







Université du Québec  
à Rimouski

# **LA SÉLECTION DE PROJET DANS UN CONTEXTE DE DÉVELOPPEMENT DURABLE EN PRÉSENCE D'INCERTITUDE**

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de la maîtrise en gestion de projet  
en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences en gestion de projet

PAR

**© EMMANUELLE K. GABLA**

**Février 2016**



**Composition du jury :**

**Farid Ben-Hassel, président du jury, Université du Québec à Rimouski**

**Anissa Frini, directrice de recherche, Université du Québec à Rimouski**

**Bruno Urli, codirecteur de recherche, Université du Québec à Rimouski**

**Philippe Deboudt, examinateur externe, UFR géographie et aménagement, Université  
des sciences et techniques de Lille, France**

Dépôt initial le 09 Septembre 2015

Dépôt final le 15 Février 2016



UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI  
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.



Je dédie ce mémoire de maîtrise  
à mes parents qui ont cru en moi et qui  
ont fait d'énormes sacrifices durant  
mon parcours scolaire.



## **REMERCIEMENTS**

Je tiens à remercier tout d'abord GOD de m'avoir donné le courage et surtout la patience pour l'accomplissement de ce travail ensuite remercier mes parents qui m'ont beaucoup soutenu et encouragé durant mon parcours scolaire dans mon pays et ici au Canada.

Je remercie tout particulièrement mes deux directeurs de mémoire Anissa Frini et Bruno Urli pour m'avoir encadré tout au long de ma recherche avec tant de sympathie et de disponibilité.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude envers le directeur du programme de Maîtrise en Gestion de Projet, Mr Louis Babineau ainsi que tous mes autres professeurs du campus de Rimouski pour la qualité de l'enseignement.

Enfin je remercie toutes les personnes qui de près ou de loin ont contribué à l'élaboration de ce document. Un remerciement spécial à Youssef Benchaabane pour son aide particulière dans la réalisation d'un programme, à mon oncle Jean Séka et mon ami Hermann Dagri Yessotchè pour les conseils qu'ils m'ont donné et le soutien moral qu'ils m'ont apporté ici au Canada.



## RÉSUMÉ

La sélection de projets dans un contexte de développement durable doit viser un équilibre à long terme entre le maintien de l'intégrité de l'environnement, l'équité sociale et l'efficacité économique, en plus de favoriser la participation des parties prenantes. Il s'agit d'une problématique décisionnelle complexe. En effet, les critères de décision à prendre en considération sont en général multiples, conflictuels et non commensurables. De plus, afin de répondre aux besoins des générations actuelles sans compromettre ceux des générations futures, les évaluations des projets devraient être échelonnées sur plusieurs périodes pour considérer les conséquences à court, moyen et long termes. Dans ce contexte, les différents projets devraient alors être évalués dans un avenir incertain. L'imprécision associée aux évaluations futures des projets devra alors être analysée afin que les décisions prises soient robustes. Dans ce mémoire, nous nous intéressons à l'application de l'analyse multicritère dans un contexte multi-périodes et nous modélisons l'imprécision des évaluations futures des projets ainsi que l'imprécision sur les préférences des décideurs (poids des critères). En particulier, nous proposons l'application conjointe de la méthode multicritère PROMETHEE avec la simulation Monte Carlo afin de sélectionner les projets durables dans ce contexte d'incertitude. L'approche proposée est par la suite appliquée dans le contexte de l'aménagement forestier durable.

Mots clés : Sélection de projet, analyse multicritère, PROMETHEE, simulation Monte Carlo, développement durable.



## **ABSTRACT**

Project selection in the context of sustainable development aims at reaching a long-term balance between maintaining the integrity of the environment, social equity and economic efficiency, in addition to promote the participation of stakeholders. This is a complex decision-making problem. Indeed, several conflicting and non-commensurable decision criteria are usually considered. In addition, to meet the needs of present generations without compromising those of future generations, multi-period evaluations of projects should be analysed in order to consider the impact of projects in the short, medium and long term. In this context, projects should be evaluated in an uncertain future. The imprecision associated with future assessments of projects will then be analyzed to insure the robustness of decisions. In this paper, we focus on applying multi-criteria analysis in a multi-period context and we model the imprecision of future evaluation of projects and the vagueness about the preferences of decision-makers (criteria weights). In particular, we propose the joint application of PROMETHEE method with Monte Carlo simulation to select under uncertainty sustainable projects. The proposed approach is then applied in the context of sustainable forest management.

*Keywords:* Project selection, Multi-criteria analysis, PROMETHEE, Monte Carlo simulation, sustainable development.



## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	ix
RÉSUMÉ.....	xi
ABSTRACT.....	xiii
TABLE DES MATIÈRES.....	xv
LISTE DES TABLEAUX.....	xvii
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1 la revue de littérature.....	5
1.1 INTRODUCTION.....	5
1.2 DEVELOPPEMENT DURABLE.....	5
1.3 LES METHODES DE SELECTION DE PROJET.....	9
1.4 LES METHODES DE SELECTION DE PROJET EN CONTEXTE DE DEVELOPPEMENT DURABLE.....	15
1.5 CONCLUSION.....	21
CHAPITRE 2 méthode de sélection de projet durable dans un contexte d'incertitude.....	23
2.1 INTRODUCTION.....	23
2.2 LES METHODES MULTICRITERES D'AIDE A LA DECISION.....	23
2.2.1 Historique.....	23
2.2.2 La méthode PROMETHEE.....	32
2.3 LA MODELISATION DE L'INCERTITUDE.....	36
2.4 LA SIMULATION MONTE CARLO.....	39
2.5 METHODOLOGIE PROPOSEE.....	43
3.1 INTRODUCTION.....	46

3.2	GENERALITES SUR LE CONTEXTE DE L'AMENAGEMENT FORESTIER DURABLE.....	46
3.3	PROBLEME DE DECISION .....	52
3.3.1	Description .....	52
3.3.2	Données du problème.....	53
3.4	RESULTATS.....	64
3.4.1	Rangement de chaque scénario en pourcentage sur les 30 périodes .....	70
3.4.2	Evolution dynamique de chaque scénario en pourcentage sur les 30 périodes .....	76
3.5	DISCUSSION.....	83
3.6	CONCLUSION .....	85
	CONCLUSION GENERALE.....	86
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	88

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Quelques domaines d'application du développement durable .....	8
Tableau 2.	Quelques méthodes de sélection de projet en contexte de développement durable et d'indétermination .....	17
Tableau 3.	Les avantages et limites d'une analyse multicritère d'aide à la décision .....	31
Tableau 4.	Les normes de certification propres à la foresterie .....	50
Tableau 5.	La famille des critères .....	62
Tableau 6.	Poids des critères obtenus selon la méthode AHP .....	63
Tableau 7.	Fonctions de préférence et seuils d'indifférence et de préférence .....	64
Tableau 8.	Données d'entrée (inputs) .....	65
Tableau 9.	Données de sortie (outputs) .....	72
Tableau 10.	Classement des scénarios selon l'Aménagement intégré .....	67
Tableau 11.	Classement des scénarios selon le producteur de bois .....	69
Tableau 12.	Classement des scénarios selon les écologistes .....	71
Tableau 13.	Classement des scénarios par période selon les représentants de l'Aménagement intégré .....	74
Tableau 14.	Classement des scénarios par période selon les producteurs de bois .....	76
Tableau 15.	Classement des scénarios par période selon les écologistes .....	78

## LISTE DES FIGURES

Figure 1. Les différentes étapes de la naissance du terme développement durable.....	7
Figure 2. Les caractéristiques du développement durable (Source : <a href="http://www.ethique-economique.fr/uploaded/1-introduction.pdf">http://www.ethique-economique.fr/uploaded/1-introduction.pdf</a> ).....	8
Figure 3. Les différentes méthodes de sélection de projet R&D (Hall et al., 1990).....	12
Figure 4. Classification des méthodes de sélection de portefeuilles de projets, Iamratanakul et al (2008) .....	14
Figure 5. Le processus général de l'analyse multicritère d'aide à la décision, Guitouni(1998).....	26
Figure 6. Classification des approches opérationnelles et méthodes.....	28
Figure 7. Les fonctions de préférences de PROMETHEE .....	35
Figure 8. Modélisation de l'imperfection de l'information .....	37
Figure 9. La simulation déterministe et la simulation non déterministe.....	39
Figure 10. Proposition d'un modèle de sélection de projet en contexte de DD et d'incertitude	44
Figure 11. Évolution du volume quinquennale exploitable sur un horizon de 150 ans (Consultants forestiers DGR, 2009).....	56
Figure 12. Évolution de l'indice de qualité de l'habitat du caribou sur un horizon de 150 ans (Consultants forestiers DGR, 2009).....	58
Figure 13. Évolution des superficies d'habit qualifiées de « bon » pour l'orignal sur un horizon de 150 ans (Consultants forestiers DGR, 2009).....	59
Figure 14. Évolution des superficies de vieilles forêts sur un horizon de 150 ans (Consultants forestiers DGR, 2009).....	60

Figure 15.	Évolution du bilan de carbone sur un horizon de 150 ans (Consultants forestiers DGR, 2009).....	61
Figure 16.	Illustration de la méthode Monte Carlo .....	67
Figure 17.	Évolution des scénarios selon les représentant de l'aménagement intégré.....	75
Figure 18.	Évolution des scénarios selon les producteurs de bois .....	77
Figure 19.	Évolution des scénarios selon les écologistes.....	79



## INTRODUCTION GENERALE

Depuis 2006, le gouvernement du Québec s'est doté d'une loi sur le développement durable qui établit un nouveau cadre commun de gestion pour tous les ministères et organismes gouvernementaux du Québec. L'article 2 du chapitre 1 de la loi définit le développement durable comme suit : « *développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs. Le développement durable s'appuie sur une vision à long terme qui prend en compte le caractère indissociable des dimensions environnementale, sociale et économique des activités de développement* ». Premièrement, cette définition met l'accent sur la nécessité de prendre en considération simultanément les dimensions environnementale, sociale et économique. Chacune de ces dimensions ne peut être isolée et doit être considérée autant que les autres. D'où la nécessité d'avoir une vision holistique et de traiter les questions liées au développement durable dans une perspective de recherche d'équilibre c.à.d. de recherche d'une solution de meilleur compromis. Deuxièmement, cette définition met l'accent sur la vision à long terme liée au développement durable. Ainsi, les décisions devraient tenir compte non seulement des conséquences immédiates mais aussi des conséquences futures des projets. La sélection de projets publics dans ce contexte constitue une problématique décisionnelle complexe pour les raisons suivantes :

- Les aspects d'efficacité économiques, d'équité sociale et de maintien de l'intégrité de l'environnement doivent être pris simultanément dans le processus décisionnel.
- Chaque projet est évalué selon plusieurs critères conflictuels, mesurés sur des échelles différentes pouvant être quantitatives ou qualitatives (échelles sémantiques).
- Les conséquences des projets doivent être évaluées à court, à moyen et à long terme.

- Les évaluations à long terme de chaque projet selon les critères se situent dans un avenir incertain; les données peuvent en plus être imprécises ou non disponibles.
- Plusieurs événements imprévisibles et incontrôlables pourraient surgir au futur et impacteraient l'évaluation des projets.
- Plusieurs parties prenantes doivent être consultées et un consensus devrait être visé.
- Les ressources disponibles pour les projets sont limitées.

C'est dans ce contexte particulier que notre recherche s'inscrit. Il sera question de la sélection de projets dans un contexte de développement durable tout en considérant simultanément les aspects multicritères et multi-périodes du problème. Le contexte d'incertitude dans lequel évoluera le projet sera également pris en considération. En particulier, nous nous intéressons à l'application des méthodes d'aide multicritère à la décision pour sélectionner les projets durables. Ces méthodes permettent d'analyser les éléments de la décision, d'explicitier les jugements de valeur, politiques, économiques et techniques qui prennent place dans le processus de prise de décision.

De retour à la littérature scientifique, nous constatons un intérêt particulier pour la problématique de sélection de projets dans un contexte de développement durable. Le nombre de publications scientifiques est en forte croissance depuis les cinq dernières années et l'aide multicritère à la décision apparaît comme l'approche privilégiée [Xu and Chan 2013; Vučijak *et al.*, 2013; Tian *et al.*, 2013; Liu, 2013; Streimikiene *et al.*, 2012; Gervasio et da Silva, 2012; Henao *et al.*, 2012; Datta *et al.*, (2011); Pourebrahim *et al.*, 2010; Jourard et Nicolas, 2010]. Plusieurs méthodes multicritères sont utilisées telles que les méthodes AHP, ANP, ELECTRE, VIKOR, PROMETHEE, MAUT, SMART, etc. Ces analyses multicritères ont été faites dans divers contextes tels que : le choix des systèmes de production d'énergie, la construction, les projets de transport, l'aménagement du territoire littoral, le développement agricole, le traitement des eaux, etc. Par ailleurs, nous retrouvons des recherches qui traitent l'imprécision des évaluations en la modélisant par les sous-ensembles flous [Yeh et Xu (2013); Balezentiene et al., (2013); Wang *et al.*, (2013); Khalili-Damghani et Sadi-Nezhad, 2013a; Ebrahimnejad *et al.*, 2012; Khalili-Damghani et

*al.*, 2013b; Awasthi *et al.*, 2011; Hsueh et Yan, 2011; Kahraman et Kaya, 2010]. Les opérateurs linguistiques qui permettent l'agrégation d'évaluations exprimées par le langage naturel sont également utilisés pour modéliser les critères qualitatifs (Karakosta et Askounis, 2010). Alors qu'ils considèrent pour la plupart au moins deux des trois dimensions économiques, sociales et environnementales du développement durable, les recherches antérieures n'abordent pas la perspective temporelle (multi-périodes) associée au problème. Autrement dit, l'enjeu relié à l'atteinte de l'équilibre entre le court et le long terme n'est pas pris en compte. Sur le plan théorique, nous retrouvons certains travaux de recherche qui traitent simultanément les aspects dynamique et multicritère du problème par les arbres de décision multicritères [Frini *et al.* 2012; Santos *et al.* 2008; Haimès (2009)]. Cependant, ces approches deviennent difficiles à appliquer pour les problèmes de grande taille. De plus, la décomposition de l'arbre pour réduire sa taille discréditerait certaines méthodes multicritères bien qu'intéressantes (Frini *et al.* 2012).

Ce mémoire s'intéresse précisément à la problématique de sélection de projets dans un contexte de développement durable. Il sera question de l'application de l'analyse multicritère dans un contexte multi-périodes et de la modélisation de l'incertitude des évaluations futures des projets ainsi que l'incertitude sur les préférences des décideurs (poids des critères). En particulier, nous proposons l'application conjointe de la méthode multicritère PROMETHEE avec la simulation Monte Carlo afin de sélectionner les projets durables dans ce contexte d'incertitude. L'approche proposée est par la suite appliquée dans le contexte de l'aménagement forestier durable.

Le caractère novateur de la recherche repose sur le fait que le problème sera traité en considérant une perspective à la fois multicritère (intégrant les trois dimensions du développement durable), multi-périodes (considérant des évaluations à court, à moyen et à long terme) et multi-acteurs. La problématique énoncée s'avère donc pertinente sur le plan scientifique en plus de l'être sur le plan pratique.

En pratique, l'approche développée sera appliquée pour l'aménagement forestier durable. Dans ce contexte, *l'aménagement forestier durable* du territoire vise l'équilibre

entre plusieurs points de vue quantitatifs et qualitatifs tels que la conservation de la diversité biologique, la conservation des sols et de l'eau, le maintien de la productivité des écosystèmes forestiers, le maintien des avantages socio-économiques multiples, et la prise en compte des valeurs et des besoins exprimés par la population [BFEC, 2010]. Ainsi, le cadre d'application dans le domaine de l'aménagement forestier se prête parfaitement à cette problématique.

Le mémoire sera structuré comme suit. Le chapitre 2 présentera une revue de littérature sur les notions de développement durable, les différentes méthodes de sélection de projet, ainsi que les travaux de recherche sur la sélection de projets dans un contexte de développement durable. Le chapitre 3 exposera la méthode de résolution proposée. Il présentera d'abord l'aide multicritère à la décision en général, pour se concentrer ultérieurement sur la méthode PROMETHEE. Par la suite, la modélisation de l'incertitude sera discutée en présentant les différentes théories de modélisation de l'incertitude ainsi que l'approche de simulation Monte Carlo. Finalement, les étapes de la méthode de résolution seront expliquées. Le chapitre 4 présentera l'application de la méthode proposée dans le domaine de l'aménagement forestier durable. Ce chapitre débutera par une présentation du contexte d'application, du cadre légal, du nouveau régime forestier de 2013 au Québec ainsi que les normes de certification forestières. Le problème de décision sera par la suite décrit en termes de scénarios, critères de décision, et préférences des décideurs. Puis, les principaux résultats de l'application de la méthode proposée dans ce mémoire seront présentés et discutés. Le chapitre 5 présentera une conclusion dans laquelle les limites du travail et les voies de recherche futures seront discutés.

# **CHAPITRE 1**

## **LA REVUE DE LITTERATURE**

### **1.1 INTRODUCTION**

En raison de la compétitivité croissante et de la présence accrue de l'incertitude auxquelles sont confrontées les organisations, il est de plus en plus essentiel, pour les gestionnaires de ces organisations, d'évaluer, de sélectionner et de planifier les projets en prenant en compte le manque d'informations, l'imprécision et la complexité croissante de l'environnement dans lequel se développent ces différentes organisations. Cette partie vise à présenter les principaux écrits qui se sont penchés sur la sélection de projet en contexte de développement durable. Ainsi, nous y traiterons du concept de développement durable et de ses caractéristiques, mais aussi des grandes approches qui ont été développées dans le cadre de la sélection de projet et de quelques méthodes représentatives de ces approches.

### **1.2 DÉVELOPPEMENT DURABLE**

Le concept de développement durable est né de la rencontre de deux courants de réflexion qui sont : la notion de développement et la prise de conscience écologique. Au début, la notion de développement se rapportait aux pays du Sud qui cherchaient un moyen par lequel ils allaient pouvoir sortir du sous-développement. Ensuite l'idée s'est progressivement répandue aux pays industrialisés pour désigner certains aspects de leur activité économique et sociale. Cependant, au début des années 70, certains événements sont venus questionner ce développement. Le premier rapport du Club de Rome publié en 1972 a prédit, grâce à un modèle de simulation, une chute brutale de la population à

cause de la pollution, de l'appauvrissement des sols cultivables et de la raréfaction des ressources énergétiques. En 1973, la crise pétrolière est venue mettre une emphase encore plus grande sur le fait qu'il était urgent de prendre conscience de l'épuisement des ressources et de voir au renouvellement des ressources. Des catastrophes écologiques ont aussi marqué ces années 70 (*Amoco Cadiz*, Three Miles Island, ...) et la relation indissociable entre l'environnement et le développement s'est alors progressivement imposé dans la population. La volonté de protéger l'environnement tout en utilisant de la meilleure façon que possible les ressources naturelles pour assurer un développement dit durable s'est ensuite traduite par la mise en œuvre d'une série de politiques de protection, de défense et de réparation des actions dommageables pour l'environnement et causées par l'homme.

Le développement durable, selon le rapport de Brundtland paru en 1987, est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs. Il est né à la suite d'une série chronologique de politiques mais sa véritable apparition s'est faite en 1980 dans la Stratégie Mondiale de la Conservation, une publication de l'Union Internationale pour la Conservation de la nature (UICN) et en 1987 suite à la publication du rapport de la Commission mondiale sur l'environnement et le développement, intitulé 'Notre avenir à tous'.

Les différentes étapes de la naissance du développement durable se présentent dans la figure ci-dessous :

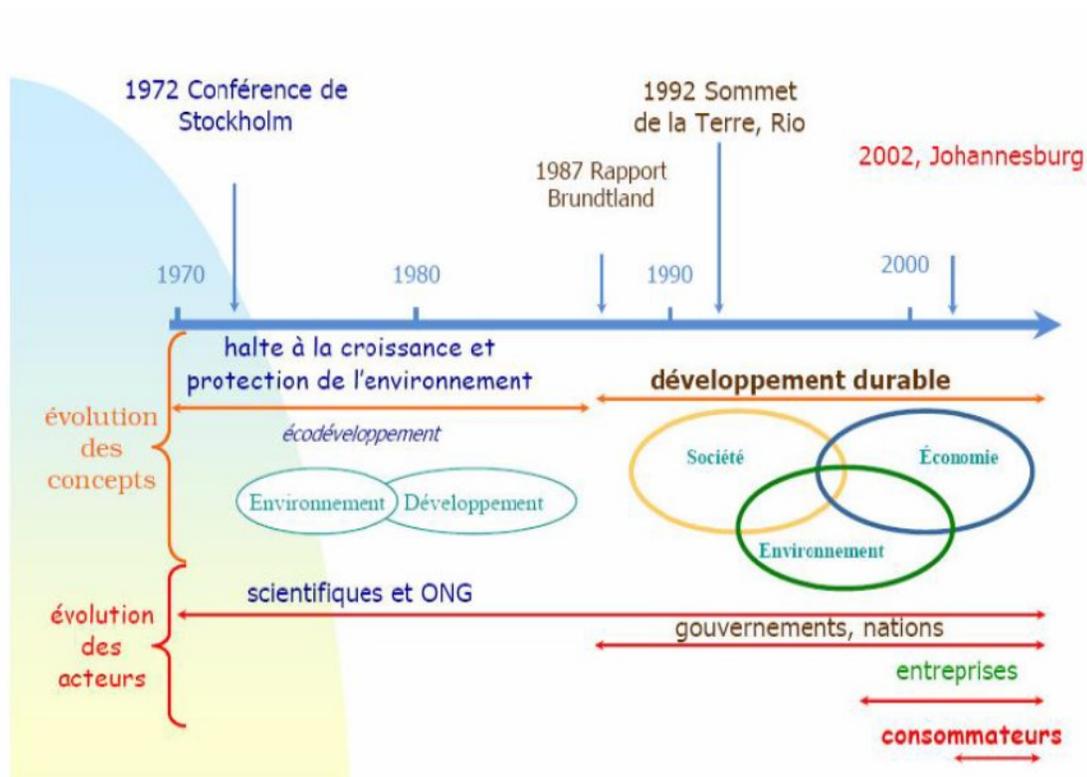


Figure 1. Les différentes étapes de la naissance du terme développement durable

Source : <http://www.ethique-economique.fr/uploaded/1-introduction.pdf>

Le développement durable repose sur trois caractéristiques (figure 2) qui sont : l'environnement, l'économie et le social. En d'autre terme, il répond aux besoins de maintenir l'intégrité de l'environnement pour la protection de l'écosystème, d'assurer la santé et la sécurité des ménages, d'assurer l'équité sociale pour favoriser le bien-être de la population et de viser l'efficacité économique. Le développement durable est en quelque sorte une stratégie qui vise à équilibrer ces trois dimensions.

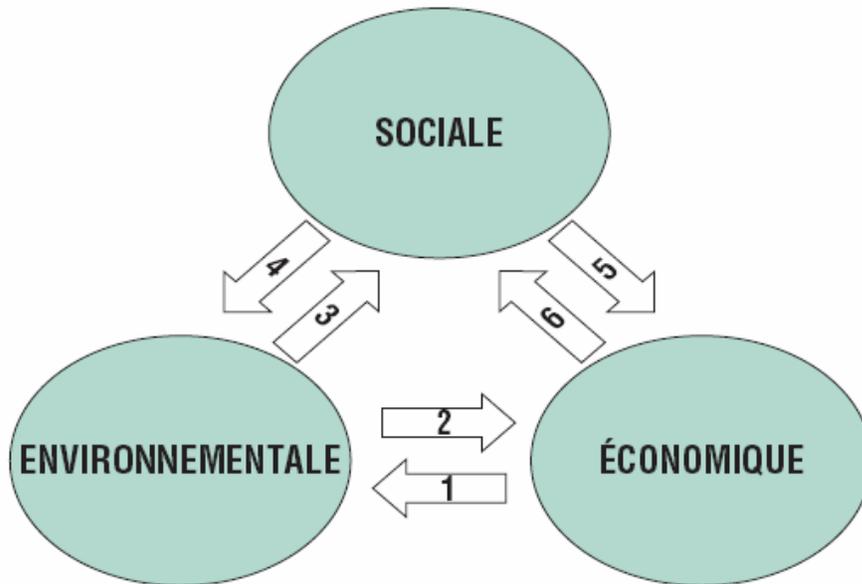


Figure 2. Les caractéristiques du développement durable (Source : <http://www.ethique-economique.fr/uploaded/1-introduction.pdf>)

Le tableau ci-dessous présente quelques domaines d'application du développement durable et des indicateurs de mesure qui leur seraient appropriés.

Tableau 1. Quelques domaines d'application du développement durable

Domaines d'application	Indicateurs de mesure
Développement économique	Taux de croissance du PIB/hbt
Changement climatique et énergie	Émission de gaz à effet de serre. Énergie renouvelable
Transport durable	Consommation d'énergie totale dans les transports
Production et consommation durables	Productivité des ressources
Gestion des ressources naturelles	Évolution de la biodiversité Gestion des ressources halieutiques
Santé et gestion des risques	Espérance de vie
Social	Taux d'emploi Taux de pauvreté Aide publique au développement

Source : <http://www.ethique-economique.fr/uploaded/1-introduction.pdf>

### 1.3 LES MÉTHODES DE SÉLECTION DE PROJET

La sélection de projets est une activité importante par laquelle les décideurs doivent sélectionner des projets parmi les nombreux projets proposés. Elle implique dans la plupart des cas un problème de décision multicritères et multiobjectifs, faisant intervenir des dimensions quantitatives (valeur actuelle nette, ventes, part de marché) et des dimensions qualitatives (niveau de risque, compétences du personnel, impact environnemental, impact social). Les études empiriques montrent que la sélection de projets demeure un processus complexe et un véritable challenge pour les décideurs. En effet, les personnes qui ont la responsabilité de sélectionner les projets doivent gérer des problèmes de concurrence (ressources humaines ou financières) et de complémentarité (partage de composants, de technologies ou de savoir-faire) entre les projets regroupés dans une même catégorie (Cooper *et al.*, 1998). Dans ce contexte, le problème de sélection de projets peut être vu comme un problème d'optimisation sous contraintes. De nombreuses méthodes ont été développées pour gérer ce problème d'optimisation et aujourd'hui, on possède toute une panoplie de modèles d'aide à la sélection de projets. La recherche dans ce domaine demeure très active et, à ce jour, il n'y a pas un modèle qui a fait consensus chez les chercheurs et les praticiens.

Il existe plusieurs typologies permettant de présenter les méthodes de sélection de projets et, par exemple, on pourrait les présenter selon le domaine d'application ou encore selon le type de modélisation utilisée pour générer des solutions. . Toutefois, il n'existe pas de consensus quant à la classification de ces méthodes mais la classification proposée par Hall and Nauda (1990) est sans doute celle qui est la plus mentionnée dans la littérature. Elle consiste à classifier les méthodes (figure 3) en quatre grands types:

- Les méthodes de programmation mathématique
- Les méthodes d'émulation et théorie de la décision

- Les méthodes de mesure comparative
- Les méthodes Ad hoc

*Les méthodes de programmation mathématique* (Mathematical Programming) regroupent en général les modèles de la programmation linéaire, non-linéaire et la programmation en nombres entiers. Elles sont en effet des méthodes d'optimisation sous contraintes.

