la méthodologie proposée. En suivant la méthodologie proposée, il serait possible d'obtenir deux sous-ensembles de paramètres à étudier :

Sous-ensemble E1 : à partir d'une première itération de l'ACV sans aspects prospectifs, les hotspots suivants sont apparus : production de l'acier et de l'aluminium utilisés dans le véhicule, production de la batterie, production de l'électricité, consommation unitaire du véhicule. Ces hotspots peuvent être associés à l'ensemble de paramètres E1 suivants : répartition acier / aluminium, mix électrique, consommation du véhicule.

Sous-ensemble E2 : se plaçant dans une perspective à moyen-terme, on cherche ici les paramètres susceptibles de varier de manière non-tendancielle. Ce type de paramètre n'est pas spontanément envisagé par les praticiens de l'ACV mais il serait possible dans un premier temps d'envisager les paramètres suivants : répartition roulage urbain / routier (scénario d'interdiction de roulage en ville par exemple) et technologie innovante de batterie (par ex. lithium-air). Le nombre de paramètres envisagés ici dépend du temps dont dispose le praticien ainsi que des connaissances qu'il possède.

2.2 Suivi de l'arbre méthodologique : Selon le point 1.3, on se place ici dans un horizon à court-moyen terme. Il est donc recommandé de se rendre à la question Q2 de l'arbre méthodologique : « les moyens affectés à l'étude sont-ils suffisants pour approfondir la question ? ». Dans le cas où les moyens sont suffisants, trois possibilités existent : extrapolation des tendances passées, études de sensibilité et consultations d'experts. Le choix d'une technique dépend des données disponibles, des compétences du praticien et de la nature des paramètres. Il serait ainsi possible de préconiser pour notre étude de cas les éléments suivants :

- Le paramètre mix électrique peut être obtenu à partir d'extrapolation de données passées ou à partir d'études prospectives, en étudiant dans ce cas leur parti pris idéologique.
- La répartition aluminium / acier peut être obtenue via une consultation d'experts automobiles ou des métaux ou d'études existantes, en étudiant leur parti pris idéologique (en particulier si elles proviennent d'un producteur de métal en particulier).
- La consommation du véhicule peut aussi être obtenue à partir de dires d'experts de l'industrie automobile ou de centres de recherche spécialisés dans l'énergie.
- La part du roulage urbain / routier ainsi que la technologie de batterie peut être étudiée en analyse de sensibilité car il apparaît plus complexe d'obtenir une valeur chiffrée fiable.

2.3 Interprétation et conclusions : dans cette étape, les résultats doivent être interprétés à la lumière des limites définies dans les objectifs et le champ de l'étude.

6 Conclusions

L'ACV prospective se distingue de l'ACV conséquentielle dans le sens où elle implique seulement la notion de temps, tandis que l'ACV conséquentielle implique la notion de changement. Ainsi, une ACV conséquentielle peut ne pas avoir d'horizon temporel défini. De même, les données prospectives

peuvent s'employer indifféremment dans une ACV attributionnelle ou conséquentielle. Les résultats de l'enquête ont montré que cette distinction n'est pas toujours très claire.

La réalisation d'une ACV est un travail nécessitant un investissement important en termes de temps. La nécessité de collecter les données, de les analyser et de les traiter, la recherche de données manquantes, la construction de scénarios, l'appel à des experts, etc. sont des étapes requérant chacune du temps. En outre, le nombre de paramètres à étudier peut s'avérer très important ainsi que le nombre de valeurs attribuées à l'horizon de temps retenu. Plus l'horizon temporel est éloigné, plus les paramètres susceptibles de varier devront faire l'objet d'une étude approfondie et plus le nombre de scénarios possibles augmente. *In fine*, la qualité de l'ACV prospective dépendra du temps passé à comprendre le système étudié, à la qualité des données générés et au nombre de scénarios envisagés. La méthodologie présentée précédemment préconise un certain nombre d'étapes à suivre et propose des solutions pour obtenir et organiser les données prospectives. Il appartient néanmoins aux praticiens d'essayer de réaliser la meilleure étude prospective avec les moyens humains et le temps qui lui sont disponibles et d'interpréter les résultats à la lumière de ces éléments. Il est évident qu'une ACV prospective réalisée en quelques jours ne pourra prétendre aux mêmes résultats que si elle avait fait l'objet d'une thèse et le praticien reste seul maître et juge de la qualité et des limites de son étude.

