REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

University of M'hamed Bougara-Boumerdes

Faculté des Sciences–Département de Mathématiques

Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de **Master** en Mathématiques

Option : Recherche opérationnelle, optimisation et management stratégique

Réalisé par

HAFID Hafida

KENAOUI Bouchra Lina

Conception d'un outil d'aide a décision pour l'investissement

d'un projet Exploration et Production

Soutenu le 08/07/2023 devant le jury composé de :

Mme FASS.R	**MAA**	**Univ.M.B Boumerdes**	**Examinatrice**
Mme LARBI.N	**MAA**	**Univ.M.B Boumerdes**	**Président**
Mme BARKA.S	**MAA**	**Univ.M.B Boumerdes**	**Encadreur**
Mme DRICI.W	**MCB**	**Univ.M.B Boumerdes**	**Co-Encadreur**

Année scholaire : 2022/2023

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier ALLAH le tout puissant de nous avoir donné la force,le courage ,la santé et la patience qui nous ont été utiles tout au long de notre parcours et d'accomplir ce modeste travail.

Nos sincéres remerciements à Madame W.Drici pour l'encadrement de ce mémoire et pour la confiance qu'elle nous a accordée , sa disponibilité et ses bons conseils.

Nous tenons tout particulièrement à remercier notre encadrante Madame S.Barka qui nous a guider dans notre travail aussi pour sa disponibilité et ses conseils durant la durée de notre projet.

Nos remerciements aussi l'équipe de IAP,surtout notre encadrante Mme. Slimani Leila pour l'honneur qu'elle nous a fait en proposant ce thème et acceptant de nous encadrer, aussi pour la confiance qu'elle nous a accordée et suivi durant tout au long du stage et qui a su jusqu'au dernier moment par sa gentillesse et sa bienveillance nous aider, encourager.

a su jusqu'au dernier moment par sa gentillesse et sa bienveillance nous aider, encourager.

Un grand merci ainsi à tout les personnes en particulier Mme. Lakama Sabrina et son marie , M.Kedour, M.Louzai.

Notre sincère remerciement s'adresse à tout personnel de département "Mathématiques" spécialement notre chef de département Mr Y.Firani et nos enseignants .

Nos remerciements s'adressent aussi aux membres de Jury qui nous ont fait l'honneur de juger notre mémoire.

Enfin, nous n'oublions pas de remercier toutes les personnes ayant contribué deprés ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail qui est le fruit de mes efforts :

À celle qui m'a fait venir au monde, celle qui s'est sacrifiée pour ma voir grandir, celle à qui je ne pourrai révéler mon amour avec de simples mots, à toi maman BAYOU DRIFA .

Au guide de ma vie, celui qui a répondu de la lumière sur mon chemin, celui qui s'est donné tant de mal pour me voire en arriver là où je suis, à toi mon père RABAH .

Très grand merci pour mon marie FELLAH AHMED qui été à mon aide et me donnée le courage et la volanté pour terminer mes études .

À Mon très cher frère MOHAMED et sa fémme ASSIA et ses enfants IDRIS et ABD ELHAY

Et aussi a mes sœurs SARA ,CHAHRAZED et SIHAM , a ma belle mére FATIHA .

À mes cousins et cousines tantes et oncles.

A mes très chers amis spécialement Lina, Bouchra, selma, rayane ,je vous dis merci pour tous ces moments inoubliables qu'on a passés ensembles et qui seront toujours gravé dans ma mémoire .

À tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce travaille .

Enfin, Merci à tous ceux qui m'aiment .

Hafida

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à tous les gens qui m'entourent un par un :

*À ceux qui ont souffert pour mois, ces personnes qui m'ont entouré et m'entourent, parleur amour, leur sacrifice ; ces gens qui sont la source du bonheurs dans ma vie, ces gens qui sont mon refuge dans les moments difficiles, sans eux je serais jamais ce que je suis aujourd'hui "**Mon pére** Abed el Kadar Et **Ma mére** Razika" je vous aime.*

***Mes fréres :** Amine et M^{ed} Taki el dine.*

***Mes soeurs :** Zineb, Warda, Kltoume et Hadjer.*

***Mes chers amis(es) :**spécialemen mon Binome Hafida,mes chers soeurs "Manel et Abir", Lila ,Rayan, Ramzi et Ataf.je vous dis merci pour tous ces moments inoubliables qu'on a passés ensembles et qui seront toujours gravé dans ma mémoire.*

A tous les personnes à qui je réserve une place dans mon coeur, et qui ont su étre patienttes, je leurs dédie ce modeste travail.

Enfin, Merci à tous ceux qui m'aiment .

Lina

ملخص

يلعب قطاع المحروقات في الجزائر دورًا حاسمًا في الاقتصاد الوطني كونه المحرك الرئيسي للبلاد. هذا هو السبب في إجراء استثمارات كبيرة في هذا القطاع ، .لاسيما في مشاريع الاستكشاف والإنتاج (المنبع)

تتطلب هذه الاستثمارات الضخمة دراسات وتقييمات متعمقة تستند إلى معايير دقيقة ، يقوم بها صناع القرار قبل اتخاذ القرار. دفعنا هذا الموقف إلى استكشاف عمليات صنع القرار المتعلقة بنشاط المنبع وتطوير نموذج دعم القرار. للقيام بذلك ،قمنا بفترة تدريب في الشركة الوطنية صوناطراك، و بعد اتمام هذه الفترة و الوصول الى نهاية هذه الرسالة توصلنا ان اتخاذ قرارات متعددة المعايير لاستثمار مشاريع الاستكشاف والإنتاج يركز على تصميم أداة مساعدة. حيث يقدم شرحا مفصلا عن تقييم المشاريع الاستثمارية حسب المعايير الاقتصادية والاستراتيجية والمخاطر ، باستخدام نهج احتمالي. بالإضافة إلى ذلك ، تستكشف الأطروحة بالتفصيل مفهوم دعم القرار متعدد المعايير و يقدم الطرق الأكثر استخدامًا ، مع التركيز بشكل خاص حول مشكلة ترتيب البدائل. نجحنا في تصميم نموذج معايير متعددة تسهل اتخاذ القرار وفقًا للمعايير التي تقترحها الشركة ، باستخدام أكثر الأساليب ذات الصلة في مجال الاستكشاف والإنتاج.

في الختام ، لقد وضعنا جدول ترتيب الأولويات للمشاريع الحقيقية التي درسنت باستخدام هذا النموذج. لتحسين كفاءة ودقة الخدمات عملية صنع القرار ، استخدمنا أيضًا تقنيات التعلم الآلي لمقارنة طرق دعم القرار المختلفة. باستخدام الأساليب والمعايير الاحتمالية ،الاقتصادية ،الاستراتيجية والمخاطر ، نموذجا متعدد المعايير

يسهل اختيار المشاريع الاستثمارية في مجال الاستكشاف والإنتاج. مكنت هذه التطورات الشركة الوطنية صوناطراك من اتخاذ قرارات أكثر تنوير وتعظيم لاستثماراتها في قطاع المحروقات في الجزائر ، والمساهمة في ذلك وبالتالي تعزيز الاقتصاد الوطني للبلاد.

الكلمات المفتاحية : الاستكشاف ، الإنتاج ، أداة دعم القرار متعددة المعايير ، تصنيف مشاريع استثمارية

الكلمات الرئيسية : المنبع ، دعم القرار متعدد المعايير ، تحديد أولويات المشاريع الاستثمارية قرار ، الترتيب.....

Abstract

The hydrocarbon sector in Algeria plays a crucial role in the national economy of the country, being the main driver. This is why significant investments are made in this sector, particularly in Exploration-Production projects (upstream). These massive investments require in-depth studies and assessments based on precise criteria, carried out by decision-makers before making

a decision.
This situation prompted us to explore the decision-making processes concerning the upstream activity and to develop a decision support model. To do this, we did an internship at the national company SONATRACH, where we finally completed this dissertation. This focuses on the design of a multi-criteria decision support tool for the investment of Exploration-Production projects. It provides a detailed explanation of the evaluation of investment projects according to economic, strategic and risk criteria, using a probabilistic approach.
In addition, the thesis explores in detail the concept of multi-criteria decision support and presents the most commonly used methods, focusing specifically on the problem of ranking alternatives. We have succeeded in designing a multi-criteria model that facilitates decision-making based on the criteria proposed by the company, using the most relevant methods in the field of Exploration-Production.
In conclusion, we have established a priority ranking table of the real projects that we have studied using this model. To improve the efficiency and accuracy of our decision-making process, we also used machine learning techniques to compare different decision support methods. By using probabilistic approaches and economic, strategic and risk criteria, our multi-criteria model facilitates the selection of investment projects in the field of Exploration-Production. These advances have enabled the national company SONATRACH to make more informed decisions and optimize its investments in the hydrocarbon sector in Algeria, thus contributing to strengthening the country's national economy.

Key words : Upstream, multi-criteria decision support, ranking of investment projects, decision

Résumé

Le secteur des hydrocarbures en Algérie joue un rôle crucial dans l'économie nationale du pays, étant le moteur principal. C'est pourquoi d'importants investissements sont réalisés dans ce secteur, en particulier dans les projets d'Exploration-Production (amont). Ces investissements massifs requièrent des études approfondies et des évaluations basées sur des critères précis, réalisées par les décideurs avant de prendre une décision.
Cette situation nous a incités à explorer les processus de prise de décision concernant l'activité amont et à développer un modèle d'aide à la décision. Pour ce faire, nous avons effectué un stage au sein de la société nationale SONATRACH, où nous avons finalement achevé ce mémoire.

Celui-ci se concentre sur la conception d'un outil d'aide multicritère à décision pour l'investissement des projets en Exploration-Production. Il fournit une explication détaillée de l'évaluation des projets d'investissement selon des critères économiques, stratégiques et de risque, en utilisant une approche probabiliste.
De plus, le mémoire explore en détail le concept d'aide à la décision multicritère et présente les méthodes les plus couramment utilisées, en se concentrant spécifiquement sur le problème du classement des alternatives. Nous avons réussi à concevoir un modèle multicritère qui facilite la prise de décision en fonction des critères proposés par l'entreprise, en utilisant les méthodes les plus pertinentes dans le domaine de l'Exploration-Production.
En conclusion, nous avons établi un tableau de classement prioritaire des projets réels que nous avons étudiés à l'aide de ce modèle. Pour améliorer l'efficacité et l'exactitude de notre processus de prise de décision, nous avons également utilisé des techniques de machine learning pour comparer les différentes méthodes d'aide à la décision. En utilisant des approches probabilistes et des critères économiques, stratégiques et de risque, notre modèle multicritère facilite la sélection des projets d'investissement dans le domaine de l'Exploration-Production. Ces avancées ont permis à la société nationale SONATRACH de prendre des décisions plus éclairées et d'optimiser ses investissements dans le secteur des hydrocarbures en Algérie, contribuant ainsi à renforcer l'économie nationale du pays.
Mots clés : Exploration-Production, outil d'aide à la décision multicritères, classement des projets d'investissement, décision.

Mots clés : En amont, aide à la décision multicritère, hiérarchisation des projets d'investissement, décision ...

Table des matières

Table des matières **i**

Table des figures **vi**

Liste des tableaux **viii**

Introduction générale **1**

Problématique **3**

1 Organisme d'accueil **5**

1.1 Présentation de la société SONATRACH 5

1.1.1 Organisation de la sociétée 6

1.2 L'Institut algérien du pétrole (IAP) 9

1.3 Généralité sur les hydrocarbures 9

1.3.1 Définition des hydrocarbures 9

1.3.2 Formation des hydrocarbures 10

1.3.3 Naissance et piégeage des hydrocarbures dans un bassin sédimentaire . . 11

1.4 La chaîne de valeur de l'industrie pétrolière 13

1.4.1 L'activité amont 13

1.4.2 L'activité aval 18

1.4.3 L'abandon et la remise en l'état du site 20

2 l'evaluation d'investissement dans un projet d'exploration-production **22**

2.1 Le projet 23

2.2 Projet d'investissement 23

2.2.1 L'investissement 23

2.2.2 Un projet d'investissement 23
2.3 Les Etapes de l'Exploration-Production 23
2.3.1 Étape exploration 23
2.3.2 Étape développement 24
2.3.3 Étape exploitation 24
2.4 Évaluation d'un projet EP 24
2.4.1 Investissement (Capex) 25
2.4.2 Dépenses d'exploitation (Opex) 25
2.4.3 Flux de trésorerie (CACH -FLOW) 26
2.4.4 Amortissement 26
2.4.5 Actualisation 26
2.4.6 Taux d'actualisation 26
2.4.7 Inflation 26
2.4.8 Prix des hydrocarbures 27
2.5 Les critères principale d'évaluation d 'un projet pétrolier 27
2.5.1 Critères économiques 27
2.5.2 Critères de risque 30
2.5.3 Critères stratégiques 31
2.6 L'évolution d'investissements dans un projet EP 33
2.6.1 Evolution des investissements EP dans le monde 33
2.6.2 La guerre en Ukraine et comment l'OPEC a maintenu la stabilité du marché pétrolier en 10 mois 35
2.6.3 Evolution des investissement EP en Algérie 37
2.7 Production et consommation nationale 39

3 Aide à décision multicritère 42
3.1 Problème monocritère et multicritère 43
3.2 Notions de base de l'aide multicritère à la décision 44
3.2.1 Composantes d'un problème de décision 44
3.3 Les seuils 44
3.3.1 Le seuil d'indifférence 44
3.3.2 Le seuil de préférence 45
3.3.3 Le seuil de veto 45
3.4 Critères et famille cohérente de critères 45

3.4.1 Critères . . . 45
3.4.2 La cohérence des critères . . . 45
3.4.3 Échelle d'un critère . . . 46
3.4.4 Poids des critères . . . 46
3.5 Relations binaires dans un ensemble . . . 46
3.5.1 La relation binaire . . . 46
3.5.2 Les relations d'ordre et d'équivalence . . . 46
3.6 Relation de dominance . . . 47
3.6.1 Action efficace . . . 48
3.6.2 Le point idéal . . . 48
3.6.3 La matrice des gains . . . 48
3.6.4 Le point nadir . . . 48
3.6.5 Le point anti-idéal . . . 48
3.7 Les étapes de l'Aide à la Décision MultiCritère . . . 49
3.8 Modélisation des préférences . . . 50
3.8.1 Représentation graphique d'une structure de préférence . . . 51
3.8.2 Représentation matricielle d'une structure de préférence . . . 52
3.8.3 Le tableau des performances . . . 53
3.9 Les modèles d'agrégation , Fonction d'utilité et Relation de surclassement . . . 53
3.9.1 Les modèles d'agrégation . . . 53
3.9.2 Fonction d'utilité . . . 54
3.9.3 Relation de surclassement . . . 54
3.10 Problématique d'approche multicritère d'aide à la décision . . . 54
3.10.1 Problématique de choix P_α . . . 55
3.10.2 Problématique de tri P_β . . . 55
3.10.3 Problématique de rangementP_γ . . . 56
3.10.4 Problématique de description P_δ . . . 57
3.11 Analyse . . . 57
3.11.1 analyse de sensibilité . . . 57
3.11.2 analyse de robustesse . . . 57

4 Les Methodes d'aide à decision multicritére 59

4.1 Méthodes de l'utilité multiattribut . . . 60
4.1.1 La méthode SMART : Simple Multi-Attribute Rating Technique . . . 60

4.1.2 La méthode AHP : Analytic hierarchy Process [Saaty 1980]. 62
4.1.3 La méthode TOPSIS : Technique for Order by Similarity to Ideal Solution 68
4.2 Méthodes de surclassement 70
4.2.1 La méthode Electre I : Élimination et Choix Traduisant la Réalité [Roy 1968] 70
4.2.2 La méthode Electre II 75
4.3 Les avantages et les inconvénients des différentes méthodes de résolution 83

5 Machine Learning et aide à la décision 87
5.1 Les principes de base du machine learning 88
5.1.1 Les différents types d'apprentissage 88
5.2 Les algorithmes couramment utilisés en machine learning 89
5.2.1 Les algorithmes de régression (linéaire ou logistique) 90
5.2.2 L'algorithme de l'arbre de décision 90
5.2.3 Des algorithmes de clustering 90
5.2.4 Forêts aléatoires 91
5.2.5 Machine à vecteurs de support (SVM) 91
5.3 Méthode des k plus proches voisins (KNN) 92
5.3.1 Le classificateur du plus proche voisin K (KNN) 92
5.4 Machine learning et analyses prédictives 93
5.4.1 l'analyse prédictive 93
5.4.2 l'utilisation du machine learning pour les analyses prédictives sur le dommaie d'aide a decision 93

6 Conception d'un outil d'aide a décision pour l'investissement d'un projet Exploration et Production 96
6.1 Présentation et identification du problème 96
6.2 Structure du modèle 97
6.2.1 L'ensemble des actions : 97
6.2.2 L'ensemble des critères : 97
6.2.3 Propriétés des critères 99
6.3 Pondération des critères 99
6.3.1 Outil de pondération basée sur la méthode AHP 100
6.3.2 Table de Synthèse de l'entreprise SONATRACH 102

6.3.3 Matrice de décision 102
6.4 Choix de l'application 104
6.5 Choix et justification de la méthode de résolution 106
6.6 Application des méthodes d'Aide à la Décision Multicritère 106
6.6.1 Implémentation de la résolution : 106
6.6.2 Présentation du modèle : 107
6.6.3 Résolution avec la méthode AHP 108
6.6.4 Résolution avec la méthode ELECTRE I 109
6.6.5 Résolution avec la méthode ELECTRE II 110
6.6.6 Résolution avec la méthode SMART 113
6.6.7 Résolution avec la Méthode TOPSIS 115
6.6.8 Résolution avec la méthode Hybride 117
6.7 Discussion des résultats 119
6.7.1 Discussion des résultats de la méthode AHP : 121
6.7.2 Discussion des résultats de la méthode ELECTRE I : 121
6.7.3 Discussion des résultats de la méthode ELECTRE II : 121
6.7.4 Discussion des résultats de la méthode SMART : 121
6.7.5 Discussion des résultats de la méthode TOPSIS : 122
6.7.6 Discussion des résultats de la méthode HYBRIDE 122
6.8 Comparaison des méthodes AMD a l'aide de Machine Learning 123
6.8.1 Choix de l'application 123
6.8.2 Bibliothèques Python pour l'apprentissage automatique 124
6.8.3 Résolution du problème 125

Conclusion générale **131**

Bibliographie **133**

Table des figures

1.1 Logo de l'entreprise SONATRACH[45]. 5
1.2 Schéma organisationnel et fonctionnel de la SONATRACH[1]. 7
1.3 Génération d'hydrocarbures [46]. 10
1.4 Migration de la roche mère à la roche-réservoir[46]. 11
1.5 Schéma des divers types de gisements pétroliers[46]. 11
1.6 Système pétrolier[46]. 12
1.7 Le parcours de l'industrie pétrolière. 13
1.8 Prospection géologique[47]. 15
1.9 Transport des hydrocarbures[46]. 19
1.10 Raffinage du pétrole brut[48]. 19
1.11 Révolution mondiale de l'exploitation du gaz de schiste[49]. 20

2.1 Courbe représentant la rentabilité[50]. 29
2.2 Catégorie du Prospect[50]. 31
2.3 FICHE TECHNIQUE DU PROSPECT X [50]. 32
2.4 Les critères de décision. 33
2.5 pétrole et gaz en amont de capeux[37]. 34
2.6 pétrole et gaz en amont 35
2.7 Baisse prévue de la production des pays non membres de l'OPEP en supposant l'absence de forage supplémentaire[37]. 35
2.8 Production mondiale de pétrole brut et de combustibles liquides[37]. 37
2.9 Investissements en recherche et exploration et prix du Brent[1986-2019][51]. . . . 38
2.10 Evolution du nombre de découvertes, Wildcat et taux de succès[51]. 39
2.11 Volume des ventes au marché national[52]. 40

3.1 Représentation graphique d'une structure de préférence 52
3.2 Problématique de choix 55
3.3 Problématique de tri 56
3.4 Problématique de rangement 56

4.1 Structuration du problème sous forme de hiérarchie 66
4.2 Le graphe de surclassement fort $G^{'}_{F}$ Le graphe de surclassement faible $G^{'}_{f}$ . . . 81

5.1 Exemple d'un arbre de décision pour l'accord d'un prêt 91

6.1 Structure Du Problème. 98
6.2 Les poids des critéres 101
6.3 Synthèse des résultats économiques par projet. 102
6.4 Matrice de décision des projet 104
6.5 L'interface Du Logciel 105
6.6 Structure du modèle. 107
6.7 Page d'accueil de l'interface graphique. 108
6.8 Résolution de la méthode AHP Avec Python 109
6.9 Résolution de la méthode ELECTRE 1 Avec Python 110
6.10 Classement direct de la méthode ELECTRE 2 Avec Python 111
6.11 Classement inverse de la méthode ELECTRE 2 Avec Python 112
6.12 Résolution de la méthode ELECTRE 2 Avec Python 113
6.13 Résolution de la méthode SMART Avec Python 114
6.14 Résolution de la méthode TOPSIS Avec Python 117
6.15 Résolution de la méthode HYBRIDE Avec Python 118
6.16 Logo jupyter 123
6.17 Classement des projets : mesures de séparation de chaque alternative. 126
6.18 Algorithme machine learning 127

Liste des tableaux

3.1 Modèle de préférence 51

4.1 Échelle de Saaty de la méthode AHP 64
4.2 les avantages et les inconvénients des methodes multi-attribut. 84
4.3 les avantages et les inconvénients des methodes surclassement. 85

6.1 Famille de critère 99
6.2 la matrice de comparaison 101
6.3 Critéres Qualitatif 103
6.4 Mesure de séparation idéale etn Anti-idéal eAvec Python 116
6.5 Classement des projets avec les six méthodes. 120
6.6 Analyse de l'étendue des scores des projets 122

Introduction générale

Depuis des décennies, les hydrocarbures occupent une place cruciale, tant sur le plan du développement économique des pays producteurs que dans les relations géopolitiques internationales. La crise économique mondiale actuelle affecte à la fois les investissements nécessaires pour développer l'offre pétrolière et les besoins de consommation.

En Algérie, la production d'hydrocarbures a joué un rôle essentiel dans l'économie du pays depuis son indépendance. Les ressources en pétrole et en gaz ont été exploitées pour construire un État moderne. Cependant, en raison de l'incertitude économique, en particulier sur le marché pétrolier, de nombreux projets risquent de ne pas se concrétiser. Dans ce contexte, la gestion de projets et l'analyse des risques jouent un rôle crucial pour faire face aux changements inattendus.

Les équipes de la Division Exploration de la compagnie étatique Sonatrach sont souvent chargées d'évaluer de nombreux projets et de sélectionner ceux qui répondent le mieux aux objectifs de l'entreprise. Cette étape représente certainement la partie la plus délicate du processus de décision, qui aboutit à l'acceptation ou au rejet d'une ou plusieurs propositions. Par conséquent, l'introduction d'outils de prise de décision, tels que ceux fournis par la recherche opérationnelle, devient une nécessité.

