

République Algérienne Démocratique Et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Abderrahmane Mira de Béjaïa

Faculté de technologie

Département de Génie Electrique



Mémoire de fin de cycle

En vue de l'obtention du diplôme de Master en électrotechnique

Option : Réseaux électriques

THÈME

**Critères économiques à avenir incertain dans la
gestion des réseaux électriques**

Réalisé par :

Mr. Redouane ZADI

Mr. Islam NAIT MOHAND

Encadrés par :

Mr. Rabah MEDJOUJ

Melle. Fairouz IBERRAKENE

2014 - 2015

Remerciements

Nous remercions le bon dieu tout puissant de nous avoir donné le courage de surmonter tous les obstacles qu'on a rencontrés tout le long de notre parcours.

Nous tenons à remercier sincèrement Mr. R. MEDJOU DJ qui, en tant qu'encadreur, s'est toujours montré à l'écoute.

Nous tenons à remercier Melle Iberraken Fairouz qui a toujours été à notre disposition tout au long de la réalisation de ce mémoire
Nous tenons à remercier les membres du jury qui ont accepté d'évaluer notre travail.

Nous adressons nos plus sincères remerciements à nos parents et ami(e)s, pour leur soutien et encouragements au cours de la réalisation de ce mémoire.

Merci à toutes et à tous.

Dédicaces

A la mémoire de ma frangine Fadoua

A mes Parents qui m'ont toujours soutenu

A Mon frère Nacim

*A ma Bien Aimée Baya et mes sœur Imane et Hana
ainsi son petit Saïfou*

*A tous mes amis en particulier Arezki, Moumouh et
Takfarinas*

A Ma Famille DEF?

A Ma famille AA?

Issam

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents,

Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que vous représentez pour moi. Puisse Dieu, le tout puissant, vous préserver et vous accorder santé, longue vie et bonheur. Je vous dédie ce travail en témoignage de mon profond amour.

Mes frères : Boualem, makhlouf, loucif et à mes sœurs : Rachida, Soraya et Karima

Vous qui êtes toujours à mes côtés. En témoignage de l'attachement, de l'amour et de l'affection que je porte pour vous. Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.

Tous mes amis, à Lahcene, Ouiza, Madjid et Madjid, Billal et Belal, Zinedine, Yanisse, Nadir, Micipsa, Amine, Syphax, Hanafi, Salim, Ferhat et Fares.

En témoignage de l'amitié qui nous uni et des souvenirs de tous les moments que nous avons passé ensemble, je vous dédie ce travail et je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.

Redouane

Liste des Tableaux

II.1. Échelle de Saaty de la méthode AHP

II.2. Échelle de SAATY pour les Indices de cohérence aléatoire

II.3. Ratio de cohérence acceptable

III .1. Effets sur la santé dus au fonctionnement normal

III.2. Indicateurs de risque d'accidents liés à l'expérience sévères pour les filières énergétiques complètes

III. 3. Les catégories de déchets sélectionnés pour chaînes énergétiques Complets

IV.1. synthèse des résultats antérieurs

IV.2. comparaison des critères

IV.3. comparaison des sous critères Economique

IV. 4. Comparaison des sous critères sociaux

IV. 5. Comparaison des sous critères environnementaux

IV. 6 .7.8.9.10.11.12.13.14.15 Comparaison des alternatives par rapport au sous critères

VI.16. Synthèse des résultats

Liste des Figures

- I.1. Processus de décision
- I.2. Préférence entre les actions a et b selon le vrai critère
- I.3. Préférence entre les actions a et b selon le quasi –critère
- I.4. Préférence entre les actions a et b selon le pré-critère
- I.5. Démarche top-down d’analyse multicritère
- I.6. Démarche bottom-up d’analyse multicritère
- I.7. Démarche intermédiaire d’analyse multicritère
- II.1. Etapes de la méthode AHP
- II.2 La structure hiérarchique
- II.3. Étapes pour dériver les vecteurs propres
- II.4 Étapes de calcul et de validation de ratio de cohérence
- III.1. Graphique représentant le développement durable
- III.2. Émissions basées sur LCA de GHG pour les systèmes actuels et futurs
- III. 3. Coûts externes de production d'électricité et interne. Pour chaque vecteur d'énergie deux cas sont présentés - l'un représentant la fourchette basse des valeurs et l'autre représentant la gamme supérieure
- III.4. hiérarchie explicite à la détermination d'une durabilité de l'électricité pour une croissance à long terme d'une entreprise
- III.5 : BOCR (avantages, opportunités, coûts et risques) de durabilité d'électricité
- IV.1 : priorité des critères dans l'étude antérieure
- IV.2 : construction de la hiérarchie
- IV.3. poids des critères
- IV.4. Priorités des sous critères
- IV.5. priorités des alternatives

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Méthodes multicritères d'aide à la décision	
Introduction	3
I.1 Aide à la décision.....	3
I.1.1 Définition de l'aide à la décision	3
I.1.2 Le processus de décision.....	4
I.2 L'aide multicritère à la décision.....	5
I.2.1 Définition de l'aide multicritère à la décision.....	5
I.2.2 Démarche de l'aide multicritère à la décision.....	7
I.3 Définition de la méthode Analytic Hierarchy Process (AHP)	9
I.3.1 Intérêts de la méthode Analytic Hierarchy Process (AHP)	10
I.4 La méthode Analytic network Process (ANP).....	10
I.4.1 La structure générale d'Analytic Network Process (ANP).....	11
I.5 Multiple attribute utility theory (MAUT)	11
I.6 Les méthodes de surclassement de synthèse.....	12
I.6.1 Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation (PROMETHEE)	12
I.6.2 Les méthodes Elimination Et Choix Traduisant la Réalité (ELECTRE).....	13
Conclusion	14
Chapitre II : développement des méthodes	
Introduction	15
II.1 Les critères économiques à avenir incertain.....	15
II.1.1 Critère de Wald.....	15
II.1.2 Critère du Max Max	16
II.1.3 Critère de Hurwicz.....	17
II.1.4 Critère de Savage.....	17
II.1.5 Critère de Laplace.....	18
II.2 Analytic hierarchy process (AHP).....	18
II.2.1 Particularités de la méthode AHP.....	18
II.2.2 Etapes de la méthode AHP	19
II.2.2.1 Etablir la structure hiérarchique.....	19
II.2.2.2 Effectuer les comparaisons binaires	20
II.2.2.3 Dériver les vecteurs propres	21

SOMMAIRE

II.2.2.4 Calculer le ratio de cohérence	22
II.2.2.5 Etablir les priorités finales	26
Conclusion	27
Chapitre III : l'électricité durable	
Introduction	28
III.1 Développement durable.....	28
III.1.1 Indicateurs du développement durable.....	29
III.1.1.1 Indicateurs environnementaux	29
III.1.1.2 Indicateurs économiques	29
III.1.1.3 Indicateurs sociaux	30
III.2 Ressources d'énergie.....	30
III.2.1 Energie nucléaire.....	30
III.2.2 Ressources fossiles.....	31
III.2.3 Ressources renouvelables.....	33
III.2.3.1 L'énergie éolienne.....	33
III.2.3.2 L'énergie hydraulique	34
III.2.3.3 L'énergie solaire.....	35
III.2.3.4 Pourquoi sont-elles indispensables.....	37
III.3 Comparaison des énergies	37
III.3.1 Emission des gaz à effet de serre (GES)	38
III.3.2 Impacts sur la santé	39
III.3.3 Déchets	40
III.3.4 Effets sur l'emploi.....	41
III.3.5 Risques de reproduction	42
III.3.6 Coûts.....	42
III.3.7 Sécurité d'approvisionnement	43
III.3.8 Robustesse	44
III.4 Critères d'évaluation de la durabilité	45
III.4.1 Bien-être humain	45
III.4.2 Sécurité de l'approvisionnement.....	45
III.4.3 Tolérance écologique	45
III.4.4 Efficience économique.....	45
III.4.5 Evitement de risques critiques mettant en danger le système	46
III.4.6 Flexibilité	46
III.4.7 Diversité	46

SOMMAIRE

III.5 Développement du concept de la durabilité d'électricité	46
III.5.1 L'analyse BOCR (bénéfices, opportunités, couts, risques).....	46
Conclusion	50
Chapitre IV : application de la methode AHP	
Introduction	51
IV.1 Résultats antérieur.....	51
IV.2 Cas d'étude.....	53
IV.3 Détermination des critères et sous critères.....	53
IV.4 Application.....	53
IV.4.1 Construction de la hiérarchie	53
IV.4.2 Effectuer les comparaisons binaire, dériver le vecteur propre et le calcul de ratio de cohérence.....	54
IV.4.3 Synthèse et résultats	58
Conclusion.....	58
Conclusion générale	59

Introduction générale

Respectueuse du climat, de l'environnement et des ressources, sans émission, sûre et fiable, largement acceptée socialement et bien sûr économique: c'est ainsi que la plupart d'entre nous s'imaginent une alimentation électrique durable. Malheureusement, ceci reste pour le moment un vœu pieux et il nous faudra encore vivre de longues années sans cette technologie idéale.

Cela ne nous empêche pas, dans notre prise de décision, de peser le pour et le contre des alternatives possibles. Ainsi le meilleur moyen est de s'appuyer sur des indicateurs mesurables, qui doivent refléter les aspects écologiques, économiques et sociaux, comme par exemple les émissions toxiques, les coûts de l'électricité, ou encore les accidents possibles, mais qu'est-ce que cela signifie concrètement dans les secteurs de l'énergie et de l'électricité? La durabilité des systèmes énergétiques peut-elle être mesurée objectivement? Quelles technologies font bonne figure?

C'est ainsi que nous jugeons utile de définir un nouveau mode de gestion des réseaux électriques, basé sur les aspects économiques, sociaux et environnementaux. Chaque porteur de projet relatif à l'énergie, doit mettre en exergue quatre principaux critères : ce qu'il apporte comme bénéfices, qu'est-ce qu'il apporte comme opportunité, combien ça coûte et surtout quelle sont les risques à courir ?

En plus il y a lieu de traiter en détail les ressources dépendamment de leur nature à savoir : fossiles, nucléaires et renouvelables, même dans le domaine de renouvelable, il y a lieu aussi de distinguer selon leur confort, maîtrise et performances, l'objectif est surtout d'évoluer à une qualité de vie supérieure.

Notre travail se départage en quatre principaux chapitres :

Dans le premier chapitre, on donne des généralités sur la prise de décision et les méthodes multicritère d'aide à la décision.

Dans le deuxième chapitre, nous développons la méthode Analytic Hierarchy Process AHP et les critères économiques inspirés de la théorie des jeux.

Les différentes ressources d'énergie et leurs impacts sur l'économie, la société et l'environnement ; et on va développer un concept de la durabilité d'électricité ont fait l'objet de troisième chapitre.

Dans le quatrième chapitre, nous effectuons une application à l'aide de la méthode AHP pour sélectionner la meilleure alternative pour une électricité durable.

En fin, on termine par une conclusion.

CHAPITRE I

MÉTHODES MULTI CRITÈRES D'AIDE À LA DÉCISION

Introduction

Le comportement face au risque a fait l'objet de nombreuses recherches se référant à divers ancrages théoriques relevant des théories managériales, psychologiques, sociologiques ou encore anthropologiques. L'intérêt croissant pour cet objet d'étude tant de la part des praticiens que des chercheurs se justifie entre autres par la valorisation accrue du comportement risqué dans les économies occidentales considéré le plus souvent comme associé à des rendements élevés.

Bien que le degré de risque assumé (comportement) soit plus ou moins élevé en fonction du degré de risque perçu, le comportement ou encore la prise de décision face au risque ne reflète pas systématiquement la perception du risque.

On présente dans ce chapitre, quelques méthodes d'aide à la décision les plus utilisées dans le domaine de l'énergie et de l'électricité, à savoir : Analytic Hierarchy Process AHP, Analytic Network Process ANP, Multiple attribute utility theory MAUT, Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation PROMETHEE, Les méthodes Elimination Et Choix Traduisant la Réalité ELECTRE.

I.1 Aide à la décision

Il est courant, dans une étude d'aide à la décision, de devoir tenir compte de plusieurs points de vue pour comparer l'attractivité relative des différentes actions susceptibles de résoudre le problème de décision considéré.

L'aide à la décision utilise des techniques et des méthodologies issues du domaine des mathématiques appliquées telles que l'optimisation, les statistiques, la théorie de la décision ainsi que des théories de domaines moins formels.

I.1.1 Définition de l'aide à la décision

L'aide à la décision ne relève que de façon très partielle de la recherche d'une vérité. Les théories ou, plus simplement, les méthodologies, les concepts, les modèles, les techniques sur lesquelles elle s'appuie ont, le plus souvent, une ambition différente : raisonner le changement que prépare un processus de décision de façon à accroître sa cohérence avec les objectifs et le système de valeurs de celui pour qui ou au nom de qui, l'aide à la décision s'exerce [1].

En effet, une activité d'aide à la décision implique un minimum d'insertion dans le processus de décision : elle se fait essentiellement avec les acteurs du processus dans

l'établissement d'une véritable relation d'aide [2]. Un problème de décision n'est pas un objet qui préexiste ; La formulation qu'on en donne ne peut pas être totalement objective et ne peut être envisagée indépendamment des rapports entre l'individu et la réalité. Il ajoute qu'il est normal que cette formulation évolue au fur et à mesure de l'avancement dans le processus de décision [3]. Dans ce sens, le succès d'une démarche d'aide à la décision dans une organisation nécessite la compréhension de l'ensemble du processus de décision dans lequel s'insère cette aide, ce qui implique une capacité d'appréhender adéquatement le problème qui justifie l'origine et qui alimente par la suite ce processus [4].

I.1.2 Le processus de décision

Le processus de décision est défini comme l'enchaînement des trois phases :

- **Phase de compréhension:** analyse de la situation et du problème.
- **Phase de modélisation:** formulation du problème (mise en évidence des écarts entre la situation actuelle et la situation objectée) et description des solutions potentielles.
- **Phase de sélection:** choix d'une solution en fonction de critères concrets (objectifs, normes,...) ou abstraits (intuition, motivation,...), appréhendés par le décideur avec ou sans le soutien d'outils et de techniques d'aide à la décision. La figure ci-dessous explique ce processus avec des intercales entre les phases. [5]

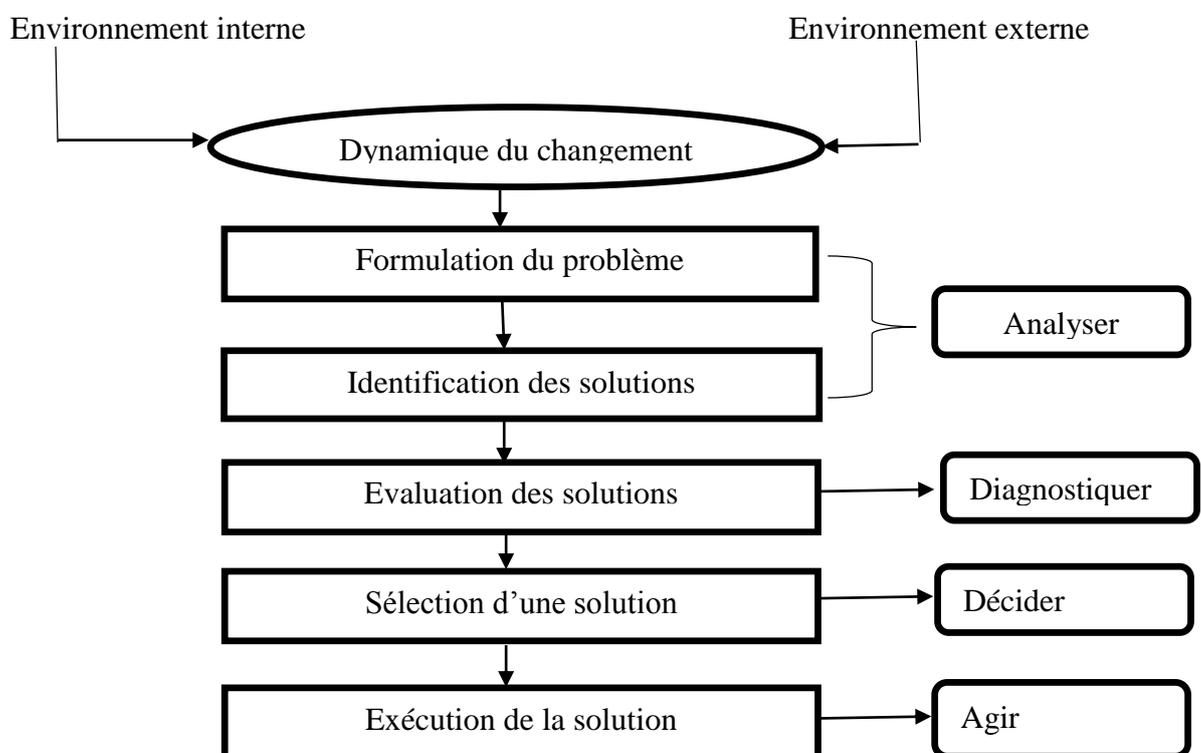


Figure I.1 : Processus de décision

I.2 L'aide multicritère à la décision

La détermination de la “meilleure” action (optimale, de meilleur compromis...) constitue un défi intellectuel perpétuel en sciences et en génie. L'aide multicritère à la décision s'est alors développée pour offrir à la fois une démarche et des outils de solutions à des problèmes décisionnels complexes [6]. Ainsi, l'analyse multicritère est aujourd'hui considérée comme l'une des branches les plus importantes de la recherche opérationnelle et des théories de la décision.

I.2.1 Définition de l'aide multicritère à la décision

Techniquement, l'aide multicritère à la décision est développée pour traiter plusieurs classes de problèmes de décision (choix, tri, description, rangement...) tout en considérant plusieurs critères (attributs), souvent conflictuels et non commensurables, tout en cherchant à modéliser au mieux les préférences et les valeurs des décideurs [7].

