2003s-53

Analyse multicritère : Étude et comparaison des méthodes existantes en vue d'une application en analyse de cycle de vie

Renaud Caillet

Série Scientifique
Scientific Series

Montréal
Août 2003

© 2003 Renaud Caillet. Tous droits réservés. *All rights reserved*. Reproduction partielle permise avec citation du document source, incluant la notice ©.
Short sections may be quoted without explicit permission, if full credit, including © notice, is given to the source.

CIRANO
Centre interuniversitaire de recherche en analyse des organisations

CIRANO

Le CIRANO est un organisme sans but lucratif constitué en vertu de la Loi des compagnies du Québec. Le financement de son infrastructure et de ses activités de recherche provient des cotisations de ses organisations-membres, d'une subvention d'infrastructure du ministère de la Recherche, de la Science et de la Technologie, de même que des subventions et mandats obtenus par ses équipes de recherche.

CIRANO is a private non-profit organization incorporated under the Québec Companies Act. Its infrastructure and research activities are funded through fees paid by member organizations, an infrastructure grant from the Ministère de la Recherche, de la Science et de la Technologie, and grants and research mandates obtained by its research teams.

Les organisations-partenaires / The Partner Organizations

PARTENAIRE MAJEUR
. Ministère du développement économique et régional [MDER]

PARTENAIRES
. Alcan inc.
. Axa Canada
. Banque du Canada
. Banque Laurentienne du Canada
. Banque Nationale du Canada
. Banque Royale du Canada
. Bell Canada
. Bombardier
. Bourse de Montréal
. Développement des ressources humaines Canada [DRHC]
. Fédération des caisses Desjardins du Québec
. Gaz Métropolitain
. Hydro-Québec
. Industrie Canada
. Ministère des Finances [MF]
. Pratt & Whitney Canada Inc.
. Raymond Chabot Grant Thornton
. Ville de Montréal

. École Polytechnique de Montréal
. HEC Montréal
. Université Concordia
. Université de Montréal
. Université du Québec à Montréal
. Université Laval
. Université McGill

ASSOCIÉ À :
. Institut de Finance Mathématique de Montréal (IFM^2)
. Laboratoires universitaires Bell Canada
. Réseau de calcul et de modélisation mathématique [RCM^2]
. Réseau de centres d'excellence MITACS (Les mathématiques des technologies de l'information et des systèmes complexes)

Les cahiers de la série scientifique (CS) visent à rendre accessibles des résultats de recherche effectuée au CIRANO afin de susciter échanges et commentaires. Ces cahiers sont écrits dans le style des publications scientifiques. Les idées et les opinions émises sont sous l'unique responsabilité des auteurs et ne représentent pas nécessairement les positions du CIRANO ou de ses partenaires.
This paper presents research carried out at CIRANO and aims at encouraging discussion and comment. The observations and viewpoints expressed are the sole responsibility of the authors. They do not necessarily represent positions of CIRANO or its partners.

ISSN 1198-8177

Analyse multicritère : Étude de comparaison des méthodes existantes en vue d'une application en analyse de cycle de vie *

Renaud Caillet†

Résumé / *Abstract*

L'analyse de cycle de vie est un concept environnemental de plus en plus appliqué dans le monde de l'entreprise. Il ne remplace pas les normes environnementales, mais donne aux décideurs un moyen de comparer différentes solutions possibles (qui peuvent être des processus, des biens, des services, etc.). Il y a peu, ce concept a fait l'objet de normes environnementales ISO. Cependant, l'analyse de cycle de vie est toujours un domaine où la recherche est active (définition des impacts, pondération, etc.). Notamment, un des problèmes de l'analyse de cycle de vie est de combiner les différents indicateurs, de les agréger et d'en déduire un classement des solutions possibles.

L'analyse multicritère est un concept plus vieux, mais sa structure est équivalente à celle de l'analyse de cycle de vie. De plus, c'est aussi un outil pour des décideurs, permettant de sélectionner une solution. De nombreuses méthodes ont été proposées pour agréger les performances de chacune des solutions relativement à chacun des critères.

Les deux premières parties de ce papier sont une présentation de quelques unes des principales méthodes d'analyse multicritère; ainsi qu'une brève introduction à l'analyse de cycle de vie. Nous évaluons ensuite quels pourraient être les apports de l'analyse multicritère à l'analyse de cycle de vie, et quels en seraient les obstacles.

L'idée de base est d'appliquer l'analyse multicritère à l'analyse de cycle de vie. Quelques papiers ont déjà été écrits en ce sens, proposant des règles pour construire une famille cohérente de critères, etc. Mais parmi les nombreuses méthodes multicritère, nous ne savons toujours pas laquelle choisir. Il y a bien des façons d'agréger des indicateurs, et la méthode d'analyse multicritère devrait être évaluée selon plusieurs points : est-elle compensatoire ?, fournit-elle un résultat numérique ?, etc. Nous pensons qu'il n'y a pas de méthode unique, applicable à tous les problèmes. On devrait certainement choisir la méthode la plus adaptée à un problème et un contexte spécifique. Ce papier évalue également certaines méthodes à l'aide de leurs logiciels associés, en implémentant des données d'analyse de cycle de vie.

Mots clés : Méthode d'analyse multicritère, analyse de cycle de vie, analyse multicritère d'aide à la décision, agrégation, choix de méthode.

---

* Je remercie Bernard Sinclair-Desgagné et Dina Feigenbaum du CIRANO qui m'ont si bien encadré, Renée Michaud, Sandra Estrela, Pascal Lesage, Gontran Bage et Jean-François Ménard du CIRAIG pour leur aide ainsi que Caroline Gaudreault et Erica Salazar de la Chaire CRSNG pour leurs précieux conseils.

† Étudiant en maîtrise, CIRANO, Montréal, Canada et École Polytechnique, Palaiseau, France.

Life cycle analysis is an environmental concept that is more and more applied in companies that take care of environment. It does not replace environmental laws, but it gives managers a mean to compare different alternatives (which can be goods, processes, services, etc.). Lately this concept has been integrated in environmental ISO norms. However it is still a subject where research is quite active (definition of impacts, weighting, etc.). One problem for life cycle analysis is to combine the different indicators and aggregate them, to get a ranking of all the alternatives.

Multicriteria analysis is an older concept , but its framework fits the methodology of life cycle analysis. Moreover it is also a tool for managers to select an alternative. Many methods have been proposed to aggregate the performances of an alternative relatively to a criterion.

The first two parts consist in a presentation of some multicriteria decision making methods, and a brief presentation of life cycle analysis. Then we evaluate what could multicriteria analysis bring to life cycle analysis, and what are the obstacles for the application of multicriteria analysis to life cycle analysis.

The basic idea is to apply multicriteria analysis to life cycle analysis. Some papers have already been written, proposing rules to get coherent criteria, etc. But among the many existing multicriteria methods, we still don't know which one to choose. There are many ways to aggregate indicators and the multicriteria method chosen should be evaluated on some points : is it compensatory ?, does it provide a real number as a result ?, etc. We think that there is no unique method which can be applied to all problems, but we should certainly choose the most suitable method for a specific problem or context. In this paper some methods will be evaluated with their associated softwares, using life cycle analysis data.

Keywords: *Multicriteria analysis (MCA) method, life cycle analysis (LCA), multiple criteria decision aid, aggregation, choice of method.*

SOMMAIRE

Introduction 5

I- Présentation des principales méthodes d'analyse multicritère 6

A- Les méthodes de sur-classement 7
1- Les méthodes ELECTRE 7
a. ELECTRE I 7
b. ELECTRE III 10
c. ELECTRE IV 13
2- Les méthodes PROMETHEE 14
a. Ossature générale 14
b. PROMETHEE I 16
c. PROMETHEE II 16

B- Les méthodes basées sur la théorie de l'utilité 16
1- MAUT 16
2- Somme pondérée 17

C- Autres méthodes 18
1- AHP 18
2- MACBETH 21

II- Présentation du concept d'analyse de cycle de vie 23

A- Définition de l'objectif et des frontières du système 24
B- Inventaire 25
C- Détermination des poids d'impact 26
D- Interprétation 27

III- Application de l'analyse multicritère à l'analyse de cycle de vie 29

A- État des lieux des méthodes existantes 29
B- Apport de l'analyse multicritère à la pondération 30
C- Problèmes pratiques à l'implémentation de l'analyse multicritère 30

IV- Choix d'une méthode d'analyse multicritère pour l'analyse de cycle de vie 31

A- Élimination de méthodes par la solidité de leurs bases mathématiques 32
B- Critères possibles pour le choix d'une méthode appliquée à l'analyse de cycle de vie 33
C- Compte-rendu de quelques implémentations de méthodes d'analyse multicritère 34
1- Implémentation d'ELECTRE III et IV 37
2- Implémentation de la méthode de Somme pondérée 39
3- Implémentation de PROMETHEE I et II 40
4- Implémentation de MACBETH 43
5- Remarques d'ordre général 44

Conclusion 45

Bibliographie 47

Introduction

Ce rapport se découpe en trois grandes phases. Les deux premières phases font l'objet d'un chapitre chacune, et sont essentiellement des présentations de concepts. La première présentation concerne l'analyse multicritère. Après une présentation succincte des idées de base, les méthodes les plus connues en analyse multicritère sont présentées. La seconde présentation concerne l'analyse de cycle de vie.

Finalement, la troisième grande phase concerne l'application de l'analyse multicritère à l'analyse de cycle de vie. Cette phase est découpé en deux parties distinctes. La première présente les avantages, inconvénients et contraintes que l'on aurait à appliquer l'analyse multicritère à l'analyse de cycle de vie. La seconde présente les avantages et défauts des méthodes d'analyse multicritère dans leur implémentation (peu approfondie) à l'analyse de cycle de vie. Elle doit aider à faire un choix de méthode d'analyse multicritère.

La conclusion présente les idées personnelles, d'un novice en analyse multicritère et en analyse de cycle de vie.

I- PRESENTATION DES PRINCIPALES METHODES D'ANALYSE MULTICRITERE D'AIDE A LA DECISION

Les méthodes d'analyse multicritère sont des outils d'aide à la décision développés depuis les années 1960. De nombreuses méthodes ont été proposées afin de permettre aux décideurs de faire un « bon » choix. Pour certains experts du domaine, ce choix existe dans l'esprit du décideur, et le processus d'aide à la décision doit le faire ressortir. Pour d'autres, le processus d'aide à la décision doit créer ce choix. Le concept d'analyse multicritère n'étant pas toujours très clair, l'exemple suivant permettra de mieux comprendre le contexte, les acteurs et le vocabulaire de l'analyse multicritère.

Un ou plusieurs décideurs sont face à un problème, et disposent pour cela de plusieurs solutions possibles (qui seront aussi appelées « actions » par la suite). Le décideur prend en compte plusieurs critères (des points de vue) pour juger ces actions. Mais aucune action ne se dégage du lot (c'est à dire qu'aucune action n'est la plus performante pour tous les critères). De plus, les critères sur lesquels sont jugés ces actions sont conflictuels.

Prenons un exemple anodin: un consommateur veut acheter une nouvelle voiture. Les critères dont il tient compte pour faire son choix sont le prix, la puissance et la beauté de la voiture. Il a le choix entre plusieurs modèles, de toutes marques. A priori, le critère puissance et le critère prix vont rentrer en conflit dans le choix de la voiture (on « paie » pour avoir plus de puissance). De plus, entre la Fiat bas de gamme et la Ferrari, de nombreuses autres voitures (solutions possibles) sont envisageables pour le consommateur. Parmi toutes ces possibilités, le choix est difficile, et les méthodes d'analyse multicritère d'aide à la décision peuvent aider notre consommateur à faire son choix.

L'objectif des méthodes multicritère est ainsi d'aider à prendre une décision (ou à évaluer entre elles plusieurs solutions, sans avoir forcément de choix à effectuer au final) dans les situations de choix où aucune possibilité n'est parfaite; et où différents critères entrent en conflit. L'idée de base est de considérer tous les critères entrant en compte; leur attribuer un poids lié à leur importance relative; de noter chaque action par rapport à tous les critères; et finalement d'agréger ces résultats. On peut ici faire un parallèle avec le classement de plusieurs élèves d'une même classe : Jean a eu 17 en mathématiques et 13 en physique. Les mathématiques ont un coefficient 4 contre 3 pour la physique. On va alors pouvoir ranger tous les élèves de la classe en considérant la somme pondérée de leurs notes. Ceci est une façon triviale de trier des solutions, mais d'autres possibilités existent. Le concept de pondération et agrégation est toutefois utilisé par toutes les méthodes d'analyse multicritère.

Un grand nombre de méthodes ont été étudiées, toutefois, afin d'éviter un document trop long et lourd; seules celles utilisées par la suite seront présentées. Les notes sur ces méthodes sont néanmoins disponibles.

De plus, l'explication de chacune des méthodes sera accompagnée d'un exemple abstrait. Cet exemple de base aura pour sujet le choix d'un site d'enfouissement de déchets. Les méthodes d'analyse multicritère ont déjà été utilisées pour ce genre de choix public, pour lequel le facteur coût n'est pas le seul critère entrant en jeu. Notre exemple évaluera 3 sites (A, B et C) selon 3 critères : coût, proximité de zones d'habitation et proximité d'une voie rapide. Les données que nous considérerons sont présentées dans le tableau suivant :

	Site A	Site B	Site C
Coût (millions d'euros)	9	5	9
Proximité de zones d'habitation (mètres)	200	1500	750
Proximité d'une voie rapide (mètres)	200	400	300

Pour le traitement d'exemples concrets, avec de véritables données d'analyse de cycle de vie, on se reportera à la partie IV, C.

Je vais néanmoins lister ici les méthodes que je n'ai pas retenues, après étude, pour être appliquées dans la suite de mon stage: ORESTE, QUALIFLEX, PAMSSEM, ELECTRE II, PROMETHEE III, PROMETHEE IV, SMARTS, SMARTER, ANP, REMBRANDT, Méthode basée sur les cônes de référence, Méthode STEP.

A) Les méthodes de sur-classement

1) Les méthodes ELECTRE

Ces méthodes ont été développées par Bernard Roy au début des années 1970. Il a ainsi initié toute une série de méthodes, dites de sur-classement, basées sur des comparaisons d'actions deux à deux. Celles-ci demandent peu d'information pour pouvoir être implémentées; de plus cette information est facilement accessible au décideur (en effet, il est plus facile de comparer deux actions, que de donner une évaluation précise de leurs performances); elles fournissent donc des résultats solides, mais pauvres.

a) ELECTRE I

Comme pour toute méthode multicritère, un premier travail consiste à poser correctement le problème. Cela se fait par la détermination d'un choix cohérent de critères. Cette étape permet également au décideur d'appréhender le problème auquel il est confronté avec une structure plus solide. On attribue ensuite des poids aux différents critères qui ont été considérés.

Différentes méthode sont possibles pour fixer une pondération; on peut, pour exemple, citer la méthode des cartes de SIMOS (on range tous les critères par ordre de préférence, puis on insère des cartes entre. Un écart d'une carte vaudra une différence de 1 sur la pondération, un écart de 0 carte vaudra une différence de 1, etc.). Notons que l'étape de pondération numérique est facultative avec ELECTRE I. Par contre, on doit ranger les critères en 3 catégories de poids : fort, moyen et faible.

Ensuite, vient le moment de l'évaluation de chaque action par rapport à chacun des critères. Les notes disponibles pour cette évaluation sont limitées, et vont dépendre du poids du critère. Si on évalue une action sur un critère de poids fort, on ne pourra mettre à cette action qu'une note appartenant à la série de valeurs : {10 , 7.5 , 5 , 2.5 , 0} . De même, si le critère est de poids moyen, la note devra appartenir au barème : {8 , 6.5 , 5 , 3.5 , 2} . Finalement, si le critère est de poids faible, on ne pourra mettre à l'action qu'une note appartenant à : {7 , 6 , 5 , 4 , 3} . Ainsi, toutes les notes attribuées ont la

même base de notation, et il n'y a pas à normer les résultats, ni à tenir compte des poids lors de l'agrégation des résultats.

Grâce à cette notation, on peut construire une matrice d'évaluation; avec en ligne les actions, et en colonnes les critères. Revenons à notre exemple de choix de site d'enfouissement. Considérons les critères « coût » et « proximité d'une zone d'habitation » comme des critères de poids fort. Le critère « proximité d'une voie rapide » aura un poids moyen.

	Coût	Proximité d'une zone d'habitation	Proximité d'une voie rapide
Site A	2.5	2.5	8
Site B	7.5	7.5	3.5
Site C	2.5	5	6.5

De cette matrice, on va pouvoir tirer les indices de concordance et de discordance. Il faut ici comprendre que l'on désigne l'indice de concordance de l'hypothèse «l'action A est meilleure que l'action B», et l'indice de discordance de l'hypothèse « l'action A est meilleure que l'action B». L'indice de concordance mesure la confiance que l'on a que A soit meilleur que B. L'indice de discordance mesure le regret que l'on a, à voir A devant B. Voyons comment les calculer.

En comparant les notes des actions A et B, pour un critère quelconque, on observe immédiatement si A se comporte mieux que B ou non (on dit que A surclasse B pour le critère considéré). On retient ensuite tous les critères pour lesquels A surclasse B. On additionne les poids de tous les critères retenus. Notons n le résultat. En divisant n par la somme totale des poids de tous les critères (cette opération est destinée à normer), on obtient l'indice de concordance de l'hypothèse « l'action A est meilleure que l'action B ». La valeur obtenue sera comprise entre 0 et 1.

Pour calculer l'indice de discordance, on considère tous les critères pour lesquels A ne surclasse pas B; et on retient le critère pour lequel la différence de note entre les deux actions est la plus grande. On divise ensuite ce nombre (la différence de note) par la longueur de la plus grande échelle de notation (dans notre cas, la plus grande échelle de notation est 10, que l'on trouve pour la notation de poids fort). Le résultat est l'indice de discordance.

Revenons à notre exemple de base, et considérons l'hypothèse « le site A surclasse le site B ». Supposons aussi que le poids accordé au coût soit 5, la proximité d'une zone d'habitation 7; et la proximité d'une voie rapide 3. L'indice de concordance i de notre hypothèse sera donc : $n = 3$, $i = 3/(7+3+5) = 3/15 = 1/5$; car le site A n'est mieux noté que le site B que sur le critère de proximité d'une voie rapide.

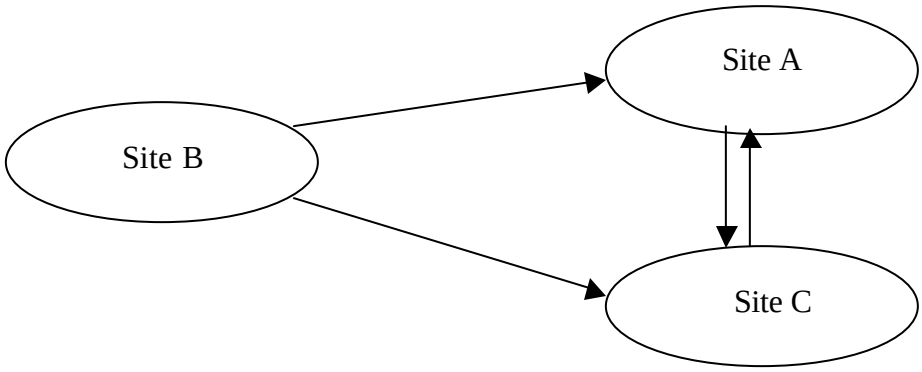
L'indice de discordance d sera alors $d = 5/10 = 1/2$ car pour les critères « coût » et « proximité d'une zone d'habitation », la différence de note entre les sites A et B est de 5. Puisque l'échelle la plus grande que nous utilisions est 10 (pour le critère de poids fort), on obtient sans problème l'indice de discordance.