L'objectif principal de notre étude est de fournir aux décideurs un outil d'aide multicritére a la décision dans le domaine de la hiérarchisation des projets d'implantation de forage exploration de la société nationale SONATRACH , qui va leur permettre de choisir prudemment leurs stratégies d'investissement de la reduire les échecs.

Pour se faire,nous cheminons le plan de travail suivant :

Dans le premier chapitre, nous présentons d'abord la société SONATRACH,ensuite nous avons donner une généralité sur les hydrocarbures et la chaine de valeur de l'industrie pétroliére.
Le deuxième chapitre ,nous le consacrons pour la présentation de la notion d'investissement et de l'ensemble des critères d'évaluation des projets.
Le troisième chapitre portera sur les concepts théoriques de l'aide à la décision multicritère.
Le quatrième chapitre est consacré à l'exposition des différentes méthodes de résolution d'aide à la décision multicritère que nous allons utilisées.
Et pour Le cinquième chapitre nous présentons la machine learning et aide a décision pour le choix entre les méthodes de résolution .
Le sixiéme présentera la modélisation détaillée du problème et décrira l'approche détaillée de résolution avec l'analyse des résultats obtenus.
Enfin, nous terminons cette étude par une conclusion générale portant sur ce qui a été élaboré.

Problématique

L'exploration-production est une activité essentielle pour les entreprises pétrolières qui cherchent à maintenir et à renouveler leurs réserves d'hydrocarbures, assurant ainsi leur pérennité et leur développement. Cependant, cette activité est complexe et comporte divers risques tels que les risques géologiques, économiques, fiscaux, contractuels et associés. Elle nécessite d'importants investissements et un suivi rigoureux des opérations afin d'assurer la cohérence de la chaîne pétrolière.

Une fois la phase d'exploration terminée, toute découverte est évaluée et une décision d'investissement doit être prise. Cette évaluation se déroule en deux étapes complémentaires. D'un côté, les études géologiques, géophysiques et les puits déjà forés sont prises en compte pour estimer le potentiel en hydrocarbures et le volume probable à découvrir. De l'autre côté, des considérations économiques sont prises en compte pour évaluer la rentabilité du projet, en prenant en compte les investissements, les coûts d'exploitation, les prix de vente, etc.

Lors d'une réunion du comité d'implantation, les ingénieurs spécialisés tels que les géologues, les géophysiciens, les producteurs et les économistes présentent leurs travaux. La décision est prise en combinant les résultats techniques et économiques avec les objectifs stratégiques de l'entreprise. Si nécessaire, les projets peuvent être reportés pour une réévaluation technique ou économique.

Les projets d'exploitation pétrolière sont de grande envergure, tant en termes d'investissement que de contexte historique et social. Il est donc impératif de disposer d'un outil de gestion fiable permettant de prévoir et de faire les bons choix de projets. Cela implique l'établissement de critères de sélection (quantitatifs et qualitatifs) et de règles de décision. L'entreprise est confrontée au défi suivant : "Comment classer et sélectionner ces projets (hiérarchisation) afin de mettre en œuvre la meilleure stratégie ?".

L'une des problématiques majeures pour toute entreprise pétrolière est le processus de sélection des investissements dans les projets d'exploration pétrolière. Dans le cadre de cette étude, nous

abordons spécifiquement le problème posé par la compagnie Sonatrach. Ainsi, la question centrale consiste à développer un outil d'aide à la décision qui permettra aux décideurs de choisir leurs stratégies d'investissement de manière prudente et de réduire les échecs potentiels. De plus, il est essentiel de catégoriser ces projets en fonction de divers critères (quantitatifs, qualitatifs) afin de simplifier la tâche des décideurs. Pour ce faire, nous mettons à leur disposition les techniques de la recherche opérationnelle, tout en comparant ces différentes techniques afin de déterminer laquelle est la plus adaptée.

Chapitre 1

Organisme d'accueil

1.1 Présentation de la société SONATRACH

SONATRACH est une compagnie étatique algérienne et un acteur international majeur dans l'industrie des hydrocarbures.

Historique :

La société nationale de transport et de commercialisation des hydrocarbures (SONATRACH) a été créée par le décret N°63/491 du 31 décembre 1963 paru dans le journal officiel du 10 novembre 1964. Ces missions ont été élargies le 22 septembre 1966 pour s'étendre à tous les domaines de l'industrie pétrolière, la recherche et le transport des hydrocarbures [1].

FIGURE 1.1 – Logo de l'entreprise SONATRACH[45].

La nationalisation des hydrocarbures, le 24 février 1971, a poussé Sonatrach à prendre en main le destin pétrolier et gazier du pays. Sonatrach a fait l'objet d'un découpage qui a donné naissance à d'autres entreprises telles que NAFTAL, ASMIDAL, ENPE ....
Aujourd'hui, et après sa restructuration en 1981, Sonatrach garde les principales fonctions du secteur des hydrocarbures à savoir [1] :

— L'exploration, le forage et la production.
— Le transport des hydrocarbures.
— Le traitement et la liquéfaction du gaz naturel.
— La commercialisation des hydrocarbures liquides et gazeux.

1.1.1 Organisation de la sociétée

Le schéma d'organisation de la macrostructure de SONATRACH s'articule autour des structures suivantes [1] :

— La Direction générale.
— Les Structures opérationnelles.
— Les Structures fonctionnelles.

La macrostructure de la société Sonatrach est schématisée par l'organigramme suivant :

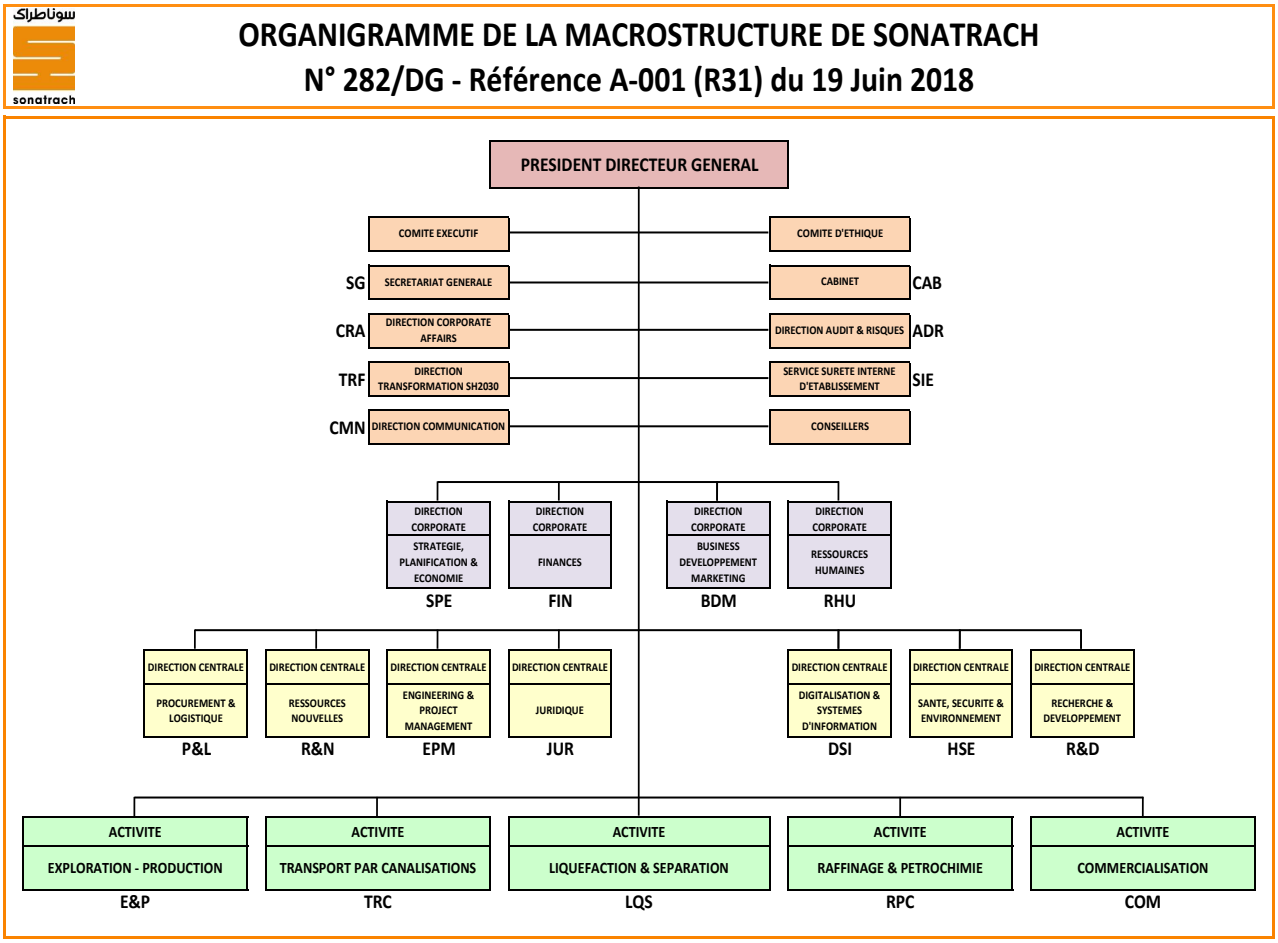


FIGURE 1.2 – Schéma organisationnel et fonctionnel de la SONATRACH[1].

a. La Diretion Générale :

Dirigée par un présidant directeur général, assisté du comité exécutif. Il est également assisté de conseillers et de directeurs chargés du traitement et du suivi de dossiers spécifiques et à caractère stratégique. D'autres comités sont rattachés à la direction générale.

— Le comité d'examen des projets (CEP).

— Le comité de coordination des projets (CIP).

— Le comité d'éthique.

Le président directeur général peut à tout moment créer d'autres comités chargés d'assurer la coordination de l'étude de problèmes particuliers. Ces comités peuvent être chargés d'une mission permanente ou d'une durée déterminée. La direction relation publique (REP) et le service sureté interne d'établissement (SIE) relèvent également de la direction générale.

b. Structures opérationnelles :

Les activités opérationnelles exercent les métiers du groupe et développent son potentiel d'affaires tant en Algérie qu'à l'étranger. Les activités opérationnelles, qui sont placées sous l'autorité d'un vice-président sont [1] :

- **L'Activité Exploration-Production (EP) :**Couvre les activités de recherche, d'exploration, de développement et de production d'hydrocarbures. Elles sont assurées par SONATRACH seule, ou en association avec d'autres compagnies pétrolières.
- **L'Activité Liquéfaction, Raffinage et Pétrochimie (LRP) :**Couvre le développement et l'exploitation des complexes de liquéfaction de gaz naturel, de séparation de GPL, de raffinage et des gaz industriels.
- **L'Activité Transport par Canalisations (TRC) :**Assure l'acheminement des hydrocarbures (pétrole brut, condensat, GPL et gaz naturel) et dispose d'un réseau de canalisations de près de 19 623 km en 2015 contre 14 915 en 2005, soit une augmentation de 4 708 km.
- **L'Activité Commercialisation (COM) :** A pour missions l'élaboration et l'application de la stratégie de Sonatrach en matière de commercialisation des hydrocarbures sur le marché intérieur et à l'international par les opérations de trading et de hipping.
  Ces opérations sont menées en coopération avec les filiales NAFTAL pour l'approvisionnement du marché national en produits pétroliers et gaziers (GPL), HYPROCSC pour le transport maritime de ces produits et COGIZ pour la commercialisation des gaz industriels.

c. Structures fonctionnelles :

- **Direction Coporate :**
  -Stratégie, Planification Économie (SPE) ;
  -Finances (FIN) ;
  -Ressources Humaines (RHU) ;

- **Direction Centrale**
  -Filiales participations (FIP) ;
  - Activités Centrales (ACT) ;
  - Juridique (JUR) ;
  - Informatique Système d'Information (ISI) ;

- Marchés et Logistique (MLG) ;

-Santé, sécurité environnement (HSE) ;

- Business Développent (BSD) : nouvelle direction chargée de détecter des opportunités de croissance, d'évaluer et de lancer des nouveaux projets dans les activités de base de l'entreprise ;

- Recherche Développement (RDT) : nouvelle direction chargée de promouvoir et de mettre en oeuvre la recherche appliquée et de développer des technologies dans les métiers de base de l'entreprise.

1.2 L'Institut algérien du pétrole (IAP)

L'institut algérien du pétrole (IAP), est une grande école algérienne, spécialisée dans les métiers de l'industrie du pétrole et des hydrocarbures en général. Son siège à Boumerdès est et l'enseignement est donné Sur 4 sites : Boumerdès, Arzew, Skikda et Hassi Messaoud. L'IAP a pour objet la prise en charge des besoins du secteur de l'énergie, en matière de formation de spécialisation, de perfectionnement, de recyclage et de recherche appliquée, toutes disciplines confondues. L'institut assure des formations opérationnelles de niveau international en adéquation avec les besoins du secteur de l'énergie. Il est lié à la Sonatrach mais, en juillet 2020, le conseil des ministres décide la «remise de l'Institut algérien du pétrole (IAP) sous l'autorité du ministère de l'Enseignement supérieur »[45].

1.3 Généralité sur les hydrocarbures

Afin de réaliser un outil d'aide à la décision , il est nécessaire d'utiliser une terminologie spécifique et purement technique du domaine pétrolier. Pour cette raison, nous allons présenter quelques généralités relatives à ce dernier.

1.3.1 Définition des hydrocarbures

Les hydrocarbures sont des molécules organiques exclusivement composées de carbone et d'hydrogène. L'image du pétrole et du gaz naturel, deux carburants importants. Ils sont inflammables, par ailleurs, ils ne se mélangent pas avec l'eau.

1.3.2 Formation des hydrocarbures

La matière organique, composée de carbone, hydrogène, oxygène et azote (CHON) est, dans un milieu, protégée d'oxydation, mais non de l'action des bactéries anaérobies. Ces bactéries sont celles qui n'ont pas besoin d'oxygène libre, mais qui viennent chercher, dans les molécules organiques, l'oxygène et l'azote dont elles ont besoin pour leur métabolisme ; en simplifiant, elles soustraient donc des CHON, les O et les N, laissant les carbones (C) et les hydrogènes (H) : c'est la dégradation biochimique de la matière organique.
Les carbones et les hydrogènes s'unissent alors pour former de nouvelles molécules composées principalement de ces deux éléments et qu'on appelle des hydrocarbures (HC).
Une des premières molécules à se former est le CH4, le méthane (gaz naturel), les molécules d'HC sont amenées à des températures et pressions de plus en plus élevées ;
c'est l'enfouissement. À partir d'ici, les molécules d'hydrocarbures vont devenir de plus en plus complexes. La dégradation passera de biochimique (régie par les bactéries) à thermique (régie par l'augmentation de température). Le schéma qui suit résume ce qui se passe à mesure de l'enfouissement et comment se forment l'huile et le gaz.

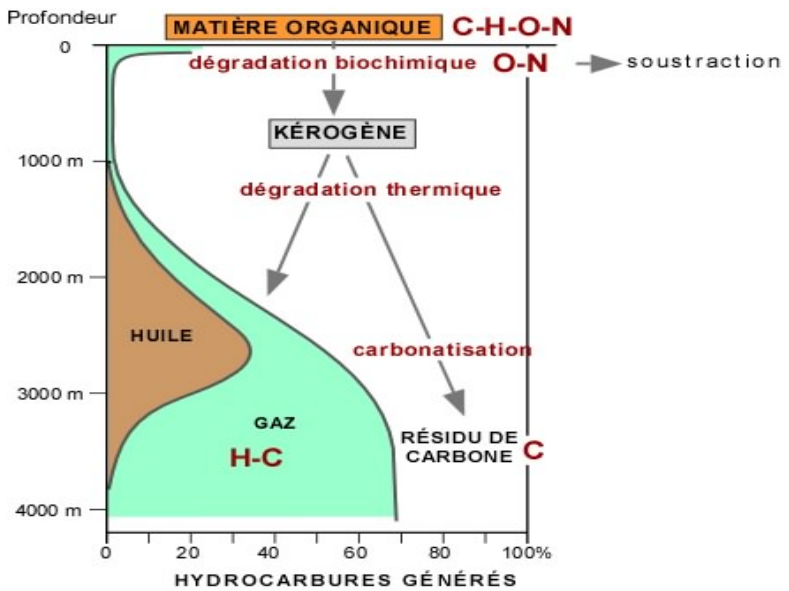


FIGURE 1.3 – Génération d'hydrocarbures [46].

La roche dans laquelle se forment les gouttelettes d'hydrocarbures est appelée rochemère. Il faut en arriver à ce que les gouttelettes se concentrent, en se déplaçant par exemple. C'est le processus de la migration. Il faut que les conditions géologiques soient telles que les gouttelettes en viennent à être expulsées de la roche-mère, puis transportées dans une roche perméable pour

venir se concentrer dans ce qu'on appelle une rocheréservoir où le pétrole se trouve dans les pores de la roche ; une sorte de roche éponge.

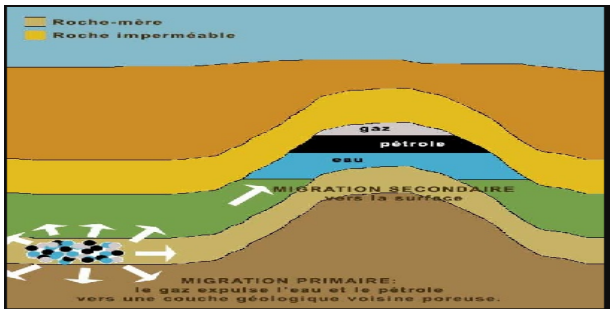


FIGURE 1.4 – Migration de la roche mère à la roche-réservoir[46].

1.3.3 Naissance et piégeage des hydrocarbures dans un bassin sédimentaire

Les hydrocarbures prennent naissance et évoluent dans un bassin sédimentaire. Leurs histoires lui sont étroitement liées. C'est pour cette raison que l'étude du mécanisme de formation des bassins sédimentaires est fondamentale et constitue la première étape des études de l'explorateur. Ces études lui permettent d'orienter et localiser des zones susceptibles de renfermer des hydrocarbures et d'établir des programmes d'exploration en vue d'identifier des prospects devenant par la suite des gisements d'hydrocarbures exploitables.

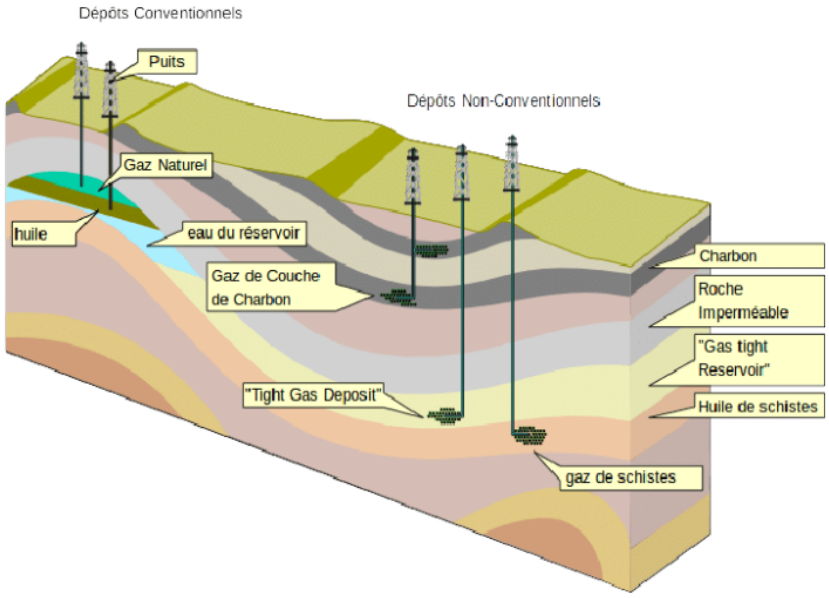


FIGURE 1.5 – Schéma des divers types de gisements pétroliers[46].

*** Système pétrolier :**

Le système pétrolier désigne la combinaison des facteurs géologiques majeurs qui ont permis d'obtenir des accumulations d'hydrocarbures. Ces facteurs sont :

- Une roche mère :Roche dans laquelle se sont formés des hydrocarbures.
- migration : Cheminement du pétrole à travers les terrains.
- piège : Anomalie dans la régularité des couches géologiques d'un bassin sédimentaire, affectant en particulier la coupe.
- Une roche-couverture : Permettant l'accumulation des hydrocarbures en un gisement
- Un réservoir : Roche poreuse dans laquelle le pétrole et le gaz sont concentrés.
- Un gisement : Accumulation naturelle de matière minérale (solides, liquides ou gazeuses) susceptible d'être exploitée. Tout d'abord, la présence d'une roche mère est fondamentale pour la génération des hydrocarbures. Ensuite, une roche-réservoir poreuse et perméable est nécessaire pour contenir les hydrocarbures et leur permettre de s'accumuler. Ce réservoir doit être surmonté d'une couverture qui agit comme une barrière contre les ascendants de fluides. Un piège doit sceller le tout, afin de permettre des accumulations. Enfin, la succession des événements géologiques, que l'on appelle le timing, doit avoir été favorable, et en particulier, il indispensable que le piège se soit formé avant que les hydrocarbures n'aient migré.

  C'est l'occurrence de chacun de ces événements individuels que l'explorateur tente d'évaluer, au moyen de probabilités, lors de la prospection pétrolière, afin d'évaluer les chances de rencontrer une accumulation dans un endroit précis du sous-sol.

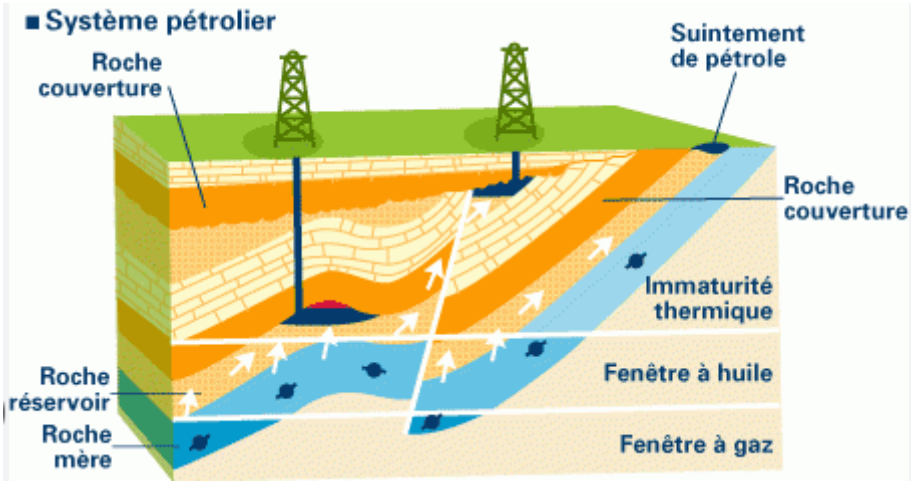


FIGURE 1.6 – Système pétrolier[46].