*Les méthodes d'émulation et théorie de la décision* (Emulation models and decision theory) sont des méthodes qui regroupent les modèles de régression, les diagrammes d'arbre de décision, les modèles qui font appel aux systèmes experts et les modèles qui interviennent normalement dans les décisions internes (les analyses des scénarios, les modèles flous et les options réels). Ces modèles sont systémiques et facilitent l'accumulation et la compréhension des données sur la gestion des organisations.

*Les méthodes de mesure comparative* (Comparative measurement) ou encore *méthodes de mesure sur les bénéfices* sont des modèles qui regroupent les approches comparatives, les approches par pointage (les Scoring models) et les approches sur la contribution aux bénéfices et les indices financiers... Cette catégorie de méthodes a des objectifs bien définis. Dans un premier temps, elles permettent à l'homme d'étude de développer une mesure quantitative des bénéfices relative au projet donné sous la contrainte de budget qui sera imposé. Ensuite elles permettent l'évaluation de n'importe quel projet par la comparaison des réponses (approches comparatives), par l'évaluation des coûts et bénéfices ou le risque financier (modèles de contribution bénéfices/risques et indices financier). Et pour finir par l'utilisation des critères (approches de pointage ou scoring models) sur lesquelles notre étude est faite. Les inconvénients majeurs des méthodes de mesures des bénéfices, c'est qu'elles ne tiennent pas compte des interactions entre projets et de la modélisation de l'attitude de décideur face au risque. Récemment, certains auteurs ont introduit les concepts de dominance stochastique (Ringuest et al. 2000), et le coefficient Gini (mean-Gini analysis) dans la sélection de projets pour faire face à aux risques ou à l'incertain (Ringuest et al. 2004).

*Les méthodes Ad hoc* comprennent les modèles Genius award qui consistent à octroyer des fonds destinés aux meilleurs chercheurs, les approches systémiques, les approches de l'orientation du client, les méthodes Top-down.

Plus récemment, des modèles ont été proposés afin de combler certaines des lacunes qui ont été mentionnées plus tôt. Par exemple, Cooper et al. (1997) a utilisé la technique de l'arbre de décision et a incorporé des évaluations de la probabilité du succès technique et du succès commercial pour la valeur commerciale estimée. De plus, la méthode de scoring a été améliorée par Henriksen et Traynor (1999) pour faire intervenir les différences entre les critères d'évaluation et ainsi favoriser le calcul de la valeur du projet en fonction du rendement et du coût.

La figure 3 ci-dessous présente les différentes méthodes de sélection de projet R&D selon Hall et Nauda (1990).

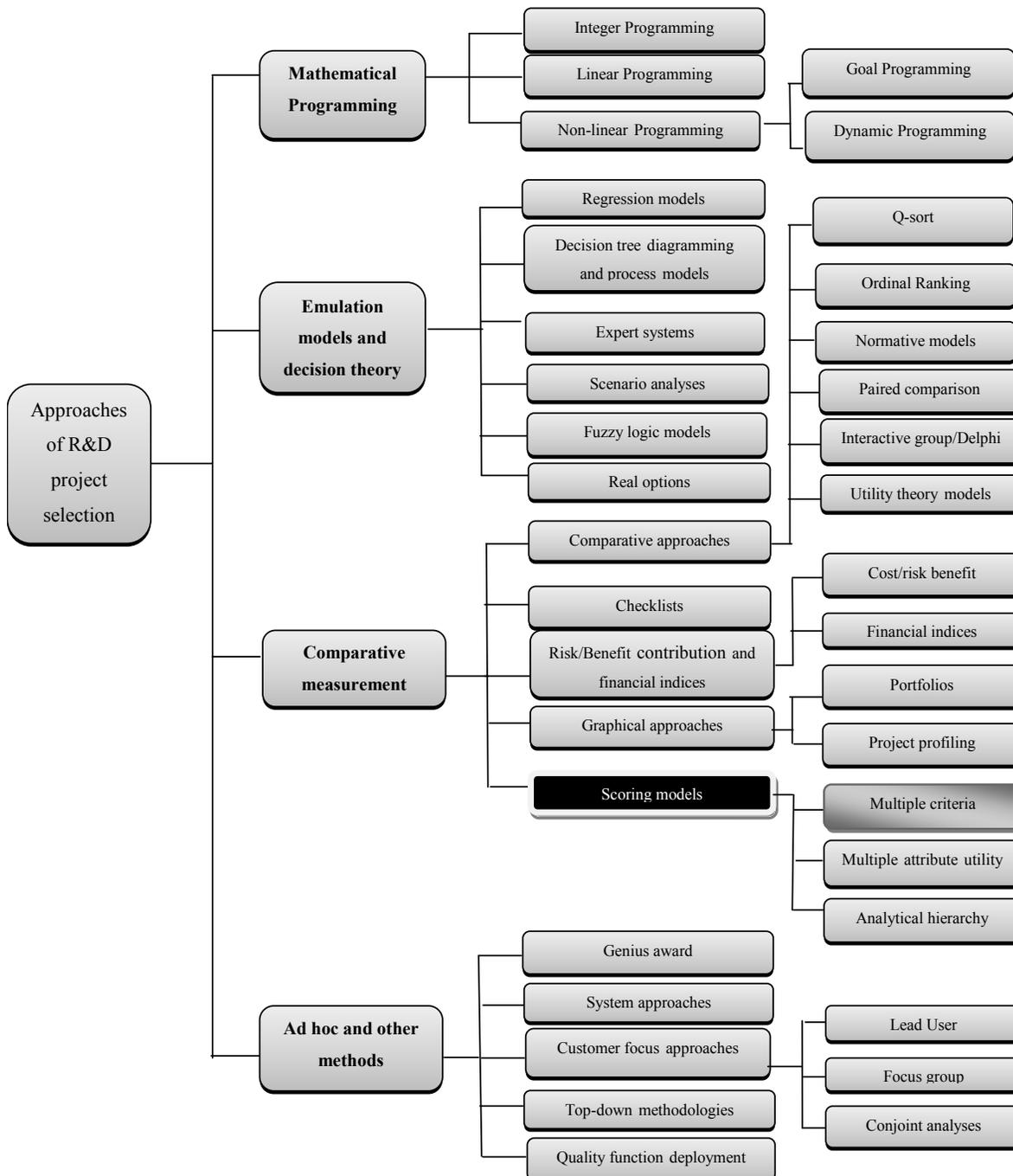


Figure 3. Les différentes méthodes de sélection de projet R&D (Hall et al. 1990)

Le travail d'Iamratanakul et al (2008) présente une synthèse récente des méthodes de sélection dit de portefeuilles de projet. Ils font ressortir six différentes catégories de méthodes. Notons que la sélection de portefeuilles de projets est en plein essor dans les organisations. Un portefeuille de projets peut donc être défini comme un ensemble de projets en concurrence selon Fernez-Walch (2004). Il regroupe des projets dépendants les uns des autres, par les produits, les ressources mobilisées, les technologies ou les savoir-faire utilisés.

Dans cette typologie, les méthodes sont regroupées selon qu'elles appartiennent aux:

- méthodes de mesure de bénéfices
- méthodes de la programmation mathématique
- méthodes de l'émulation cognitive
- méthodes de la simulation heuristique
- méthodes d'options réelles
- méthodes Ad hoc

Cependant selon ces auteurs, les méthodes énumérées ci-dessus ne traitent pas toutes de la sélection de portefeuilles de projets et il est intéressant de référer à Graves et Ringuest (2003) et Iamratanakul et al (2008) pour plus d'informations sur les méthodes de la sélection de portefeuilles de projets.

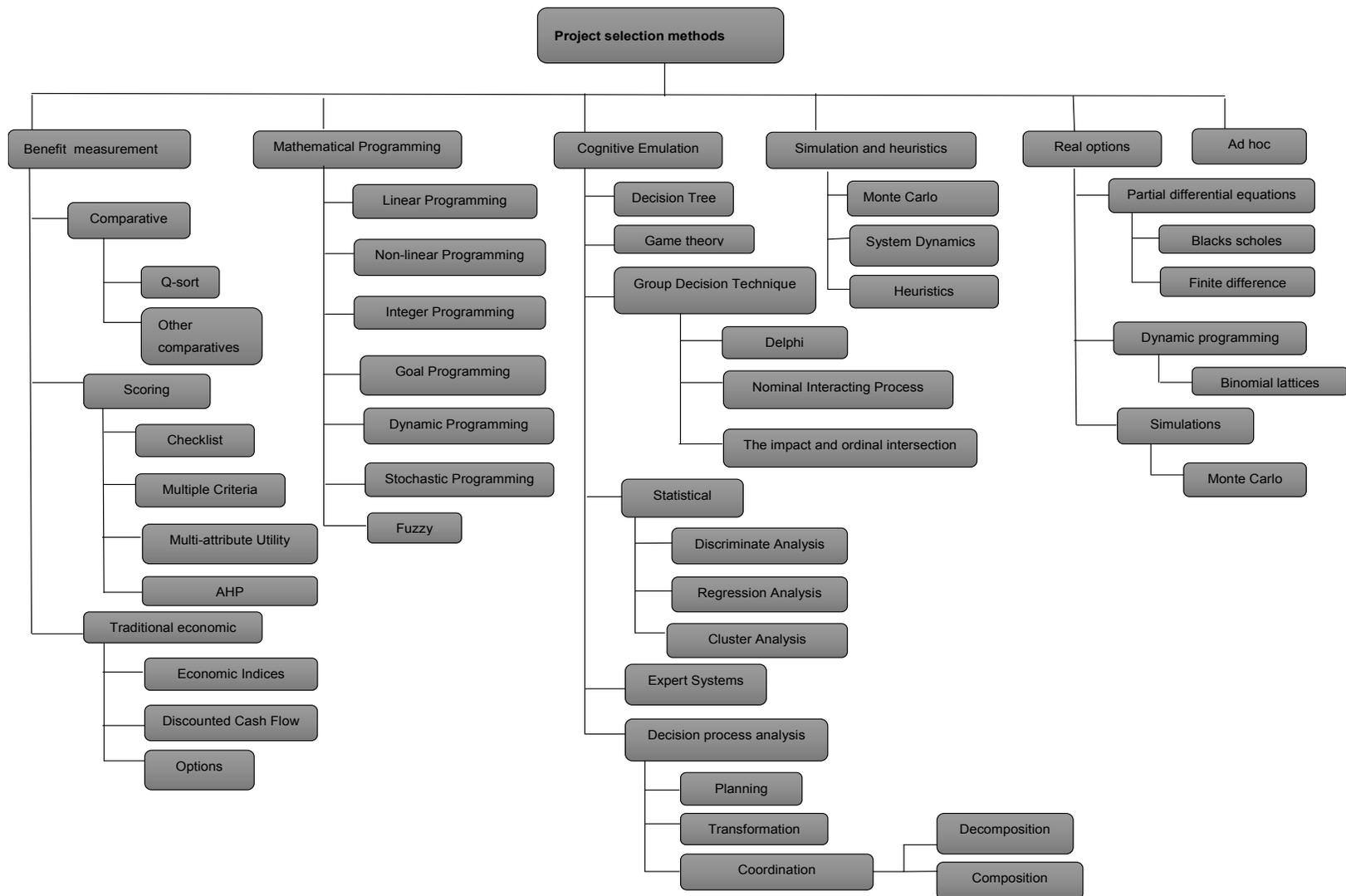


Figure 4. Classification des méthodes de sélection de portefeuilles de projets, Iamratanakul et al (2008)

#### **1.4 LES MÉTHODES DE SÉLECTION DE PROJET EN CONTEXTE DE DÉVELOPPEMENT DURABLE**

Rappelons que le problème de sélection de projet implique la plupart du temps des objectifs multiples. L'évaluation des projets qui se fait en regard de la multiplicité des critères ne peut se faire sans tenir compte du milieu dans lequel est réalisé le projet.

Aujourd'hui de multiples critères contribuent à la complexité du problème de sélection de projet à savoir: l'incertitude ou l'imprécision, les interactions entre les projets ou encore l'aspect socio-économique et environnemental dans lequel le projet est réalisé.

Plusieurs travaux scientifiques se sont intéressés à cette complexité de la sélection de projet en y introduisant la notion de développement durable, l'analyse multicritère et l'incertitude.

Ivan Ivanovic et al (2013), a présenté un modèle de sélection de projet durable dans le cadre du transport dans une ville des Balkans. L'objectif de cette étude est de pouvoir comparer les résultats obtenus par le Plan directeur de Transport par une méthode de prise de décision multicritère ANP.

Aliye Ahu Akgün, et al (2012), ont proposé des stratégies efficaces de développement durable dans cinq pays de l'Europe : Finlande, Espagne, Roumanie, Scotland et l'Italie qui représentent en effet cinq scénarios de tests en prenant en considération les différents objectifs des parties prenantes. Pour cela, les auteurs utilisent comme approche, PENTAGONE pour représenter cinq aspects critiques de durabilité et identifier le meilleur scénario. Ensuite pour analyser le compromis et les synergies entre les différents objectifs quatre scénarios ont été considérés à savoir la compétitivité, la continuité, la capacité et la cohérence. Pour évaluer le meilleur parmi les quatre, le modèle multicritère Regime Analysis (RA) fut appliqué. A la suite de toutes ces analyses, les auteurs ont choisi la cohérence comme meilleur scénario.

Kai Cao et al (2012) à travers leur étude, ont développé une méthode heuristique qui est un Algorithme Génétique (BFGA : Boundary-based Fast Genetic Algorithm) pour rechercher des solutions optimales à un problème d'utilisation de terrain avec des objectifs multiples et contradictoires à Beijing en Chine.

Krishnendu Shawa et al (2012), ont réalisé une étude faite sur une chaîne d'approvisionnement pour choisir le fournisseur approprié. Les méthodes appliquées dans ce cas sont la méthode AHP utilisée pour analyser les poids des facteurs multiples (% de rejet de qualité, % de livraison avec retard, émission de gaz de maison verte et la demande) et la programmation linéaire multiobjective utilisée avec les poids des facteurs pour la sélection du fournisseur idéal.

Asim Datta et al (2011), ont visé à identifier les meilleurs sources d'énergie pour ensuite suggérer la meilleure solution grâce à une analyse de prise de décision multicritère basée sur la méthode AHP et en se basant aussi sur les préférences des groupes de décisions.

Piya Parnphumeesup et al (2011), ont appliqué à la fois une méthode multicritère, en fait la méthode AHP, et une méthode qualitative d'analyse des parties prenantes pour examiner les préférences des parties prenantes dans un contexte de développement durable sur des projets énergétiques (biomasse) en Thaïlande.

S. Ebrahimnejad et al (2012) ont proposé un modèle de prise de décision tenant compte de l'imprécision et qui utilise l'ANP pour les critères contradictoires et VIKOR pour la classification des projets en fonction de leur performance.

Ludovic-Alexandre Vidal et al (2011), ont recouru à la méthode DELPHI et à l'AHP pour évaluer la complexité des projets dans un contexte événementiel.

Nasrin R. et al (2012), dans un contexte de développement durable, ont choisi la méthode ELECTRE III pour répondre aux critères environnementaux, industriels, économiques et sociaux dans toutes les étapes de la prise de décision. Ils l'ont utilisé dans le but de

sélectionner les meilleures solutions de gestions possibles en donnant un ordre de préférence aux multiples options.

Harrison E. Mutikanga et al (2010) ont utilisé la méthode multicritère PROMETHEE pour la résolution de la gestion complexe de l'eau et les problèmes liés à la planification stratégique de cette gestion en prenant en compte les préférences des décideurs et l'incertitude. Les critères pris en considération sont au nombre de sept : finance- économie- environnement – santé publique- impacts techniques et sociaux tous ceux-ci dans un contexte de développement durable.

Le tableau 3 ci-dessous résume les principaux travaux qui ont été menés pour répondre au problème de la sélection de projets dans un contexte de développement durable et en présence d'incertitude.

Tableau 2. Quelques méthodes de sélection de projet en contexte de développement durable et d'indétermination

<b>Références</b>	<b>Années</b>	<b>Domaines d'application</b>	<b>Méthodes de sélection</b>	<b>Modélisation de l'incertitude</b>
T. Larimiana et al	2013	Environnement	AHP	Théorie des ensembles flous
Ivan Ivanovic' et al	2013	Transport	ANP	Théorie des intervalles
Getnet D. and al	2013	Environnement	PROMETHEE I et II /AHP	Simulation Monte Carlo
Mohammad Azizur Rahman et al	2013	Environnement	AHP	les variables linguistiques et L'analyse de la sensibilité
Éric W. Stein	2013	Énergie renouvelable	AHP	Théorie des ensembles flous
Crina Oltean-D. et al	2013	Transport	AHP TOPSIS PROMETHEE	La méthode probabiliste L'intervalle ou la

			ou ELECTRE	logique floue L'analyse de la sensibilité
Peter O. Akadiri et al	2013	Construction des bâtiments	FEAHP (Fuzzy Extended AHP)	Les nombres flous
Gernot Doberl et al	2013	Environnement	CEA (Cost Effectiveness Analysis)	L'analyse de la sensibilité
Wei-Ming Wang et al	2013	Construction	DELPHI ANP	La théorie des ensembles flous
Pengpeng Xu, et al	2013	Énergie	ANP	La théorie des ensembles flous
Joseph Sarkis et al	2012	Commerce	AHP ANP	L'analyse de la sensibilité
D. Choudhary et al	2012	Économie	AHP	Théorie des ensembles flous
S. Ebrahimnejad et al	2012	Développement des infrastructures	ANP VIKOR	Les variables linguistiques Les nombres triangulaires flous
Jie Yu et al	2012	Transport	AHP	Les ensembles flous
K. K. Damghania et al	2012	Finance	Le Goal Programming TOPSIS.	Les variables linguistiques
Z. Long-chang et al	2012	Technologie	TOPSIS	La théorie des intervalles et Les nombres flous
Felipe Henao et al	2012	Technologie	RA (Robustness Analysis)	L'analyse de la sensibilité
H. Gervásio et al	2012	Construction	PROMETHEE AHP	Monte Carlo et Analyse de la sensibilité

Nasrin R. Khalili et al	2012	Environnement	Electre III	Analyse de la sensibilité
Devendra Choudhary et al	2012	Économie	AHP TOPSIS	La théorie des ensembles flous et Analyse de la sensibilité
Pao-Long Chang et al	2011	Technologie	DELPHI	Les variables linguistiques.
Ana Piresa et al	2011	Gestion de l'environnement	AHP TOPSIS	La théorie des intervalles.
Anjali Awasthi et al	2011	Transport	TOPSIS.	La théorie des ensembles flous
Ming-Lang Tseng	2011	Gestion des connaissances environnementales	ANP DEMATEL	Les ensembles flous Les variables linguistiques
SungLin H. et al	2011	Énergie	DELPHI AHP	La théorie des ensembles flous
M. Shakhshi-Niaei et al	2011	Construction	PROMETHEE	Monte Carlo
Gu¨lcin Bu¨yu¨koc¸kan, Gizem Cifci	2011	Gestion des approvisionnements	ANP	La théorie des ensembles flous
Lei Wang et al	2011	Énergie	AHP	Les variables linguistiques Les nombres flous
Marta Bottero et al	2011	Technologie	AHP /ANP	L'analyse de la sensibilité
Anjali Awasthi et al	2011	Transport	TOPSIS	La théorie des ensembles flous Les nombres triangulaires flous L'analyse de la sensibilité

C. Kahraman et al	2010	Énergie	AHP	La théorie des ensembles flous
Yi-Kai et al	2010	Environnement	PROMETHEE GAIA et DELPHI	La théorie des ensembles flous Les variables linguistiques.
Morteza Pakdin Amiri,	2010	Énergie	AHP /TOPSIS	Les nombres flous Les variables linguistiques
Cengiz K et al	2010	Énergie	AHP	Les variables linguistiques
Haris Doukas et al	2010	Énergie renouvelable	TOPSIS	Les variables linguistiques
I. Ferná'ndez et al	2009	Écologie	AHP	La logique floue
Yi-Kai Juan	2009	Construction	CBR (Case-Based Reasoning) et DEA	Les ensembles flous
Hua-Kai Chioua et al	2005	Environnement	AHP	Les nombres triangulaires flous / La théorie des ensembles flous / Les variables linguistiques
S.D. Pohekar et al	2004	Énergie	AHP / PROMETHEE / ELECTRE	Les méthodes floues

D'une manière générale, nous constatons que l'analyse multicritère semble être l'approche la plus utilisée dans le domaine de la sélection de projet durable. Cela peut s'expliquer par le fait qu'elle permet d'avoir une approche plus réaliste et plus globale pour effectuer un choix parmi plusieurs projets et qu'elle s'adapte à des situations de prise de décision complexe. Par ailleurs sa forte utilisation s'explique aussi par sa simplicité, sa flexibilité ainsi que sa capacité à mélanger à la fois les critères qualitatifs et quantitatifs dans un même processus décisionnel.

De plus la revue de littérature nous a permis d'observer que la notion d'indétermination s'applique également à la sélection de projet puisqu'il est difficile de pouvoir quantifier ou qualifier avec justesse les données d'un problème posé. Nous remarquons aussi que la modélisation de l'incertitude s'est faite très souvent par l'application de la théorie des ensembles flous, la théorie des intervalles, l'utilisation des variables linguistiques ou encore l'analyse de la sensibilité. Mais la simulation Monte Carlo a été peu utilisée, peut-être parce qu'elle s'applique à de l'incertitude comme forme particulière d'indétermination.

## **1.5 CONCLUSION**

Le développement durable s'appuie donc sur une vision à long terme qui prend en compte le caractère indissociable des dimensions environnementale, sociale et économique des activités de développement». Si la loi du développement durable s'applique aux décisions publiques, elle reflète néanmoins les aspirations et les préoccupations des citoyens et celles-ci ne peuvent être mises de côté dans des décisions privées. Ainsi, cette recherche de compromis entre les grandes dimensions du DD est essentielle pour faire face aux attentes de la population quant aux projets réalisés dans un territoire pour appuyer le développement actuel de la collectivité, tout en garantissant celui des générations futures. L'évaluation ou la sélection de projets publics comme privés en contexte de DD présente alors plusieurs défis :

- La nécessité d'aborder les projets réalisés dans le territoire dans une perspective de recherche d'une solution de meilleur compromis entre les grandes dimensions du DD
- La nécessité de tenir compte des conséquences immédiates mais aussi des conséquences futures des projets réalisés dans le territoire. Ceci implique de disposer de données temporelles mais également de prendre en compte des données qui pourraient être incertaines, imprécises ou ambiguës.

- La nécessité de favoriser la participation, de consulter, voire de prendre en compte les avis et connaissances, de différentes parties prenantes touchées par ces projets.

Ce projet s'inscrit donc dans ce que l'on pourrait appeler la sélection de projets en contexte de DD et, pour faciliter ce processus décisionnel, nous proposons le développement d'un modèle d'Aide MultiCritères à la Décision Participative (AMCDP) en incertitude.

## **CHAPITRE 2**

### **METHODE DE SELECTION DE PROJET DURABLE DANS UN CONTEXTE D'INCERTITUDE**

#### **2.1 INTRODUCTION**

Dans le chapitre précédent, nous avons constaté qu'il existait en effet plusieurs articles se référant en général aux différentes méthodes de sélection de projets durables. De plus le processus décisionnel est fondamental dans le processus de choix pour tout décideur car il lui faut intégrer plusieurs critères de diverses natures avec des objectifs qui sont à la fois multiples et contradictoires. Parmi les méthodes précitées ci-dessus, nous portons notre attention sur une seule qui nous semble être flexible, simple et pertinente. Il s'agit entre autre de l'approche multicritère ou l'analyse multicritère d'aide à la décision PROMETHEE.

De plus le processus décisionnel intervient lorsque nous sommes confrontés aux difficultés liées à l'incertitude, aux difficultés combinatoires et aux difficultés multicritères.

#### **2.2 LES METHODES MULTICRITÈRES D'AIDE A LA DECISION**

##### **2.2.1 Historique**

Avant l'émergence de l'analyse multicritère, les problèmes de décision se ramenaient la plupart du temps à l'optimisation d'une fonction économique. Cette approche avait l'avantage de déboucher sur des problèmes mathématiques qui étaient clairement posés mais qui ne reflétaient pas toujours les situations décisionnelles abordées.

La recherche opérationnelle classique avait pour objectif de désigner, dans n'importe quelle situation donnée, la meilleure solution au problème posé, et donc elle reposait sur les hypothèses implicites suivantes :

- Une hypothèse dite de globalité où il fallait forcément rechercher une décision optimale parmi toutes les actions potentielles en désignant une seule action comme la meilleure solution.
- Une hypothèse dite de stabilité où l'ensemble des actions potentielles n'est jamais remis en cause au cours d'une évaluation d'une étude de cas alors que cette dernière peut souvent générer de nouvelles idées ou peut être confrontée à de nouveaux problèmes durant le processus d'évaluation.
- Une hypothèse dite de complète comparabilité transitive où la recherche opérationnelle ou encore l'approche monocritère ne tient pas compte de l'incomparabilité, ignore le fait que l'indifférence soit intransitive et oublie que la préférence n'est pas tout le temps transitive.

Cette critique de l'optimisation classique a porté fruit et dans un nombre croissant de problèmes de gestion, l'idée de la nécessité de prendre en compte des critères multiples même s'ils étaient souvent contradictoires a fini son chemin et a donné un formidable élan au développement des méthodes d'agrégation multicritère.

C'est dans cette optique qu'au cours des années soixante-dix, le paradigme multicritère s'est imposé. Ce paradigme multicritère s'articule autour de trois concepts clés qui sont (Guessous Y, 2006 ; Bana-e-Costa, 1993)

- L'introduction d'une démarche constructive d'apprentissage
- L'instauration d'une interactivité entre les parties impliquées (l'homme d'étude et le décideur) dans la décision
- L'insertion des éléments subjectifs et objectifs

Mareschal (1998), de son côté, affirme que : << l'analyse multicritère est une sorte de prolongement de la recherche opérationnelle, mais pas une rivalité qui cherche à l'éliminer >>.

Pour B. Roy, (1998 p.3), le paradigme multicritère représente << un nouveau schéma de pensée pour comprendre ou agir sur un système en considérant que plusieurs critères sont à l'œuvre pour conduire le système ou guider son évolution, ces critères sont, au moins localement, conflictuels, ils tendent à faire se succéder des compromis ou invitent à procéder à un arbitrage et ces compromis ou arbitrages ont pour objectif de conférer aux critères des valeurs compatibles avec une certaine forme d'équilibre et s'il y a succession, cela tient au caractère transitoire de l'équilibre atteint >>.