Les créateurs de cette méthode ont pensé que cette manière de noter pouvait parfois être trop sévère. Ainsi, ils ont proposé un autre indice, l'indice de discordance de sévérité 2, qui se calcule comme l'indice de discordance, mais en retenant le critère pour lequel la différence de note entre les deux actions est la deuxième plus grande.

On fixe ensuite des seuils de tolérance pour les indices de concordance et de discordance (notons les s et t). On dira ainsi que A surclasse B (au sens global) si l'indice de concordance de l'hypothèse A surclasse B est supérieur à s, et si l'indice de discordance de cette même hypothèse est inférieur à t. Dans le cas où ces deux conditions ne sont pas remplies, on dira que l'action A est indifférente à l'action B. Ces seuils doivent fixer des limites pour lesquelles on ne peut supporter qu'une action soit aussi bonne qu'une autre.

En passant ainsi en revue tous les couples possibles d'actions, on déduit un sous-ensemble d'actions qui ne sont surclassées par aucune autre. Ce sont les actions préférables. On peut représenter le résultat de ce passage en revue par un graphe, le graphe de dominance.

On peut ainsi imaginer des seuils tels que l'on obtienne le graphe suivant :



$\longrightarrow$: indique que l'action située à la base de la flèche surclasse l'action pointée. Deux flèches allant en sens inverse indiquent l'équivalence entre les deux actions.

Notons que l'on peut également trouver des situations qui ne permettent pas de trouver de meilleure solution (des circuits du type paradoxe de Condorcet par exemple, en boucle fermée). En faisant varier ces seuils de concordance et de discordance, on peut déduire de nouveaux graphes de dominance, et évaluer la robustesse du résultat. Le danger en prenant des valeurs trop laxistes (ou trop sévères respt.) est d'avoir trop (plus assez respt.) d'information disponible pour en tirer un résultat clair. La force du résultat pourra aussi s'évaluer en changeant (dans les limites définies par les préférences du décideur) les notes et les poids. Ceci s'appelle «analyse de sensibilité ». Une analyse de sensibilité complète est l'observation des changements de résultat, lorsqu'on fait varier les poids et les notes des actions (dans la limite des préférences du décideur).

Quelques remarques s'imposent. Notons ainsi qu'ELECTRE I ne doit être prise que comme une méthode permettant de dégager un sous-ensemble de meilleures solutions. Notons aussi que l'on peut ajouter des nouvelles règles discriminantes sur les indices de concordance et de discordance. Le fait d'utiliser une échelle finie pour la notation est un manque de souplesse.

N.B. : N'ayant pas retenu ELECTRE II pour la suite de mon stage, je ne présente pas cette méthode.

b) ELECTRE III

Les critères considérés dans l'analyse multicritère doivent tout d'abord être pondérés. Une fois la matrice des évaluations remplies, on peut calculer la différence de notes d entre deux actions pour un critère quelconque. On peut calculer cette différence pour tous les couples d'actions, relativement à tous les critères. On fixe également pour tous les critères des seuils de préférence forte (notons le p) et de préférence faible (notons le q).

Considérons un critère quelconque et deux actions A et B évaluées sur ce critère (d sera ici « note de A » moins « note de B »).

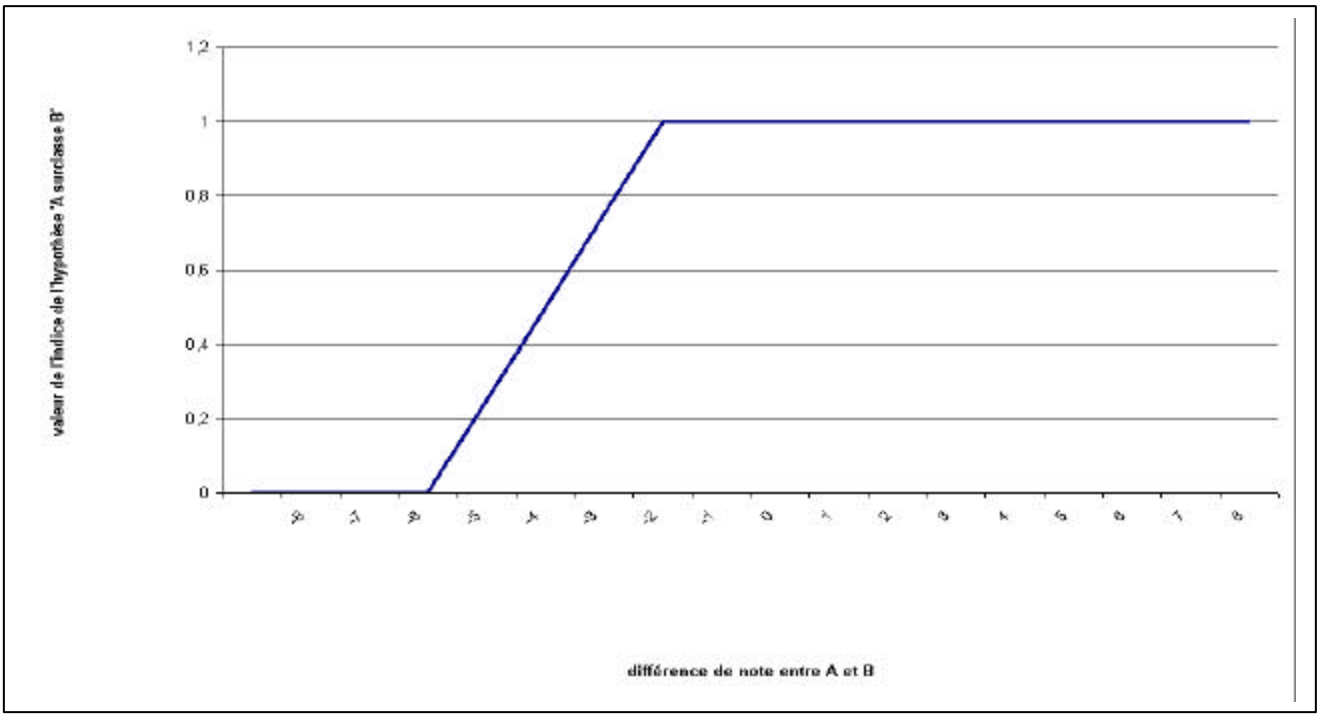
$$\begin{cases} d \geq p & \text{A est fortement préféré à B} \\ p \geq d \geq q & \text{A est faiblement préféré à B} \\ q \geq d \geq 0 & \text{A et B sont indifférents} \\ -q \leq d \leq 0 & \text{A et B sont indifférents} \\ -p \leq d \leq -q & \text{B est faiblement préféré à A} \\ d \leq -p & \text{B est fortement préféré à A} \end{cases}$$

On peut également considérer un seuil de veto, tel que si la différence de notes soit en valeur absolue supérieure à ce seuil, on exclue l'action qui se comporte mal sur ce critère. On accorde ensuite un indice de crédibilité à l'hypothèse « A surclasse B pour le critère considéré », en fonction du niveau de préférence défini par les seuils de préférence.

On va ensuite considérer un indice de crédibilité de l'hypothèse « A surclasse B » relativement à un critère quelconque. Cet indice de crédibilité est fonction de d. Un d négatif indique que l'action B se comporte mieux que A relativement au critère considéré.

Cet indice de crédibilité est une image de la certitude que l'on a que « A soit au moins aussi bon que B ». On considère ainsi que dans la zone d'indifférence, cela est réalisé (l'indice vaut 1). Si B est fortement préféré, on considère alors que A ne peut être meilleur que B (l'indice vaut 0). Entre ces deux zones, on suppose que cet indice varie linéairement.

La figure ci-dessous en est une représentation graphique pour $p = 6$ et $q = 2$.

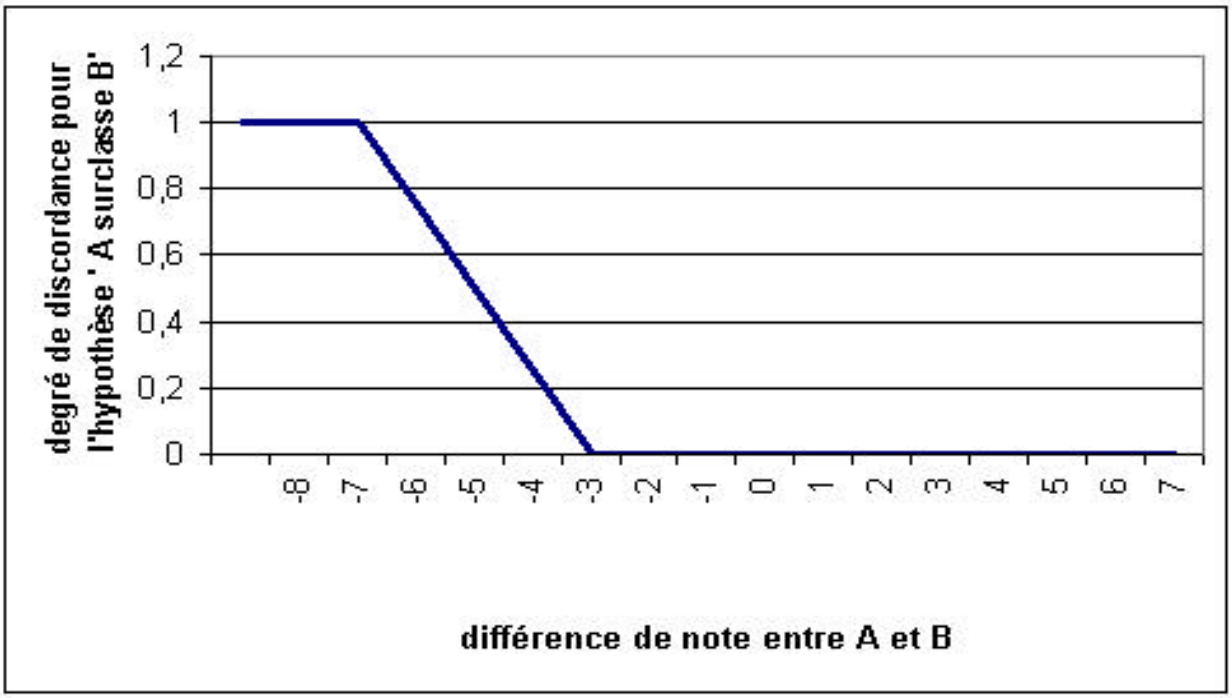


On va ensuite pouvoir définir un indice de concordance global pour l'hypothèse « A surclasse B ». Son calcul est simple : il s'agit de sommer les indices de crédibilité de cette hypothèse, pour tous les critères, pondérés par les poids respectifs des critères.

On cherche donc un indice de discordance global pour l'hypothèse «A surclasse B» . On procède comme il suit, successivement pour tous les critères.

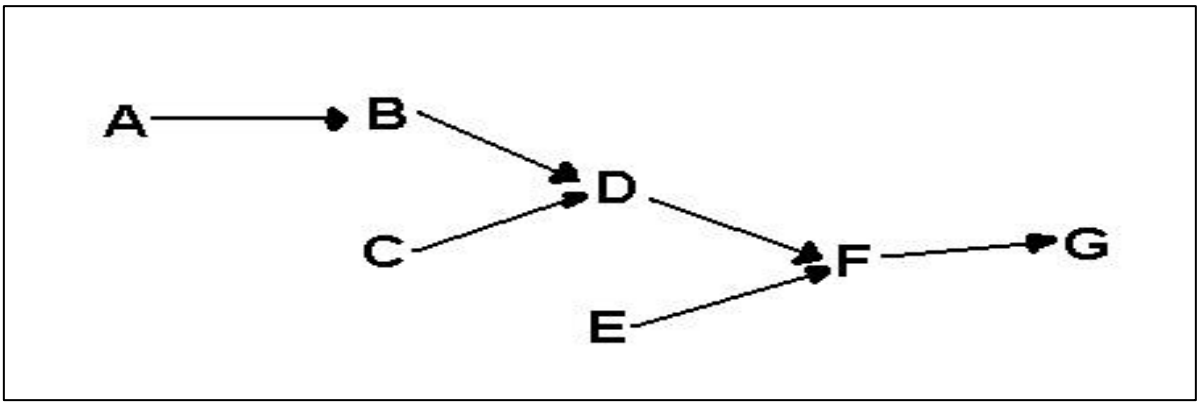
On définit un seuil de veto, que l'on note v. Si la différence de note entre A et B est inférieure à $-v$, le degré de discordance (c'est à dire le regret) de l'hypothèse «A surclasse B » vaut 1. Si cette différence de notes est supérieure à $-p$, le degré de discordance vaudra 0. Entre les deux, on impose au degré de discordance de varier linéairement.

La figure ci-dessous illustre ces variations pour $v = 6$ et $p = 2$:



L'indice de discordance global de l'hypothèse « A surclasse B » sera calculé en sommant les degrés de discordance pour chacun des critères, pondérés par le poids de leurs critères respectifs.

Ensuite, on fixe différents seuils sur les indices de concordance et de discordance , afin de déterminer des relations de préférence (forte ou faible), et indifférence entre les actions. Un graphe peut en être déduit, et par suite un classement des actions (voir le graphe d'exemple ci-dessous)



Implémentons les données relatives au site d'enfouissement, avec les seuils suivant :

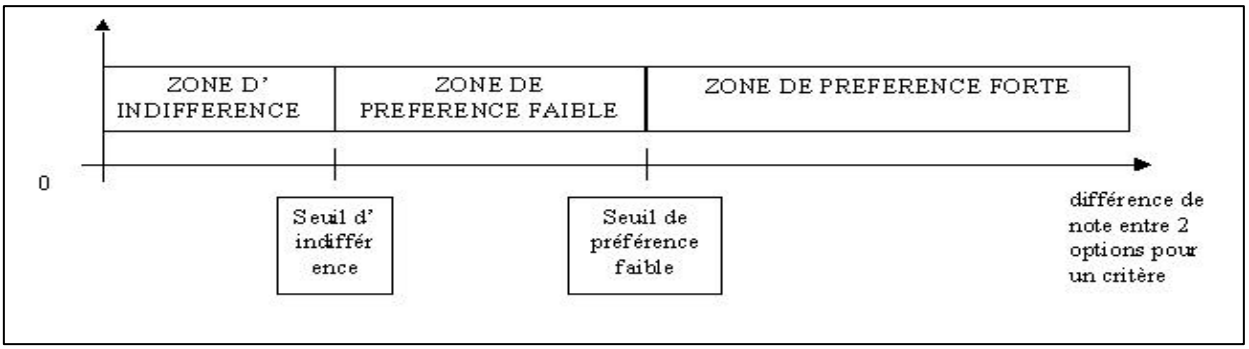
	Seuil de préférence faible q	Seuil de préférence forte p	Seuil de veto v
Coût (millions d'euros)	1	2	5
Proximité d'une zone d'habitation (mètres)	200	400	1000
Proximité d'une voie rapide (mètres)	100	200	500

On obtient alors : B domine A et C ; et C domine A

c) ELECTRE IV

Par rapport aux autres méthodes de cette famille, celle-ci abandonne l'étape de pondération. Il faut juste vérifier qu'aucun critère ne soit prépondérant face à un regroupement d'une moitié quelconque des critères. De même, aucun critère ne doit être négligeable face à un regroupement d'une moitié quelconque des critères. Ceci assure que tous les critères pris en compte ont le même ordre d'importance. Par contre, il faut toujours remplir la matrice d'évaluations des actions.

On calcule ensuite la différence de note deux à deux entre toutes les actions, relativement à tous les critères. On définit deux seuils relatifs à cette différence, pour chacun des critères. Un premier seuil va permettre de délimiter la zone d'indifférence entre les deux critères, des zones de préférence faible. Le second seuil (plus élevé en valeur absolue) doit définir la limite entre les zones de préférence faible et forte (voir figure ci-dessous).



On définit ensuite 2 règles qui permettent de distinguer les dominances fortes et faibles. Ainsi, il y aura préférence forte (A surclasse fortement B):

- *s'il n'existe aucun critère donnant B strictement préféré à A*
- ***et** si le nombre des critères donnant B faiblement préféré à A est au plus égal au nombre des critères donnant A préféré (strictement ou faiblement) à B.*

Il y aura préférence faible (A surclasse faiblement B) :

- *s'il n'existe aucun critère donnant B strictement préféré à A **et** si la seconde condition ci-dessus n'est pas vérifiée*

- ***ou*** *s'il existe un unique critère donnant B strictement préféré à A, l'écart étant au plus égal au double seuil de préférence,* ***et*** *si trois critères au moins donnent A strictement préféré à B.*

Les conditions de préférence forte et faible sont des conditions de bon sens. Une fois toutes les relations entre actions déterminées deux à deux, on peut tracer un graphe, avec des flèches distinguant les dominances fortes et faibles.

Définissons maintenant la qualification d'une action; qui est le nombre d'actions qu'elle surclasse fortement (sa puissance) moins le nombre d'actions par qui elle est surclassée fortement (sa faiblesse). On pratique alors une distillation ascendante. Cela consiste à retenir le groupe des actions à qualification maximale, qu'on peut ensuite départager en ayant recours aux sur-classements faibles. On retire toutes ces actions de l'ensemble global; puis on recalcule les qualifications de chacune des actions restantes, pour les distiller une nouvelle fois. Et ainsi de suite jusqu'à ce qu'il ne reste plus d'actions. On a ainsi un classement de groupes d'actions équivalentes.

On pratique ensuite une distillation descendante. On retient le groupe des actions pour lesquelles la qualification est la plus faible. On les retire de l'ensemble, puis on recalcule les qualifications de chacune des actions restantes, pour les distiller une nouvelle fois; et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'il ne reste plus aucune action. Un nouveau classement est ainsi établi. Il ne reste plus qu'au décideur à comparer les deux classements obtenus, et à en tirer les conclusions qui s'imposent.

Si l'on implémente les données relatives au choix d'un site d'enfouissement de déchets, avec les mêmes seuils que pour ELECTRE III, on obtient le même classement (pour une distillation ascendante et descendante). B domine A et C; et C domine A.

2) Les méthodes PROMETHEE

Les méthodes PROMETHEE sont des méthodes de sur-classement, basées sur les théories de Roy (développeur des méthodes ELECTRE) Elles ont été développées par Jean-Pierre Brans et Philippe Vincke à partir du milieu des années 80. Nous ne présentons ici que PROMETHEE I et II; qui sont les plus utilisées.

a) Ossature générale

Les 2 méthodes ont le même cheminement initial, mais leurs buts sont différents. PROMETHEE I permet de dégager des relations partielles de classement; alors que PROMETHEE II fournit un classement de toutes les actions.