1.4 La chaîne de valeur de l'industrie pétrolière

L'industrie pétrolière est caractérisée par la succession d'activités importantes. Ce sont l'activité « amont » et l'activité « aval ». Les auteurs, BITEAU Jean-Jacques et BAUDIN François[7] soulignent que c'est par commodité qu'on parle de l'industrie pétrolière. En vérité, dans la branche il n'y a pas qu'une industrie mais plusieurs. Sur le plan symbolique elles restent des "stades" d'une même industrie. L'intégration de ces stades dans une même appellation est la conséquence de l'insertion des entreprises pétrolières dans tous les domaines d'activité de la branche. En effet, la tendance dominante fut de regrouper autour d'une même entreprise toutes les activités liées au pétrole, de l'exploitation au raffinage et à la distribution. La figure ci-dessous synthétise les différentes étapes de la chaine pétrolière.

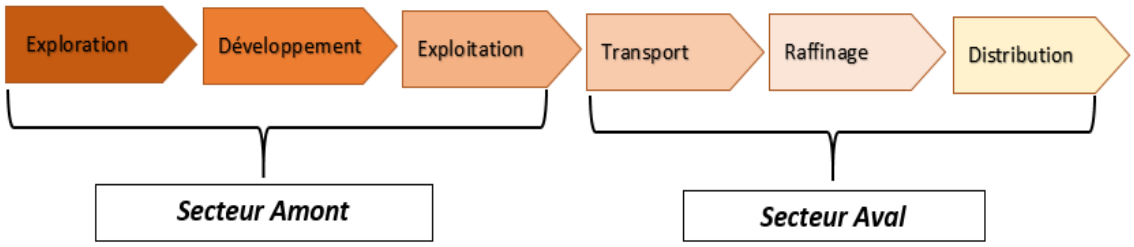


FIGURE 1.7 – Le parcours de l'industrie pétrolière.

1.4.1 L'activité amont

L'activité amont, également appelée "exploration-production" constitue le maillon essentiel de la chaine pétrolière. L'activité "amont" est une succession continue et complémentaire de plusieurs travaux pétroliers qui ont pour but la découverte de nouveaux gisements d'hydrocarbures économiquement exploitables.

L'activité amont comprend plusieurs étapes distinctes. D'abord, l'étape d'exploration.Cela consiste à faire une géologie et une géophysique de terrain, afin de mieux connaitre les composantes du sous-sol. Puis, viennent les forages d'exploration pour confirmer ou infirmerla présence des hydrocarbures, déjà ciblés par les études précédentes.

Dans le cas où lesforages d'exploration sont positifs, c'est un succès pour l'activité. Ensuite, l'étape de développement par les forages d'appréciation pour l'extraction, et l'estimation des infrastructures afin de produire et traiter les hydrocarbures. Enfin l'étape d'exploitation permettant l'extraction des hydrocarbures pour les rendre conformes aux spécifications de transport par canalisation et de commercialisation.

1. **Phase d'exploration** :

   L'exploration est la première étape du processus de l'activité pétrolière. Elle est un ensemble d'opérations préliminaires à l'exploitation dont le but est la découverte d'accumulation d'hydrocarbures liquides et gazeux éventuellement solide, techniquement et économiquement exploitable. L'exploration constitue une phase particulière caractérisée par une prise de risque. Aussi, le développement de nouvelles techniques d'exploration a permis d'améliorer la visibilité des spécialistes en géologie, et d'augmenter ainsi l'efficacité de l'exploration.
   L'exploration comprend la prospection et l'appréciation de la taille et les caractéristiques du réservoir.

   a. La prospection :

   On entend par prospection l'ensemble des travaux d'investigation qui se font dans des zones peu connues où règne un contexte de grande incertitude qui nécessite d'émettre un certain nombre d'hypothèses qui seront plus ou moins rapidement confirmées, ou devront être rejetées au vu d'indices souvent ténus. Dans un premier temps, les géologues ont pour tâche d'étudier la géologie de grandes zones afin d'y définir les endroits susceptibles de receler des gisements d'hydrocarbures. Ils s'associent aux géophysiciens qui étudient les propriétés du sous-sol, notamment grâce aux données de la sismique. La prospection peut être une prospection géologique en surface. Les caractéristiques géologiques des gisements pétroliers diffèrent en fonction de leur âge (de 5 à 400 millions d'années), de leur profondeur (de 1 à 10 km) et de leur thermique (la formation de l'huile se situant entre 60 et 150 °C). C'est la première étape qui permet de repérer les zones sédimentaires méritant d'être étudiées (plissements, failles). Pour identifier les régions potentiellement pétrolifères, les géologues s'interrogent sur les points suivants :
   Quelle est la nature des roches ? Ont-elles été soumises à des conditions favorables à la création d'hydrocarbures ? Ces hydrocarbures ont-ils pu migrer et être piégés par des couches imperméables ? Les géologues dressent une carte du sous-sol à partir des informations obtenues en surface par examen des affleurements et dans les airs par photogéologie. Lorsqu'une zone favorable (prospect) est repérée par les géologues depuis lasurface, c'est au tour des géophysiciens d'explorer le sous-sol. La prospection peut également être une prospection géophysique en profondeur. En effet, la connaissance des caractéristiques du terrain en surface n'est pas suffisante pour permettre d'extrapoler

les propriétés du sous-sol. C'est pourquoi la société peut avoir recours aux méthodes géophysiques d'exploration. Celles-ci consistent à effectuer des mesures de grandeurs physiques fondamentales en profondeur[4].

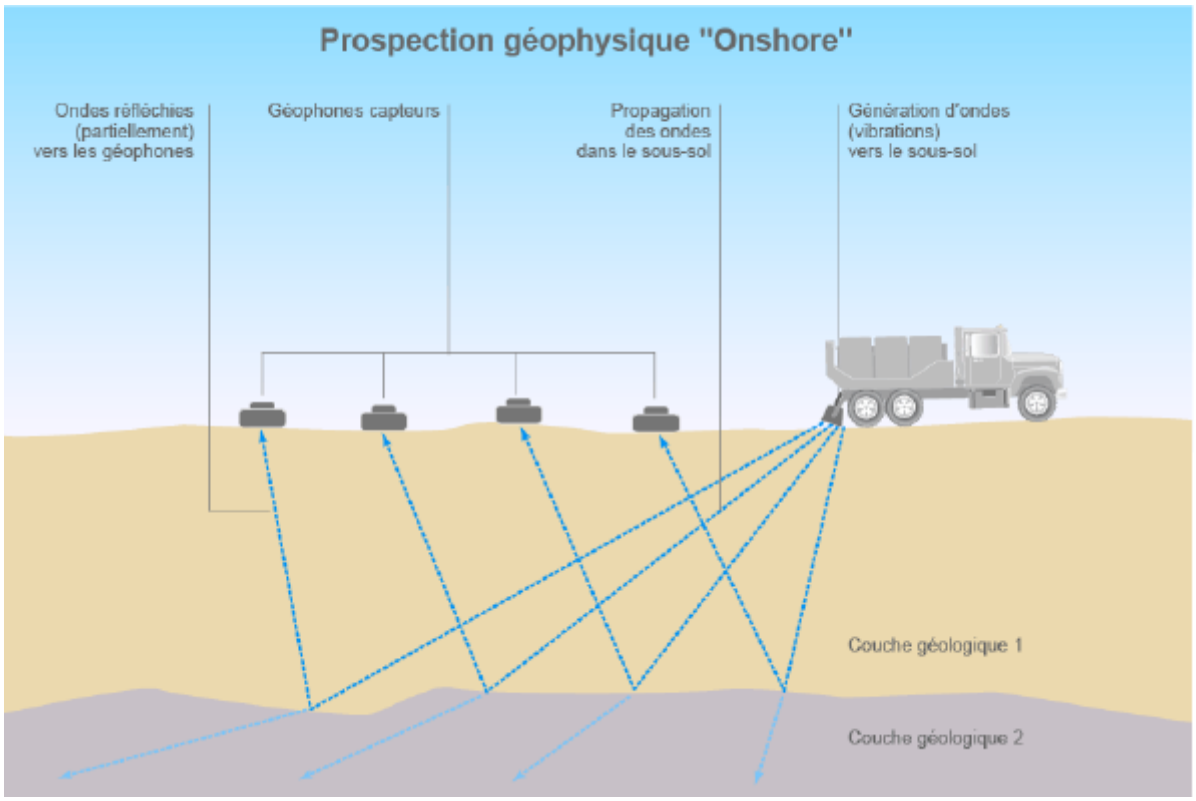


FIGURE 1.8 – Prospection géologique[47].

b. L'appréciation :

une fois qu'un ou plusieurs puits d'exploration aient été forés dans un réservoir et aient résulté en une découverte de réserves en hydrocarbures, des puits additionnels, appelés des puits d'appréciation, peuvent être forés pour obtenir des informations sur la taille et les caractéristiques du réservoir, pour évaluer le potentiel commercial et pour estimer l'importance des réserves récupérables. Quatre scénarios possibles sont à considérer à ce stade :

Procéder directement au développement, et générer ainsi des revenus sur une période relativement courte. Néanmoins, le risque serait que le champ développé s'avère plus ou moins important que l'estimation initiale et les équipements ne seraient pas adéquats à la taille du gisement, ce qui pourrait remettre en cause la rentabilité économique de la découverte.

Mettre en place un programme de travail pour la phase d'appréciation avec, comme objectif, l'optimisation technique du développement. Ceci mènera à un retard dans la production du premier baril du champ en question par quelques années en plus des coûts supplémentaires à supporter. Cependant, la rentabilité totale du projet pourrait s'améliorer. Dans ce scénario, l'objectif de l'appréciation dans le contexte de développement d'un champ pétrolier n'est pas de trouver des hydrocarbures additionnels mais plutôt de réduire les incertitudes, en particulier celles relatives au volume estimé des réserves contenu dans la roche réservoir.

Céder la découverte à d'autres sociétés. Dans ce cas, une évaluation s'avère nécessaire. Dans la pratique, il existe des sociétés pétrolières qui se spécialisent dans l'utilisation de leurs savoir-faire en matière d'exploration sans l'intention de continuer à investir dans la phase de développement. Ils font une découverte puis décident de la céder en réalisant une plus-value pour passer à l'exploration d'autres opportunités.

Ne rien faire. Ceci est toujours une option, malgré qu'elle soit une option de facilité, et pourrait mener à des réclamations de la part des autorités (l'Etat) pour exiger la renonciation aux droits d'exploration si la société continue à ne rien faire à propos de la découverte [5].

2. **Le développement et la production :** Une fois les informations supplémentaires définies et collectées pour une estimation initiale des réserves, l'étape qui suit est celle d'étudier les différents scénarios de développement. Une étude de faisabilité est donc nécessaire pour documenter les différentes options techniques, parmi lesquelles il existe au moins une option ayant une rentabilité économique acceptable. L'étude contient les options de développement du gisement, la conception du processus de production, la taille des équipements, les emplacements proposés (pour une plateforme en mer) ainsi que le système de transport du pétrole brut ou du gaz pour la vente. Les options retenues sont accompagnées par une estimation des coûts et la planification des activités du projet de développement. Une telle étude permet de donner un aperçu complet sur toutes les conditions, opportunités, risques et contraintes liées au projet.

a. Plan développement :

En se basant sur l'étude de faisabilité, et sur l'hypothèse qu'il existe une option commercialement fiable, un plan de développement (POD) peut être développé et exécuté.

Le POD est un document clé utilisé pour effectuer proprement la communication, la discussion et l'accord autour des activités nécessaires pour le développement d'un nouveau champ, ou l'extension d'un projet existant. L'objectif principal du POD étant de servir en tant que concept spécifique du projet pour les équipements de surface et en sous-sol pour l'exploitation et la maintenance des investissements requis. Ceci devrait donner à la direction de la société pétrolière ainsi qu'aux investisseurs, une certaine assurance que tous les aspects du projet ont été identifiés et discutés avec les parties prenantes, notamment :

— Les objectifs du développement.
— Les données d'ingénierie pétrolière (du sous-sol).
— Les principes d'exploitation et de maintenance.
— La description de d'ingénierie des équipements et installation.
— L'estimation des coûts et de la main d'oeuvre.
— Le calendrier et planification du projet.
— Le résumé de l'étude de rentabilité.
— Proposition de budget.

b. La phase de production :

La phase de production commence avec la première quantité d'hydrocarbures commercialisables produite à partir de la tête du puits. Cet évènement est aussi connu par le terme « first oil ». Cette étape représente un point marquant du point de vue des flux de trésorerie, puisque c'est à partir de ce moment que la société commence à générer des revenus qui vont constituer l'essentiel du retour sur l'investissement effectué. En effet, le plan de développement et de production se base généralement surl'estimation du profil de production. Selon ce profil, est effectuée la mise en place des infrastructures, ce qui permet d'entamer les opérations de production du bassin qui se caractérisent typiquement
par trois phases :

1. La phase de construction (courte période) :

Durant cette phase, les puits nouvellement forés sont mis en production. La production augmente progressivement.

2. La phase du plateau (entre 2 et 5ans) :

Les puits nouvellement forés produisent à pleine capacité mais les puits anciens commencent à entrer dans le déclin. Toutefois, la production reste stable, et les équipements fonctionnent à pleine capacité.

3. La phase de déclin (la plus longue) :

Durant cette phase, tous les puits producteurs sont en phase de déclin. Plusieurs techniques sont utilisées pour optimiser les quantités récupérables d'hydrocarbures et prolonger ainsi la phase de production. Pour que cela aboutisse, la pression dans le puits doit être nettement inférieure à celle des fluides présents dans le réservoir :
- Si cette différence de pression existe naturellement et si elle est suffisamment importante, les hydrocarbures se dirigent vers le puits et remontent d'eux-mêmes à la surface .
- Si la pression du gisement est insuffisante, mais aussi pour augmenter la productivité des puits, il faut réaliser des investissements supplémentaires en ayant recours à des procédés de récupération assistée, qui consistent en la mise en place de compresseurs à haut débit, permettant l'injection dans les puits du gaz ou de l'eau sous une pression supérieure à la pression interne du puits pour que les hydrocarbures puissent remonter plus facilement .
- Le pompage artificiel peut également être réalisé en installant des pompes au niveau des puits. Dans tous les cas, la pression diminue au fur et à mesure que le gisement se vide de ses hydrocarbures. En fin de production, il faut systématiquement la stimuler. A cette phase de production, de nombreuses dépenses sont effectuées. Ce sont les dépenses d'exploitation. Ces dépenses sont les coûts permanents d'exploitation et de maintenance d'un champ pétrolier ou de gaz ainsi que les équipements et installations connexes[6].

1.4.2 L'activité aval

Elle prend en charge l'élaboration et la mise en ouvre des politiques de développement et d'exploitation de l'aval pétrolier et gazier. Elle a pour missions essentielles l'exploitation des installations existantes de liquéfaction de gaz naturel et de séparation de GPL, de pétrochimie et de gaz industriel.

(a) **Activité Transport par Canalisation "TRC" :** Le transport par canalisations

assure l'acheminement des hydrocarbures (pétrole brut, condensat,GNL, GPL). La longueur du réseau de canalisation dépasse aujourd'hui les 19 000 km. Les centres de dispatching des hydrocarbures liquides et gaziers comptent parmi les installations névralgiques de l'activité. SONATRACH dispose de 22 systèmes de transport par canalisations (STC). SONATRACH dispose de 82 stations de pompage et de compression dont 39 stations de pompage destinées au brut.

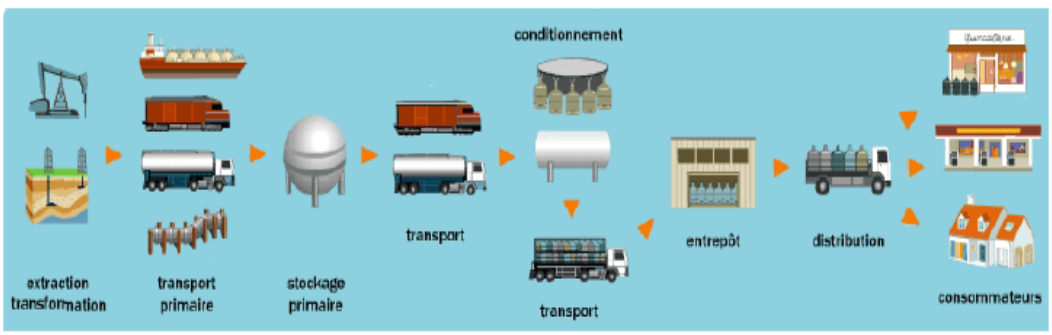


FIGURE 1.9 – Transport des hydrocarbures[46].

(b) **Raffinage des hydrocarbure :** Le pétrole et les produits pétroliers qui en dérivent jouent un rôle clés dans l'activité économique d'un pays et dans la vie quotidienne de chacun. Le raffinage est un maillon clé de la chaine pétrolière. C'est ce maillon qui va permettre la transformation du pétrole brut en produits utilisables pour le transport, les besoins industriels, de fibres, de caoutchoucs synthétiques. . .etc. Schématiquement on peut distinguer

— Les raffineries appartenant à des sociétés intégrées qui produisent, transforment et commercialisent les produits pétroliers.

— Les raffineries indépendantes qui appartiennent à des sociétés ne disposant ni de sources de brut, ni de réseaux de distribution pour leurs produits.

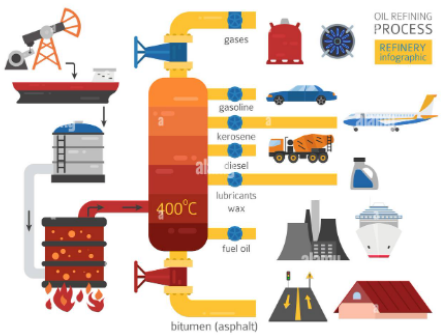


FIGURE 1.10 – Raffinage du pétrole brut[48].

(c) **Activité Commercialisation "COM" :** Elle a en charge le management des opérations de vente et de shipping (expédition par bateau). Les actions sont menées en coopération avec les filiales NAFTAL pour la distribution des produits pétroliers, SNTM HYPROC pour le transport maritime des hydrocarbures et COGIZ pour la commercialisation des gaz industriels.

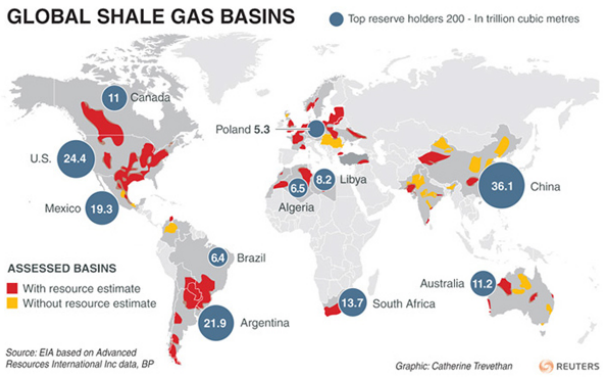


FIGURE 1.11 – Révolution mondiale de l'exploitation du gaz de schiste[49].

1.4.3 L'abandon et la remise en l'état du site

La durée de vie économique d'un projet se termine une fois que l'activité ne peut générer que des flux de trésorerie négatifs. L'abandon économique est le point ou les revenus ne couvrent plus les dépenses d'exploitation. Cependant, il est toujours possible, de point devue technique, de produire mais ça sera une production à perte. Si les options de l'extension de la durée de vie économique du champ pétrolier ont toutes été épuisées, l'abandon devient alors une nécessité. La remise en état du site est le processus par lequel l'opérateur d'un champ pétrolier obtient l'approbation, et procède à l'enlèvement, la cession ou la réutilisation des installations et équipements lorsque ceux-ci ne correspondent plus aux besoins de la société dans leur état actuel. Les coûts d'abandon et de remise en état du site peuvent être considérablement élevés, d'autant plus qu'ils sont engagés au moment où le projet ne génère plus de flux de trésorerie. Aussi, une provision est constituée tout au long du cycle de vie du champ pétrolier pour prendre en considération ces engagements au niveau des états financiers de la société. Les activités liées à l'abandon et remise en état du site sont souvent assez compliquées et risquées. Pendant cette phase, le défi sera de trouver

les possibilités de l'optimisation des activités d'abandon sans compromettre l'aspect environnemental, ni engager des coûts excessivement élevés.

Conclusion

Depuis plus de 50 ans, SONATRACH joue pleinement son rôle de locomotive de l'économie nationale. Elle a pour mission de valoriser les importantes réserves en hydrocarbures de l'Algérie. Cet acteur majeur de l'industrie pétrolière, surnommé la major africaine, tire sa force de sa capacité à être un groupe entièrement intégré sur toute la chaine de valeur des hydrocarbures.

Nous verrons dans le prochain chapitre l'investissements dans un projet d exploration -production

Chapitre 2

l'evaluation d'investissement dans un projet d'exploration-production

Introduction

L'industrie pétrolière et gazière est confrontée à des défis majeurs pour investir efficacement dans les projets d'exploration et de production en raison de la complexité croissante des gisements, de la volatilité des prix de l'énergie et des exigences environnementales de plus en plus strictes. Les entreprises doivent être en mesure de prendre des décisions rapides et précises en matière d'investissement pour maximiser la valeur de leur portefeuille de projets.

Dans ce contexte, de nombreux outils d'aide à la décision ont été développés pour aider les entreprises à évaluer les projets d'exploration et de production et à prendre des décisions éclairées en matière d'investissement. Ces outils se basent sur des modèles économiques et géologiques sophistiqués, des simulations de risque et des analyses de sensibilité pour évaluer les projets et optimiser les portefeuilles.

Dans ce chapitre, nous allons examiner les principaux concepts théoriques liés à l'évaluation des projets d'exploration et de production.

2.1 Le projet

Un projet est un processus unique qui consiste en un ensemble d'activité et d'équipes coordonnée et maitrisées, comportant des dates de début et de fin, entrepris dans le but d'atteindre un objectif conforme à des exigences spécifique.

2.2 Projet d'investissement

2.2.1 L'investissement

constitue un acte fondamental pour l'entreprise, dans la mesure où il conditionne son développement futur et mobilise de nombreuses énergies en termes de temps, de compétences et de ressources (humaines et financières). Dans un sens large, l'investissement peut être défini comme une utilisation des fonds de l'entreprise aujourd'hui dans le but d'obtenir dans le futur des recettes anticipées.

2.2.2 Un projet d'investissement

correspond à l'acquisition d'un ensemble d'immobilisations, permettant de réaliser ou de développer une activité (ou un objectif) donnée.

2.3 Les Etapes de l'Exploration-Production

Un projet d'Exploration-Production est défini comme étant une succession continue et complémentaire de plusieurs travaux pétroliers dont le but est de découvrir de nouveaux gisements, de maintenir et de renouveler les ressources en hydrocarbures. La réalisation de ce dernier comporte plusieurs étapes distinctes :

— L'étape exploration

— L'étape développement

— L'étape exploitation

2.3.1 Étape exploration

Appelée aussi prospection, elle a pour but de trouver des nouveaux gisements et comporte deux étapes. Une première constituée par les études géologiques et géophysiques,

qui permettent de déceler les pièges géologiques structuraux. La seconde comprend un ou plusieurs forages exploration, qui aideront à conclure sur la présence ou non d'hydrocarbure. La phase exploration apporte un lot important d'informations sur le gisement découvert qui sont :

– Estimation des réserves.

