

UTILISER L'ANALYSE MULTICRITERE POUR LA PRISE DE DECISION EN ACV

Synthèse

Juillet 2016

Responsable scientifique :

- **Stéphane LE POCHAT, Mélissa CORNELUS**

EVEA - 8, avenue des Thébaudières
44800 Saint Herblain



- **Jacky MONTMAIN, Abdelhak IMOUSSATEN**

ECOLE DES MINES D'ALES - LGI2P/ KID - 6, avenue de Clavières
30319 Alès 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.

- ✓ 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.

Table des matières

1	Introduction.....	4
2	Etat de l'art des méthodes MCDA.....	5
3	Cas d'étude.....	7
3.1	ACV comparative des véhicules électriques et des véhicules thermiques	8
3.2	Scénarios et indicateurs d'impacts.....	8
3.3	Méthode pour le cas d'étude	10
3.4	Résultats obtenus.....	10
3.4.1	Résultats avec MACBETH (intégrale de Choquet k-additive)	11
3.4.2	Résultats avec ELECTRE III	12
3.4.2.1	Pondération des critères avec Electre (Simos).....	12
3.4.2.2	Classement des scénarios avec Electre III	12
3.5	Résultats avec PRIOR.....	13
3.6	Comparaison des résultats obtenus avec les différentes méthodes	13
3.7	Conclusion sur le cas d'étude	14
4	Guide recommandations à l'usage des praticiens ACV.....	15
4.1	Critères d'aide au choix.....	15
4.2	Recommandations pour l'aide au choix entre MACBETH et ELECTRE	16
4.2.1	Recommandations générales	16
4.2.2	Aide au choix de la méthode.....	16
4.2.2.1	Recommandation pour une méthode d'élicitation indirecte des préférences.....	16
4.2.2.2	Objectif de surclassement.....	17
4.2.2.3	Non-compensation.....	17
4.2.2.4	Indicateurs qualitatifs.....	17
4.2.2.5	Logigramme d'aide au choix.....	17
5	Conclusion générale	18

1 Introduction

La difficulté de la prise de décision en environnement complexe (ie. non « trivial »), que ce soit pour les orientations de politiques publiques, l'aménagement du territoire, les orientations stratégiques pour l'entreprise ou encore le choix de solutions lors du processus de conception, est une situation bien connue de tous ceux qui sont confrontés à la nécessité de faire des choix parmi des ensembles plus ou moins grands de solutions potentielles. L'aide à la décision multicritère illustre le dilemme suivant : soit une simplification, réduisant le multicritère en monocritère, et facilitant la prise de décision mais au détriment d'une perte d'information, soit la complétude de l'information mais au détriment de la complexité de la prise de décision, et donc au risque de la non-décision.

L'ACV, en tant que méthode de calcul des impacts environnementaux, peut être considérée comme un outil fournissant une information pour le processus de décision. Pour autant, l'ACV vient complexifier le processus de décision en apportant une information multicritère dans un processus déjà multicritère. L'enjeu porte donc sur la capacité d'interprétation de résultats multicritères et de l'utilisation de ces résultats comme élément de la prise de décision.

Face à cette question d'un compromis entre les approches multicritère et monocritère, notamment pour l'ACV, se présentent les techniques mathématiques d'analyse multicritère visant à définir une ou plusieurs solutions optimales, au sens de Pareto. Ainsi, l'enjeu de cette étude commandée par SCORELCA est d'explorer le potentiel des techniques mathématiques d'analyse multicritère à résoudre le « dilemme du compromis » pour l'ACV, et de proposer un guide méthodologique d'aide au choix des méthodes MCDA pour les praticiens et utilisateurs de résultats d'ACV.

L'objectif de cette étude est de révéler dans quelle mesure les techniques mathématiques d'analyse multicritère pourraient être utilisées pour aider, voire solutionner le traitement de l'information fournie par les ACV sous forme multicritère. Notamment, l'étude doit permettre de savoir si des outils existants dans le domaine de l'analyse multicritère pourraient être appliqués aux ACV, et le cas échéant, quelles en sont les prérequis.

L'étude est structurée en trois parties :

- La première partie consiste en un état de l'art des méthodes d'analyse multicritère. Cet état de l'art présente l'historique des développements méthodologiques relatifs à la problématique du choix en environnement multicritère, ainsi que les concepts mathématiques sous-jacents aux différentes familles de méthodes. Il propose finalement le choix de deux méthodes, les méthodes Macbeth et Electre, pouvant le plus facilement convenir au contexte des études ACV.
- La deuxième partie est constituée d'un cas d'application des deux méthodes d'analyse multicritère préconisées avec les résultats d'une étude ACV comparant les impacts environnementaux de différentes motorisations de véhicules particuliers (essence, diesel, électrique).
- Enfin, la troisième partie constitue un guide de recommandations pour le choix des méthodes d'analyse multicritère pour les études d'ACV. Il est destiné aux praticiens ACV et à tous ceux qui souhaitent utiliser les résultats d'ACV dans le cadre d'un processus de décision.

2 Etat de l'art des méthodes MCDA

L'aide à la décision consiste à accompagner un donneur d'ordre confronté à un problème où plusieurs alternatives (solutions, actions, choix, scénarios, etc.) sont envisageables. Pour choisir « la meilleure », les conséquences des alternatives envisageables doivent être minutieusement étudiées pour pouvoir établir une comparaison entre elles.

La nécessité de prendre en compte plusieurs points de vue dans l'aide à la décision a conduit les chercheurs à s'intéresser à l'aide à la décision multicritère. M. Grabisch définit la décision multicritère comme « l'action de synthétiser des informations relatives à différents points de vue ou aspects concernant un ensemble d'objets (ou alternatives, actions), et choisir un ou plusieurs objets dans cet ensemble » (Grabisch, 2005). Plusieurs méthodes et outils ont été proposés pour la décision multicritère. Ils répondent à différentes problématiques :

- choix (sélection des "meilleures alternatives"),
- rangement (ordonnancement total ou partiel des alternatives selon leurs qualités relatives),
- tri (affectation des alternatives à des catégories prédéfinies).