On commence par attribuer un poids et un type à chaque critère. Le type de ce critère est en quelque sorte une fonction de préférence. Ainsi, pour une différence de performance brute entre deux actions, le type va permettre d'avoir une différence de performance normée; prenant en compte les particularités d'évaluation relativement à un critère (si l'échelle d'évaluation des préférences est concave ou convexe, voire en puits). Six types de critère sont disponibles (voir le tableau ci-dessous). Notons que *d* est la différence de notes entre deux actions.

Critère	Nom du critère	Fonction retournée	Paramètres à fixer
I	Critère usuel	0 si indifférent ou pire; 1 sinon	aucun
II	Quasi-critère	0 si $d \leq q$; 1 sinon	q
III	Critère linéaire de préférence	0 si indifférent ou pire ; d / p si $d \leq p$; 1 sinon	p
IV	Critère de niveau	0 si $\lvert d \rvert \leq q$; 1/2 si $q \leq \lvert d \rvert \leq p$; 1 si $\lvert d \rvert \geq p$	p , q
V	Critère linéaire avec zones de préférence et indifférence	0 si $\lvert d \rvert \leq q$; $(\lvert d \rvert - q)/(p-q)$ si $q \leq \lvert d \rvert \leq p$; 1 si $\lvert d \rvert \geq p$	p , q
VI	Critère gaussien	0 si $d \leq 0$; $1-\exp(-d^2/2s^2)$ si $d \geq 0$	σ

On attribue ensuite un indice de préférence global entre 2 actions A et B, Π(A,B). En notant w_j le poids attribué au critère j, cet indice est donné par :

$$\Pi(A,B) = \frac{\sum_{j \in K} w_j * P_j(A,B)}{\sum_{j \in K} w_j}$$

où K est l'ensemble des critères, et P_j (A,B) est la valeur de retour (après le passage par la fonction de type) de la différence de notation entre A et B pour le critère j. Une valeur proche de 0 indiquera que B est meilleur que A. Une valeur proche de 1 indiquera que A est meilleur que B.

On calcule ensuite pour chacune des actions, la moyenne des intensités des préférences sur toutes les alternatives (i.e. $\frac{\sum_{i \in I} \Pi(A,B_i)}{Card(I)}$, où I est l'ensembles des actions pour lesquelles A surclasse B). Ce nombre, noté Φ_{A+} est appelé flux de sortie de A. Le flux de sortie est en quelques sorte la confiance que l'on a dans le fait que A soit la meilleure solution.

On calcule ensuite le flux entrant de A: Φ_{A-}, défini par : $\frac{\sum_{i \in I} \Pi(A,B_i)}{Card(I)}$, où I est cette fois l'ensemble des actions qui surclassent A. Le flux entrant peut être vu comme le regret de choisir A.

Finalement, on calcule aussi le flux net : $\Phi(A) = \Phi_{A+} - \Phi_{A-}$. Le flux net donne une valeur de la confiance que l'on a en A, mais prenant en compte le regret que l'on aurait si l'on choisissait A.

La différence entre les méthodes PROMETHEE I et II se trouve dans les différences de rangement des actions.

b) PROMETHEE I

Pour cette méthode, quatre relations sont fixées entre les actions :

A P+ B si et seulement si $\Phi_{A+} \geq \Phi_{B+}$ (A domine plus d'actions que B)
A P- B si et seulement si $\Phi_{A-} \leq \Phi_{B-}$ (A est dominé par moins d'actions que B)
A I+ B si et seulement si $\Phi_{A+} = \Phi_{B+}$ (A et B dominent autant d'actions)
A I- B si et seulement si $\Phi_{A-} = \Phi_{B-}$ (A et B sont dominées par autant d'actions)

On considère alors que A surclasse B si : A P+ B ***et*** A P- B, ***ou*** , A P+ B ***et*** A I- B, ***ou***, A I+ A ***et*** A P- B.

A sera indifférent à B si : A I+ B ***et*** A I- B.

Dans tous les autres cas, A et B seront incomparables.

Comme avec la méthode ELECTRE, on peut alors tracer un graphe de dominance entre les solutions, et on pourra en déduire un classement des actions en différents groupes d'actions à performances équivalentes.

L'implémentation des données du choix du site d'enfouissement des déchets (avec les seuils définis pour ELECTRE III), retourne le même résultat qu'ELECTRE III : B domine C, qui domine A

c) PROMETHEE II

Avec cette méthode, on dira que :

A surclasse B si et seulement si : $\Phi(A) \geq \Phi(B)$
A est indifférente à B si et seulement si : $\Phi(A) = \Phi(B)$

On en déduira de même un graphe de dominance, qui permettra de dégager un classement des actions.

L'implémentation de l'exemple du choix d'un site d'enfouissement de déchets donne le même résultat que PROMETHEE I.

B) Les méthodes basées sur la théorie de l'utilité

1) MAUT

MAUT (MultiAttribute Utility Theory) est une méthode développée vers la fin des années 60 par Ralph Keeney et Howard Raiffa. Cette théorie est exposée dans un livre complet : Decisions with

multiple objectives : preferences and value tradeoffs [28]; et se base sur les travaux des économistes Von Neumann et Morgenstern.

L'idée est assez simple : le décideur doit associer une utilité à chacune des actions considérées. Pour ce faire, il va considérer séparément chacun des critères, et observer quelle utilité dégage chaque critère pour l'action considérée. En effet, l'utilité $V_A(x_1, x_2, ..., x_n)$ associée à l'action A, évaluée sur les critères 1,2,… n peut se décomposer sous la forme :

$V_A(x_1, x_2, ..., x_n) = \sum_{i=1}^{n} v_i(x_i)$ ($v_i(x_i)$ étant l'utilité générée au vu du critère i si l'action considérée a la performance x_i); à condition que les critères considérés soient indépendants.

En posant des questions au décideur, ou en le soumettant à des loteries, on peut extrapoler sa courbe d'utilité pour chacun des attributs. Il est ainsi possible d'intégrer l'incertitude du décideur (par l'intégration de probabilités, d'évènements conditionnels : l'additivité de la fonction n'est alors plus vérifiée). Nous ne développerons pas les formules en cas d'incertitude.

Notons que le concept d'utilité évite d'avoir à pondérer ; mais il faut porter une grande attention aux réponses fournies car tous les critères doivent être évalués sur une même échelle : l'utilité. Cette méthode est très peu employée à cause de sa complexité (surtout dans le cas où il y a incertitude), ainsi que de la difficulté pour le décideur de se représenter ce qu'est l'utilité associée à une performance sur un critère. Enfin, les bases théoriques de cette méthode sont ébranlées par quelques expériences sur des loteries : plus de 90% des gens ont un comportement contraire à celui prédit par la théorie de l'utilité.

Revenons à l'exemple du choix d'un site d'enfouissement; et supposons qu'après avoir interrogé le décideur nous ayons déterminé les utilités qu'il associe à chacun des sites :

	Site A	Site B	Site C
Utilité associée au coût	10	18	10
Utilité associée à la proximité d'une zone d'habitation	5	18	13
Utilité associée à la proximité d'une voie rapide	14	9	12
Utilité globale	29	47	35

Ainsi, le classement est B devant C, devant A.

2) Somme pondérée

Cette méthode n'est pas à proprement parler une théorie basée sur l'utilité; mais elle s'en rapproche. Le fonctionnement de cette méthode est très simple : tout se passe comme si on évaluait les élèves d'une même classe en faisant la moyenne pondérée de leurs notes.

Cette méthode permet de se passer des difficultés inhérentes à MAUT, et propose au décideur de noter directement les différentes actions relativement à tous les critères. Le décideur doit également décider de la pondération ; en prenant garde toutefois aux unités qu'il a utilisé pour les critères.

L'avantage de cette méthode est qu'elle permet d'obtenir un résultat numérique, et un classement complet des actions, sans la lourdeur de MAUT. Si l'on dispose de données chiffrées sur les performances des actions, on peut les implémenter directement, sans avoir à convertir ces données sur une échelle abstraite. Toutefois, Somme pondérée demande beaucoup d'attention au décideur, notamment car elle est compensatoire.

Appliquons Somme pondérée à notre exemple de base :

	Coût	Proximité d'une zone d'habitation	Proximité d'une voie rapide	Note globale
Pondération associée au critère	6	7	3	
Site A	9	4	18	136
Site B	19	18	11	273
Site C	9	15	16	207

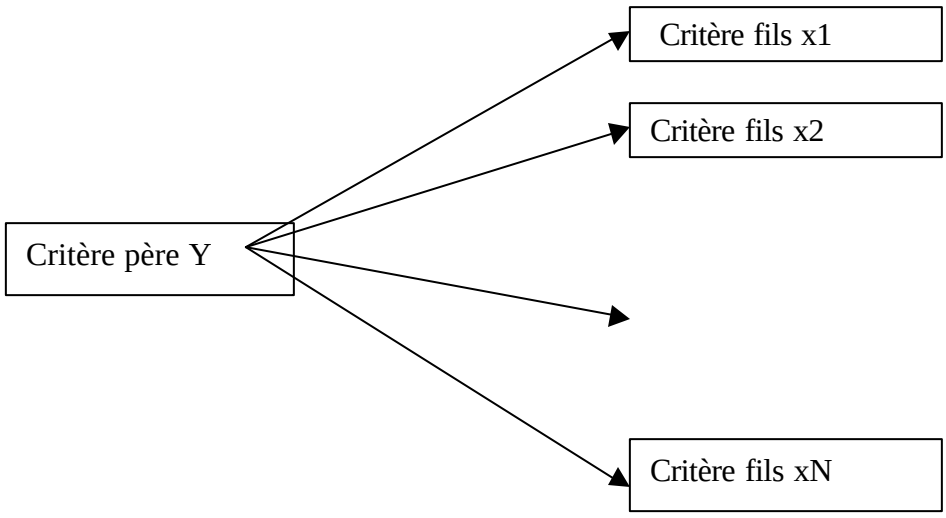
La méthode de Somme pondérée donne donc B devant C, devant A.

C) Autres méthodes

1) AHP

La méthode AHP (Analytical Hierarchy Process) a été développée par Thomas Saaty dans les années 1980. Elle vise à affiner le processus de décision en examinant la cohérence et la logique des préférences du décideur.

Le point de départ de la méthode est de définir une arborescence hiérarchique de critères et de sous-critères. La représentation de l'arborescence se fait sous la forme de couples père-fils :



Chaque critère doit être identifié, avec sa définition et son intensité. Il faut en effet que la somme des poids de tous les critères fils d'un même critère père, soit égale à 1. Cette expression des poids est appelée *relation d'interdépendance*.

La détermination des poids des facteurs se fait une fois que la hiérarchie complète du problème est posée. On va comparer deux à deux les différentes branches de même niveau, en attribuant une note chiffrée (sur une échelle prédéfinie : voir ci-dessous) à la façon dont on ressent la différence entre les deux critères. On commence par peser entre eux, les critères ayant les rangs les plus élevés (les plus hauts dans la hiérarchie).

INTENSITE DE LA PREFERENCE	VALEUR ASSOCIEE
La différence entre les deux actions est nulle, ou négligeable	1
On préfère légèrement le premier élément au second	3
On préfère le premier élément au second	5
On préfère de beaucoup le premier élément au second	7
On préfère beaucoup plus le premier élément au second	9

Dans un souci d'obtenir des réponses cohérentes, on peut également rajouter les évaluations suivantes :

INTENSITE DE LA PREFERENCE	VALEUR ASSOCIEE
On préfère un peu moins le premier élément au second	1/3
On préfère moins le premier élément au second	1/5
On préfère de beaucoup le second élément au premier	1/7
On préfère beaucoup moins le premier élément au second	1/9

Ainsi, on dispose de toute cette échelle de valeurs pour remplir une matrice de jugements, que nous noterons A dans les formules mathématiques. Notons aussi I_d la matrice identité d'ordre n, n étant la nombre d'actions prises en compte dans l'étude.

On va ensuite, une fois cette matrice remplie, normaliser par colonne cette matrice (on additionne les valeurs d'une même colonne, puis on divise chaque nombre de la colonne par cette somme). Puis, on calcule la moyenne arithmétique des nombres sur chaque ligne. Chaque ligne correspondant à un critère, la moyenne associée au critère définit le poids du critère relativement au critère père. La valeur « globale » du poids d'un critère en bout d'arbre est le produit de tous les poids aboutissant à ce critère.

Initialement, Saaty avait proposé une méthode basée sur les valeurs propres l de la matrice des jugements. Ainsi, il avait montré que la valeur propre maximale l_m du problème de recherche des

valeurs propres ($\det(A - lI_d) = 0$) était réelle, et supérieure à la taille de la matrice. Puis, en résolvant le système $AV = l_m I_d V$ (V étant un vecteur propre de A), et en ajoutant la condition que la somme des poids doit être égale à 1; il en tirait les mêmes valeurs des poids que celles obtenues par la technique précédente.

La cohérence des résultats doit également être vérifiée. Pour chacune des matrices d'évaluation A, on peut calculer un indice de cohérence. Pour une matrice donnée, on retient sa valeur propre maximale l_m. L'indice de cohérence CI d'une matrice $n \times n$ est :

$$CI = \frac{l_m - n}{n-1}.$$

Le ratio de cohérence est ensuite calculé en utilisant la formule $CR = \frac{CI}{RI}$; où RI est un indice de cohérence obtenu par un grand nombre de simulations. Nous ne détaillerons pas la démonstration de la formule donnant CI, mais nous en fournirons juste les éléments clés. Pour une démonstration plus complète, on se reportera au livre [43].

L'élément a_{ij} de A peut être vu comme $a_{ij} = \frac{w_i}{w_j}$; où w_i et w_j sont les notes absolues évaluant les performances des options i et j. Il vient : $a_{ij} w_j = w_i$. Et donc : $\sum_{j=1}^{n} w_j a_{ij} = n w_i$. Ceci est équivalent à :
$Aw = nw$. A l'aide d'un théorème d'algèbre, sous des hypothèses auxquelles nous pouvons nous ramener, on peut montrer que : $\sum_{j=1}^{n} l_j = n$ (où les l_j sont les valeurs propres de A). Et puisque $Aw = l_m w$, alors dans le cas parfait, $n = l_m$. Le rapport $\frac{w_i}{w_j}$ est un rapport parfait, si le décideur peut juger parfaitement les options. Mais, dans le cas réel, son évaluation doit se rapprocher de ce rapport. Dans le cas où son évaluation est acceptable l_m doit rester proche de n. Ainsi, $l_m - n$ mesure bien la cohérence des réponses. Le facteur $n-1$ évite le biais, et rend l'indice indépendant de la taille de la matrice A.

Les valeurs de RI sont déterminées par simulation, on peut en trouver des tables dans [43]. Saaty[43] définit comme valeurs acceptables pour CI, les nombres inférieurs à 0,1 .

On va maintenant déterminer le poids à accorder à une action. Pour cela, on va considérer un critère en bout d'arbre, et faire des comparaisons entre toutes les actions, du point de vue de ce critère. L'échelle de notations appliquée est la même que celle présentée ci-dessus. On va donc obtenir une nouvelle matrice de jugement, que l'on va traiter de la même manière que précédemment. On obtiendra alors pour chaque critère, la note de chaque action.

On peut ensuite attribuer une note globale à chaque action, en calculant la moyenne pondérée (par les poids des critères) des notes obtenues par les actions. Il ne reste plus qu'à ranger ces notes pour obtenir un classement final des actions.

Cette méthode a souffert des nombreuses critiques (voir [8] et [9]). Les plus basiques se contentaient de critiquer l'échelle trop restreinte des valeurs autorisées pouvant conduire à des erreurs (si A est noté 3 par rapport à B, B 5 par rapport à C, on a un problème car il n'est pas possible de noter A par rapport à C avec 8).

Les poids sont déterminés avant que les échelles de mesure des critères n'aient été fixés. Ainsi, le décideur est induit à faire des suggestions à propos de la relative importance des objets sans savoir, en fait, ce qui est comparé.

Notons aussi qu'AHP demande de faire des comparaisons du type $\frac{n_A}{n_B}$, entre deux actions (ou critères) A et B. Or, il n'est pas certain que si l'on demande à un individu de comparer deux alternatives; il évalue $\frac{n_A}{n_B}$, mais plutôt $n_A - n_B$.

De plus, le fait de normaliser les poids à tous les niveaux de hiérarchie entraîne un phénomène d'inversement de rang (si l'on conduit deux études avec les mêmes actions, mais que l'on retire une action pour la seconde étude ; le classement final des actions sera profondément bouleversé). Finalement, une des erreurs les plus difficiles à corriger est le fait qu'AHP ne dispose pas de points d'ancrage pour relier entre eux les différentes échelles des critères (en effet, on ne peut pas contrôler si un point de différence sur le critère puissance vaudra un point sur le critère prix). Ceci implique que les critères n'ont pas tous la même échelle (que l'on pourrait croire absolue); mais que tous les critères ont des échelles flottantes les unes par rapport aux autres.

Appliquons AHP à notre exemple de base. Nous ne considérerons pas de critère père : nous comparons seulement les trois critères initiaux sans chercher à les décomposer. Dans un souci de concision, nous ne présenterons que la matrice de comparaison des critères; le principe étant le même pour les comparaisons d'actions relativement aux critères.

	Coût	Proximité d'une zone d'habitation	Proximité d'une voie rapide
Coût	1	1/3	5
Proximité d'une zone d'habitation	3	1	7
Proximité d'une voie rapide	1/5	1/7	1

On obtient alors les poids suivants :
Coût : 0.283 ; Proximité d'une zone d'habitation : 0.64 ; Proximité d'une voie rapide : 0.07

2) MACBETH

La méthode MACBETH (Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique) est une méthode assez récente, développée notamment par Carlos Bana e Costa. Cette approche itérative, de questionnement du décideur a pour but de quantifier l'attractivité relative de chaque action par rapport à une autre. Elle ne requiert qu'un jugement qualitatif de préférence, ce qui lui permet de s'affranchir des critiques concernant les notations et leurs références. Le système est basé sur un programme, vérifiant la consistance des données fournies, et créant une échelle de poids.

La première étape est de rentrer tous les critères devant entrer en compte dans le processus de décision. On rentre ensuite également toutes les actions possibles.

On définit deux seuils pour chacun des critères qui vont servir d'ancrage. Le décideur doit ainsi imaginer deux niveaux abstraits pour chacun des critères. Un niveau devrait être considéré comme 'bon', et l'autre devra être considéré comme 'neutre'. On donne à ces deux niveaux les valeurs 100 et 0 respectivement.

On demande ensuite au décideur de ranger par ordre de préférence pour chacun des critères, les différentes actions, ainsi que les deux niveaux définis 'bon' et 'neutre'. Pour chacun des critères, on va ensuite demander au décideur d'évaluer la différence d'attractivité entre deux actions (les niveaux 'bon' et 'neutre' doivent aussi être évalués avec les actions). L'échelle disponible pour le décideur est : très faible, faible, modérée, fort, très forte et extrême. Si le décideur n'est pas sûr de son jugement, on peut l'autoriser à mettre deux jugements (par exemple, le décideur hésitant entre les niveaux modérés et fort est autorisé à donner une différence de type modéré-fort). Le décideur peut aussi considérer deux actions comme équivalentes. On commence par comparer l'action la plus attractive avec la moins attractive, puis la 2ème plus attractive avec la moins attractive, etc.