L'aide multicritère à la décision est défini comme étant : « L'aide multicritère à la décision vise, comme son nom l'indique, à fournir à un décideur des outils lui permettant de progresser dans la résolution du problème de décision ou plusieurs points de vue, souvent contradictoires, doivent être pris en compte » [8].

L'aide multicritère à la décision est considérée comme une analyse ayant pour but d'explicitier une famille cohérente de critères permettant d'appréhender les différentes conséquences d'une action. Ainsi, un critère permet d'évaluer et de comparer des actions potentielles selon un objectif bien défini. A chaque critère en associé une donnée descriptive unique [9].

Un critère g est une fonction à valeurs réelles définies sur A permettant de déterminer le résultat de la comparaison de toute paire d'action relativement à un objectif associé, de sorte que:

$$\forall (a, b) \in A, g(a) > g(b) \Rightarrow a P_g b \dots\dots\dots (I.1)$$

Où : P_g est l'expression des préférences partielles de a par rapport à b relativement au critère.

A chaque critère g est associé une échelle de mesure E_g représentant les valeurs possibles que peut prendre le critère, à toute action est associé un vecteur de performance traduisant l'image de l'action a dans l'espace des critères:[10]

$$\forall (a) \in A, E_g = (g_1(a), g_2(a), \dots, g_n(a)) \dots\dots\dots (I.2)$$

Il existe trois types de critères : [11]

Le vrai critère: Nous parlons de vrai critère lorsque l'action qui reçoit la meilleure note sera préférée à l'autre. Il n'y a indifférence que si les deux notes sont égales. Les indices P et I signifie respectivement la préférable et l'indifférence

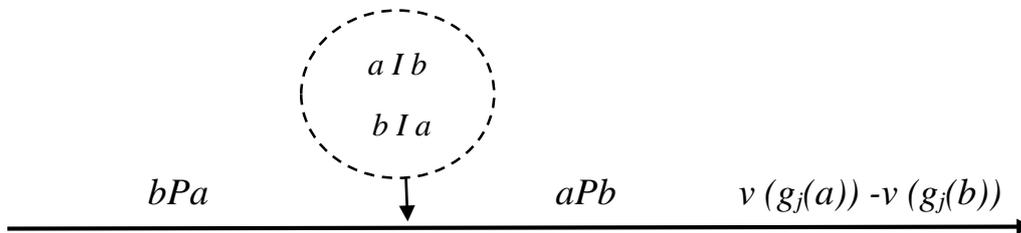


Figure I.2 : Préférence entre les actions a et b selon le vrai critère

Le quasi-critère: Nous parlons de quasi-critère lorsqu'il y a une plage d'indifférence $[-q, q]$. Il y a indifférence entre les actions a et b lorsque l'écart de leur évaluation tombe dans la Plage $[-q, q]$, tel que q et $-q$ sont le seuil d'indifférence supérieur et inférieur.

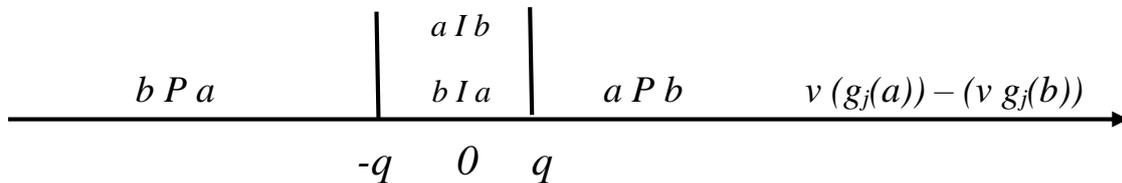


Figure I.3 : Préférence entre les actions a et b selon le quasi -critère

Le pré-critère : Un pré-critère est un vrai critère auquel on a introduit une plage de préférence faible, tel que p et $-p$ représente le seuil de préférence.

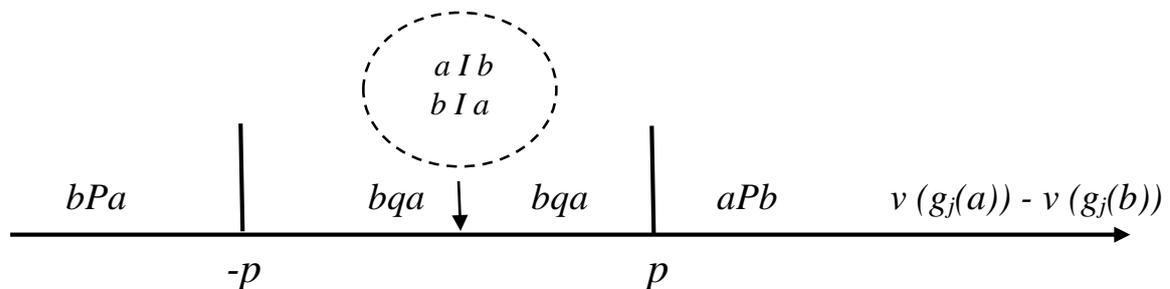


Figure I.4 : Préférence entre les actions a et b selon le pré-critère

I.2.2 Démarche de l'aide multicritère à la décision

Il existe différentes démarches pour faire face à la situation de décision multicritère. Chacune met l'accent sur certains aspects aux dépendants d'autres et, par conséquent, chacune a ses avantages et ses inconvénients.

- **L'approche du "haut vers le bas" (top down)** : cette approche consiste à construire une structure hiérarchique ayant à son premier niveau l'objectif global qui est "éclaté" en sous-objectifs jusqu'à ce que l'on atteigne un niveau mesurable que l'on qualifie d'attributs.

En plus, on associe de manière explicite chaque attribut avec un objectif fondamental, où les attributs peuvent être nommés descripteurs, les niveaux d'impacts destinés à être utilisés pour décrire les impacts plausibles des actions potentielles par rapport à chaque point de vue [6], tel que montré sur la figure I.5.

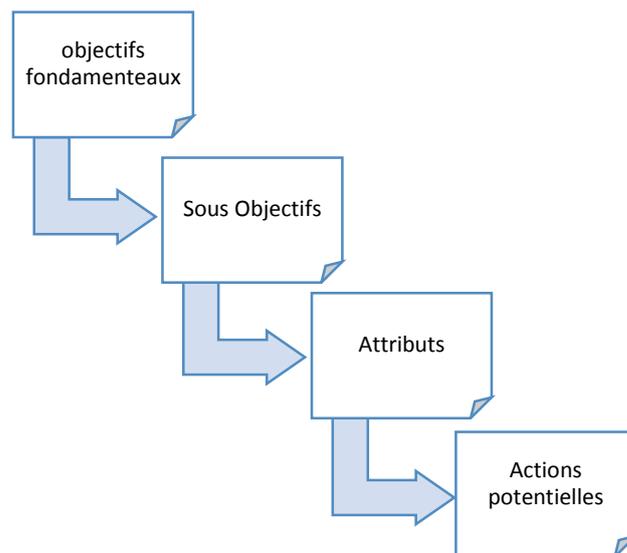


Figure I.5 : Démarche top-down d'analyse multicritère

- **L'approche du bas vers le haut (bottom-up)** : cette approche consiste à identifier toutes les conséquences pouvant résulter de la mise en œuvre des actions, que l'on structure en dimensions puis en axes de signification autour desquels sont construits les critères [12] , Tel que montré sur la figure I.6 .

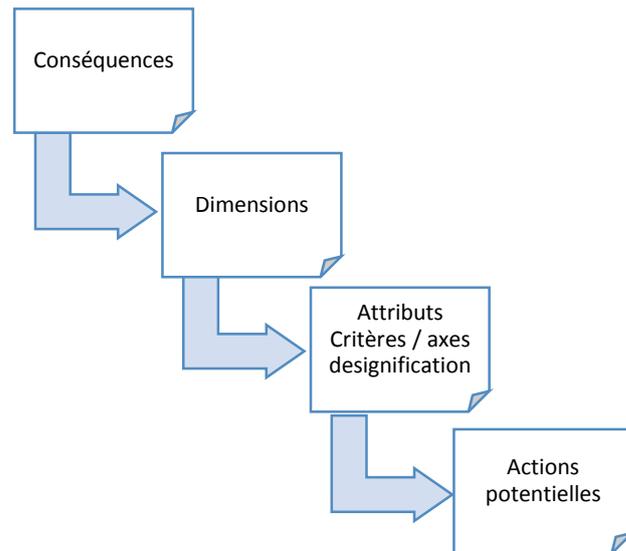


Figure I.6 : Démarche bottom-up d'analyse multicritère

- **L'approche intermédiaire:** partant d'une situation de décision quelconque (perception d'un problème de décision), il y a lieu de tenter de dégager au départ les objectifs qu'on cherche à atteindre. En tenant compte de ces objectifs, un faisceau de points de vue pourrait se dégager, exprimant en quelque sorte des classes de critères. Aussi, les objectifs permettraient de définir des actions (globales) ou des scénarios (ensemble des actions fragmentées), tandis que la famille de points de vue se traduit généralement par un ensemble de critères qui permettraient de procéder à une évaluation des actions ou des scénarios [13], ainsi donné sur la figure I.7.

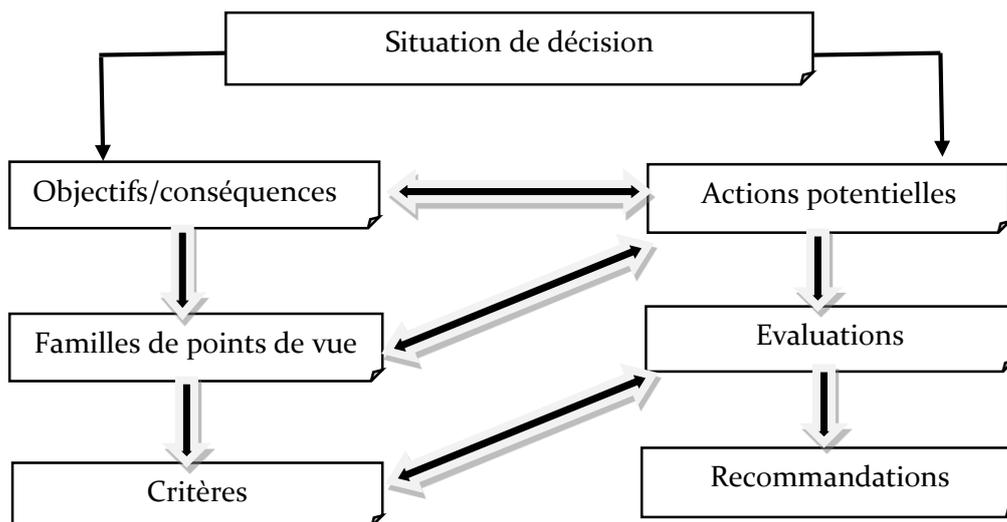


Figure I.7 : Démarche intermédiaire d'analyse multicritère

I.3 Définition de la méthode Analytic Hierarchy Process (AHP)

AHP est une des méthodes de prise de décision multicritères développée par SAATY en 1980. C'est une méthodologie systématique, flexible et simple, utilisée fréquemment par les chercheurs et les praticiens afin de comparer plusieurs variantes sur la base de critères. L'application de la méthode AHP se fait à deux niveaux : la structure hiérarchique et l'évaluation. Les décideurs peuvent rassembler les critères qualitatifs et quantitatifs dans la structure hiérarchique [14].

La méthode intègre l'opinion et l'évaluation des experts, et décompose le problème de décision à multicritères en un système des hiérarchies, en descendant dans la hiérarchie de grands aux petits éléments [15]. La structure hiérarchique de la méthode AHP reflète la tendance naturelle de l'esprit de l'homme ; Cette structure hiérarchique, clarifie le problème et permet la contribution de chaque élément à la décision finale [16].

L'objectif se situe au niveau le plus haut de la hiérarchie. Les critères et les sous critères, étant les éléments qui influencent l'objectif, se trouvent dans les niveaux intermédiaires de la hiérarchie. Les variantes ou scénario sont le niveau le plus bas de la hiérarchie [17]. Cette méthode part des matrices de comparaison binaires pour arriver après quelques étapes à évaluer un vecteur de poids. La méthode AHP s'applique en procédant comme suit :

➤ **Etape 1**

Cette étape consiste à décomposer le problème sous forme d'une hiérarchie son sommet est l'objectif et dans les niveaux inférieurs, les éléments contribuant à atteindre cet objectif. Le dernier niveau est celui des actions.

➤ **Etape 2**

Procéder à des comparaisons par paires des éléments de chaque niveau hiérarchique par rapport à un élément du niveau hiérarchique supérieur. Cette étape permet de construire des matrices de comparaisons. Les valeurs de ces matrices sont obtenues par la transformation des jugements en valeurs numériques selon l'échelle de Saaty (Echelle de comparaisons binaires).

➤ **Étape 3:**

Déterminer l'importance relative des éléments en calculant les vecteurs propres correspondants aux valeurs propres maximales des matrices de comparaisons.

➤ **Étape 4 :**

Vérifier la cohérence des jugements à travers l'indice de cohérence IC , et le ratio de cohérence RC . Une valeur de RC inférieure à 10% est généralement acceptable, sinon, les comparaisons par paires doivent être révisées pour réduire les incohérences.

➤ **Étape 5 :**

Établir la performance relative de chacune des actions.

I.3.1 Intérêts de la méthode Analytic Hierarchy Process (AHP)

Cette méthode permet de décomposer un problème complexe de décision en un ou plusieurs niveaux de détails où l'évaluation est fournie par des comparaisons par paires. AHP permet de prendre en compte des critères qualitatifs et quantitatifs. Dans le but de fournir une approche structurante, des vecteurs de priorités sont établis. AHP a l'avantage de détecter toute incohérence dans les jugements d'un décideur, à chaque étape de calcul.

Nous avons positionné la méthode AHP pour proposer un mode d'ordonnement intégrant des critères qualitatifs et quantitatifs permettant de prendre en compte différents types de contraintes et destinées à être exploitée en temps réel.

I.4 La méthode Analytic network Process (ANP)

La méthode ANP a été introduite pour la première fois par SAATY, pour fournir une plateforme qui assiste les problèmes d'aide à la décision. Depuis son introduction, elle a été appliquée à une très grande échelle.

La méthode ANP est une forme bien connue des théories de la décision. AHP, très similaire à cette dernière, la méthode ANP est basée sur la dérivation du vecteur scalaire de mesure pour être utilisé pour allouer les ressources selon les propriétés du vecteur scalaire.

Donc ces modèles de décision peuvent être construits comme des réseaux complexes d'objectifs, de décisions, de critères, d'enjeux, d'alternatives, les scénarios et d'autres facteurs environnementaux qui influent sur d'autres propriétés. La clef de la conception d'ANP, est que cette influence n'est pas nécessairement du haut vers le bas [18].

I.4.1 La structure générale d'Analytic Network Process (ANP)

La plateforme ANP est construite sur les définitions et les axiomes qui suivent :

A) La priorité ou le poids qui est un nombre absolu tout au long de l'intervalle $[0, 1]$ et c'est une mesure de dominance relative.

B) Une condition réciproque existe tel que le ratio de comparaison entre composants est possible.

C) L'homogénéité existe, ce qui est la motivation pour le vecteur dévaluation $([1,9])$, là où la limite maximum '9' est due à l'obligation de l'homogénéité pour maintenir la stabilité, du vecteur propre jusqu'à la perturbation de consistance, elle est due aussi à l'obligation que seulement un petit nombre d'éléments qui sont d'une importance proche doit être comparé (un vecteur propre avec un petit nombre de composants considéré).

D) Une condition de dépendance est considérée telle que le système peut être décomposé en parties. Et le vecteur, et le nombre d'élément comparés peuvent être étendues indéfiniment ; ceci est fait en créant des registres avec un petit nombre d'éléments homogènes dans chacun, utilisant un élément pivot dans chaque registre jusqu'au prochain (le plus petit d'un côté et le plus grand de l'autre).

La méthode ANP incorpore les dépendances de composant et feedback en utilisant une approche de super matrice. Une super matrice W est une matrice complète de système de composants (C_a, C_b, \dots, C_n) et leurs relations où le poids des systèmes W_{ij} où $C_i = \{E_{i1}, E_{i2}, \dots, E_{in}\}$ décrivant les éléments sous-composants, de composants critères i [19].

I.5 Multiple attribute utility theory (MAUT)

La méthode MAUT développée par KEENEY et RAIFA en 1976 peut être utilisée pour résoudre les problèmes de choix ou de rangement multicritère sur un ensemble "A" d'actions.

Elle construit une fonction d'utilité à partir d'un pré ordre défini par l'utilisateur sur un sous ensemble "A" d'actions de référence, la procédure, basée sur un principe de régression ordinale, consiste à résoudre un programme linéaire. L'utilisateur peut modifier d'une façon interactive les fonctions d'utilité dans les limites fournies par une analyse de sensibilité du problème de régression ordinale. Pour effectuer ces modifications, l'utilisateur est aidé par une interface graphique très conviviale. La fonction d'utilité acceptée par l'utilisateur sert alors à définir un pré ordre sur l'ensemble "A" des actions [20].

MAUT est convenable pour incorporer des préférences de risques d'incertitudes dans les problèmes de décisions multicritères d'une manière conséquente [21].

Elle s'applique dans le cas où les évaluations des actions par rapport aux attributs sont imprégnées d'incertitude (aléatoire). L'idée est assez simple, le décideur doit associer une utilité à chacune des actions considérées.

Pour ce faire, il va considérer séparément ces critères, et observer quelle utilité dégage chaque critère pour l'action considérée. En effet, l'utilité $V_A(x_1, x_2, \dots, x_n)$, associée à l'action A évaluée sur les critères $(1, 2, \dots, n)$ peut se décomposer sous la forme : $V_A(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n (x_i, (v_i(x_i)))$ étant l'utilité générée au vu du critère i , si l'action considérée à la performance x_i , à condition que les critères considérés soient indépendants.

I.6 Les méthodes de surclassement de synthèse

Cette approche consiste à prendre appui sur une règle apportant une réponse synthétique, exhaustive et définitive au problème de l'agrégation des performances. Elle prend la forme d'un ensemble de conditions conduisant à accepter ou à rejeter un surclassement au niveau global, cette approche vise à caractériser le surclassement qu'il est possible d'établir de façon suffisamment solide. Elle conduit à des acceptations de comparabilité et n'ayant pas nécessairement des propriétés remarquables de transitivité [22].