De nombreuses méthodes ont été développées depuis la naissance du multicritère. La dénomination la plus générale pour les désigner est MCDA (pour Multiple Criteria Decision Analysis). Plusieurs classifications des méthodes MCDA sont possibles selon qu'elles relèvent de méthodes d'optimisation ou d'analyse multicritère, qu'elles autorisent la compensation ou non, qu'elles utilisent des opérateurs d'agrégation ou pas, qu'elles agrègent puis comparent (méthode AC) ou comparent puis agrègent (méthode CA), etc.

La figure 1 ci-dessous, inspirée de (Seppälä et al., 2001), propose une classification des méthodes MCDA. Les méthodes d'analyse multicritère citées dans cette figure sont présentées en détail dans le rapport d'étude.

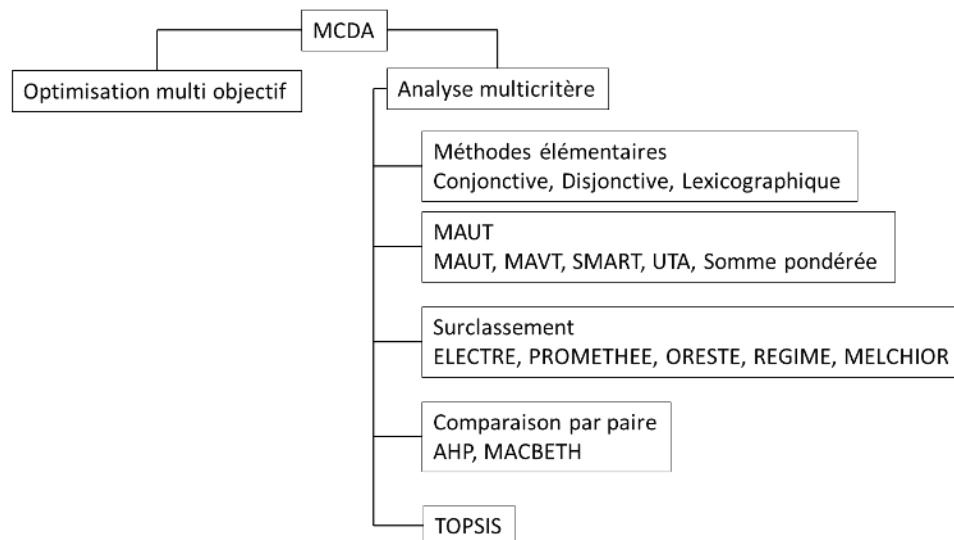


Figure 1. Typologie des méthodes multicritères d'après (Seppälä et al., 2001)

On ne peut pas dire de manière stricte qu'une méthode multicritère est meilleure qu'une autre. Le choix d'une méthode dépend de la problématique, des données disponibles, et des résultats escomptés. Dans l'idéal, on pourrait imaginer une méthode qui emprunterait des techniques à chacune des méthodes présentées ci-dessus.

Utiliser l'analyse multicritère pour la prise de décision en ACV

L'état de l'art réalisé dans l'étude recense et compare les principales méthodes apparaissant dans la figure 1. Le tableau 1 ci-dessous dresse une analyse comparée des méthodes abordées dans l'étude.

<i>Méthodes MCDA</i>	MAUT	Moyenne Pondérée	PROMETHEE	ELECTRE	AHP	MACBETH	TOPSIS
<i>Critères</i>							
Prise en compte de l'incertitude	Oui	Oui	Oui/Non	Oui/Non	Oui/Non	Non	Oui
Facilité d'application	Dépend de l'opérateur	Facile	Moyen	Moyen	Facile	Moyen	Moyen
Opérateur d'agrégation ¹	Tous	MP	MP	MP	MP	MP, IC	MP
Comparaison par paire	Non	Non	Non	Non	Oui	Oui	Non
Compensation	Fonction de l'opérateur	Oui	Semi compensation	Non	Oui	Oui	Oui
Possède un logiciel	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Non
Quantité d'information à renseigner	Fonction de l'opérateur	Moyen	Moyen	Moyen	Beaucoup	Beaucoup	Moyen
Requiert la séparabilité	Dépend de l'opérateur	Oui	Non	Non	Oui	Oui/Non	Non
Requiert l'indépendance	Dépend de l'opérateur	Oui	Non	Non	Oui	Oui/Non	Oui
Requiert le calcul des utilités	Oui	Oui/Non	Oui	Non	Non	Oui	Non
Intègre l'identification des paramètres	Oui	Non	Non	Non	Oui	Oui	Non
Déjà testée pour l'ACV	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Non	Non
Mélange des critères qualitatifs et quantitatifs	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Non
Tolère la forte hétérogénéité entre critères	Dépend de l'opérateur	Non	Oui	Oui	Non	Non	Non
Richesse de l'opérateur d'agrégation	Oui	Non	Non	Non	Non	IC	Non
AC/CA ²	AC	AC	CA	CA	AC	AC	AC
Agrégation des préférences	Non	Non	Oui	Oui	Non	Non	Non
Agrégation des évaluations	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Oui

Tableau 1. Critères pour la comparaison des méthodes d'analyse multicritère

En conclusion de l'état de l'art, les points essentiels à retenir au sujet des méthodes d'analyse multicritère sont résumés ci-dessous :

- L'analyse multicritère vise à modéliser le comportement décisionnel d'un décideur ou d'un groupe de décideurs confrontés à des décisions complexes.

¹ MP = moyenne pondérée. IC = intégrale de Choquet.

² Ordre des opérations : AC = agrégation puis comparaison. CA = comparaison puis agrégation.

- Choisir d'optimiser (i.e., désigner, en toutes circonstances, la meilleure décision), c'est implicitement se placer dans une approche à critère unique.
- Le processus d'analyse multicritère comporte nécessairement une phase d'expression des préférences du décideur. Ainsi, la solution finale identifiée par l'analyse multicritère ne dépend pas seulement de la méthode choisie, mais aussi des préférences du décideur.
- La phase d'agrégation de toute méthode d'analyse multicritère porte en elle la question de la compensation (et donc pour l'ACV la question de la compensation d'un impact environnemental par un ou plusieurs autres). La plupart des méthodes peuvent être considérées comme des méthodes « compensatoires ». Par construction, les méthodes de surclassement³ s'avèrent être « moins compensatoires » que les méthodes à critère unique de synthèse⁴.
- L'analyse multicritère doit permettre de bien identifier et séparer les réalités d'ordre 1 (objectivement mesurables) et les réalités d'ordre 2 (non mesurables objectivement et dont la valeur repose sur la subjectivité, le consensus). Par ailleurs, une aide à la décision bien conçue ne saurait faire abstraction des réalités d'ordre 2.
- D'une manière générale, plus le modèle permet de modéliser de comportements décisionnels, plus il coûte cher à renseigner.
- Pour pouvoir faire appel à la somme pondérée comme opérateur d'agrégation, les attributs (en ACV, les indicateurs d'impacts environnementaux) doivent être indépendants⁵ et vérifier la notion de séparabilité⁶.
- Il semble illusoire de vouloir définir une grille de priorisation absolue et universelle des enjeux environnementaux. Cette grille ne peut être que la traduction d'un système de valeurs défini dans une optique socio-politique donnée, traduisant une « logique d'acteurs » vis-à-vis des questions et enjeux environnementaux, et de la conception des relations entre économie et écosystèmes.