Cette étude vise à donner une méthodologie aux praticiens de l'ACV afin d'améliorer la qualité de leurs études prospectives. En effet, en suivant les principales étapes de l'ACV (objectifs et champs de l'étude, inventaire et interprétation), elle apporte les éléments de réflexion supplémentaires nécessaires à la conduite d'une ACV prospective. La qualité d'une ACV est liée à celle de ses hypothèses et à son interprétation. Cela est d'autant plus vrai dans une ACV prospective qui, de par sa nature incertaine, requiert une prudence et une transparence encore plus importante. L'interprétation des résultats est essentielle et doit prendre en compte les limites précisément énoncées dans la définition des objectifs et du champ de l'étude.

7 Bibliographie

- ADEME (2013). L'exercice de prospective de l'ADEME « Vision 2030-2050 ». Document technique. 297p. <http://www.ademe.fr/contribution-lademe-a-lelaboration-visions-energetiques-2030-2050>
- ADEME (2015). Un mix électrique 100% renouvelable ? Analyses et optimisations. Rapport final. 166p. <http://www.ademe.fr/mix-electrique-100-renouvelable-analyses-optimisations>
- AIE (2015). World Energy Outlook. 718p.
- AIE (2015). Energy Technology Perspectives 2015 - Mobilising Innovation to Accelerate Climate Action.
- ANCRE (2013). Scénarios de l'ANCRE pour la transition énergétique. Rapport 2013. 117p.
- Beaujean, J.M., Charpentier, J.P. (1978) A Review of Energy Models No.4 .IIASA Research Report. IIASA, Laxenburg, Austria, RR-78-012
- Berger, G., 1967. Sciences Humaines et prévision, in Etapes de la prospective, P.U.F.
- Bhattacharyya, S.C., Timilsina, G.R. (2010) A review of energy system models. International Journal of Energy Sector Management, 4(4):494-518.
- Böhringer, C., Rutherford, T.F. (2008) Combining bottom-up and top-down, Energy Economics, 30(2):574-596.
- Börjeson, L., Höjer, M., Dreborg, K-H., Ekvall, T., Finnveden, G. (2006) Scenario types and techniques: Towards a user's guide. Futures, 38(7):723-739.
- BP (2016). BP Energy Outlook. Outlook to 2035. 98p. <http://www.bp.com/energyoutlook>
- Commission Européenne (2013). EU energy, transport and GHG emissions trends to 2050. Reference scenario 2013. 173p.
- Conseil Mondial de l'Energie & Institut Paul Scherrer (2013). World Energy Scenarios Composing energy futures to 2050. 288p.
- Contadini, J. F., Moore, R. M., & Mokhtarian, P. L. (2002). Life cycle assessment of fuel cell vehicles a methodology example of input data treatment for future technologies. The International Journal of Life Cycle Assessment, 7(2), 73-84.
- Da Silva, C. R., Franco, H. C. J., Junqueira, T. L., van Oers, L., van der Voet, E., & Seabra, J. E. (2014). Long-term prospects for the environmental profile of advanced sugar cane ethanol. Environmental science & technology, 48(20), 12394-12402.
- Dandres, T., Gaudreault, C., Tirado-Seco, P., & Samson, R. (2012). Macroanalysis of the economic and environmental impacts of a 2005–2025 European Union bioenergy policy using the GTAP model and life cycle assessment. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(2), 1180-1192.
- Dator, J. (1996) Foreword in The Knowledge Base of Future Studies, R.A. Slaughter Eds, DDM Media Group.
- Dufour, J., Serrano, D. P., Galvez, J. L., Moreno, J., & Garcia, C. (2009). Life cycle assessment of processes for hydrogen production. Environmental feasibility and reduction of greenhouse gases emissions. International Journal of Hydrogen Energy, 34(3), 1370-1376.
- Enerdata (2016). Global Energy Scenarios to 2040. Understanding our energy future. 57p.
- ExxonMobil (2016). The outlook for Energy: A View to 2040. 80p.
- Faucheux, S., Noel, J-F., 1995. Economie des ressources naturelles et de l'environnement. Armand Colin.
- Ferreira Pinto, A. (2009) Evolution of weight, fuel consumption and CO2 of automobiles. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Universidade técnica de Lisboa.
- Fishbone, L.G., Abilock, H. (1981) Markal, a linear-programming model for energy systems analysis: Technical description of the bnl version. International Journal of Energy Research, 5(4):353-375.