I.6.1 Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation (PROMETHEE)

Cette méthode utilise le principe de surclassement pour classer les alternatives, combinée avec la facilité d'utilisation et une diminution de la complexité. Elle effectue une comparaison par paire des solutions de rechange afin de les classer par rapport à un certain nombre de critères. Brans et al ont offert six fonctions de critères généraux pour référence savoir, d'habitude critère, le quasi critère avec préférence linéaire, critère de niveau, un critère avec une préférence linéaire et la zone d'indifférence et le critère de Gauss. Procédé utilise fonction de préférence $P_j(a, b)$ qui est une fonction de la différence entre deux alternatives d_j pour tout critère j, i .

$$d_j = f(a, j) - f(b, j) \dots\dots\dots(I.3)$$

Où : $f(a, j)$ et $f(b, j)$ sont des valeurs de deux variantes a et b pour le critère j . L'indifférence et

le seuil de préférence q' et p' sont également définis en fonction du type de critère. Deux variantes sont indifférentes pour le critère j tant que d_j fait pas dépasser le seuil d'indifférence q' , si d_j devient supérieure à p' , il existe une préférence stricte. Indice de préférence multicritères, $\pi(a,b)$ est une moyenne pondérée des fonctions de préférence $P_j(a,b)$ pour l'ensemble des critères, elle est définie comme suit : [23]

$$\pi(a,b) = \frac{\sum_{j=1}^i w_j(a,b)}{\sum_{j=1}^i w_j} \dots\dots\dots(I.4)$$

I.6.2 Les méthodes Elimination Et Choix Traduisant la Réalité (ELECTRE)

Cette méthode est capable de traiter des critères discrets à la fois quantitatifs et qualitatifs et fournit la commande complète des solutions de rechange. Le problème est d'être ainsi formulé qu'il choisit des alternatives qui sont préférées sur le plus grand des critères et qui ne doit pas provoquer un niveau inacceptable de mécontentement pour l'un des critères.

La concordance, les indices de discordance et les valeurs seuils sont utilisés dans cette technique. Sur la base de ces indices, des graphiques de relations fortes et faibles sont développés.

Ces graphiques sont utilisés dans une procédure itérative pour obtenir le classement d'alternatives. Cet indice est défini dans l'intervalle (0-1), fournit un arrêt sur le degré de crédibilité de chaque relation de sur classement et représente un test pour vérifier les performances de chaque alternative. L'indice de concordance mondiale C_{ik} représente la quantité de preuves pour soutenir la concordance entre tous les critères. Dans l'hypothèse où A_i devance A_k .

Elle est définie comme suit :

$$C_{ik} = \sum_{j=1}^m W_j C_j(A_i A_k) / \sum_{j=1}^m W_j \dots\dots\dots (6)$$

Où : W_j est le poids associé à des critères de $j^{\text{ème}}$ ordre [23].

Conclusion

L'activité d'aide à la décision est une activité faite par tous presque chaque jour. Nous prenons des décisions sans arrêt. Des plus simples, aux plus complexes, à tous les niveaux individuels. Assez souvent, dans ces processus de décision nous demandons l'avis, l'aide, le support d'ami(e)s, d'experts, de sociétés de conseil, etc.

Dans ce chapitre on a présenté la problématique d'aide à la décision et plus particulièrement l'analyse multicritère d'aide à la décision, son processus de réalisation, ainsi que les différentes méthodes de modélisation d'un problème multicritère tel qu'elles soient des méthodes d'analyses (et/ou) d'optimisation multicritère.

CHAPITRE II

DÉVELOPPEMENT DES MÉTHODES

Introduction

La décision ne dispose que pour l'avenir et La prévision étant un art difficile, il est rare qu'il soit possible de décrire avec certitude les conséquences de la mise à exécution d'une action. Dans un problème de décision dans l'incertain on suppose que les conséquences de ses actions dépendent de l'occurrence de divers événements.

Une place particulière dans la théorie des jeux est occupée par le match contre nature on dira par la suite des « états de la nature », la Nature étant supposée décider de ce qui n'est pas sous son contrôle, elle ne cherche systématiquement ni à nous avantager ni à nous désavantager. Le nœud d'un tel problème de décision réside dans le fait que l'on doit choisir une action avant d'avoir connaissance de la décision de la Nature.

Dans ce chapitre nous limitons notre travail aux critères économiques suivant : Wald, Max-max, Hurwitz, Savage et Laplace-Bayes et la méthode (AHP).

II.1 Les critères économiques à avenir incertain

Pour l'application de ces critères le décideur doit prévoir les scénarios possibles i , la stratégie j , le coût associé à chaque scénario U_{ij} et la probabilité de chaque scénario Q_j .

II.1.1 Critère de Wald

C'est un critère du pessimisme absolu qui correspond à une attitude prudente d'un décideur. Il cherchera à identifier pour chaque stratégie possible, un scénario qui mènerait à de moins bons résultats.

Ensuite, il va essayer de se couvrir en adoptant une stratégie qui est susceptible de fournir le mauvais résultat le moins possible, si l'évolution de la concurrence (scénarios) est préjudiciable à la société:

$$Z_{Mm} = \text{Max}_i \text{Min}_j U_{ij} \dots\dots\dots (II.1)$$

❖ Critique

- ✓ ce critère conduit à une mauvaise utilisation de l'information : le lourd travail de Modélisation qu'implique le fait de bâtir une matrice de décision n'est que très Imparfaitement exploité.
- ✓ il n'y a aucune compensation possible entre les conséquences sur les divers états de la nature. Une très petite différence sur la conséquence la pire suffira à emporter le choix, même si sur tous les autres états il existe de « grandes différences » en sens inverse.
- ✓ en pratique, ce critère conduira à privilégier systématiquement le statu quo par rapport à tout projet susceptible de comporter un risque.

II.1.2 Critère du Max Max

Le critère du Max Max est l'exact opposé du critère de Wald : c'est celui de l'optimisme qui consiste à fonder son choix uniquement sur ce qui risque d'arriver de plus favorable. Ce critère est modélisé sous la forme suivante :

$$Z_{MM} = \text{Max}_i \text{Max}_j U_{ij} \dots\dots\dots(\text{II.2})$$

❖ Critique

- ✓ ce critère conduit à une mauvaise utilisation de l'information : le lourd travail de modélisation qu'implique le fait de bâtir une matrice de décision n'est que très Imparfaitement exploité.
- ✓ il n'y a aucune compensation possible entre les conséquences sur les divers états de la nature. Une très petite différence sur la conséquence la meilleure suffira à emporter le choix, même si sur tous les autres états il existe de « grandes différences » en sens inverse.

II.1.3 Critère de Hurwicz

Il consiste à tenter un compromis entre les deux critères précédents en prenant en compte un coefficient de « pessimisme ». Étant donné un nombre $\alpha \in [0 ; 1]$ appelé coefficient de pessimisme, la fonction de valorisation du critère de Hurwicz est donnée comme suit :

$$Z_H = \alpha \text{Max}_i \text{Max}_j U_{ij} + (1 - \alpha) \text{Max}_i \text{Min}_j U_{ij} \dots \dots \dots (\text{II.3})$$

❖ Critiques

- ✓ ce critère conduit à une utilisation de l'information qui n'est pas nettement meilleure que les deux critères précédents.
- ✓ ce critère contient comme cas particulier les deux critères précédents et tente de réaliser un compromis entre le « pessimisme absolu » et « l'optimisme ».
- ✓ la détermination du coefficient de pessimisme α est loin d'être évidente !

II.1.4 Critère de Savage

On détermine une fonction de regret qui mesure le manque à gagner en n'ayant pas choisi la bonne action. Si on utilise ce critère, on doit construire une nouvelle matrice pour minimiser le regret maximal.

Le regret est la différence entre la performance maximale d'un scénario donné et celle qui est obtenu du même scénario contenu dans la décision retenue. Sa fonction de valorisation est donnée comme suit :

$$Z_{mM} = \text{Min}_i \text{Max}_j U_{ij} \dots \dots \dots (\text{II.4})$$

❖ Critique

- ✓ ce critère fait dépendre le choix de l'ensemble des actions de U. En particulier l'adjonction de nouvelles actions peut modifier le choix de façon imprévisible, ainsi avec la matrice de décision.

II.1.5 Critère de Laplace

Il consiste faire usage du « principe de raison insuffisante » pour supposer que la vraisemblance des divers états de la Nature est identique puisque l'on ne dispose d'aucune information quant à leur vraisemblance relative, Ce dernier est modélisé sous la forme ci-dessous :

$$Z_L = \text{Min}_i \frac{1}{n} \sum U_{ij} \dots\dots\dots (II.5)$$

❖ Critique

- ✓ ce critère est sensible au choix, généralement arbitraire, du nombre des états de la Nature considéré. Raffiner la description de certains états (en en subdivisant certains) peut conduire à modifier son choix initial.
- ✓ on comprend mal ce qui, en pratique, il peut justifier d'appliquer le principe de raison insuffisante à de telles situations.

II.2 Analytic hierarchy process (AHP)

La méthode AHP a été développée par SAATY en 1980, l'essence du processus de décomposition est un problème complexe dans une hiérarchie, de but au sommet de la hiérarchie, de critères au deuxième niveau, de sous-critères au troisième niveau et enfin des alternatives au bas de hiérarchie [24].

Le décideur doit alors effectuer des comparaisons binaires entre chaque niveau (entre les différents éléments de la hiérarchie à l'aide d'une échelle nominale (échelle de SAATY). Ces comparaisons permettent de construire des matrices à partir des quelle on extrait des vecteurs de priorités relatives, ceci permet de calculer le poids des critères et ainsi d'établir la priorité des options ou des solutions analyser.

II.2.1 Particularités de la méthode AHP

La méthode AHP est subjective puisqu'elle fait appel au jugement des individus qui l'appliquent. Son échelle de pondération est unique, elle ne correspond pas à des unités de mesure. Par exemple, les coûts ne sont pas comparés entre eux selon une valeur monétaire mais par une comparaison qui conclue sur quelle est l'option la plus coûteuse et dans quel ordre de grandeur ? C'est-à-dire un peu plus cher, moyennement plus cher, beaucoup plus cher ou nettement plus cher. Enfin, notons que les comparaisons s'effectuent toujours deux à deux. En effet, on compare un critère à un autre ou encore une option à une autre.

II.2.2 Etapes de la méthode AHP

La méthode AHP se divise en cinq étapes principales : la construction de la hiérarchie, faire les comparaisons binaires, la dérivation des vecteurs propres, la vérification de ratio de cohérence RC et l'établissement des priorités [25], comme le montre la figure II .1.

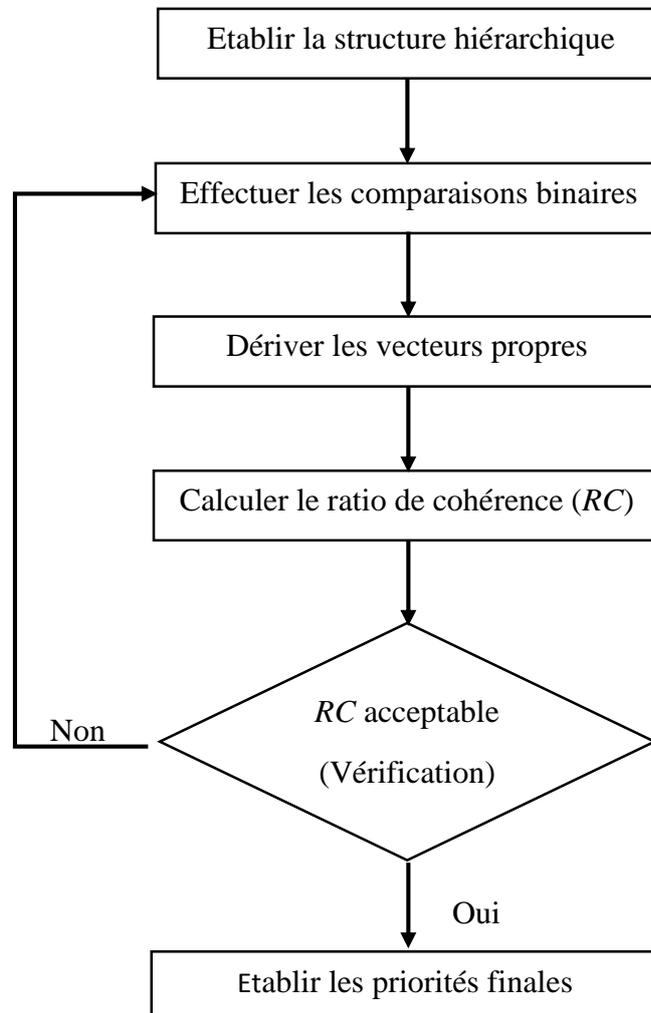


Figure II.1 : Etapes de la méthode AHP

II.2.2.1 Etablir la structure hiérarchique

Décomposer le problème en une hiérarchie d'éléments inter-reliés. Au sommet de la hiérarchie, on trouve l'objectif, et dans les niveaux inférieurs, les éléments contribuant à atteindre cet objectif (les critères à évaluer), le dernier niveau est celui des actions ou des alternatives [11].

La structure générale de la hiérarchie est représentée dans la figure II.2.

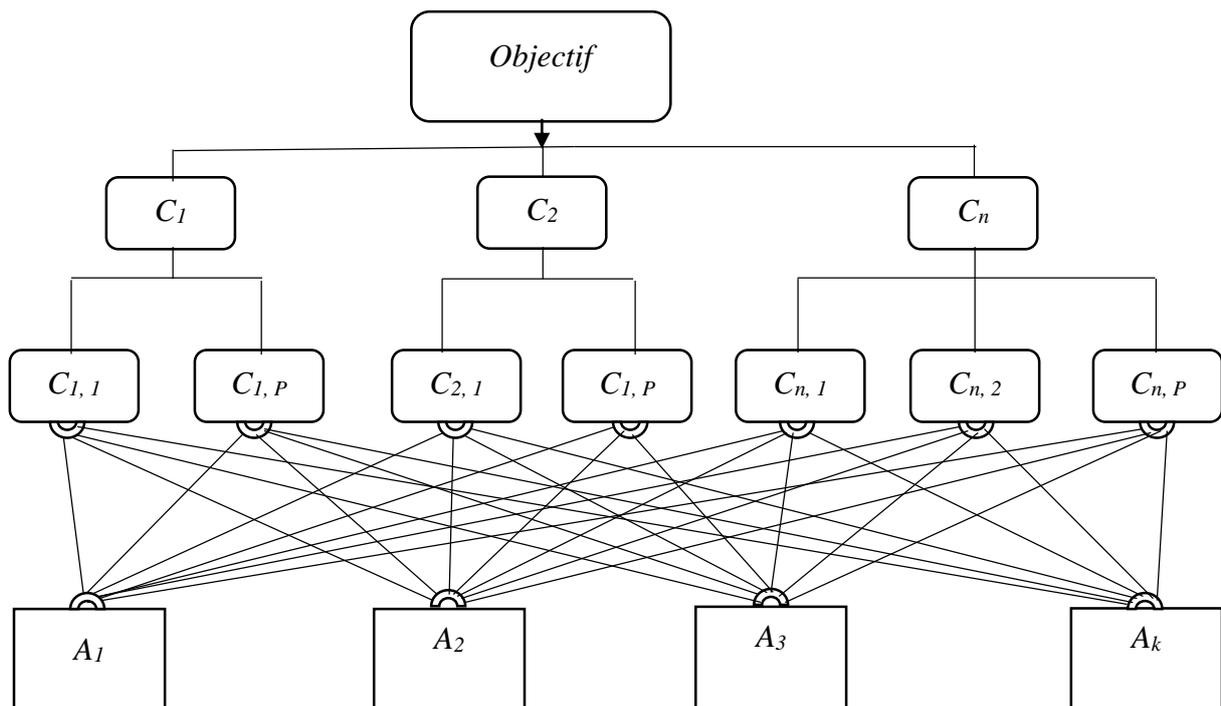


Figure II.2 : La structure hiérarchique

II.2.2.2 Effectuer les comparaisons binaires

Procéder à des comparaisons par paires des éléments de chaque niveau hiérarchique par rapport à un élément du niveau hiérarchique supérieur. Cette étape permet de construire des matrices de comparaisons. Les valeurs de ces matrices sont obtenues par la transformation des jugements en valeurs numériques selon l'échelle de Saaty (Echelle de comparaisons binaires) tout en respectant le principe de réciprocité, il avait proposé une échelle de rapport avec des unités allant de 1 (indifférence) à 9 (préférence absolue), cette échelle est donné dans le tableau II.1.

Le nombre de comparaisons qu'il faut pour faire une analyse complète se calcule par la relation suivante :

$$\text{Nombre de comparaisons} = N \times (N - 1) / 2$$

Où : N est le nombre de facteurs à comparer pour un niveau donné [26].

Degré d'importance	Définition
1	Importance égale des deux éléments
3	Faible importance d'un élément par rapport à un autre
5	Importance forte ou déterminante d'un élément par rapport à un autre
7	Importance attesté d'un élément par rapport à un autre
9	Importance absolue d'un élément par rapport à un autre
2, 4, 6, 8	Valeurs intermédiaires entre deux appréciations voisines
Réciprocité	Si l'élément i se voit attribuer l'un des chiffres précédents lorsqu'il est comparé à l'élément j , ce dernier aura donc la valeur inverse lorsqu'on le compare à i

Tableau II.1 : Échelle de Saaty de la méthode AHP

II.2.2.3 Dériver les vecteurs propres

Déterminer l'importance relative des éléments en calculant les vecteurs propres correspondants aux valeurs propres maximales des matrices de comparaisons, ces vecteurs sont normalisés, la somme d'un vecteur propre doit être égale à 1. La figure ci-dessus montre les étapes à suivre pour dériver les vecteurs propres (Voire figure II.3) [27].