Finalement, au terme de l'état de l'art initial, deux méthodes ont plus particulièrement été recommandées comme étant bien adaptées au contexte de l'ACV : la méthode MACBETH d'une part (méthode de comparaison par paires, à critère de synthèse unique, de type AC) et la méthode ELECTRE d'autre part (méthode de surclassement, de type CA). Il convient de noter, que d'après l'état de l'art, MACBETH n'a encore jamais été utilisée pour l'ACV.

3 Cas d'étude

La première partie de l'étude a fourni un état de l'art des méthodes d'analyse multicritère (MCDA). La recommandation formulée au terme de l'état de l'art indique que les méthodes MACBETH et ELECTRE (famille ELECTRE) semblent, compte tenu des spécificités des pratiques d'ACV, les mieux à même de servir pour l'analyse multicritère et l'aide à la décision en ACV. Par ailleurs, dans l'optique

³ Par exemple ELECTRE, cf. ci-après.

⁴ Par exemple MACBETH, cf. ci-après.

⁵ On parle d'indépendance si le score d'une alternative sur un critère n'est aucunement influencé par son score sur un autre critère.

⁶ Les critères sont séparables si, pour chaque critère i , la propriété suivante est vérifiée : si sur le critère i , la valeur a_i est préférée à la valeur b_i , pour tout couple d'alternatives (a, b) ayant respectivement les scores a_i et b_i sur i , et ayant les mêmes valeurs sur tout autre critère que i , alors a est préférée à b .

du cas d'application, MACBETH et ELECTRE représentent respectivement chacune un prototype des deux classes de méthodes AC et CA.

A noter que, dans le but de compléter l'analyse et tester une méthode supplémentaire connue des praticiens ACV, la méthode PRIOR⁷ a été utilisée pour traiter les résultats du cas d'étude, et les résultats ont été comparés à ceux obtenus avec MACBETH et ELECTRE.

Sur cette base, et profitant de la dynamique de groupe des membres de ScoreLCA, un cas d'application a été proposé et réalisé. Le cas d'application porte sur une étude ACV visant à comparer les véhicules particuliers à moteurs thermiques avec les véhicules particuliers électriques. Dans un premier temps, le cas d'application est décrit tel qu'il a été exposé aux experts se prêtant à l'exercice. Ensuite, le mode opératoire utilisé pour réaliser l'analyse multicritère est rappelé. Dans un troisième temps, les résultats sont présentés et analysés. Enfin, une conclusion sur les enseignements à tirer de ce cas d'étude est formulée.

3.1 ACV comparative des véhicules électriques et des véhicules thermiques

Le choix du cas d'application s'est porté sur une étude ACV, réalisée pour le compte de l'Ademe, sur les véhicules électriques (véhicules particuliers et véhicules utilitaires légers), en 2012⁸. La référence de l'étude est la suivante :

« Élaboration selon les principes ACV des bilans énergétiques, des émissions de gaz à effet de serre et des autres impacts environnementaux induits par l'ensemble des filières de véhicules électriques et des véhicules thermiques, VP de segment B et VUL à l'horizon 2012 et 2020 ».

L'objectif de cette étude ACV est d'établir une comparaison des bilans environnementaux des VE et VT essence et diesel, respectivement pour deux horizons temporels (2012 et 2020).

3.2 Scénarios et indicateurs d'impacts

Dans le cadre du cas d'application pour l'analyse multicritère, le périmètre de l'ACV a été réduit à 5 scénarios et 7 indicateurs d'impacts tels que précisés ci-dessous :

⁷ Bio Intelligence Service. Projet PRIOR. Mise au point d'un outil de priorisation des enjeux environnementaux. Rapport, décembre 2005. Convention Ademe Eco-conception n°04 77 C 0072.

⁸ L'étude a été réalisée pour le compte de l'Ademe par Ginkgo 21 et PE International, en 2012. Le rapport de l'étude ainsi qu'un résumé non technique sont disponibles sur Internet.

Scénarios

Scénario	Abréviation
Véhicule électrique France	VE FR
Véhicule électrique Allemagne	VE DE
Véhicule électrique Europe (EU 27)	VE EU27
Véhicule thermique essence	VT ESS
Véhicule thermique diesel	VT DIES

Indicateurs d'impacts environnementaux

Indicateur	Abréviation
Changement climatique	CC
Acidification	Ac
Eutrophisation	Eutro
Consommation totale d'énergie	CED
Emissions de NOx	NOx
Déchets radioactifs	Dec Rad
Emissions radioactives (air)	Em Rad

Les résultats d'ACV utilisés pour le cas d'étude d'analyse multicritères sont présentés ci-dessous.