– Pré-évaluation (géologique, technique, économique). – Calcul des profits de production, des investissements et des dépenses d'exploitation, calculs économiques.

2.3.2 Étape développement

Elle comprend la planification et l'exécution du projet, elle consiste à forer les futurs puits producteurs et installer tous les matériaux connexes permettant la production.

2.3.3 Étape exploitation

Il s'agit des travaux permettant l'extraction des hydrocarbures pour les rendre conformes aux spécifications de transport par canalisation et de commercialisation (récupération, raffinage, stockage).

2.4 Évaluation d'un projet EP

L'évaluation économique se base sur trois data.

1.Data technique : consiste en

– Investissements recherche ;

– Investissements développement ;

– Coûts opératoires ;

– Profils production.

2.Data économique : consistes en des hypothèses sur :

– Prix de vente ;

– Taux d'actualisation ;

– Inflation ;

– Taux de change.

Ainsi que,

3.Data contractuel : qui consiste en la zone fiscale et la durée contractuelle.

2.4.1 Investissement (Capex)

L'investissement est l'affectation de ressources à un projet dans l'espoir d'en retirer des profits futurs. Consentir des dépenses au présent pour des revenus dans le futur. Les dépenses de prospection et de développement seront considérées comme investissements.

a.Dépenses d'exploration :

Elles sont en générales inférieures aux autres dépenses, en revanche, elles sont effectuées avant la découverte et ont donc un impact direct sur les comptes de la compagnie, avec une garantie de remboursement liée à la probabilité de succès du programme d'exploitation soit en général 10% à 50% correspondant à la découverte de nouveaux gisements. Sachant qu'elles englobent les travaux de géologie et de géophysique et en général jusqu'au premier forage de découverte. Ces dépenses sont :

– Acquisition de la sismique 2D, 3D ;
– Acquisition d'autres méthodes (radar. . .) négligeables par rapport à la sismique ;
– Important coût du personnel ;
– Coût de traitement sismique ;
– Coût d'interprétation de données en carte, profil de forage et modèle réservoir ;
– Coût de forage d'exploration.

b.Dépenses de développement :

Afin de mettre en production les gisements éventuellement découverts, et qui représentent une part très importante des investissements. Parmi ces investissements :

– Coûts de forage ;
– Installations connexes à la production et systèmes d'évacuation ;

2.4.2 Dépenses d'exploitation (Opex)

Elle correspond aux frais opératoires courants (la somme des frais du personnel, entretien d'installation et des frais variables de production) pour assurer la bonne exploration des gisements. On peut estimer que l'exploration représente de 10 à 20%, le développement de 40 à 60%, les frais d'exploitation de 20 à 50% des dépenses engagées.

2.4.3 Flux de trésorerie (CACH -FLOW)

Un Cache flux est le solde des flux de trésorerie engendrés par un investissement à la clôture d' une période .il désigne la différence entre les encaissements (cach-input) et les décaissements (cash out put) d'une année donnée [26].

2.4.4 Amortissement

L'amortissement est la constatation comptable et annuelle de la perte de valeur des actifs d'une entreprise subie du fait de l'usure, du temps ou de l'obsolescence. L'amortissement permet à l'entreprise de dégager les sommes nécessaires pour le renouvellement des éléments d'actif [25]. L'amortissement se calcule comme suit :

$$\text{Amortissement} = \text{investissement} * \text{taux d'amortissement}$$

2.4.5 Actualisation

L'actualisation consiste à déterminer le pouvoir d'achat que procurera la valeur d'un bien dans le futur. Elle se calcule en tenant compte de l'inflation. Actualiser un montant signifie déterminer ce que l'on sera en mesure d'acquérir avec cette somme, à la date à laquelle elle sera encaissée. Certaines entreprises incluent des clauses d'actualisation dans leurs contrats, leur permettant de faire varier leurs prix en fonction des évolutions de certains indices. L'actualisation est également utilisée dans le cadre d'investissements [25].

2.4.6 Taux d'actualisation

C'est le cout d'opportunité du capital investi c'est-à-dire le rendement qu'il serait possible d'obtenir en investissant ailleurs le même capital .

2.4.7 Inflation

L'inflation désigne une hausse durable des prix. Lorsque le prix d'un seul bien ou de quelque bien augmente, il n'y a pas forcément d'inflation, car les prix de tous biens peuvent ne pas bouger. L'inflation correspond alors à une hausse du prix moyen de tous les biens et services [25].

2.4.8 Prix des hydrocarbures

La loi n° 05 fixe, en son article 90, les conditions de détermination de prix de base selon la nature des hydrocarbures :

– Pour le pétrole, les GPL, le butane, propane produits en Algérie et le condensat produit en Algérie, il s'agit des moyennes mensuelles des prix FOB publiés par une revue spécialisée incontestable ou à défaut, des prix notifies par ALNAFT (Agence Nationale pour la Valorisation des Ressources en Hydrocarbures) ;

– Pour les hydrocarbures liquides et produits pétroliers destinés au marché national, il s'agit des prix en vigueur durant l'année considérée ;

– Pour le gaz (vente de gaz à l'exportation), il s'agit de prix en vigueur durant l'année considérée ;

– Pour le gaz (vente de gaz sur le marché national), il s'agit des prix en vigueur pendant l'année civile considérée.

2.5 Les critères principale d'évaluation d 'un projet pétrolier

2.5.1 Critères économiques

La décision d'investir dans un quelconque projet se base principalement sur l'évaluation de son intérêt économique et par conséquent, du calcul de sa rentabilité.

La rentabilité d'un projet dépend des coûts qu'il induit et des gains qu'il procure.

Si la somme des gains est supérieure aux coûts de l'investissement, celui-ci est rentable. L'objectif de ce point est d'illustrer les critères pertinents à utiliser lors de la prise de décision d'investir. Ces critères sont représentés selon deux approches : déterministe et probabiliste.

a) Approche déterministe :

C'est une étude préalable des différents critères pour l'aide à la prise de décision. Ces critères d'aide à la décision sont la valeur actuelle nette (VAN), le taux de rentabilité interne (TRI) et l'enrichissement relatif au capital (ERC).

1.Revenu actualisé ou Valeur Actuelle Nette(VAN) :

La Valeur Actuelle Nette (VAN) est le critère fondamental du calcul économique. Le revenu actualisé (ou valeur actuelle nette)d'un projet est la somme des valeurs ac-

tuelles des flux de trésorerie associés au projet [33]. La Valeur Actuelle Nette (VAN) est généralement définie comme la différence entre les flux nets de trésorerie actualisés et le montant initial de l'investissement. Elle indique l'enrichissement net de l'entreprise qui découle de la réalisation de cet investissement. Dans les projets pétroliers, les investissements s'étalent également sur plusieurs périodes de temps. Nous pouvons représenter la valeur actuelle nette en utilisant l'équation suivante :

$$\text{VAN}=\sum_{t=0}^{n} \frac{CF_t}{(1+i)^t}$$

Tel que :

— VAN : valeur actuelle nette.

— CF : flux de trésorerie (cash-flows).

— i :taux d'actualisation.

— t :l'année considérée d'exploitation .

Décision d'acceptation ou de rejet d'un projet :

— **Une VAN positive (VAN> 0) :** Une valeur actuelle nette positif signifie que l'investissement augmente la valeur de l'entreprise conduira évidemment à accepter le projet,c'est-à-dire Les recettes du projet seront capables de Couvrir toutes les dépenses d'exploitation et de rembourser l'investissement au Département Financier donc l'acceptation du projet est recommandée.

— **Une VAN Nulle (VAN=0) :** Une valeur actuelle nette nulle signifie que l'investissement permet seulement de récupérer la mise initiale et le cout des ressources mises en oeuvre donc le projet est acceptable .

— **Une VAN négative (VAN<0) :** Une valeur actuelle nette négative signifie que l'investissement diminue la valeur de l'entreprise, c'est-à-dire, le rendement est inférieur au coût du capital.et cela signifie que la rentabilité de l'investissement est inférieure aux coûts des ressources mises en oeuvre donc le projet ne peut pas être accepté.

2.Le Taux de Rentabilité Interne(TRI) :

On appelle taux de rentabilité interne d'un projet, la valeur du taux d'actualisation pour laquelle la VAN s'annule[32], c'est-à-dire la valeur du taux pour laquelle on a.

$$\text{VAN}=(\sum_{t=0}^{n} \frac{CF_t}{(1+i)^t})=0$$

Pour expliquer cette définition, on revient à l'interprétation de la VAN : dire que la VAN au taux est nulle, c'est dire que les revenus du projet permettre de rembourser le

capital initial est de le rémunérer au taux, sans gain ni perte (i.e. la valeur actualisée des recettes est dans ce cas égales à la valeur actualisée des dépenses). Le taux de rentabilité est donc le taux maximum auquel on peut rémunérer les capitaux ayant servi à financer, sans que l'opération ne devienne difficile.

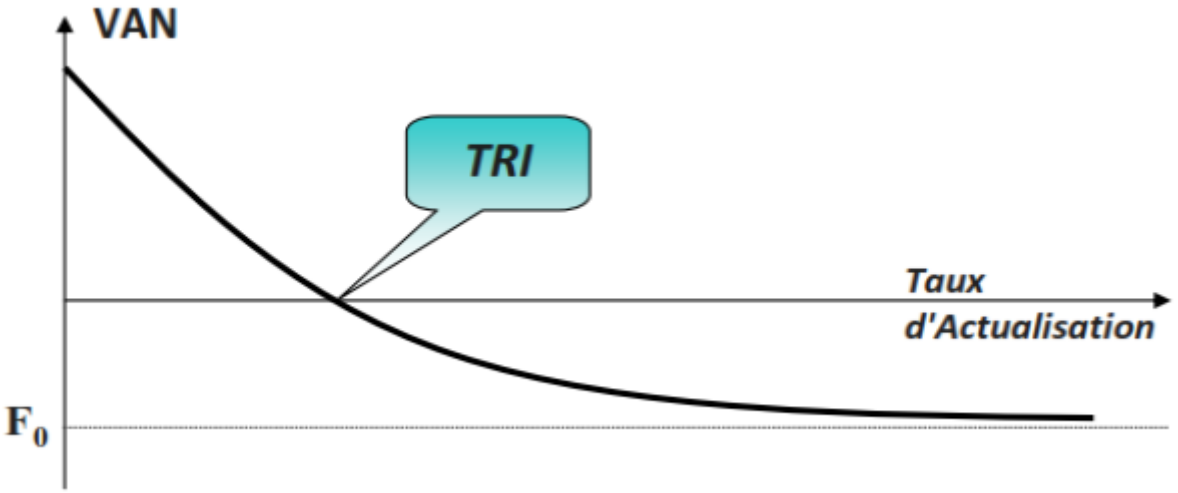


FIGURE 2.1 – Courbe représentant la rentabilité[50].

3.Enrechissement relatif en capital (ERC) :

l'enrichissement relatif en capital est le gain relatif en valeur capital . c'est le rapport du revenu actualisé du projet au montant de l'investissement actualisénécessaire à sa réalisation.

$$\text{ERC}=\frac{VAN}{\frac{\sum I}{(1+i)^t}}$$

Le critère consiste a réaliser le projet si son enrichissement relatif en capital est positif.

4.Le coût de Forage :

Le coût des forages pétroliers représente encore une part importante de l'ensemble des investissements de la recherche pétrolière.

Ce prix correspond aux frais de fonctionnement de l'appareil de forage (amortissement, main-d'oeuvre, entretien), au prix des matières consommables (trépan, tubage, produits à boues) et des services fournis par les sociétés spécialisées.

b) Approche probabiliste

Cette approche permet essentiellement de quantifier des événements possibles pour essayer d'analyser le risque dans le but de prendre une décision.

1.La Valeur Monétaire Espérée (EMV) du projet :

La valeur monétaire espérée (EMV), est un paramètre essentiel dans un contexte d'incertitude. Elle est définie comme étant l'espérance mathématique associée à deux possibilités, succès ou échec, autrement dit la valeur de la VAN en tenant compte de risque de perte sur le projet. La formule de calcul de l'EMV est définie comme suit :

$$\text{EMV} = (\text{V AN} * \text{POS}) + (1 - \text{POS}) * (-\text{I})$$

Tel que :

— **POS :** La Probabilité de Succès du Play (ou de forage).

— **VAN :** Valeur Actuelle Nette .

— **I :** L'Investissement de Recherche (Sismique et Forage Exploration).

Décision d'acceptation ou de rejet d'un projet

— **EMV**> 0 **:** le projet est acceptée.

— **EMV** $<$**0 :** le projet est non acceptée.

2.5.2 Critères de risque

1.Probabilité de succée (POS) :

C'est la probabilité d'existence d'hydrocarbures, en tenant compte d'un certain nombre de paramètres comme l'existence d'une géométrie favorable, l'existence de la roche mère, et la roche réservoir, couverture et du type de piège . La valeur de la probabilité de succès est estimé comme suit :

$$\text{POS} = \text{PC} * \text{PM} * \text{PR} * \text{PP}$$

Tel que :

— **PC :** La probabilité d'existence d'une roche couverture .

— **PM :** La probabilité d'existence d'une roche mère.

— **PR :** La probabilité d'existence d'un réservoir.

— **PP :** La probabilité de la présence d'un piège.

2.5.3 Critères stratégiques

1.Distance par rapport aux infrastructure :

Un prospect loin des infrastructures, nécessite de nouvelles usines de traitement et infrastructures de surface pour le développement , ce qui peut être une barrière pour le choix de ce prospect à moyen et court terme .tandis qu'un prospect proche des infrastructures et installations bénéficiera de l'utilisation possible des infrastructures existantes, donc une mobilisation rapide des potentielles ressources .

2.Catégorisation des prospects :

- **La catégorie A (Near Field) :** Mobilisation rapide de réserves en profitant des installations existantes.
- **La catégorie B (Near Infrastructure) :** Mobilisation rapide de réserves en profitant des installations existantes et basé sur un nouveau concept de play (nouveaux réservoirs, ect).
- **La catégorie C (Emerging Play) :** Génération de nouveaux projets dans des bassins émergents (développement de bassins émergents).
- **La catégorie D (New Concept) :** Générer des opportunités dans de nouveaux bassins et alimentation du pipe de projets (Ouverture de nouvelles province).

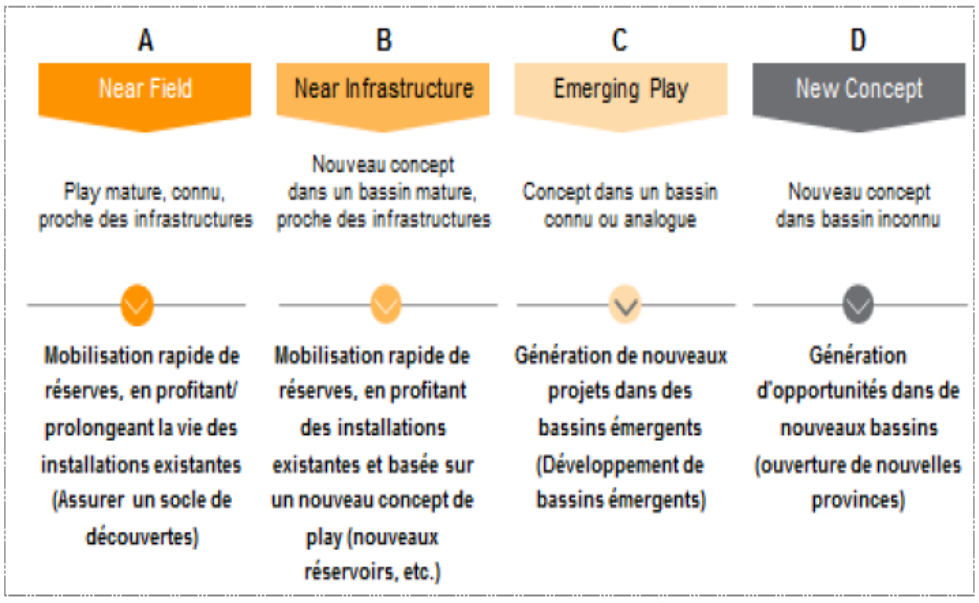


FIGURE 2.2 – Catégorie du Prospect[50].

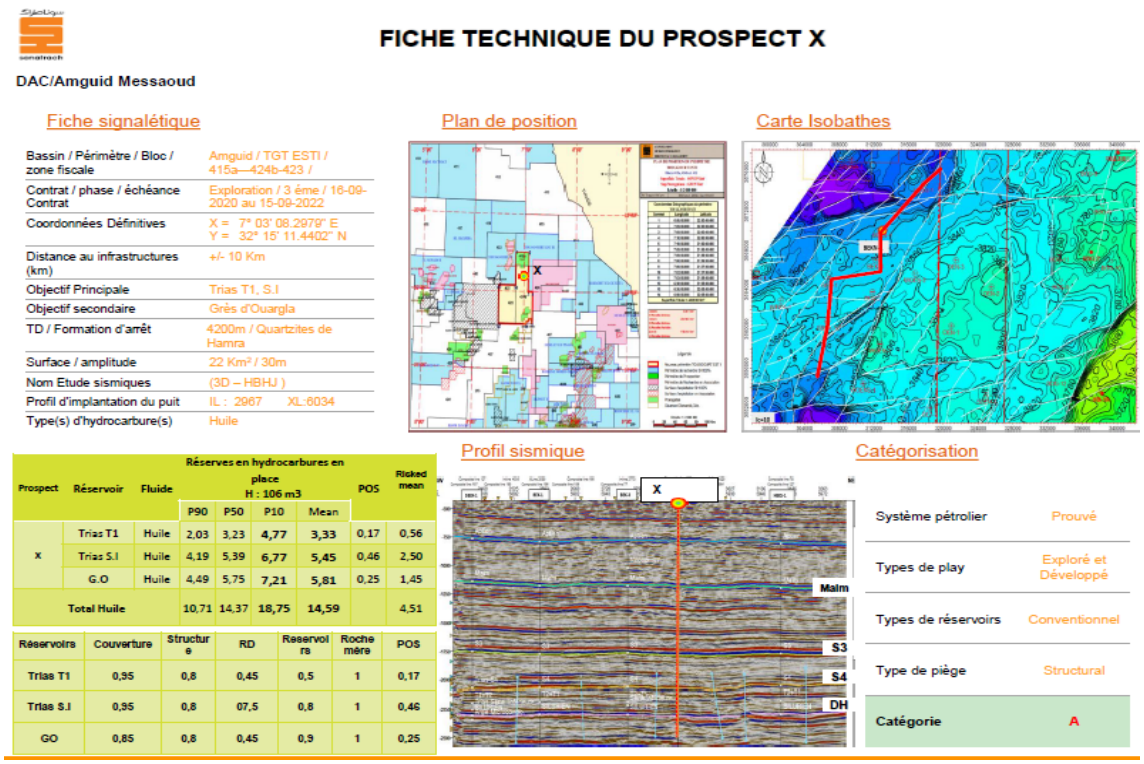
3.Ressource en place (p mean) :

Une novelle découverte n'est pas mise en production que si un marché rentable existe pour les hydrocarbures susceptibles d'en être extraits. Ce constat d'évidence montre

à quel point la notion de réserves demeure avant tout un concept économique .afin de mettre en avant les projets les plus intéressants ,il est impératif d'avoir des approximations de la quantité des hydrocarbures existante dans chaque opportunité sous forme de ressources en place liées aux différents scénarii en fonction de la distribution de la probabilité(P10,P50 et P90).

$$\text{Pmean} = \text{P10} * 30\% + \text{P50} * 40\% + \text{P90} * 30\%$$

Plus le pmean est grand , plus le volume escompté est intéressant .



FICHE TECHNIQUE DU PROSPECT X

DAC/Amguid Messaoud

Fiche signalétique

Bassin / Périmètre / Bloc / zone fiscale	Amguid / TGT ESTI / 415a—424b-423 /
Contrat / phase / échéance Contrat	Exploration / 3 éme / 16-09-2020 au 15-09-2022
Coordonnées Définitives	X = 7° 03' 08.2979" E Y = 32° 15' 11.4402" N
Distance au infrastructures (km)	+/- 10 Km
Objectif Principale	Trias T1, S.I
Objectif secondaire	Grès d'Ouargla
TD / Formation d'arrêt	4200m / Quartzites de Hamra
Surface / amplitude	22 Km² / 30m
Nom Etude sismiques	(3D – HBHJ)
Profil d'implantation du puit	IL : 2967 XL:6034
Type(s) d'hydrocarbure(s)	Huile

Plan de position

Carte Isobathes

Prospect	Réservoir	Fluide	Réserves en hydrocarbures en place H : 106 m3				POS	Risked mean
			P90	P50	P10	Mean		
X	Trias T1	Huile	2,03	3,23	4,77	3,33	0,17	0,56
	Trias S.I	Huile	4,19	5,39	6,77	5,45	0,46	2,50
	G.O	Huile	4,49	5,75	7,21	5,81	0,25	1,45
Total Huile			10,71	14,37	18,75	14,59		4,51

Réservoirs	Couverture	Structure	RD	Reservoirs	Roche mère	POS
Trias T1	0,95	0,8	0,45	0,5	1	0,17
Trias S.I	0,95	0,8	07,5	0,8	1	0,46
GO	0,85	0,8	0,45	0,9	1	0,25

Profil sismique

Malm

S3

S4

DH

Catégorisation

Système pétrolier	Prouvé
Types de play	Exploré et Développé
Types de réservoirs	Conventionnel
Type de piège	Structural
Catégorie	A

FIGURE 2.3 – FICHE TECHNIQUE DU PROSPECT X [50].

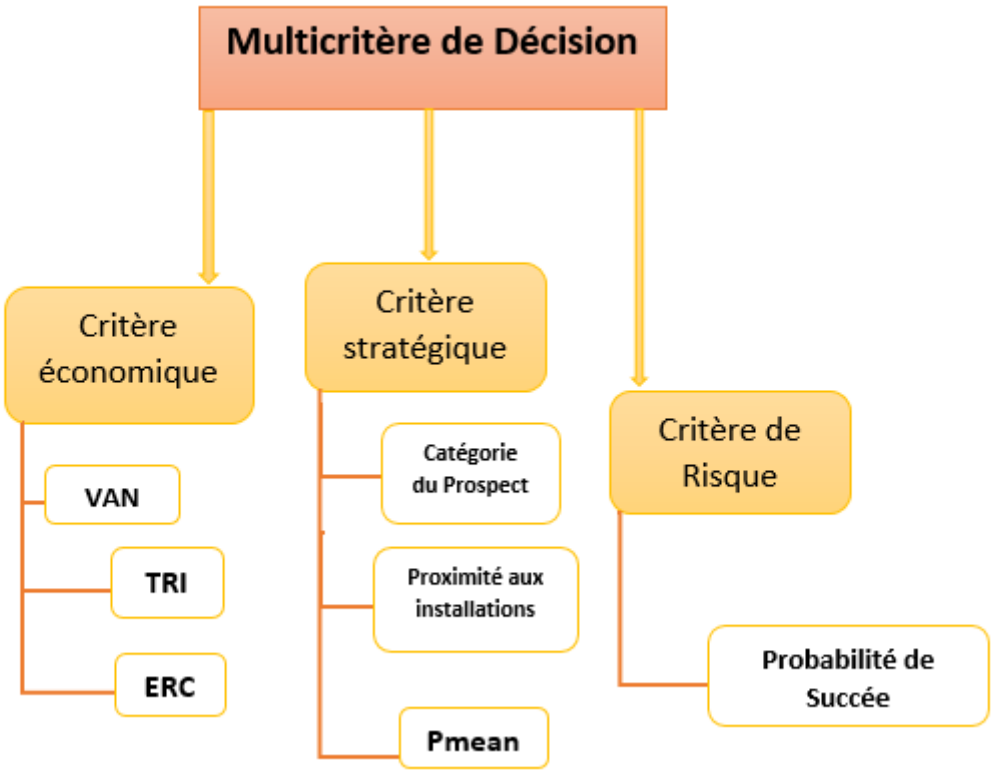


FIGURE 2.4 – Les critères de décision.