L'analyse multicritère peut ainsi se définir comme une approche permettant de cheminer vers le meilleur compromis parmi plusieurs éventualités. Elle peut être perçue comme étant un processus récursif ou itératif non linéaire qui regroupe à la fois la structuration du processus d'aide à la décision : (identification des parties prenantes - identification des différents critères - identification des différentes options – évaluation des différentes options en fonction des critères) et le processus d'aide à la décision en lui-même : (modélisation des préférences – agrégation des préférences – exploitation de l'agrégation - application d'une méthode multicritère). Selon Roy, le processus d'aide à la décision suit une chronologie bien précise qui est répartie en quatre procédures qui sont : le choix, le tri, le rangement et la description. Toute méthode d'analyse multicritère présente deux avantages qui sont non négligeables : l'amélioration de la transparence du processus de décision et la définition précise et évidente de la responsabilité du décideur.

Par contre, le concept de solution optimale n'existe généralement pas en analyse multicritère car il est généralement impossible de pouvoir atteindre, pour une même action, les meilleures évaluations sur les différents critères et donc, contrairement à l'optimisation uni-critère, un problème multicritère n'est pas mathématiquement bien posé. Maystre et al (1994) affirment que le problème multicritère peut être traité selon deux états d'esprit différents :

- << introduire des hypothèses restrictives telles que le problème puisse être résolu par une méthode classique, la contrepartie est un décalage de plus en plus important par rapport à la réalité.
- Utiliser une méthode d'analyse multicritère qui se base sur des modèles bâtis en partie sur des hypothèses mathématiques nécessairement restrictives et en partie sur des informations recueillies auprès du décideur >>.

La figure 5 ci-dessous décrit le processus général de l'analyse multicritère d'aide à la décision.

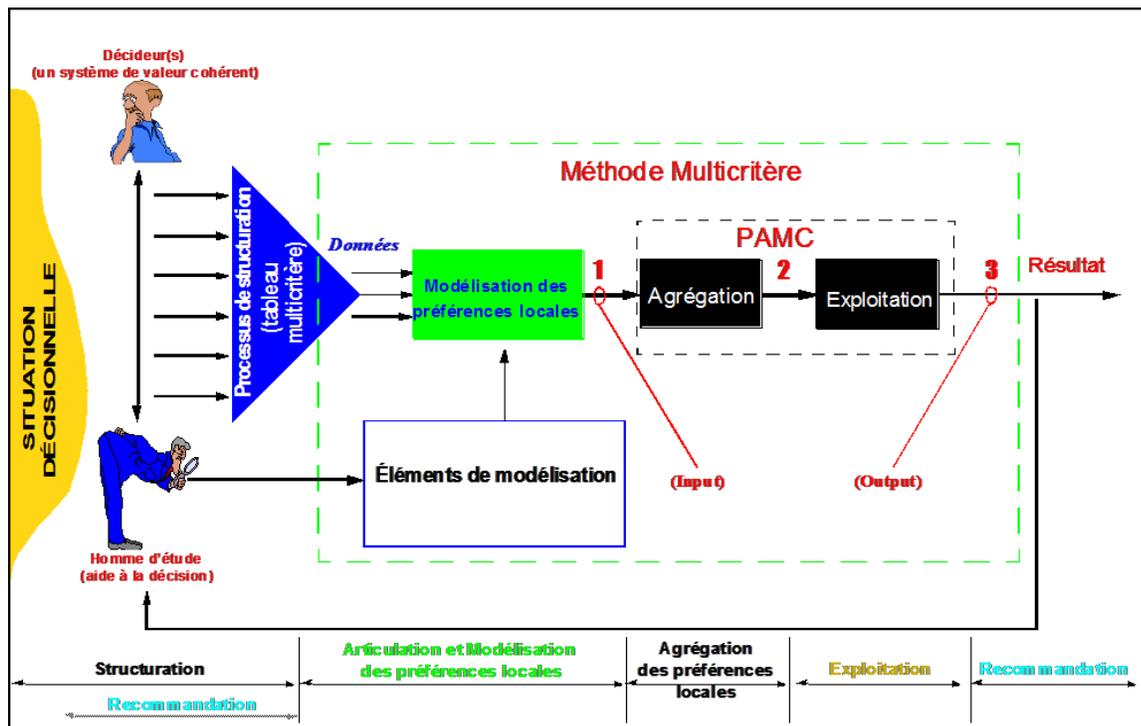


Figure 5. Le processus général de l'analyse multicritère d'aide à la décision, Guitouni (1998)

Il existe donc aujourd'hui un grand nombre de méthodes multicritère, ce qui pourrait être perçu comme une force ou une faiblesse (Bouyssou et al. 1993), mais on peut les répartir selon trois grandes catégories d'approches opérationnelles qui sont :

- L'approche opérationnelle du critère unique évacuant toute incomparabilité (agrégation complète transitive).
- L'approche opérationnelle du surclassement acceptant l'incomparabilité (agrégation partielle) à laquelle la méthode PROMETHEE appartient.
- L'approche du jugement local interactif avec itérations essai-erreur (agrégation locale et itérative).

L'approche opérationnelle du critère unique consiste à évacuer toute situation d'incomparabilité et à expliciter une fonction d'agrégation apportant une réponse synthétique, exhaustive et définitive au problème de l'agrégation des performances.

L'approche opérationnelle du surclassement consiste à accepter toute situation d'incomparabilité, d'adopter un système référentiel de préférences fondées sur la notion de surclassement et d'expliciter un test de surclassement apportant une réponse synthétique, exhaustive et définitive au problème d'agrégation des performances.

L'approche opérationnelle du jugement interactif consiste quant à elle, à accorder la primauté à des jugements locaux en dehors de toute règle explicite apportant une réponse synthétique au problème d'agrégation des performances. De plus elle consiste à expliciter un protocole organisant l'interaction entre le décideur et l'homme d'étude en vue de l'émergence de la prescription en fonction de la problématique retenue.

La figure 6 ci-dessous, Scharlig (1985), récapitule de façon plus précise les trois approches ainsi que les méthodes appartenant à ces approches.

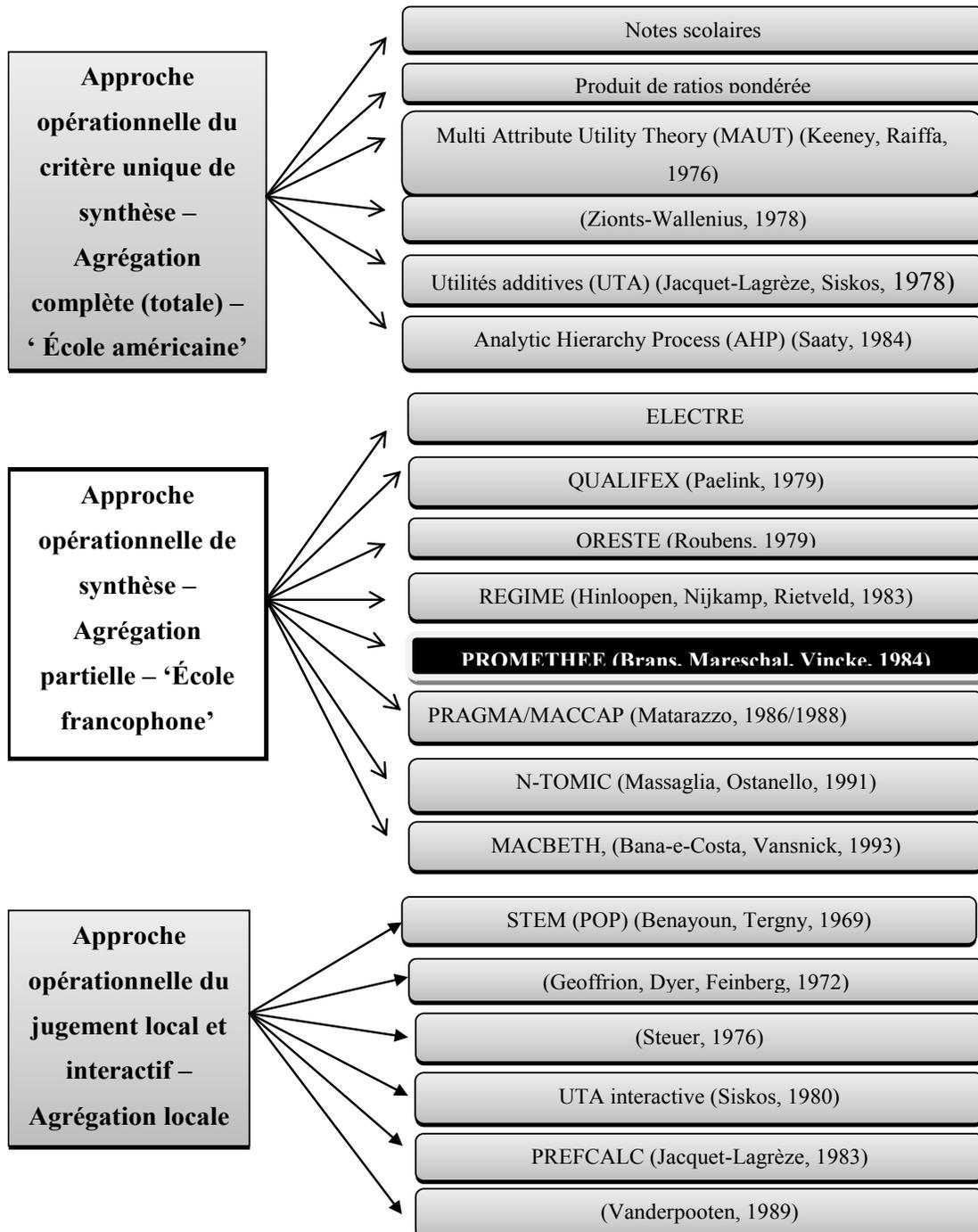


Figure 6. Classification des approches opérationnelles et méthodes

Certains auteurs, Gervásio et al (2012) par exemple, utilisent deux approches MCDA dans des projets d'infrastructures. En effet la méthode AHP est utilisée pour la définition des valeurs privilégiées des critères et l'importance relative de ces différents critères dans la hiérarchisation des valeurs. La méthode PROMETHEE est ensuite appliquée pour choisir le meilleur projet et fournir une compréhension claire de la comparaison entre les critères.

Cavalcante et al (2007), développent à partir de PROMETHEE III, une solution dans des situations d'incertitude liées à l'établissement d'une périodicité de remplacement d'équipement et basée sur des critères et des données incomplètes. En effet l'application de PROMETHEE III a pour but de permettre l'amplification de la notion d'indifférence dans le cadre de la planification de la maintenance des équipements. Notons que ce modèle a un impact sur le coût de la maintenance et la fiabilité de l'usine de production.

Vinodh, R. et al (2011), font ressortir le fait que plusieurs méthodes telles que : ANP-AHP – ELECTRE et PROMETHEE seraient idéales pour la sélection de projet et ils mettent l'accent sur PROMETHEE qui selon eux est la méthode la plus appropriée pour choisir un meilleur concept de sélection durable.

Oberschmidt et al (2010), utilisent la méthode multicritère PROMETHEE pour évaluer la performance de la technologie dans le processus d'approvisionnement en énergie en tenant compte des préférences des décideurs.

Harrison E. et al (2010), quant à eux, parlent de la théorie de la prise de décision complexe avec des techniques de recherches opérationnelles basées sur l'application de l'approche multicritère PROMETHEE pour la résolution de la gestion complexe de l'eau et les problèmes liés à la planification stratégique de cette gestion en prenant en compte les préférences des décideurs et l'incertitude. Les critères pris en considération sont au nombre de sept : finance- économie- environnement – santé publique- impacts techniques et sociaux tous ceux-ci dans un contexte de développement durable.

Il est important de savoir que l'utilisation de ces méthodes se fait de différentes manières c'est-à-dire que chaque méthode a ses caractéristiques qui semblent être distinctes les unes des autres. Sept conditions permettent de pouvoir avoir des méthodes satisfaisantes qui peuvent-être examinées selon le point de vue du décideur. On a donc :

- 1) La prise en compte des écarts entre les évaluations des scénarios sur chaque critère.
  - 2) L'élimination des effets d'échelle car tout résultat obtenu par une méthode multicritère doit être indépendant des échelles utilisées puisque les évaluations sont faites dans diverses unités.
  - 3) L'incomparabilité qui doit être admise dans la mesure où cela permet au décideur de ne prendre aucune décision lorsqu'il est en face d'informations incomplètes.
  - 4) La simplicité, tout modèle multicritère doit-être simple car lorsque le gestionnaire choisit une méthode, il a en partie choisi la solution.
  - 5) La signification de l'information supplémentaire, toute méthode multicritère requiert toujours des informations supplémentaires qui ne doivent pas être interprétées uniquement de façon technique car le décideur doit comprendre le sens du point de vue économique ainsi que sa portée.
  - 6) La présence de critères conflictuels, le décideur doit pouvoir être informé sur le caractère conflictuel des critères selon la méthode utilisée afin de pouvoir lui faciliter la tâche dans le processus décisionnel.
  - 7) L'interprétation des poids, une importante précision sur les critères est faite grâce à l'utilisation des poids qui doivent être clairement expliqués au décideur.
- (Boumedyen T. ,2010)

Toutes méthodes, au fur et à mesure que les recherches évoluent, font l'objet de plusieurs critiques.

Tableau 3. Les avantages et limites d'une analyse multicritère d'aide à la décision

<b>Avantages</b>	<b>Limites</b>
<p>Favorise et facilite l'obtention d'une solution en toute transparence dans les situations complexes en décomposant et structurant l'analyse.</p> <p>L'analyse multicritère est perçue comme étant une méthode assimilable, perceptible.</p> <p>L'analyse multicritère est perçue comme étant une méthode cohérente.</p> <p>L'analyse multicritère est perçue comme étant un outil de résolution de problèmes complexes.</p> <p>Elle intègre les différents points de vue du décideur.</p> <p>Elle considère la multiplicité des critères divergents.</p>	<p>Il devrait exister un terrain d'entente entre chaque décideur sur un minimum de points importants.</p> <p>Les moyens utilisés pour résoudre les points essentiels à l'analyse sont parfois très longs et compliqués.</p> <p>Le manque d'informations peut s'avérer parfois être un handicap dans certaines situations.</p> <p>La durée et le coût de réalisation des analyses peuvent aussi être un handicap dans le cadre de l'évaluation.</p> <p>Les méthodes mathématiques d'agrégation des données nécessitent obligatoirement un savoir-faire très important en d'autre terme il faut bien les connaître, savoir bien les utilisés afin d'éviter de mauvais résultats.</p> <p>L'analyse multicritère est perçue comme étant selon les chercheurs une approche subjective.</p>

Source : <http://dspace.univ-tlemcen.dz/handle/112/750>

### 2.2.2 La méthode PROMETHEE

Il existe plusieurs méthodes d'agrégation des préférences, mais nous présenterons une méthode particulière qui est la méthode PROMETHEE (The Preference Ranking Organization METHod of Enrichment Evaluation).

Proposée pour la première fois en 1982 par Jean Pierre Brans, la méthode PROMETHEE fait partie de la famille des méthodes de surclassement et elle se caractérise par les trois étapes suivantes :

- La structure de la préférence des décideurs en se référant aux fonctions de critères généralisées.
- La relation de dominance où la relation d'une valeur est proposée en tenant compte des critères et pour chaque degré de préférence globale une option est établie sur l'autre.
- L'aide à la décision; ici la méthode PROMETHEE permet au décideur d'avoir une vision plus claire sur le choix à faire.

Selon Hyde et al (2003), la méthode PROMETHEE suit généralement une chronologie de la façon suivante :

- ✓ Identification des parties prenantes dans le processus d'aide à la décision.
- ✓ Identification des différents critères
- ✓ Formulation des alternatives
- ✓ Pondération des critères
- ✓ Évaluation des différentes alternatives en fonction des critères
- ✓ Sélection des critères appropriés en prenant en compte les préférences du décideur pour chaque critère
- ✓ Application de la méthode PROMETHEE
- ✓ Analyse de la sensibilité
- ✓ Le choix d'une recommandation finale

La méthode PROMETHEE a donné lieu à plusieurs généralisations et, selon le problème de décision rencontré, on peut recourir à PROMETHEE 1, 2, 3, 4,5 ou encore à PROMETHEE tri.

Pour Hyde et al (2003), la méthode PROMETHEE met l'accent sur l'utilisation des fonctions de critères généralisés qui permettent de prendre en considération l'incertitude. Toutefois la subjectivité et l'ambiguïté dans l'évaluation ne sont pas considérées. Dans ce cas, Hyde et al (2003) ont décidé d'évaluer les inconvénients de cette incertitude sur les décideurs par l'analyse de la sensibilité qui en général est appliquée à l'étape finale du processus d'analyse de décision pour l'évaluation de l'impact des propositions sur le classement des différentes options.

On distingue six versions de la méthode PROMETHEE.

*PROMETHEE I* utilisé pour un rangement partiel des actions de manière naturelle. Dans ce cas lorsque le rangement est fait, certaines actions sont incomparables.

*PROMETHEE II* utilisé pour un rangement complet de toutes les actions et ce rangement est établi de façon décroissante. Ici on ne tient pas compte de l'incomparabilité. Notons qu'il existe une différence entre PROMETHEE I et II au niveau du rangement des actions. Les deux méthodes utilisent le même cheminement mais PROMETHEE I dégage des relations partielles de classement alors que le II fournit un classement de toutes ses actions.

*PROMETHEE III* est une extension de Prométhée II en ce sens que la notion d'indifférence est amplifiée.

*PROMETHEE IV* permet le classement complet ou partiel des actions.

*PROMETHEE V* a été proposé par Brans et Marshall en 1992 pour des problèmes multicritères avec contraintes de segmentation.

*PROMETHEE VI* pour la représentation cérébrale humaine. Et on a deux autres extensions de Prométhée qui furent développées récemment par Figueira et al (2004) ce sont

*PROMETHEE TRI* pour les problèmes de tri et *PROMETHEE CLUSTER* pour la classification nominale.

### Principe de base

Le principe de base de la méthode PROMETHEE revient à établir des comparaisons par paire de chaque action par rapport à toutes les autres actions en fonction de chaque critère donné pour en ressortir des relations binaires partielles aboutissant au calcul du degré de préférence associé à la meilleure action possible. Le résultat obtenu à la suite de ces comparaisons nous permet de procéder au classement ordonné de ces actions. Selon Brans et al (1994), l'application des méthodes PROMETHEE se caractérisent par trois étapes:

- *L'enrichissement de la structure de préférence* : cette étape se réfère à la notion de critère généralisé qui est introduite dans le souci de prendre en considération les amplitudes des écarts entre les évaluations faites sur les critères choisis par le décideur. Ce critère généralisé repose sur le développement d'une fonction de préférence  $P(a ; b)$  qui permet de déterminer le degré de préférence qui est compris entre 0 et 1.
- *L'enrichissement de la relation de dominance* : Au niveau de cette étape, une relation de la valeur de surclassement est construite prenant en compte tous les critères. A ce stade pour chaque paire d'actions, un degré de préférence globale d'une action sur l'autre est défini.
- *L'exploitation de l'aide à la décision* : Cette étape consiste à évaluer le comportement de chaque action en fonction de  $(n - 1)$  actions. Cela revient à ranger les actions de façon partielle ou totale en utilisant les méthodes PROMETHEE I et II. L'application de ces deux méthodes est basée sur le calcul des flux de surclassement.

### Les fonctions de préférence

Pour simplifier la tâche au décideur, six fonctions de préférences ont été proposées par Brans et al (1986). Le choix du type de fonction devrait être fait selon un mode interactif

entre le décideur et l'homme d'étude afin de modéliser au mieux les degrés de préférence du décideur. Dans chaque fonction, pas plus de deux paramètres sont à fixer et chacun de ces paramètres possède une signification économique précise.

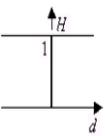
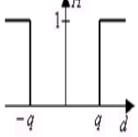
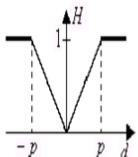
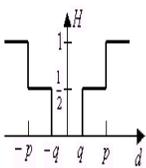
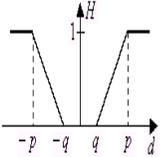
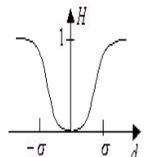
Type de fonction critère	Définition analytique	Forme	Paramètres à définir
(I) Vrai critère	$H(d) = \begin{cases} 0, & d = 0; \\ 1, &  d  > 0. \end{cases}$		—
(II) Quasi-critère	$H(d) = \begin{cases} 0, & d \leq q; \\ 1, & \text{autrement.} \end{cases}$		q
(III) Critère à préférence linéaire	$H(d) = \begin{cases} \frac{ d }{p}, &  d  \leq p; \\ 1, & \text{autrement.} \end{cases}$		p
(IV) Critère à paliers	$H(d) = \begin{cases} 0, &  d  \leq q; \\ \frac{1}{2}, & q <  d  \leq p; \\ 1, & \text{autrement.} \end{cases}$		q, p
(V) Critère à préférence linéaire avec zone d'indifférence	$H(d) = \begin{cases} 0, &  d  \leq q; \\ \frac{ d  - q}{p - q}, & q <  d  \leq p; \\ 1, & \text{autrement.} \end{cases}$		q, p
(VI) Critère (inverse) gaussien	$H(d) = 1 - \exp\left\{-\frac{d^2}{2\sigma^2}\right\}$		σ

Figure 7. Les fonctions de préférences de PROMETHEE

### Les poids des critères

Les poids des critères sont des données essentielles qui reflètent les exigences ou priorités du décideur. Ils traduisent l'importance relative des critères et sont définis indépendamment des échelles de mesure. Le meilleur critère est celui qui a le poids le plus élevé et la normalisation des poids se fait de telle sorte que leur somme soit égale à 1 (100%).

### 2.3 LA MODÉLISATION DE L'IMPERFECTION DES DONNÉES

En se basant sur la littérature existante, on peut définir l'imperfection comme l'incertitude, l'imprécision et/ou l'incomplétude (Bouchon-Meunier, 1995). L'imperfection des données dans la prise de décision se modélise selon trois grandes approches. Bien avant cela, nous avons essayé d'énumérer les raisons qui ont poussé les chercheurs à modéliser l'incertitude. Elles sont de natures différentes. Nous avons d'une part les raisons économiques qui s'expliquent par l'utilisation de données ou modèles réalistes qui favorisent la réduction des marges à cause des hypothèses pénalisantes. D'autre part, les raisons de sûreté quant à l'analyse du risque qui prend en compte la probabilité. Et pour finir l'incertitude peut être perçue comme un outil de communication dans la mesure où elle permet une visibilité sur l'état des connaissances et l'explication des procédures de sûreté qui ont été prises. La modélisation de l'incertitude se fera dès lors par :

a) La théorie des probabilités comme nous l'avons dit plus haut, elle est issue de l'époque de l'antiquité et fut reprise par Zadeh. Elle est la plus utilisée jusqu'à présent et s'adresse aux incertitudes de nature aléatoire. Elle constitue un moyen simple et performant et nécessite la représentation de l'incertitude par une distribution de probabilités. Nous allons appliquer cette théorie dans notre étude en modélisant l'incertitude par les variables aléatoires plus précisément par la simulation Monte Carlo.

b) La théorie des sous-ensembles flous Zadeh (1965), qui permet de modéliser les situations présentant l'imprécision. Elle intègre dans son processus, la théorie des possibilités pour permettre la prise en compte à la fois de l'imprécision et de l'incertitude.

c) La théorie des possibilités qui permet de manipuler l'incertitude sur des connaissances imprécises.

La figure 8 ci-dessous, qui est une fusion et une adaptation de Bouchon-Meunier (1995) et Azondékon (1991) et représentée par Ben Amor et al. (2004), caractérise en quelque sorte les différentes théories de la modélisation de l'imperfection de l'information.

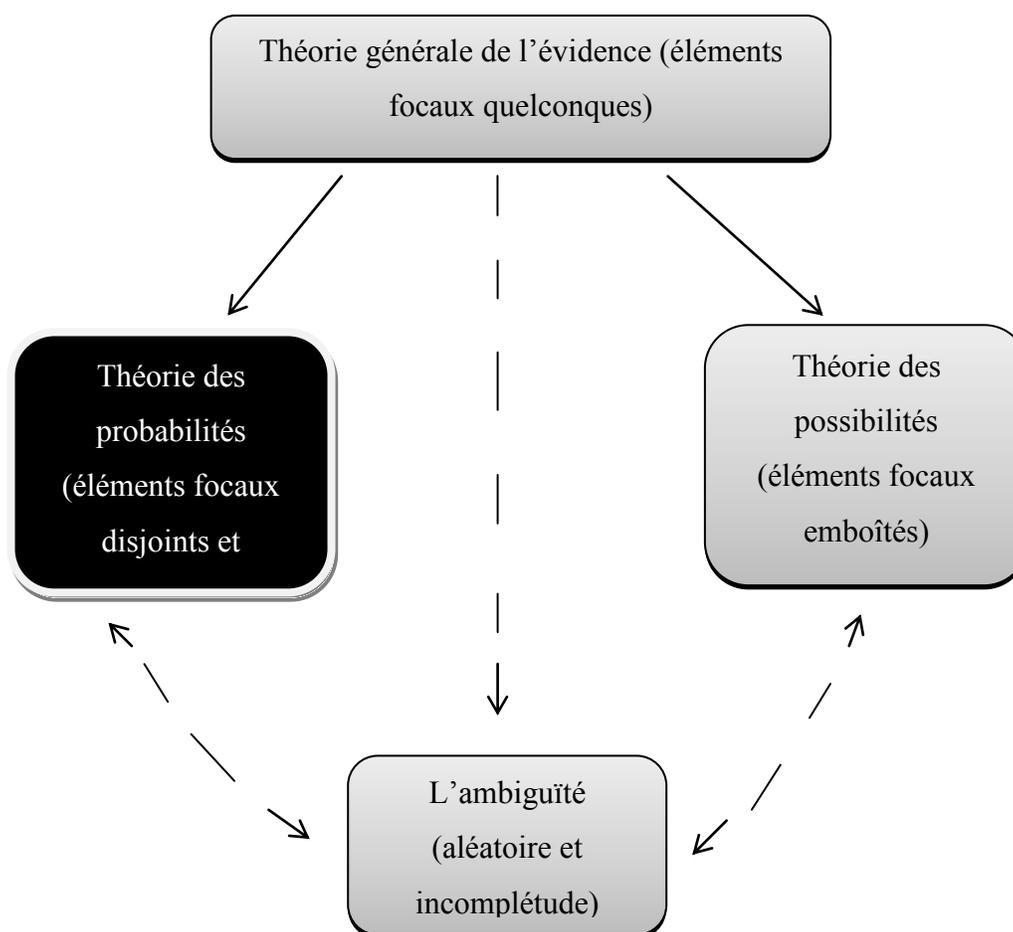


Figure 8. Modélisation de l'imperfection de l'information

Comme nous l'avons souligné dans les paragraphes précédents, la modélisation de l'imperfection des données dans la littérature se faisait par trois approches qui sont

l'approche des probabilités, des ensembles flous et l'approche des possibilités. Mais dans notre cas, nous considérerons que cette imperfection des données est due à de l'incertitude, c'est-à-dire qu'elle est liée à la validité de la connaissance que l'on peut avoir sur les données de notre problème. Dans notre cas, ces données incertaines sont les évaluations, dans le temps, des différents scénarios d'aménagement de la forêt relativement à différents critères comme l'indice de qualité de l'habitat du Caribou, le bilan de carbone ou encore le volume quinquennal de forêt exploitable. La modélisation de l'incertitude se fera par l'application de la simulation Monte Carlo (MCS) qui fait partir de la classe des méthodes probabilistes.