A chaque jugement, le programme vérifie la consistance de la nouvelle donnée avec les précédentes. Une fois tous les jugements rentrés, le logiciel crée une échelle (basée sur des nombres associés l'expression verbale de la préférence), et dispose sur cette échelle l'attractivité de l'action relativement au critère considéré. Cette échelle est ensuite proposée au décideur. Si cette échelle ne lui semble pas correcte, on ajuste les scores, en restant en accord avec les données de jugement fournies dans la notation. Ce processus est répété pour chacun des critères.

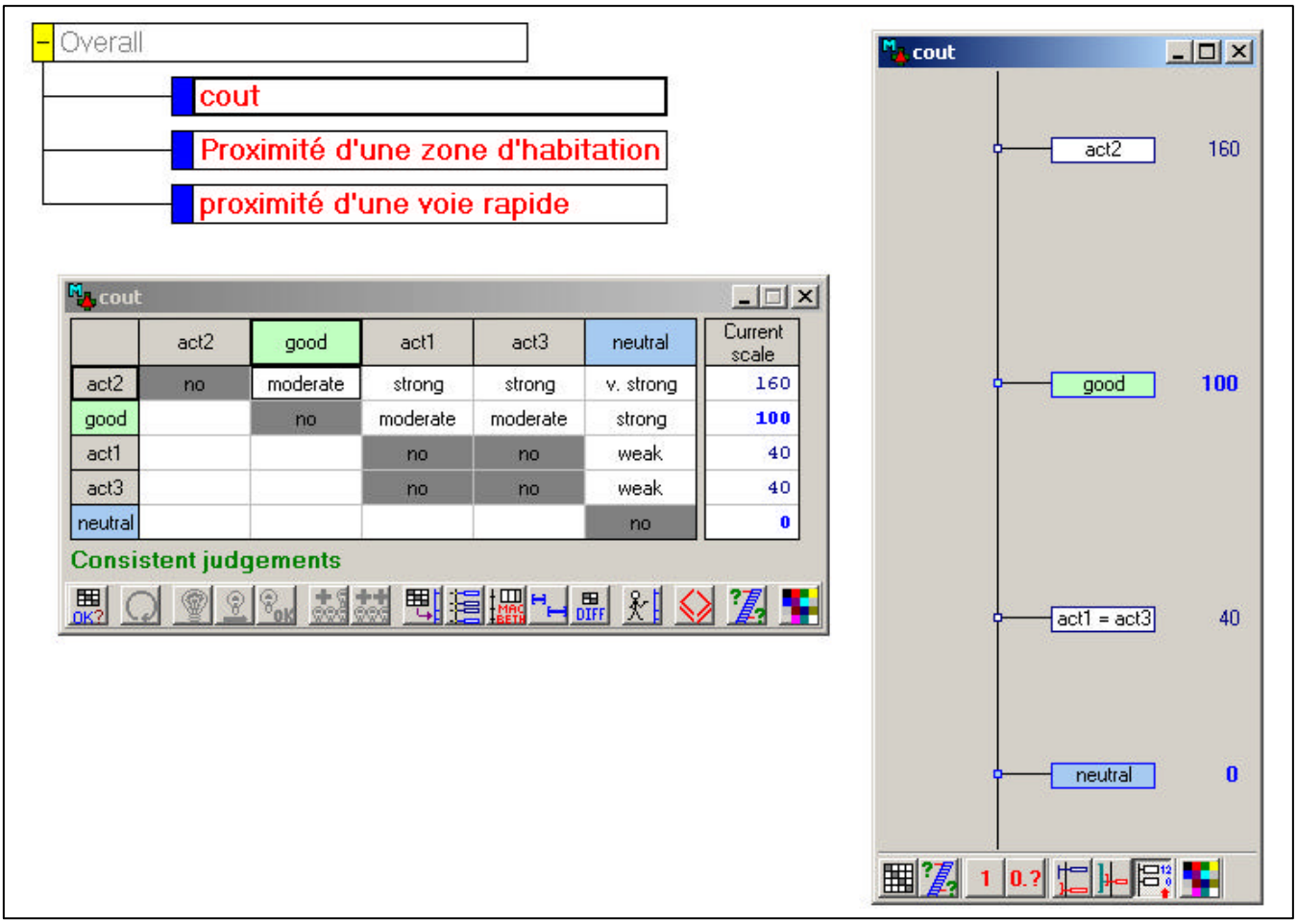
Puis, on va chercher à créer une échelle commune aux critères. On demande au décideur d'imaginer une action qui serait 'neutre' pour chacun des critères. Puis, on lui demande d'évaluer l'augmentation d'attractivité globale, si l'on passe pour un critère quelconque du niveau 'neutre' au niveau 'bon'. On répète ce processus pour une augmentation de 'neutre' à 'bon' pour chacun des critères. Une première base pour une échelle est alors proposée par le software. Cette échelle va être complètement remplie par l'étape suivante.

On évalue alors entre eux les critères. On pose au décideur la question : « Combien de fois est plus attractif l'élévation de niveau 'neutre' à 'bon' dans le critère A que dans le critère B ? ». On pose cette question pour chacun des couples possibles d'actions, en vérifiant la consistance de la réponse avec les données déjà entrées. Le logiciel va ensuite pouvoir créer une échelle de poids pour les critères. On demande bien évidemment au décideur de vérifier cette échelle de poids, et on fait les modifications qui s'imposent si besoin. Pour faciliter cette vérification, on montre comment un changement d'une des ses réponses va affecter le résultat global du modèle.

Des graphiques sont proposés, avec des tables de valeurs, pour résumer les résultats. Cela permet bien évidemment de pouvoir discuter et choisir avec plus de latitude, qu'avec un simple classement.

Il est bien évidemment très difficile de pouvoir évaluer des niveaux abstraits, et de les relier entre eux. C'est néanmoins une étape très importante, qui assure la validité du raisonnement. De plus, aucune méthode ne permet de pondérer facilement des critères. Au vu des essais effectués, l'appréhension du problème est toutefois améliorée par l'introduction de ces niveaux abstraits.

La figure suivante montre les résultats de MACBETH appliqué à notre exemple de base. Notons que act1 est le site A, act2 est le site B et act3 est le site C. Cette figure montre les résultats de la notation des sites relativement au paramètre coût. Le reste de l'étude fait appel à la même interface graphique avec le même type de comparaisons.



II- PRESENTATION DU CONCEPT D'ANALYSE DE CYCLE DE VIE

L'analyse de cycle de vie (ACV) est un concept assez simple à appréhender, mais qui reste très difficile et laborieux à mettre en pratique.

L'idée de l'ACV est de déterminer les impacts sur l'environnement causés par un service ou un produit, tout au long de sa vie (du berceau à la tombe). Prenons l'exemple de l'ACV 'simple' d'une boîte en carton. L'étude concernant cette boîte va devoir prendre en compte tous les impacts environnementaux liés à la coupe du bois (la déforestation et les impacts sur les écosystèmes, le paysage par exemple; mais cela peut aussi prendre en compte les émissions de dioxyde de carbone et de poussières par les machines coupant le bois), le transport du bois (émission de gaz à effets de serre par les camions par exemple) , les impacts environnementaux liés à sa mise en forme finale (d'éventuels produits chimiques ayant des rejets liquides ou atmosphériques). Cette étude doit aussi prendre en compte le recyclage s'il est possible, la réutilisation (on peut par exemple envisager que de la vapeur soit émise au cours du procédé, et que cette vapeur soit transformée en électricité) du carton,

et leurs impacts respectifs sur l'environnement (les procédés de recyclage vont ainsi nécessiter des produits chimiques, causant des rejets, qui doivent être comptabilisés). Cette étude se terminant par les impacts environnementaux liés à la mise au rebut, ou (et) à la destruction du carton.

L'ACV permet de répondre à des questions pertinentes quand à des problèmes d'actualité. Ainsi, on peut se demander si le recyclage a bien un effet bénéfique sur l'environnement. En effet, a priori, on ne sait pas si les impacts liés au ramassage, et la remise en forme des matériaux ne sera pas plus néfaste pour l'environnement, que l'extraction et la transformation de matières premières. L'ACV permet ainsi de comparer les impacts environnementaux de plusieurs produits, ou procédés. On peut également envisager de faire des ACVs du berceau aux portes (sous entendu, les portes de l'usine : dans ce cas, l'étude ne prend pas en compte les impacts liés à l'utilisation du produit).

Le concept d'ACV a connu ses balbutiements vers 1969; et a continué sa maturation pour finalement être intégré dans les normes environnementales ISO 14000. Les étapes d'une ACV ont ainsi été clairement posées, bien que les méthodes pour les implémenter soient très diverses. Passons ainsi en revue les différentes étapes d'une ACV, telles qu'elles sont proposés par les normes ISO.

A) Définition de l'objectif et des frontières du système

L'objectif habituel d'une ACV est de permettre de faire un choix entre différentes actions; mais d'autres buts peuvent être visés. Au cours de cette étape, il faut bien se rappeler qu'une ACV doit être un élément de choix pour un manager; il faut donc bien définir le degré de précision souhaité, la forme que prendra le résultat (notamment l'agrégation ou non des différents impacts environnementaux). Quand à la définition des frontières du système, il doit s'agir des frontières tant spatiales, que temporelles. Un choix raisonnable doit être fait : un système trop 'petit' ne serait pas suffisamment significatif ; un système trop 'grand' demanderait des moyens énormes. Idéalement, les quatre étapes du cycle de vie d'un produit doivent être prises en compte dans les frontières:

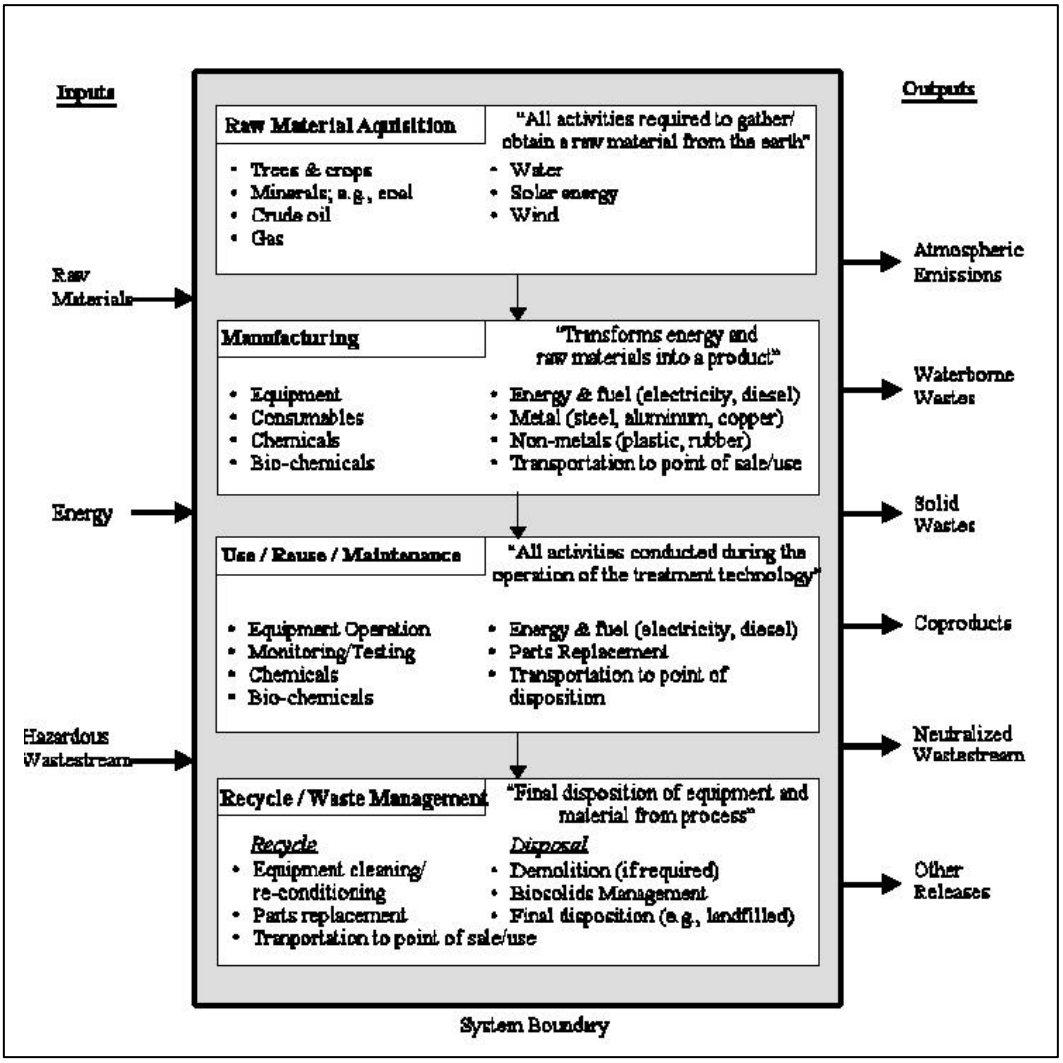
- Acquisition des matières premières (dont l'énergie). Cette partie doit aussi prendre en compte le transport de ces matières premières.

- Fabrication des produits. Cette partie est elle-même décomposée en quatre sous-parties :
    - Transformation des matières afin de les rendre aptes à fabriquer un produit
    - Fabrication du produit
    - Remplissage, empaquetage et distribution

- Utilisation, réutilisation et maintenance. Cette étape doit prendre en compte l'énergie consommée par le produit, et ses éventuels rejets environnementaux.

- Recyclage et mise au rebut.

La figure ci-dessous se veut un schéma du problème de la partie définition de l'objectif et des frontières du système.



ISO préconise une démarche scientifique et la plus objective possible pour mener une ACV (donner de l'information et des justifications sur les approximations effectuées notamment, objectivité maximale). On notera toutefois que cette première étape introduit une part de subjectivité assez importante; dans la définition des frontières notamment.

B) Inventaire

L'objectif de l'inventaire est de déterminer pour le système considéré l'énergie consommée et les matières premières utilisées; ainsi que tous les rejets atmosphériques, solides et liquides. A la fin de l'inventaire, on dispose donc d'une liste de tous les polluants émis (avec leur quantité), ainsi que des matières premières utilisées.

Cette étape est très lourde et demande beaucoup de temps. Afin de l'effectuer efficacement, il est conseillé de suivre les 4 étapes suivantes :

- Développer un diagramme de flux, comprenant les flux internes au système; ainsi que les échanges avec l'extérieur.

- Développer un plan de collecte des données. Ainsi, on identifiera les sources et types de polluants (et matières premières), ainsi qu'un indicateur pour les comptabiliser. Ensuite, on développera une check-list pour les collecter.

- Collecter les données

- Evaluer les résultats. Il faudra ici s'assurer de la précision des données, et documenter les approximations effectuées.

C) Détermination des poids d'impact

Cette partie d'une ACV est elle même décomposée en plusieurs sous-parties. Les normes ISO 14000 ont proposé que certaines de ces parties soient obligatoires et d'autres facultatives. En particulier, ISO considère que l'agrégation des impacts doit être facultative; et que les résultats d'une éventuelle agrégation ne doivent pas être rendus publics (afin d'éviter les abus et publicités mensongères : une analyse de cycle de vie se base sur de nombreuses approximations, impossibles à faire tenir sur une petite étiquette d'emballage). De plus, les étapes facultatives sont celles qui font entrer le plus de subjectivité dans l'ACV. Passons en revue les différentes parties de cette étape :

- Sélectionner et définir les catégories d'impact (étape obligatoire). Une liste de catégories d'impact (14 sont proposées) semble faire l'unanimité dans la communauté scientifique. Citons quelques catégories d'impact de cette liste : réchauffement de la planète, acidification, eutrophication, santé humaine, diminution des ressources.

- Classification (étape obligatoire). Cette étape sert à classer les impacts de l'inventaire dans des catégories d'impact. Ainsi, le dioxyde de carbone sera ajouté à la catégorie du réchauffement de la planète. Si un produit a des impacts sur deux catégories en même temps, il faudra raisonner plus prudemment afin d'allouer les impacts correctement (par exemple, le dioxyde de soufre peut être relâché soit dans le sol, soit dans l'atmosphère. Il affectera donc la santé humaine et l'acidification : on peut mettre 50% des rejets sur chacun de ces impacts. Par contre, le dioxyde d'azote affecte potentiellement en même temps la formation d'ozone et l'acidification. On comptabilisera donc 100% des rejets avec l'acidification; et un autre 100% au réchauffement de la planète).

- Caractérisation (étape obligatoire). La caractérisation permet de mettre sur une même échelle deux polluants différents ayant des effets sur la même catégorie d'impact. Ainsi, cette étape permet d'ajouter les tonnes de dioxyde d'azote et de dioxyde de carbone rejetés, au vu de leur impact sur le réchauffement global. Par exemple, le méthane aura un impact de 21 (l'unité de ce nombre est le 'Potentiel de réchauffement global par livre rejetée'), contre 9 pour le chloroforme. Une fois cette étape effectuée, on dispose d'un indicateur de catégorie qui permet d'observer l'impact d'un produit de consommation ou d'un service, relativement à une catégorie d'impact ; selon la règle :

Indicateur d'impact = Données d'inventaire $\times$ Facteur de caractérisation

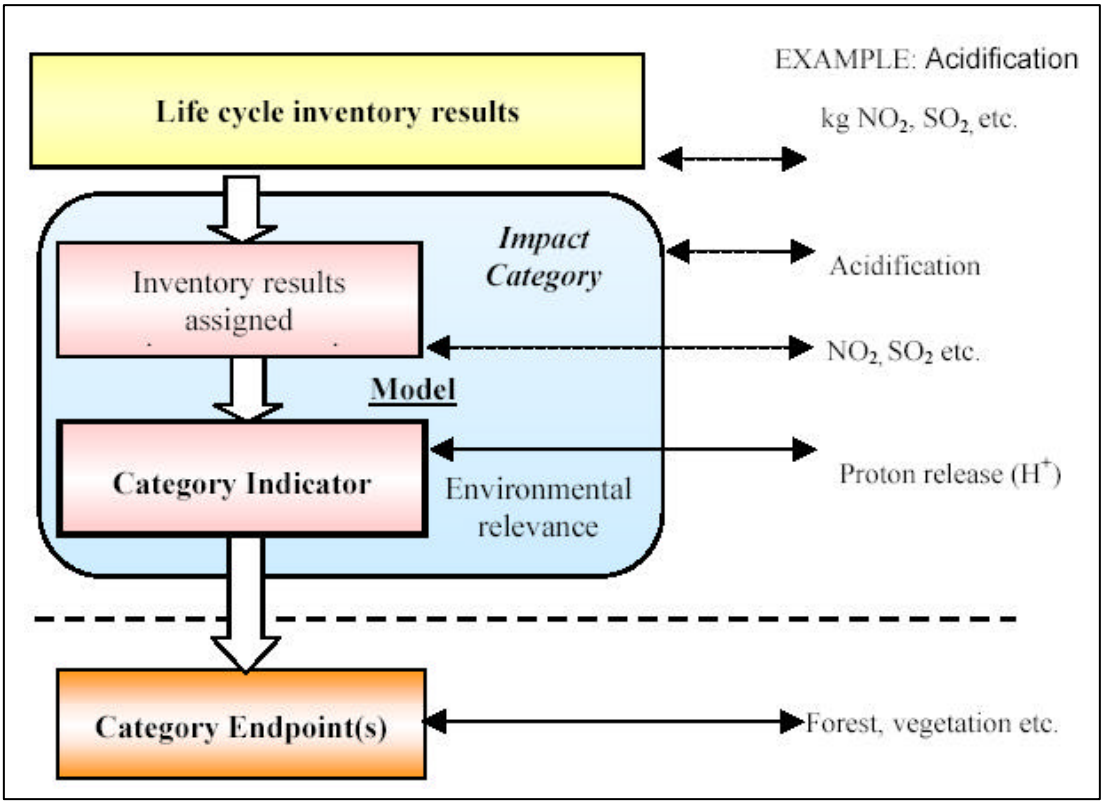
- Normalisation (étape facultative). La normalisation se fait par rapport à une valeur de référence choisie, afin de ramener les données à une même échelle. Cette valeur de référence dépend

des méthodes d'ACV employées. Cela peut être une valeur légale (la quantité maximum de rejets autorisés), une valeur déterminée par une étude (la quantité de polluants admissible par un écosystème ou une valeur légale maximale de taux de pollution); ou encore, on peut normaliser en considérant une des actions comme référence (si l'on compare 3 actions A, B et C; on peut dire que A rejette 40% de ce que rejette C, et B rejette 120% de ce que rejette C).