2.6 L'évolution d'investissements dans un projet EP

L'activité Exploration-Production n'est pas une activité indépendante de l'environnement économique, de la géopolitique mondiale, et de plusieurs autres facteurs qui affectent l'activité EP, ce qui explique les chiffres en conflit, et imprévu de la tendance de cette activité.

2.6.1 Evolution des investissements EP dans le monde

En 2022, les investissements mondiaux en amont ont connu une reprise spectaculaire avec une augmentation de 39% (soit 141 milliards de dollars), portant le total à 499 milliards de dollars. Cela représente le niveau le plus élevé depuis 2014 et dépasse de 13% le niveau d'avant la pandémie de COVID-19. L'Amérique du Nord a enregistré la plus forte augmentation des dépenses, avec une hausse de 53% (soit 61,7 milliards de dollars) en seulement un an [37].

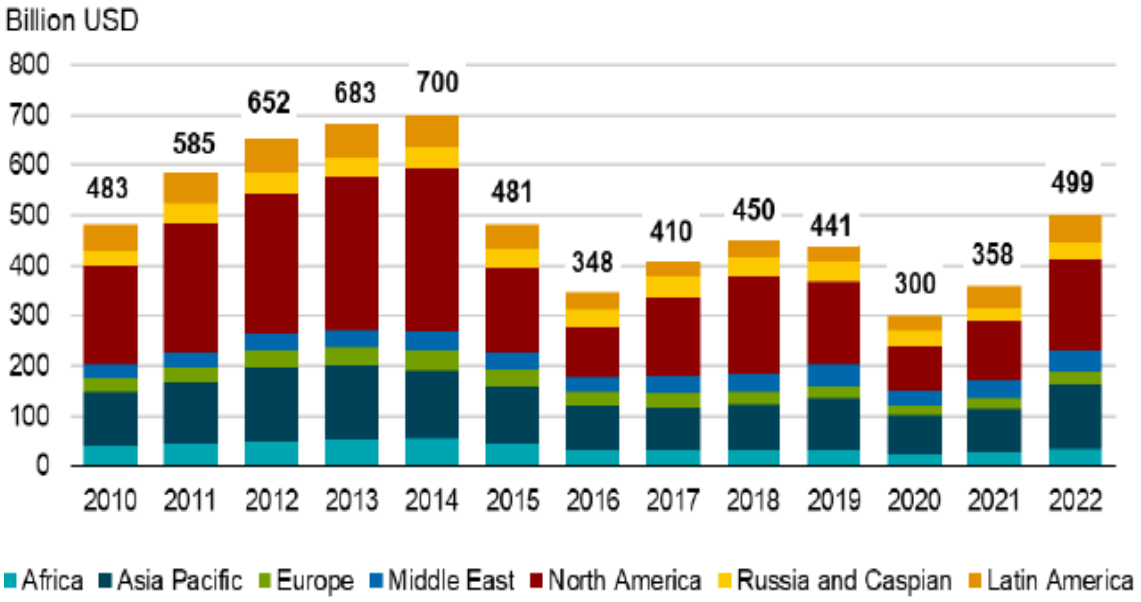


FIGURE 2.5 – pétrole et gaz en amont de capeux[37].

Il est essentiel de noter que les investissements en amont devront atteindre 640 milliards de dollars par an d'ici 2030 pour répondre à la demande future et compenser la baisse de production. Bien que les investissements en 2022 aient atteint un niveau record et affiché la plus forte augmentation de tous les temps, il sera nécessaire d'augmenter encore davantage ces investissements pour éviter une pénurie mondiale d'approvisionnement au cours de la prochaine décennie.

Il est prévu que les investissements annuels en amont passent de 499 milliards de dollars en 2022 à 640 milliards de dollars en 2030, avec un total cumulatif de 4,9 billions de dollars entre 2023 et 2030 pour répondre aux besoins du marché. Cette augmentation est indispensable même si la croissance de la demande ralentit vers un plateau. Il s'agit d'une demande cruciale de la part des investisseurs et des entreprises, d'autant plus qu'elle est devenue critique en raison du ralentissement observé en 2020-2021 et de l'érosion des réserves sur le marché[37].

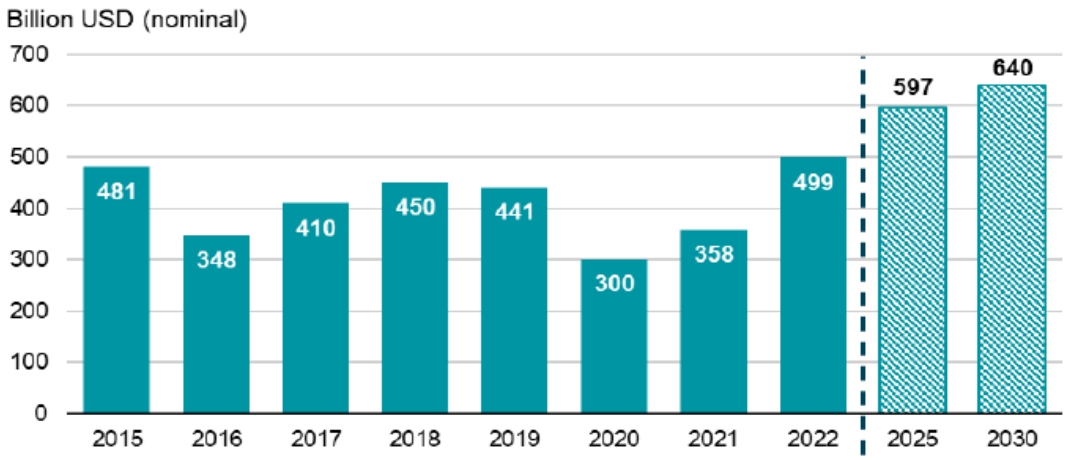


FIGURE 2.6 – pétrole et gaz en amont

Un investissement continu en amont est tout aussi nécessaire, sinon plus, pour compenser la production prévue pour répondre à la croissance future de la demande. Sans forages supplémentaires, nous estimons que La production de l'OPEP diminuerait de 9 millions de barils par jour d'ici 2026 et de 17 millions de barils par jour. (ou 31%) d'ici 2030.

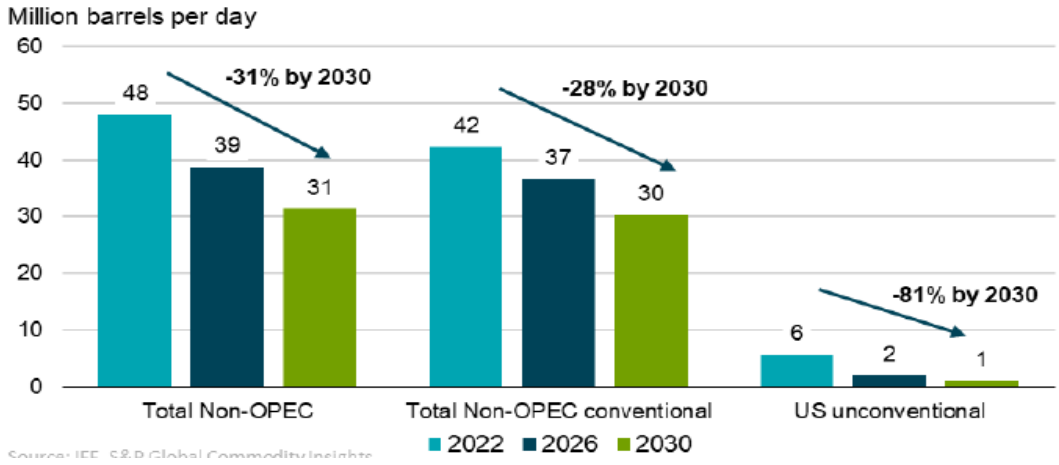


FIGURE 2.7 – Baisse prévue de la production des pays non membres de l'OPEP en supposant l'absence de forage supplémentaire[37].

2.6.2 La guerre en Ukraine et comment l'OPEC a maintenu la stabilité du marché pétrolier en 10 mois

Avec le déclenchement de la guerre en Ukraine, les marchés pétroliers mondiaux ont connu un état de confusion sans précédent au cours des décennies, et l'OPEC + al-

liance a travaillé pour contrer une hausse des prix du pétrole qui ont touché 140 $ par baril, la première fois depuis la crise financière mondiale dans une crise similaire. Face à cette confusion, la réunion de l'Alliance est venue avec une insistance sur une augmentation progressive de la production, prévue avant l'invasion russe de l'Ukraine, estimée à 400000 barils par jour de pétrole brut, Certains d'entre eux l'accusent d'avoir des antécédents politiques derrière ses décisions.

Alors que la guerre en Ukraine se poursuivait, pendant plusieurs mois, l'augmentation graduelle de la production de pétrole de l'OPEC + faisait partie d'un plan pré-préparé, littéralement mis en œuvre, qui a fait baisser les prix à plusieurs mois dans la région de 95$ le baril, avant de chuter dans les dernières semaines de l'année (2022), autour de 80 $ le baril.

Aujourd'hui (24février) s'achève la première année de la guerre en Ukraine, qui n'a pas encore été dépassée, mais qui s'intensifie de jour en jour, pour continuer à semer la confusion sur les marchés mondiaux de l'énergie et susciter d'autres doutes sur les perspectives d'avenir[44].

Dans ce contexte, il est maintenant certain que les équilibres des marchés mondiaux de l'énergie après l'invasion russe de l'Ukraine ne seront pas les mêmes qu'avant ; l'Europe est en train de conduire un changement majeur alors qu'elle cherche à s'éloigner des importations de combustibles fossiles en provenance de Moscou.

Alors que la guerre en Ukraine éclatait, les prix du pétrole ont atteint des niveaux jamais vus depuis 14 ans, reflétant les coûts du carburant à l'échelle mondiale et déclenchant une vague d'inflation qui a confondu l'économie mondiale, qui a commencé à soupirer de soulagement après la crise de la pandémie de coronavirus.

À mesure que la demande mondiale diminuait et que l'OPEC et l'alliance réussissaient à équilibrer les marchés, les prix du pétrole sont revenus aux niveaux d'avant la guerre d'Ukraine, la même trajectoire que les prix du gaz après avoir atteint un sommet l'an dernier (2022), soutenus par l'augmentation des approvisionnements en GNL, en particulier en provenance des États-Unis.

Les répercussions de la guerre en Ukraine ont également eu une incidence sur les énergies renouvelables, mais elles ont eu un effet positif sur le monde entier en mobilisant d'énormes investissements, afin de ne pas rester à la merci de la volatilité des prix des combustibles fossiles [44].

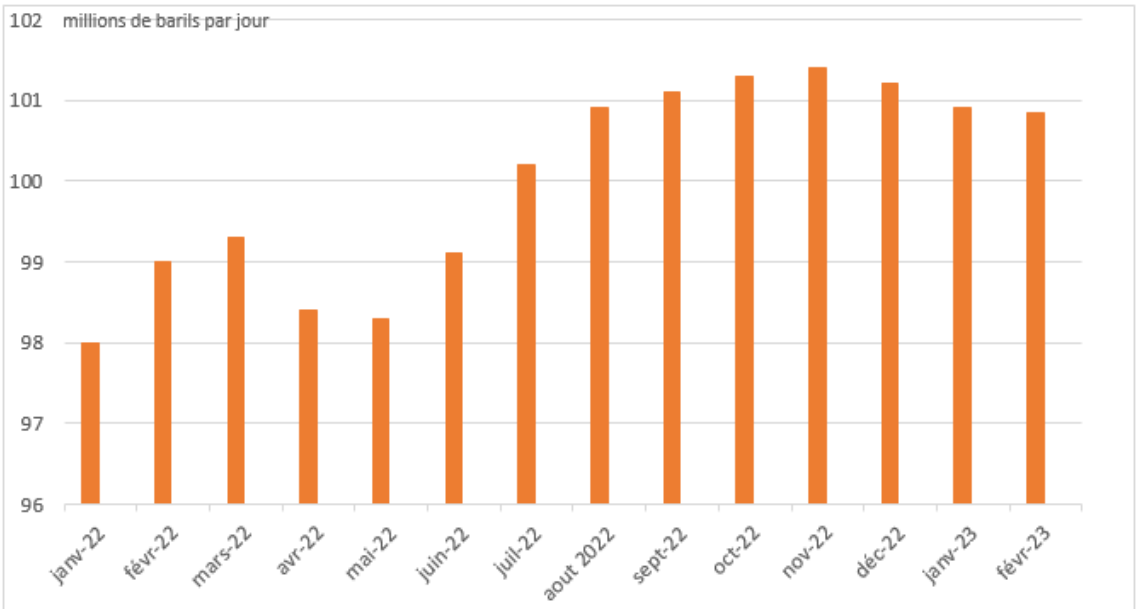


FIGURE 2.8 – Production mondiale de pétrole brut et de combustibles liquides[37].

2.6.3 Evolution des investissement EP en Algérie

L'Algérie est arrivée en tête des indices d'investissement en matière d'explorations pétrolière et gazière au niveau arabe durant le premier trimestre de 2022, indique un communiqué de l'Organisation des pays arabes exportateurs de pétrole (OPAEP) après la découverte par le Groupe SONATRACH de trois explorations pétrolière.

Les investissements de recherche et exploration (géologie, géophysique, forage et équipements) passe de 2 420 MM$ en 2014 à 735 MM$ en 2021, soit une diminution de plus de la moitié. Où la période avant 2014, est marquée par une intensification de l'effort d'investissements pour le maintien de la production des champs déjà en déclin. Les investissements dans le segment Exploration-Production ont représenté l'essentiel des investissements réalisés en 2020 (soit 89 % du total), avec un niveau de 5,1 Milliards US$ équivalent, Ce niveau est en baisse de 31% par rapport à l'année 2019, suite à la révision à la baisse des projets et programmes liés au forage et au développement des gisements, en raison principalement de la baisse drastique du prix du pétrole et des mesures de confinement liées à la crise sanitaire ayant impacté l'avancement des projets. Les investissements suivent une continuation de tendance des investissements dans l'amont pétrolier au monde, après un cycle haussier, avant l'année 2015. La légère reprise des investissements en 2017 a été suivit de deux années de fort recul. Les investissements sont à nouveau en baisse en 2019, avec une diminution d'environ 19% par rapport à 2017.

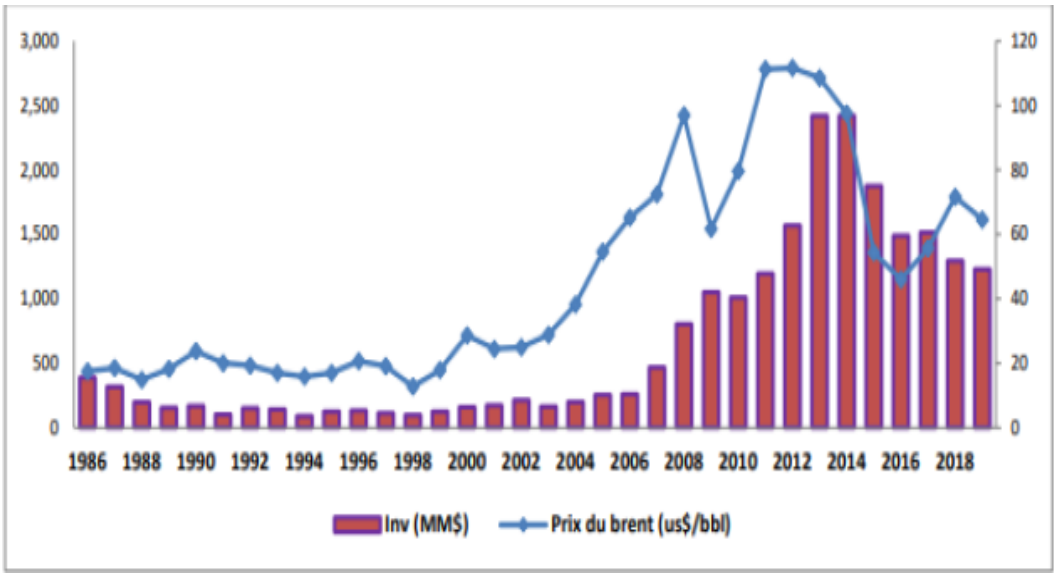


FIGURE 2.9 – Investissements en recherche et exploration et prix du Brent[1986-2019][51].

Les découvertes enregistrées sur la période [1986-2019], sont de l'ordre de 373 découvertes. L'année 2019 a été marquée par un fort repli du nombre de découvertes réalisées en effort propre, par rapport à 2018, soit une diminution de 66%, passant de 30 découvertes enregistrées en 2018 à 18 en 2019. De plus, l'année 2020 a connu une augmentation (23 découvertes) par rapport à l'année précédente avant qu'elles diminues encore une fois en 2021 avec un nombre de 15 découvertes . Le taux de succès (découvertes/forage Wild-cat) recul de 52% en 2018 à 38% en 2019 avec un taux moyen sur toute la période de 39%.

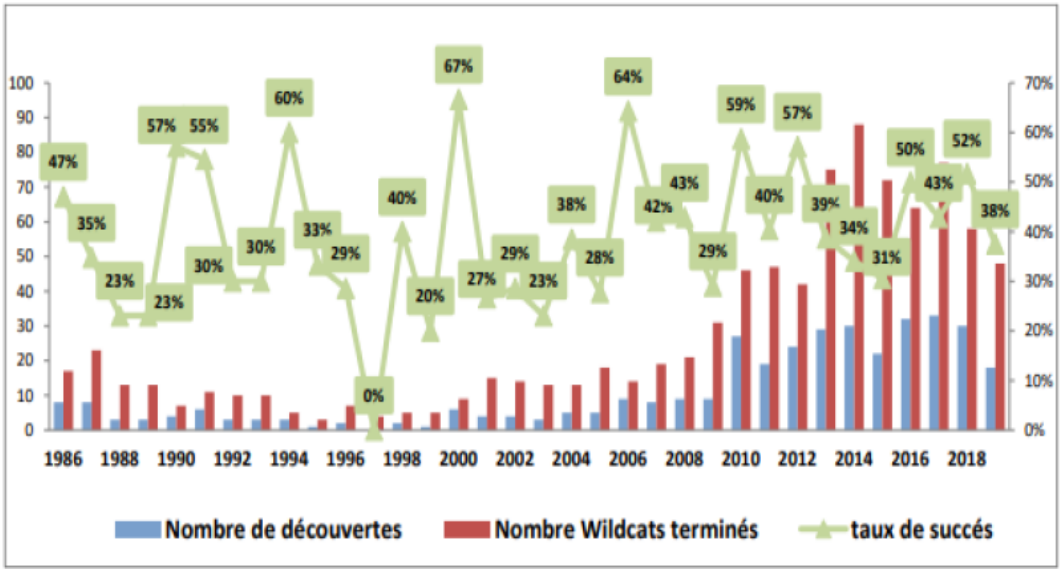


FIGURE 2.10 – Evolution du nombre de découvertes, Wildcat et taux de succès[51].

2.7 Production et consommation nationale

La production d'hydrocarbure en Algérie a connu une augmentation de 5,3% durant les deux dernières années[51], elle passe de 186,89 millions de tonnes équivalent pétrole (TEP) en 2019 à 175,9 TEP en 2020 (dont 123 milliards m3 de gaz) dont 59,2 Millions TEP ont été commercialisés au niveau national avec une baisse de 1% par rapport à 2019[49].En 2021 la production a augmentée avec un taux de 5% par rapport à l'année 2020 pour atteindre 185,2 millions de TEP (dont 132 milliards m3 de gaz). La demande intérieure sur les produits énergétiques, notamment la demande en gaz naturel qui dépasse les 45 milliards en 2021. Les recettes en hydrocarbures ont connes un recul sensible atteignant les 24,6 milliards$, fin septembre 2019 contre 29 milliards $ durant la même période en 2018.

Volume des ventes au marché national		2020	2019
Produits Raffinés	10^6 tonnes	12.9	12.0
GPL	10^6 tonnes	2.4	2.4
Gaz Naturel	10^6 m^3	44.8	46.1
Total	10^6 TEP	59.2	59.5

FIGURE 2.11 – Volume des ventes au marché national[52].

En 2020 Le volume des ventes des hydrocarbures, au marché national a atteint 59 Millions TEP, en baisse de 1% par rapport à 2019. Cette baisse a été favorisée par la diminution de la consommation du gaz naturel due à la douceur du climat et aussi à la récession de l'activité économique engendrée par les mesures de confinement prises pour la lutte contre la pandémie de la Covid-19. En revanche la consommation nationale a augmenté à 47 millions TEP (fin septembre 2021).

Conclusion

L'évaluation d'investissement dans un projet d'exploration-production met en évidence les étapes clés du projet, les critères d'évaluation (économiques, de risque et stratégiques), ainsi que les facteurs influençant les investissements. Cette évaluation financière repose sur l'analyse des flux de trésorerie, prenant en compte les revenus, les dépenses, l'amortissement, l'actualisation et d'autres variables telles que l'inflation et le prix des hydrocarbures. Les entreprises du secteur pétrolier et gazier doivent mener une analyse approfondie pour prendre des décisions éclairées sur la viabilité et la rentabilité des projets d'exploration-production, tout en tenant compte des conditions du marché et des opportunités dans différentes régions.

Cette multiplicité nous pousse à faire appel à l'aide à la décision multicritère et par conséquent de mettre à la disposition des décideurs les techniques de la recherche opérationnelle pour les aider dans leurs choix, c'est ce que nous verrons dans les prochains chapitres.

Chapitre 3

Aide à décision multicritère

Introduction

L'aide à la décision multicritère se présente comme une alternative aux méthodes d'optimisation classiques basées sur la définition d'une fonction unique, souvent exprimée en terme économique et qui reflète la prise en compte de plusieurs critères, souvent conflictuels. L'aide à la décision est donc un processus qui utilise un ensemble d'information disponible à un instant donné, afin de formuler un problème et aboutir à une décision sur un objet précis. Dans le cadre de la décision multicritère, l'objet de la décision est formé par un ensemble d'action ou alternatives.