D'une manière générale, la simulation fait appel à des théories déterministes puisque tous les paramètres des modèles sont normalement supposés être connus avec certitude et le résultat qui en découle est alors déterminé avec certitude. Mais, avec les années et la reconnaissance de plus en plus partagée de l'importance de prendre en compte l'incertitude ou la mauvaise connaissance que l'on peut avoir de notre environnement, la simulation non-déterministe s'est développée. Elle se définit comme étant une simulation permettant l'évaluation de l'impact de l'incertitude dans le processus décisionnel. Mais elle est moins répandue dans les études actuelles. Comme simulation non-déterministe nous avons comme précité ci-dessus, la simulation par la théorie des probabilités, la théorie des sous-ensembles flous et la théorie des possibilités.

Le principe de la simulation non-déterministe revient donc à choisir une théorie non-déterministe (la théorie des probabilités dans le cas de notre étude) puis modéliser l'incertitude qu'elle concerne soit le modèle de l'environnement, soit le modèle économique, ... et pour finir simuler la propagation de l'incertitude d'où son influence sur la décision (par la simulation Monte Carlo dans notre étude de cas par exemple). La figure 8 ci-dessous permet de mieux comprendre la différence entre une simulation déterministe et une simulation non-déterministe.

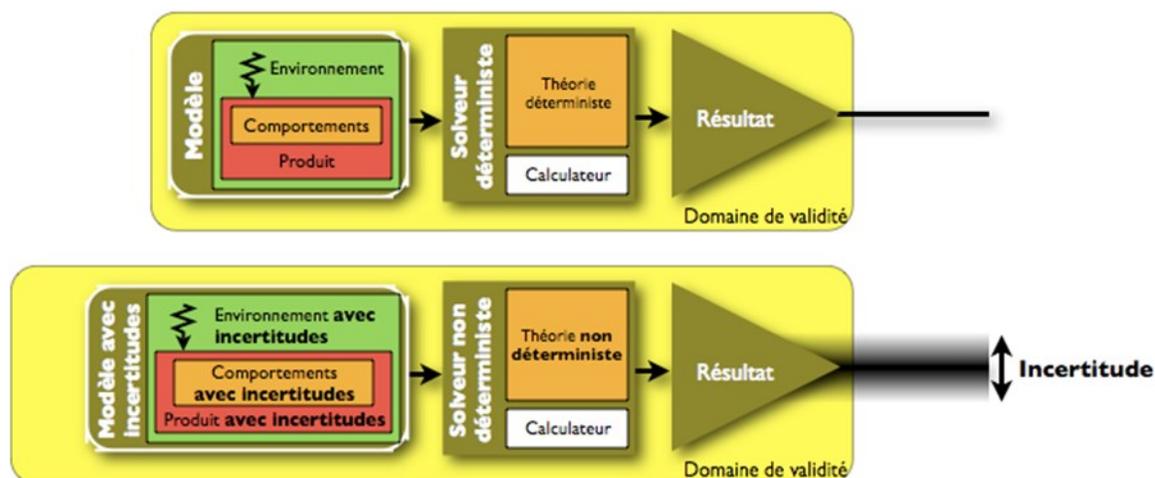


Figure 9. La simulation déterministe et la simulation non déterministe

## 2.4 LA SIMULATION MONTE CARLO

Historiquement la simulation Monte Carlo remonte aux 18<sup>ème</sup> siècle avec le problème de l'aiguille de Buffon. A cette époque la méthode était utilisée par le comte de Buffon pour décrire la méthode de calcul de  $\pi$  basé sur la réalisation d'expériences répétées. Mais la véritable application de cette méthode s'est faite au cours de l'apparition des premiers ordinateurs et son utilisation dans les projets secrets américains en vue de l'élaboration de la première bombe atomique au cours de la deuxième guerre mondiale par Ulam, Metropolis et Von Neumann à Los Alamos. Les premières publications sur ces méthodes ont commencé en 1949. (Metropolis-Ulam, the Monte Carlo method, 1949). L'utilisation de la méthode a pris de l'ampleur à partir des années 1950 et s'est propagée dans plusieurs domaines (finance, télécommunications, physique, chimie, statistiques...) pour occuper aujourd'hui une place prépondérante dans la panoplie d'outils disponibles pour modéliser l'incertitude dans le domaine de la gestion de projet et notamment dans la planification de projet.

Par définition, la simulation Monte Carlo peut être considérée comme étant :

- Une méthode d'approximation dans le cas où les problèmes d'optimisation font appel parfois à des hypothèses beaucoup plus importantes quand le calcul des sommes ou encore lorsque le nombre d'opérations requises devient difficile à appliquer en un temps raisonnable et qui amènent donc les chercheurs à se tourner vers des méthodes d'approximation.
- Une méthode numérique et probabiliste puisqu'elle se sert du hasard, plus explicitement des variables aléatoires, pour résoudre des problèmes de type numérique, probabiliste.
- Une méthode mathématique informatisée qui tient compte du risque (incertitude) dans l'analyse quantitative et la prise de décision. Elle propose en effet aux décideurs un ensemble de solutions possibles et la probabilité qu'elles soient réalisées selon l'action choisie<sup>1</sup>.

La simulation Monte Carlo, aussi appelée simulation aléatoire ou technologie d'échantillonnage aléatoire, se définit comme étant un processus itératif qui vise à analyser les permutations stochastiques des incertitudes. Dans le cas de cette simulation, chaque incertitude est abordée selon une fonction de distribution de probabilités appropriée. En d'autre terme la simulation Monte Carlo est un processus qui permet d'effectuer un certain nombre d'itérations d'où une valeur type (variable de décision ou output) est extraite de chaque distribution de probabilités faite sur les inputs (variables d'entrée).

De plus la forme de distribution des variables tirées de façon aléatoire varie d'une variable à l'autre selon le degré de précision de l'information dont dispose les décideurs sur ces variables. La simulation est en quelque sorte une forme de détermination d'un intervalle de confiance autour d'un résultat escompté, ce qui aboutit par la suite à l'établissement d'une mesure du risque liée à la dispersion de la distribution. La simulation Monte Carlo

---

<sup>1</sup> [www.palisade.com/risk/fr/simulation\\_monte\\_carlo.asp](http://www.palisade.com/risk/fr/simulation_monte_carlo.asp)

permet donc de modéliser l'incertitude des paramètres utilisés par une distribution de probabilités.

La particularité au niveau de cette simulation c'est qu'elle effectue plusieurs itérations distinctes afin de pouvoir avoir plusieurs résultats distincts qui seront valables ou suffisants pour en ressortir une série de distributions de valeurs d'issues possibles. Cela revient donc à déterminer un nombre spécifique d'itérations (par exemple : 1000, 2000 ou 10 000...).

Les distributions de probabilité les plus souvent utilisées pour décrire l'incertitude sont :

- La distribution normale ou courbe en cloche : cette distribution symétrique permet de décrire la variation autour de la moyenne en définissant la moyenne et l'écart type de cette variation. Et les valeurs proches de la moyenne qu'on aura sont les plus probables. Nous l'utilisons en général pour déterminer par exemple : le taux d'inflation, la taille d'une personne.
- La distribution normale logarithmique : cette distribution asymétrique permet d'avoir des valeurs positives illimitées c'est-à-dire qui ne sont jamais en dessous de zéro. Elle est appliquée la plupart du temps pour déterminer des valeurs dans le cas des estimations des réserves pétrolières dans le secteur pétrolier, des actions en bourse ou biens immobiliers dans le secteur de la finance et valeurs mobilières.
- La distribution uniforme : revient à définir la valeur minimale et la valeur maximale. La particularité de cette distribution correspond au fait que toutes les valeurs déterminées possèdent une chance égale de se réaliser. Elle est pratique pour la description des valeurs de la réalisation du coût de production ou du chiffre d'affaires d'un produit par exemple dans le secteur de la production.

- La distribution triangulaire : cette distribution est plus ou moins semblable à la distribution uniforme dans la mesure où elle permet de définir des valeurs minimale et maximale. Mais contrairement à la distribution uniforme, elle permet de définir également la valeur probable et la particularité au niveau de cette distribution est le fait que les valeurs qui sont proches de la valeur probable sont celles qui sont en mesure de pouvoir se réaliser. Les valeurs qui peuvent être décrites par la distribution triangulaire sont par exemple les valeurs relatives aux niveaux de stocks ou les variables d'historique des ventes par unité de temps.
- La distribution PERT : cette distribution est identique à la distribution triangulaire en ce sens qu'elle permet de définir la valeur minimale, probable et maximale. Et les valeurs qui sont proches de la valeur probable sont réalisables. Cependant il existe avec PERT, des valeurs qui sont comprises entre la valeur probable et les extrêmes. Ces valeurs-là sont aussi capables de pouvoir se réaliser. PERT est utilisée pour la durée d'une tâche dans le cas de la gestion de projet.
- La distribution discrète : avec celle-ci, nous pouvons définir des valeurs spécifiques qui sont réalisables et la probabilité de chacune de ces valeurs. En utilisant cette distribution nous pouvons décrire par exemple les résultats d'une action en justice.

La simulation présente des avantages au niveau des résultats et au niveau de l'analyse.

Du point de vue des résultats, l'application de Monte Carlo permet d'obtenir une indication approximative sur ce qui pourrait arriver et dans quelle mesure cela peut se réaliser; ce sont en effet des résultats probabilistes. Mais elle permet aussi d'identifier aisément les facteurs critiques au moyen d'une représentation graphique des résultats déterminés.

En outre les variables qui produisent le plus d'effet sur les résultats sont clairement identifiées grâce à l'analyse de sensibilité faite en appliquant la simulation Monte Carlo. Il est aisé de modéliser plusieurs combinaisons de valeurs d'input distinctes qui sont associées aux valeurs d'output possibles. Il est également facile d'observer les effets de scénarios grâce à une analyse de scénarios. Finalement, avec la simulation Monte Carlo, l'homme d'étude bénéficie d'information utile pour informer, aider le décideur dans l'impact de l'incertitude sur son processus décisionnel.

## **2.5 METHODOLOGIE PROPOSEE**

Nous avons schématisé le modèle proposé à travers la figure 10. Il se compose de trois grandes étapes :

- La définition du problème
- La modélisation de l'incertitude
- La présentation des résultats et recommandation

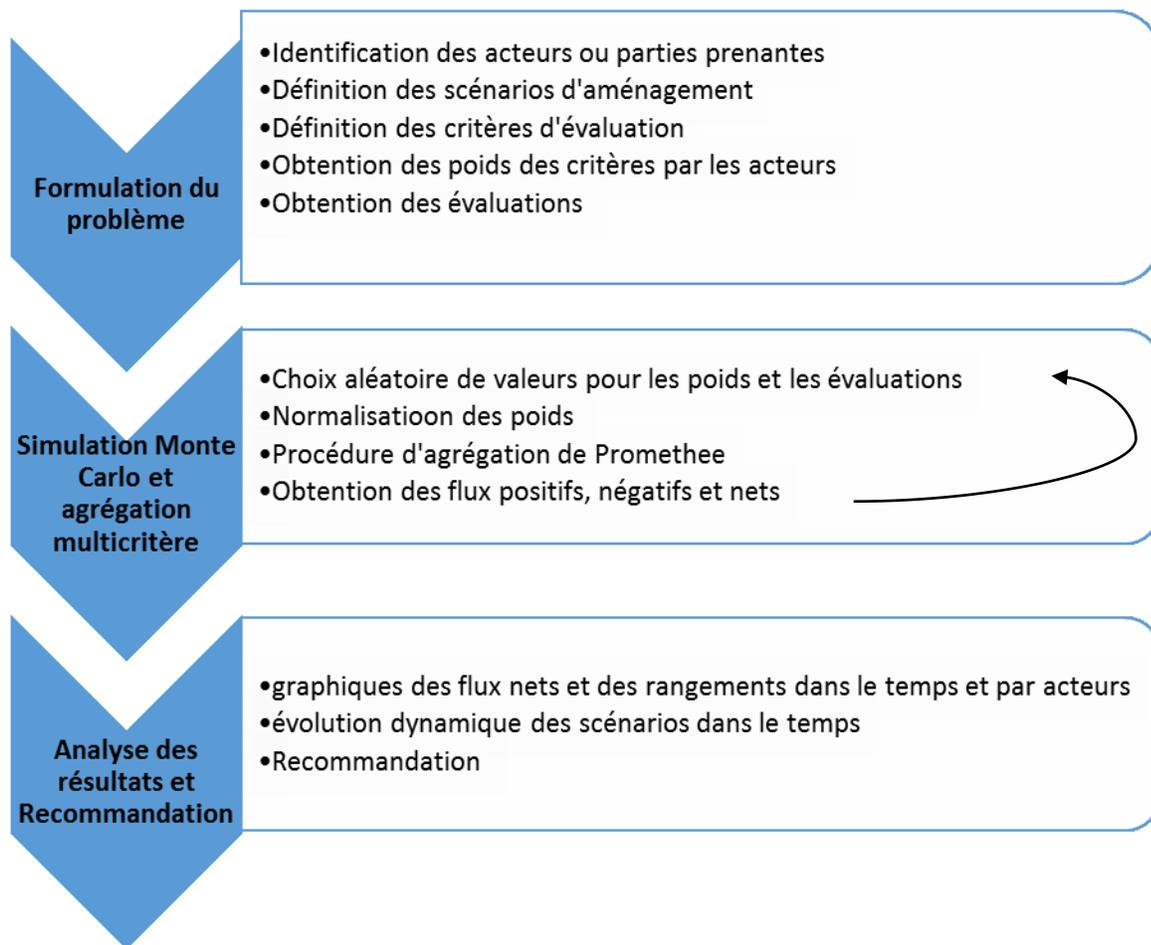


Figure 10. Proposition d'un modèle de sélection de projet en contexte de DD et d'incertitude

- *La définition du problème* : cette première phase de notre travail consiste pour nous, à identifier les différents acteurs qui interviendront dans le projet, à définir les actions et les différents critères sur lesquels reposera le choix du meilleur scénario. Notons qu'en général, la description de chaque critère dépend du type de projet auquel l'homme d'étude peut-être confronté et les critères sont d'ordre quantitatif ou qualitatif. Aussi les seuils de préférences et les poids des critères seront définis par chaque acteur. La définition du poids des différents critères se fera par une distribution de probabilité. En général quand nous sommes confrontés à un petit

nombre d'acteurs dans notre cas par exemple qui participent au processus décisionnel, le type de distribution de probabilité qui est approprié est la loi uniforme.

- La modélisation de l'incertitude : cette deuxième étape constitue la partie la plus importante de notre recherche. Une fois que le problème est bien défini, c'est-à-dire que les acteurs, les critères, les poids des critères et les évaluations sont déterminés, il faut alors procéder à une modélisation de l'incertitude qui, dans notre cas, se fera par l'application de la simulation Monte Carlo. Celle-ci sera utilisée afin de pouvoir propager l'incertitude des inputs (poids des critères et évaluations incertaines) vers les résultats (les rangements). Dans cette technique, une distribution de probabilités bien précise a été choisie pour modéliser l'incertitude relative aux poids des critères de chaque acteur et de la matrice des évaluations. L'application de la simulation Monte Carlo conduit à l'extraction d'un certain nombre d'itérations (1000 itérations dans notre cas pour chaque scénario) de valeurs aléatoires échantillonnées. Une fois que cela est effectué, notre algorithme va utiliser la procédure d'agrégation multicritère de PROMETHEE 2 sur les résultats issus de ces différents échantillonnages pour faire ressortir les flux nets et déterminer les rangements des différents scénarios. La méthode Monte Carlo continuera à calculer et recalculer ces résultats que nous avons plusieurs fois en se basant bien entendu sur un ensemble distinct de valeurs aléatoires.

Quand la simulation sera complète, nous aurons à la fin, différentes probabilités de valeurs d'issues ou de résultats possibles du modèle.

- La présentation des résultats et recommandation : cette dernière partie de notre recherche met l'accent sur l'analyse des résultats. En effet des distributions de probabilité de valeurs d'issues pour le rangement des scénarios seront fournies par les résultats obtenus. Ce qui nous permettra de pouvoir tirer une conclusion finale.

## **CHAPITRE 3**

### **ETUDE DE CAS**

#### **3.1 INTRODUCTION**

Ce chapitre présente l'application de la méthode proposée dans le domaine de l'aménagement forestier durable. L'aménagement forestier durable se prête très bien comme cadre d'application pour la présente recherche. En effet, la sélection des options d'aménagement forestiers durables vise l'équilibre entre plusieurs points de vue tels que la conservation de la diversité biologique, la conservation des sols et de l'eau, le maintien de la productivité des écosystèmes forestiers, et le maintien des avantages socio-économiques multiples.

Ce chapitre débutera par une présentation du contexte d'application, du cadre légal, du nouveau régime forestier de 2013 au Québec ainsi que les normes de certification forestières. Le problème de décision sera par la suite décrit en termes de scénarios, critères de décision, et préférences des décideurs. Puis, les principaux résultats de l'application de la méthode proposée dans ce mémoire seront présentés et discutés.

#### **3.2 GÉNÉRALITÉS SUR LE CONTEXTE DE L'AMENAGEMENT FORESTIER DURABLE**

##### **a) Historique**

Le gouvernement québécois a entrepris des initiatives afin d'améliorer et ajuster le cadre législatif et politique de la gestion forestière au Québec du régime forestier. Nous

allons essayer de démontrer de façon chronologique, les changements qui ont été apportés à la gestion des forêts.

En 1972, le gouvernement québécois avait adopté une réforme qui avait pour objectif, l'abolition du régime de concessions forestières. Cette réforme avait pour but de désintégrer au mode de gestion des ressources forestières, celui de l'allocation de la matière ligneuse. Cela s'explique par le fait que l'État voulait lui-même être de façon active, le gérant des ressources pour le mieux-être de la population car selon lui, la gestion des forêts nécessite des actions à long terme et il était imprudent de laisser cette gestion aux utilisateurs de matières ligneuses vu que ceux-ci ont des obligations de résultats financiers qui s'étendent sur le court terme.

En 1986 après avoir instauré le nouveau mode d'allocation de matière ligneuse sous la forme d'un contrat d'approvisionnement et d'aménagement forestier (CAAF), le gouvernement redonne aux utilisateurs de matière ligneuse, la gestion de la forêt mais cette fois-ci avec l'obligation de signer un contrat de permis annuel de coupe pour la récolte d'un volume de bois dans un territoire bien délimité et la mission d'aménager la forêt sur ce territoire.

En 1994, le conseil des ministres mettra en place une stratégie de protection des forêts contre toutes attaques et prendra en considération les préoccupations des citoyens qui se souciaient de la saine gestion des forêts pour les générations à venir. Par ailleurs le gouvernement mettra l'accent sur la régénération naturelle. Ce qui va par la suite le conduire à la modification en 1996, de la loi sur la forêt tout en intégrant les notions d'aménagement durable des forêts.

En 2000, le régime forestier fut encore une fois de plus révisé. La loi sur les forêts a été modifiée à la suite de plusieurs concertations. On assiste à de nouveaux changements qui se rapportent à la consultation du public dans le cadre de la planification de l'aménagement forestier, l'augmentation du nombre de territoires protégés, la conservation des anciennes forêts, l'intégration et la mise en valeur des ressources forestières dans les

plans d'aménagement forestier généraux (PGAF de 2008-2013) et l'évaluation des performances forestières des industries.

En 2005, les projets de loi n°71 et n°94 furent adoptés à l'unanimité à l'Assemblée Nationale. Ainsi la modernisation de la gestion forestière s'inscrit dans le rapport de la commission d'étude sur la gestion de la forêt publique au Québec. (Commission Coulombe, dépôt en déc. 2004). La commission avait pour but d'évaluer l'état de la situation de la gestion forestière publique du Québec et de recommander des améliorations qui favorisent le perfectionnement du régime forestier dans la perspective de développement durable.

Toutes ces mesures prises par l'État montrent sa ferme volonté de mettre en place une gestion participative qui obligerait à prendre en compte les opinions du public, des utilisateurs associés au processus de planifications forestiers (les signataires de contrats) sur les orientations de protection et de mise en valeur des forêts.

Ainsi la nouvelle loi sur l'aménagement durable du territoire forestier permet d'introduire le caractère innovateur dans la gestion des forêts qui vise à favoriser et protéger selon le gouvernement, la diversité tout en assurant la durabilité des ressources forestières. Par ailleurs, cette nouvelle loi a pour finalité de permettre aux populations (régions et collectivités) de participer directement à la gestion, de répondre aux attentes prévues en ce qui concerne l'évolution et les enjeux de la rentabilité de l'industrie des produits forestiers.

### **b) Le nouveau régime forestier de 2013**

Le 01 Avril 2013, la nouvelle loi sur l'aménagement durable forestier est entrée en vigueur et entraîne des modifications au niveau de la gestion forestière. Elle remplace la loi sur les forêts (L.R.Q., c.F-4.1). Les informations proviennent de l'éditeur officiel du Québec.

#### Finalités de la loi :

- Implantation d'un aménagement durable des forêts par un aménagement écosystémique.
- Assurer la durabilité du patrimoine forestier.
- Favoriser la gestion intégrée des ressources et du territoire.
- Prévoir des dispositions qui sont propres aux communautés autochtones.

Principaux objectifs de la loi :

- Mettre en valeur les forêts privées.
- Promouvoir une gestion qui sera axée sur les objectifs bien précis, sur l'atteinte de résultats mesurables et sur la responsabilité des gestionnaires et des utilisateurs du territoire forestier.
- Établir un équilibre au niveau des responsabilités entre l'État, les organismes régionaux, les communautés autochtones, et les utilisateurs du territoire.
- Assurer le suivi et le contrôle des interventions effectuées dans les forêts du domaine de l'État.
- Favoriser l'aménagement écosystémique et une gestion intégrée des ressources et du territoire forestier.
- Soutenir la viabilité des collectivités forestières.
- Assurer la pérennité du patrimoine forestier et l'implantation d'un aménagement durable forestier.
- Vendre les bois sur un marché ouvert à un prix reflétant la valeur marchande.
- Approvisionner les usines de transformation du bois.
- Régir les activités de protection des forêts.

Rôle du ministère des ressources naturelles dans l'aménagement durable de la forêt :

- Responsable de l'aménagement durable et la gestion durable de la forêt du domaine de l'État.
- Responsable de la planification forestière.
- Assure le suivi, le contrôle des interventions forestières.
- Responsable de l'attribution des droits forestiers et des mesures des bois.

- Assure la vente aux enchères d'une partie des bois du domaine de l'État.
- Délègue une partie de la gestion du territoire et de certaines ressources à la communauté autochtone, la municipalité, l'organisme ou une personne morale.

### c) Les normes de la certification forestière

Toute entreprise qui détient une certification forestière a pour responsabilité d'utiliser les ressources d'un territoire tout en respectant les principes d'aménagement durable des forêts. Il existe trois sortes de certification qui sont reconnues à l'échelle internationale :

- La certification de l'Association Canadienne de normalisation (CSA).
- La certification de Sustainable forestry initiative (SFI).
- La certification de Forest Stewardship Council (FSC).

Tableau 4. Les normes de certification propres à la foresterie

<b>Normes de certification propres à la foresterie</b>			
<i>Acronyme</i>	<b>FSC</b>	<b>SFI</b>	<b>CSA</b>
<i>Organisme responsable</i>	<u>FSC Canada</u>	<u>SFI Inc</u>	<u>Association canadienne de normalisation</u>
<i>Application</i>	Internationale	Aux États-Unis et au Canada	Au Canada
<i>Entrée en vigueur</i>	Depuis 1993	Depuis 1994	Depuis 1996
<i>Fondements</i>	10 principes 56 critères universels d'aménagement durable des forêts Indicateurs et moyens de vérification nationale et régionale	20 objectifs de foresterie durable reconnus 39 mesures de performance 114 indicateurs	6 critères du Conseil canadien des ministres des forêts 17 éléments CSA d'aménagement durable des forêts 35 indicateurs de base Valeurs, objectifs, indicateurs et cibles

Source : site internet des ressources naturelles du Québec.

#### **d) Critères d'évaluation de l'aménagement durable des forêts**

Les critères d'évaluation incluent la prise en compte :

- Des besoins de la population concernée.
- De la diversité biologique.
- De la conservation des sols et de l'eau
- De l'apport des écosystèmes dans les cycles écologiques.
- De la considération des avantages socioéconomiques des forêts.
- Du maintien et de l'amélioration de l'état et de la productivité des écosystèmes forestiers exceptionnels.

#### **e) L'implication des parties prenantes**

Comme nous l'avons affirmé ci-dessus, la nouvelle loi sur l'aménagement durable met l'accent sur l'implication de plusieurs parties prenantes au processus de la gestion durable de la forêt québécoise. En effet, cette considération faite par le gouvernement influencera l'opinion sur la gestion forestière grâce aux interventions et différents points de vue qui pourraient permettre l'apport de nouvelles idées qui seraient bénéfiques pour le maintien et l'amélioration à long terme des forêts ainsi que des ressources naturelles. Les interventions faites par l'État auprès des autres participants portent sur les enjeux plus ou moins importants qui sont basés sur les orientations ou les nouvelles perspectives à adopter, les nouvelles politiques et programmes à intégrer, le classement d'écosystèmes forestiers, les attentes à atteindre au niveau de la conservation de la diversité biologique, le maintien des paysages et la production de ressources puis la conciliation des activités de l'aménagement forestier aux activités de la forêt.

Les différentes parties prenantes que nous pouvons considérer sont les suivantes :

- Les producteurs de bois
- Les écologistes
- Les responsables de l'aménagement intégré

- Les gestionnaires de pourvoies
- Les communautés autochtones
- Les acteurs socio-économiques
- Les groupes environnementaux
- Le forestier en chef
- Le public
- L'homme d'étude

La prochaine section décrit le problème de décision particulier que nous considérons dans le cadre de cette recherche ainsi que ses différentes facettes.