	VP 2012 DE	VP 2012 ES	VP 2012 EU27	VP 2012 FR	VP 2012 GB	VP 2012 IT	VP 2012 gasoline NEDC	VP 2012 Diesel NEDC
Potentiel d'épuisement des ressources minérales [kg Sb-Equiv.]	2,02E-01	2,01E-01	2,01E-01	2,01E-01	2,01E-01	2,02E-01	2,44E-01	2,38E-01
Potentiel d'épuisement des ressources fossiles [MJ]	1,83E+05	1,71E+05	1,69E+05	7,67E+04	2,09E+05	2,04E+05	3,69E+05	2,99E+05
Potentiel d'acidification [kg SO ₂ -Equiv.]	4,78E+01	7,26E+01	7,03E+01	3,43E+01	6,91E+01	5,33E+01	4,15E+01	4,90E+01
Potentiel d'eutrophisation [kg Phosphate-Equiv.]	4,00E+00	4,34E+00	4,27E+00	2,56E+00	5,63E+00	3,69E+00	3,75E+00	6,46E+00
Potentiel de changement climatique [kg CO ₂ -Equiv.]	1,78E+04	1,40E+04	1,49E+04	6,78E+03	1,70E+04	1,62E+04	2,69E+04	2,22E+04
Potentiel de création d'ozone photochimique [kg Ethene-Equiv.]	4,78E+00	6,54E+00	5,86E+00	3,74E+00	5,55E+00	5,44E+00	1,08E+01	1,07E+01
CO [kg]	1,11E+01	9,16E+00	1,08E+01	5,93E+00	9,85E+00	9,84E+00	6,69E+01	6,64E+01
CO ₂ [kg]	1,87E+04	1,34E+04	1,51E+04	6,69E+03	1,69E+04	1,59E+04	2,76E+04	2,21E+04
Déchets faiblement radioactifs [kg]	6,51E-01	5,54E-01	6,95E-01	1,42E+00	5,00E-01	3,18E-01	7,91E-02	8,03E-02
Déchets moyennement radioactifs [kg]	3,25E-01	2,67E-01	3,31E-01	6,30E-01	2,46E-01	1,48E-01	4,16E-02	4,20E-02
NOx [kg]	2,34E+01	2,76E+01	2,66E+01	1,41E+01	3,69E+01	2,26E+01	2,00E+01	3,48E+01
PM (10 - 2,5) [kg]	1,27E+00	1,38E+00	1,40E+00	1,22E+00	1,31E+00	1,39E+00	7,25E-01	6,96E-01
Consommation d'énergie primaire non renouvelable [MJ]	2,71E+05	2,48E+05	2,66E+05	2,81E+05	2,79E+05	2,53E+05	3,89E+05	3,18E+05
Consommation d'énergie primaire renouvelable [MJ]	3,78E+04	4,38E+04	3,26E+04	2,13E+04	1,55E+04	3,64E+04	2,18E+04	1,34E+04
Consommation d'énergie primaire totale [MJ]	3,09E+05	2,92E+05	2,99E+05	3,02E+05	2,95E+05	2,90E+05	4,11E+05	3,32E+05
Emiss. radioactives dans l'air [Bq I129-Equiv.]	7,27E+08	6,66E+08	7,76E+08	8,77E+08	8,98E+08	5,96E+08	6,97E+08	6,87E+08
Emiss. radioactives dans l'eau [Bq I129-Equiv.]	3,37E+08	3,23E+08	5,04E+08	1,44E+09	3,38E+08	2,87E+08	9,69E+07	9,80E+07
Résidus radioactifs [kg]	3,45E+01	3,05E+01	3,85E+01	8,15E+01	2,79E+01	1,92E+01	7,32E+00	7,35E+00
Déchets radioactifs [kg]	5,08E-02	4,58E-02	6,25E-02	1,51E-01	4,34E-02	3,32E-02	1,27E-02	1,28E-02
SO ₂ [kg]	2,77E+01	4,76E+01	4,51E+01	2,16E+01	3,78E+01	3,10E+01	2,54E+01	2,30E+01
COV [kg]	5,58E+00	6,87E+00	5,80E+00	5,48E+00	5,67E+00	6,12E+00	1,75E+01	1,70E+01

Tableau 2. Tableau des résultats utilisés pour l'analyse multicritère. Sont surlignés les scénarios et indicateurs sélectionnés.

3.3 Méthode pour le cas d'étude

L'analyse multicritère pour le cas d'étude a été réalisée avec les deux méthodes préconisées à l'issue de l'état de l'art, respectivement MACBETH et ELECTRE (Electre III). Par ailleurs, pour la méthode MACBETH, deux systèmes de pondération différents ont été testés : d'une part la moyenne pondérée (MP), et d'autre part l'intégrale de Choquet k-additive (IC).

Au total, 12 participants de 7 entreprises différentes ont réalisé l'exercice d'analyse multicritère sur le cas d'étude (respectivement 11 pour MACBETH, et 12 pour ELECTRE III). La plupart des participants sont des experts ACV, et tous sont des spécialistes des questions environnementales. Dans la présentation des résultats ci-dessous, les noms des participants ont été anonymisés et sont notés de A1 à G2.

Suite à une présentation du cas d'étude et des résultats ACV, l'exercice a consisté à soumettre chaque participant à 2 questionnaires, respectivement pour la méthode MACBETH et pour la méthode ELECTRE III. Chaque questionnaire contenait ses propres instructions.

Les réponses aux questionnaires ont été traitées par l'Ecole des Mines d'Alès (laboratoire LGI2P, équipe KID), et leur exploitation a permis d'obtenir les résultats présentés ci-dessous.

Par ailleurs, dans le but de compléter l'analyse et tester une méthode supplémentaire connue des praticiens ACV, la méthode PRIOR a été utilisée pour traiter les résultats du cas d'étude, et les résultats ont été comparés à ceux obtenus avec MACBETH et ELECTRE. Cette application présente l'intérêt de tester et comparer une méthode typique représentative de ce qui se pratique en ACV pour l'analyse multicritère. La méthode PRIOR a été appliquée selon deux jeux de facteurs de normalisation différents (respectivement ILCD et ReCiPe).

3.4 Résultats obtenus

Le synoptique de la figure 2 présente l'ensemble des résultats obtenus dans le cadre du cas d'étude. L'ensemble de ces résultats est détaillé dans le rapport d'étude. Dans cette synthèse ne sont présentés que certains des résultats « finaux » (ie. les classements finaux des scénarios avec chacune des deux méthodes) permettant la présentation de la comparaison entre méthodes.