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser aux outils méthodologiques qui seront utilisés dans la démarche d'aide multicritère à la décision constituant la base de la résolution de notre problème.

3.1 Problème monocritère et multicritère

On définit un problème décisionnel comme monocritère lorsque la prise de décision se base sur un seul critère (objectif ou fonction économique à optimiser dans la programmation linéaire par exemple).Un problème monocritères est mathématiquement défini comme suit :

$$\begin{cases} max \quad g(a) \\ a \in \text{A} \end{cases}$$

Où :

$A = \{\text{a}_1, a_2, ..., a_n\}$ n$\geq$ 2, est ensemble des n actions potentielles, $a_i, i = 1, 2, ...n$.

g :a $\longrightarrow R$

g$\longrightarrow$ g(a), est le critère d'évaluation.

En décision multicritére, les différentes alternatives se présentant au décideur sont décrites par un certain nombre de critéres. Les valeurs des alternatives sur ces critéres représentent la prise en compte de points de vue diversifies, en général, non réductibles a un seul critére. De plus, la notion d'optimisation "dans l'absolu" est vide de sens en décision multicritére, car il n'existe généralement pas d'alternative optimisant tous les critéres simultanément. Il est donc nécessaire de prendre en compte de l'information supplémentaire, en particulier l'importance relative de chaque critére et les relations existantes entre les différents critéres. Il existe une grande diversit e d'approches et de modéles en theorie de la décision multicritére.

Un problème multicritère d'aide à décision peut etre formulé comme suit :

$$max\{g_1(a), g_2(a), ..., g_j(a)/\text{a} \in \text{A }\}$$

Où :

A : un ensemble d'actions potentielles.

$(g_j, j = 1, 2, 3, ..., k)$: un ensemble de critères d'évaluation. Notons la possibilité de considérer certains critères à maximiser et d'autres à minimiser.

Les problèmes multicritère sont d'une importance dans la majorité des problèmes économiques, industriels, politiques, financiers . . . etc [8].

3.2 Notions de base de l'aide multicritère à la décision

3.2.1 Composantes d'un problème de décision

1.La décision : Décider, par définition, c'est choisir entre plusieurs alternatives l'action à entreprendre, c'est-à-dire choisir une action parmi celles qui sont possibles. Une décision est une action de décider, c'est-à-dire de faire un choix face à un problème.

2.Le décideur : Le décideur est généralement une personne ou un groupe de personnes qui sont supposées connaître le problème multicritère. Le décideur se base sur son expérience et ses connaissances pour exprimer des relations de préférences entre différentes solutions. Dans ce contexte, le décideur est souvent épaulé par un analyste, qui joue le rôle d'interface entre le décideur et l'aspect mathématique du processus de décision multicritère[9].

3.L'analyste : L'analyste on l'homme d'étude est celui qui prend en charge l'aide à la décision .Mettant en oeuvre des modèles dans le cadre d'un processus de décision, il contribue à l'orienter et à la transformer [17].

4.Action on altrenative : une action est un objet, une décision ou un candidat qui, dans un problème de décision, apporte un choix possible, et ce, le plus souvent en concurrence avec d'autres actions.

3.3 Les seuils

La pratique montre qu'il existe souvent une zone intermédiaire dans laquelle le décideur hésite entre les deux réponses ou donne des réponses contradictoires suivant la maniére dont il est interrogé. Cette constatation conduit à l'introduction d'un mod'ele de préférence faisant intervenir deux seuils distincts :

3.3.1 Le seuil d'indifférence

Le seuil d'indifférence noté 'q',en dessous duquel le décideur marque une indifférence nette.

3.3.2 Le seuil de préférence

Le seuil de préférence noté 'p', au dessus duquel le d´ecideur montre une pr´ef´erence stricte.

3.3.3 Le seuil de veto

Le seuil de veto, noté 'v', est le plus petit écart entre les performances de deux actions potentielles au delà duquel l'utilisateur estime qu'il n'est plus possible d'accepter plus mauvaise des deux actions soit considérée globalement comme au moins aussi bonne que la meilleure, même si ses performances sur les autres critères sont toutes meilleures. Selon Roy et Bouyssou [16], le principe d'un seuil de veto est de conférer à un critère, le pouvoir de s'opposer à lui seul au surclassement quelque soit le poids qu'on lui a accordé.

3.4 Critères et famille cohérente de critères

3.4.1 Critères

Un critère est une fonction g, définie sur l'ensemble des actions A, qui prend ses valeurs dans un ensemble totalement ordonné, et qui représente les préférences de l'utilisateur selon un point de vue[12].

3.4.2 La cohérence des critères

On appelle famille cohérente de critéres toute famille F$\{g_1, g_2, ...g_n\}$ [17] ;
conforme aux trois conditions suivantes :

1.Exhaustivité : si deux actions a_i et a_k sont telles que $g_i(a_i)$=$g_j(a_k)$, $\forall$j $\in$ {1,2,....N},alors il est impossible de diff erencier a_i et a_k dans un modéle de préférences globales fondées surF.

$$g_j(a_i)= g_j(a-k)\ \forall\ \text{j} \in \{1,2,...,\text{N}\} \Longrightarrow a_i = a_k.$$

2.Cohésion :

$\forall$j $\neq$l $g_j(a_j)$= $g_j(a_k)$ et $g_l(a_i) > g_l(a_k) \Longrightarrow$ a_i est préféree à a_k.

3.Non redondance : Pas de crit'eres dupliqu es, il faut que le nombre soit tel que la suppression d'un crit'ere remettrait en cause les deux conditions précédentes.

3.4.3 Échelle d'un critère

L'appréciation des actions selon un critère donné sur un axe de signification conduit à l'établissement de deux échelles : échelles d'état et échelle de préférence.

1.Échelle d'état : Elle représente les unités des évaluations de chaque action par rapport à chaque critère. Elle peut être associée à des appréciations quantitative ou qualitatives.

2.Échelle de préférence : Elle représente les évaluations de la première échelle dans un système muni d'une structure d'ordre propre au décideur, et qui correspondant au sens de préférence des actions selon l'objectif recherché par rapport à ce critère[15].

3.4.4 Poids des critères

L'importance donnée par le décideur à chacun des critères n'est pas la même. Les méthodes d'aide à la décision traduisent cette importance relative par des nombres, souvent appellés "poids".

3.5 Relations binaires dans un ensemble

3.5.1 La relation binaire

Une relation binaire sur deux ensembles X et Y est un ensemble de couples (x,y) composé des éléments x dans X et y dans Y . C'est-a-dire qu'il s'agit d'un sous-ensemble du produit cartésien XxY.

3.5.2 Les relations d'ordre et d'équivalence

1.La relation d'équivalence :

Une relation binaire $\Re$ définie sur un ensemble A est une relation d'équivalence si cette relation est :

— Réflexive, $\forall x \in A, x\Re x$.

— Symétrique, $\forall (x, y) \in A, x\Re y \Rightarrow y\Re x$.

— Transitive, $\forall (x, y, z) \in A, (x\Re y \text{ et } y\Re z) \Rightarrow x\Re z$.

2.La relation d'ordre :

Une relation binaire R définie sur un ensemble A est une relation d'ordre si cette relation est :

— Réflexive : $\forall x \in A$, $x \Re x$.

— Anti-symétrique : $\forall (x, y) \in A$, $(x \Re y$ et $y \Re x) \Rightarrow y = x$.

— Transitive : $\forall (x, y, z) \in A$, $(x \Re y$ et $y \Re z) \Rightarrow x \Re z$.

Ces différentes définitions vont nous permettre de construire des relations de comparaison (on les appellera aussi des relations de préférence). Ces relations nous permettront, ensuite, d'ordonner les éléments de l'ensemble sur lequel on effectue ces comparaisons.

Il existe plusieurs types d'ordres :

a.Préordre : Un préordre est une relation réflexive et transitive.

b.Ordre : Un ordre est un préordre antisymétrique (c'est donc une relation d'ordre).

3.La relation de préordre :

— **préordre total :** Un préordre total est une relation de préordre pour laquelle tous les éléments d'un ensemble peuvent être mis en relation : l'incomparabilité entre deux éléments n'est pas permise.

— **préordre partiel :** Un préordre partiel est une relation de préordre pour laquelle certains éléments d'un ensemble ne peuvent pas être mis en relation : l'incomparabilité entre deux éléments est autorisée[12].

3.6 Relation de dominance

— **Dominance** Étant donnée deux vecteurs x et y de R^m, x domine y, si et seulement si, $x_j \geq y_j$; j = 1,2,... n, avec au moins une des inégalités est stricte, on note x $\geq y$.

— **Dominance stricte** Étant donnée deux vecteurs x et y de R^m , x domine strictement y, si et seulement si $x_j > y_j$, j = 1, 2,....,n, on note x > y.

3.6.1 Action efficace

— **Efficacité :** Une action a est dite efficace si et seulement s'il n'existe aucune action b ∈ A, tel que : z(b) domine z(a) [12].

3.6.2 Le point idéal

Le point de coordonnées $(Z_1^*;.....;Z_m^*)$, ou pour tout j∈(1 ;... ;n).

$$z_j^* = \begin{cases} maxg_j(a) & \text{si le critére j est a maximiser} \\ ming_j(a) & \text{si le critére j est a minimiser} \end{cases}$$

Nous notons a^*j la meilleure action pour le critère j :

$g_j(a^*) = z_j^*$ [29].

3.6.3 La matrice des gains

La matrice des gains est la matrice G(m x m) dont l'élément général

$G_kl = g_k(\hat{a}^l)$

Avec k,l = 1,....,m C'est donc la matrice qui reprend, pour chaque action $\hat{a}$ ses évaluations suivant tous les critères , en particulier

$G_kl = z_l^*$

3.6.4 Le point nadir

Le nadir est un point qui reprend la pire solution efficace, il est estime par le point de coordonnées $(z_1, ..., z_m)$ ou[13] :

$$\underline{z}_j = \begin{cases} min_l G_j l & \text{si le critére j a maximiser} \\ max_l G_j l & \text{si le critére j est minimiser} \end{cases}$$

pout tout j ∈ $(1, ..., m)$

3.6.5 Le point anti-idéal

Le point de coordonnées $(\overline{z}_1, ..., \overline{z}_m)$ ou [13] :

$$\overline{z}_j^* = \begin{cases} maxg_j(a) & \text{j= 1,....,m dans le cas de maximisation} \\ ming_j(a) & \text{j = 1,....,m dans le cas de minimisation} \end{cases}$$

3.7 Les étapes de l'Aide à la Décision MultiCritère

Nous présentons les étapes principales de l'aide multicritère à la décision [10] :

— **Définition du problème :** la première étape de l'aide multicritère à la décision consiste à cerner la nature du problème auquel le décideur se trouve confronté en le formulant soit en une problématique de choix p_α, de tri $p_\beta$ou de rangement p_γ et le type de solution qu'il souhaite dégager.

— **Définition de l'ensemble des actions potentielles :** cette étape consiste à identifier l'ensemble des actions ou alternatives sur lesquelles va porter la décision.

— **Construction des critères :** la construction des critères est une étape délicate qui nécessite une compréhension du problème posé ; tout d'abord il s'agit d'identifier les caractéristiques des actions considérées et puis de dégager les critères qui peuvent évaluer les actions et peuvent décrire le résultat de la comparaison de deux actions à partir de leurs évaluations ; les critères construits doivent former une famille cohérente de critères.

— **Evaluation des actions :** il s'agit de mesurer, de juger chaque action suivant tous les critères considérés.

— **Définir les différents seuils :** cette étape consiste à estimer les seuils d'indifférence qj, de préférence pj et de veto v j lorsque le décideur marque une incertitude dans l'évaluation des performances liées au j ème critère .

— **Pondération des critères :** cette étape à pour but de préciser l'importance (poids) relative aux critères ;parmi de nombreuses techniques de pondération , en voici quelques unes[24] :

a) La notation, qui demande au décideur de noter sur une échelle de 1 à 10 l'importance qu'ils attribuent à chaque critère, cette méthode étant la plus communément utilisée .

b) La méthode de distribution des points, qui demande au décideur de répartir 100 points en fonctions de l'importance accordée aux critères.

c) Hiérarchisation des critères (catégorisation), cette technique demande au décideur de placer les critères dans des catégories telles que : trés important, moyennement important, peu important.

— **Choix d'une méthode :** il s'agit de définir la méthode la plus appropriée pour traiter un problème bien défini .

— **Analyse de robustesse :** l'analyse de robustesse consiste à sensibiliser la solution de base en faisant varier les différents paramètres : le poids des critères, le seuil d'indifférence qj, le seuil de préférence pj et le seuil de veto v j ; si les résultats ne sont pas sensibles aux variations des valeurs des paramètres alors la solution est robuste.

3.8 Modélisation des préférences

Les préférences sont essentielles dans la vie des individus aussi bien que des collectives. Leur modélisation constitue une étape indispensable dans des disciplines comme l'économie, la recherche opérationnelle, la théorie de décision, la psychologie, la sociologie,. . .. Confronté à la comparaison de deux objets a et b, un individu aura, le plus souvent l'une des trois réactions suivantes :

— Préférence pour l'un des deux objets.

— Indifférence entre les deux objets.

— Refus ou impossibilités de comparaison.

Nous noterons :

— aPb (resp. bPa) si a est préféré à b (resp. b préféré à a).

— aIb si'li y a indifférence entre a et b.

— aRb si il y a incomparabilité entre a et b,(ce qui signifie que l'on n'a ni aP b, ni aIb, ni bP a). Ce sont les trois situations que l'on retrouve le plus souvent dans la littérature traitant la modélisation des préférences [18].

Le tableau suivant récapitule les quatre situations fondamentales représentant les préférences par rapport à deux actions :

Situation	Définition	Relation binaire
Indifférence	Elle correspond à l'existence de raisons claires et positive, qui justifient une équivalence entre les deux action	I : relation symétrique
Préférence stricte	Elle correspond à l'existance de raisons claires et positives, qui justifient une préférence significative en faveur de l'une des deux actions	P : relation asymétrique (irréflexive)
Préférence faible	Elle correspond à l'existence de raisons claires et positives qui infirment une préférence stricte en faveur de l'une des deux actions, mais ces raisons sont insuffisantes pour en déduire soit une préférence stricte en faveur de l'autre, soit une indifférence entre ces deux actions	Q :relation asymétrique
Incomparabilité	Elle correspond à l'absence de raisons claires et positives justifiant l'une des trois situations précédentes	R : relation symétrique irréflexive

TABLE 3.1 – Modèle de préférence

3.8.1 Représentation graphique d'une structure de préférence

Nous adaptons les conventions graphiques suivantes pour représenter les trois relations constitutives d'une structure de préférence.

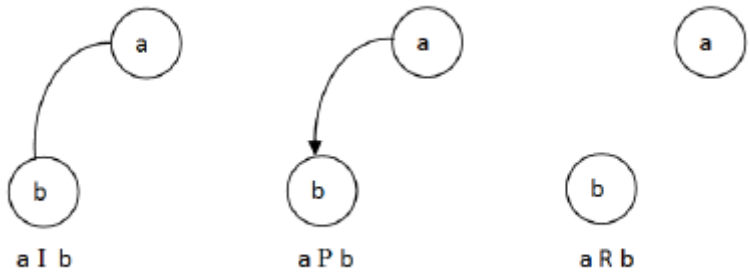


FIGURE 3.1 – Représentation graphique d'une structure de préférence

3.8.2 Représentation matricielle d'une structure de préférence

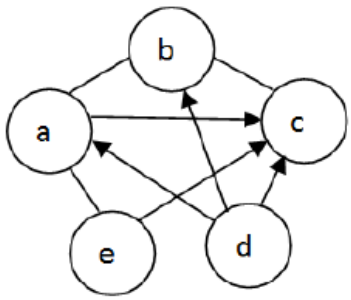
Il peut être commode de représenter une structure de préférence au moyen d'un tableau (d'une matrice) comme l'exemple ci-dessous [22].

Il arrivera souvent que l'on définisse un codage permettant de remplacer les P,I,R et P^- l'inverse P par des nombres, de manière à simplifier l'application d'algorithmes sur ordinateur [21].

1.Représentation matricielle :

	a	b	c	d	e
a	I	I	P	P^-	I
b	I	I	I	p^-	R
c	P^-	I	I	P^-	P^-
d	P	P	P	I	R
e	I	R	P	R	I

2.Représentation graphique :



3.8.3 Le tableau des performances

Soit un ensemble d'actions potentielles B (pouvant être égal à A) et $(g_1, ..., g_n)$, n critères formant une famille F. On appelle tableau des performances de B sur F le tableau contenant les valeurs de $g_j(a)$ pour tout j appartenant à F et tout a appartenant à B ainsi les caractéristiques des éventuelles fonctions seuils $q_j(g_j(a)), p_j(g_j(a))$.

Critères	g_1	g_2	...	g_i	...	g_n
Seuils	p_1	p_2	...	p_i	...	p_n
	q_1	q_2	...	q_i	...	q_n
Actions				.		
a_1				.		
a_2				.		
.				.		
.				.		
.				.		
a_i	...	...	...	$g_j(a_i)$		
.						
.						
a_n						

3.9 Les modèles d'agrégation , Fonction d'utilité et Relation de surclassement

3.9.1 Les modèles d'agrégation

1.Modèle additif : C'est la forme la plus simple et la plus utilisée soit :

g_j : A $\longrightarrow$R , j = 1,...,n Pour a $\in$A la fonction d'utilité additif s'écrit :

U(a)=$\sum_{j=1}^{n} U_j(g_j(a))$ Tel que :

U_j, j = 1,...,n est une fonction strictement croissante et à valeur réelles.

2.Modèle multiplicatif : Pour a $\in$ A la fonction d'utilité multiplicatif s'écrit : Tel que :

U_j, j = 1,...,n est une fonction strictement croissante et à valeur réelles.

$$\text{U(a)}=\prod_{j=1}^{n} U_j(g_j(a))$$

3.9.2 Fonction d'utilité

Il est souvent supposé qu'un décideur se base sur une certaine fonction pour formuler ses préférences [20]. Cette fonction est appelée fonction d'utilité ou fonction de valeur.
Une fonction d'utilité est une fonction u :
$R^k \longrightarrow R$ qui traduit les préférences du décideur comme suit.
Soit $g_1 et g_2$ deux vecteurs de critères :
g_1 est meilleur que g_2 si u$(g_1) > u(g_2)$.
g_1 et g_2 sont indifférents si $u(g_1) = u(g_2)$.

3.9.3 Relation de surclassement

On dit qu'une alternative a surclasse une alternative b et on note aSb si, étant donné ce que l'on sait des préférences du décideur, de la qualité des évaluations et de la nature du problème, il y a suffisamment d'arguments pour admettre que a est au moins aussi bonne que b et qu'il n'y a pas d'arguments importants prétendant le contraire [19].

3.10 Problématique d'approche multicritère d'aide à la décision

La problématique est la manière dont l'aide à la décision doit être envisagée [22]. Elle exprime les termes dans lesquels le décideur ou l'homme d'étude pose le problème et traduit le type de la prescription qu'il souhaite obtenir. Roy [21] distingue quatre problématiques, de base pour tout problème de décision multicritère doit se ramener nécessairement à l'une d'entre elles.

3.10.1 Problématique de choix P_α

La problématique de choix, dite aussi problématique alpha, consiste à chercher un sous-ensemble de A bien sûr aussi restreint que possible, contenant les meilleures actions ou a défaut les actions les plus satisfaisantes. Donc, cette problématique donne comme résultat un choix ou une procédure de sélection.

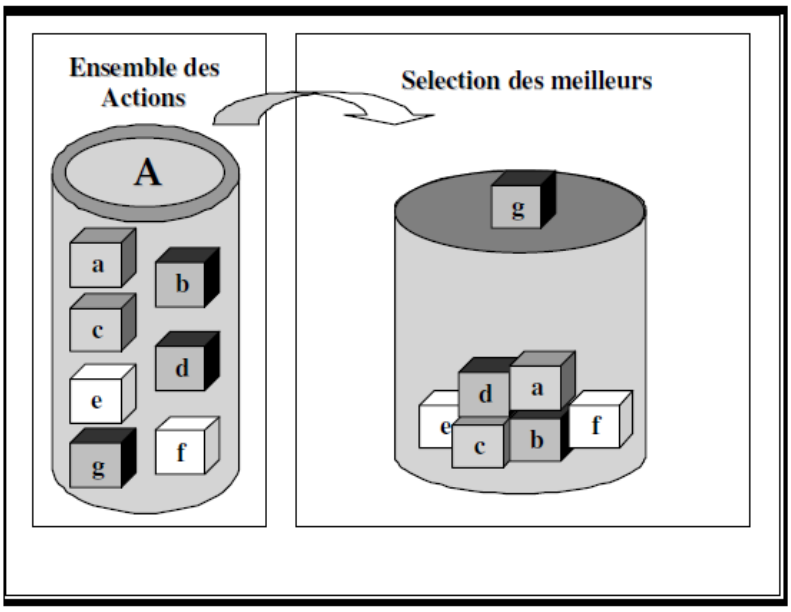


FIGURE 3.2 – Problématique de choix

3.10.2 Problématique de tri P_β

La problématique de tri, dite aussi problématique bêta, est celle qui cherche à affecter chacune des actions potentielles à une catégorie, celles-ci sont définies à partir de la valeur intrinsèque des actions qu'elles sont destinées à recevoir, le but de cette méthode est de séparer les bonnes actions des moins bonne.

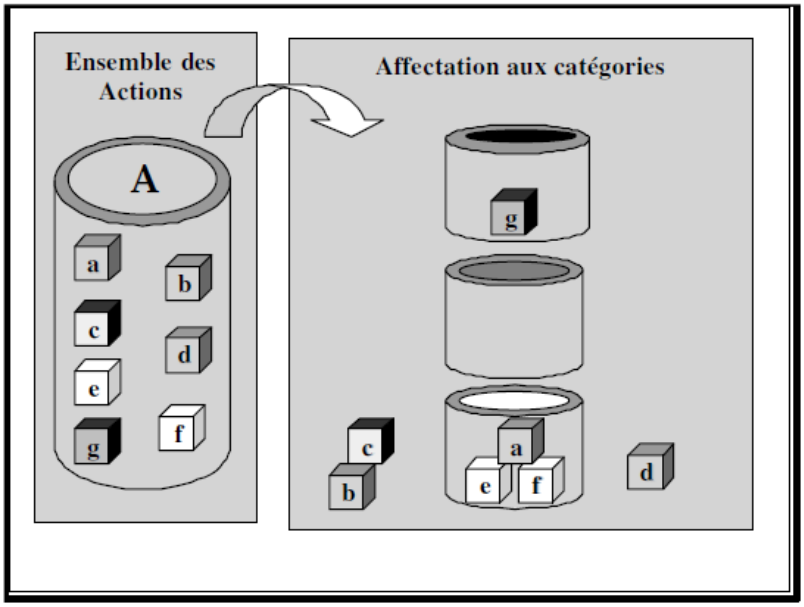


FIGURE 3.3 – Problématique de tri

3.10.3 Problématique de rangement P_γ

La problématique de rangement, dite aussi problématique gamma, consiste à regrouper les actions en classes d'équivalence, lorsqu'on se situe dans cette problématique, les actions sont classées de la meilleure à la moins bonne pour choisir ensuite K actions parmi les meilleures.