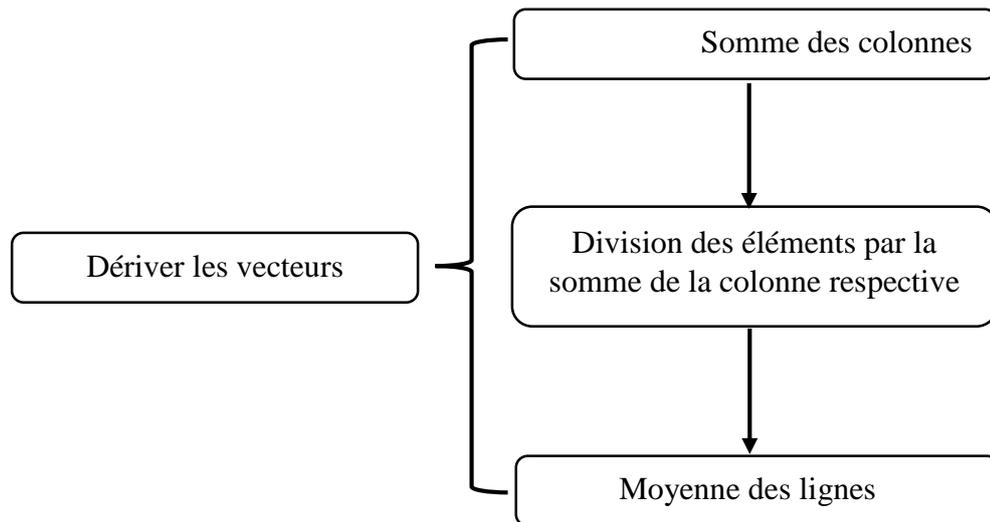


Figure II.3 : Étapes pour dériver les vecteurs propres

II.2.2.4 Calculer le ratio de cohérence

Parmi toutes les méthodes multi-critères d'aide à la décision, on ne trouve que la méthode AHP qui a le pouvoir de mesurer la cohérence des comparaisons et des choix pris par les décideurs et de procéder à une vérification pour s'assurer que les poids relatifs ou les priorités ne sont pas pris d'une manière aléatoire ou arbitraire.

C'est une procédure très importante dans le processus de décision, car même les experts qui peuvent être des décideurs parfois, ils commettent eux aussi des erreurs qui sont dues à une mauvaise appréciation, le manque de concentration, la fatigue mentale ou à la mauvaise transcription des résultats dans la matrice de décision.

Le calcul et la validation de la consistance des jugements se fait en plusieurs étapes :

- Premièrement on doit prendre la matrice originale et la multiplier par les priorités relatives finales issues de la dernière étape de l'extraction des vecteurs propres, la matrice originale est donnée sous la forme suivante :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \frac{w_1}{w_2} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_2}{w_1} & 1 & \dots & \frac{w_2}{w_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(\text{II.6})$$

La relation entre les poids w_i et les jugements a_{ij} est la suivante :

$$a_{ij} = \frac{w_j}{w_i}$$

Il conduit à la nouvelle matrice de consistance suivante :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & \dots & \frac{a_{2n}}{a_{12}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \dots & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(\text{II.7})$$

- En deuxième lieu, on calcule la somme des valeurs sur les lignes de la nouvelle matrice.
- Troisièmement, on effectue la division du total de chacune des lignes par la valeur du vecteur de priorité qui lui est associé.
- La quatrième étape consiste à calculer la valeur moyenne des résultats qu'on notera par λ_{max} , ce dernier est donné par la relation suivante :

$$\lambda_{max} = \sum_{j=1}^n a_{ij} \frac{w_j}{w_i} \dots\dots\dots(\text{II.8})$$

- En cinquième lieu, on doit calculer l'indice de cohérence (IC), ce dernier peut être calculé à partir de la formule qui suit :

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \dots\dots\dots(\text{II.9})$$

Où n est le nombre de facteurs représentés dans la hiérarchie et représentant l'ordre de la matrice.

- En sixième lieu, on détermine l'indice de cohérence aléatoire (*ICA*) à partir de l'échelle de SAATY, ce dernier est représenté dans le tableau suivant en fonction de *n* (tableau II.2) :

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ICA	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Tableau II.2 : Échelle de SAATY pour les Indices de cohérence aléatoires

- En septième lieu, on calcule le ratio de cohérence final, ce dernier est donné à partir de l'équation suivante :

$$RC = \frac{IC}{ICA} \dots\dots\dots (II.10)$$

- Finalement on procède à une vérification pour valider le résultat, on se basant sur un tableau proposé par SAATY (tableau II.3), le ratio est donné en pourcentage en fonction de la dimension de la matrice. [28]

Dimension de la matrice	3	4	5 et plus
RC acceptable	0.05	0.08	0.10

Tableau II.3 : Ratio de cohérence acceptable

Toutes ces étapes sont récapitulées dans l'organigramme de la figure II.4 [27].

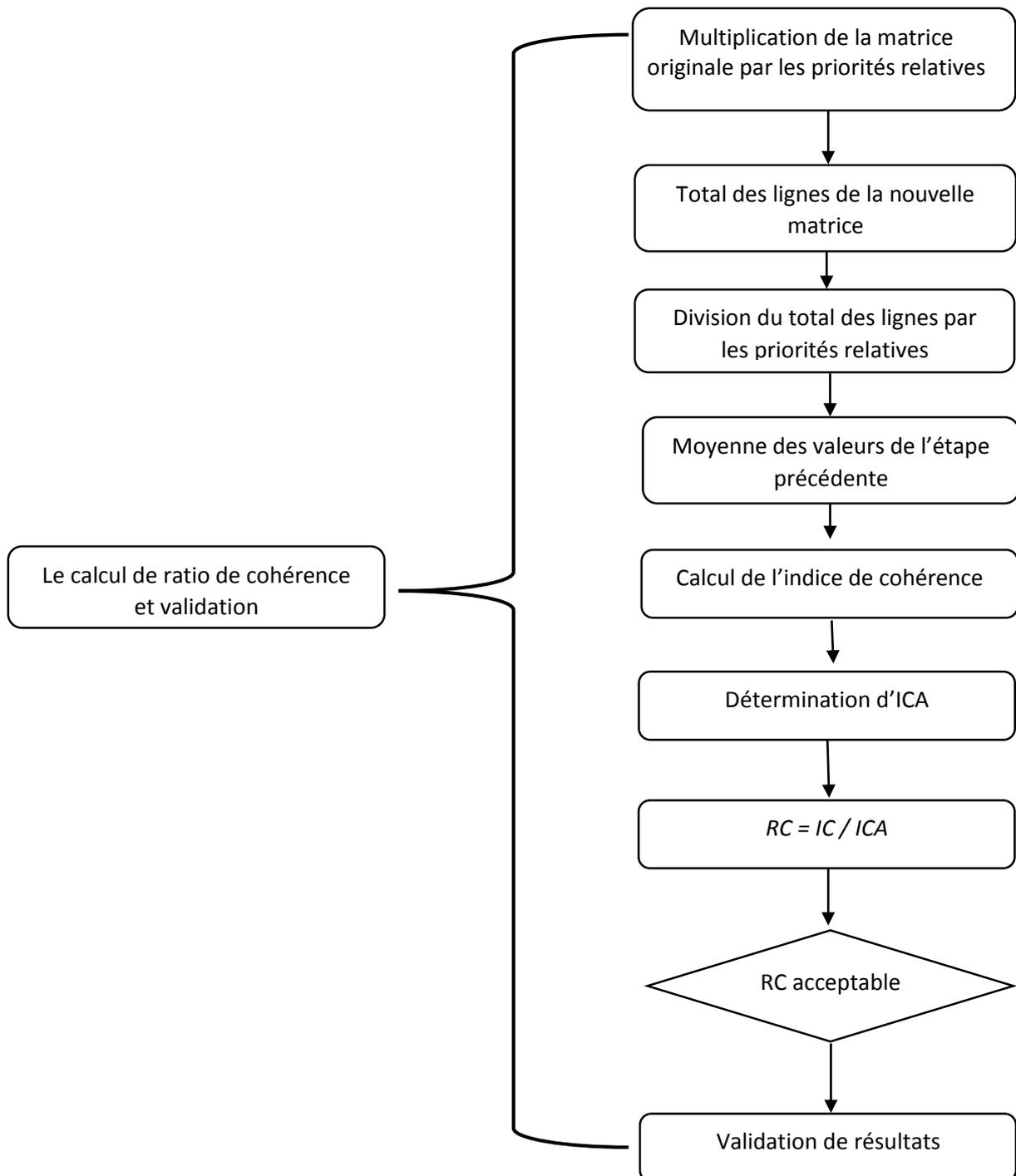


Figure II.4 : Étapes de calcul et de validation de ratio de cohérence

II.2.2.5 Etablir les priorités finales

Cette étape consiste à distribuer les poids relatifs pour chacun des niveaux de la hiérarchie pour qu'on puisse calculer les priorités d'ensemble, lorsque on a dans la hiérarchie trois niveaux ou plus, les priorités des options deviennent globales tels que ces priorités peuvent être calculées par la multiplication des priorités locales d'un groupe de facteurs par le pourcentage attribué à la catégorie parente, après avoir effectué toutes les opérations citées, on obtient alors les priorités globales de l'ensemble de la hiérarchie [18].

Le calcul de préférence relative des options s'effectue avec l'équation suivante :

$$P_k(e_i^{k-i}) = \sum_{j=1}^{n_{k-1}} P_{k-1}(e_i^{k-1}) \times P_k\left(\frac{e_i^k}{e_i^{k-1}}\right) \dots \dots \dots \text{(II.11)}$$

Avec :

$$\sum_{j=1}^{n_{k-1}} P_k(e_i^k) = 1 \dots \dots \dots \text{(II.12)}$$

Où : n_{k-1} est le nombre d'éléments du niveau hiérarchique $k-1$ et $P_k(e_i^k)$ est la priorité accordée à l'élément e_i au niveau hiérarchique k .

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons développé la méthode AHP et les critères de décisions inspirés de la théorie des jeux.

Les critères de décisions dans un avenir incertain ont été abordés pour traiter l'attitude des décideurs en ce qui concerne les bénéfices dans un investissement à long terme tout en confédérant les encouragements des états pour développer les énergies propres.

IL est judicieux de traiter la thématique d'électricité durable en combinant les deux approches c'est ce qui fera l'objet du chapitre 4, car la méthode AHP est un processus transparent qui prend en considération les avis des experts dans la prise de décision d'une part et les critères économiques à avenir incertain interprètent aisément les attitudes des preneurs de décisions et les réactions des consommateurs par rapport aux décisions prises.

CHAPITRE III

L'ÉLECTRICITÉ DURABLE

Introduction

Le secteur d'électricité est d'une importance capitale pour la croissance économique et le développement sociale. Alors que de nombreux avantages sociétaux et économiques proviennent de la production d'électricité, il peut aussi avoir des impacts qui peuvent ne pas être pleinement et unanimement conciliable avec le concept de durabilité.

Les changements structurels sont inévitables, mais les préoccupations légitimes se posent en ce qui concerne les impacts de la déréglementation sur la réalisation des objectifs ambitieux de politiques énergétiques respectueuses de l'environnement. Le déplacement du secteur de l'électricité vers le développement durable fait appel à l'intégration des aspects environnementaux, sociaux et économiques dans le processus de prise de décision.

III.1 Développement durable

Aujourd'hui, la notion de développement durable est mondialement connue et souvent illustrée par trois cercles représentant chacun une des dimensions que sont l'environnement, l'économie et la société, situés sur les axes du temps et de l'espace (figure III .1). Cette illustration résume les points suivants:

- L'économie, la société et l'environnement sont trois domaines qui peuvent sembler indépendants au premier abord (partie extérieure des cercles), mais ils sont en réalité totalement interdépendants (partie des cercles qui se recoupent). En effet, toute action entreprise dans un domaine aura forcément des conséquences sur les deux autres. On ne peut donc pas les considérer indépendamment les uns des autres.
- Les actions entreprises aujourd'hui peuvent avoir des effets à long terme qui doivent être prises en compte. C'est-à-dire qu'il faut penser à "demain" dès aujourd'hui.
- La société humaine devrait être considérée dans son ensemble (pays industrialisés et pays en voie de développement confondus). Or le mode de vie qui prévaut actuellement dans les pays industriels n'est pas transposable à l'ensemble des pays, car les ressources de la planète seraient insuffisantes. Il faut donc penser à "partout" au lieu de se concentrer uniquement sur sa propre région. [29]

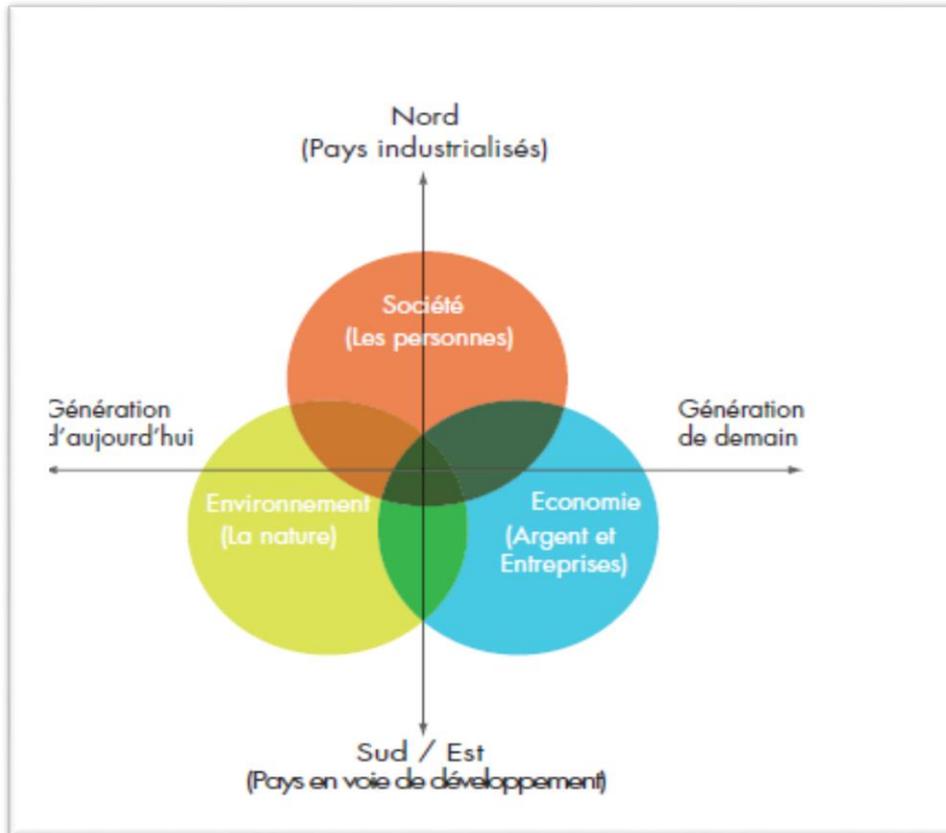


Figure III.1 : Graphique représentant le développement durable [29]

III.1.1 Indicateurs du développement durable

La durabilité de l'électricité (DE) est basé sur les trois piliers précédemment cité et de leur sous-associés (indicateurs) suivant :

III.1.1.1 Indicateurs environnementaux

- ✓ Ressources énergétiques et richesses du sous-sol.
- ✓ Changement climatique.
- ✓ Répercussions sur l'écosystème en fonctionnement normal et dans le cas d'un accident grave les déchets chimiques spéciaux et déchets à radioactivité moyenne et élevée.

III.1.1.2 Indicateurs économiques

- ✓ Répercussions pour les clients (prix de l'électricité).
- ✓ Pour l'économie dans son ensemble (emploi, autonomie de production d'électricité).
- ✓ Pour les fournisseurs d'énergie (risques financiers, exploitation).

III.1.1.3 Indicateurs sociaux

- ✓ La sécurité et fiabilité.
- ✓ La stabilité et légitimité politique.
- ✓ La perception des risques (fonctionnement normal et accidents).
- ✓ La menace terroriste et qualité de vie de l'environnement (paysages, nuisances sonores).

III.2 Ressources d'énergie

De tout temps, l'Homme a eu besoin de l'énergie pour se nourrir, se mouvoir. Celle-ci existe sous plusieurs formes. Aujourd'hui, la technologie permet d'en produire en grande quantité, en utilisant toutes les ressources possibles (fossiles, nucléaire, renouvelables).

L'énergie est un enjeu majeur, tant au niveau politique, économique, scientifique qu'environnemental [30].

Pourquoi l'énergie est-elle un enjeu majeur pour demain ?

- L'énergie est au cœur de toutes les activités humaines. Pour se nourrir, se divertir, bouger, s'éclairer, se chauffer, construire... l'homme a besoin d'énergie.
- Avec l'augmentation de la population mondiale, l'émergence de nouveaux pays industrialisés, les besoins en énergie vont continuer d'augmenter fortement.
- Cette consommation d'énergie est une des causes principales du réchauffement climatique de la planète.
- Nous devons donc faire face à un double défi : satisfaire les besoins en énergie de l'humanité tout en limitant l'impact de sa consommation sur notre environnement.

III.2.1 Energie nucléaire

Une centrale nucléaire (voir la photo en bas) produit de l'électricité en transformant de la chaleur, produite par fission nucléaire, en électricité. La chaleur dégagée par la fission nucléaire sert à réchauffer de l'eau, qui circule dans un circuit primaire, l'énergie ainsi transportée sert à produire de la vapeur qui est amenée à une turbine qui est mise en mouvement et entraîne un générateur de courant alternatif.

On peut constater qu'une grande importance est accordée à la sécurité, les échanges thermiques se font par des échangeurs thermiques dans lesquels l'eau des différents circuits n'est jamais mise en contact direct.



❖ Avantages

- L'énergie nucléaire produit peu de gaz à effet de serre.
- Insensible aux conditions climatiques.
- Indépendance énergétique envers certains pays. Cet argument est lié directement aux risques de guerres et aux ruptures d'approvisionnement.
- Quasi indépendant du prix des matières premières, le minerai d'uranium ne représente en effet qu'une faible part du coût de production du KWH électrique (2% à 3%).
- Développement d'une technologie de pointe.