### **3.3 PROBLÈME DE DÉCISION**

#### **3.3.1 Description**

Le problème de décision considéré consiste à choisir, parmi des scénarios d'aménagement forestiers proposés, celui qui réaliserait le meilleur compromis à long terme entre les différents critères de décision. Pour ce faire, nous allons appliquer la méthode proposée dans le chapitre 3 qui consiste à utiliser pour chaque période, la méthode PROMETHEE et faire les simulations Monte Carlo pour modéliser l'incertitude sur les évaluations et les poids des critères. Pour aboutir à cette fin, nous utiliserons, comme données, les résultats de l'évaluation économique et environnementale faite par des consultants forestiers pour le bureau du forestier en chef du gouvernement du Québec en 2009 (Consultants forestiers DGR, 2009). Les évaluations de cinq scénarios selon cinq critères sur un horizon de 150 ans ont été élaborées afin de servir comme instrument pour mesurer la sensibilité de diverses mesures sur le calcul de la possibilité forestière (CPF). Par contre, aucune agrégation ni multicritère ni multi-périodes n'a été établie. Ce qui justifie la pertinence de cette problématique afin de tester la méthode proposée dans le chapitre 3.

Ainsi les cinq scénarios proposés sont les suivants :

- Scénario A1 : Modalités du règlement sur les normes d'intervention (RNI) incluant l'effet des aires protégées.
- Scénario A2 : Modalités du règlement sur les normes d'intervention (RNI) excluant l'effet des aires protégées.
- Scénario A3 : Modalités du " plan caribou".
- Scénario A4 : Reboisement des landes forestières.
- Scénario A5 : Niveaux variables de récoltes.

Cinq critères d'évaluation environnementaux ont été pris en considération. Il s'agit de :

- Le bilan de carbone (tonnes de CO<sub>2</sub>).
- L'évolution du volume quinquennale exploitable.
- La superficie qualifiée de " bon" pour l'original (ha).
- L'évolution de la superficie des vieilles forêts (ha).
- La variation de l'Indice de Qualité de l'Habitat (IQH) du caribou (De 0 à 1).

### **3.3.2 Données du problème**

Le contenu de cette session s'inspire largement des résultats de l'évaluation économique et environnementale faite par des consultants forestiers pour le bureau du forestier en chef du gouvernement du Québec en 2009 (Consultants forestiers DGR, 2009)

#### 1. Les scénarios

Chaque scénario d'aménagement forestier répond à un ou plusieurs objectifs spécifiques (ex : reboisement des landes forestière, protection des espèces en voie de disparition, niveaux variables de récolte, etc.). Conformément à la terminologie employée en aide multicritère à la décision, chaque scénario correspond à une action, une alternative ou une variante de projet ou de programme. Les objectifs des cinq scénarios qui seront considérés dans cette étude visent à mesurer :

- ✓ L'impact de la soustraction d'aires destinées à la production de bois en aires protégées.
- ✓ L'impact de la mise en œuvre d'un plan spécifique à la protection de l'habitat du caribou forestier.
- ✓ L'impact d'un vaste programme de reboisement des terrains dénudés secs (landes forestières).
- ✓ L'impact d'une stratégie de récolte à niveaux variables visant le rajeunissement du stock sur pied qui correspond à l'accélération du rythme de prélèvement pour les 30 premières années suivie d'un rendement soutenu.

En particulier, les scénarios que nous considérons visent d'une part à étudier les modalités régulières du règlement sur les normes d'intervention et d'autre part les modalités spéciales d'une stratégie qui vise le maintien de grands massifs pour la protection de l'habitat du caribou forestier. Les 5 scénarios sont décrits ci-après.

**Scénario A1:** il correspond aux modalités du règlement sur les normes d'intervention incluant l'effet des aires protégées et sert de base à l'analyse comparative des scénarios B, C et E.

**Scénario A2:** il correspond aux modalités du règlement sur les normes d'intervention excluant l'effet des aires protégées. La création de ce scénario dépend du scénario A et la modification majeure qu'a subie ce scénario était dans le but de rendre disponible à la récolte la superficie occupée par l'aire protégée située au nord de l'unité d'aménagement forestier. Notons que la comparaison entre le scénario A2 et le scénario A1 consiste à mesurer l'effet de la soustraction d'aires destinée à la production de bois en aires protégées.

**Scénario A3:** Ce scénario correspond aux modalités du plan caribou. La comparaison entre les scénarios C et A permettra la mesure de l'effet de la mise en place d'un plan spécifique à la protection de l'habitat du caribou forestier.

**Scénario A4:** ce scénario correspond au reboisement des landes forestières. Il s'agit d'une extension du scénario A3 en considérant la plantation de près de 57 400 ha de landes forestières au cours des dix premières années de l'horizon de simulation. Notons que la comparaison entre le scénario A4 et le scénario A3 permettra de mesurer l'effet d'un programme de reboisement de 70% des quelques 82 000 ha de landes forestières dans l'unité d'aménagement.

**Scénario A5:** ce scénario introduit un niveau variable de récolte. La comparaison qui est faite entre ce scénario et le scénario A permet de mesurer la sensibilité de l'effet d'une stratégie de récolte à niveaux variables pour le rajeunissement de la forêt, la normalisation du couvert et l'augmentation du rythme de prélèvement des bois matures sur les 30 premières années de l'horizon du calcul.

## 2. Les différents critères de décision

Un critère de décision est un attribut qui est associé à chaque action et qui permet de pouvoir effectuer des comparaisons possibles entre plusieurs actions afin d'en ressortir les meilleures. C'est en effet selon Roy et Bouyssou (1993), une échelle qui représente un point de vue important aux yeux du décideur et permet la comparaison de deux actions selon le point de vue qu'il représente. Il peut être à caractère quantitatif ou qualitatif. Dans cette étude, nous considérons cinq critères environnementaux, à savoir l'évolution du volume quinquennale exploitable, l'indice de qualité de l'habitat du caribou, la superficie d'habitat qualifié de « bon » pour l'orignal, la superficie des vieilles forêts et le bilan carbone. Les sous-sections suivantes décrivent ces différents critères. Chaque scénario d'aménagement forestier (A1 à A5) sera évalué sur les cinq critères énoncés plus haut à chaque 5 an sur un horizon de 150 ans. 30 périodes seront alors considérées pour l'évaluation.

### a) Évolution du volume quinquennale de SEPM exploitable

Ce critère, mesuré en millions de mètre cube, permet d'examiner la variation dans le temps du volume exploitable à la récolte à chacune des périodes quinquennales en

comparant chacun des scénarios. La figure ci-après décrit l'évolution du volume quinquennale exploitable sur un horizon de 150 ans. Notons que le scénario A3 (Plan Caribou) est celui qui traduit le volume exploitable le moins élevé au terme de l'horizon de 150 ans et le scénario E (Coupe à niveaux variables) traduit un fort volume SEPM disponible à la récolte au terme de l'horizon.

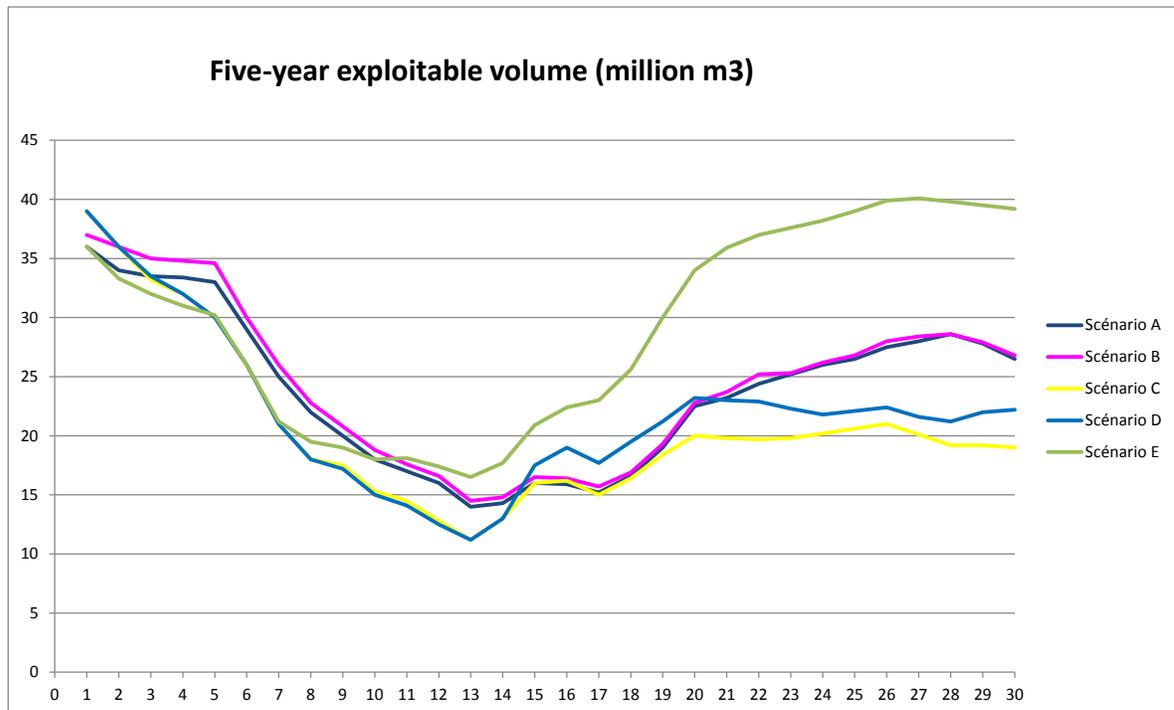


Figure 11. Évolution du volume quinquennale exploitable sur un horizon de 150 ans (Consultants forestiers DGR, 2009)

Si nous nous référons aux objectifs précis des différents scénarios, nous pouvons affirmer que ce critère nous permet de mieux les comprendre. En effet la soustraction d'aires protégées destinées n'aura aucun effet sur le volume exploitable. Ensuite la mise en œuvre d'un plan spécifique à la protection de l'habitat du caribou forestier par rapport aux modalités du règlement sur les normes d'intervention incluant l'effet d'aires protégées aura peu d'impact sur le volume exploitable. De plus la mise en place d'une stratégie de reboisement n'entraînera également aucune évolution croissante du volume exploitable. Par conséquent la stratégie de récolte à niveaux variables qui entrainera le rajeunissement du

stock sur pied présente une réelle augmentation du volume quinquennale de SEPM exploitable.

b) Variation de l'indice de qualité de l'habitat (IQH) du caribou

L'indice de qualité de l'habitat (IQH) du caribou a été conçu par le bureau du forestier en chef en se basant sur les travaux de Côté et Doyon (2004) afin de pouvoir évaluer la qualité relative de l'habitat d'hiver du caribou forestier. L'échelle de mesure de l'indice varie entre 0 et 1. Notons que la simulation dans Woodstock permet de reproduire à chaque période quinquennale, une image spatialisée du couvert forestier et de ses caractéristiques. Ce qui favorise l'obtention d'un indice qui est composé de la qualité de l'habitat du caribou forestier. Il est important de constater qu'au cours des 150 ans, des modifications aux écosystèmes forestiers peuvent affecter les conditions d'habitat d'hiver, du couvert végétal, d'occupation des espèces animales prédatrices du caribou. (Consultants forestiers DGR, 2009)

La figure 12 ci-après décrit l'évolution de l'indice de qualité de l'habitat du caribou sur un horizon de 150 ans.

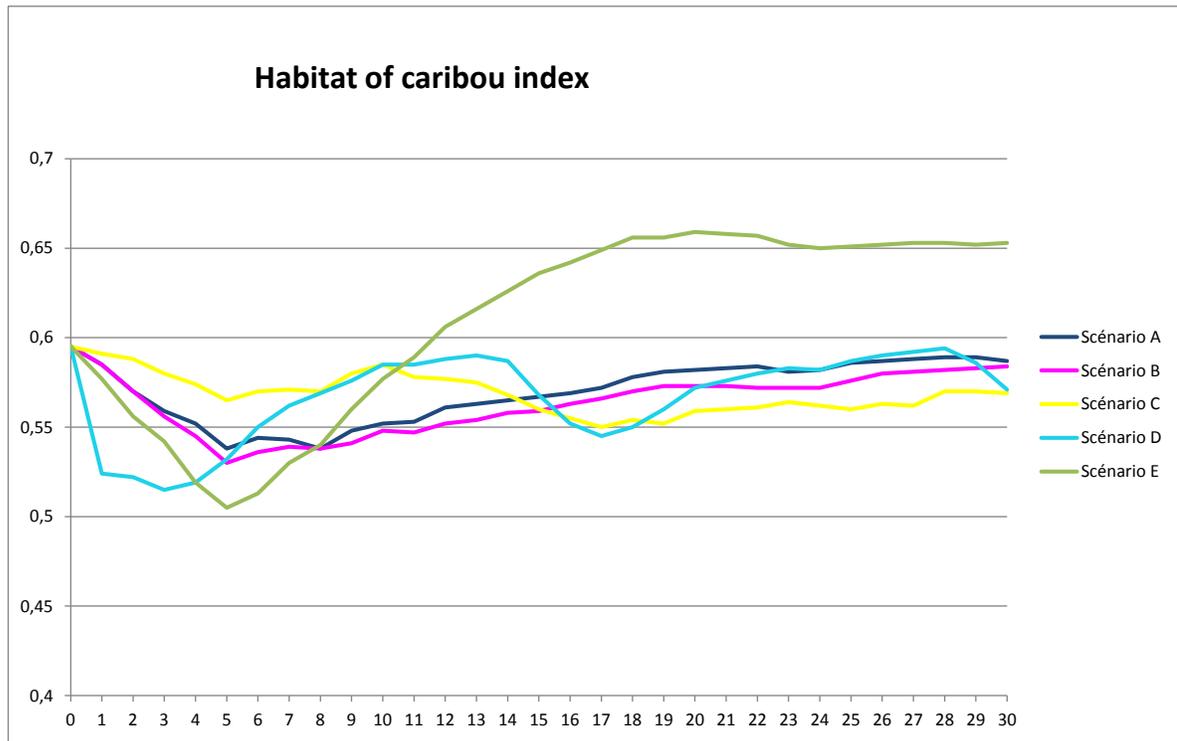


Figure 12. Évolution de l'indice de qualité de l'habitat du caribou sur un horizon de 150 ans (Consultants forestiers DGR, 2009)

c) Superficies d'habitat qualifié de « bon » pour l'orignal

La méthode choisie pour évaluer l'état de la forêt et des habitats faunique a utilisé la base de données du système d'information écoforestière (SIEF) afin de pouvoir rassembler les différents peuplements forestiers selon leur hauteur. Et une côte de qualité d'habitat pour l'orignal fut attribuée. L'unité de mesure de la qualité est exprimée en milliers d'hectares sur la base des superficies qui constituent un habitat de bonne, moyenne ou pauvre qualité. La figure ci-après décrit l'évolution des superficies d'habit qualifiées de « bon » pour l'orignal sur un horizon de 150 ans.

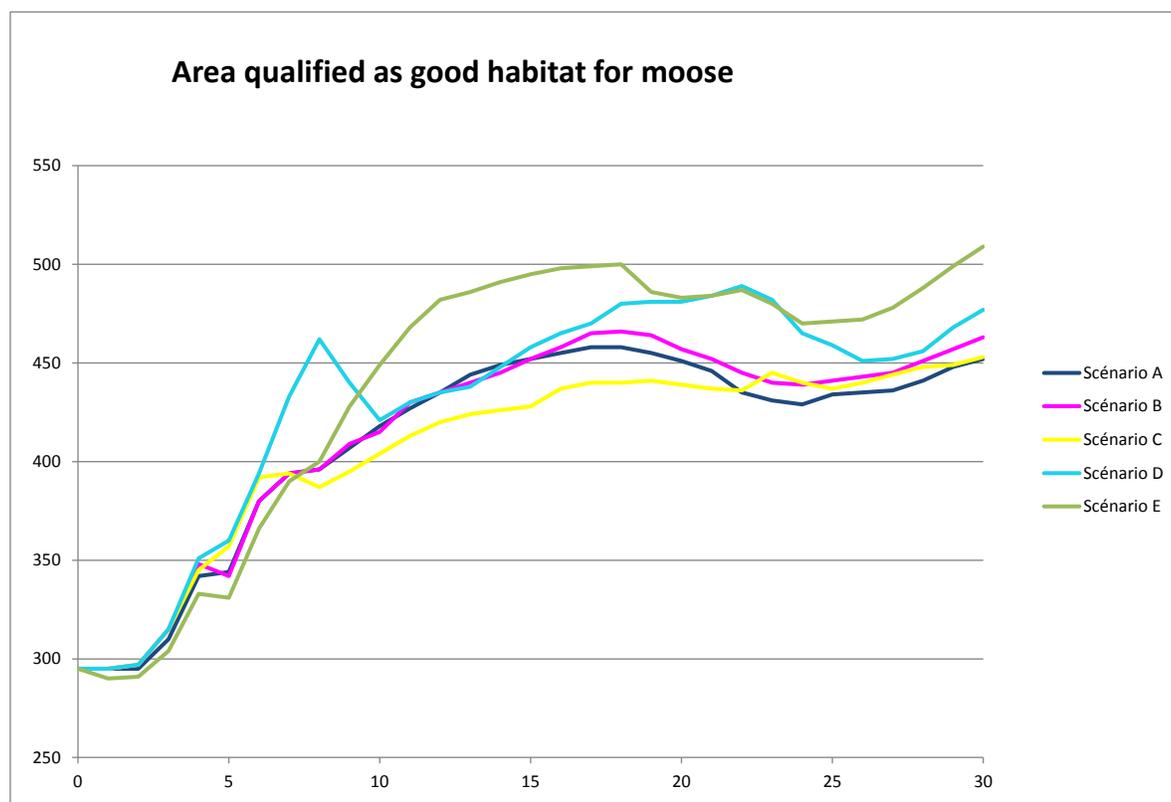


Figure 13. Évolution des superficies d'habit qualifiées de « bon » pour l'original sur un horizon de 150 ans (Consultants forestiers DGR, 2009)

#### d) Superficie des vieilles forêts

La sommation des superficies forestières dont l'âge est égal ou supérieur à 90 ans, à chacune des périodes de l'horizon permet de déterminer l'indice de l'évolution du couvert ou de la superficie des vieilles forêts. Ainsi le taux de prélèvement de chacun des cinq scénarios a une incidence directe sur le niveau de vieilles forêts à court, moyen et long terme. Les écarts qui existent entre chacun des scénarios s'élargissent au fur et à mesure que l'on évolue dans le temps. La superficie est exprimée en milliers d'hectares. La figure ci-après décrit l'évolution des superficies des vieilles forêts sur un horizon de 150 ans.

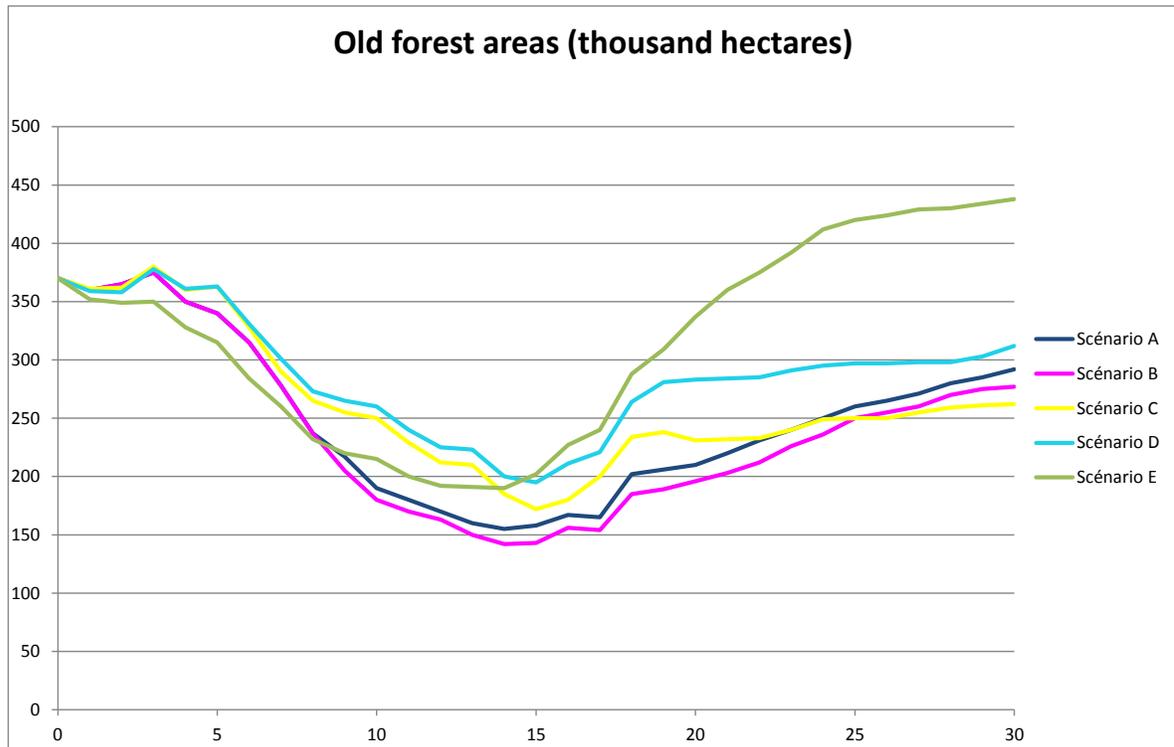


Figure 14. Évolution des superficies de vieilles forêts sur un horizon de 150 ans (Consultants forestiers DGR, 2009)

#### e) Bilan de carbone

La réduction des émissions de gaz à effet de serre et la lutte contre les changements climatiques constituent des enjeux majeurs pour le développement durable de notre planète. Par la photosynthèse, la forêt contribue à la diminution des gaz à effet de serre en absorbant d'énormes quantités de carbone jusqu'à sa maturité où il se crée un équilibre entre la quantité de carbone fixé et celle qui est libérée. Le carbone est stocké dans les végétaux et une fois que la forêt vieillie et que les feuilles meurent et tombent, il se retrouve dans le sol. Ce qui signifie que la forêt à ce stade libère plus de carbone qu'elle n'en accumule. En un mot, le carbone se retrouve essentiellement stocké dans le bois et la biomasse aérienne (les troncs, les écorces, les branches...) et souterraine (les racines).

Afin de pouvoir évaluer la quantité de CO<sub>2</sub> stockée dans la forêt, un bilan de carbone par rapport aux différents scénarios d'aménagement a été établi en comptabilisant le

carbone de l'écosystème forestier et celui des produits du bois issus de la récolte auxquels on ajoute les émissions de carbone qui sont évitées grâce à l'utilisation du bois ou de la biomasse forestière en substitution à des matériaux de construction et de chauffage. Les données qui seront utilisées résultent du modèle du bilan du carbone du secteur forestier canadien (MBC-SFC3) qui est utilisé pour estimer le stock total de carbone de la forêt et tester différents scénarios d'aménagement. Notons qu'en plus des stocks de carbone du secteur forestier, le modèle prend en compte, les stocks de la biomasse et de la matière organique morte.

Notons que les analyses comparatives de carbone faites à partir des seules données relatives à la biomasse aérienne et souterraine des arbres vivants fournissent une image représentative des écarts de bilan de carbone entre les divers scénarios. Et les émissions de carbone lors des opérations de récolte, de transport et de transformation du bois ne sont pas prises en compte dans les estimations mais sont plutôt considérées comme marginales par rapport aux quantités emmagasinées. Le bilan de carbone des différents scénarios d'aménagement est exprimé en tonnes de CO<sub>2</sub>. La figure ci-après décrit l'évolution du bilan de carbone sur un horizon de 150 ans.

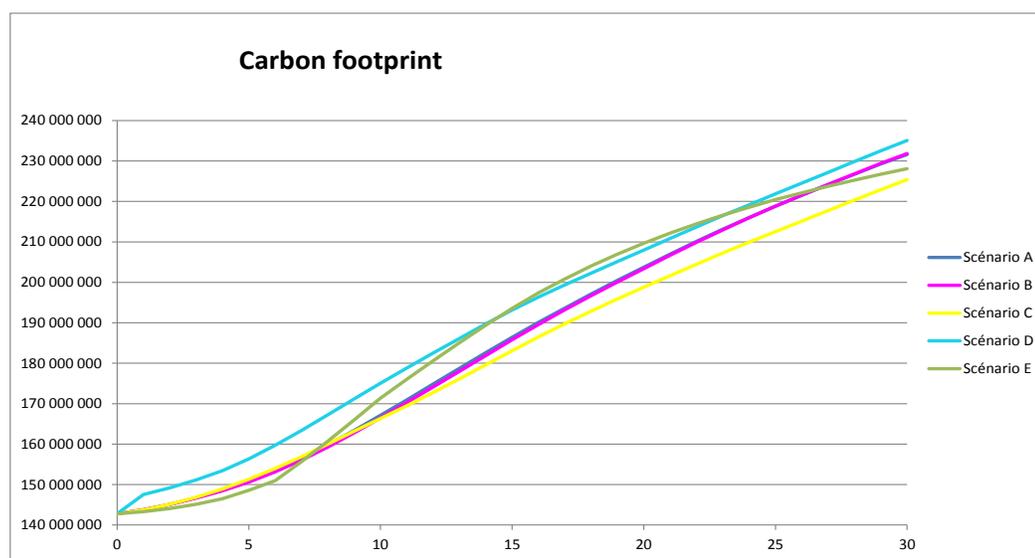


Figure 15. Évolution du bilan de carbone sur un horizon de 150 ans (Consultants forestiers DGR, 2009)

Le tableau 5 reprend les cinq critères de décision et identifie le sens de l'optimisation désiré ainsi que l'échelle d'évaluation de chacun des critères.

Tableau 5. La famille des critères

<b>Critère</b>	<b>Sens</b>	<b>Échelle d'évaluation</b>
Évolution du volume quinquennale de SEPM exploitable	À maximiser	en millions de m <sup>3</sup>
Variation de l'indice de qualité de l'habitat du Caribou	À maximiser	0 à 1
Superficie qualifiée de bon pour l'original	À maximiser	en milliers hectares
Superficie des vieilles forêts	À minimiser	en milliers hectares
Bilan de carbone	À maximiser	en tonnes de CO <sub>2</sub>

### 3. Modélisation des préférences

#### a) Poids des critères

La méthode AHP et l'échelle sémantique de Saaty ont été utilisées dans une étude antérieure pour élucider les poids des critères. Le questionnaire de la méthode AHP a été posé à un expert qui a fourni les réponses selon trois points de vue différents : les environmentalistes, les spécialistes de l'aménagement intégré et les producteurs de bois. Bien entendu dans une situation idéale, il aurait été préférable d'élucider les préférences de ces trois groupes d'acteurs mais faute de moyens et de temps, nous avons demandé à l'expert de remplir le questionnaire 3 fois en se substituant respectivement aux environmentalistes, spécialistes de l'aménagement intégré et producteurs de bois. La méthode AHP fournit les résultats suivants tel qu'indiqué dans le tableau 6 qui suit.

Tableau 6. Poids des critères obtenus selon la méthode AHP

<b>Critère</b>	<b>Environnementalistes</b>	<b>Producteurs de bois</b>	<b>Spécialistes de l'Aménagement intégré</b>
Volume exploitables	0.058	0.492	0.144
Qualité de l'habitat du caribou	0.346	0.072	0.306
Superficie qualifiée de « bonnes » pour l'original	0.116	0.075	0.161
Vieilles forêts	0.307	0.100	0.306
Bilan carbone	0.173	0.261	0.082

a) Fonctions de préférences et seuils d'indifférence et de préférence

Les fonctions de préférence de la méthode PROMETHEE telles qu'illustrées dans le chapitre 3 ont été présentées à l'expert. Ce dernier a choisi en se substituant respectivement aux points de vue des environnementalistes, des spécialistes de l'aménagement intégré et des producteurs de bois, les fonctions de préférence à retenir dans chaque cas. Parallèlement, l'expert a identifié les seuils d'indifférence et de préférences pour chaque critère.