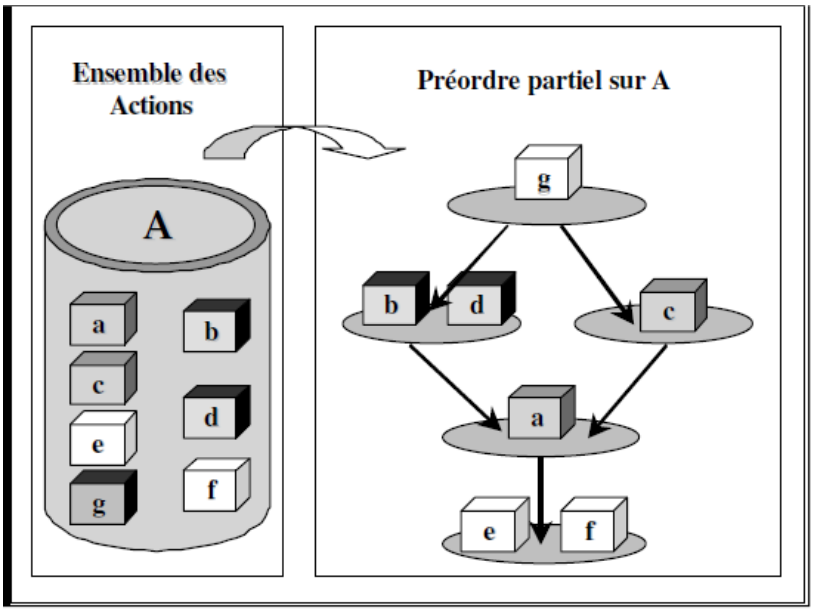


FIGURE 3.4 – Problématique de rangement

3.10.4 Problématique de description P_δ

Il n'est pas nécessaire que le résultat d'une aide à la décision soit une prescription (choix d'une ou d'un ensemble d'actions comme recommandation au décideur) mais il peut s'agir aussi de déterminer l'ensemble des actions potentielles A, une famille de critères F ou des valeurs possibles que peuvent prendre certains paramètres (seuil d'indifférence et de préférence, poids, niveau d'aspiration).
Ce type de problématique est approprié lorsque le décideur rencontre des difficultés à définir le problème, à exprimer ses points de vues ou le type de résultat qu'il souhaiterait obtenir.

3.11 Analyse

À la fin de l'application d'une méthode d'aide à la décision, on procède à une phase d'analyse de sensibilité et d'analyse de robustesse. Ces deux analyses permettent de vérifier la "fiabilité" du résultat fourni par la méthode ou la sensibilité du résultat vis-à-vis des paramètres choisis par l'utilisateur[12].

3.11.1 analyse de sensibilité

C'est une analyse consistant à répéter l'utilisation de la méthode d'aide à la décision originale en faisant varier les valeurs attribuées à l'origine aux différents paramètres de la méthode, valeurs qui sont souvent empreintes d'un certain arbitraire. Elle vise à définir les paramètres qui conditionnent le plus étroitement la solution choisie, c'est-à-dire où il suffit d'une faible modification pour changer la solution proposée.

3.11.2 analyse de robustesse

C'est une analyse cherchant à déterminer le domaine de variation de certains paramètres dans lequel un classement ou un choix reste stable. Elle sert à fournir à l'utilisateur une solution robuste, qui l'informe quant à la capacité de la solution à résister à des variations entre la réalité et le modèle censé la représenter.

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. Ce qui caractérise l'aide à la décision à la fois comme activité scientifique et comme activité professionnelle est son approche qualifiée de « formelle : langages pour réduire l'ambigüité de la communication humaine » et « abstraite : langages indépendants du domaine de discours ». Dans le chapitre suivant nous présenterons les méthodes d'aide multicritère à la décision, son classement, une présentation de quelques méthodes et ses limites.

Chapitre 4

Les Methodes d'aide à decision multicritére

introduction

L'application de l'aide à la décision face à un ensemble de critères au sein des organisations, nécessite une synergie d'efforts de plusieurs décideurs ayant différents intérêts, compétences et expériences afin que chacun d'eux mette à contribution son savoir-faire. Par conséquent, chaque décideur impliqué dans le processus de décision est invité à exprimer ses préférences, d'une part, sur l'importance des critères d'évaluation et, d'autre part, ont regardent de l'ensemble des alternatives potentielles, afin de défendre les intérêts du service de l'entreprise qui le représente, à savoir le service de la distribution, de la qualité et du développement durable, etc. grâce à cette synergie que les décideurs peuvent atteindre des résultats supérieurs à ceux qu'ils pourraient réaliser individuellement[Ayadi, 2010] .

Dans ce contexte, dans ce chapitre, nous avons présenté en débutant les méthodes d'utilité multi-attribut, notamment la méthode SMART, AHP et la méthode TOPSIS. Ensuite, nous avons exploré les méthodes de surclassement, telles que la méthode Electre I et Electre II. Enfin, nous avons abordé les avantages et les inconvénients des différentes méthodes de résolution.

4.1 Méthodes de l'utilité multiattribut

4.1.1 La méthode SMART : Simple Multi-Attribute Rating Technique

1.Présentation de la méthode :

Edwards [37] pense que si la modélisation des préférences est assez complexe, entre autres raisons à cause des erreurs de mesure, il serait intéressant de simplifier cette modélisation en mettant de l'avant une procédure simple pour obtenir les préférences réelles du décideur qui sont nécessairement subjectives. C'est ainsi qu'il a été conduit à développer la procédure SMART. Il constate que plusieurs expériences et simulations avec le décideur confirment qu'on obtient d'aussi une bonne approximation avec la fonction additive qu'avec d'autres formes non linéaires qui sont beaucoup plus complexes.

La procédure se présente comme suit :

— **Étape 1** : mettre les critères selon l'ordre décroissant d'importance. C'est une étape qui devrait déclencher une discussion entre le décideur et tous ses partenaires dans le processus de décision.

— **Étape 2** : déterminer le poids de chaque critère.

— **Étape 3** : faire la somme des coefficients d'importance et diviser chaque poids par cette somme. Cette étape permet de normaliser les coefficients d'importance relative entre 0 et 1.

— **Étape 4** : mesurer la localisation de chaque action sur chaque critère (uj(ai)). Les évaluations des actions se font sur une échelle variant de 0 (minimum possible) à 100 (maximum possible).

— **Étape 5** : déterminer la valeur de chaque action selon la somme pondérée suivante :

$$U(a_i) = \sum_{j=1}^{n} \pi_j \mu_j(a_i) \text{ ;i=1,2....m.}$$

— **Étape 6** : classer les actions selon l'ordre décroissant de $U(a_i)$.

2.Exemple d'application pour le cas des pieces de rechange dans le secteure automobile :

Pour cette étude de cas, nous nous sommes penchés sur le cas du département Pièces de rechange PR chez un distributeur automobile que nous appellerons DIS pour des raisons de confidentialité. la supply chain de DIS englobe plusieurs taches qui ne se rapportent pas au cœur du métier à savoir le transport national et le transit.

La volonté est certes là, mais devant la richesse et la diversité du marché du transit et du transport national, DIS est devant un dilemme : quel prestataires choisir pour assurer une relation win-win ?

Afin d'apporter une réponse à cette question, nous proposons d'utiliser la méthode SMART décrite précédemment et l'appliquer à notre cas d'étude.

Les offres reçues ont été examinées selon les critères suivants :

C1 : Honoraires du transitaire

C2 : Avance des droits de douane auprès de la douane

C3 : Frais de transport (camions porte conteneurs) et de manutention (élévateur au niveau du port) des conteneurs

C4 : Délais de livraison des palettes dépotées aux locaux de DIS

Ceci dit, les offres reçues se présentent comme suit :

Offre	Honoraires C1	Avance DD C2	Frais de transport C3	Délais de livraison C4
A1	2000	10000	3080	4 jours
A2	3000	20000	3000	7 jours
A3	1500	10000	3300	10 jours

Tableau des offres des transitaires

Après réunion avec les différents membres du comité de décision, nous attribuons à ces critères l'ordre suivant :

$C1 > C4 > C3 > C2$

Afin de déterminer le poids de chaque critère i, nous commençons d'abord par attribuer à C2 une valeur de 20, à C3 une valeur de 80, à C4 120 et à C1 180. Nous procédons ensuite à la normalisation des coefficients d'importance :

Honoraires C1$=\frac{180}{20+80+120+180} = 45\%$

Avance DD C2=$\frac{20}{20+80+120+180}$ = 5%

Frais de transport C3 =$\frac{80}{20+80+120+180}$ = 20%

Délais C4 =$\frac{120}{20+80+120+180}$ = 30%

Donc : π1= 0.45 / π2=0.05 / π3=0.2 / π4= 0.3

Nous évaluons de ce fait, les actions de chaque attribut U_j(Ai) et ce comme suit :

Pour les honoraires C1 : Max=3000 et Min=1500

U1(Ai)= 100*$\frac{(3000-honoraires)}{3000-1500}$

U1(A1)= 100 *$\frac{(3000-2000)}{3000-1500}$=66.66%

U1(A2)= 100 *$\frac{(3000-30000)}{3000-1500}$= 0%

U1(A3)= 100*$\frac{(3000-1500)}{3000-1500}$= 100%

Nous procédons de la même manière pour C2, C3 et C4 ce qui nous donne :

U2(A1)=100% /U2(A2)=0% /U2(A3)=100%

U3(A1)= 73.3% / U3(A2) = 100% / U3(A3)= 0%

U4(A1)= 100% /U4(A2)= 50% / U4(A3)=0%

Ces valeurs obtenues, nous pouvons ainsi déduire les valeurs des actions selon le tableau suivant :

	honoraires	Avance DD	Frais de transport	Délais de livraison	U(ai)
πj	0.45	0.05	0.2	0.3	
A1	66.66	10	73.3	10	79.65
A2	0	0	10	50	35
A3	100	100	0	0	50

Tableau de la valeur des actions

Ayant obtenu le meilleur score, nous pouvons ainsi conclure que l'offre A1 est celle à retenir. A1 sera le meilleur partenaire pour remplacer le transitaire interne de DIS.

4.1.2 La méthode AHP : Analytic hierarchy Process [Saaty 1980].

1.Principales étapes de la méthode :

La méthode AHP consiste à représenter un problème de décision par une structure hiérarchique reflétant les interactions entre les divers éléments du problème [39], et

procéder ensuite à des comparaisons par paire des éléments de la hiérarchie, et enfin à déterminer les priorités des actions.

— **Étape 1** : décomposer le problème en une hiérarchie d'éléments interreliés. Au sommet de la hiérarchie, on trouve l'objectif, et dans les niveaux inférieurs, les éléments contribuent à atteindre cet objectif. Le dernier niveau est celui des actions.

— **Étape 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 (échelle de comparaison binaire), tout en respectant le principe de la réciprocité :

$$P_c(E_A; E_B) = \frac{1}{P_c(E_B; E_A)}$$

Le tableau suivant présente l'échelle de Saaty, telle que :

l'échelle de Saaty est un élément clé de la méthode Analytic Hierarchy Process (AHP). Elle permet d'assigner des valeurs numériques à des comparaisons qualitatives entre différents critères ou alternatives. L'échelle de Saaty se base sur des comparaisons en paires, où les éléments sont évalués selon leur importance relative.

L'échelle de Saaty est représentée par une série de chiffres allant de 1 à 9. Chaque chiffre correspond à un niveau d'intensité de préférence ou d'importance.

Grâce à l'échelle de Saaty, les décideurs peuvent exprimer leurs préférences subjectives de manière chiffrée. Ces valeurs numériques sont ensuite utilisées dans le processus d'analyse hiérarchique pour déterminer les poids relatifs des critères et des alternatives. Cela permet d'obtenir une prise de décision plus éclairée et structurée.

Degré d'importance	Définition	Explication
1	Egalement important	Deux éléments contribuent également a l'objectif.
3	Légérement plus important	L'exprérience et le jugement favorise faiblement un objet sur un autre .
5	Fortement plus important	L'expérience et le jugement favorise fortemet un objet sur un autre .
7	Trés fortement important élément par rapport un autre	Un objet est fortement favorisée et sa dominance démontrée en pratique est attestée dans la pratique .
9	Absolumenet plus important	L'expérience favorise un objet sur un autre et de plus grand re possible d'affirmation .
2,4,6,8	Valeurs intermédiaire pour affiner	Un compromis est nécessaire entre deux appréciation.

TABLE 4.1 – Échelle de Saaty de la méthode AHP .

— Étape 3 : Normalisation de la matrice de jugement Mc des comparaisons binaire :

i. Sommer les entrées (les classes) de chaque colonne j :

$$\text{SC(j)}=\sum_{i=1}^{m} Mc(i,j).$$

ii. Diviser l'entrée de chaque colonne par le total de cette colonne :

$$M(i,j)=\frac{M_c(i,j)}{SC(j)}.$$

— **Étape 4** : Déterminer les priorités globales.

i. Totaliser les entrées de chaque ligne de la matrice normalisée :

$$\text{SL(i)} =\sum_{i=1}^{m} M(i,j)$$

ii. Prendre la moyenne de ces entrées :

$$\text{PG(i)} = \frac{SL(i)}{m} \text{ ; pour } j = \overline{1,m}(\text{vecteur des priorités} w_i)$$

— **Étape 5** : déterminer de la cohérence des jugements.

i. Multiplier la matrice intiale par la priorité globale relative :

$$\text{TL(i)} = \sum_{j=1}^{m} MC(i,j)PG(i) \text{ ;pour i=}\overline{1,m}$$

ii. Calculer les proportions :

$$\text{PR(i)} = \frac{TL(i)}{PG(i)} \text{ ;pour i=}\overline{1,m}$$

iii. Calculer (λ) :

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^{n} PR(i)}{m}$$

iv. Déterminer l'indice de consistance :

$$\text{Ic} = \frac{\lambda - m}{m-1}$$

v. Déterminer le ratio de consistance :

$$\text{RC} = \frac{IC}{IC(m)}$$

Avec IC(m) indice de consistance aléatoire.

Dimension de la matrice	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cohérence aléatoire(IC(m))	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

— **Étape 6** : Tester la consistance des jugements.

si RC<0.1 alors.

Bonne consistance, le vecteur de priorité PG(i) est accepté.

sinon

Revoir, et modifier les jugements des décideurs (la matrice Mc).

finsi

— **Étape 7 :** Détermination de l'utilité de chaque critère. Pour chaque critère refaire les mêmes procédures de l'étape précédente.

2.Exemple d'application de la méthode AHP pour l'achat d'une voiture :

Prenons l'exemple de l'achat d'une voiture. L'objectif global du problème est l'achat d'une voiture.Nous supposons que le décideur sera amené à choisir entre trois modèles M_1, M_2 et M_3.

— Étape 1 : la structure hiérarchique du problème.

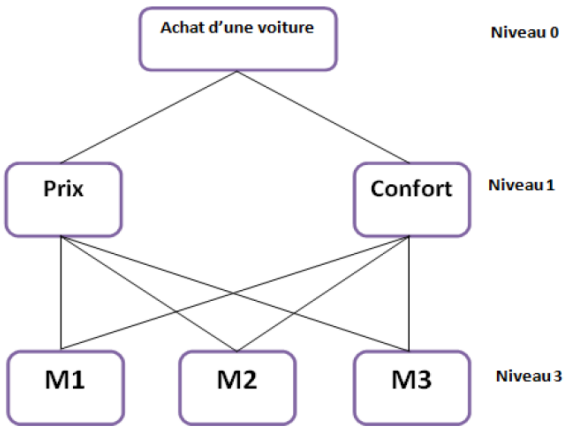


FIGURE 4.1 – Structuration du problème sous forme de hiérarchie

— Étape 2 : le décideur est sollicité pour fournir trois matrices de comparaison deux à deux,

Matrice de comparaisons deux à deux du niveau 1 :

	P	C	Priorité
P	1	5	0.83
C	1/5	1	0.17

Matrice de comparaisons deux à deux du niveau 2 (critère prix) :

	M1	M2	M3	Priorité
M1	1	3	7	0.6586
M2	1/3	1	4	0.2628
M3	1/7	1/4	1	0.0786

Matrice de comparaisons deux à deux du niveau 2 (critère Confort) :

	M1	M2	M3	Priorité
M1	1	2	4	0.5714
M2	1/2	1	2	0.2857
M3	1/4	1/2	1	0.1429

— Étape 3 : le vecteur de propriété correspond au vecteur propre associé à la valeur propre maximale de chaque matrice de comparaison deux à deux par exemple la matrice de comparaison deux à deux du niveau 2 (critère prix), la valeur propre maximale est $\lambda_{max} = 3.0324$ et le vecteur propre correspondant est W=(0,9232 ; 0,3683 ; 0,1102).

Enfin, le vecteur des priorités W_p=(0.6586 ; 0.2686 ; 0.0786) est obtenu en divisant chaque coordonnée par la somme des valeurs de toutes les coordonnées.

— – Etape 4 : $\lambda_{max} = 3.0324$. Concernant le IC(m), Saaty a fourni dans ce livre [44] des valeurs pour des matrices de comparaisons deux à deux différentes. Par exemple, pour n=3, IC(m)=0.58. Par conséquent, le ratio de consistance de la matrice de comparaison deux à deux du niveau 2 (critère prix) est obtenu comme suit :

$$\text{IC} = \frac{3.0324-3}{3-1} = 0.00162$$

$$\text{RC} = 100\ \frac{0.0162}{0.58} = 2.8\%$$

Selon Saaty, une matrice de comparaison, deux à deux, est consistante si $RC < 10\%$. De ce fait, la matrice de comparaison deux à deux niveaux 2 (critère prix) est consistante. Notons que la ration de consistance doit être calculée pour chaque matrice de comparaison deux à deux afin de vérifier leur consistance. Dans le cas ou une inconsistance est détecté, le décideur sera amené à reformuler ses jugements. De ce fait, la matrice de comparaison deux à deux niveaux 2(critère prix) est consistante. Les scores finaux de notre exemple sont donnés comme suit :

$M_1 = 0.83 * 65.86\% + 0.17 * 57.14\% = 64.38\%$

$M_2 = 0.83 * 26.28\%\ 0.17 * 28.57\% = 26 : 6.7\%$

$M_3 = 0.83 * 7.68\% + 0.17 * 14.29\% = 26.67\%$

Les résultats de cet exemple montrent que le modèle M_1 est meilleur que le modèle M_2, qui est meilleur que M_3.

Ceci est valable pour le décideur qui a fourni les matrices de comparaison deux à deux décrites dans les trois tableaux précédents.

4.1.3 La méthode TOPSIS : Technique for Order by Similarity to Ideal Solution

1.Les principales étapes de la méthode :

Proposée pour la première fois par (Hwang et Yoon, 1981). Elle se base sur la relation de dominance qui est représentée par les distances entre les poids et la solution idéale. Son principe consiste à choisir une solution qui se rapproche le plus de la solution idéale et de s'éloigner le plus possible de la pire solution pour tous les critères [16].

La méthode se présente comme suit :

— **Étape 1** : normaliser les performances comme suit :

$$r_{ij}=\frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}} x_{ij}^2}\,;\ \ i=1,2,...,n; etj=1,2,...,m$$

— **Étape 2** : calculer le produit des performances normalisées par les coefficients d'importance relative aux attributs :

$$V_{ij}=W_{ij}r_{ij}\,;\ \text{i=1,2....m. ;et j=1,2...n.}$$

— **Étape 3** : déterminer les profils idéal(a^*) et anti-idéal($a*$).

(Déterminer les ensembles J des critères à maximiser et $J^{'}$ des critères à minimiser).

$a^*= \{\mathrm{V}_1^*, V_2^*....V_k^*\}=\{\max(\mathrm{V}_{ij}|j\in J); (min\mathrm{V}_{ij}|j\in \mathrm{J}^{'})\}$; i=1,2,....m ;et j=1,2,....n ;

$a_*= \{V_{1*}, V_{2*}....V_{*k}^*\}=\{\ (\min V_{ij}|j\in \mathrm{J}); (max\mathrm{V}_{ij}|j\in J^{'})\}$;j=1,2...n ; i=1,2....m

— **Étape 4** : calculer la distance euclidienne par rapport aux profils (a^*) et ($a*$).

$$S_i^*=\sqrt{\sum_{j=1}^{k}(V_{ij}-V_j^*)^2}\ ;\text{i=1,2....n}$$

$$S_{*i}=\sqrt{\sum_{j=1}^{n}(V_{ij}-V_{*j})^2}\ ;\text{i=1,2....n}$$

— **Étape 5** : calculer un coefficient de mesure du rapprochement au profil idéal.

$$C_i^*=\frac{S_{*i}}{S_{*i}+S_i^*}\ ;\forall i=1,2....n\,;\ \text{avec } 0\leq \mathrm{C}_i^*\leq 1$$

— **Étape 6** : ranger les actions en fonction des valeurs décroissantes de C^*i

2.Exemple d'application de la méthode TOPSIS :

Une entreprise cherche un partenaire pour sous-traiter la fabrication d'un produit. La direction de cette entreprise privilégie les critères lors de choix de :

La direction a reçu les quatre offres suivants :

Critère de sélection	Sens d'optimisation	Coefficient d'importance
Fiabilité	Maximiser	45%
Capacité d'autofinancement	Maximiser	45%
Coût de contrat sous-traitance	Minimiser	20%

Partenaire	Fiabilité	Autofinancement	Coût du contrat
a_1	78%	94%	10000$
a_2	82%	86%	15000$
a_3	80%	75%	22000$
a_4	88%	90%	25000$

Quel est le partenaire qui sera sélectionné par le comité de direction de l'entreprise ?
(application la methode TOPSIS)

— **Etape 1** : calcule de la matrice de décision normalisée r_{ij} :
On la matrice de décision :

78	94	10000
82	86	15000
80	75	22000
80	90	25000

le vecteur decoefficient d'importance des critéres (poids des critéres) :
W=[0.45,0.35, 0.20]
$r_{ij}=\frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} x_{ij}^2}}$; $\forall$ j

0.4751	0.5431	0.2641
0.4995	0.4969	0.3961
0.4873	0.4333	0.5810
0.5360	0.520	0.6602

— **Etape 2** :pondération de performances :
(matrices de décision normalisé chargée d'un poids)
$V_{ij}= W_j.r_{ij}$,

0.2138	0.1901	0.0528
0.2248	0.1739	0.0792
0.2193	0.1517	0.1162
0.2412	0.1820	0.1320

— **Etape 3** : déterminer les profils idéal (a^*)et anti-idéail (a_*)

J={1,2} : l'ensemble des critéres à maximiser

$J^{'}$={3} :l'ensemble des critéres à minimiser

La solution idéale :a^*=(0.2412, 0.1901 , 0.0528)

La solution anti-idéale :a_* =(0.2138, 0.1517, 0.1320)

— **Etape 4** : calculer la distance euclidienne par rapport (a^*) et (a_*)

S_i^* =$\sqrt{\sum_{i=1}^{3}(V_{ij} - V_j^*)^2}$

S_1^*=0.0274, S_2^*=0.0350, S_3^*=0.0773, S_4^*=0.0796

S_*=$\sqrt{\sum_{i=1}^{3}(V_{ij} - V_{j*})^2}$

S_{1*}=0.1001 , S_{2*}=0.1156, S_{3*}=0.1359 , S_{4*}=0.1671

— **Etape 5** : calculer un coefficient de mesure du rapprochement au profil idéal

C_i^*= $\frac{S_{i*}}{S_i^*+S_{i*}}$, $\forall$ i=1,3

C_{1*}= 0.7851, C_{2*}=0.7676, C_{3*}=0.6374 ,C_{4*}=0.6773.