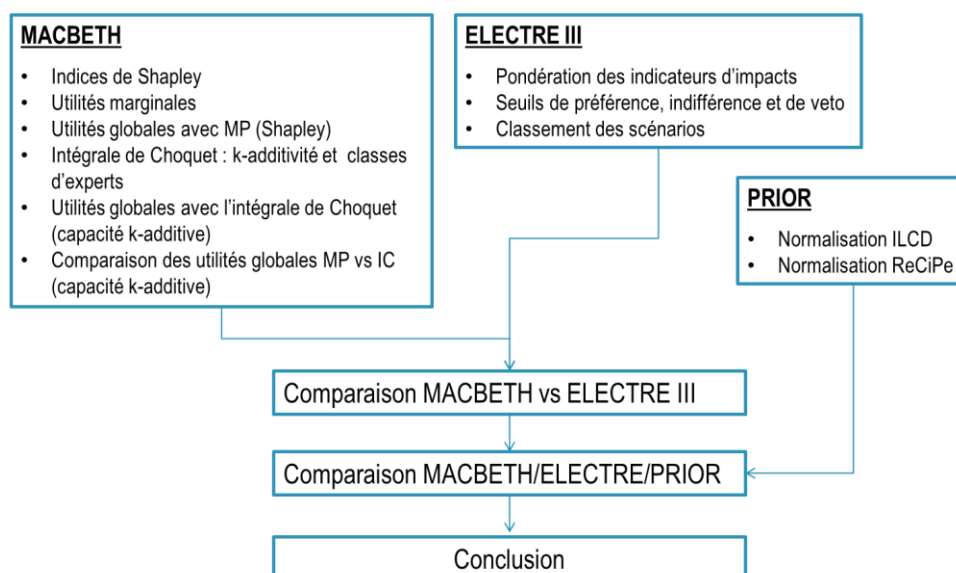


Figure 2. Résultats obtenus et logique de présentation des résultats

3.4.1 Résultats avec MACBETH (intégrale de Choquet k-additive)

Le tableau 3 ci-dessous présente les résultats obtenus pour le classement des scénarios véhicule, pour 11 experts, avec la méthode Macbeth (avec intégrale de Choquet k-additive).

Experts	Scénarios	VE DE	VE EU 27	VE FR	VT Ess	VT Dies
F1		0,368689	0,210718	0,263979	0	5,28E-05
F2		0,367683	0,292482	0,324523	0,126186	0,0720442
E2		0,500165	0,444254	0	0,300566	0,159841
E1		0,483642	0,373161	0,293801	0,340709	0,24904
D2		0,642944	0,459913	0,97553	0,27547	0,401575
D1		0,363987	0,524919	0,905762	0,595174	0,191432
G2		0,457319	0,512912	0,861002	0,442842	0,337881
G1		0,417275	0,216375	0,580203	0,486585	0,534112
B1		0,619948	0,55744	0,899022	0,541752	0,336403
B2		0,42937	0,142641	0,427866	0,143171	0,213318
A1		0,087101	0,142831	0,871163	0,279131	0,000208

Tableau 3. Méthode MACBETH. Scores des utilités globales avec l'intégrale de Choquet k-additive. En vert : les meilleurs choix ; en orange : les moins bons choix

Avec cette méthode, le choix du meilleur scénario se répartit entre le véhicule VE FR (6 répondants sur 11) et le véhicule VE DE (5 répondants sur 11). A noter que dans 5 cas sur les 6 exprimant leur préférence pour le véhicule VE FR, le score final est un score plutôt fort (entre 0,85 et 0,98), marquant le choix sans ambiguïté, ce qui est moins le cas pour ceux dont le choix se porte sur le véhicule VE DE.

3.4.2 Résultats avec ELECTRE III

3.4.2.1 Pondération des critères avec Electre (Simos)

Le tableau 4 ci-dessous donne le résultat de la pondération des indicateurs d'impacts environnementaux pour le cas d'étude, pour chacun des 12 experts.

Indicateurs Experts	CC	AC	Eutro	CED	Dec rad	Em rad	NOx
A1	0,272727	0,181818	0,181818	0,0606061	0,0606061	0,0606061	0,181818
B2	0,257143	0,0571429	0,0571429	0,142857	0,2	0,228571	0,0571429
B1	0,227273	0,151515	0,151515	0,227273	0,0606061	0,030303	0,151515
D1	0,25	0,25	0,0952381	0,142857	0,0238095	0,0714286	0,166667
C1	0,244565	0,179348	0,119565	0,179348	0,0163043	0,0163043	0,244565
D2	0,203125	0,125	0,015625	0,257812	0,0703125	0,0703125	0,257812
E1	0,236111	0,0416667	0,0416667	0,125	0,194444	0,236111	0,125
E2	0,0454545	0,0454545	0,121212	0,0909091	0,257576	0,257576	0,181818
F1	0,219512	0,134146	0,134146	0,243902	0,0365854	0,0365854	0,195122
F2	0,257143	0,171429	0,142857	0,228571	0,0571429	0,0285714	0,114286
G1	0,21875	0,09375	0,0625	0,15625	0,21875	0,21875	0,03125
G2	0,173913	0,076087	0,076087	0,23913	0,152174	0,0217391	0,26087

Tableau 4. Pondération des indicateurs d'impacts par les experts avec la méthode SIMOS. En vert : les meilleurs scores (ie. les indicateurs ayant le plus d'importance aux yeux de l'expert) ; en orange : les moins bons scores (ie. les indicateurs ayant le moins d'importance aux yeux de l'expert). Ici, la somme des poids pour un expert donné est égale à 1.

3.4.2.2 Classement des scénarios avec Electre III

Le tableau ci-dessous donne le classement final des scénarios, pour chacun des 12 experts. On note que les choix finaux sont beaucoup plus dispersés qu'avec la méthode Macbeth, 4 experts sur les 12 portant leur préférence sur les véhicules thermiques essence et diesel.

Scénarios Experts	VE DE	VE EU 27	VE FR	VT Ess	VT Dies
A1	3	2	1	5	4
B2	3	4	3	5	1
B1	1	5	3	2	4
D1	2	5	1	5	5
C1	1	5	4	4	4
D2	2	3	1	4	5
E1	3	5	4	2	4
E2	3	5	5	1	4
F1	2	5	1	4	5
F2	1	5	3	2	4
G1	3	4	4	5	1
G2	2	3	1	5	4

Tableau 5. Classement des scénarios par les experts (rangs de 1 à 5). En vert : les meilleurs classements (rang 1) ; en orange : les moins bons classements.

3.5 Résultats avec PRIOR

Le tableau ci-dessous présente les résultats du classement obtenu en appliquant la méthode PRIOR, selon deux jeux de facteurs de normalisation différents, respectivement ILCD et ReCiPe. Pour rappel, l'application de la méthode PRIOR impose, par construction, un système de préférences unique et invariant, donc indépendant des experts.