- Groupement (étape facultative). Le but de cette étape est de grouper les impacts afin de rendre leur interprétation plus aisée (ils peuvent être groupés par ordre d'importance, ou par types d'émissions par exemple).

- Pondération (étape facultative). Cette étape va mener à une agrégation des résultats. Il s'agit de comparer entre elles les différentes catégories d'impact (ou leurs groupements) et de leur assigner une importance. On pourra ensuite agréger les résultats. Cette étape est très subjective, et les méthodes utilisées jusqu'à présent ont été des techniques d' évaluations monétaires, d'évaluations par des jurys; ou encore de comparaisons face à des standards ou des objectifs.

La figure ci-dessous montre un exemple pour l'impact 'acidification'. Tous les produits acidifiants ont été comptabilisés, un modèle a permis de déterminer leur impact dans une unité commune (les protons relâchés). Un indicateur en est déduit.

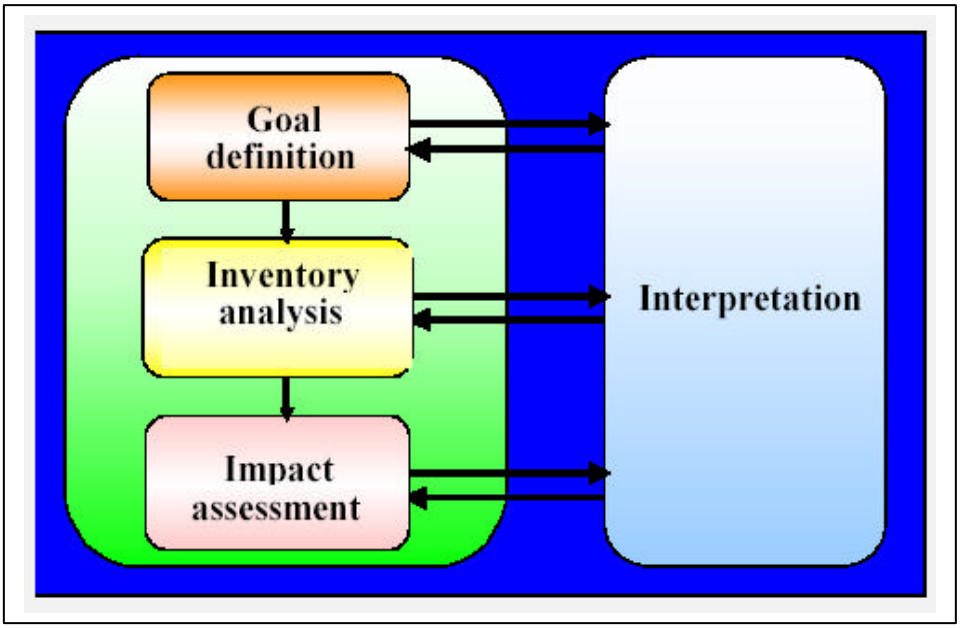


Cette étape doit être documentée pour permettre au décideur d'avoir un regard critique face aux résultats.

D) Interprétation

Les objectifs de l'interprétation sont l'analyse des résultats, et la rédaction de conclusions; tout en soulignant les limites de l'étude (échelle de précision, approximations effectuées, etc.). En fonction des résultats de cette étape, des modifications peuvent être apportées à l'ACV (par exemple, on peut reprendre l'étude en cherchant plus de précision dans les données, ou on peut considérer que le modèle de pondération n'est pas satisfaisant et en essayer un autre, etc.).

En résumé, voilà le schéma que doit avoir une ACV :



Avant de continuer plus avant, définissons quelques termes utilisés en ACV, qui nous serons utiles pour la suite :

- On distingue deux façons d'orienter une ACV. L'approche 'bottom-up' est la plus classique : on part de tous les rejets et on les classe dans des catégories d'impact. L'approche 'top-down' est en sens inverse : on choisit les impacts que l'on veut considérer, puis on dirige la recherche des rejets à prendre en compte.

- On fait la différence entre l'approche de thèmes environnementaux et l'approche des fonctions de dommage. La première consiste à donner les résultats ponctuels pour chaque type d'impact. L'approche des fonctions de dommage vise à établir une relation 'continue' entre la quantité de rejets et les impacts.

- Les indicateurs peuvent être soit 'endpoints', soit 'midpoints'. L'approche 'endpoints' va considérer les impacts finaux des polluants. Par exemple, on va comparer deux polluants soit par leur pouvoir à augmenter les radiations (midpoint); ou par leur capacité à augmenter la fréquence des tempêtes, ou à détruire des maisons (endpoint). Les endpoints sont beaucoup plus palpables, mais il y a une perte d'information par passage des midpoints aux endpoints. De plus, le passage des midpoints aux endpoints est encore très peu documenté : on ne connaît pas exactement l'impact d'une augmentation des radiations sur la fréquence des tempêtes par exemple.

III- APPLICATION DE L'ANALYSE MULTICRITERE A L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE

Plusieurs tentatives ont déjà été effectuées dans ce sens, et ont préparé le terrain pour une véritable ACV utilisant les méthodes d'analyse multicritère. On pourrait imaginer plusieurs applications de l'analyse multicritère au cours d'une ACV.

Tout d'abord au niveau de l'agrégation des éléments de l'inventaire en un seul impact. En ce qui concerne les facteurs scientifiquement évaluables (par exemple la comparaison des 2 matières polluantes en un seul équivalent); il ne serait pas convenable de remplacer ces éléments justifiés scientifiquement par des études précises, par une pondération issue d'une analyse multicritère, qui serait, elle, subjective. Par contre, l'analyse multicritère pourrait être un bon moyen d'intégrer et d'agréger des facteurs difficilement quantifiables scientifiquement (comme les facteurs sociaux, l'impact sur les paysages, etc. Notons que ces externalités ne sont pas encore intégrés dans les ACV).

L'analyse multicritère peut aussi être appliquée pour la pondération des différents facteurs d'impact en vue d'une agrégation. C'est essentiellement cette direction qui a été présentée dans différentes publications (voir [24], [25] et [48]). Il est assez facile de voir que les ossatures des deux concepts que sont l'ACV et l'analyse multicritère sont semblables. Les papiers (voir [11] et [17]) ont ainsi relié toutes les composantes d'une ACV avec les composantes d'une analyse multicritère. On peut identifier les critères aux catégories d'impact.

L'analyse multicritère pourrait également être utilisée en aval de l'ACV; c'est à dire au niveau du choix d'un produit. Ainsi, avoir une 'note' environnementale pour tous les produits possibles, permettra aux managers de choisir un produit au vu de son coût monétaire, son coût social; et le critère environnemental pourra être intégré de façon synthétique, dans cette prise de décision.

Par la suite, ce rapport se contentera d'examiner la seconde possibilité d'application : utiliser l'analyse multicritère pour la pondération des catégories d'impact, et l'agrégation.

A) État des lieux des méthodes existantes

Les chercheurs en ACV ont développé une multitude de méthodes afin de mener des ACV. Parmi les plus connues, citons Eco-Indicator 95, Eco-Indicator 99, EPS. Toutes les méthodes proposées ne permettent pas de faire une pondération des catégories d'impact, la pondération étant une étape facultative de l'ACV. En ce qui concerne les méthodes d'ACV proposant une pondération, trois grandes techniques se dégagent.

La première est la monétisation des critères : on assigne telle valeur monétaire à la perte d'un point d'acidification par exemple. Il faut toutefois prendre garde à la forme de cette fonction de préférence : la valeur monétaire n'est sûrement pas une fonction linéaire de l'acidification.

La seconde grande technique consiste à trouver la distance entre une valeur standard donnée (déterminée par des politiques, ou des scientifiques), et la valeur obtenue de l'ACV. On en déduit par comparaisons entre tous les critères considérés, une pondération.

La troisième technique consiste à demander à un collège d'experts (scientifiques, représentants de l'autorité, etc.), de proposer une pondération.

D'autres techniques, moins répandues, ont toutefois été utilisées pour mener à une agrégation des différentes catégories d'impact:

- l'approche proxy : on convertit toutes les catégories d'impact en une même unité (la consommation d'énergie par exemple), puis on agrège par simple addition tous ces facteurs transformés sur une échelle commune.

- on peut également chercher la distance par rapport à une valeur cible, déterminée par la quantité de polluants que peut supporter le milieu.

B) Apport de l'analyse multicritère à la pondération

Les techniques aujourd'hui employées dans la pondération, laissent place à beaucoup de subjectivité dans la détermination des poids. Les seuils qui sont fixés, le sont arbitrairement par exemple. De même, la monétisation est une forme de détermination de préférences, et est aussi subjective. Les décisions d'un panel de scientifiques et de politiques, sont elles aussi subjectives. L'analyse multicritère se place sur le même niveau de subjectivité, et ne peut donc être critiquée sur ce point.

Par contre, les méthodes multicritère sont des techniques d'aide à la décision éprouvées depuis de nombreuses années. Elles ont largement été employées pour résoudre des problèmes variés et complexes (choix de ligne de métro parisien, évaluation de sites d'enfouissement de déchets, etc.). L'analyse multicritère peut donc apporter des méthodes rôdées, et reconnues à l'ACV.

Un autre avantage de l'analyse multicritère, est la possibilité d'implémenter à la fois des données subjectives et objectives.

De plus, le principe même de l'analyse multicritère est de structurer les différentes données, afin de former un choix raisonné. Ceci apportera une légitimité au résultat de l'ACV, dans le sens où ce résultat aura été pensé et repensé, de manière cohérente (et non déterminé par tâtonnements).

C) Problèmes pratiques à l'implémentation de l'analyse multicritère en analyse de cycle de vie

Avant d'implémenter les méthodes d'analyse multicritère en ACV, l'utilisateur peut se poser quelques questions. Passons en revue quelques problèmes.

Il faut tout d'abord faire un choix quand au niveau de la pondération. Deux niveaux sont possibles pour effectuer la pondération : les midpoints ou les endpoints. Ces alternatives ont chacune leurs bons, et mauvais côtés.

Une pondération au niveau des endpoints mettra en jeu des critères beaucoup plus palpables (les concepts de nombre de morts potentiels ou d'impact sur l'environnement sont bien plus faciles à appréhender que l'acidification ou l'eutrophication, au moins pour un novice). Par contre, les endpoints sont créés par combinaisons de midpoints. Il y a du coup, perte d'information au passage des

midpoints aux endpoints. Un autre problème est induit par la liste restreinte des endpoints; ils sont au nombre de 4 (ce nombre est susceptible d'évoluer : l'ACV est un domaine sur lequel de nombreux chercheurs se penchent); mais il m'apparaît très difficile de faire un choix entre le nombre d'année de vie perdues, les dégâts sur l'environnement, et la diminution des ressources naturelles. Un aspect éthique entre en ligne de compte, ce qui complique encore plus la tâche de la pondération.

D'un autre côté, la liste des midpoints semble relativement exhaustive. Ils sont au nombre de 14, ce qui est peut-être un peu trop pour mener une bonne analyse multicritère (tout du moins, on ne pourra pas employer n'importe quelle méthode). Il est de plus difficile, à moins d'être un expert, de pouvoir comparer une perte de 20 points d'indicateur d'acidification avec un gain de 10 points en potentiel de réchauffement planétaire. Ces indicateurs sont peu parlants pour la plupart des gens. La pondération ne pourra dans ce cas être effectuée que par un (des) scientifique(s) ayant une vision assez large du problème.

Des hypothèses assez strictes sont posées sur les critères, afin de pouvoir les utiliser lors d'une ACV. [17] nous donne quelques règles à suivre afin de construire une famille de critères acceptables. Remarquons toutefois que les hypothèses sur les critères pour mener une analyse multicritère sont rarement remplis. De toute façon, il est souhaitable de s'approcher au mieux de ces hypothèses. Il ne faudra toutefois pas oublier de documenter les approximations effectuées.

Le choix de la (des) personne(s) chargée(s) de déterminer la pondération est ardu. Doit-on demander cela à un collège d'experts, au risque de rendre la pondération encore plus difficile par le fait qu'il n'y aura sûrement pas unanimité dans le choix des poids ? Si on demande à une seule personne de le faire, quel devra être son statut (politique, scientifique, une personne choisie au hasard) ? On pourrait également penser à un sondage, mais évidemment tous les sondés n'auront pas la compétence technique, pour appréhender correctement le problème (bases scientifiques notamment).

L'analyse multicritère ne pourrait être considérée comme un outil scientifique si elle ne proposait pas d'effectuer une analyse de sensibilité. Cette analyse permet de se rendre compte de la robustesse des résultats obtenus. Ainsi, une solution peut être classée première avec un certain ensemble de poids; mais si l'on change cet ensemble, elle dégringole dans notre classement; il faudra se méfier de cette solution (voire reprendre la pondération). Notons que l'analyse de sensibilité devra concerner la pondération, mais aussi les résultats de l'ACV. Il est en théorie possible d'implémenter des intervalles de confiance, voire même des distributions de probabilité, pour les différentes catégories d'impact. Toutefois, cela ne peut se faire sans un investissement encore plus important au niveau de l'inventaire. L'analyse de sensibilité permet de relativiser le résultat brut d'une ACV.

IV- CHOIX D'UNE METHODE D'ANALYSE MULTICRITERE POUR L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE

Les exemples existant d'application de méthodes multicritère à l'ACV, sont très peu nombreux; et à ma connaissance, seul Sarkis ([44] et [45]) a appliqué AHP à l'ACV. Ayant conscience de ne pas avoir balayé toutes les méthodes d'analyse multicritère, cette étude restera à approfondir, éventuellement en incluant d'autres méthodes. Les évolutions des techniques d'analyse de cycle de vie et d'analyse multicritère, pourraient également permettre de rétrécir (ou augmenter) le nombre de méthodes à prendre en compte.

Le choix d'une méthode d'analyse multicritère doit se faire en prenant en compte de nombreux paramètres. Une vue d'ensemble de l'analyse multicritère est nécessaire pour effectuer un choix adéquat. En effet, en implémentant n'importe laquelle des méthodes d'analyse multicritère, on arrivera à un résultat. Toutefois, le chemin choisi ne sera pas forcément le plus pratique, le résultat ne sera pas forcément satisfaisant non plus. Il est donc souhaitable de justifier la méthode d'analyse multicritère choisie; ceci ayant une influence importante sur le résultat final.

Étant donné la quantité de méthodes disponibles, le choix d'une méthode d'analyse multicritère est plus pratique par élimination. L'objectif n'est pas d'arriver à une seule méthode qui permettra de résoudre tous les problèmes, mais plutôt de déterminer une liste de méthodes plus adaptées à la problématique de l'ACV. Puis, en fonction de la question à laquelle on est confronté, choisir la (les) méthode(s) la (les) plus appropriée(s).

A) Élimination de méthodes par la solidité de leurs bases mathématiques

Toutes les méthodes multicritère utilisées ont eu leurs détracteurs. Il est toutefois peu justifiable d'utiliser une méthode d'analyse multicritère tranquillement lorsque l'on sait que ses fondements mathématiques et logiques ne sont pas corrects. Remarquons toutefois qu'il est possible de corriger certains de ces défauts, en portant une attention accrue aux réponses fournies par le décideur.

Néanmoins, au vu des nombreuses critiques qu'a connu AHP, il me semble préférable de ne pas l'utiliser; ainsi que toutes les autres méthodes ayant la même base. De nombreux défauts ont été signalés (voir dans la partie 1); peut-être pourrait-on en corriger certains, mais il ne me semble pas possible de pouvoir tous les corriger.

Quand aux méthodes restantes, la pondération reste une étape délicate; en particulier sur un point que je tiens à souligner. La note finale obtenue par une action doit bien évidemment être indépendante des unités choisies pour évaluer chacun des critères. Par exemple, supposons que l'encombrement d'une voiture, soit un critère entrant dans un problème d'analyse multicritère. Le classement final entre toutes les voitures considérées, ne devra pas dépendre du fait que l'on mesure l'encombrement en mètres, ou en pouces. Ceci implique donc que le choix de la pondération est intimement lié aux unités utilisées. Donc, si on veut pondérer l'encombrement d'une voiture et sa puissance, il faudra vérifier que :

Poids pour la puissance $\times$ 1 cheval = Poids pour l'encombrement $\times$ 1 pied

Un autre détail important est la prise en compte de points de référence. En effet, il est a priori incorrect d'ajouter des mètres et des chevaux (toujours pour notre exemple de choix d'une voiture). Il est donc primordial de pouvoir lier l'échelle discriminant les voitures selon leur encombrement, et l'échelle distinguant les voitures selon leur puissance. Il faut donc choisir des points de référence pour lier ces deux échelles. Très peu de méthodes prennent ce facteur en compte; et il faut donc manipuler avec précaution les résultats fournis par l'évaluateur. Lui demander régulièrement de bien réfléchir à ses choix, va l'amener à lier les deux échelles considérées.

Beaucoup de méthodes procèdent par agrégation linéaire des scores obtenus sur les différents critères avec leur poids ; de la même manière que l'on compare plusieurs élèves d'une même classe entre eux. Mais, il y a en fait très peu de chances que les préférences du décideur soient simplement une somme pondérée; il est possible qu'il existe des corrélations et des changements d'inclinaison dans

ses fonctions de préférence. On peut toutefois considérer cette somme pondérée comme une approximation au premier ordre des préférences du décideur; l'analyse de sensibilité permettant ensuite de savoir quel degré de certitude (plus ou moins élevé) on a sur ce résultat.