❖ Inconvénients

- Déchets radioactifs (production et stockage), c'est en effet un souci de moyen ou long terme pour lequel des solutions techniques sont à l'étude.
- Risque d'un accident grave dans une centrale.
- Crainte de radiations directes.
- Sensibilité aux risques d'attentats et de malveillance.
- Coût d'investissement élevé.
- Réserves d'uranium limitées (avec les technologies actuelles).

III.2.2 Ressources fossiles

Les énergies fossiles sont issues de la matière vivante, végétale ou animale, elles comprennent le charbon, le pétrole et le gaz naturel. Leur utilisation, en tant que combustible, s'est véritablement développée au cours du 19^{ème} siècle, à une époque où les besoins en énergie ont fortement augmenté avec les débuts de la «Révolution industrielle» [31].

❖ Avantages

Les avantages du charbon

- C'est la seule forme d'énergie fossile qui est solide.
- Il est disponible dans de nombreux pays.
- Les gisements connus sont très importants.
- Il permet de produire du gaz de houille et un grand nombre de produits chimiques carbonés ou hydrogénés.

Les avantages du pétrole

- C'est une énergie disponible sur un peu tous les continents.
- Son transport par bateau est facile et peu coûteux.
- La chimie du pétrole est très riche. En effet, grâce au pétrole, on peut obtenir des gaz tels que le méthane, le propane et le butane, des carburants tels que l'essence, le kérosène, le gazole et le fioul et des composés aromatiques.
- C'est la forme d'énergie liquide la plus concentrée disponible actuellement.

Les avantages du gaz naturel

- C'est une énergie disponible sur tous les continents.
- La forme gazeuse du gaz nécessite une extraction qui consomme peu d'énergie.
- Le traitement du gaz est pratiquement nul, on peut presque le consommer sous sa forme primaire.
- C'est le combustible fossile le moins polluant, qui émet le moins de dioxyde de carbone.
- On peut le transporter très facilement grâce à des gazoducs, des canalisations.

❖ Inconvénients

Les inconvénients du charbon

- C'est une énergie non-renouvelable et très coûteuse à extraire.
- C'est une énergie fossile très polluante surtout à cause de ses impuretés qui se dispersent dans l'atmosphère lors de sa combustion.
- De plus, lors de sa combustion, c'est une énergie fossile qui libère beaucoup de dioxyde de carbone. Ce phénomène est à l'origine de l'accroissement de l'effet de serre.

Les inconvénients du pétrole

- La recherche d'un nouveau gisement de pétrolier est une activité de plus en plus difficile qui est très coûteuse.
- Son transport est à l'origine de nombreux polluants.
- Comme pour le charbon, sa combustion produit du dioxyde de carbone, qui libéré dans l'atmosphère, participe à l'accroissement de l'effet de serre.

Les inconvénients du gaz naturel

- Il est dangereux car il peut devenir explosif lorsque certaines conditions de concentration et de température sont remplies.
- Celui-ci est incolore et inodore. Il est donc indétectable par les sens humains.
- Le gaz, est par nature, peu dense.

III.2.3 Ressources renouvelables

Les énergies renouvelables constituent historiquement les premières sources d'énergies utilisées par les hommes. Fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau. Ces énergies, par définition, se renouvellent naturellement après avoir été consommées et sont donc inépuisables (au moins sur des très grandes échelles de temps).

Aujourd'hui, elles servent surtout à la production d'électricité mais participent également à la production de chaleur. Toutefois, un constat s'impose. Dans l'état actuel des techniques, les énergies renouvelables ne peuvent couvrir l'ensemble de nos besoins énergétiques. Surtout si la croissance des consommations persiste. Ce n'est pas parce qu'une énergie est renouvelable qu'elle est abondante [32].

III.2.3.1 L'énergie éolienne

La force éolienne (voir la photo en bas) est connue et exploitée depuis des milliers d'années au travers des moulins à vent et de la navigation, par exemple. Aujourd'hui, nous pouvons exploiter cette énergie à l'aide d'hélices spéciales qui emmagasinent le vent et de machines qui le transforment en énergie électrique. Les éoliennes sont installées sur terre et en mer dans des endroits où le vent atteint une vitesse élevée et constante.



❖ Avantages

- C'est une forme d'énergie indéfiniment durable et propre, elle ne produit ni gaz à effet de serre ni déchets toxiques ou radioactifs.
- Chaque mégawatt heure d'électricité produit aide à réduire de 0.8 à 0.9 tonne des émissions de CO₂ rejetée chaque année.
- Une éolienne est en grande partie recyclable car elle est construite en acier et on peut même retirer les fondations en béton.

❖ Inconvénients

- L'énergie produite par l'éolienne nécessite une régulation par des centrales thermiques, d'ont les inconvénients doivent être pris en compte. De plus, elle produit en moyenne 20% à 35% de sa puissance nominale.
- La dégradation de l'aspect visuel et la pollution sonore à cause de bruit de l'éolienne et certain, estime qu'elle constitue pour la migration des oiseaux un obstacle mortel.
- Elle peut aussi perturber la réception des ondes hertziennes (télévision,..) et produit des interférences avec les radars en particulier avec les radars météorologiques.

III.2.3.2 L'énergie hydraulique

L'eau est également une source renouvelable puisqu'elle se régénère grâce au cycle d'évaporation et des précipitations. Sa force est connue et exploitée depuis des milliers d'années au travers des barrages, des moulins à eau et des systèmes d'irrigation. Plusieurs technologies permettent d'exploiter l'énergie produite par la chute ou le mouvement de l'eau (voir la photo en bas). Les roues à aubes peuvent la transformer directement en énergie mécanique (moulin à eau), tandis que les turbines et les générateurs électriques la transforment en électricité.



❖ Avantages

- C'est une énergie renouvelable et considérer comme une énergie propre et inépuisable contrairement aux énergies fossiles et nucléaire.
- Les couts de maintenance sont raisonnables, les installations sont prévues pour durer longtemps.
- C'est une énergie stockable, elle peut donc être utilisée aux pics de la demande.

❖ Inconvénients

- La production est limitée par la réserve d'eau disponible.
- Les impacts environnementaux peuvent être très importants, surtout lors de la mise en place de structures de types barrages.
- Les barrages conduits au dépeuplement de rivières en espèces migratrices (anguilles, saumon,...).

III.2.3.3 L'énergie solaire

Ce terme désigne l'énergie fournie par les rayons du soleil. Le soleil est la source d'énergie la plus puissante et cette énergie est gratuite, il n'y a qu'à l'exploiter ! Les technologies sont réparties entre actives et passives. Les technologies actives transforment l'énergie solaire en une forme électrique ou thermique que nous pouvons utiliser directement. C'est le cas des cellules photovoltaïques qui transforment la lumière du soleil directement en énergie électrique (voir photo en bas à droite), des collecteurs solaires qui permettent de chauffer l'eau des maisons, du chauffage et du refroidissement solaire, des concentrateurs solaires qui utilisent des miroirs pour concentrer les rayons du soleil et générer une chaleur intense, transformant l'eau en vapeur et produisant de l'électricité grâce à certaines machines, et même des fours solaires (voir photo en bas à gauche).

Les technologies passives consistent à bien orienter les bâtiments par rapport au soleil ou à utiliser des matériaux spéciaux et des modèles architecturaux qui permettent d'exploiter l'énergie solaire [32].



Les installations solaires photovoltaïques peuvent être de deux types :

- autonomes, il faut alors prévoir un système de stockage ou un générateur d'appoint
- raccordées au réseau, il est alors possible de prendre de l'électricité sur le réseau quand la production est inférieure à la consommation et d'en injecter quand elle est supérieure à la consommation.

❖ **Avantages**

- Les technologies à mettre en œuvre pour utiliser l'énergie solaire thermique sont aisément maîtrisables et adaptables aux situations de toutes les Régions. Les techniques et les matériaux utilisés sont similaires à ceux employés dans le secteur traditionnel du chauffage, du sanitaire et des verrières. La main d'œuvre ne nécessite qu'une formation complémentaire aisément maîtrisable.
- Il s'agit d'une forme modulable de production d'énergie que l'on peut adapter en fonction de ses besoins.
- Si l'entretien des installations ne doit pas être négligé, les frais de maintenance et donc de fonctionnement sont relativement faibles.

❖ **Inconvénients**

- La production de chaleur est maximale pendant les mois d'été alors que les besoins de chaleur sont habituellement plus importants en hiver.
- La chaleur est une forme d'énergie qui est difficilement stockable pour une longue durée, et qui est difficilement transportable. Dès lors, l'installation solaire thermique doit être soigneusement dimensionnée en fonction des besoins de son application pour éviter tout "gaspillage".

- L'énergie solaire est une énergie diffuse. La puissance disponible par unité de surface est relativement limitée, ce qui rend difficile une réponse à des besoins importants (grands ensembles d'appartements, par exemple).

III.2.3.4 Pourquoi sont-elles indispensables

Pour de nombreuses raisons. Tout d'abord, si nous ne développons pas leur utilisation, les réserves en énergies fossiles s'épuiseront, puisqu'elles ne sont pas renouvelables ! Ces mêmes sources d'énergie non renouvelables sont responsables de l'effet de serre à l'origine du réchauffement climatique qui menace notre planète et les générations futures. N'oublions pas non plus que le pétrole et le gaz sont, la plupart du temps, des produits importés par l'Union européenne. En augmentant l'utilisation des sources d'énergie renouvelables, nous renforçons aussi la sécurité de l'approvisionnement en énergie de l'UE ! Enfin, on prévoit la création de centaines de milliers de postes dans le secteur des énergies renouvelables dans les années à venir, ce qui devrait faire baisser le chômage, notamment chez les jeunes.

III.3 Comparaison des énergies

Les réserves naturelles de combustibles non renouvelables sont limitées. Au niveau actuel de la consommation et sans laisser de fortes augmentations des coûts d'extraction, les réserves de carburant connus dureront de plusieurs décennies (pétrole, gaz et nucléaires) à un couple de siècles (charbon). Il est à noter que contrairement aux systèmes fossiles les coûts totaux de production d'électricité nucléaire sont tout à fait insensibles à la composante de coût du combustible, En outre, l'utilisation de réacteurs surgénérateurs conduirait à une extension énorme des ressources nucléaires.

La production d'énergie implique la consommation de matières premières non énergétiques telles que le minerai de fer, le minerai de cuivre, la bauxite ou le calcaire. La durabilité signifie aussi une utilisation efficace de ces ressources. Le vent et l'énergie solaire sont caractérisés par une densité d'énergie faible et par conséquent les consomment des quantités relativement importantes de matériaux. Par exemple, pour produire 1 GW /h les centrales éoliennes exigent de 159 à 832 kilogrammes de minerai de cuivre, ce qui est supérieur d'un facteur de 800 à 4200 que la normale pour l'hydroélectricité, de 20 à 100 fois plus grande que pour le nucléaire, et de 10 à 50 fois plus importante que pour les chaînes fossiles. Les facteurs correspondants pour les panneaux photovoltaïques sont 1300 - 8000, 30-200 et 15-100, respectivement [33].

III.3.1 Emission des gaz à effet de serre (GES)

La figure III.2 montre une comparaison des émissions basées sur LCA (life cycle analysis) des systèmes actuels et futurs. Les émissions sont données dans les grammes d'équivalents de CO₂ par kWh.

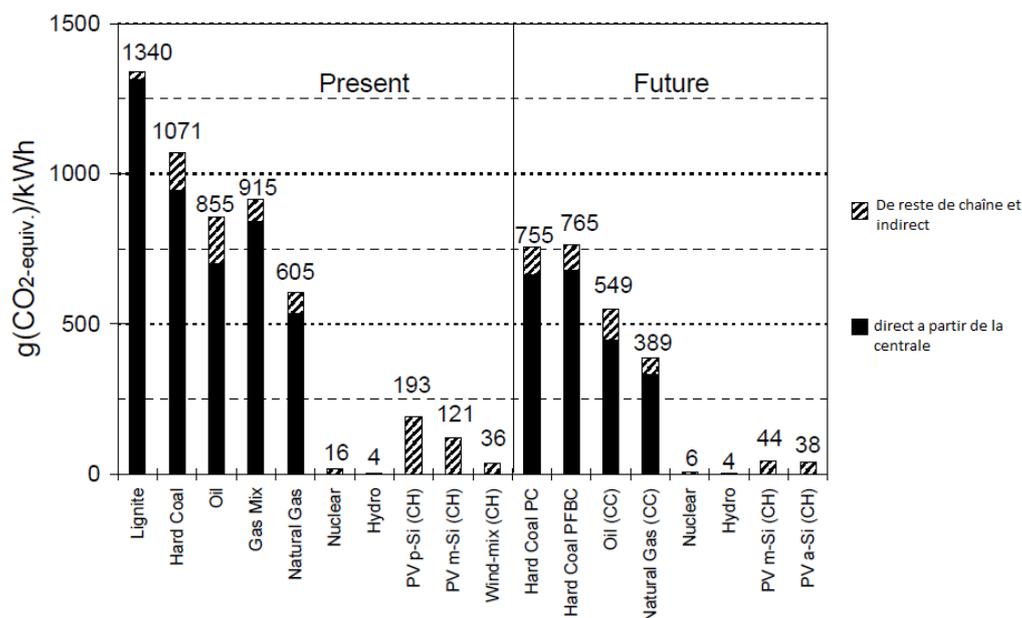


Figure III.2 : Émissions des GES basées sur LCA pour les systèmes actuels et futurs [34]

Pour les ressources fossiles, la plus grande partie de ces gaz s'émette directement à partir des centrales, le charbon présente les plus fortes émissions de GES, en deuxième place on trouve le gaz mixte qui est inférieur au charbon de 156 g/kWh. En bas de la liste des ressources fossiles on trouve le gaz naturel avec une différence de 466 g/kWh par rapport au charbon.

Pour les ressources renouvelables, la totalité de ces gaz s'émette du reste de la chaîne de production, les systèmes PV ont des émissions inférieures par rapport aux ressources fossiles, mais elles représentent la plus grande des énergies renouvelables, en deuxième place on trouve l'éolienne suivie de nucléaire et en bas de la liste on trouve l'hydraulique.

Les systèmes de production d'électricité future basés sur les chaînes fossiles, ont le potentiel de réduire ces émissions de 30 à 50 % avec les moyens actuels, cependant le charbon reste le plus grand producteur des GES et les autres restent dans le même classement.

Les émissions des principaux produits de combustion (tel que : NO_x et SO_x), suivent des schémas similaires que les GES, les émissions des radioactivité sont en terme relatif les plus élevés pour l'énergie nucléaire.

III.3.2 Impacts sur la santé

La production de l'énergie peut endommager la santé des personnes, à cause d'une grande concentration des polluants de l'air, dans le cas des sources renouvelables les dommages sont provoqués par des émissions liées à la fabrication des matériaux et des composants.

Le tableau III.1 donne les résultats d'une étude de pointe allemande récente effectuée dans l'exécution de ressortissant Externe de projet d'UE (union européen). Les impacts prévus dépendent fortement des technologies de référence (efficacité, la mesure de réduction d'émissions, ...) et des caractéristiques de l'environnement dans lequel les usines fonctionnent (distribution de population, conditions météorologiques, ...).

Chaîne d'énergie	Impacts en fonctionnement normal sur la santé publique [années vie perdues par GW par année]
Charbon	1209
Huile	3145
Gaz Natural	368
Vent	24
Nucléaire	219
Photovoltaïques	508

Tableau III .1 : Effets sur la santé dus au fonctionnement normal [35].

L'expectative de pertes humaines est la plus haute pour la production d'électricité des combustibles liquides et solides. Le vent montre les impacts les plus peu prospères suivis du nucléaire et le gaz naturel. Les impacts du réchauffement global et les grands accidents ne sont pas inclus dans les évaluations ci-dessus. Les risques liés aux accidents graves dans le secteur de l'électricité est une question beaucoup discutée.

Le tableau III.2 montre le nombre d'accidents graves impliquant des morts et le nombre prévu de morts immédiats par unité d'énergie produite. Les différences significatives existent

entre les taux agrégés et normaux de dommages évalués pour les divers transporteurs d'énergie. On devrait, cependant, maintenir dans l'esprit qui du point de vue absolu les taux de fatalité sont dans le cas des sources fossiles petites une fois comparés aux taux correspondants liés aux impacts de santé du fonctionnement normal. Sur la base mondiale les taux de fatalité immédiats les plus élevés dus aux accidents graves s'appliquent à l'énergie hydraulique suivie du pétrole, charbon, gaz naturel et le nucléaire.

Chaîne d'énergie	Nombre d'accidents grave impliquant des morts dans le monde entier 1969 – 1996	[Nombre de morts immédiats par année par GW]		
		Dans le monde entier	OECD	Non-OECD
Charbon	187	$3.4 \cdot 10^{-1}$	$1.4 \cdot 10^{-1}$	$5.1 \cdot 10^{-1}$
Huile	334	$4.2 \cdot 10^{-1}$	$3.9 \cdot 10^{-1}$	$4.6 \cdot 10^{-1}$
Gaz naturel	86	$8.5 \cdot 10^{-2}$	$6.6 \cdot 10^{-2}$	$1.1 \cdot 10^{-1}$
Nucléaire	1	$8.4 \cdot 10^{-3}$	0	$5.3 \cdot 10^{-2}$
Hydraulique	9	$8.8 \cdot 10^{-1}$	$4.0 \cdot 10^{-3}$	2.2

Tableau III.2 Indicateurs de risque d'accidents liés à l'expérience sévères pour les filières énergétiques complètes [36]

III.3.3 Déchets

Les catégories sélectionnées par expositions du tableau III.3 des déchets radioactifs et non radioactifs, c.-à-d. déchets en décharge sanitaire (matériaux inertes, particulièrement du secteur de construction et exploitation), déchets en décharge chimique (déchets inorganiques avec potentiellement la forte concentration de polluants).