Selon le point de vue de l'aménagement intégré par exemple, la fonction de préférence du type V serait la fonction à retenir pour tous les critères. Quant aux seuils, on conclut, par exemple, que pour le critère « Volume exploitable », une différence au-delà de 0,75 millions de m<sup>3</sup> peut emmener cet acteur à préférer un scénario à un autre. Toute différence entre 0,5 et 0,75 millions de m<sup>3</sup> indiquera une préférence faible entre les deux scénarios ; tandis que toute différence entre 0 et 0,5 millions de m<sup>3</sup> ne serait pas assez significative pour conclure à une préférence faible.

Tableau 7. Fonctions de préférence et seuils d'indifférence et de préférence

	<b>Aménagement Intégré</b>	<b>Producteur de bois</b>	<b>Écologiste</b>	<b>Indifférence</b>	<b>Préférence</b>
<b>Volume exploitable (million de m<sup>3</sup>)</b>	V	II	V	0,5	0,75
<b>IQH Caribou (entre 0 et 1)</b>	V	V	III	0,01	0,05
<b>Superficie original (milliers d'hectares)</b>	V	V	III	5	7
<b>Vieille forêts (milliers d'hectares)</b>	V	V	III	40	100
<b>Bilan Carbone (tonnes de CO<sub>2</sub>)</b>	V	IV	V	2	5

### 3.4 RÉSULTATS

Ce paragraphe présente les principaux résultats obtenus lors de l'application de la méthode. Rappelons que la simulation Monte Carlo est la méthode la plus utilisée pour l'étude de la propagation de l'incertitude. Elle est considérée généralement comme une référence pour la validation des autres méthodes d'analyse. Elle est aussi basée sur une génération aléatoire répétitive des variables d'entrée (inputs) à partir de leur distribution et plusieurs exécutions du modèle jusqu'à obtention d'une distribution de probabilité de sortie satisfaisante (output). Dans la plupart des cas, plus la taille des simulations est grande plus les résultats sont probants. Pour mener à bien notre analyse, nous avons utilisé un programme développé dans Matlab et qui permet de faire des simulations Monte Carlo sur les évaluations et les poids des critères et d'appliquer la méthode PROMETHEE pour chaque simulation et à chaque période. Conformément à la méthode PROMETHEE, nous obtenons, pour chaque simulation, les flux positifs et négatifs nets ainsi que les rangements des différents scénarios. Les différentes simulations avait pour objectif de produire les distributions de ces flux et des rangements dans le temps et ce, pour chaque point de vue d'acteur (environnementaliste, producteurs de bois et spécialistes de l'aménagement intégré).

Concrètement, nous avons effectué 1000 itérations par période de temps afin de générer une distribution de probabilité des flux et des rangements (outputs) pour chacun des scénarios. Le temps de traitement était inférieur à une minute pour chaque simulation. Il s'agissait, en effet, d'effectuer pour chaque acteur 1000 itérations sur 30 périodes d'où un total de 30000 itérations par acteur/point de vue. Ce processus nous aura permis de ressortir le rangement des différents scénarios et leursphis nets pour chaque période. De plus, nous avons pu représenter ces résultats sur tout l'horizon de temps.

D'une manière générale, l'application de la simulation Monte Carlo a été faite en cinq grandes étapes.

*Identification des paramètres incertains et de leur distribution.* Nous avons proposé un modèle et identifié les incertitudes dans les données de base. Ces données incluent les poids des critères et les évaluations. Nous avons également identifié la forme de distribution associée : la distribution uniforme qui consiste à choisir les valeurs minimales et maximales pour les poids et les évaluations. Et nous avons tenu compte des informations qui étaient à notre disposition (les fonctions, les seuils de préférences...).

Tableau 8. Données d'entrée (inputs)

Ecologistes		Actions				
Poids	Critères	a1	a2	a3	a4	a5
[.5,.51]	c1	[34.2,37.8]	[35.15,38.85]	[37.05,40.95]	[37.05,40.95]	[34.2,37.8]
[.07,.08]	c2	[.55575,.61425]	[.55575,.61425]	[.56145,.62055]	[.4978,.5502]	[.54815,.60585]
[.07,.08]	c3	[280.25,309.75]	[280.25,309.75]	[280.25,309.75]	[280.25,309.75]	[275.5,304.5]
[.1,.11]	c4	[342,378]	[342,378]	[342.95,379.05]	[314.05,376.95]	[334.4,396.6]
[.25,.30]	c5	[136566311,150941713]	[136581571,150958579]	[136531073,150902765]	[140182825,154938911]	[136121986,150450616]
Producteurs de bois		Actions				
Poids	Critères	a1	a2	a3	a4	a5
[.47,.52]	c1	[34.2,37.8]	[35.15,38.85]	[37.05,40.95]	[37.05,40.95]	[34.2,37.8]
[.07,.08]	c2	[.55575,.61425]	[.55575,.61425]	[.56145,.62055]	[.4978,.5502]	[.54815,.60585]
[.08,.081]	c3	[280.25,309.75]	[280.25,309.75]	[280.25,309.75]	[280.25,309.75]	[275.5,304.5]
[.1,.11]	c4	[342,378]	[342,378]	[342.95,379.05]	[314.05,376.95]	[334.4,396.6]
[.25,.30]	c5	[136566311,150941713]	[136581571,150958579]	[136531073,150902765]	[140182825,154938911]	[136121986,150450616]
Aménagement intégré		Actions				
Poids	Critères	a1	a2	a3	a4	a5
[.14,.16]	c1	[34.2,37.8]	[35.15,38.85]	[37.05,40.95]	[37.05,40.95]	[34.2,37.8]
[.30,.40]	c2	[.55575,.61425]	[.55575,.61425]	[.56145,.62055]	[.4978,.5502]	[.54815,.60585]
[.16,.20]	c3	[280.25,309.75]	[280.25,309.75]	[280.25,309.75]	[280.25,309.75]	[275.5,304.5]
[.30,.33]	c4	[342,378]	[342,378]	[342.95,379.05]	[314.05,376.95]	[334.4,396.6]
[.09,.10]	c5	[136566311,150941713]	[136581571,150958579]	[136531073,150902765]	[140182825,154938911]	[136121986,150450616]

*Paramétrage du logiciel.* Nous avons paramétré le calcul des données grâce au logiciel Matlab. Une fois que nous appliquons pour les poids, une valeur min et une valeur max pour chaque critère dans le fichier input, c'est le Monte Carlo qui choisira par la suite les valeurs. Pour les seuils et type de fonctions de préférence, nous les entrons dans le fichier Matlab et le logiciel exécute automatiquement les étapes qui suivent. Il est important de savoir à ce stade que les distributions de poids varient en fonction des parties prenantes. Voici comment se présente du point de vue mathématique, la matrice Monte Carlo de notre étude:

$$C = \begin{pmatrix} C1 & C2 & C3 & C4 & C5 & C6 \\ -1 & 2 & 10 & 0 & 0 & W(1) \\ 1 & 3 & 0 & 30 & 0 & W(2) \\ -1 & 5 & 0.5 & 4.5 & 0 & W(3) \\ -1 & 4 & 1 & 5 & 0 & W(4) \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & W(5) \end{pmatrix}$$

Avec : C1 = max ou min (1 ou -1)

C2 = type de fonction de préférence 1 à 6

C3 = seuil q

C4 = seuil p

C5 = valeur de sigma = écart type si la fonction est de type Gauss

C6 = poids, ici c'est le MC qui se charge de lire les données directement dans la matrice input.

*Echantillonnage.* Cette étape marque le début des itérations. Pour chaque élément de données d'entrée, un nombre de valeurs est choisi aléatoirement à partir des distributions. Ce qui nous a permis de générer N échantillons de chacun des paramètres. ( $N= 10^3$ ).

*Détermination des outputs.* L'exécution du modèle avec le jeu de données choisies aléatoirement donne N valeurs des variables de sortie (les flux et les rangements) ce qui permet de construire leur distribution.

*Itération et vérification des résultats.* Le total calculé à l'étape précédent est sauvegardé et le processus est répété à partir de la troisième étape jusqu'à obtention d'un résultat. En effet la détermination de l'estimation de la plage de confiance de 95% dans une marge de +/- 1 pour cent nous permet d'estimer avoir obtenu un résultat suffisamment stable pour les 30 périodes. La distribution des données simulées donne une estimation de la fonction de densité de probabilité du résultat. On attribue à chaque donnée simulé un rang  $k$  ce qui nous permet de classer par ordre croissant les différents scénarios. Le tableau ci-dessous est un exemple de l'ensemble des résultats obtenus (outputs) après un certain nombre d'itérations. Rappelons que nous avons effectué 1000 itérations sur les 30 périodes pour chaque scénario selon les trois acteurs. (Voir la feuille de calcul Excel ci-dessous pour une période et selon le point de vue des spécialistes de l'aménagement intégré).



Feuille de calcul  
Microsoft Excel

Le tableau à la page suivante nous présente les résultats obtenus à la suite d'une quarantaine d'itérations pour la première période selon l'opinion des représentants de l'aménagement intégré.

Tableau 9. Données de sortie (outputs)

Nbre d'itérations	PhiPlus					PhiMinus					Phinet					Rang				
	a1	a2	a3	a4	a5	a1	a2	a3	a4	a5	a1	a2	a3	a4	a5	a1	a2	a3	a4	a5
1	0,33243	1,093905	1,442781	1,041756	0,946884	1,534825	0,666237	0,36051	1,097075	1,199109	-1,2024	0,427668	1,082271	-0,05532	-0,25223	5	2	1	3	4
2	1,322591	1,325611	1,611238	0,890117	0	0,685271	0,705831	0,256445	1,185002	2,317008	0,63732	0,61978	1,354793	-0,29489	-2,31701	2	3	1	4	5
3	1,606922	0,870029	1,237644	0,777616	0,93633	0,647358	1,149408	0,640074	1,938902	1,052801	0,959564	-0,27938	0,59757	-1,16129	-0,11647	1	4	2	5	3
4	0,575549	1,485038	1,314156	1,395201	0,602427	1,263802	0,680082	0,619887	1,459105	1,349495	-0,68825	0,804956	0,694269	-0,0639	-0,74707	4	1	2	3	5
5	1,386099	1,543413	0,727528	0,980404	0,638749	0,71085	0,899317	0,956067	1,50473	1,20523	0,675249	0,644096	-0,22854	-0,52433	-0,56648	1	2	3	4	5
6	1,257013	0,843465	1,959521	0,727328	0,358641	0,679462	0,881442	0,174891	1,550289	1,859884	0,577551	-0,03798	1,78463	-0,82296	-1,50124	2	3	1	4	5
7	0,827407	0,933968	1,904222	0,668418	0,174083	0,777495	0,623751	0,318492	1,309169	1,479192	0,049912	0,310217	1,58573	-0,64075	-1,30511	3	2	1	4	5
8	0,493862	1,092535	1,28927	0,767036	1,076049	1,049861	0,676706	0,418576	1,880417	0,693192	-0,556	0,415829	0,870694	-1,11338	0,382857	4	2	1	5	3
9	1,245708	0,955477	1,484676	0,636506	0,584679	0,817587	0,808373	0,266475	1,912305	1,102306	0,428121	0,147104	1,218201	-1,2758	-0,51763	2	3	1	5	4
10	0,925259	1,743241	1,298026	0,918045	0,73255	1,414353	0,417864	0,732441	1,565686	1,486778	-0,48909	1,325377	0,565585	-0,64764	-0,75423	3	1	2	4	5
11	0,2151	1,326001	2,135755	0,622949	0,225203	1,536228	0,337713	0,088061	1,023642	1,539365	-1,32113	0,988288	2,047694	-0,40069	-1,31416	5	2	1	3	4
12	0,714849	1,234221	0,770361	1,238632	0,257441	0,745684	0,23162	0,786536	1,201889	1,249776	-0,03084	1,002601	0,10618	0,036743	-0,99234	4	1	3	2	5
13	0,991787	0,820717	1,826527	0,830422	0,603121	1,17168	0,869624	0,348106	1,671105	1,012057	-0,17989	-0,04891	1,478421	-0,84068	-0,40894	3	2	1	5	4
14	0,809125	1,094501	1,373751	0,807704	0,485015	0,847458	0,873446	0,265792	1,449041	1,134359	-0,03833	0,221055	1,107959	-0,64134	-0,64934	3	2	1	4	5
15	0,795318	1,002257	1,119754	1,350002	0,533796	0,831624	0,10662	0,520398	1,342164	1,49632	-0,03631	0,391637	0,599356	0,007838	-0,96252	4	2	1	3	5
16	1,243713	1,452985	1,842619	0,669618	0,283224	0,773817	0,872178	0,424142	1,555711	1,866312	0,469896	0,580807	1,418477	-0,88609	-1,58309	3	2	1	4	5
17	1,159256	0,933948	1,460487	0,587776	0,299932	0,70771	0,575155	0,288563	1,742393	1,127577	0,451546	0,358793	1,171924	-1,15462	-0,82765	2	3	1	5	4
18	1,436909	0,723453	0,940927	1,579584	0,296696	0,668731	0,98017	0,762697	1,228087	1,338148	0,768178	-0,25672	0,17823	0,351497	-1,04119	1	4	3	2	5
19	1,423717	0,435396	1,67258	0,898493	0,212374	0,345694	1,2524	0,019659	1,408468	1,616339	1,078023	-0,817	1,652921	-0,50998	-1,40397	2	4	1	3	5
20	1,317947	1,516957	0,945688	0,834821	0,488479	0,60318	0,403921	0,997542	1,660827	1,438423	0,714767	1,113036	-0,05185	-0,82601	-0,94994	2	1	3	4	5
21	0,721191	1,300323	1,117792	0,755367	0,322735	0,575686	0,466876	0,430784	1,592179	1,151883	0,145505	0,833447	0,687008	-0,83681	-0,82915	3	1	2	5	4
22	0,719235	1,675689	1,252487	1,071368	0,067882	0,86277	0,356503	0,792265	0,941727	1,833395	-0,14354	1,319186	0,460222	0,129641	-1,76551	4	1	2	3	5
23	1,140667	0,872423	1,448228	0,759674	0,482887	1,005267	0,784777	0,246078	1,423095	1,244662	0,1354	0,087646	1,20215	-0,66342	-0,76178	2	3	1	4	5
24	0,842188	1,224483	1,358903	0,907853	0,568958	0,999538	0,598884	0,444792	1,566731	1,29244	-0,15735	0,625599	0,914111	-0,65888	-0,72348	2	1	4	4	5
25	0,865208	0,562357	2,159382	1,075239	0,566697	0,859666	1,455051	0,298441	1,165012	1,450711	0,005542	-0,89269	1,860941	-0,08977	-0,88401	2	5	1	3	4
26	0,921667	0,353186	0,945559	1,063435	1,155795	0,568409	1,170369	0,8133	1,240278	0,647285	0,353258	-0,81718	0,132259	-0,17684	0,50851	2	5	3	4	1
27	0,645178	0,774607	2,214222	0,828264	0,305353	1,045157	0,775551	0	1,537401	1,409516	-0,39998	-0,00094	2,214222	-0,70914	-1,10416	3	2	1	4	5
28	1,045374	0,569888	1,181441	0,714835	1,00225	0,612136	1,091664	0,44338	1,702676	0,663933	0,433238	-0,52178	0,738061	-0,98784	0,338317	2	4	1	5	3
29	0,588498	1,283931	0,98768	0,858983	0,982515	1,126126	0,379772	0,636809	1,703381	0,855518	-0,53763	0,904159	0,350871	-0,8444	0,126997	4	1	2	5	3
30	0,975992	0,559343	1,437563	0,835327	0,612781	0,58504	1,032743	0,319827	1,402044	1,081353	0,390952	-0,4734	1,117736	-0,56672	-0,46857	2	4	1	5	3
31	0,915494	0,904184	1,239846	1,395816	0,841044	0,822182	1,215069	0,865102	1,294229	1,099802	0,093312	-0,31089	0,374744	0,101587	-0,25876	3	5	1	2	4
32	0,949384	1,12079	1,363935	0,619301	0,76328	0,745823	0,539389	0,220246	2,120859	1,190373	0,203561	0,581401	1,143689	-1,50156	-0,42709	3	2	1	5	4
33	0,857831	1,317337	0,985778	1,393602	0,329552	0,847894	0,317265	0,725972	1,318206	1,674762	0,009937	1,000072	0,259806	0,075396	-1,34521	4	1	2	3	5
34	0,757042	1,041837	1,641177	0,792145	0,624563	1,087612	0,743228	0,28938	1,736103	1,000441	-0,33057	0,298609	1,351797	-0,94396	-0,37588	3	2	1	5	4
35	0,477071	1,077466	1,658715	1,32077	0,389685	1,157031	1,281812	0,29072	0,894827	1,299315	-0,67996	-0,20435	1,367995	0,425943	-0,90963	4	3	1	2	5
36	1,063681	0,510533	1,602569	0,501669	0,367415	0,33934	1,006621	0,089449	1,3802	1,230257	0,724341	-0,49609	1,51312	-0,87853	-0,86284	2	3	1	5	4
37	0,663933	1,335194	0,740659	1,311024	0,853629	1,056631	0,551645	1,079163	1,164629	1,052372	-0,3927	0,783549	-0,3385	0,146395	-0,19874	5	1	4	2	3
38	0,346725	0,379922	1,709832	1,372886	0,883364	1,344558	1,19489	0,234154	1,144309	0,774818	-0,99783	-0,81497	1,475678	0,228577	0,108546	5	4	1	2	3
39	1,296796	0,730299	1,182293	1,341968	0,607869	0,609396	1,276621	0,812891	1,083646	1,37667	0,6874	-0,54632	0,369402	0,258322	-0,7688	1	4	2	3	5
40	0,688181	1,280068	1,471657	1,24686	0,58911	1,138477	0,782505	0,844485	1,304916	1,205492	-0,4503	0,497563	0,627172	-0,05806	-0,61638	4	2	1	3	5
41	1,139378	0,826935	1,518982	0,903405	0,616716	0,490556	1,304196	0,766365	1,398111	1,046188	0,648822	-0,47726	0,752617	-0,49471	-0,42947	2	4	1	5	3
42	1,210083	0,65482	1,082618	1,418955	0,505007	0,743729	1,168449	0,563811	0,904715	1,490779	0,466354	-0,51363	0,518807	0,51424	-0,98577	3	4	1	2	5
43	0,732831	1,436782	1,712715	1,030381	0,598453	1,352013	0,731926	0,670879	1,273671	1,482673	-0,61918	0,704856	1,041836	-0,24329	-0,88422	4	2	1	3	5
44	1,085808	1,567205	1,225283	1,268242	0,082742	1,111809	0,445016	0,719171	0,984077	1,969207	-0,026	1,122189	0,506112	0,284165	-1,88647	4	1	2	3	5
45	0,556713	0,921112	1,322911	1,360314	0,937072	1,287179	0,736647	0,713483	1,296021	1,064793	-0,73047	0,184465	0,609428	0,064293	-0,12772	5	2	1	3	4
46	0,750531	0,972753	1,495517	0,862441	0,449676	0,917232	0,342817	0,255142	1,441171	1,574556	-0,1667	0,629936	1,240375	-0,57873	-1,12488	2	2	1	4	5
47	1,084952	0,620014	2,02792	0,94141	0,51595	0,682803	1,699202	0,210165	1,462115	1,136142	0,402149	-1,07901	1,817755	-0,52071	-0,62019	2	5	1	3	4
48	0,533886	0,64195	0,942605	1,253891	0,413502	0,720377	0,571183	0,238015	1,307535	0,948725	-0,18649	0,070767	0,704459	-0,05364	-0,53522	4	2	1	3	5

La figure 16 représente l'organigramme d'application de la simulation Monte Carlo.

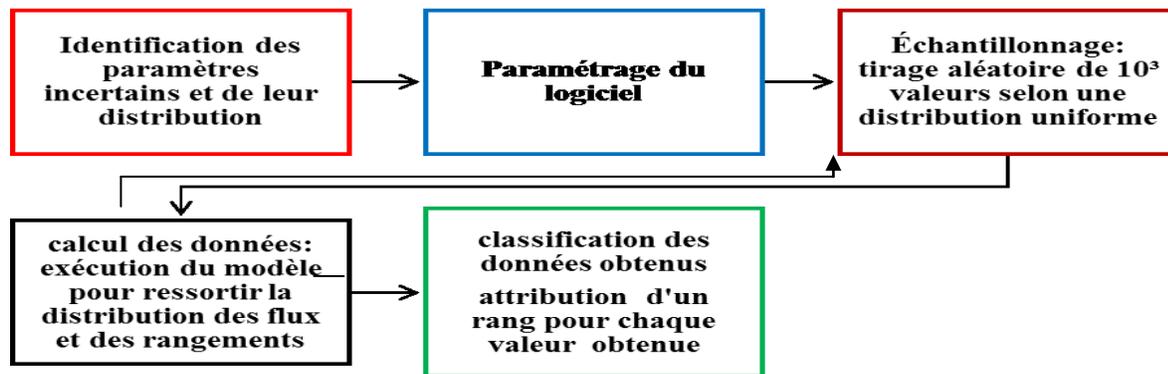


Figure 16. Illustration de l'application de la méthode Monte Carlo

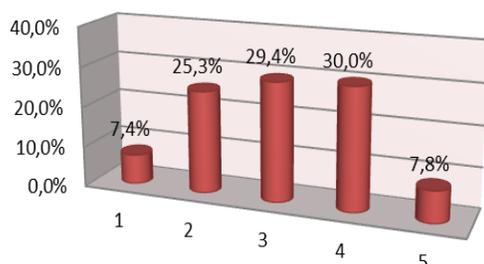
La synthèse des résultats obtenus à la suite des différents tests est représentée dans les tableaux ci-dessous :

### 3.4.1 Rangement de chaque scénario en pourcentage sur les 30 périodes

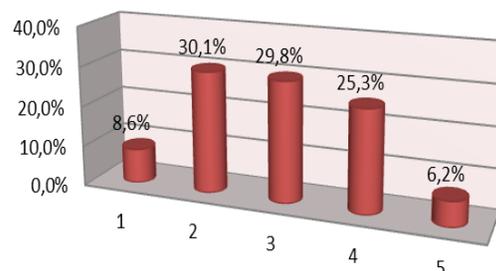
Tableau 10. Classement des scénarios selon l'aménagement intégré

	A1	A2	A3	A4	A5
<b>Rang 1</b>	7,4%	8,6%	8,4%	7,5%	<b>68,1%</b>
<b>Rang 2</b>	25,3%	<b>30,1%</b>	7,5%	28,7%	8,3%
<b>Rang 3</b>	29,4%	29,8%	8,5%	<b>29,0%</b>	3,4%
<b>Rang 4</b>	<b>30,0%</b>	25,3%	13,1%	27,2%	4,4%
<b>Rang 5</b>	7,8%	6,2%	<b>62,5%</b>	7,6%	15,8%

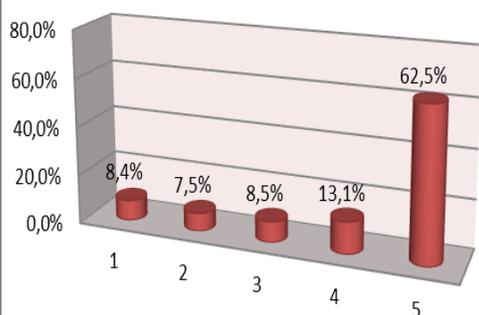
**A1: Modalité RNI incluant les aires protégées**



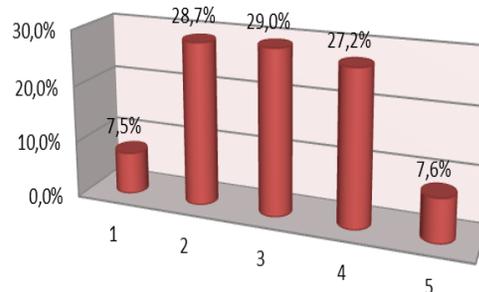
**A2: Modalité RNI excluant les aires protégées**



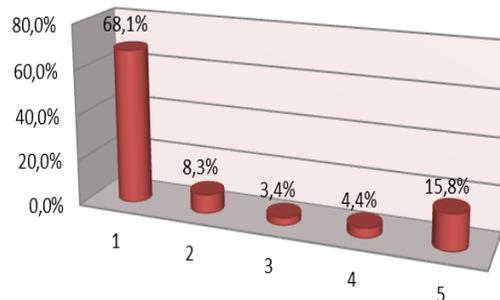
**A3: Plan Caribou**



**A4: Caribou + Reboisement de landes forestières**



**A5: Niveaux de récoltes variables**



Le classement des scénarios selon l'aménagement intégré est le suivant :

- 1<sup>er</sup> Scénario : A5
- 2<sup>ème</sup> Scénario : A2
- 3<sup>ème</sup> Scénario : A4
- 4<sup>ème</sup> Scénario : A1
- 5<sup>ème</sup> Scénario : A3

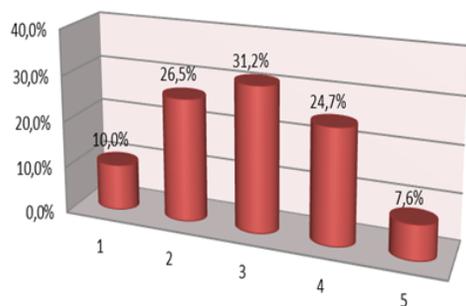
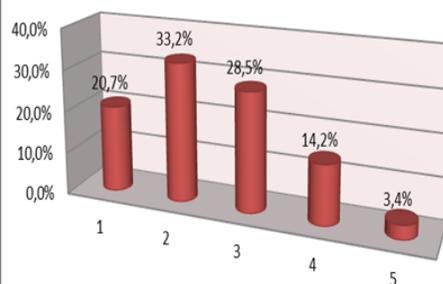
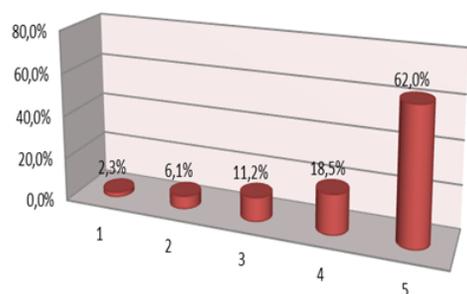
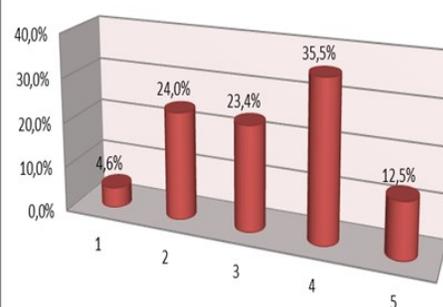
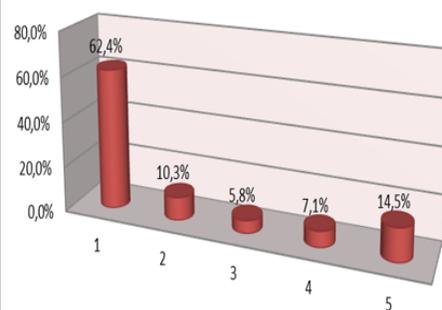
Il en ressort que pour l'acteur 'aménagement intégré', le meilleur scénario sur l'ensemble des périodes est sans contredit celui qui prône un niveau variable des récoltes et que le pire est celui qui vise la protection du caribou au premier chef. Les trois autres scénarios se ressemblent fortement aux yeux de cet acteur.