Forrester, Jay W., 1971. World Dynamics, Wright-Allen Press, Cambridge. Seconde Edition: Wright-Allen Press (1973).

Forrester, Jay W., 1989. The Beginning of System Dynamics. Banquet Talk at the international meeting of the System Dynamics Society Stuttgart, Germany July 13.

Fukushima, Y., & Hirao, M. (2002). A structured framework and language for scenario-based life cycle assessment. The International Journal of Life Cycle Assessment, 7(6), 317-329.

Us General Accounting Office (1990) Prospective Evaluation Methods – The Prospective Evaluation Synthesis.

Godet, M. (1986) Introduction to La prospective: Seven key ideas and one scenario method. Futures, 18(2):134-157. Godet, M. (2000) The Art of Scenarios and Strategic Planning: Tools and Pitfalls. Technological Forecasting and Social Change, 65(1):3-22.

Hertwich, E. G., Gibon, T., Bouman, E. A., Arvesen, A., Suh, S., Heath, G. A., ... & Shi, L. (2015). Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies. Proceedings of the National Academy of Sciences, 112(20), 6277-6282.

Hourcade, J-C., Jaccard, M., Bataille, C., Gherzi, F. (2006) Hybrid modeling: New answers to old challenges. The Energy Journal special Issue, 1-12.

Institute of Studies for the Intergration of Systems (2009) NEEDS New energy externalities developments for sustainability. Publishable final activity report, 81 p. <http://www.needs-project.org/2009/AnnualReport/Publishable%20Final%20Activity%20Report.doc>

De Jouvenel, F. (2014) Initiation à la Prospective, Notes de cours.

Lesourne, J., Randet, D., (Sous la Direction de). 2007. La recherche et l'innovation en France, Editions Odile Jacob.

Mahrane, Y., Fenzi, M., Pessis, C., Bonneuil, C., 2012. De la nature à la biosphère. L'invention politique de l'environnement global 1945-1972. Vingtième Siècle, 2012/1, n°113, pp.127-141.

Mai, T., Logan, J., Blair, N., Sullivan, P., Bazilian, M. (2013) RE-ASSUME : A Decision Maker's Guide to Evaluating Energy Scenarios, Modeling, and Assumptions, IEA-RETD Report.

Manne, A.S., Wene, C.O. (1992) Markal-Macro: a linked model for energy-economy analysis. BNL Report n°47161.

Meadows, D.H., & D.L., Randers, J., Behrens III, W.W, 1971, The limits to growth. Universe Books, New York.

Mu, D., Seager, T., Rao, P. S., & Zhao, F. (2010). Comparative life cycle assessment of lignocellulosic ethanol production: biochemical versus thermochemical conversion. Environmental management, 46(4), 565-578.

Mutombo, E.J.K, Bauler, T., Wallenborn, G. (2007) Méthodes participatives de prospective et de planification pour un développement durable : analyse d'approches et de réalisations. Université Libre de Bruxelles – IGEAT.

Nicolas, C., 2016. Robust energy and climate modeling for policy assessment. Thèse de doctorat, Université Paris Ouest Nanterre-La Défense.

Nordhaus, W.D., 1973. World Dynamics: Measurement Without Data. The Economic Journal, Vol. 83, N° 332. (Dec), pp. 1156-1183.

Nordhaus, W.D. (1977) Economic Growth and Climate: The Case of Carbon Dioxide," The American Economic Review, 67(1):341-346.

Nordhaus, W.D. (1980) Thinking About Carbon Dioxide: Theoretical and Empirical Aspects of Optimal Control Strategies, Department of Energy, Cowles Foundation Discussion Paper 565.

Ou, X., Zhang, X., & Chang, S. (2010). Scenario analysis on alternative fuel/vehicle for China's future road transport: Life-cycle energy demand and GHG emissions. Energy policy, 38(8), 3943-3956.

Passet, R. 2010. Les grandes représentations du monde et de l'économie à travers l'histoire. Les Liens qui libèrent.

Passet, R. 1979. L'économie et le vivant. Payot.

Pehnt, M. (2003a). Assessing future energy and transport systems: the case of fuel cells - Part 1 Methodological aspects. The International Journal of Life Cycle Assessment, 8(5), 283-289.

Pehnt, M. (2003b). Assessing future energy and transport systems: the case of fuel cells - Part 2 Environmental performance. The International Journal of Life Cycle Assessment, 8(5), 283-289.

Percebois, J., Hansen, J-P (2010) Energie : Economie et Politiques. De Boeck.