Les résultats représentent la gamme des valeurs de LCA pour des pays d'UCPTE (union pour la coordination de la production et la transmission de l'électricité) sauf là où autrement remarquables, L'énergie éolienne produit les plus petits volumes de rebut, les volumes les plus élevés de déchets non radioactifs proviennent de la chaîne de charbon, pour les déchets non radioactifs dans la plupart des catégories de rebut hydrauliques, les chaînes nucléaires et de gaz montrent des déchets du bas volume et sensiblement plus haut photovoltaïque.

Comme on pouvait s'y attendre, les systèmes nucléaires produisent des quantités de loin les plus grandes de déchets radioactifs. Dans l'approche de LCA une part appropriée des déchets

radioactifs est également assignée aux systèmes non-nucléaires, résultant en grande partie des mélanges de l'électricité employés pour soutenir de diverses étapes des chaînes d'énergie.

Chaîne d'énergie	déchets dans enfouissement sanitaire (kg / GWh)	déchets (inorganique) à décharge chimique (kg / GWh)	Faible et de courte durée moyenne déchets radioactifs (m ³ / GWh)	Haut et longtemps vécu milieu déchets radioactifs un (m ³ / GWh)
Houille	178000-247000	5800-54000	$8.2 \cdot 10^{-4}$ - $1.3 \cdot 10^{-3}$	$6.7 \cdot 10^{-5}$ - $1.0 \cdot 10^{-4}$
Huile	2300-4000	3100-4000	$5.5 \cdot 10^{-4}$ - $7.1 \cdot 10^{-4}$	$4.5 \cdot 10^{-5}$ - $5.8 \cdot 10^{-5}$
Gaz naturel	34500	1500	$2.4 \cdot 10^{-4}$	$2.0 \cdot 10^{-5}$
Nucléaire	3100-8500	650-1200	$4.8 \cdot 10^{-2}$ - $9.6 \cdot 10^{-2}$	$4.5 \cdot 10^{-3}$ - $5.5 \cdot 10^{-3}$
Hydraulique	20550	30	$3.7 \cdot 10^{-5}$	$3.0 \cdot 10^{-6}$
Photovoltaïque	15400-24000	4900-10000	$3.9 \cdot 10^{-3}$ - $7.0 \cdot 10^{-3}$	$3.1 \cdot 10^{-4}$ - $5.8 \cdot 10^{-4}$
Vent	4750	650	$1.9 \cdot 10^{-4}$	$1.6 \cdot 10^{-5}$

Tableau III.3 : Les catégories de déchets sélectionnés pour chaînes énergétiques

Complets.

Le poids ou le volume de déchets est seulement un indicateur qui peut être employé pour caractériser leur importance relative. Actuellement, il n'existe pas une méthode largement admise pour comparer la toxicité des déchets à l'intérieur et entre les diverses catégories de rebut. La question des déchets radioactifs nucléaires demeure pour être due controverser à la nécessité des temps extrêmement longs d'emprisonnement, ceci mène aux questions complexes et non résolues sur l'équitable distribution entre générations des risques et des charges, ou alternativement, considération de principe d'égalités des chances, soulignant une distribution égale des ressources avec la place pour la liberté d'action pour des générations futures [37].

III.3.4 Effets sur l'emploi

Les différences entre les diverses options peuvent être significatives, mais l'influence globale au niveau de l'activité en Suisse par exemple est d'importance secondaire en comparaison de beaucoup d'autres facteurs affectant le marché de travail. La promotion des options travail-intensives telles que solaire peut créer des occasions de travaux récents dans quelques secteurs de l'économie. D'autres secteurs peuvent desserrer leur compétitivité due à des prix de l'énergie plus élevés.

Les études récentes faites en Suisse indiquent que l'effet de réseau « de l'initiative solaire » serait une légère augmentation de production nationale, exportations et importations aussi bien qu'une augmentation du nombre de lieux de travail par environ 0,25%. Les effets

régionaux sont positifs mais les augmentations d'emploi locales restent généralement en-dessous de 0,5%, les options centralisées en outre grandes, particulièrement nucléaires, mènent à la stimulation régionale de l'emploi [33].

III.3.5 Risques de reproduction

Il y a une préoccupation publique continue que l'utilisation de l'énergie nucléaire est en soi associée une autre à diffusion des armes nucléaires et à risque de terrorisme, le Traité sur la non-prolifération des armes nucléaires (TNP) commet plus de 180 pays pour s'abstenir à acquérir les armes nucléaires et pour accepter les sauvegardes complètes de l'AIEA sur toutes leurs activités nucléaires.

La production de large échelle du plutonium pour les armes nucléaires a toujours été réacteurs particulièrement conçus. Tandis que le carburant usé des centrales nucléaires commerciales contient des quantités significatives de plutonium fissile, le plutonium séparé est pollué avec les isotopes non-fissiles de plutonium. Ce matériel pose un risque de prolifération en principe.

Cependant, la forte concentration d'isotopes non-fissiles de plutonium en carburant dépensé de réacteur de puissance crée des problèmes significatifs dans sa manipulation et utilisation pour les armes nucléaires. Néanmoins, le risque de prolifération aujourd'hui n'est pas zéro et ne deviendrait pas zéro même si l'énergie nucléaire a cessé d'exister, il n'y a pas de technique imperméabilisent des difficultés pour cette question. Un régime continuellement renforcé de non-prolifération est la pierre angulaire des efforts d'empêcher la diffusion des armes nucléaires. Il convient de noter que jusqu'ici il n'y a pas eu un cas simple de prolifération comportant des utilisations des centrales nucléaires commerciales [33].

III.3.6 Coûts

Les coûts de production énergétique ont deux composants, c.-à-d. interne (des coûts de production) et externe. Les dommages à l'environnement et à la santé désigné sous le nom des coûts externes, car ils ne sont pas actuellement reflétés dans le prix du marché de l'électricité.

Dans l'exécution nationale de projet d'UE un large éventail de technologies a été analysé, y compris des combustibles fossiles, nucléaire et des énergies renouvelables. Basé sur une enquête de ces résultats, la figure III.3 montre l'effet d'ajouter les coûts estimatifs externes aux coûts de production à l'aide de divers transporteurs d'énergie, les gammes données pour les coûts de production reflètent les différences réelles entre les usines fonctionnant en Suisse et/ou les coûts directs prévus, l'usine seraient établis en Suisse aujourd'hui.

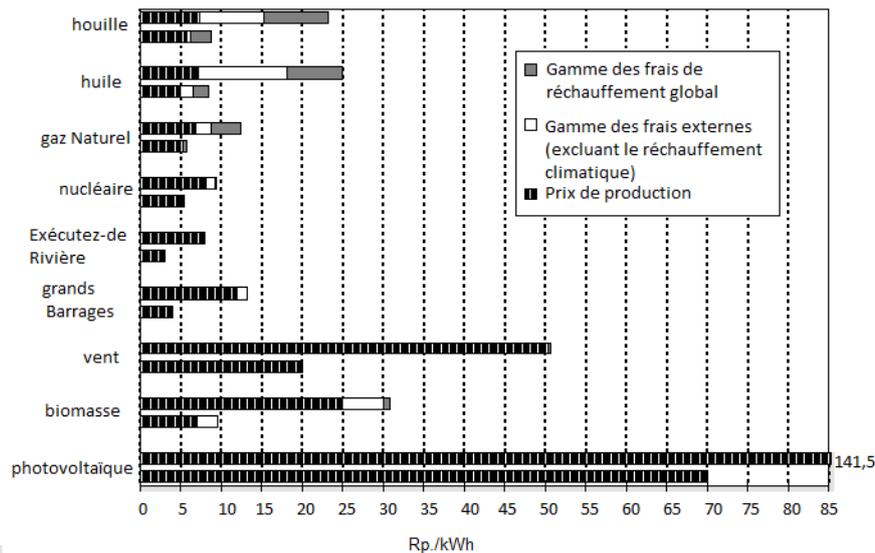


Figure III.3 : Coûts externes et interne de production d'électricité. [38]

Les chaînes de charbon et de pétrole montrent les coûts externes les plus élevés peut bien être dont de l'ordre ou au-dessus des coûts typiques de production d'électricité, en particulier quand les dommages dus au réchauffement global sont inclus. Les coûts de dommages liés au gaz naturel sont les plus bas parmi les chaînes fossiles et deviennent relativement hauts seulement quand les impacts de réchauffement global sont entièrement expliqués. La chaîne nucléaire montre des coûts de bas dommages, du même ordre que ces derniers typiques pour les sources renouvelables telles que l'énergie hydraulique, photovoltaïques et le vent. Bien que les incertitudes soient très grandes, ce rang basé sur les dommages des options d'approvisionnement est considéré en tant que tout à fait robuste.

III.3.7 Sécurité d'approvisionnement

La sécurité de l'approvisionnement est liée aux questions géopolitiques au sujet des transporteurs d'énergie non-renouvelables principaux, à la disponibilité continue des ressources et à la capacité des transporteurs d'énergie spécifiques pour satisfaire la demande dans un avenir proche. L'approvisionnement fiable et de continous de pétrole et de gaz dépend de la stabilité politique dans les régions du monde où ces ressources sont concentrées.

Des quantités d'huile relativement grandes peuvent être stockées (approvisionnement pendant peu de mois), par opposition au gaz. L'approvisionnement en charbon peut être considéré en tant que plus stable parmi des sources fossiles dues à l'immense quantité de réservations et à la grande diversité des fournisseurs.

Le stockage des volumes de combustible nucléaire relativement petits est suffisant pendant des temps très longs d'opération, également le combustible nucléaire est principalement assuré par les pays politiquement stables.

L'approvisionnement en sources d'énergie renouvelables ne dépend pas des facteurs politiques mais plutôt des conditions climatiques variables, la quantité de puissance hydraulique disponible varie d'année en année et les indices de charge pour l'énergie solaire et éolienne sont dans les conditions assez basses [33].

III.3.8 Robustesse

Tous les systèmes d'approvisionnement énergétique actuels dépendent dans une certaine mesure de la culture politique et financière de stabilité et de sécurité en fonction. Comme démontré par l'expérience historique, excepté les « nouvelles » énergies renouvelables non très utilisées, toutes les options sont également susceptibles de grands accidents.

En raison du caractère des conséquences d'accidents et de la complexité des systèmes, la robustesse globale est particulièrement essentielle pour l'énergie nucléaire et à peu de degré pour la puissance hydraulique. L'industrie nucléaire occidentale a mis en application les soi-disant la règle de 30 minutes qui permet aux opérateurs dans presque toutes les situations potentielles d'accidents de prendre du temps pour évaluer l'état de l'usine et de choisir la meilleure stratégie pour empêcher l'accident pour se produire, les nouveaux développements de conception tendent à augmenter cette fois au niveau de plusieurs heures, l'attention accrue est prêtée aux niveaux élevés de culture de sécurité.

La réduction des accidents hydrauliques dépend fortement d'efficacité des dispositifs d'alerte, l'excellent disque de sécurité des barrages hydrauliques est la haute qualité des activités d'inspection et de surveillance [33].

III.4 Critères d'évaluation de la durabilité

Les académies européenne des sciences se sont fixé les critères suivants : [39]

III.4.1 Bien-être humain

Le système électrique doit contribuer à la qualité de vie de l'individu, l'accès à l'approvisionnement en électricité est accordé à tous, l'électricité peut être utilisée pour la réalisation de biens matériels et immatériels importants, et les atteintes à la santé sont évitées.

Les risques sont répartis de manière équitable entre les générations: la génération actuelle ne devrait pas prendre de décision dont elle serait seule à bénéficier, tandis que les générations à venir en assument les risques. La participation sociale étant un élément constitutif du bien-être, un système électrique durable présuppose son acceptation sociale.

III.4.2 Sécurité de l'approvisionnement

Un approvisionnement en électricité sûr et fiable est une préoccupation centrale de la politique énergétique.

A cet effet, les vecteurs énergétiques, les installations de production et les matériaux nécessaires doivent être disponibles en quantités suffisantes ; par ailleurs, le réseau doit demeurer stable si la centrale ou la ligne la plus importante devaient tomber en panne, ou si de grandes quantités d'électricité fluctuante sont injectées.

III.4.3 Tolérance écologique

Un système énergétique durable tient compte des risques écologiques, une place de premier plan revient à la protection du climat: si le changement climatique doit être limité à un degré gérable, les émissions globales de CO₂ doivent être réduites d'ici la fin du siècle à seulement 1 tonne par an et par personne.

III.4.4 Efficience économique

L'électricité est à la fois facteur de production et bien de consommation, l'économie et les consommateurs ont un intérêt à ce que l'électricité soit peu coûteuse. Du point de vue de la durabilité, l'électricité ne devrait cependant pas simplement être proposée le moins cher possible, le prix de l'électricité devrait plutôt refléter les coûts effectifs, y compris les risques. L'efficience économique présuppose d'une part la vérité des coûts et d'une autre les conditions cadre ne créent pas de distorsions et que la régulation du marché soit aménagée de manière neutre en termes de concurrence.

III.4.5 Evitement de risques critiques mettant en danger le système

Chaque système électrique présente des risques spécifiques, il relève de la responsabilité de chaque génération de décider de manière autonome du maniement de ces risques, il ne faut pas s'exposer à des risques qui pourraient entraîner un effondrement du système social.

III.4.6 Flexibilité

Les chemins sur lesquels nous nous engageons aujourd'hui ne doivent pas exclure des chemins futurs meilleurs, comme nous ne connaissons pas encore ces chemins meilleurs, le système doit pouvoir être adapté de manière flexible aux nouveaux développements.

III.4.7 Diversité

Comme un système est par principe plus facile à modifier s'il repose sur de nombreux piliers, il faut veiller à assurer la diversité dans l'approvisionnement futur en électricité.

III.5 Développement du concept de la durabilité d'électricité

La durabilité est un outil efficace et un indice de performance pour une croissance à long terme d'une entreprise, elle doit être concrètement mesurée.

III.5.1 L'analyse BOCR (bénéfices, opportunités, couts, risques)

Les critères stratégiques sont des objectifs ou des critères que la prise de décision a besoin de vérifier, peu importe la décision qui est prise en considération.

Parfois, les bénéfices de la décision sont vraiment importants, imaginons un modèle pour un diplômé d'université a récemment marié et qu'il a acheté une voiture, il peut en être ainsi massivement important d'avoir une voiture pour se rendre au travail, pour satisfaire ses critères stratégiques d'avoir la sécurité économique et de prendre soin de la famille, que les coûts deviennent presque sans importance.

De même pour les opportunités: comment choisir la meilleure alternative sous l'impact des chances aux critères stratégiques d'une manière positive. Si nos catégories sont haute, moyenne et faible, la sélection de haut sur un critère stratégique, signifie la meilleure alternative en vertu des chances est vraiment bon, positif, pour ce critère stratégique.

Passant aux coûts et aux risques, nous considérons aussi l'alternative qui a la plus haute priorité, qui est la plus coûteuse (plus risqué). En utilisant la même haute, moyenne, faible catégories, la sélection de haut sur un critère stratégique signifie que l'alternative qui a la plus haute priorité coûte beaucoup pour cet objectif, à savoir qu'il est mauvais.