B) Critères possibles pour le choix d'une méthode appliquée à l'analyse de cycle de vie

Un examen attentif des données disponibles peut d'ores et déjà permettre de réduire une nouvelle fois le champ des méthodes utilisables. A priori, les données d'une ACV ne sont pas des nombres incertains. Certaines méthodes récentes très raffinées (NAIADE, PAMSSEM pour ne citer que celles-ci) peuvent donc être écartées car les données disponibles, ne correspondent pas à leur champ d'application.

Un autre élément discriminant se situe dans le type de résultats que l'on veut obtenir. Les méthodes d'analyse multicritère sont généralement classées en trois catégories. Tout d'abord, celles qui permettent de séparer l'ensemble des solutions possibles en deux sous-ensembles : le sous-ensemble des solutions acceptables, et le sous-ensemble des solutions à rejeter (méthodes de type alpha). Une deuxième catégorie de méthodes sépare toutes les actions en plusieurs sous-ensembles d'actions, ayant des performances comparables (méthodes de type bêta). Finalement, la dernière catégorie de méthodes range les actions de la plus performante, jusqu'à la moins performante (méthodes de type gamma).

Il est également possible d'avoir un résultat numérique reflétant le degré de performance de chaque action. Sur ce point, seule une discussion avec les utilisateurs des résultats des ACV (managers de groupes industriels, décideurs politiques) pourrait permettre de faire ce choix. Il est recommandé d'adapter le choix de la méthode à la problématique rencontrée, ne pas se contenter d'une seule méthode pour répondre à toutes les problématiques.

On peut également envisager de mener deux ACV, l'une utilisant une méthode de problématique gamma, donnant un résultat numérique reflétant la performance d'un produit. Une autre utilisant une problématique bêta, définissant des actions ayant des performances environnementales équivalentes. Ceci permettrait d'intégrer l'ACV dans une vue d'ensemble pour le décideur (avec des paramètres de coût, sociaux, etc.); et dans une vue plus centrée sur l'environnement.

La facilité à manipuler les méthodes doit également permettre de faire une différence : on aura plus de confiance dans un résultat sur lequel le décideur sera sûr de lui; que dans le cas où il aura peiné pour émettre des opinions incohérentes.

Les méthodes que j'ai sélectionnées parmi celles que j'ai étudiées sont les suivantes :

- Pour une problématique alpha: ELECTRE I

- Pour une problématique bêta: ELECTRE III, ELECTRE IV, PROMETHEE I

- Pour une problématique gamma: Somme pondérée, MACBETH, PROMETHEE II

Pour des raisons mathématiques, j'ai donc préféré ne pas retenir AHP. MAUT semble tellement difficile à mettre en œuvre, que je lui ai préféré la méthode de Somme pondérée, plus

palpable. De plus, il me semble difficile de convertir simplement (et du coup sans perdre trop d'information) un impact environnemental (des kilos de dioxyde de carbone par exemple) en utilité.

C) Compte-rendu de quelques implémentations de méthodes d'analyse multicritère

Afin d'évaluer avec de véritables données d'ACV les différentes méthodes d'analyse multicritère, je me suis procuré des résultats d'ACV, ainsi que des logiciels de démonstration. Très peu de données finales d'ACV sont disponibles. Notamment, je n'ai pu trouver de données chiffrées de catégories d'impact au niveau des endpoints.

Les méthodes ont été testées par des logiciels en démonstration. De ce fait, le nombre de critères et d'actions pouvant être implémentées, a été limité; et il a fallu laisser de côté certains critères. J'ai donc testé la méthode MACBETH à l'aide du logiciel M-MACBETH. Les méthodes PROMETHEE I et II ont été implémentées à l'aide du logiciel Decision Lab. Les méthodes ELECTRE III et IV ont été implémentées à l'aide du logiciel ELECTRE. Excel a servi à implémenter la méthode de Somme pondérée.

Quand aux données implémentées; une étude comparant des canettes et des bouteilles m'a été fournie. Elle permettait de faire des tests avec des midpoints et des endpoints; mais ne comportait que deux actions. J'ai également implémenté des données au niveau des midpoints, mais comportant plus d'actions. Une étude comparant trois bio polymères extraits de plantes génétiquement modifiées à trois polymères 'traditionnels'; et une autre comparant trois cycles de motorisation, ont également servi de données.

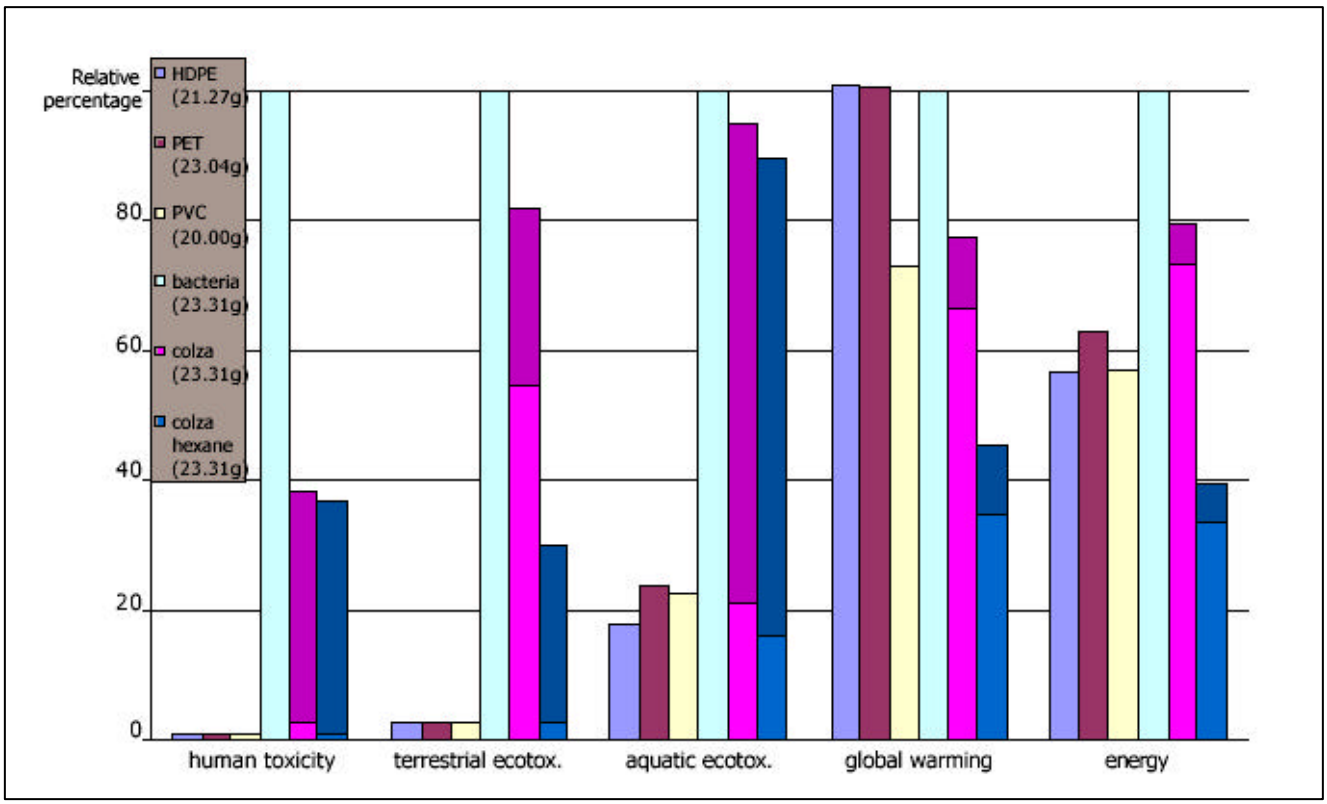
Le tableau suivant montre les données de l'ACV comparant canettes et bouteilles, dans le cas des indicateurs midpoints (les données sont normalisées, elles sont donc sans unité) :

Catégorie d'impact	Impact par les bouteilles	Impact par les canettes
Effet de serre	0.0176054	0.0073186
Couche d'ozone	x	x
Acidification	0.0244797	0.007382
Eutrophication	0.0045482	0.002176
Métaux lourds	0.2069	0.003334
Cancérigènes	0.0047263	0.0008802
Smog en été	0.0135134	0.0045619
Smog en hiver	2.58^{E}-5	0.0013597
Pesticides	x	x
Ressources en énergie	0.0062786	0.0037646
Déchets solides	0	0

Le tableau ci-dessous montre les résultats normalisés de l'ACV des canettes et bouteilles, au niveau des endpoints :

Catégorie d'impact	Impact par les bouteilles	Impact par les canettes
Santé humaine	0.0328707	0.0070131
Écosystème	0.0160111	0.0006471
Ressources	0.0151243	0.011406

La figure suivante montre les résultats de l'ACV comparant les bio polymères. Les données sont ici aussi normalisées, mais par rapport à l'action « bactérie ».



La figure ci-dessous reprend la comparaison des trois cycles de motorisation :

Impact Category	Base Case Cycle * (Case A)	Multi-Product Cycle, Combined Part (Case B)	IEA IGCC Cycle with CO_2 Separation (Case C)	Case B/Case A	Case B/ Case C
Acidification	5.03E-04	3.19E-04	3.46E-04	0.63	0.92
Eutrophication	8.72E-01	9.43E-01	1.13E+00	1.08	0.84
Smog	8.52E-05	7.83E-05	1.08E-04	0.92	0.73
GCC	1.56E+00	4.90E-01	2.80E-01	0.31	1.75
Particulate Matter (PM_{10})	3.27E-04	3.31E-04	4.17E-04	1.01	0.79
Terrestrial Toxicity	8.27E-06	6.55E-07	1.07E-06	0.08	0.61
Human Toxicity (air)	1.11E-02	1.08E-02	1.05E-02	0.97	1.02
Human Toxicity (water)	2.16E-08	3.21E-08	4.26E-04	1.49	0.00
Carcinogenicity (air)	2.02E-08	1.69E-08	1.17E-08	0.84	1.45
Land Use	1.09E-01	1.06E-01	8.69E-02	0.97	1.22
Resource Depletion	5.66E-03	5.53E-03	3.64E-03	0.98	1.52
Water Use	1.43E+00	1.84E+00	3.56E+00	1.29	0.52

*A) Base-case IGCC cycle without H_2 and CO_2 separation; net power output – 412.8 MW.
B) Multi-product system, combined cycle only; net power output – 110.3 MW.
C) IEA IGCC cycle with separation of CO_2; net power output – 646 MW.

Les poids utilisés dans ces méthodes sont en bonne partie les mêmes que ceux utilisés par les méthodes Eco-indicator 95 (pondération des midpoints) et Eco-indicator 99 (pondération des endpoints). Afin d'effectuer des analyses de sensibilité, ces poids ont été légèrement changés. Notons également qu'aucune information sur l'incertitude n'était disponible, ce qui ne permet pas d'effectuer d'analyse de sensibilité complète.

Le tableau ci-dessous présente la pondération utilisée par Eco-indicator 95 pour certaines catégories d'impact. Afin de mener des analyses de sensibilité, j'ai considéré que ces nombres étaient en fait compris entre des valeurs minimum et maximum : ces considérations ne sont en rien tirées de la littérature, et c'est uniquement un 'jugement' personnel basé sur les pondérations Éco-indicator.

Indicateur midpoint	Pondération Eco-indicator 95
Effet de serre	2.5
Smog en été	2.5
Smog en hiver	5
Cancérigènes	10
Acidification	5
Eutrophication	2.5

Les tableaux ci-dessous présentent deux des trois pondérations endpoints proposées par la méthode Eco-indicator 99.

Indicateur endpoint	Pondération Égalitaire Eco-indicator 99
Santé humaine	300
Écosystème	400
Ressources	300

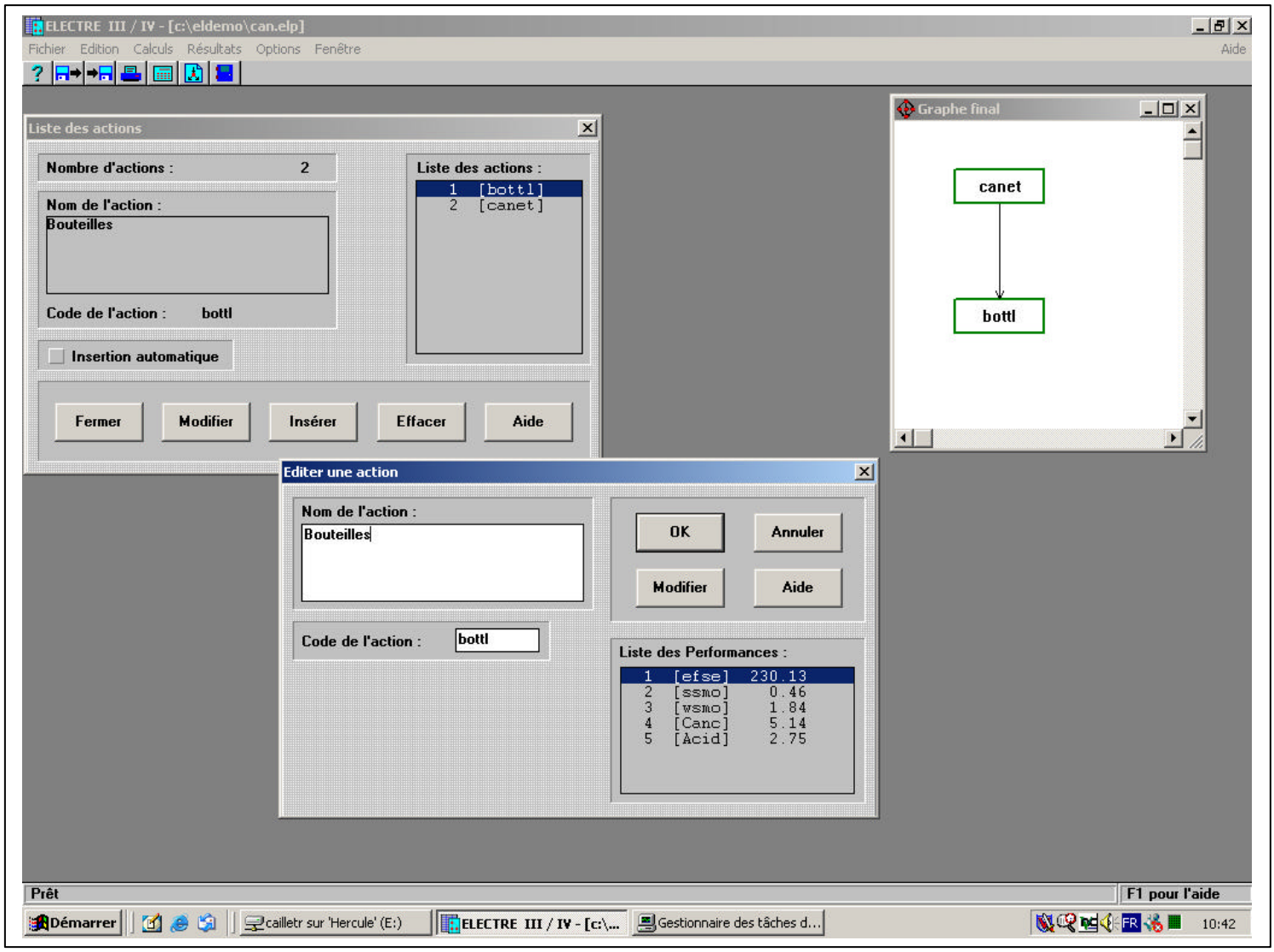
Indicateur endpoint	Pondération Individualiste Eco-indicator 99
Santé humaine	550
Écosystème	250
Ressources	200

1) Implémentation d'ELECTRE III et IV

Ce logiciel est assez simple à manipuler. Même si je n'ai pas touché à certaines subtilités des méthodes ELECTRE, les résultats obtenus sont concluants (on ne trouve pas d'aberrations).

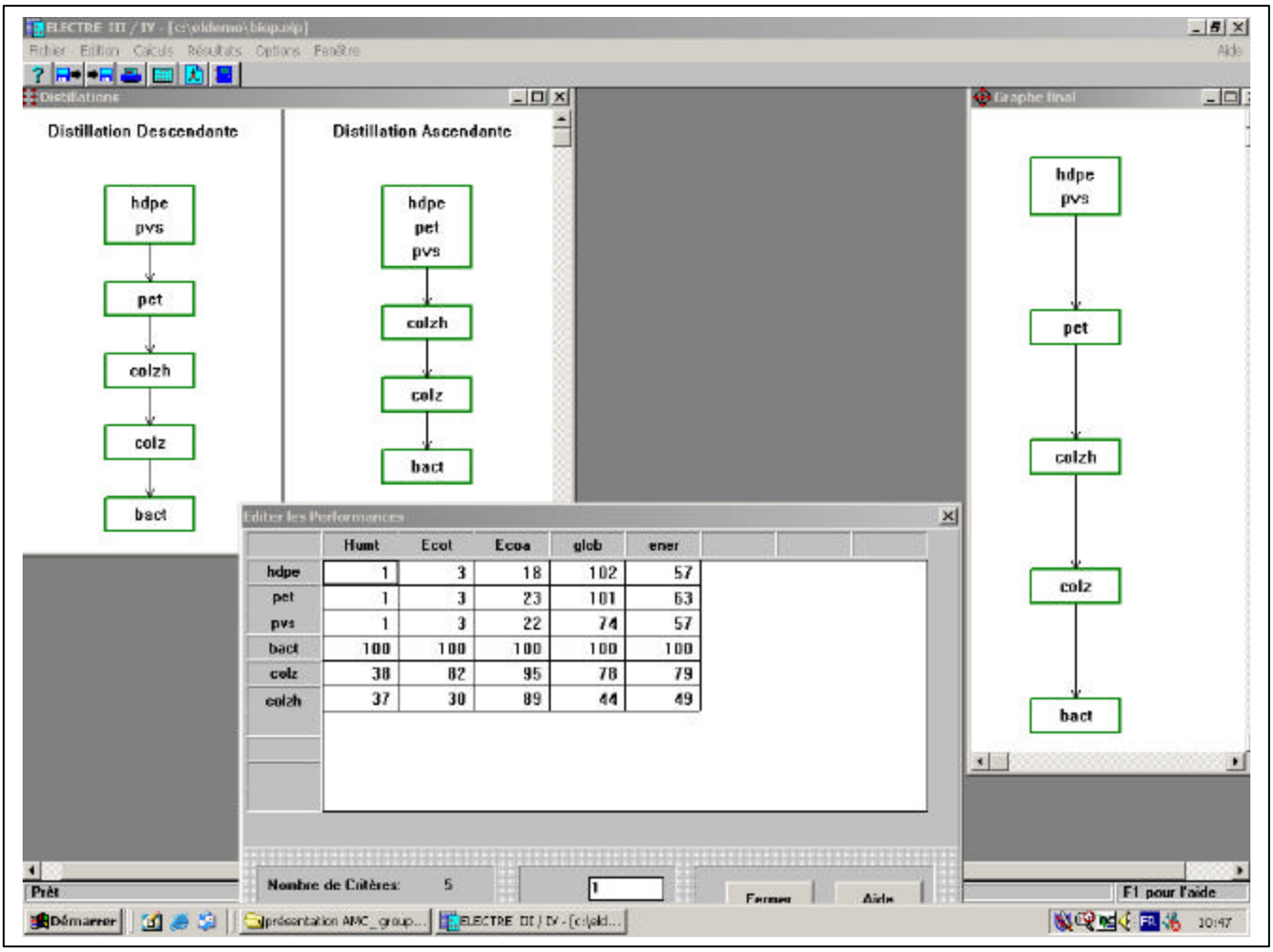
L'implémentation des données de l'ACV des canettes et bouteilles a donné, quel que soit la pondération adoptée (pondération Eco-indicator 95 ou 99, avec ou sans modification des poids pour analyse de sensibilité), l'action 'canettes' a toujours dominé l'action 'bouteilles'. C'est un premier point qui souligne bien le caractère faiblement compensatoire de cette méthode. En effet, l'implémentation des données avec les poids individualistes d'Eco-indicator 99, aurait donné l'action 'bouteilles' devant l'action 'canettes' (voir la partie « Implémentation de la méthode de somme pondérée »).