		VE DE	VE UE27	VE FR	VT ESS	VT DIES	Indicateurs les plus contributeurs (par ordre d'importance) au résultat final
ILCD	Résultat	19,98	21,74	28,53	20,17	19,77	1. Ém. Rad 2. Énergie 3. CO2
	%	101%	110%	144%	102%	100%	
	Rang	2	4	5	3	1	
ReCiPe	Résultat	11,39	11,79	11,17	13,27	12,79	1. Énergie 2. CO2 3. Ém. Rad
	%	102%	106%	100%	119%	115%	
	Rang	2	3	1	5	4	

Figure 3. Résultats de l'analyse multicritère obtenus avec la méthode PRIOR pour deux systèmes de normalisation différents (respectivement ILCD et ReCiPe)

Avec PRIOR/ILCD, c'est le véhicule thermique diesel qui ressort en première position tandis que le véhicule électrique VE FR est classé en dernière position. Cela est principalement dû au système de normalisation ILCD qui pénalise très fortement les émissions radioactives dans l'air en retenant une valeur de référence européenne très inférieure à celle de ReCiPe (facteur 5).

A l'inverse, avec PRIOR/ReCiPe, c'est le véhicule électrique VE FR qui vient en première position, tandis que le véhicule thermique essence prend la dernière place (l'accent étant mis avec les facteurs ReCiPe sur l'énergie primaire).

3.6 Comparaison des résultats obtenus avec les différentes méthodes

Le tableau 6 donne une comparaison des résultats obtenus respectivement avec chacune des trois méthodes. Pour rappel, les classements obtenus avec MACBETH (intégrale de Choquet k-additive) et ELECTRE III sont des classements individuels pour chaque expert, tandis que le classement avec PRIOR donne un résultat indépendant des experts, donc identique pour chaque expert. Pour l'exemple, ce sont les résultats obtenus avec PRIOR/ReCiPe qui sont présentés.

	Meilleur(s) score ou classement(s)			Moins bon(s) score ou classement(s)		
	Macbeth Ch k-add	Electre III	Prior/ReCiPe	Macbeth Ch k-add	Electre III	Prior/ReCiPe
F2	VE DE	VE FR	VE FR	VT ESS	VE EU, VT DIES	VT ESS
F1	VE DE	VE DE	VE FR	VT DIES	VE EU	VT ESS
E2	VE DE	VT ESS	VE FR	VE FR	VE FR, VE EU	VT ESS
E1	VE DE	VT ESS	VE FR	VT DIES	VE EU	VT ESS
D2	VE FR	VE FR	VE FR	VT ESS	VT DIES	VT ESS
D1	VE FR	VE FR	VE FR	VT DIES	VE EU	VT ESS
G2	VE FR	VE FR	VE FR	VT DIES	VT ESS	VT ESS
G1	VE FR	VT DIES	VE FR	VE EU	VT ESS	VT ESS
B1	VE FR	VE DE	VE FR	VT DIES	VE EU	VT ESS
B2	VE DE	VT DIES	VE FR	VE EU	VT ESS	VT ESS
A1	VE FR	VE FR	VE FR	VT DIES	VT ESS	VT ESS
C1	-	VE DE	VE FR	-	VE EU	VT ESS

Tableau 6. Comparaison des résultats finaux avec Macbeth IC k-additive, Electre III, et Prior/ReCiPe (les choix identiques sont repérés en vert, les choix totalement divergents – 3 scénarios différents – sont repérés en orange)

Sur les 12 participants (11 réponses complètes sur l'ensemble des méthodes) :

- Il y a convergence sur le même meilleur scénario pour seulement 4 participants.
- Pour 3 participants, les classements pour le meilleur scénario sont à chaque fois différents pour chaque méthode.
- Pour le moins bon scénario, il n'y a convergence sur un même « pire » scénario pour aucun participant.

Par ailleurs il convient de noter que ces analyses pourraient être complétées et modifiées si l'on introduisait les résultats obtenus avec la méthode MACBETH/moyenne pondérée avec les indices de Shapley d'une part, et la méthode PRIOR/ILCD d'autre part (par exemple, la méthode PRIOR/ILCD donne comme meilleur choix le scénario véhicule diesel).

3.7 Conclusion sur le cas d'étude

Ce cas d'étude a permis de tester, sur une ACV comparative, chacune des deux méthodes recommandées en conclusion de l'état de l'art : MACBETH et ELECTRE. De plus, pour MACBETH, deux variantes ont été testées : la moyenne pondérée (avec l'indice de Shapley) et l'intégrale de Choquet. Par ailleurs, la méthode PRIOR a également été utilisée pour compléter le cas d'étude, avec deux variantes relatives au système de normalisation (ILCD et ReCiPe).

La comparaison des différentes méthodes testées met en évidence la sensibilité des résultats de l'analyse multicritère au choix de la méthode. En effet, les résultats obtenus sont sensiblement différents, au sein du panel des experts interrogés, avec la méthode MACBETH et avec la méthode ELECTRE III. Ils le sont également au sein des variantes de MACBETH, selon que l'on utilise, pour l'agrégation, la somme pondérée ou l'intégrale de Choquet. En revanche, pour PRIOR, dont les résultats sont, par construction, indépendants des experts, la sensibilité importante vient de la phase de normalisation des résultats ACV avant la pondération.

La divergence des résultats obtenus avec les différentes méthodes montre également la nécessité de réaliser des analyses de sensibilité sur les méthodes MCDA afin de conforter les résultats, exercice qui n'a pas été conduit dans le cadre de cette étude.

Finalement, ce cas d'application démontre la faisabilité totale de l'application de l'analyse multicritère à l'ACV, nonobstant les moyens et compétences requis.

4 Guide recommandations à l'usage des praticiens ACV

Dans le contexte de l'aide à la décision multicritère, il est nécessaire de reconnaître la multiplicité des points de vue, autrement dit qu'il n'y a pas nécessairement une solution objectivement meilleure qu'une autre. L'amélioration d'un critère se fait souvent au détriment d'un autre, la solution optimale n'a alors plus de sens. Dans ce contexte, on préférera le concept de solution satisfaisante à celui de solution optimale. Le modèle d'aide à la décision ne peut être expurgé de toute subjectivité. Admettre cela c'est aussi accepter que les objectifs de l'aide à la décision ne sont peut-être pas de découvrir la solution idéale, mais de guider le décideur dans sa construction.