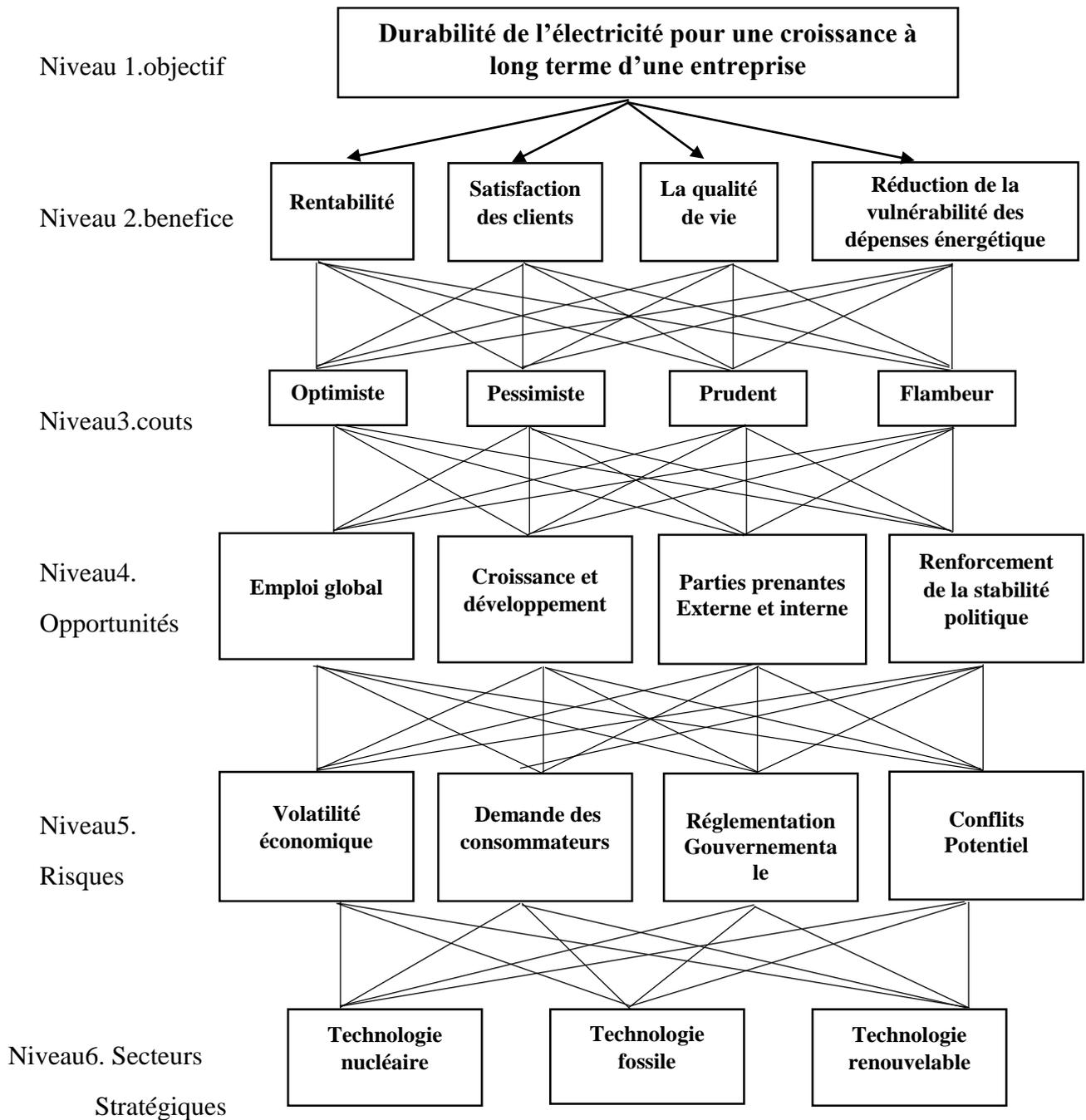
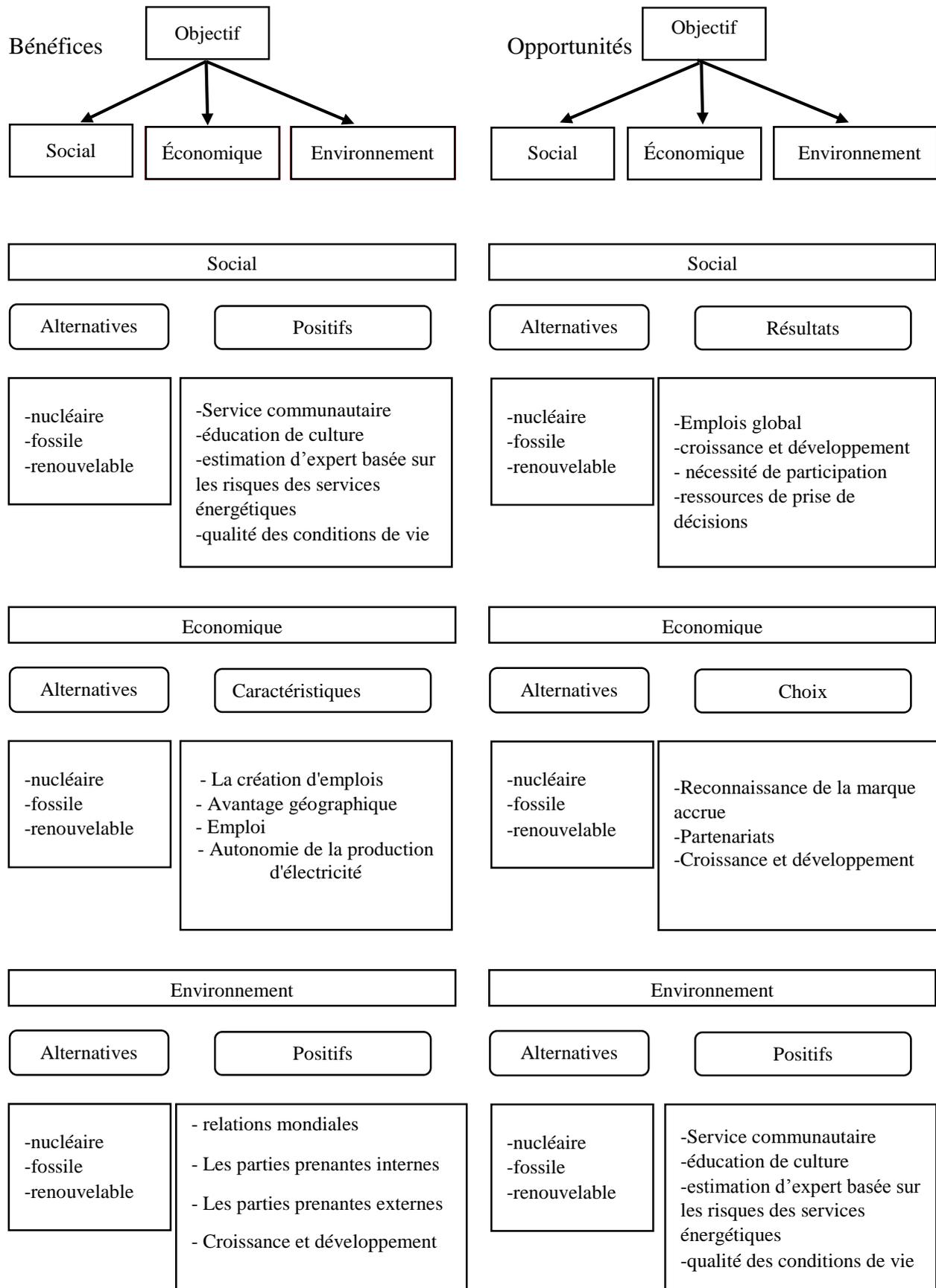


Figure III.4 : hiérarchie explicite à la détermination d'une électricité durable pour une croissance à long terme d'une entreprise [40]



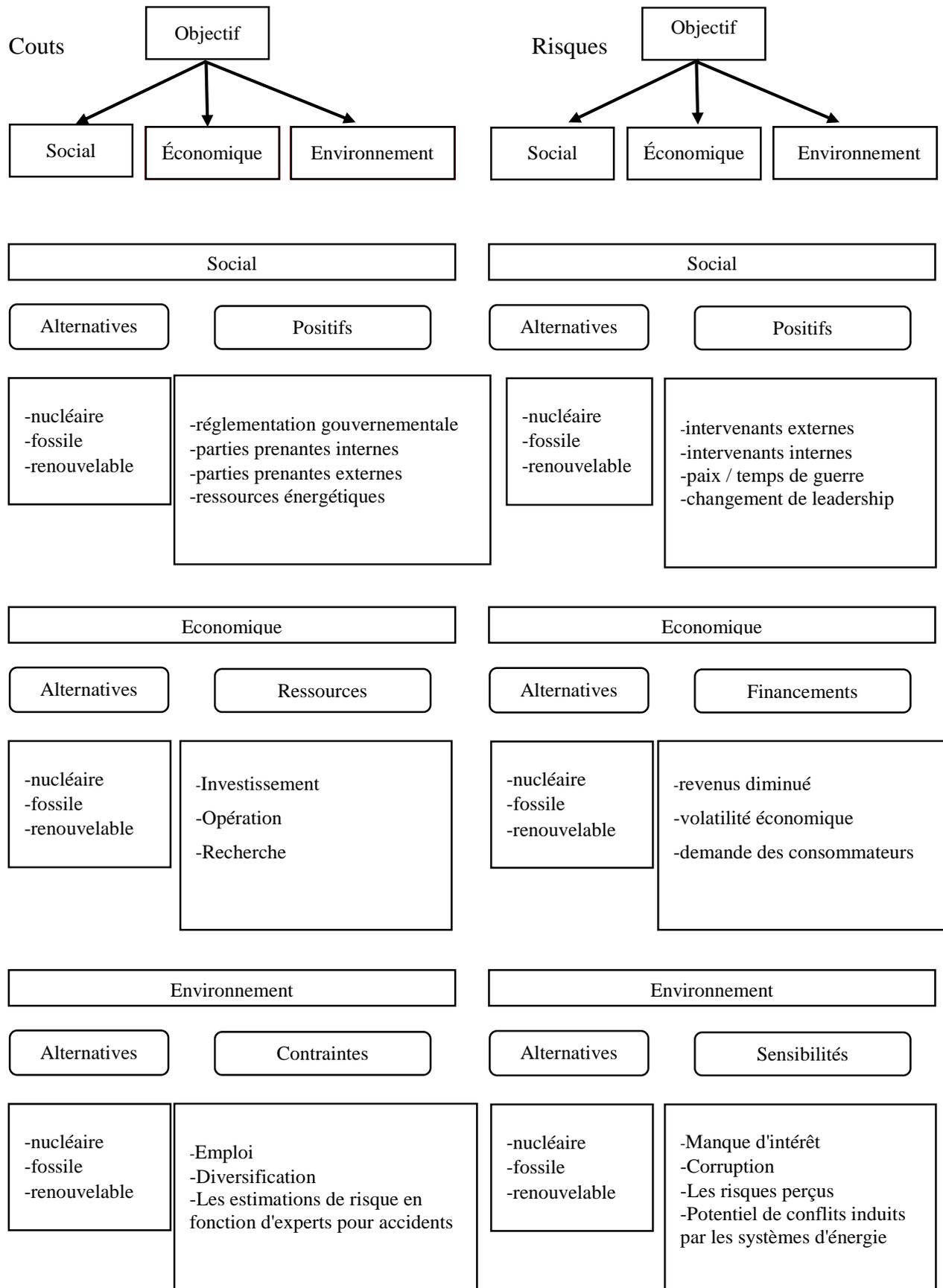


Figure III.5 : BOCR (avantages, opportunités, coûts et risques) de durabilité d'électricité [40]

Conclusion

La durabilité est aujourd'hui dans une large mesure reconnue comme objectif de la politique énergétique. Il n'est cependant pas si simple de définir ce que signifie concrètement la notion de durabilité. Le rôle de la science n'est donc pas de donner des recommandations concrètes, mais d'élaborer des évaluations de durabilité qui permettent des décisions rationnelles. Ce faisant, il faut tout particulièrement garder à l'esprit que nous prenons toujours nos décisions dans un contexte d'incertitude.

CHAPITRE IV

APPLICATION DE LA MÉTHODE AHP

Introduction

Par rapport aux travaux réalisés précédemment par d'autres chercheurs, notre réflexion s'est tournée vers le développement des critères économiques à avenir incertain dans le domaine de l'énergie, ce dernier poursuit une certaine inertie dans l'aboutissement aux résultats d'une opération de restriction ou de développement, alors les investissements se déroulent avec beaucoup d'incertitude,

Dans ce chapitre nous allons faire une application de la méthode multicritère d'aide à la décision (AHP) dans la durabilité de l'électricité pour une croissance à long terme des entreprises.

IV.1 Résultats antérieur

Pour un développement durable sans dommage sur l'environnement une étude faite au niveau de l'unité de recherche LAMOS à l'université de Bejaia, a montré que les énergies renouvelables sont plus prioritaires par rapport aux énergies fossile et nucléaire, les résultats obtenues sont montrés dans le tableau IV.1, les critères et les sous critères utilisé sont les suivant :

Critère 1 : Aspects économiques

- Microéconomie (ME)
- Economie Nationale (EN)
- Coût de production (PE)

Critère 2 : aspects sociaux

- Sécurité de l'approvisionnement (SA)
- Stabilité politique (SP)
- Risque individuel et social (RIS)
- Qualité de vie (QV)

Critère 3 : aspect environnementaux

- Ressources (RESS)
- Changement climatique (CHC)
- Dommage sur l'écosystème (DOE)
- Déchets (DECH)

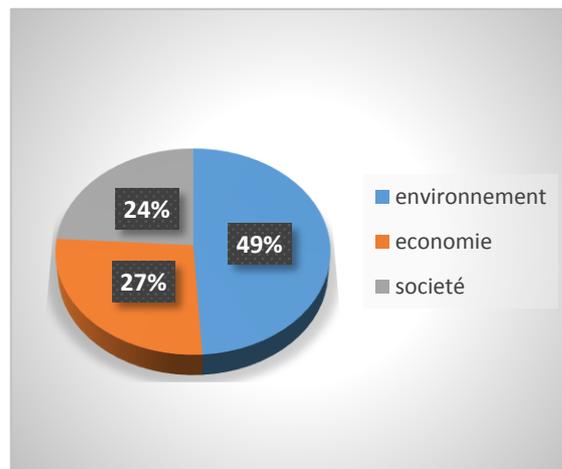


Figure IV.1. Priorité des critères dans l'étude antérieure

Critères	Environnement				Economie			Société				P I O D S
Priorités	0.49				0.27			0.24				
S-critères	RESS	CHC	DOME	DECH	PE	EN	ME	SA	SP	RIS	QV	
Priorités	0.229	0.368	0.229	0.173	0.458	0.256	0.284	0.291	0.208	0.291	0.208	
R-nucléaires	0.222	0.249	0.105	0.644	0.297	0.547	0.539	0.218	0.558	0.218	0.333	0.283
R fossiles	0.112	0.097	0.256	0.270	0.539	0.263	0.163	0.630	0.319	0.151	0.569	0.274
E-renouvelable	0.666	0.654	0.639	0.085	0.163	0.189	0.297	0.151	0.122	0.630	0.097	0.443

Tableau IV.1. Synthèse des résultats antérieurs

IV.2 Cas d'étude

Dans notre travail nous allons approfondir l'étude pour sélectionner la meilleure source d'énergie renouvelable qui pourra répondre à notre objectif, les alternatives considérées sont les suivantes :

- Photovoltaïque
- Hydraulique
- Eolienne

IV.3 Détermination des critères et sous critères

Cette étape est très importante pour l'application de la méthode AHP et c'est pour cela que généralement elle est réservée aux experts,

Donc pour notre cas on va prendre les mêmes critères et sous critères que l'unité de recherche LAMOS de Bejaia.

IV.4 Application

IV.4.1 Construction de la hiérarchie

Notre objectif est d'assurer une électricité durable et une croissance économique pour les entreprises sans causer de dommages pour l'environnement, les critères et les sous critères ainsi que les alternatives sont montrés sur la figure IV.2.

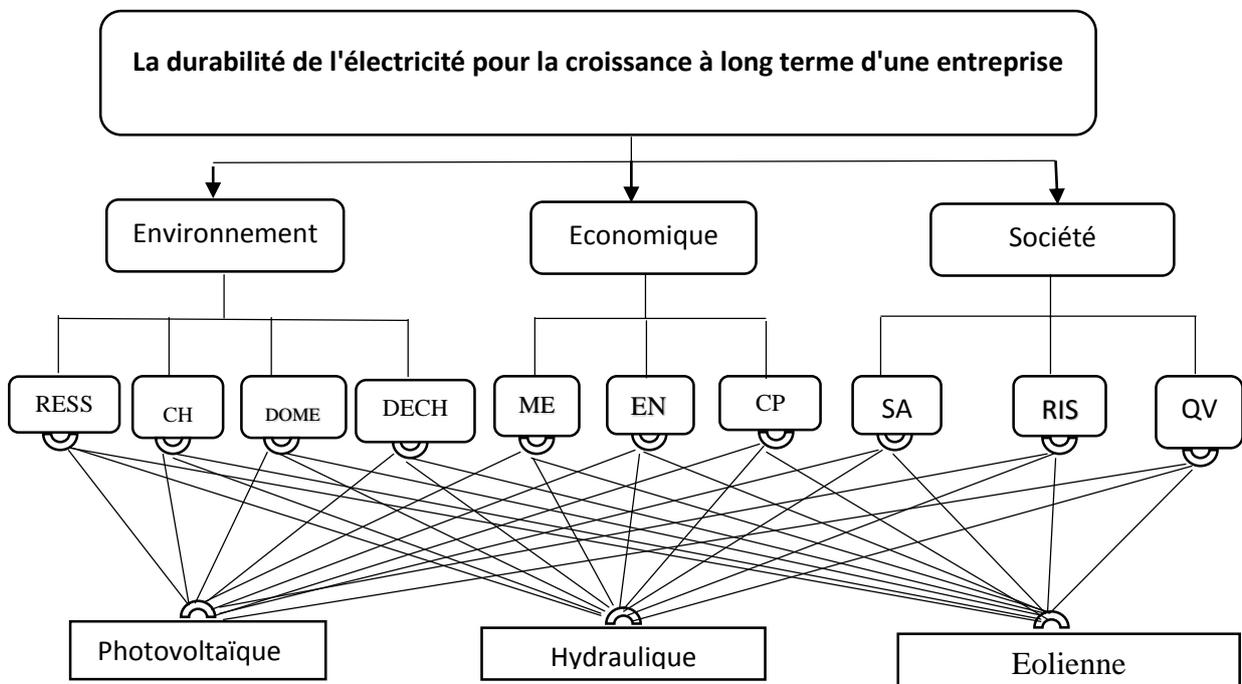


Figure IV.2. Construction de la hiérarchie

IV.4.2 Effectuer les comparaisons binaire, dériver le vecteur propre et le calcul de ratio de cohérence

Ces trois étapes sont résumées ci-dessous :

Critères :

Avec 49% pour le pilier économie et 19,32% respectivement pour le pilier environnemental et social, nous exprimons notre optimisme dans l'investissement,

contrairement aux environnementalistes, le développement durable est avant tout un développement économique, et le reste découle logiquement.

Les résultats des comparaisons binaires des critères par rapport à l'objectif sont donnés dans le tableau IV.2 et la figure IV.3.

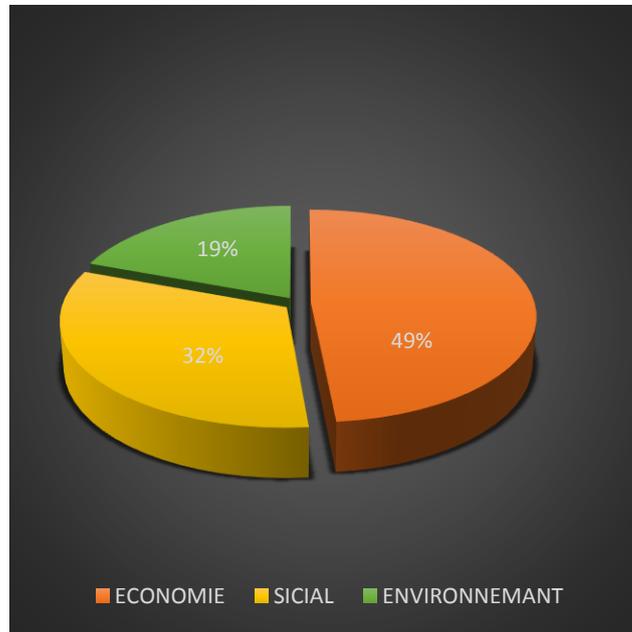


Figure IV.3. Poids des critères

Objectif	Eco	So	en	Priorités
Eco	1.00	1.66	2.50	0.4852
So	0.60	1.00	1.50	0.3213
En	0.40	0.66	1.00	0.1934
	$\lambda_{\max}= 3.000$ $CI= 5.61 \cdot 10^{-6}$ $CR=9.67 \cdot 10^{-6}$			

Tableau IV.2. Comparaison des critères

Sous critères :

Les poids associé aux sous critères sont inspirés d'un sondage (un sondage en ligne des parties prenantes dans l'approvisionnement énergétique en Europe (non représentatif de la moyenne de la population)). Les résultats des comparaisons et les priorités des sous critères par rapport aux critères sont montré dans les tableaux IV.3, IV.4, et IV.5 et la figure IV.4.