Le tableau 11 décrit les résultats des rangements obtenus sur les 30 périodes de l'horizon et ce, pour chaque scénario selon le point de vue des producteurs de bois. Le classement des scénarios est le suivant :

- 1<sup>er</sup> Scénario : A5
- 2<sup>ème</sup> Scénario : A2
- 3<sup>ème</sup> Scénario : A1
- 4<sup>ème</sup> Scénario : A4
- 5<sup>ème</sup> Scénario : A3

Tableau 11. Classement des scénarios selon le producteur de bois

	A1	A2	A3	A4	A5
<b>Rang 1</b>	10,0%	20,7%	2,3%	4,6%	<b>62,4%</b>
<b>Rang 2</b>	26,5%	<b>33,2%</b>	6,1%	24,0%	10,3%
<b>Rang 3</b>	<b>31,2%</b>	28,5%	11,2%	23,4%	5,8%
<b>Rang 4</b>	24,7%	14,2%	18,5%	<b>35,5%</b>	7,1%
<b>Rang 5</b>	7,6%	3,4%	<b>62,0%</b>	12,5%	14,5%

**A1: Modalité RNI incluant les aires protégées****A2: Modalité RNI excluant les aires protégées****A3: Plan Caribou****A4: Caribou + Reboisement de landes forestières****A5: Niveaux de récoltes variables**

Le tableau 12 décrit les résultats des rangements obtenus sur les 30 périodes de l'horizon et ce, pour chaque scénario selon le point des écologistes. Le classement des scénarios est le suivant :

1<sup>er</sup> Scénario : A5

2<sup>ème</sup> Scénario : A2

3<sup>ème</sup> Scénario : A1

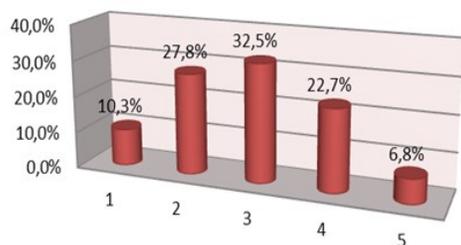
4<sup>ème</sup> Scénario : A4

5<sup>ème</sup> Scénario : A3

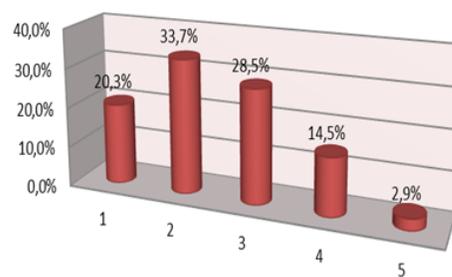
Tableau 12. Classement des scénarios selon les écologistes

	A1	A2	A3	A4	A5
<b>Rang 1</b>	10,3%	20,3%	3,2%	3,7%	<b>62,6%</b>
<b>Rang 2</b>	27,8%	<b>33,7%</b>	6,1%	22,7%	9,8%
<b>Rang 3</b>	<b>32,5%</b>	28,5%	10,6%	22,1%	6,3%
<b>Rang 4</b>	22,7%	14,5%	17,5%	<b>37,8%</b>	7,5%
<b>Rang 5</b>	6,8%	2,9%	<b>62,7%</b>	13,8%	13,9%

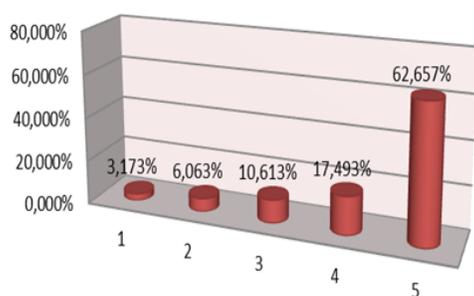
**A1: Modalité RNI incluant les aires protégées**



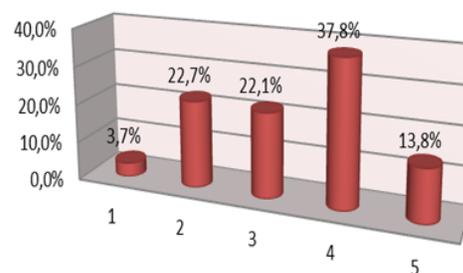
**A2: Modalité RNI excluant les aires protégées**



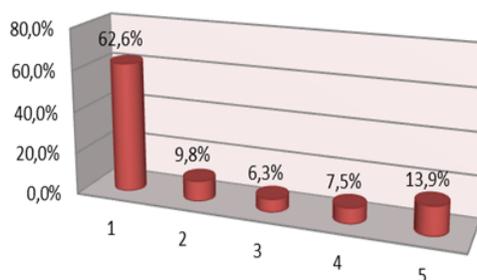
**A3: Plan Caribou**



**A4: Caribou + Reboisement de landes forestières**



**A5: Niveaux de récoltes variables**



### **3.4.2 L'évolution dynamique de chaque scénario sur les 30 périodes**

L'analyse de l'évolution des différents scénarios selon les préférences des acteurs en se basant sur le rangement et le flux net témoigne mieux de l'espace temporel dans lequel s'inscrivent les changements. Cette procédure est une simple extension de l'analyse décrite dans le paragraphe précédent.

Selon les spécialistes de l'aménagement intégré, le scénario A5 (niveau de récoltes variables) occupe deux fois le premier rang. Le scénario A3 (modalités du plan caribou) et le scénario A4 (Reboisement de Landes forestières) arrive au premier rang une fois. En se basant sur le Phi net, le scénario A3 arrive premier deux fois et le scénario A5 occupe la cinquième place trois fois. Notons que ces résultats sont néanmoins basés sur le rang moyen et le flux net moyen de chacun des scénarios à chacune des périodes de temps. La moyenne (figure 17) est calculée pour prendre en compte l'incertitude des données du problème à chacune des périodes. Le concept de rang moyen ou de flux moyen est à prendre avec beaucoup de précaution car le scénario peut être au rang1, pour une période donnée, sur 60 simulations et ensuite au rang5 sur 10 simulations. Donc cette mesure ne doit pas être considérée isolément et il est important de regarder le rang du scénario sur toutes les simulations à chacune des périodes étudiées.

Tableau 13. Classement des scénarios par période selon les représentants de l'AI

Périodes	Classement des scénarios				
	<i>Rang</i>				
[1 - 4[	1 A3	2 A2	3 A1	4 A4	5 A5
[4 - 5[	1 A5	2 A2	3 A1	4 A4	5 A3
[5 - 10[	1 A4	2 A3	3 A2	4 A1	5 A5
[10 - 30]	1 A5	2 A4	3 A2	4 A1	5 A3
	<i>Phi Net</i>				
[1 - 4[	1 A3	2 A2	3 A1	4 A4	5 A5
[4 - 6[	1 A3	2 A4	3 A1	4 A3	5 A5
[6 - 9[	1 A4	2 A3	3 A1	4 A2	5 A5
[9 - 30]	1 A5	2 A1	3 A4	4 A2	5 A3

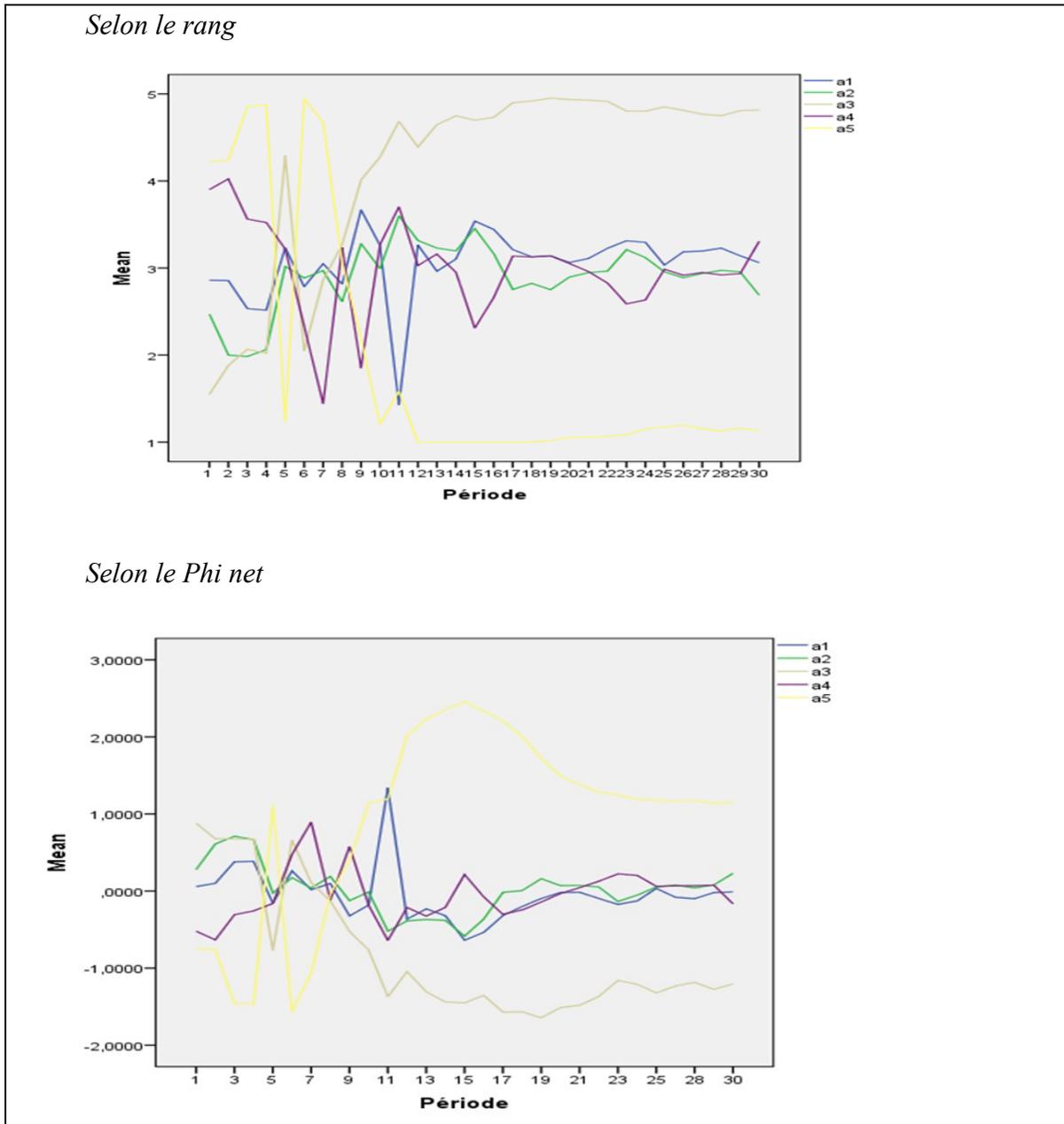


Figure 17. Évolution des scénarios selon les spécialistes de l'aménagement intégré

Les producteurs de bois quant à eux classent le scénario A5 au premier rang trois fois. Le scénario A2 devient premier qu'une seule fois et le scénario A3 occupe la cinquième place trois fois.

Tableau 14. Classement des scénarios par période selon les producteurs de bois

Périodes	Classement des scénarios				
[1 - 10[  [10 - 15[  [15 - 20[  [20 - 30]	<i>Rang</i>				
	1	2	3	4	5
	<b>A2</b>	A1	A4	A3	<b>A5</b>
					
1	2	3	4	5	
<b>A5</b>	A2	A1	A4	<b>A3</b>	
					
1	2	3	4	5	
<b>A5</b>	A4	A2	A1	<b>A3</b>	
					
1	2	3	4	5	
<b>A5</b>	A2	A1	A4	<b>A3</b>	
					
[1 - 10[  [10 - 15[  [15 - 22[  [22 - 30]	<i>Phi Net</i>				
	1	2	3	4	5
	<b>A2</b>	A1	A4	A3	<b>A5</b>
					
1	2	3	4	5	
<b>A5</b>	A2	A1	A4	<b>A3</b>	
					
1	2	3	4	5	
<b>A5</b>	A4	A2	A1	<b>A3</b>	
					
1	2	3	4	5	
<b>A5</b>	A2	A1	A4	<b>A3</b>	
					

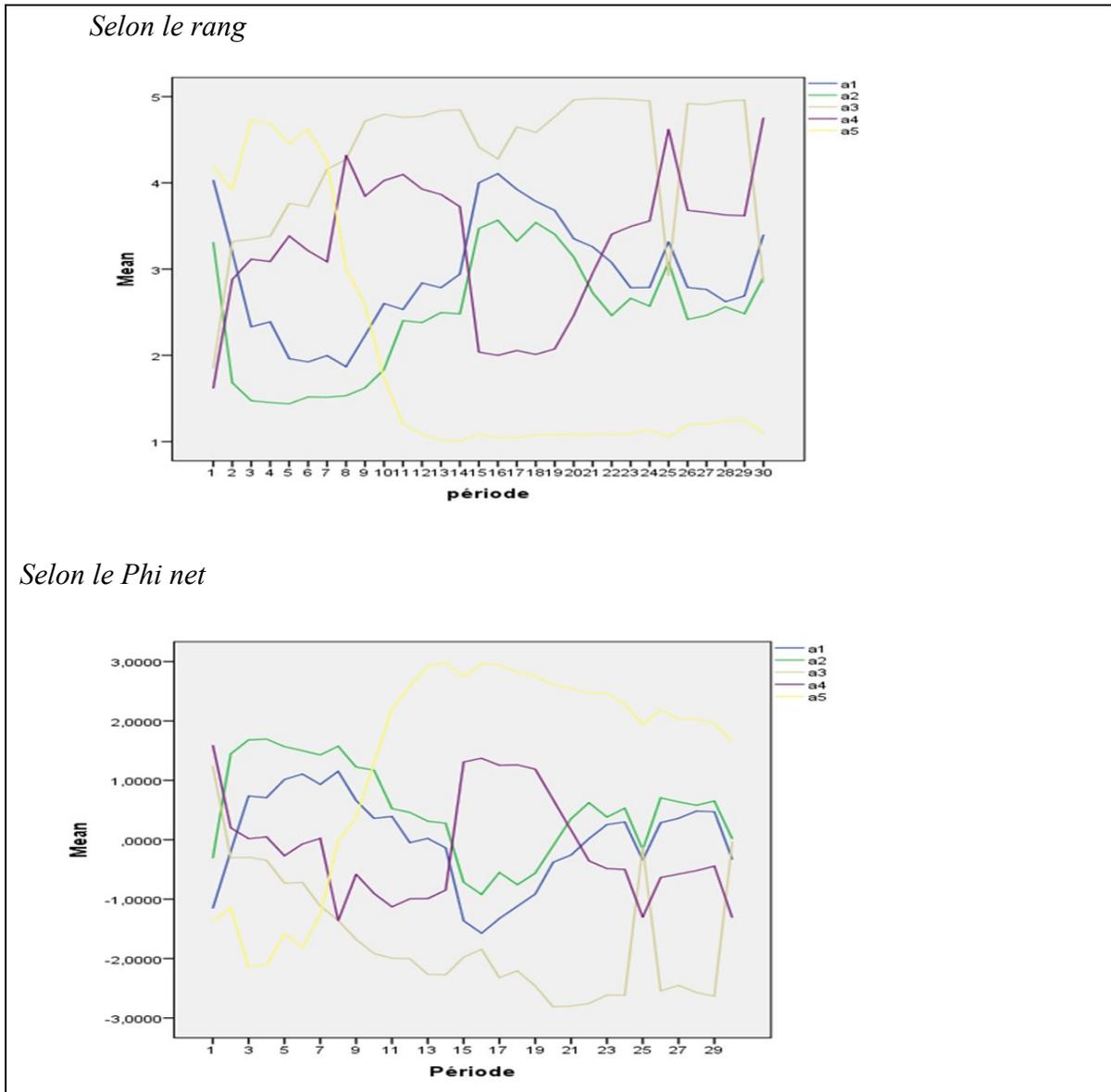


Figure 18. Évolution des scénarios selon les producteurs de bois

Pour les écologistes, le scénario A5 arrivent premier trois fois, le scénario A2 une fois. Par contre le scénario A3 se trouve à la cinquième place trois fois.

Tableau 15. Classement des scénarios par période selon les écologistes

Périodes	Classement des actions				
	<i>Rang</i>				
[1 - 10[	1 A2	2 A1	3 A4	4 A3	5 A5
[10 - 15[	1 A5	2 A2	3 A1	4 A4	5 A3
[15 - 20[	1 A5	2 A4	3 A2	4 A1	5 A3
[20 - 30]	1 A5	2 A2	3 A1	4 A4	5 A3
	<i>Phi Net</i>				
[1 - 8[	1 A2	2 A1	3 A4	4 A3	5 A5
[8 - 14[	1 A5	2 A2	3 A1	4 A4	5 A3
[14 - 21[	1 A5	2 A4	3 A2	4 A1	5 A3
[21 - 30]	1 A5	2 A2	3 A1	4 A4	5 A3

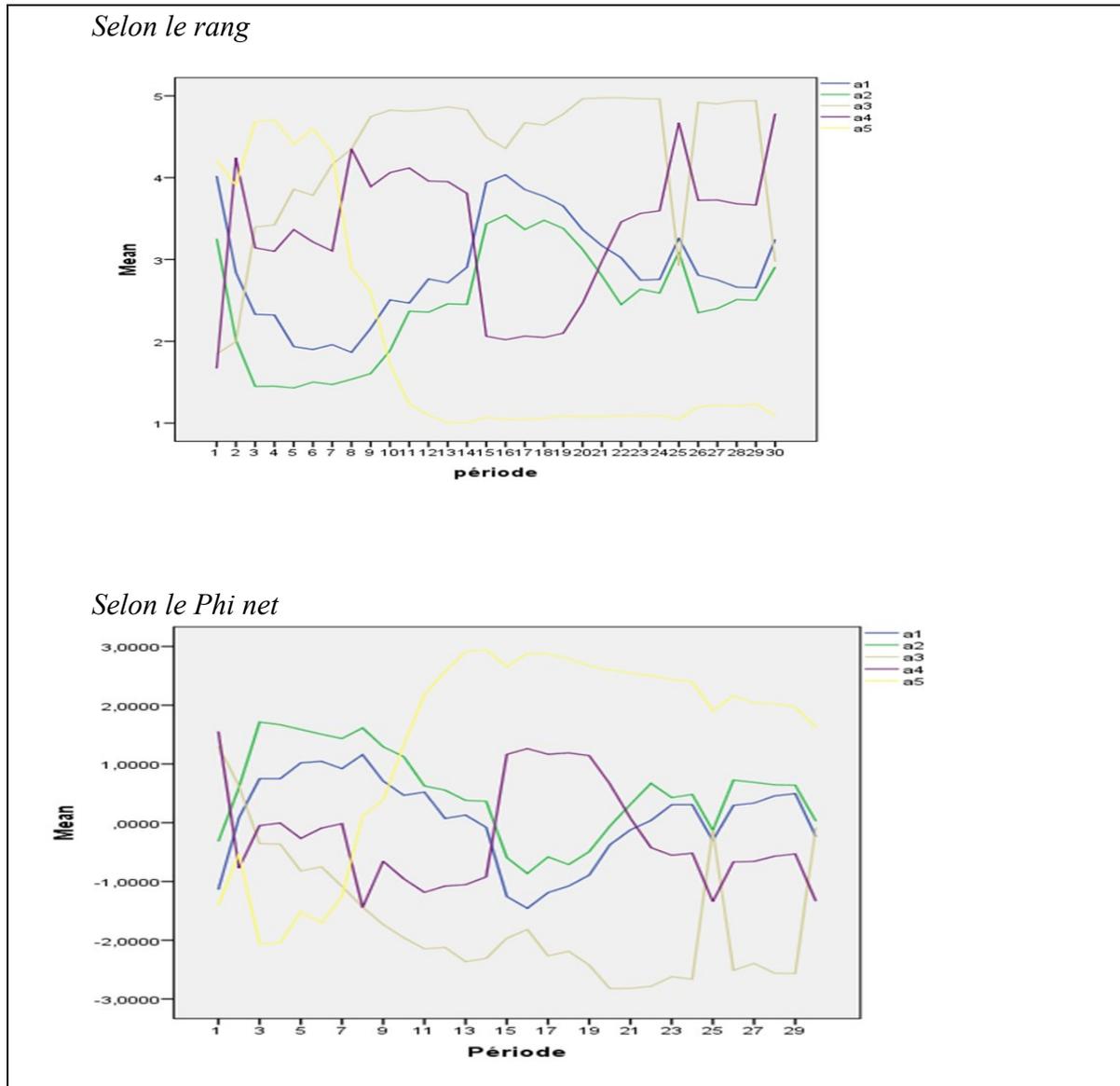


Figure 19. Évolution des scénarios selon les écologistes

Quand nous analysons le choix des acteurs par action, on constate que la pondération des critères place le scénario A5 au premier rang et le scénario A3 en dernière position. Le scénario A5 rejoint la plupart des décideurs comme solution privilégiée. L'analyse par période nous permis d'admettre que même si le scénario A5 se maintient au premier rang,

le scénario A2 peut dès fois constituer des solutions de rechanges à prendre en considération selon l'opinion de deux acteurs (les producteurs de bois et les écologistes).

### 3.5 DISCUSSION

Une analyse probabiliste a été faite sur les valeurs de chaque critère en exécutant la simulation Monte Carlo afin de pouvoir évaluer les différents scénarios. Nous avons considéré l'incertitude sur les poids et l'évaluation des scénarios. Le résultat des tests effectués correspond à une distribution de probabilités.

Dans un premier temps, une valeur intermédiaire a été choisie entre les valeurs minimales et maximales des poids et l'échantillon des valeurs aléatoires des poids qui découlent de ces distributions a été normalisé afin que la somme des valeurs soit égale à 1. Ils ont été déterminés en calculant les vecteurs propres de la matrice directement avec le logiciel Matlab.

Pour déterminer l'incertitude sur l'évaluation des scénarios, une série de valeurs a été attribuée à chaque valeur de pondération représentant ainsi l'ensemble des valeurs possibles. Pour cela, nous avons choisi une distribution uniforme pour chaque valeur, chaque distribution a été échantillonnée aléatoirement 1000 fois et pour chaque combinaison de poids échantillonné aléatoirement, la méthode PROMETHEE II est exécutée pour nous donner un rangement complet des cinq scénarios du meilleur au moins bon.

Les résultats du classement selon chaque partie prenante sont présentés dans les tableaux 10, 11, 12. Ces tableaux montrent la probabilité qu'un scénario obtienne un certain rang. Le scénario A5 obtient donc la première place avec une probabilité de (68,1%) selon l'aménagement intégré, de (62,4%) selon le producteur de bois et de (62,6%) selon l'écologiste.

Les chances que le scénario A2 occupe la deuxième place pour les trois décideurs sont de (30,1%), (33,2%) et (33,7%). Cependant, nous pouvons constater qu'il y a un léger conflit entre le choix de l'aménagement intégré et celui des deux autres décideurs sur le classement des scénarios A1 et A4.

Pour le premier décideur, la probabilité que les scénarios A4 et A1 soient respectivement troisième et quatrième est de (29%) et (30%). Tandis que pour le producteur de bois et l'écologiste, les chances que A1 et A4 soient respectivement troisième et quatrième sont de (31,2%), (32,5%) et (35,5%), (37,8%). Finalement le scénario A3 occupe la cinquième place avec une probabilité de (62,5%), (62%) et (62,7%) pour les trois décideurs.

Par ailleurs, l'analyse de l'évolution des scénarios sur l'horizon de 150 ans nous a montré qu'il n'est pas toujours possible de tirer une conclusion précise et claire sur les choix à entreprendre. En effet même si le scénario A5 est perçu comme étant le meilleur scénario, il est aussi important de savoir qu'à une certaine période, le scénario A2 représentait le meilleur choix pour les écologistes et les producteurs de bois et pour les spécialistes de l'aménagement intégré, le scénario A3 était l'option favorable durant les premières années.

D'une manière générale, la remarque que nous pouvons faire est qu'à partir de la 10<sup>ème</sup> période nous constatons une convergence d'opinion très pointue entre les trois décideurs. Ceux-ci sont tous unanimes sur le fait que les modalités du plan caribou ne constituent pas une option souhaitable puisque ce scénario se classe en dernière position dans la majorité des cas.

Ceci implique que sur les 30 premières années de l'horizon, il serait plus judicieux d'augmenter le rythme de prélèvement des bois matures tout en fixant les niveaux de variables de récoltes plutôt que de mettre en œuvre un plan spécifique pour la protection de l'habitat du caribou forestier. Car, cette augmentation pourrait engendrer le rajeunissement de la forêt et la normalisation du couvert forestier.

Ensuite selon les décideurs après avoir augmenté le rythme de prélèvement, il va falloir dans un second plan, mesurer l'impact qu'aura la soustraction d'aires destinées à la production de bois en aires protégées, dans l'unité de l'aménagement forestier. Puisque cette modification va permettre la disponibilité de la superficie occupée à la récolte par l'aire protégée.

En troisième étape, il va falloir calculer la possibilité forestière (CPF), à travers les impacts simulés par Woodstock/Stanley et pour finir procéder au reboisement des terrains dénudés secs (landes forestières).

### **3.6 CONCLUSION**

Ce chapitre de notre mémoire nous aura permis de pratiquer sur une étude de cas, la méthode PROMETHEE qui a été utilisée pour classer les différents scénarios et la simulation Monte Carlo pour la modélisation de l'incertitude. Nous avons cherché à identifier lequel des cinq scénarios pouvait permettre d'assurer la pérennité des ressources naturelles et forestières de ce territoire dans un avenir incertain et dans un contexte de durabilité.