Le point commun entre les méthodes multicritères réside dans la confrontation, selon plusieurs perspectives, d'analyses de l'état actuel du monde (les conséquences d'une alternative) qui constituent la partie objective du modèle d'aide à la décision d'une part, et du monde tel que le souhaite le décideur (la satisfaction que procurent ces conséquences au décideur et l'importance qu'elles revêtent à ses yeux) qui constitue la partie subjective du modèle d'autre part. L'alternative choisie par le décideur sera celle qui se rapproche au mieux de ses espérances.

Plusieurs méthodes et outils ont été proposés pour la décision multicritère. Ils répondent à différentes problématiques : choix, rangement, tri.

La démarche générale est la suivante :

- structuration du problème,
- construction du modèle de préférences,
- analyse de sensibilité.

La construction du modèle de préférences est réalisée par la sollicitation des décideurs et/ou experts de l'entreprise qui sont amenés à se prononcer sur leurs préférences (en l'occurrence préférences relatives aux problématiques environnementales exprimées par les indicateurs d'impacts environnementaux).

4.1 Critères d'aide au choix

Le guide spécifie les différents critères à considérer pour le choix d'une méthode parmi l'ensemble des méthodes disponibles. Ces critères sont les suivants (ils sont explicités dans le rapport d'étude) :

- Nombre d'indicateurs d'impacts environnementaux et nombre de scénarios à comparer
- Séparabilité⁹ et indépendance¹⁰ des indicateurs d'impacts environnementaux

⁹ Séparabilité : Les critères sont séparables si, pour chaque critère i , la propriété suivante est vérifiée : si sur le critère i , la valeur a_i est préférée à la valeur b_i , pour tout couple d'alternatives (a,b) ayant respectivement les scores a_i et b_i sur i , et ayant les mêmes valeurs sur tout autre critère que i , alors a est préférée à b . Un exemple de test pour la séparabilité est proposé dans le paragraphe 3 ci-après.

- Acceptation de la compensation
- Opérateur d'agrégation
- Elicitation des paramètres du modèle de préférence : élicitation directe ou indirecte
- Méthode AC ou méthode CA
- Mélange d'indicateurs qualitatifs et quantitatifs

4.2 Recommandations pour l'aide au choix entre MACBETH et ELECTRE

4.2.1 Recommandations générales

Tout en gardant en tête que le choix d'une méthode d'analyse multicritère est indissociable du contexte et que, par conséquent, il est difficile de formuler des recommandations dans l'absolu, les enseignements de cette étude nous porte à formuler a minima trois recommandations pour le choix d'une méthode parmi d'autres :

- Les techniques de sommes pondérées (de type PRIOR par exemple), telles que généralement pratiquées en ACV, ne sont pas adaptées à l'ACV (notamment, d'un point de vue mathématique, les conditions ne sont pas remplies) et doivent être évitées.
- Préférer une méthode d'élicitation indirecte des préférences.
- La méthode Macbeth avec intégrale de Choquet 2-additive semble constituer le meilleur compromis coût/performance (fidélité dans l'expression des préférences et coûts de mise en œuvre de la méthode). Ainsi, si les moyens à disposition le permettent, le choix de cette méthode est recommandé prioritairement.

4.2.2 Aide au choix de la méthode

La première question à régler dans une application d'analyse multicritère pour l'aide à la décision est de choisir la méthode adéquate en fonction des objectifs, des données et connaissances disponibles. Le premier point porte donc sur le choix de la méthode (choix restreint ici à MACBETH ou ELECTRE).

Le choix de la méthode s'effectue en fonction du choix de certains paramètres définis dans la phase de structuration du problème (objectif de l'étude, nombre d'indicateurs, nombre de scénarios à comparer, acceptation ou non de la compensation, etc.).

Le choix s'effectue également en fonction des moyens disponibles pour réaliser l'analyse multicritère (disponibilité des décideurs, recours à l'expertise, coût d'acquisition d'un outil). D'une manière générale, il faut considérer que la méthode ELECTRE requiert un moindre investissement des experts (moindre complexité) et est plus intuitive, mais est moins discriminante en retour.

4.2.2.1 Recommandation pour une méthode d'élicitation indirecte des préférences

D'une manière générale, l'état de l'art réalisé sur les méthodes d'analyse multicritère a conduit à recommander, dans le cas particulier de l'aide à la décision en ACV, des méthodes d'élicitation indirecte permettant de révéler a priori les préférences du décideur de manière plus fiable.

Ceci conduit à choisir préférentiellement, nonobstant les moyens engagés, la méthode MACBETH. Dans l'absolu, c'est-à-dire toujours indépendamment des ressources disponibles, le modèle sera avantageusement amélioré par la mise en œuvre d'une pondération avec intégrale de Choquet 2-additive.

¹⁰ On parle d'indépendance si le score d'une alternative sur un critère n'est pas corrélé au score d'un autre critère.

4.2.2.2 Objectif de surclassement

Si l'objectif de l'analyse multicritère pour l'aide à la décision consiste uniquement à identifier le scénario surclassant tous les autres, sans forcément calculer un score pour chacun des scénarios, alors le choix rationnel (économie de moyens, complexité moindre) se portera sur la méthode ELECTRE.

A l'inverse, si l'objectif est d'obtenir un score pour chacun des scénarios pour les classer et les comparer, alors il est préférable de choisir la méthode MACBETH.

4.2.2.3 Non-compensation

Si le décideur (ou panel de décideurs) fait le choix de la non-compensation entre catégories d'impacts environnementaux, alors le choix se portera sur la méthode ELECTRE.

Inversement, si la compensation entre impacts est autorisée (voire souhaitée) par le décideur, le choix se portera sur la méthode MACBETH.

4.2.2.4 Indicateurs qualitatifs

Si le jeu d'indicateurs pour l'aide à la décision est un mélange d'indicateurs quantitatifs et qualitatifs, il faudra préférer la méthode ELECTRE qui, par construction, autorise une manipulation plus facile des indicateurs qualitatifs.

4.2.2.5 Logigramme d'aide au choix

Le schéma ci-dessous synthétise les recommandations édictées ci-dessus pour en faire un diagramme d'aide au choix de la méthode d'analyse multicritère pour l'ACV.