Pereira, A.G., Funtowicz, S. (1999) VISIONS report: Venice 2050. Joint Research Center, Ispra, Italy.

Pesonen, H. L., Ekvall, T., Fleischer, G., Huppes, G., Jahn, C., Klos, Z. S., ... & Wenzel, H. (2000). Framework for scenario development in LCA. The International Journal of Life Cycle Assessment, 5(1), 21-30.

Polère, C., 2012. La prospective. Les fondements historiques. Grand Lyon Prospective. Disponible à l'adresse suivante : http://www.millenaire3.com/content/download/1358/18826/version/1/file/1_Prospective_fondements_180p.pdf

Rasmussen, B., Borup, M., Borch, K., & Dannemand Andersen, P. (2005). Prospective technology studies with a life cycle perspective. International Journal of Technology, Policy and Management, 5(3), 227-239.

Raugei, M., & Frankl, P. (2009). Life cycle impacts and costs of photovoltaic systems: current state of the art and future outlooks. Energy, 34(3), 392-399.

Remme, U (2008) TIMES Lecture Notes, IEA.

Robine, M. La question charbonnière de William Stanley Jevons. In: Revue économique, volume 41, n°2, 1990. pp. 369-394.

Robinson, J.B. (1998) Unlearning and Backcasting: Rethinking some of the Questions We Ask about the Future. Technological Forecasting and Social Change, 33(4):325-338.

RTE (2014). Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France. 184p. Sardar, Z. (2010). Futures, Futures Studies; futurology; futuristic; foresight – What's in a name? Futures, 42(3):177-184.

Schäfer, A., Heywood, J. B., & Weiss, M. A. (2006). Future fuel cell and internal combustion engine automobile technologies: A 25-year life cycle and fleet impact assessment. Energy, 31(12), 2064-2087

Schmalensee, R. (2012) Lecture notes in Energy decisions, Markets and Policies, Massachusetts Institute of Technology. <http://ocw.mit.edu/courses/sloan-school-of-management/15-031j-energy-decisions-markets-and-policies-spring-2012/lecture-notes/>

Son, H., 2015. The History of Western futures studies: An exploration of the intellectual traditions and three-phase periodization, Futures 66, pp.120-137.

Spatari, S., Zhang, Y., & MacLean, H. L. (2005). Life cycle assessment of switchgrass-and corn stover-derived ethanol-fueled automobiles. Environmental science & technology, 39(24), 9750-9758.

Spielmann, M., Scholz, R., Tietje, O., & De Haan, P. (2005). Scenario Modelling in Prospective LCA of Transport Systems. Application of Formative Scenario Analysis (11 pp). The International Journal of Life Cycle Assessment, 10(5), 325-335.

Sterman, J.D. (1991) A Skeptic's Guide to Computers Models, in Managing a Nation: The Microcomputer Software Catalog, Boulder, CO.

Tolon, K. (2011). The American futures studies movement (1965–1975): Its roots, motivations, and influences. Ames, United States: Iowa State University Ph. D Dissertation.

Tolon, K. (2012). Futures studies: A new social science rooted in Cold War strategic thinking. In M. Solovey & H. Cravens (Eds.), Cold war social science: Knowledge production, liberal democracy, and human nature (pp. 45–62). New York: Palgrave Macmillan.

Van Asselt, M.B.A., Storms, C.A.H.M., Rijkens-Klomp, N., Rotmans, J. (1998) Towards Visions for a sustainable Europe : An Overview and Assessment of the last decade of European Scenario Studies, ICIS, Maastricht, the Netherlands.

Van Notten P.W.F, Rotmans J., Van Asselt M.B.A., Rothman D.S., 2003. An updated scenario typology. *Futures*, 35:423-443.

Veille Blanchard, E., 2011. Les limites à la croissance dans un monde global. Thèse de doctorat, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales.

Walser, T., Demou, E., Lang, D. J., & Hellweg, S. (2011). Prospective environmental life cycle assessment of nanosilver T-shirts. *Environmental science & technology*, 45(10), 4570-4578.

Weinzettel, J., Reenaas, M., Solli, C., & Hertwich, E. G. (2009). Life cycle assessment of a floating offshore wind turbine. *Renewable Energy*, 34(3), 742-747.

Wender, B. A., & Seager, T. P. (2011). Towards prospective life cycle assessment: Single wall carbon nanotubes for lithium-ion batteries. In *Proceedings of the 2011 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology* (pp. 1-4). IEEE.