La figure ci-dessous montre les différentes étapes de la méthode ELECTRE. Fenêtre en haut à gauche : insertion des actions. Fenêtre du bas : insertion des performances des actions. Fenêtre de droite : graphe des résultats.



Le logiciel ELECTRE a aussi permis de comparer les deux autres ACV à disposition. Les résultats sont restés en accord avec les données (c'est à dire qu'une action qui se comportait dans l'ensemble mieux, dominait au final les autres actions). Les analyses de sensibilité effectuées en faisant varier les poids attribués aux différents critères (en faisant varier les poids au maximum de deux points autour de leur valeur initiale) ont montré peu ou pas de changements dans les classements finaux. En effet, les seuls changements notables ont eu lieu dans le cas où l'on minimise les poids avantageant une action, et l'on maximise ceux avantageant l'autre. Ceci montre bien la robustesse de la méthode ELECTRE.

La figure ci-dessous montre les résultats de la comparaison des bio polymères avec ELECTRE : Le cadre en haut à gauche montre les résultats des distillations. Le cadre du bas montre le tableau des performances des différentes actions. Enfin, à droite, le résultat final : les polymères HDPE et PVS dominent les autres.



2) *Implémentation de la méthode de Somme pondérée*

Si l'on implémente tout d'abord cette méthode avec l'étude de canettes et bouteilles, cela nous permet de comparer les études au niveau des midpoints et des endpoints. Notons que l'implémentation de cette méthode de Somme pondérée, est finalement exactement ce que font les méthodes Éco-indicator 95 et 99. Cette méthode, en gardant les poids donnés par Éco-indicator n'apporte donc pas grand chose. L'analyse de sensibilité que j'ai mené en faisant varier les poids n'a apporté aucun changement avec les midpoints. Par contre, au niveau des endpoints, le fait de passer d'une pondération égalitaire à une pondération individualiste (on y donne plus de poids au facteur humain), fait passer les bouteilles devant les canettes. Ceci montre bien le caractère pleinement compensatoire de cette méthode. Ce défaut n'est finalement pas si facile à corriger. Toutefois, l'avantage est que l'on obtient un nombre permettant de caractériser de façon synthétique, les impacts environnementaux d'un produit.

L'analyse de sensibilité sur l'étude des bio polymères n'a pas apporté beaucoup de changements. Encore une fois, les seuls changements notables ont eu lieu dans le cas où l'on minimise les poids avantageant une action, et l'on maximise ceux avantageant l'action suivante.

Les tableaux ci-dessous montre les résultats de la méthode de Somme pondérée. Le tableau du haut exhibe les poids utilisés pour l'étude (y compris l'analyse de sensibilité). Finalement, le tableau du bas montre le classement des actions, et la note qu'elles ont obtenu.

	Poids usuels midpoints	Poids maximaux	Poids minimaux
Human toxicity	10	12	8
Terrestrial ecotoxicity	5	6	4
Aquatic ecotoxicity	5	7	4
Global warming	2.5	5	2
Energy	2.5	4	2

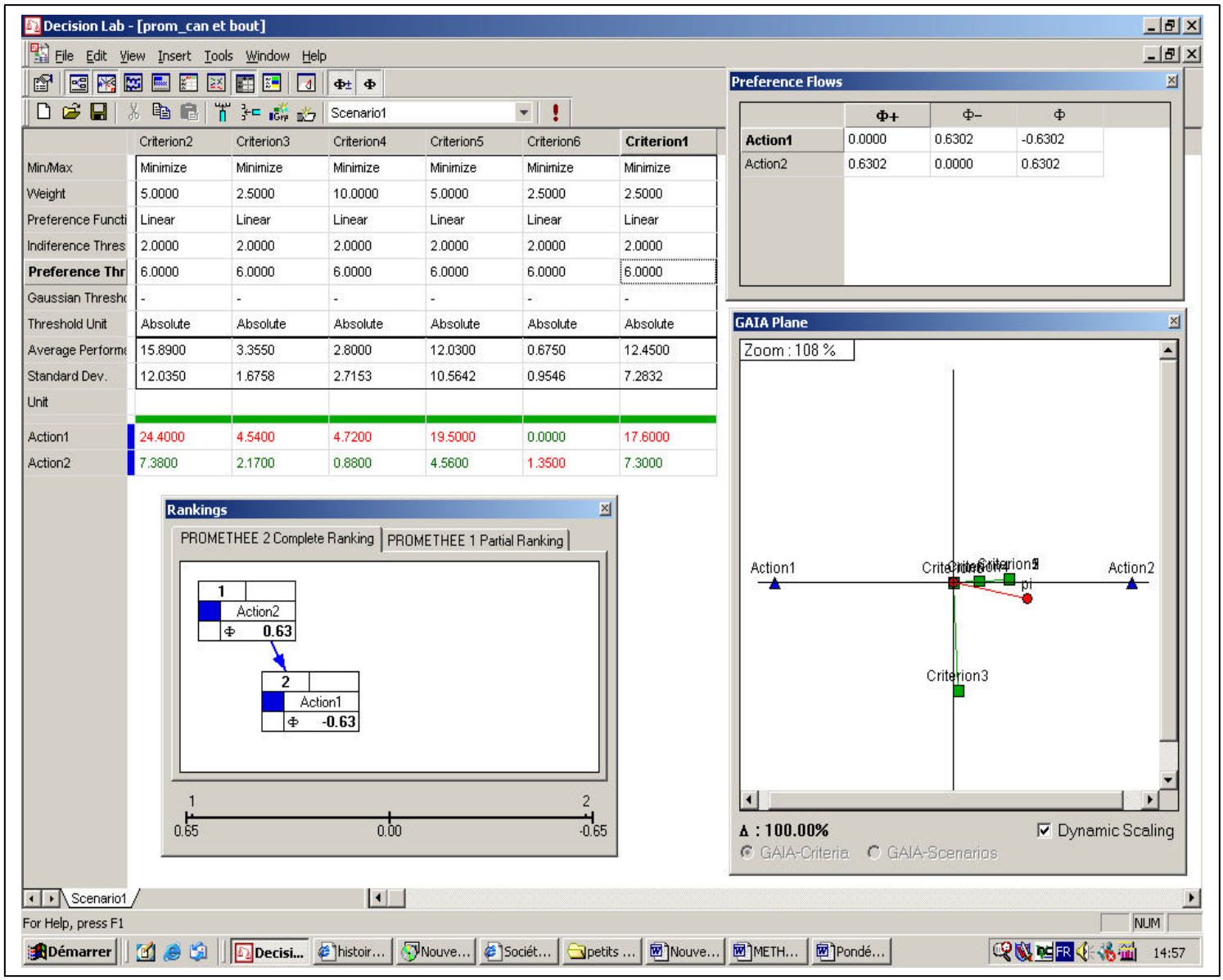
	Classement avec les poids usuels	Classement avec les poids maximaux	Classement avec les poids minimaux
1	PVC	PVC	PVC
2	HDPE	HDPE	HDPE
3	PET	PET	PET
4	Colza hexane	Colza hexane	Colza hexane
5	Colza	Colza	Colza
6	Bactérie	Bactérie	Bactérie

	Note avec les poids usuels	Note avec les poids maximaux	Note avec les poids minimaux
PVC	512.5	1143	1805
HDPE	550	1196	1940
PET	462.5	971	1625
Colza hexane	2500	3000	6600
Colza	1657.5	2495	4703
Bactérie	1197.5	1447	3479

3) *Implémentation de PROMETHEE I et II*

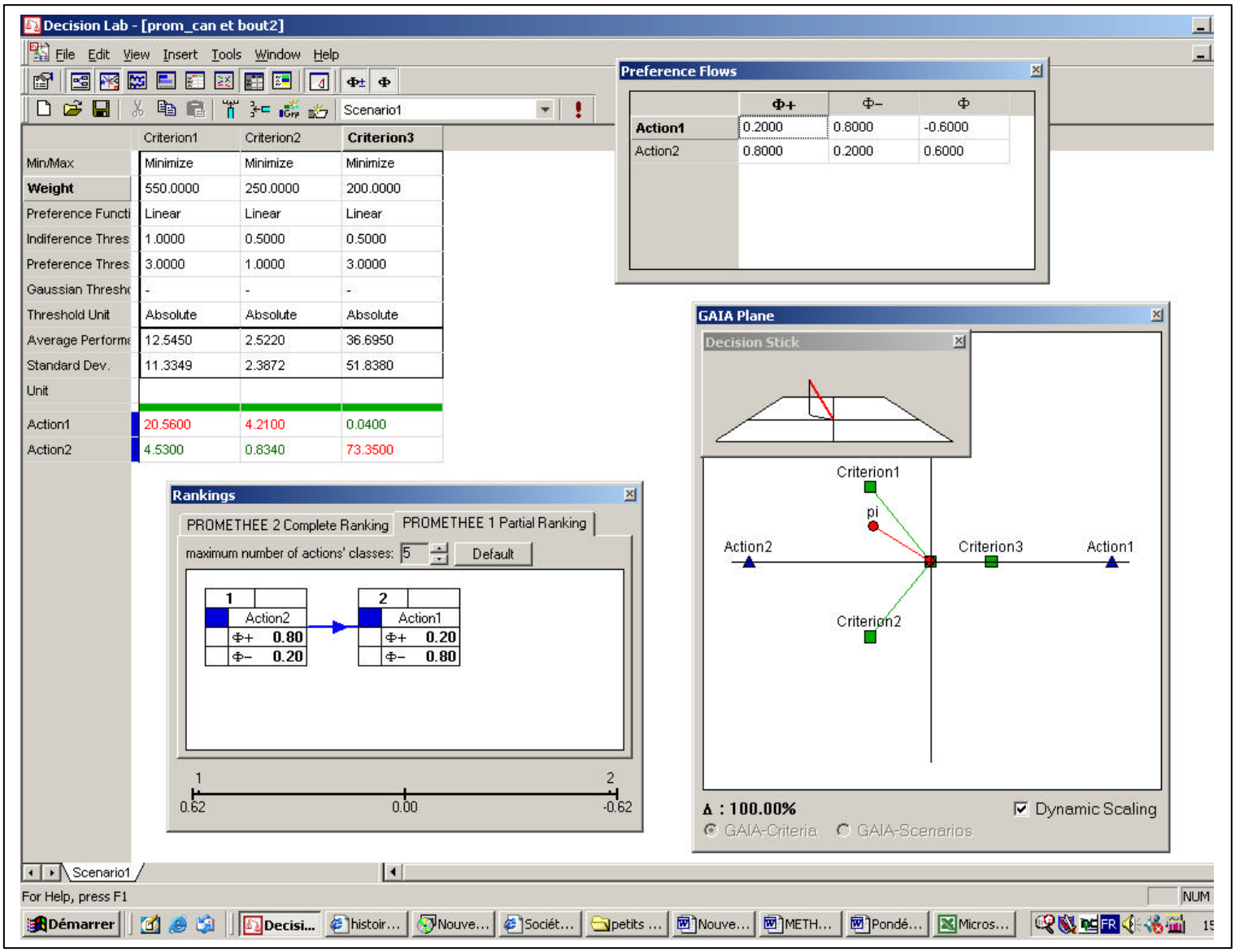
La méthode a tout d'abord été implémentée avec l'ACV des canettes et bouteilles. Le type de critères qui a été retenu est 'linéaire', ce qui me semblait le plus 'probable'. Le critère gaussien pourrait aussi être utilisé dans certains cas. Il faut toutefois avoir une idée de la valeur du nombre s , ce qui me semble encore moins évident que la détermination de seuils d'indifférence et de préférence. Les valeurs utilisées pour les seuils ont été choisies au hasard, en essayant toutefois de rester réaliste.

La figure ci-dessous montre les différentes étapes de la méthode PROMETHEE. Le cadre en haut à gauche montre les données : poids, type de critère : linéaire , seuils associés et valeurs pour chacune des deux actions considérées (Action 1 : bouteilles, Action 2 : canettes). Le cadre en bas à gauche est un graphe de domination (obtenu par la méthode PROMETHEE II). Le cadre en haut à droite montre les différents flux. Le cadre en bas à droite permet d'analyser le problème graphiquement grâce au logiciel GAIA (basé sur la Principal Component Analysis). On observe ainsi que le critère 3 (eutrophication) entre en conflit avec les autres critères.



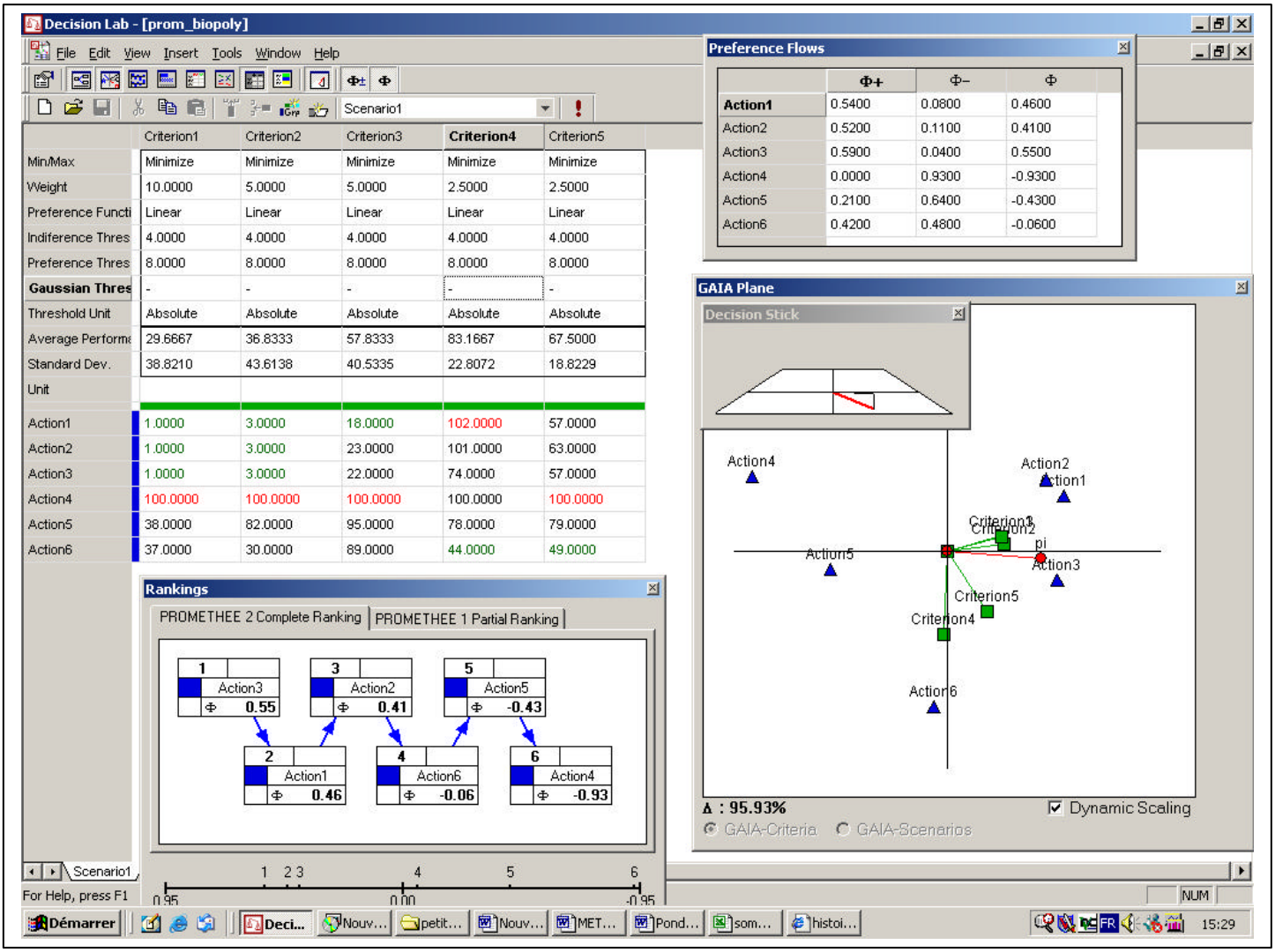
Si l'on implémente le problème au niveau des midpoints, avec une pondération individualiste, on obtient les mêmes résultats : l'action 'canettes' domine l'action 'bouteilles', ce qui montre que PROMETHEE a bien, comme ELECTRE, un caractère non-compensatoire.

La figure ci-dessous montre les résultats de l'application de PROMETHEE au niveau des endpoints. Le tableau en haut à gauche montre les données implémentées (le type choisi pour les critères est toujours linéaire). Le cadre en bas à gauche montre le graphe de dominance obtenu avec PROMETHEE I. Le tableau en haut à droite montre les flux ; et finalement le cadre en bas à droite permet une analyse graphique du problème. On voit alors que l'on ne peut augmenter l'importance de deux critères endpoints sans pénaliser le troisième.



On peut également voir les résultats de PROMETHEE appliquée à l'ACV des bio polymères. Notons que brs de l'analyse de sensibilité, les seuls changements notables de classement ont eu lieu dans le cas où l'on minimise les poids avantageant une action, et l'on maximise ceux avantageant l'action suivante.

La figure ci-dessous montre les résultats de PROMETHEE dans le cas des points usuels Éco-indicator 95.



4) *Implémentation de MACBETH*

Cette méthode était sur le papier très alléchante (rigoureuse, basée sur des comparaisons, mais permettant d'obtenir un résultat numérique). Finalement, il est quasi impossible de pouvoir l'appliquer pour mener une ACV. Les difficultés ne viennent pas tant de la méthode, que de la rigidité du logiciel; établi avant tout pour faire de l'aide à la décision. On ne peut régler le niveau des actions 'bonne' et 'neutre'. On ne peut considérer qu'une échelle croissante pour les critères envisagés (c'est à dire que les valeurs performantes sont représentées par un score élevé sur l'échelle MACBETH). On tâtonne beaucoup trop pour pouvoir rentrer les données initiales de l'ACV.