## **CONCLUSION GENERALE**

Dans ce mémoire, nous avons proposé une approche multicritère pour la sélection de projets dans un contexte de développement durable en présence d'incertitude. Nous avons ainsi structuré notre mémoire en trois parties. En premier lieu, nous avons élaboré une revue de littérature sur les notions de développement durable, les différentes méthodes de sélection de projet, ainsi que les principaux travaux de recherche sur la sélection de projets dans un contexte de développement durable. Ensuite, nous avons présenté la méthode de résolution proposée, qui utilise conjointement la méthode multicritère d'aide à la décision PROMETHEE II et la simulation MONTE CARLO. Finalement, nous avons mis en pratique le modèle que nous avons développé sur une étude de cas dans le domaine de l'aménagement forestier durable. Le problème de décision est décrit en termes de scénarios, critères de décision, et préférences des décideurs. Puis, les principaux résultats de l'application de la méthode proposée ont été présentés et discutés. Nous avons ainsi analysé, grâce à la méthode proposée, cinq scénarios d'aménagement forestiers selon cinq critères de décision et utilisant les préférences selon trois points de vues : les spécialistes de l'aménagement intégré, les producteurs de bois et les écologistes.

Le caractère novateur de la recherche repose sur le fait que le problème a été traité en considérant une perspective à la fois multicritère (intégrant les trois dimensions du développement durable), multi-périodes (considérant des évaluations à court, à moyen et à long terme) et multi-acteurs. La problématique énoncée s'avère donc pertinente sur le plan scientifique en plus de l'être sur le plan pratique.

Néanmoins, même s'il est vrai que PROMETHEE II favorise le rangement complet des différents scénarios, il n'en reste pas moins que les résultats issus des différentes

analyses que nous avons élaborées sont discutables puisque cette méthode ne tient pas compte de l'incomparabilité.

Il serait donc intéressant d'étendre notre recherche sur deux grands aspects. Premièrement déterminer la corrélation de rang qui pourrait exister entre le rangement sur tous les critères et le rangement sur les différents critères afin de voir les critères qui seront les plus sensibles sur le rangement total. Pour finir, approfondir les résultats en effectuant un rangement partiel par l'application de PROMETHEE I en prenant par exemple les doublets de scénario afin de voir combien de fois la relation est préférée ou voir l'incomparabilité qui existe entre les scénarios.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Aliye AHU AKGÜN, Eveline VAN LEEUWENV et Peter NIJKAMP. 2012. << A multi-actor multi-criteria scenario analysis of regional sustainable resource policy >>, *Ecological Economics*, volume 78, pp.19 – 28.

Kaved KHALILI-DAMGHANI et Soheil SADI-NEZHADKHALILI. 2013. << A hybrid fuzzy multiple criteria group decision making approach for sustainable project selection >>, *Applied Soft Computing*, volume 13, pp. 339-352.

Ivan IVANOVIC', DRAGANAGRUJIC'ic', DRAGANAMACURA, JADRANKAJOVIC' et NEBOJ'sa BOJOVIC. 2013. << One approach for road transport project selection >>, *Transport Policy*, volume 25, pp. 22–29.

Kai CAO, Bo HUANG, Shaowen WANG, Hui LIN. 2012. << Sustainable land use optimization using Boundary-based Fast Genetic Algorithm >>, *Computers, Environment and Urban Systems*, volume 36, pp. 257–269.

Krishnendu SHAW, Ravi SHANKAR, Surendra S. YADAV et Lakshman S. 2012. << Supplier selection using fuzzy AHP and fuzzy multi-objective linear programming for developing low carbon supply chain >>, *Expert Systems with Applications*, volume 39, pp. 8182–8192.

Asim DATTA, Amitaya RAY, Gautam BHATTACHARYA et Hiranmay SAHA. 2011. << Green energy sources (GES) selection based on multi-criteria decision analysis (MCDA) >>, *International Journal of Energy Sector Management*, volume 5, pp. 271-286.

PARNPHUMEE SUP Piya, KERR et Sandy A. 2011. << Stakeholder preferences towards the sustainable development of CDM projects: Lessons from biomass (rice husk) CDM project in Thailand >>, *Energy Policy*, volume 39, pp.3591–3601.

Gervásio .H et Simoes DA SILVA. 2012. << A probabilistic decision-making approach for the sustainable assessment of infrastructures >>, *Expert Systems with Applications*, volume 39, pp. 7121–7131.

C.A.V. CAVALCANTE et A.T. De ALMEIDA. 2007. << A multi-criteria decision-aiding model using PROMETHEE III for preventive maintenance planning under uncertain conditions >> *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, volume 13, numéro 4, pp. 385-397.

Jeya GIRUBHA et Vinodh R S. 2012. << PROMETHEE based sustainable concept selection >>, *Applied Mathematical Modelling*, volume 36, pp.5301–5308.

Julia OBERSCHMIDT, Jutta GELDERMANN, Jens LUDWIG et Meike SCHMEHL. 2010. << Modified PROMETHEE approach for assessing energy technologies >>, *International Journal of Energy Sector Management*, volume 4, numéro 2, pp.183-212.

Mutikanga HARRISON, Sharma SAROJ et Vairavamoorthy KALANITHY. 2011. << Multi-criteria Decision Analysis: A Strategic Planning Tool for Water Loss Management >>, *Water Resour Manage*, volume 25, pp.3947–3969.

HYDE Kylie, Maier HOLGER R et COLBY Christopher. 2003. << Incorporating Uncertainty in the Promethee MCDA Method >>, *Journal of Multicriteria decision analysis*, volume 12, pp. 245-259.

Anissa FRINI. 2012. << Introduction à l'analyse multicritère >>, MGP 7091- Modèles décisionnels pour la planification et la sélection de projets, Unité départementale des sciences de gestion: Université du Québec à Rimouski. Lévis.

Khalili NASRIN R. et DUECKER Susanna. 2013. << Application of multi-criteria decision analysis in design of sustainable environmental management system framework >>, *Journal of Cleaner Production*, volume.47, pp.188-198.

Dorini GIANLUCA, Kapelan ZORAN et AZAPAGIC Adisa. 2011. << Managing uncertainty in multiple-criteria decision making related to sustainability assessment >>, *Clean Techn Environ Policy*, volume 13, pp. 133–139.

ZHANG Kejiang, KLUCK Cheryl et ACHARI Gopal. 2009. << A Comparative Approach for Ranking Contaminated Sites Based on the Risk Assessment Paradigm Using Fuzzy PROMETHEE >>, *Environmental Management*, volume 44. pp. 952–967.

J.P. BRANS. 1985. << A preference ranking organisation method (the PROMETHEE Method for Multiple criteria Decision-Making) >>, *Management Science*, volume 31, numéro 6.

Ebrahimnejad, S., Mousavi, S.M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Hashemi, H. et Vahdani, B, << A novel two-phase group decision making approach for construction project selection in a fuzzy environment>>, *Applied Mathematical Modelling*, volume 36, pp. 4197–4217.

CHIN, Kwai-Sang, XU, Dong-ling, YANG, Jian-Bo et PING-KIT Lam, James. 2008. << Group-based ER–AHP system for product project screening>>, *Expert Systems with Applications*, volume 35, pp. 1909–1929.

TENG, Junn-Yuan et TZENG, Gwo-Hshing. 1998. <<Transportation investment project selection using fuzzy multiobjective programming >>, *Fuzzy Sets and Systems*, volume 96, pp. 259-280.

Ming-Lang TSENG. 2011. << Using a hybrid MCDM model to evaluate firm environmental knowledge management in uncertainty >>, *Applied Soft Computing*, volume 11, pp. 1340–1352.

VIDAL, Ludovic-Alexandre, MARLE, Franck ; BOCQUET, Jean-Claude. 2011. <<Using a Delphi process and the Analytic Hierarchy Process (AHP) to evaluate the complexity of projects >>, *Expert Systems with Applications*, volume 38, pp.5388–5405.

ZHANG, Long-chang, LI, Chun-jie et YU, Zhan-lin. 2012. << Dynamic Web service selection group decision-making based on heterogeneous QoS models >>, *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, volume 19, numéro 3, pp. 80–90.

SHAW, Krishnendu, SHANKAR, Ravi, YADAV, Surendra S. et THAKUR, Lakshman S. 2012. << Supplier selection using fuzzy AHP and fuzzy multi-objective linear programming for developing low carbon supply chain >>, *Expert Systems with Applications*, vol 39. PP. 8182–8192.

KULAK, Osman, Durmuşoğlu, M. Bülent et Kahraman, CENGİZE. 2005. << Fuzzy multi-attribute equipment selection based on information axiom >>, *Journal of Materials Processing Technology*, volume 169, pp. 337–345.

MORTEZA Pakdin Amiri. 2010. << Project selection for oil-fields development by using the AHP and fuzzy TOPSIS methods >>, *Expert Systems with Applications*, volume 37, pp. 6218–6224.

JUUSO Liesiö. 2012. <<Scenario-based portfolio selection of investment projects with incomplete probability and utility information >>, *European Journal of Operational Research*, volume 217, pp. 162–172.

Ghapanchi, Amir HOSSEIN, Tavana, Madjid, KHAKBAZ, Mohammad HOSSEIN et Low, GRAHAM. 2012. << A methodology for selecting portfolios of projects with interactions and under uncertainty >>, *International Journal of Project Management*, volume 30, pp. 791–803.

Bhattacharyya, RUPAK, Kumar, PANKAJ et KAR, Samarjit. 2011. << Fuzzy R&D portfolio selection of interdependent projects >>, *Computers and Mathematics with Applications*, volume 62, pp. 3857–3870.

Carazo, Ana F., GOMEZ, Trinidad, Molina, Julián, Hernández-Díaz, Alfredo G., Guerrero, Flor M. et CABALLERO, Rafael 2010. << Solving a comprehensive model for

multiobjective project portfolio selection >>, *Computers & Operations Research*, volume 37, pp.630—639.

TSOUTSOS, Theocharis, DRANDAKI, Maria, Frantzeskaki, Niki, IOSIFIDIS, Eleftherios et KIOSSES, Ioannis. 2009. << Sustainable energy planning by using multi-criteria analysis application in the island of Crete >>, *Energy Policy*, volume 37, pp. 1587–1600.

Chiara VERBANO, Anna NOSELLA, Emerald Group Publishing Limited. 2010. << Addressing R&D investment decisions: a cross analysis of R&D project selection methods >>, *European Journal of Innovation Management*, volume 13, numéro 3, pp. 355-380.

SNYDER, Stephanie, HAIGHT, Robert et REVELLE, Charles. 2004. << A scenario optimization model for dynamic reserve site selection >>, *Environmental Modeling and Assessment*, vol 9 pp. 179–187.

KAMRAN Shahanaghi, ARMIN Jabbarzadeh, Mohammadreza HAMIDI et Mohammadreza GHODOOSI. 2012. << Selecting the Most Economic Project under Uncertainty Using Bootstrap Technique and Fuzzy Simulation >>, *Iranian Journal of Management Studies (IJMS)*, volume.5, numéro 1, pp.9-24.

HUANG, Pi-Hui, TSAI, Jing-Shyan et LIN, Wen-Tzu. 2010. << Using multiple-criteria decision-making techniques for eco-environmental vulnerability assessment: a case study on the Chi-Jia-Wan Stream watershed, Taiwan >>, *Environ Monit Assess*, volume 168, pp.141–158.

Goletsis, YORGOS, PSARRAS, John et SAMOUILIDIS, Jesus-Emmanuel. 2003. << Project ranking in the Armenian energy sector using a multicriteria method for groups >>, *Annals of Operations Research*, volume 130, pp.135-157.

ENEA, Mario et PIAZZA, Tommaso, 2004. <<Project selection by constrained by Fuzzy AHP >>, *Fuzzy Optimization and Decision Making*, volume 3, pp 39-62.

Metin Dagdeverin. 2008. <<Decision making in equipment selection: an integrated approach with AHP and PROMETHEE >>, *Journal of Intelligent Manufacturing*, volume 19, pp.397–406.

G. Anand, RAMBABU Kodali et Emerald Group Publishing Limited. 2008. << Selection of lean manufacturing systems using the PROMETHEE >>, *Journal of Modelling in Management*, volume 3, numéro 1, pp. 40-70.

Eric W.Stein. 2013. << A comprehensive multi-criteria model to rank electric energy production technologies >>, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, volume 22, pp. 640–654.

J. Pierre BRANS et Bertrand MARESHALL. 1994. << The Promcalc and GAIA decision support system for multicriteria decision aid >>, *Decision Support Systems*, volume 12, numéro 4, pp. 297-310.

LI, Mingshun et CHEN, Wencui. 2012. <<Application of BP Neural Network Algorithm in Sustainable Development of Highway Construction Projects >>, *Physics Procedia*, volume 25, pp. 1212 – 1217.

López-Ridaura, S, Masera, O et Astier, M. 2002. << Evaluating the sustainability of complex socio-environmental systems. The MESMIS framework >>, *Ecological Indicators*, volume 2, pp. 135–148.

L. JANSEN. 2003. << The challenge of sustainable development >>, *Journal of Cleaner Production*, volume 11, pp. 231–245.

Virjee, K. et Gaskin, S. 2005. <<Fuzzy cost recovery in planning for sustainable water supply systems in developing countries >>, *Energy*, volume 30, pp. 1329–1341.

ARES, Jorge et SERRA, Juan. 2008. << Selection of sustainable projects for floodplain restoration and urban wastewater management at the lower Chubut River valley (Argentina)>>, *Landscape and Urban Planning*, vol 85 pp. 215–227.

Kumaraswamy, MOHAN M. et ANVUUR, Aaron M. 2008. << Selecting sustainable teams for PPP projects >>, *Building and Environment*, volume 43, pp. 999–1009.

Rezaei-Moghaddam, K. et Karami, E. 2008. <<A multiple criteria evaluation of sustainable agricultural development models using AHP >>, *Environ Dev Sustain*, volume 10, pp.407–426.

WHITE, Leroy et LEE, Gregory John. 2009. <<Operational research and sustainable development: Tackling the social dimension >>, *European Journal of Operational Research*, volume 193, pp. 683–692.

Doody, D.G., Kearney, P., Barry, J., Moles, R. et O'Regan, B. 2009. << Evaluation of the Q-method as a method of public participation in the selection of sustainable development indicators >>, *Ecological Indicators*, volume 9, pp. 1129–1137.

HOSSAIN, M. Shahadat, CHOWDHURY, Sayedur Rahman, DAS, Nani Gopal, SHARIFUZZAMAN, S.M. et SULTANA, Abida. 2009. << Integration of GIS and multicriteria decision analysis for urban aquaculture development in Bangladesh >>, *Landscape and Urban Planning*, volume 90, pp. 119–133.

Stanislav E. 2009. <<Dynamic multidimensional assessment of sustainability at the macrolevel: The case of Austria >>, *Ecological Economic*, volume 68, pp. 2560–2573.

Supriyasilp, THANAPORN, Pongput, KOBKIATK et Boonyasirikul, THANA. 2009. << Hydropower development priority using MCDM method >>, *Energy Policy*, volume 37, pp.1866–1875.

HOSSAIN, M. Shahadat, CHOWDHURY, Sayedur Rahman, DAS, Nani Gopal, SHARIFUZZAMAN, S.M. et SULTANA, Abida. 2009. <<Integration of GIS and multicriteria decision analysis for urban aquaculture development in Bangladesh>>, *Landscape and Urban Planning*, volume 90, pp. 119–133.

Thomas BUCHHOLZ, Ewald, RAMETSTEINER, Timothy A., VOLK, et LUZADIS, Valerie A. 2009. <<Multi Criteria Analysis for bioenergy systems assessments``, Energy Policy, Vol 37 PP.484–495.

CAVALLARO, Fausto. 2009. <<Multi-criteria decision aid to assess concentrated solar thermal technologies >>, *Renewable Energy*, volume 34, pp.1678–1685.

Terrados, J., Almonacid, G. et Pérez-Higueras, P. 2009. <<Proposal for a combined methodology for renewable energy planning. Application to a Spanish region>>, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, volume 13, pp. 2022–2030.

TSAI, Wen-Hsien et CHOU, WEN-CHIN. 2009. <<Selecting management systems for sustainable development in SMEs: A novel hybrid model based on DEMATEL, ANP, and ZOGP>>, *Expert Systems with Applications*, volume 36, pp. 1444–1458.

DANTSIS, Theodoros, DOUMA, Caterina, GIOURGA, Christina, LOUMOU, Aggeliki et POLYCHRONAKI, Eleni A. 2010. <<A methodological approach to assess and compare the sustainability level of agricultural plant production systems>>, *Ecological Indicators*, volume 10, pp. 256–263.

BAILEY, Julie A., AMYOTTE, Paul et Khan, Faisal I. 2010. <<Agricultural application of life cycle iNdeX (LInX) for effective decision making >>, *Journal of Cleaner Production*, volume 18, pp. 1703-1713.

BANIAS, Georgios, ACHILLAS, Charisios, VLACHOKOSTAS, Christos, MOUSSIOPOULOS, Nicolas et TARSENIS, Sokratis. 2010. << Assessing multiple criteria for the optimal location of a construction and demolition waste management facility>>, *Building and Environment*, volume 45, pp. 2317-2326.

RYBARCZYK, Greg et WU, Changshan. 2010. << Bicycle facility planning using GIS and multi-criteria decision analysis >>, *Applied Geography*, volume 30, pp.282–293.

COWAN, Kelly, DAIM, Tugrul, Anderson, TIM. 2010. <<Exploring the impact of technology development and adoption for sustainable hydroelectric power and storage technologies in the Pacific Northwest United States>>, *Energy*, volume 35, pp. 4771- 4779.

ORSI, Francesco et GENELETTI, Davide. 2010. << Identifying priority areas for Forest Landscape Restoration in Chiapas (Mexico): An operational approach combining ecological and socioeconomic criteria>>, *Landscape and Urban Planning*, volume 94, pp. 20–30.

BLANCAS, Francisco Javier, GONZALEZ, Mercedes, LOZANO-OYOLA, Macarena, et Pérez, Fátima. 2010. <<the assessment of sustainable tourism: Application to Spanish coastal destinations>>, *Ecological Indicators*, volume 10, pp. 484–492.

YAO, Hong, SHEN, Liyin, TAN, Yongtao et HAO, Jianli. 2011. << Simulating the impacts of policy scenarios on the sustainability performance of infrastructure projects >>, *Automation in Construction*, volume 20, pp 1060–1069.

STAMFORD, Laurence et AZAPAGIC, Adisa. 2011. <<Sustainability indicators for the assessment of nuclear power>>, *Energy*, volume 36, pp. 6037-6057.

WAHEED, Bushra, KHAN, Faisal I., VEITCH, Brian et HAWBOLDT, Kelly. 2012. <<Uncertainty-based quantitative assessment of sustainability for higher education institution>>, *Journal of Cleaner Production*, volume 19, pp. 720-732.

CHEN, Chiau-Ching, SHIH, Hsu-Shih, SHYUR, Huan-Jyh et WU, Kun-Shan. << A business strategy selection of green supply chain management via an analytic network process >>, *Computers and Mathematics with Applications*, volume 64, pp. 2544–2557.

LIU, Dehai, LI, Hongyi, WANG, Weiguo et DONG, Yucheng. 2012. << Constructivism scenario evolutionary analysis of zero emission regional planning: A case of Qaidam Circular Economy Pilot Area in China >>, *Int. J.Production Economics*, volume 140, pp.341–356.

SUKSRI, Jintawadee et RAICU, Raluca. 2012. << Developing a conceptual framework for the evaluation of urban freight distribution initiatives >>, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, volume 39, pp 321 – 332.

Othman, M.R., Hady, L., Repke, J.-U. et Wozny, G. 2012. << Introducing sustainability assessment and selection (SAS) into chemical engineering education >>, *education for chemical engineers*, volume 7, pp. 118–124.

Kalbar, Pradip P., KARMAKAR, Subhankar et ASOLEKAR, Shyam R. 2012. << Selection of an appropriate wastewater treatment technology: A scenario-based multiple-attribute decision-making approach >>, *Journal of Environmental Management*, volume 113, pp. 158 -169.

Van Duin, J.H.R. et van der Heijden, R.E.C.M. 2012. << Towards governance on noise between municipality and terminal operator by the use of simulation modelling >>, *Journal of Computational Science*, volume 3, pp. 216–227.

STREIMIKIENE, Dalia et BALEZENTIS, Tomas. 2013. << Multi-objective ranking of climate change mitigation policies and measures in Lithuania >>, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, volume 18, pp.144–153.

MACHARIS, Cathy, TURCK SIN, Laurence, LEBEAU, Kenneth. 2012. << Multi actor multi criteria analysis (MAMCA) as a tool to support sustainable decisions: State of use >>, *Decision Support Systems*, Volume 54, pp.610–620.

SARKIS, Joseph, MEADE, Laura M., PRESLEY, Adrien R. 2012. << Incorporating sustainability into contractor evaluation and team formation in the built environment >>, *Journal of Cleaner Production*, volume 31, pp. 40- 53.

105) Devendra Choudhary et al (2012), " An STEEP-fuzzy AHP-TOPSIS framework for evaluation and selection of thermal power plant location: A case study from India", *Energy* vol 42 pp. 510-521.

AKADIRI, Peter O., OLOMOLAIYE, Paul O. et CHINYIO, Ezekiel A. 2013. << Multi-criteria evaluation model for the selection of sustainable materials for building projects >>, *Automation in Construction*, volume 30, pp. 113–125.

DE BRUCKER, Klaas, MACHARIS, Cathy et VERBEKE, Alain. <<Multi-criteria analysis and the resolution of sustainable development dilemmas: A stakeholder management approach >>, *European Journal of Operational Research*, volume 224, pp. 122–131.

Wen-Hong, LIU 2013. <<Managing the offshore and coastal fisheries in Taiwan to achieve sustainable development using policy indicators >>, *Marine Policy*, volume 39, pp. 162–171.

Naddeo, V, Belgiorno, V., Zarra, T. et Scannapieco, D. 2013. << Dynamic and embedded evaluation procedure for strategic environmental assessment >>, *Land Use Policy*, volume 31, pp. 605 - 612.

Tian, WEIJUN, Bai, JIE, Sun, HUIMEI et Zhao, YANGGUO. 2013. << Application of the analytic hierarchy process to a sustainability assessment of coastal beach exploitation: A case study of the wind power projects on the coastal beaches of Yancheng, China >>, *Journal of Environmental Management*, volume 115, pp. 251 - 256.

FARRUGIA, Thierry. 2011. << Modélisation de la rentabilité financière d'une culture intensive de saules en Abitibi et évaluation de la viabilité du projet dans le contexte du développement d'une filière de proximité axée sur le développement durable >> Sherbrooke : Université de Sherbrooke.

BRANS, J.P. 1985. <<A Preference Ranking Organisation Method: The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making >>, *Management science*, volume 31, numéro 6.

Yang, WEIHUA et Tian, CONG. 2012. << Monte-Carlo simulation of information system project performance >>, *Systems Engineering Procedia*, volume 3, pp.340 – 345.

DE KEYSER, Wim et PEETERS, Peter. 1996. << A note on the use of PROMETHEE multicriteria methods >>, *European Journal of Operational Research*, volume 89, pp. 457-461.

Behzadian, MAJID, Kazemzadeh, R.B., Albadvi, A. et Aghdasi, M. 2010. << PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications >>, *European Journal of Operational Research*, volume 200, pp.198–215.

Brans, J.P., Macharis, C., Kunsch, P.L., Chevalier, A. et Schwaninger, M. 1998. << Combining multicriteria decision aid and system dynamics for the control of socio-economic processes. An iterative real-time procedure >>, *European Journal of Operational Research*, volume 109, pp.428- 441.

HU, Yi-Chung et Chen, CHIUNG-JUNG. 2011. <<A PROMETHEE-based classification method using concordance and discordance relations and its application to bankruptcy prediction >>, *Information Sciences*, volume 181, pp. 4959–4968.

Bertrand M .1995. << The PROMETHEE VI PROCEDURE: how to differentiate hard from soft multicriteria problems >>, *Journal of decision systems*, volume 4, numéro 3, pp.213-223.

DOUKAS, Haris, KARAKOSTA, Charikleia et PSARRA, John. << Computing with words to assess the sustainability of renewable energy options >>, *Expert Systems with Applications*, volume 37, pp. 5491–5497.

Fernández, I. et Ruiz, M.C. 2013. << Descriptive model and evaluation system to locate sustainable industrial areas >>, *Journal of Cleaner Production*, volume 17, pp.87–100.

Rahman, Mohammad AZIZUR, Rusteberg, BERND, Uddin, Mohammad SALAH, Lutz, ANNEGRET, Saada, Muath ABU, Sauter, MARTIN. 2013. <<An integrated study of spatial multicriteria analysis and mathematical modelling for managed aquifer recharge site suitability mapping and site ranking at Northern Gaza coastal aquifer>>, *Journal of Environmental Management*, volume 124, pp. 25-39.

Oltean-Dumbrava, CRINA, WATTS, Greg et Miah, ABDUL. 2013. <<Transport infrastructure: making more sustainable decisions for noise reduction>>, *Journal of Cleaner Production*, volume 42, pp. 58 -68.

Döberl, GERNOT, Ortmann, MORITZ et Frühwirth, WERNER. 2013. << Introducing a goal-oriented sustainability assessment method to support decision making in contaminated site management >> *environmental science and policy*, volume 25, pp.207 - 217.

Jie Yu .2012. << Prioritizing highway safety improvement projects: A multi-criteria model and case study with Safety Analyst >>, *Safety Science*, volume 50 pp. 1085–1092.

Hua-Kai Chioua .2005. << Evaluating sustainable shing development strategies usingfuzzy MCDM approach >> *Omega*, volume 33, pp. 223 – 234.

Pohekar, S.D. et Ramachandran, M. 2004. << Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—A review >>, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, volume 8, pp. 365–381.

Choudhary, DEVENDRA et Shankar, RAVI .2012. <<An STEEP-fuzzy AHP-TOPSIS framework for evaluation and selection of thermal power plant location: A case study from India >>, *Energy*, volume 42, pp. 510-521.

BOTTERO, Marta, COMINO, Elena et RIGGIO, Vincenzo. 2011. << Application of the Analytic Hierarchy Process and the Analytic Network Process for the assessment of different wastewater treatment systems >> *Environmental Modelling & Software*, volume 26, pp. 1211-1224.

Awasthi, ANJALI, Chauhan, Satyaveer S. et Omrani, HICHEM .2011. << Application of fuzzy TOPSIS in evaluating sustainable transportation systems >>, *Expert Systems with Applications*, volume 38, pp. 12270–12280.

Wei-Ming, WANG, Lee, Amy H.I, Peng, LI-PEI et Wu, ZIH-LING. 2013. <<An integrated decision making model for district revitalization and regeneration project selection >>, *Decision Support Systems*, volume 54, pp.1092 -1103.

Pengpeng, XU et Chan, Edwin H.W. 2013. << ANP model for sustainable Building Energy Efficiency Retrofit (BEER) using Energy Performance Contracting (EPC) for hotel buildings in China >>, *Habitat International*, volume 37, pp. 104 -112.

Laurencelle, LOUIS. 2001. << Hasard, nombres aléatoires et méthode Monte Carlo>>, *Les Presses de l'Université du Québec*, pp. 274.

Sami, BEN MENA. 2000. << Introduction aux méthodes multicritères d'aide à la décision >>, *Biotechnol. Agron. Soc. Environ*, volume 2, pp. 83–93.

Bernard, ROY. 1993. << Aide Multicritère à la Décision : Méthodes et Cas >>, Paris : Économica.