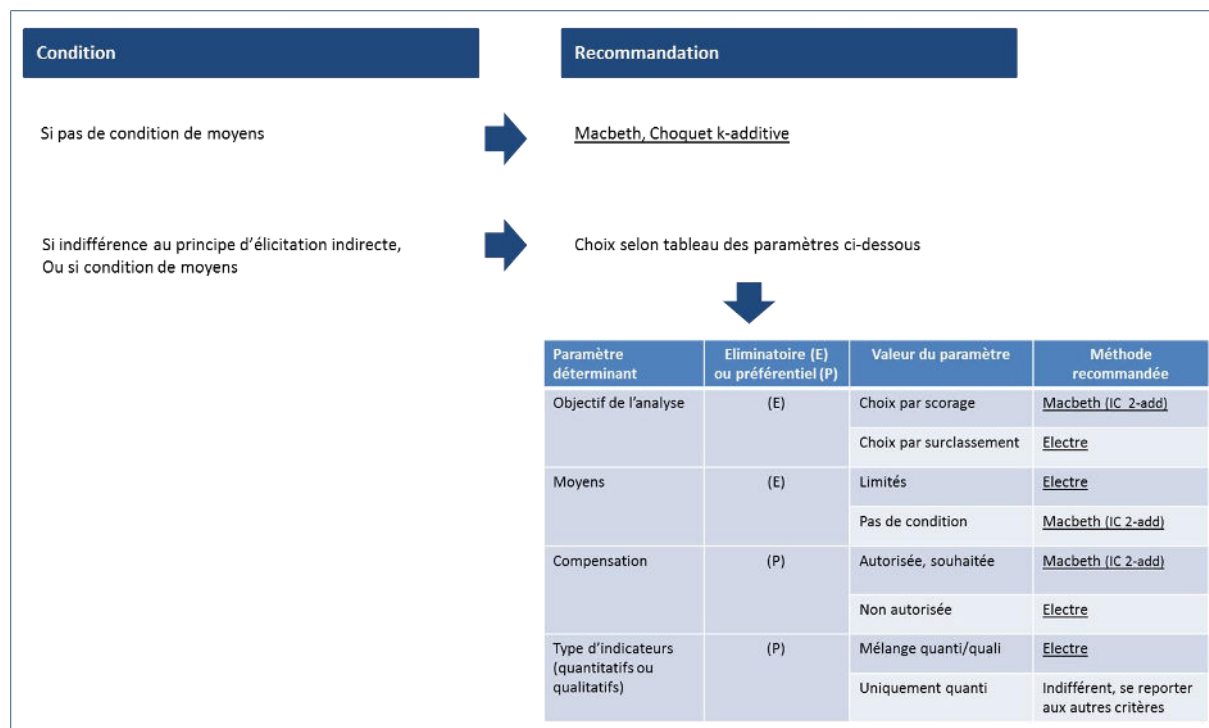


Figure 4. Schéma d'aide au choix de la méthode d'analyse multicritère pour l'ACV

Par ailleurs le guide aborde également le cas du multi-évaluateur (lorsque l'analyse multicritère est soumise à un panel de décideurs), de la généralisation de l'analyse multicritère pour l'ACV dans l'entreprise, et des moyens à allouer à l'analyse multicritère.

5 Conclusion générale

Cette étude avait pour objectif d'explorer dans quelle mesure les méthodes d'analyse multicritère peuvent être appliquées à l'analyse de cycle de vie afin de faciliter la prise de décision sur la base de résultats d'ACV.

Les principales conclusions qui ressortent de cette étude sont les suivantes :

- Partant du constat qu'il n'existe pas de meilleure méthode MCDA dans l'absolu, l'étude oriente néanmoins, à l'issue de l'état de l'art, le choix vers les méthodes MACBETH et ELECTRE. A priori, ces deux méthodes permettent de répondre à l'ensemble des situations contextuelles pouvant être rencontrées avec l'ACV.
- Par ailleurs, le guide de recommandations à l'usage des praticiens et utilisateurs d'ACV établit des recommandations de choix entre MACBETH et ELECTRE III en fonction du contexte particulier du(des) décideur(s) ayant à utiliser l'analyse multicritère..
- Le cas d'étude réalisé montre la forte sensibilité des résultats (classement des scénarios pour l'aide à la décision) à la méthode utilisée.
- L'étude montre que la méthode MACBETH avec l'intégrale de Choquet 2-additive pour la pondération semble constituer le meilleur compromis entre, d'une part la recherche de transcription la plus fidèle des préférences du décideur, et d'autre part le coût d'information nécessaire.
- L'étude remet en cause les méthodes généralement pratiquées en ACV pour l'agrégation des indicateurs d'impacts environnementaux (appelées « pondération » en ACV), et montre que ces pratiques devraient être modifiées, car elles sont non justifiées scientifiquement, et surtout non pertinentes.

Finalement, cette étude démontre la faisabilité totale de l'application de l'analyse multicritère à l'ACV, nonobstant les moyens et compétences requis.

L'analyse multicritère, en révélant les préférences des décideurs, permet, plus que d'identifier le scénario idéal parmi un ensemble de scénarios, de construire la justification du choix d'un scénario d'ACV, et permet donc la justification de la prise de décision.

L'étude n'avait pas pour objet de « bouleverser » les évaluations de scénarii déjà bien connus des experts de ScoreLCA. L'objet était plutôt d'introduire des techniques multicritères finalement peu rencontrées en ACV comme :

- l'identification paramétrique indirecte qui nous paraît mieux correspondre à ce que l'on peut attendre d'un expert de domaine,
- des méthodes de type ELECTRE, plus qualitatives, plus sévères sur les phénomènes de compensation entre critères, mais moins gourmandes en quantité d'information attendue des experts,

- ou encore la modélisation de dépendances préférentielles dans les évaluations que nous avons utilisée pour montrer que la notion de poids a priori affecté à un critère ne fait pas toujours sens.

Enfin, nous avons ébauché la notion de modèle consensuel partagé par l'ensemble des experts en calculant des voisinages entre ceux-ci sur la base de leurs modèles 2-additifs. Il convient de noter que ces premiers résultats montrent qu'il n'y a pas de consensus qui se dégage. Des fonctionnalités de clustering hiérarchique permettent néanmoins de retrouver des tendances. La variabilité inter-juges des évaluations peut provenir des utilités comme des opérateurs d'agrégation. Une analyse de sensibilité plus poussée sur la base de ces premiers résultats aurait pu montrer comment utiliser les facteurs de variabilité pour orienter le débat entre les juges lors de la recherche d'un consensus. C'est sans doute une perspective à envisager.