Au final, ce logiciel pourrait être appliqué à l'ACV si on lui apportait quelques modifications : laisser à l'utilisateur la possibilité de fixer lui-même les niveaux 'bon' et 'mauvais'; pouvoir raisonner avec une échelle de valeurs décroissantes, et rentrer les valeurs des résultats de l'ACV sans avoir à faire de comparaisons entre les critères.

Peut-être aussi que le manque d'expérience sur ce logiciel, a fait rater les réglages de la méthode, afin de pouvoir l'appliquer à l'ACV : dans ce cas, le logiciel aurait surtout besoin d'une aide en expliquant les subtilités.

5) *Remarques d'ordre général*

Les tests effectués ci-dessus montrent que l'application des méthodes d'analyse multicritère à l'ACV est possible. Une adaptation des logiciels (plus ou moins grande selon les méthodes) est toutefois souhaitable. Le caractère compensatoire de certaines méthodes incite à proposer de mener deux analyses multicritère en parallèle : l'une avec une méthode de type Somme pondérée par exemple (afin d'obtenir un résultat chiffré). L'autre avec une méthode sur-classement afin d'observer s'il y a ou non compensation; et finalement on pourra engager une réflexion sur la base de la comparaison des deux résultats.

Toutefois, de nombreuses questions fondamentales restent en suspens : la quantité de données implémentées au niveau des endpoints ne permet pas de dire s'il faut préférer la pondération au niveau des midpoints ou des endpoints. Les deux points de vue seront sûrement utiles.

Le problème crucial est celui de la pondération : j'ai repris les poids des méthodes Éco-indicator; et le seul apport personnel au niveau de la pondération se situe dans l'intervalle de fluctuation des poids. Ces fluctuations ont été fixées de manière arbitraire et sans aucune connaissance des données sous-jacentes. Il est donc bien évidemment souhaitable que des experts aboutissent à une pondération : des novices ne peuvent le faire, n'ayant aucune connaissance en impacts environnementaux. Seul un expert pourra comparer une variation d'un point d'une donnée normalisée, par rapport à la variation de 2 points sur une autre variable. De plus, le fait de normaliser les données ne rend pas les choses plus claires pour un novice.

La création d'une pondération endpoints fait aussi apparaître des considérations éthiques (comment comparer l'écosystème et des vies humaines par exemple ?).

Conclusion

Aucun obstacle conceptuel ne s'oppose à l'application de l'analyse multicritère à l'ACV. Au contraire, l'analyse multicritère semble être un outil parfaitement adapté pour intégrer de nouveaux facteurs, difficilement quantifiables et de grande importance dans l'ACV (les facteurs sociaux notamment). Il ne faut toutefois pas considérer l'analyse multicritère comme un outil magique, permettant de résoudre l'épineux problème de la pondération en ACV. La pondération restera subjective; mais l'analyse multicritère peut permettre de faciliter cette étape, et d'apporter au problème de pondération une légitimité plus importante. On pourrait utiliser certains logiciels pour structurer le raisonnement menant à une pondération. Ainsi, le logiciel M-MACBETH, qui, par étapes, permet de créer une pondération. De plus, la pondération obtenue par ce logiciel n'est pas figée; mais consiste plutôt en des intervalles. Il serait ainsi possible d'obtenir une première approximation sur la pondération à adopter. Cette idée devrait être testée par des spécialistes en écologie et en ACV.

Il est souhaitable que l'analyse multicritère soit utilisée en aval des étapes obligatoires de l'ACV (c'est à dire afin d'agréger les résultats bruts). L'analyse multicritère est avant tout un outil permettant et aidant les décideurs, à faire un choix réfléchi et structuré. Mener de front deux analyses multicritères, l'une avec une méthode compensatoire; et l'autre avec une méthode non-compensatoire, permettrait d'avoir un point de vue plus large quand aux choix considérés. Si les deux méthodes donnent le même résultat; alors ce résultat sera conforté. Dans le cas contraire, on soupçonnera le fait que certaines solutions sont compensatoires; et le manager procèdera à un examen plus fin des résultats de l'ACV. De plus, si la méthode compensatoire donne une note évaluant la performance d'une action, cette note pourra être intégré dans un choix plus large pour le décideur (incluant notamment des paramètres importants pour l'entreprise tels les coûts). Encore une fois, cette idée devrait être proposée à quelques managers afin d'en vérifier la pertinence. De même, il serait souhaitable de mener quelques expériences afin de comparer les pondérations au niveau des endpoints et des midpoints.

Les obstacles à l'utilisation de l'analyse multicritère à l'ACV sont plutôt d'ordre pratique. Pour chaque problématique, il existe une méthode plus adaptée au problème, que les autres. Choisir la méthode la plus adaptée n'est pas évident. Ce papier a néanmoins fourni quelques méthodes à préférer. De plus, certaines méthodes recèlent de pièges cachés (notamment Somme pondérée), ou sont difficilement applicables par un novice en analyse multicritère (MAUT ou MACBETH par exemple); il est ainsi souhaitable de chercher l'aide d'un spécialiste en analyse multicritère. Les logiciels d'analyse multicritère permettent d'avoir un support agréable, et facilitent le processus d'aide à la décision. L'application de l'analyse multicritère à l'ACV passera donc sûrement par ces logiciels. Certains ne nécessitent aucune adaptation spéciale, et sont suffisamment clairs pour être utilisés dans leur version actuelle. D'autres (notamment MACBETH), sont complètement inadaptés à l'ACV. Il semble que peu de modifications seraient nécessaires pour en faire un outil adapté à l'ACV.

Finalement, ce rapport devait porter sur le choix d'une méthode d'analyse multicritère à appliquer à l'ACV. Chaque problème a une méthode plus adaptée. Toutefois, s'il fallait choisir une méthode applicable à tous les problèmes, nous proposerions PROMETHEE. Son logiciel est facilement utilisable, elle est non-compensatoire; et surtout, très polyvalente. Selon les cas, on pourra la remplacer par une des méthodes ELECTRE; elles aussi très performantes. S'il fallait combiner PROMETHEE avec une méthode compensatoire, et donnant un résultat numérique pour chacune des solutions étudiées (dans le but d'intégrer la notion environnementale dans un choix plus large pour le décideur, incluant les coûts par exemple); il serait souhaitable que le logiciel MACBETH soit modifié pour être applicable à l'ACV. C'est en effet un logiciel rigoureux; permettant un dialogue avec l'utilisateur, dont

les bases mathématiques sont solides. Sinon, Somme pondérée représente une alternative à MACBETH simple; mais doit être manipulée avec beaucoup de précautions.

BIBLIOGRAPHIE

[1] ABI-ZEID Irène, Micheline BELANGER, Adel GUITOUNI, Jean-Marc MARTEL et Khaled JABEUR ; A multicriteria method for evaluating courses of action in Canadian airspace violation situations
Disponible sur internet : http://www.dodccrp.org/Proceedings/DOCS/wcd00000/wcd00091.htm

[2] ATTHIRAWONG Walailak et McCARTHY Bart ; An application of the analytical hierarchy process to international location decision-making
Disponible sur internet : http://www-mmd.eng.cam.ac.uk/cim/imnet/papers2002/Atthirawong.pdf

[3] BANA e COSTA Carlos et CHAGAS Manuel P. ; A career choice problem : an example of how to use MACBETH to build a quantitative value model based on qualitative value judgments ; Department of Operational Research, London School of Economics and Political Science; 2002

[4] BANA e COSTA Carlos A., ENSSLIN Leonardo, ZANELLA Italo J. ; A real-world MCDA application in cellular telephony systems
Disponible sur internet : http://mis.ucd.ie/staff/cbrugha/mbapapers/telesc98.pdf

[5] BANA e COSTA Carlos et VANSNICK Jean-Claude ; Applications of the MACBETH approach in the framework of an additive aggregation model ; Journal of multi-criteria analysis, volume 6, 107 - 114 ; 1997

[6] BARE Jane C. , HOFSTETTER Patrick, PENNINGTON David W. et UDO de HAES Helias A.; Life Cycle Impact Assessment Workshop Summary, Midpoints versus endpoints : the sacrifices and benefits ; International Journal of Life Cycle Analysis, 5 (6), 319-326 ; 2000

[7] BARRON F. Hutton et BARRET E. BRUCE ; Decision quality using ranked attribute weights ; Management Science, vol. 42, No. 11, 1515-1523 ; 1996

[8] BARZILAI Jonathan ; On the decomposition of value functions ; Operations Research Letters, 22, 159-170 ; 1998

[9] BARZILAI Jonathan ; Understanding hierarchical process

[10] BAUMANN Henrikke et RYDBERG Tomas ; A comparison of three methods for impact analysis and evaluation; Journal of Cleaner Production, 2 (1) ; 1994

[11] BENOIT Valérie et ROUSSEAUX Patrick ; Aid for aggregating the impacts in life cycle assessment ; International Journal of Life Cycle Analysis 8 (2), 74-82 ; 2003

[12] BERRO Alain ; Optimisation multi-objectif et stratégie d'évolution en environnement dynamique ; 2001
Disponible sur internet : http://eva.univ-tlse1.fr/berro/recherche/these/These.pdf

[13] BRANS J.P. , MARESCHAL B. et VINCKE P. ; PROMETHEE : a new family of outranking methods in multicriteria analysis; in : BRANS JP (ed) proceedings of the IFORS 84 conference, Washington, 477-490 ; 1984

[14] BRIGGS Th., KUNSCH P.L. et MARESCHAL B. ; Nuclear waste management : An application of the multicriteria PROMETHEE methods; European Journal of Operational Research 44, Elsevier Science Publishers B.V., North-Holland ; 1990

[15] BUCHANAN John and SHEPPARD Phil ; Ranking projects : using the ELECTRE method
Disponible sur internet : http://www.esc.auckland.ac.nz/Organisations/ORSNZ/conf33/papers/p58.pdf

[16] BURCHE Dirk et DORNBERGER Rolf ; New evolutionary algorithm for multi-objective optimization and its application to engineering design problems
Disponible sur internet : http://www.icos.ethz.ch/research/146BuecheDornberger.pdf

[17] CHEVALIER Jacques et ROUSSEAUX Patrick ; Classification in LCA : Building of a coherent family of criteria ; International Journal of Life Cycle Analysis 4 (6), 352-356 ; 1999

[18] DARRE E., MALECKI H. et CLERC L. ; Aide à la décision en matière de schéma d'organisation
Disponible sur internet : http://lexeco.free.fr/Artaald.htm

[19] Department for Transport, Local Government and the Regions of United-Kingdom; Multi-criteria analysis : a manual ; 2001
Disponible sur internet : http://www.dtlr.gov.uk/about/multicriteria/

[20] EDWARDS Ward et BARRON F.Hutton ; SMARTS and SMARTER : Improved simple methods for multiattribute utility measurement ; Organizational Behavior and Human Decision Process, 60, 306-325; 1994.

[21] FIGUEIRA José et ROY Bernard ; Determining the weights of criteria in the ELECTRE type methods with a revised Simos procedure ; European Journal of Operational Research, 139,317-326 ; 2002

[22] GRAILLOT Didier, Henry LONDICHE, Roland DECHOMETS et Mireille BATTON-HUBERT ; Analyse multicritère spatiale pour l'identification de la vulnérabilité aux inondations
Disponible sur internet : http://www.cindy.ensmp.fr/graillot.pdf

[23] GUITOUNI Adel et MARTEL Jean-Marc ; Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method ; European Journal of Operational Research, 109,501-521 ; 1998

[24] HERTWICH Edgar G. et HAMMIT James K. ; A decision analysis framework for impact assessment Part I : LCA and Decision Analysis ; International Journal of Life Cycle Analysis 6 (1) , 5-12 ; 2001

[25] HERTWICH Edgar G. et HAMMIT James K. ; A decision analysis framework for impact assessment Part II : Midpoints, endpoints, and criteria for method development ;International Journal of Life Cycle Analysis 6 (5) , 265-272 ; 2001

[26] KADERIWIRYONO Sudarso, DJAJANININGRAT Surna Tjahja, SURYADI Kadarsah et RUKMI Hendang Setyo ; Decision support system design for controlling plant impact to environmental pollution and evaluating work program and budget priority ; deuxième congrès international franco-québécois du génie industriel ; 1997

Disponible sur internet : http://www.enstimac.fr/manif/gi-albi-97/LIENBD/PapFinal/Publis/F6716C79.pdf

[27] KALIFA Khalil ; Problématique de l'évaluation des impacts; Techniques de l'ingénieur, traité de génie industriel

[28] KEENEY Ralph L. et RAIFFA H. ; Decision with multiple objectives : preferences and value tradeoffs ; John Wiley and sons ; 1976

[29] LABOUZE Eric, KALIFA Khalil, ROUSSEAUX Patrick et GROSJEAN Gilles ; ACV, outil d'aide a la décision industrielle ? Analyse critique de l'existant, Recommandations méthodologiques, Propositions d'axes de recherche; Rapport a l'association RECORD ;1996

[30] LAMPRECHT James L. ; ISO 14000 : issues and implementation guidelines for responsible environmental management ; American Management Association ; 1997

[31] LEE KUHRE W. ; ISO 14020s environmental labeling marketing Efficient and Accurate Environmental Marketing Procedures ; Prentice Hall PTR; 1997

[32] MATTARELLI M., MOON D. , WOLFLER CALVO R. ; STEEDS : a strategic transport/energy/environment decision support ;1999
Disponible sur internet : http://www-hcp.enst-bretagne.fr/bibliography/articles/hcp99/Mattarelli_etal_hcp99.pdf

[33] MEADE Laura M. et ROGERS K.J. ; A method for analyzing agility alternatives for business processes
Disponible sur internet : http://arri.uta.edu/eif/agil_ie.pdf

[34] NIJKAMP P. et VAN DELFT A.D.; Multi-criteria analysis and regional decision-making ; Martinus Nijhoff Social Sciences Division, Leiden ; 1977

[35] OLSON D.L. ; Decision Aids for Selecting Problems ; Springer Verlag, New York

[36] OLSON D.L. ; Comparison of three multicriteria methods to predict known outcomes ; European Journal of Operational Research, 130, 576-587; 2001

[37] PAELINCK J.H.P. ; Qualiflex : a multiple-criteria method ; Economic Letters 1, 193-197 ; 1978

[38] PINEDA-HENSON Ruby, CULABA Alvin B. et MENDOZA Guillermo A. ; Evaluating environmental performance of pulp and paper manufacturing using the analytical hierarchy process and life cycle assessment ; Journal of Industrial ecology, 6 (1), 15-28 ; 2002

[39] Programa de prospective tecnològica para Latinoamèrica y el Caribe, 2000
Disponible sur internet : http://www.foresight.ics.trieste.it/Library/library/5/TOMOV.doc

[40] ROUBENS M. ; Ajustements de relations binaires et méthode multicritère ; *Regards sur la théorie des graphes de P. HANSEN et D. De WERRA, Presses polytechniques romandes, pages 291 à 296.*; 1980

[41] ROY Bernard ; Classement et choix en présence de points de vue multiples (La méthode ELECTRE) ; Revue française d'informatique et de recherche opérationnelle, vol 2, mars 1968, 57 – 75 ; 1968

[42] ROZAKIS Stelios, KALLIVROUSSIS Leonidas, SOLDATOS Peter G. et NICOLAOU Irini ; Multiple criteria analysis of bio-energy projects : evaluation of bio-electricity production in Farsala plain, Greece ; Journal of Geographic Information and Decision Analysis, vol 5, No 1, pp 49-64 ; 2001

[43] SAATY Thomas L. ; The Analytical Hierarchy Process ; Mc GRAW-HILL International Book Company ; 1980

[44] SARKIS Joseph; Evaluating environmentally conscious business practices ; European Journal of Operations Research 107, 159-174; 1998

[45] SARKIS Joseph et TALLURI Srinivas ; A synergistic framework for evaluating business process improvement ; The International Journal of Flexible Manufacturing Systems, 14, 53-71 ; 2002

[46] SAVIC Dragan ; Single-objective vs. Multiobjective Optimization for Integrated Decision Support Disponible sur internet :
http://www.iemss.org/iemss2002/proceedings/pdf/volume%20uno/399_savic.pdf

[47] SCHARLIG Alain; Décider sur plusieurs critères / Panorama de l aide a la décision multicritère ; collection Diriger l'entreprise; Presses polytechniques romandes ;1985

[48] SEPPALA Jyri, BASSON Lauren et NORRIS Gregory A. ; Decision analysis frameworks for life-cycle impact assessment ; Journal of industrial ecology, 5 (4) ; 2002

[49] SEPPÄLÄ Jyri, Life cycle impact assessment based on decision analysis ; 2003

[50] SETAC ; Life-Cycle Impact Assessment : the state of the art 2nd edition ; Report of the SETAC Life-Cycle Impact Assessment Workgroup ;1998

[51] SIMOS Jean; Evaluer l'impact sur l'environnement, une approche originale par l'analyse multicritère et la négociation ; Presses polytechniques et universitaires romandes ; 1990

[52] SMOOK G.A. ; Handbook for Pulp and Paper Technologists 2nd edition; Angus Wilde Publications ; 1992

[53] STEWART T.J. ; A critical survey on the status of multiple criteria decision making theory and practice ; Omega International Journal of Management Science, 20 (56), 569-586; 1992

[54] TARP P. et HELLES F. ; Multi-criteria Decision-Making in Forest Management Planning ? an Overview ; Journal of Forest Economics 1 (3) ; 1995

[55] United Nation Environment Program Division of Technology, Industry and Economics Production and Consumption branch ; Evaluation of environmental impacts in life cycle assessment, Meeting report : Brussels 29-30 November 1998, Brighton 25-26 May 2000 ; 2003

[56] U.S. Environmental Protection Agency and Science Applications International Corporation ; LCAccess, LCA-101 ; 2001
Disponible sur internet : http://www.epa.gov/ORD/NRMRL/lcaccess/LCA101_printable.pdf

[57] VAN DEN HONERT R.C. ; Stochastic pair wise comparative judgments and direct ratings of alternatives in the REMBRANDT system ; Journal of Multi-Criteria Decision Analysis, 7 (2), 87-97 ; 1998

[58] VIEIRA Victor, BANA e COSTA Carlos A. et SOUSA OLIVEIRA Carlos ; A methodology to evaluate strategic importance of bridges and tunnels considering seismic vulnerability : application to Lisbon
Disponible sur internet : http://www.iiasa.ac.at/Research/RMS/july2000/Papers/vieira0310.pdf

[59] VINCKE Philippe ; Comment choisir une méthode d'aide à la décision ? ; Cahiers du CERO, vol 36, 339-343 ; 1994

[60] YUE Jinfeng, CHEN Bintong et WAN Minchiang ; Generating Ranking Groups in Analytical Hierarchy Process ; Decision Sciences Institute 2002 Annual Meeting Proceedings ; 2002
Disponible sur internet : http://www.sbaer.uca.edu/Research/2002/dsi/papers/294.pdf

[61] ZAHEDI Fatemeh ; The Analytic Hierarchy Process – A survey of the Method and its Applications ; Interfaces, 16, 96-108; 1986