ECO	ME	EN	CP	Priorités
ME	1	1.14	0.60	0.2823
EN	0.87	1	0.53	0.2482
CP	1.64	1.87	1	0.4694
$\lambda_{\max}= 3$ CI=2.7033 10^{-6} CR=4.6608 10^{-6}				

Tableau IV.3. Comparaison des sous Critères Economique

SO	SA	RIS	QV	priorités
SA	1	1.28	1.8	0.4280
RIS	0.77	1	1.9	0.3339
QV	0.55	0.71	1	0.2381
$\lambda_{\max}= 3$ CI= 1.102 10^{-6} CR=1.90 10^{-6}				

Tableau IV.4. Comparaison des sous critères sociaux

ENV	RES	CHC	DOE	DE	Priorités
RES	1	0.61	1	1.37	0.2397
CHC	1.63	1	1.63	2.25	0.3599
DOE	1	0.61	1	1.37	0.2400
DE	0.72	0.44	0.72	1	0.1603
$\lambda_{\max}= 4.0076$ CI= 0.0026 CR= 0.0029					

Tableau IV.5. Comparaison des sous critères environnementaux

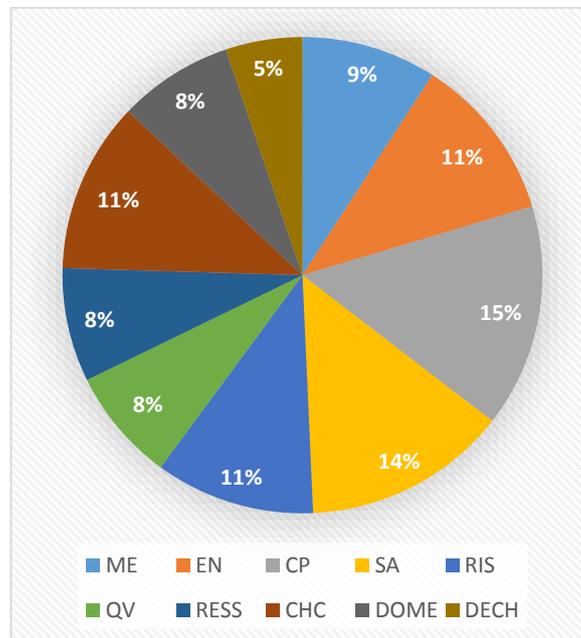


Figure IV.4. Priorités des sous critères

Alternatives :

Les poids des alternatives sont déduits à partir des comparaisons entre les énergies faites dans le chapitre 3. Les résultats des comparaisons binaires par rapport au sous critères sont indiqués dans les tableaux IV.6, IV.7, IV.8, IV.9, IV.10, IV.11, IV.12, IV.13, IV.14, IV.15.

ME	PV	HY	EO	Priorités
PV	1	0.42	0.6	0.2000
HY	2.33	1	1.4	0.4667
EO	1.66	0.71	1	0.3333
$\lambda_{\max}=3$ CI=4.44 10^{-16} CR=7.65 10^{-16}				

Tableaux IV.6

EN	PV	HY	EO	Priorités
PV	1	0.71	1.66	0.3333
HY	1.4	1	2.33	0.4667
EO	0.6	0.42	1	0.2000
$\lambda_{\max}=3$ CI=6.66 10^{-6} CR=1.14 10^{-16}				

Tableau IV.7.

CP	PV	HY	EO	Priorités
PV	1	0.42	0.6	0.2000
HY	2.33	1	1.4	0.4667
EO	1.66	0.71	1	0.3333
$\lambda_{\max}=3$ CI= 4.44 10^{-16} CR=7.65 10^{-16}				

Tableaux IV.8

SA	PV	HY	EO	Priorités
PV	1	0.55	0.71	0.2381
HY	1.8	1	1.28	0.4286
EO	1.3	0.77	1	0.3333
$\lambda_{\max}=3$ CI=2.22 10^{-16} CR=3.82 10^{-16}				

Tableau IV.9.

RIS	PV	HY	EO	Priorités
PV	1	3	1.8	0.2000
HY	0.33	1	0.6	0.4667
EO	0.55	1.66	1	0.3333
$\lambda_{\max}=3$ CI=4.44 10^{-16} CR=7.65 10^{-16}				

Tableaux IV.10

QV	PV	HY	EO	Priorités
PV	1	1.4	2.33	0.4667
HY	0.71	1	1.66	0.3333
EO	0.42	0.6	1	0.2000
$\lambda_{\max}=3$ CI=2.22 10^{-16} CR=3.82 10^{-16}				

Tableau IV.11

RESS	PV	HY	EO	Priorités
PV	1	0.71	1.66	0.3333
HY	1.4	1	1.66	0.4667
EO	0.42	0.6	1	0.2941
$\lambda_{\max}= 3$ CI=6.66 10^{-6} CR=1.14 10^{-16}				

Tableaux IV.12

CHC	PV	HY	EO	Priorités
PV	1	0.3	0.6	0.1765
HY	3	1	1.8	0.5294
EO	1.66	0.55	1	0.2901
$\lambda_{\max}= 3$ CI= 0 CR=0				

Tableau IV.13.

DECO	PV	HY	EO	Priorités
PV	1	3	1.28	0.4737
HY	0.33	1	0.42	0.1979
EO	0.77	2.33	1	0.3684
$\lambda_{\max}= 3$ CI=4.44 10^{-16} CR=7.65 10^{-16}				

Tableaux IV.14

DECH	PV	HY	EO	Priorités
PV	1	0.6	0.43	0.2000
HY	1.66	1	0.71	0.3333
EO	2.33	1.4	1	0.4667
$\lambda_{\max}=3$ CI=2.22 10^{-16} CR=3.82 10^{-16}				

Tableau IV.15.

IV.4.3 Synthèse et résultats

Après avoir terminé toutes les comparaisons binaires, nous avons obtenus les résultats représentés dans le tableau IV.16, on constate que l'énergie hydraulique a eu la plus haute priorité suivie par l'énergie photovoltaïque et en fin celle de l'éolienne.

Critères	économique			social			environnemental				Priorités
	0.4852			0.3213			0.1934				
S-critères	ME	EN	CP	SA	RIS	QV	RESS	CHC	DOME	DECH	0.2855 0.3527 0.2741
Priorités	0.2823	0.2482	0.4694	0.4280	0.3339	0.2381	0.2397	0.3599	0.2400	0.1603	
PV	0.2000	0.3333	0.2000	0.2381	0.5234	0.4667	0.3333	0.1765	0.4737	0.2000	
HY	0.4667	0.4667	0.4667	0.428	0.1765	0.3333	0.4667	0.5894	0.1579	0.3333	
EO	0.3333	0.2000	0.3333	0.3333	0.2941	0.2000	0.2000	0.2901	0.3684	0.4667	

Tableau IV.16. Résultats finaux

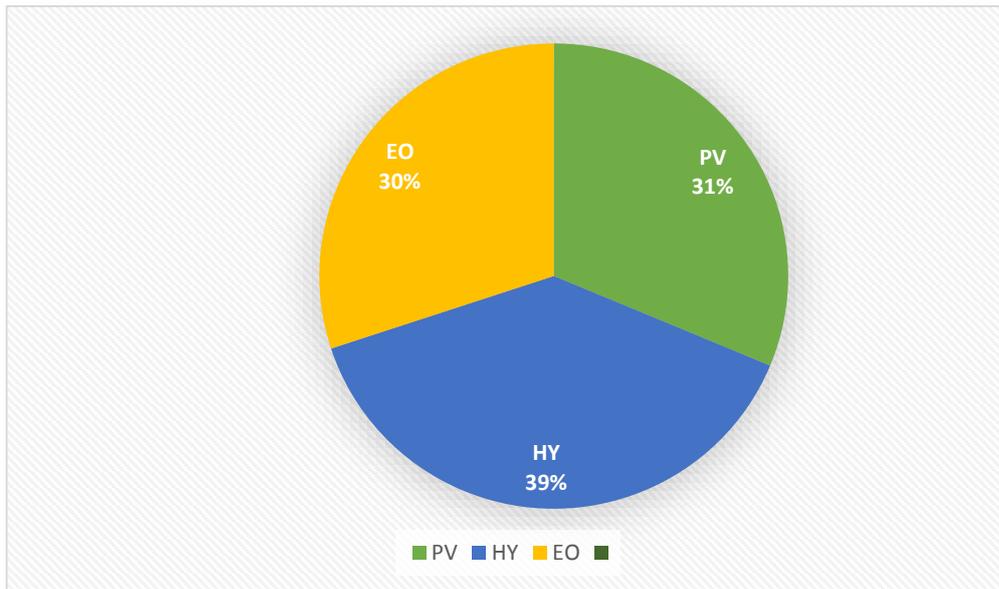


Figure 5 : priorités des alternatives

Conclusion

A travers ce chapitre on a pu montrer l'importance de la méthode multi critères d'aide à la décisions (AHP) dans la prise de toutes les décisions dans les projets d'investissement dans le domaine de l'électricité durable et le développement des entreprises en respectant les piliers de développement durable

Conclusion générale

L'électricité durable repose sur les trois aspects de développement durable mais l'énorme augmentation de la consommation d'énergie provoque des dommages colossales de côté environnemental, par suite de l'utilisation des énergies fossiles vu leur disponibilité actuelle et nucléaire à cause de leur rendement économique,

Au premier chapitre nous avons défini d'une manière globale les méthodes multi critères d'aide à la décision, car les décisions d'investissement dans le domaine de l'énergie se fait avec beaucoup d'incertitude et d'inertie dans l'aboutissement aux résultats.

Le deuxième chapitre est consacré à la définition et la modélisation des critères économiques à avenir incertain et la méthode AHP vu leur impact sur les décisions à prendre par le décideur.

Pour le troisième chapitre nous avons définies le développement durable et l'évaluation de l'impact des énergies sur ce dernier dont on a fait une comparaison des énergies par rapport aux concepts de développement durable.

A la fin de notre travail nous avons illustré l'impact de la méthode (AHP) dans la prise de décision dans le domaine de la gestion des réseaux électrique dont on a aboutie à ce que les ressources hydroélectrique sont mieux places pour répandre à notre objectif.

D'après cette étude et les études précédemment faites par les chercheurs de l'unité de recherche LAMOS de l'université de Bejaia, il est jugé utile de mettre à disposition ces méthodes auprès des décideurs pour une bonne gestion dans tous les domaines et particulièrement celui de l'énergie et de l'électricité.

Bibliographie

- [1] CHAKHAR S. : « cartographie décisionnelle multicritère : formalisation et implémentation informatique », Thèse Pour l'obtention du titre de docteur en informatique, Université Paris Dauphine D.F.R. Sciences des Organisations, (2006).
- [2] MARTEL J-J.: « Multicriteria analysis under uncertainty: The approach of outranking synthesis». Working Paper 1998-039, Faculté des Sciences de l'Administration, Université Laval, (1998).
- [3] ROY B. : « Science de la décision ou science de l'aide à la décision ». Revue Internationale de Systémique, 6(5) :497–529, (1992).
- [4] LANDRY M. : « L'aide à la décision comme support à la construction du sens dans l'organisation. », Systèmes d'Information et Management, 3(1) :5–39, (1998).
- [5] SIMON H A.: « The New Science of Management Decision », Harper and Brothers, New York, (1960).
- [6] KEENEY R L.: « Valued-focused thinking: A path to creative decision». Harvard University Press, Cambridge, USA, (1992).
- [7] POHEKAR SD. RAMACHANDRAN M.: « Multicriteria evaluation of cooking devices with special reference to utility of parabolic solar cooker (PSC) in India», Energy 31 1215–1227, (2006).
- [8] VINCKE PH. : « Une Méthode Interactive en Programmation Linéaire à Plusieurs Fonctions Economiques ». Revue Française d'Informatique et de Recherche Opérationnelle, N° 2, pp. 5-20, (1976).
- [9] MAYSTRE LY. PICTET J. SIMOS J. : « Méthodes multicritères ELECTRE », Lausanne, presse polytechniques et universitaires romandes, (1994).
- [10] MOUSSEAU V. : « Problèmes liés à l'évaluation de l'importance relative des critères en aide multicritère à la décision : réflexions théoriques, expérimentations et implémentations informatiques », Thèse de doctorat, Université Paris-Dauphine, (1993).
- [11] ROY B.: « Méthodologie multicritère d'aide à la décision », Economica, Paris, (1985).
- [12] ROY B.: « The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods, » Readings in multiple criteria decision aid. Berlin: Springer; 1990. p. 155–83.
- [13] LAARIBI A.: « SIG and analyse multicritère». Hermès Sciences Publications, Paris, (2000).

[14] SAATY T L.: « Time dependent decision-making; dynamic priorities in the AHP/ANP: Generalizing from points to functions and from real to complex variables», Mathematical and Computer Modelling 46 -860–891,(2007).

[15] AYADI D. AZZABI L. KOBİ A. ROBLEDO C. CHABCHOUB H.: « Hiérarchisation des risques des matières dangereuses : application de la méthode Macbeth» 8ème Congrès Qualité et Sécurité de Fonctionnement, QUALITA'2009.

[16] HUA Z. et GONG B. et XU X.: « A DS–AHP approach for multi attribute decision making problem with incomplete information», Expert Systems with Applications 34-2221 2227, (2008).

[17] AYADID. AZZABI L. KOBİ A. ROBLEDO C. BOUJELBENEY.: « The method analytic hierarchies process for the search and selection supplier», Ninth International Probabilistic Safety Assessment and Management Conference, PSAM, (2008).

[18] SAATY, T.L.: «The Analytic Network Process (2nd version) », 4922 Ellsworth Avenue, Pittsburgh, PA 15213, 2001.

[19] SAATY, T.L. « Theory and Applications of the Analytic Network Process», 4922 Ellsworth Avenue, Pittsburgh, PA 15213, 2005.

[20] SAATY T L.: « Decision-making with the AHP: Why is the principal Eigenvector necessary», European Journal of Operational Research 145 -85–91, (2003).

[21] LOKEN E. BOTTERUD A. HOLEN A.: « Use of the equivalent attribute technique in multi-criteria planning of local energy systems», European Journal of Operational Research, (2008).

[22] JIMÉNEZ A. MATEOS A. RÍOS-INSUA S.: « Missing consequences in multi-attribute utility theory», the international journal of management science, (2007).

[23] POHEKAR S.D. RAMACHANDRAN M.: «application des méthodes multicritères d'aide à la décision dans la planification des énergies», birla institute of technology and science (BITS) , pilani333 031 , India , 2003

[24] SAATY.: «the analytic hierarchy process». McGraw-hill, New York, NY, 287 pages, 1980

[25] LIANG W-Y. : « the analytic hierarchy process in project evaluation» , international journal , vol.10 , no 5 , p.445-456,2003.

[26] SAATY T.L. : « décider face a la complexité : une approche analytique multicritère d'aide a la décision » .Entreprise moderne d'édition , paris 231p,1984

[27] BOUGHANTAN H. HADDADI Y.: «sur la maitrise des investissements dans l'insertion des ressources renouvelables aux réseaux électriques ». Mémoire fin d'étude M2, université de Bejaia ,2014.

[28] SAATY T.L.: «How to make a decision, the analytic hierarchy process ». Interfaces, vol.24,no 6, p.19-43,1994

[29] Académies suisses des sciences « Quel avenir pour l'approvisionnement en électricité de la Suisse » 1^{ère} édition, juillet 2012 ISBN 978-3-907630-32-4

[30] Les énergies conventionnelles www.in-terre-actif.com/2010/uploads/.../energies_conventionnelles.pdf (télécharger le 12/06/2015 à 13:55)

[31] Les différentes sources d'énergie energie.wallonie.be/servlet/Repository/fiches_classeur_cpas-web.pdf (télécharger le 10/05/2015 à 13.49)

[32] LES DIFFÉRENTES SOURCES D'ÉNERGIE RENOUEVELABLE union wallonne des entreprises www.environnement-entreprise.be/.../energie/NRJ08_sources_ER_2012 (Télécharger le 10/05/2015 à 14.00)

[33] HIRCHBERG, S.et AL.: «Severe Accidents in the Energy Sector». PSI Report No. 98-16, Würenlingen and Villigen, November 1998.

[34] DONES, R. « Environmental Inventories for Future Electricity Supply Systems for Switzerland. » PSI Report No. 96-07, Würenlingen and Villigen, February 1996.

[35] KREWITT W.et AL «Health Risks of Energy Systems. » Int. Journal of Risk Analysis, 18, No.4, 1998.

[36] HIRCHBERG, S. «Severe Accidents in the Energy Sector». PSI Report No. 98-16, Würenlingen and Villigen, November 1998.

[37] FRISHKINECHT, R. et al. « Ökoinventare für Energie systeme Grundlagen für den Ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. » 3rd Edition. ETHZ/PSI, Zürich, 1996.

[38] HIRCHBERG, S., Jakob, M.: « Cost Structure of the Swiss Electricity Generation under Consideration of External Costs. SAE Seminar “Strompreise zwischen Markt und Kosten: Führt der freie Strommarkt zum Kostenwahrheit?” Bern », 11 June 1999.

[39] AEGRETER I et Al.: «quel avenir pour l’approvisionnement en électricité de la Suisse ? » académies suisses des sciences, 1^{ère} Edition, juillet 2012

[40] IBARRAKEN F et al .: « Smart energy grid development and business electricity sustainability outcome using analytic hierarchy process. » accepté pour communication a ERO 2015 conference , Glasgow 11 au 15 Juillet 2015