— **Etape 6** : classement des altrenatives :(selon l'ordere decroissant de C_i^*)

C_{1*}= 0.7851 > C_{2*}=0.7676 > C_{4*} =0.6773. > C_{3*} =0.6374.

Selon la méthode TOPSIS, le partenaire a sera alors selectionée par la comile de direction de l'entreprise.

4.2 Méthodes de surclassement

4.2.1 La méthode Electre I : Élimination et Choix Traduisant la Réalité [Roy 1968]

1.Les principales étapes de la méthode :

La méthode Electre I relève de la problématique de choix ($P\alpha$) [40]. Elle vise à ob-

tenir un sous-ensemble N d'actions tel que toute action qui n'est pas dans N elle est surclassé par au moins une action de N. N est appelée le noyau du graphe de surclassement : c'est le siège des actions non surclassées. Ce sous-ensemble (qu'on rendra aussi petit que possible) n'est pas donc l'ensemble des bonnes actions, mais c'est l'ensemble dans lequel se trouve certainement le meilleur compromis cherché [22]. La manière d'établir le surclassement d'une action par rapport à une autre repose sur :

1. Une condition de concordance :condition imposant qu'une majorité des critères se dégagent en faveur de l'action surclassant.

2. Une condition de non-discordance : condition imposant qu'il n'existe pas une trop forte pression, dans un des critères de la minorité, en faveur du surclassement inverse. La méthode Electre I se présente comme suit : On attribue à chaque critère j, un poids pj d'autant plus grand que le critère est important.

— **Étape 1** : calculer les indices de concordance à chaque couple d'action (a ; b), on associe l'indice de concordance suivant :
C(a,b)=$\frac{\sum_{\forall j:g_j(a)g_j(b)} w_j}{W}$;avec W=$\sum_{j=1}^{n} w_j$

— **Étape 2** : calculer les indices de discordance à chaque couple d'action (a ; b). On associe l'indice de discordance suivant :

$$\text{D(a,b)} = \begin{cases} 0 \quad \text{si } \forall j : g_j(a) \geq g_j(b) \\ 1 \frac{-}{\sigma} \max\ [\text{g}_j(b) - g_j(a)] \qquad \text{sinon} \end{cases}$$

— **Étape 3** : construire les relations de surclassement : La relation de surclassement pour Electre I est construite par la comparaison des indices de concordances et de discordance à des seuils limites de concordance $\hat{c}$ et discordance $\hat{d}$.Ainsi, a surclasse b, si seulement si :

$$\text{asb} \Longleftrightarrow \text{C(a,b)} \geq \hat{c} \text{ et D(a,b)} \leq \hat{d}$$

Exploiter les relations de surclassement : cette étape consiste à déterminer le sous-ensemble d'action N appelé noyau tel que toute action qui n'est pas dans N est surclassée par au moins une action de N et les actions de N sont incomparables entre elles.

2.Exemple d'application de la méthode Electre 1 sur le choix d'un projet :

Application de la méthode Electre I pour le choix d'un projet adapté. L'exemple traite du choix d'un projet, parmi six projets concurrent pour la réalisation d'une raffinerie. Chaque projet est évalué sur la base de cinq critères environnementaux :

— Cr1 : Naissance sonore.

— Cr2 : Construire les relations de surclassement.

— Cr3 : Pollution de l'air.

— Cr4 : Impact sur l'aménagement du territoire.

— Cr5 : Séparation du territoire. L'importance de chaque critère dans la prise de décision est traduite par un poids pj tel que :

Critéres	Cr_1	Cr_2	Cr_3	Cr_4	Cr_5
Poids($_{pj}$)	3	2	3	1	1

Chaque projet est évalué en fonction des critères retenus à l'aide d'une échelle qualitative et des scores, plus le score est élevé plus les impacts du projet sur l'environnement sont moindre, le tableau de performance est donné dans le tableau suivant :

Projets	Cr_1	Cr_2	Cr_3	Cr_4	Cr_5
P_1	10	20	5	10	16
P_2	0	5	5	16	10
P_3	0	10	0	16	7
P_4	20	5	10	10	13
P_5	20	10	15	10	13
P_6	20	10	20	13	13

La problématique à résoudre est de choisir le sous-ensemble avec le moins impact sur l'environnement.

— **Etape 1** : calcul des indices de concordance :

(tous les critéres sont à maxmiser)

$$C(a,b)=\frac{\sum_{\forall j g_j(a)\geq g_j(b)} W_j}{W}$$

$W=\sum_{j=1}^{k} W_j$

$C(p_1,p_2)=\frac{3+2+3+1}{10}=\frac{9}{10}=0.9$

$C(p_1,p_3)=\frac{3+2+3+1}{10}=\frac{9}{10}=0.9$

$C(p_1,p_4)=\frac{0+2+0+1+1}{10}=\frac{4}{10}=0.4$

$C(p_1,p_5)=\frac{0+2+0+1+1}{10}=\frac{4}{10}=0.4$

$C(p_1,p_6)=\frac{0+2+0+0+1}{10}=\frac{3}{10}=0.3$

C(p_2,p_1)=$\frac{0+0+3+1+0}{10}$=$\frac{4}{10}$ =0.4

En continuant ansi, on trove :

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6
P_1	-	0.9	0.9	0.4	0.4	0.3
P_2	0.4	-	0.8	0.3	0.1	0.1
P_3	0.1	0.6	-	0.3	0.3	0.3
P_4	0.7	0.9	0.7	-	0.5	0.4
P_5	0.7	0.9	0.9	1	-	0.6
P_6	0.7	0.9	0.9	1	1	-

— **Etape2** : calcul de l'indice de discordance :

$$\sigma = \max_{j,c;d} [g_j(c) - g_j(d)]$$

Pour chaque criteie, on calcul la differnece maximale :

— C_{r1} : 20-0 =20

— C_{r2} : 20-5 =15

— C_{r3} : 20-0 =20

— C_{r4} : 16-10 =6

— C_{r5} : 16-7 =9

σ = le maximum de toutes ces differnce donc : "$\sigma = 20$"

— **Etape 3** : calcul des indices de discordance :

$$\text{D(a,b)}=\begin{cases} 0 & si \\ \text{g}_j(a) \geq g_j(b)\ \forall j & \\ 1-\frac{}{\sigma}\ max_{j}\,[\text{g}_j(b) - g_j(a)] & sinon \end{cases}$$

D(p_1,p_2)=$\frac{max(0,6)}{20}$ =$\frac{6}{20}$= 0.3

— **Etape 4** : constuire les relations de surclassement :

la relation de surclassement pour Electre 1 est constute par la comparaison

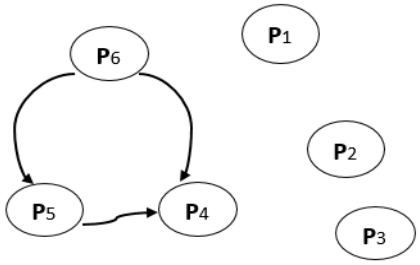
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6
P_1	-	0.3	0.3	0.5	0.5	0.75
P_2	0.75	-	0.25	1	1	1
P_3	0.5	0.25	-	1	1	1
P_4	0.75	0.3	0.3	-	0.25	0.5
P_5	0.5	0.3	0.3	0	-	0.25
P_6	0.5	0.15	0.15	0	0	-

des indices de concordance et discordance à des seuils de concordance $\hat{c}$ et discordance $\hat{d}$:

a surclasse b : a S b $\Longleftrightarrow$ C(a :b) $\geq \hat{c}$ et D(a,b)$\leq \hat{d}$

On a peu $\hat{c}$=1 et $\hat{d}$=0 : p_5 S p_4, p_6 S p_4, p_6 S p_5

et donc p_1,p_2 et p_3 sont incomparables.



Le noyau de ce graphe est : {p_1,p_2,p_4,p_6}

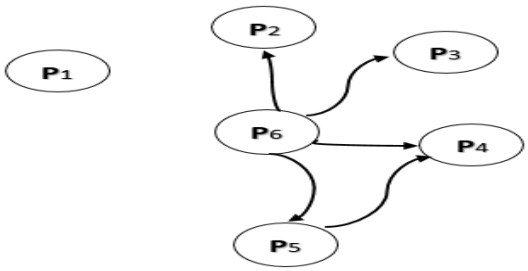
Remarque :

le résultant obtenu est sensible aux valeur des seuile $\hat{c}$ et $\hat{d}$.

Posons maintenant $\hat{c}$=0.9 et $\hat{d} = 0.15$ on obtient :

p_6 S p_2, p_6 S p_4, p_6 S p_5, p_6 S p_3, p_5 S p_4.

Le noyeau de graphe est : N= {p_1,p_6}



Dans ce cas les projets à retenie seraient p_1 et p_6.

4.2.2 La méthode Electre II

Electre II a été mise au point par ROY et BERTIER (1971, 1973)[42]. C'est une méthode d'analyse de type multicritère qui permet de résoudre avec une plus grande précision les problèmes décisionnels.

Le méthode Electre II relève de la problématique de rangement (la procédure d'investigation est une procédure de classement), elle vise à ranger les actions de la meilleure à la moins bonne.

La méthode Electre II utilise le même indice de concordance que Electre I. Toutefois, on associe trois seuils à cet indice ($0 :5 \leq c^- < c^0 < c^+ \geq 1$).

L'indice de discordance ne change pas non plus dans sa définition(Electre I), mais on le calcule pour chaque critère discordant, et on lui donne 2 seuils par critère : $D1 < D2$.

La méthode Electre II introduit une nouveauté fondamentale : elle permet de distinguer des surclassements forts et des surclassements faibles.

1.Les principales étapes de la méthode :

La méthode Electre II se présente comme suit :

On attribue à chaque critère j, telque (ensemble des critères) $j = \overline{1,n}$

un poids w_j d'autant plus grand que le critère est important .

$w^+(a_i, a_k)$=$\sum_{g_j(a_i)>g_j(a_k)} w_j$:

la somme des poids des critères pour lesquels (a_i), est préféré à (a_k) où $a_i; a_k \in$ A (ensemble des actions) et i ;k=$\overline{1,m.}$

$w^-(a_i, a_k)$=$\sum_{g_j(a_i)<g_j(a_k)} w_j$:

la somme des poids des critères pour lequels (a_k) est préféré à (a_i), où a_i ;$a_k \in$ A et i, k =$\overline{1,m.}$

— **Étape 1** : calculer les indices de concordance (idem que Electre I) à chaque couple d'actions $(a_i; a_k)$; on associe l'indice de concordance suivant :

$$C_{ik}=\frac{\sum_{\forall: g_j(a_k)\geq g_j(a_i)} w_j}{W} \text{ avec W}=\sum_{j=1}^{n} w_j$$

Construction de la matrice de concordance. La deuxième condition de concordance a comme but principal d'éliminer les circuits, qui sont toujours gênants. Elle est calculée comme suit :

$$\frac{w^+(a_i,a_k}{w^-(a_i,a_k)} \geq 1$$

— **Étape 2** : calculer les indices de discordance (par critère) à chaque couple d'actions $(a_i; a_k)$; et pour tout critère j, on associe l'indice de discordance suivant :

$$\mathrm{D}_{ik} = \begin{cases} 0 \quad \text{si } \mathrm{g}_j(a_i) \geq g_j(a_k); \\ \mathrm{g}_j(a_k) - g_j(a_i) \qquad \text{sinon} \end{cases}$$

Construction de la matrice de discordance.

— **Étape 3** : construire les relations de surclassements. On conclut au surclassement fort de a_k par $a_i(a_i S^F a_k)$ si un test de concordance et un test de non-discordance suivants sont satisfaits :

$$\begin{cases} C_{ik} \geq c^+ \qquad \text{et} \\ g_j(a_k) - g_j(a_i) \leq D_(j) \quad \forall \text{ j et} \\ \frac{w^+(a_i,a_k}{w^-(a_i,a_k)} \geq 1 \end{cases}$$

et/ou

$$\begin{cases} C_{ik} \geq c^0 \qquad \text{et} \\ g_j(a_k) - g_j(a_i) \leq D_2(j) \quad \forall \text{ j et} \\ \frac{w^+(a_i,a_k}{w^-(a_i,a_k)} \geq 1 \end{cases}$$

On conclut au surclassement faible de a_k par a_i $(a_i S^f a_k)$ si les tests de concordance et de non-discordance suivants sont satisfaits :

$$\begin{cases} C_{ik} \geq c^- \qquad \text{et} \\ g_j(a_k) - g_j(a_i) \leq D_1(j) \quad \forall jet \\ \frac{w^+(a_i,a_k}{w^-(a_i,a_k)} \geq 1 \end{cases}$$

Si aucun des deux tests précédents n'est satisfait, alors on conclut à l'incomparabilité des actions a_i et a_k (a_k R a_i).

— **Étape 4** : exploiter les relations de surclassement : On établit deux préordres totaux C_1 et C_2 , ainsi qu'un préordre partiel C.

1. Le premier préordre total C_1 est obtenu par "classement direct" en utilisant uniquement les surclassements forts : la première classe est celle des actions non surclassées ; c'est-à-dire celles auxquelles aboutit un chemin de longueur nulle. La deuxième classe est celle des actions auxquelles aboutit un chemin de longueur 1, et ainsi de suite. Par longueur d'un chemin, on entend le nombre d'arcs constituant ce chemin. On utilise ensuite les surclassements faibles pour

départager les actions à l'intérieur des classes.

2. Le second préordre C_2 est obtenu par (classement inverse) : on classe cette fois les actions en fonction de la longueur des chemins toujours en surclassement fort qui en sont issus. On utilise ensuite les surclassements faibles pour départager les actions à l'intérieur des classes.

3. Le préordre C est l'intersection de C_1 etC_2.

2.Exemple d'application de la méthode Electre 2 :

On considère les notes de cinq élèves dans cinq matières. Ces données sont réunies dans Table :

	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5
E1	7	13	8	12	11
E2	8	11	11	12	11
E3	20	2	10	3	15
E4	16	14	16	14	13
E5	12	12	8	8	10

On cherche à déterminer quel est le meilleur élève suivant trois critères :

i. f_1 : la moyenne des notes sur l'ensemble des matières doit être la plus élevée possible.

ii. f_2 : la note minimale doit être strictement supérieure à 8.

iii. f_3 : les variations des notes autour de la moyenne doivent être les plus petites possibles.

Voici les définitions mathématiques des différents critères :

$f_1(a_i)=\frac{\sum_{mat}(NOTE(a_i,MAt))}{5}$

$f_2(a_i)=\begin{cases} 10 & si \quad \min_{Mat}(Note(a_i,Mat)) > 8 \\ 0 & sinon \end{cases}$

$f_3(a_i)=\sqrt{\sum_{Mat}(Note(a_i,Mat)-f_1(a_i))^2 5}$

ou :

— a_i désigne un élève E_i,i=$\overline{1,5}$

— Mat ∈ {M1, M2, M3, M4, M5}.

— Note(a_i ;Mat) : désigne la note de l'élève ai dans la matière Mat.
Les poids des critères f_1, f_2 et f_3 sont respectivement $\omega_1 = 0.5$,$\omega_2 = 0.25$, $\omega_3 = 0.25$.

— Calculer les valeurs de chaque élève pour chaque critère.

— Les échelles des différents critères ne conviennent pas, récalibrer ces différentes valeurs selon ce qui suit :

Pour le critère f_1 , à 10 on associe 0 et à 14.6 on associe 20.
Pour le critère f_2, à 0 on associe 0 et à 10 on associe 20.
Pour le critère f_3, à 0.5366 on associe 20 et à 3.08 on associe 0.
Pour les valeurs intermédiaires de chaque critère, effectuez une interpolation linéaire en utilisant les informations ci-dessus.

— Trouvez le meilleur élève en utilisant la méthode ELECTRE I. On donne le seuil de concordance c=0.75 et le seuil de non discordance d=0.25.

— Que serait le meilleur élève en utilisant la méthode ELECTRE II. On donne les seuils suivants :$c^+ = 0.75; c^0 = 0.7; c^- = 0.65$;D_1 =20etD_2 =16.

Après récalibrage des differentes Valeus On aura la matrice des décisions suivantes :

	f1	f2	f3
E1	0.87	0	16.08
E2	2.61	20	19.45
E3	0	0	0
E4	20	20	20
E5	0	20	17.9

ω(0.5 0.25 0.25)

— **Etape 1** : L'indice de Concordance dans Electe II , se Calcul de la la meme manière Que dans Electu I.
C(a,b)=$\frac{\sum_{\forall_j g_j(a) \geq g_j(b)} W_j}{W}$; et W=$\sum_{j=1}^{k} W_j$

	E1	E2	E3	E4	E5
E1	-	0	1	0	0.5
E2	1	-	1	0.25	1
E3	0.25	0	-	0	0.5
E4	1	1	1	-	1
E5	0.5	0.25	1	0.25	-

On donne les seuils c^+= 0,75 , C^0= 0,7 et C^-= 0,65 , D_1=20, D_2 = 16

— **Etape 2** : on calcule :

$$\frac{W^+(a,b)}{W^-(a,b)}$$

On a :

$\mathrm{W}^+(a,b) = \sum_{j \in J^+(a,b)} W_j$

avec $\mathrm{J}^+(a,b) = j \in \overline{1,k} / g_j(a) \geq g_j(b)$

Représente l'ensemble des critere pour les quelle l'action "a"est preféreé à l'action "b".

et :$W^-(a,b) = \sum_{j \in J^-(a,b)} W_j \text{avec} J^-(a,b) = j \in \overline{1,k} / g_j(a) \leq g_j(b)$

et on a : $\begin{cases} \mathrm{W}^+(E_1,E_2) = 0 \\ W^-(E_1,E_2) = 1 \Rightarrow \frac{W^+(E_1,E_2)}{W^-(E_1,E_2)} \end{cases}$

$\begin{cases} \mathrm{W}^+(E_1,E_3) = 0.25 + 0.5 = 0.75 \\ W^-(E_1,E_3) = 0+0+0 = 0 \Rightarrow \frac{W^+(E_1,E_3)}{W^-(E_1,E_3)} = \frac{0.75}{0} \end{cases}$

$\begin{cases} \mathrm{W}^+(E_1,E_4) = 0 \\ W^-(E_1,E_4) = 1 \Rightarrow \frac{W^+(E_1,E_4)}{W^-(E_1,E_4)} = 0 \end{cases}$

$\begin{cases} \mathrm{W}^+(E_1,E_5) = 0.5+0+0 = 0.5 \\ W^-(E_1,E_5) = 0+0.25+0.25 = 0.5 \Rightarrow \frac{W^+(E_1,E_5)}{W^-(E_1,E_5)} = 1 \end{cases}$

En continuant ansi, on trouve la matrice suivante :

$\frac{W^+(E_i,E_j)}{W^-(E_i,E_j)}$ =

	E1	E2	E3	E4	E5
E1	-	0	$+\infty$	0	1
E2	$+\infty$	-	$+\infty$	0	$+\infty$
E3	0	0	-	0	$+\infty$
E4	$+\infty$	$+\infty$	$+\infty$	-	$+\infty$
E5	1	0	$+\infty$	0	-

— **Etape 3** : construction des relation de sur classement :

pour (E_1,E_2) :$\frac{W^+(E_1,E_2}{W^-(E_1,E_2)}$ <1 $\Longrightarrow$ l'eypothése E_1 surclasse E_2 est rejeteé.

pour (E_1,E_3) :$\frac{W^+(E_1,E_3}{W^-(E_1,E_3)}$ =$+\infty > 1 \Longrightarrow$ Vérifiée la condition $g_j(E_3)$-$g_j(E_1) \leq D_1 \ \forall$ j= 1,3

$$\begin{cases} 0 - 0.87 \leq 20 \\ 0 - 0 \leq 20 \\ 0 - 16.08 \leq 20 \end{cases}$$

$\Longrightarrow$ Vérifions la condition : C$(E_1, E_2) \geq C^-$

C(E_1, E_3)=1 $\geq$ 0.65 $\Longrightarrow$ Véeifions la conditions C$(E_1, E_3) \geq C^0$

C$(E_1,E_3) \geq C^+$

C(E_1,E_3) =1 $\geq$ 0.75 $\Longrightarrow$ l'hypothése E_1 sur classe E_1 est vérifiée avec une forte certitude.

pour (E_1,E_4) : $\frac{W^+(E_1,E_4)}{W^-(E_1,E_4)}$ =0 <1 $\Longrightarrow$ l'hypothése de surclassement est rejeteé.

pour (E_1, E_5) : $\frac{W^+(E_1,E_5)}{W^-(E_1,E_5)}$ =1 $\geq$1 $\Longrightarrow$ Vérifions la condition : $g_j(E_5) - g_j(E_1) \leq D_1 \ \forall$ j=1,3

{0-0.87 $\leq$ 20 } et {20-0 $\leq$ 20} non verifiée pour j=2.

Donc l'hypothese E_1 surclasse E_5 est rejeteé.

pour (E_2, E_1) :$\frac{W^+(E_2,E_1)}{W^+(E_2,E_1)}$ =$+\infty$ >1.

$\Longrightarrow$ Vérifions la condition $g_j(E_1) - g_j(E_2) \leq D_1 \ \forall$ j=1,3

$$\begin{cases} 0.87 - 2.61 \leq 20 \\ 0 - 20 \leq 20 \\ 16.08 - 19.45 \leq 20 \end{cases}$$

$\Longrightarrow$ Vérifions les conditions :

C$(E_2,\ E_1)$ =1 $\geq C^-$=0.5

C$(E_2,\ E_1)$ =1 $\geq C^0$=0.7

C$(E_2,\ E_1)$ =1 $\geq C^+$=0.75

E_2 surclasse fortement E_1

pour (E_2,E_3) : $\frac{W^+(E_2,E_3)}{W^+(E_2,E_3)} = +\infty > 1$.

$\Longrightarrow g_j(E_3) - g_j(E_2) \leq D_1 \ \forall$ j=1,3

C(E_2, E_3)=1 $\geq C^-$

C(E_2, E_3)=1 $\geq C^0$

C(E_2, E_3)=1 $\geq C^+$

$\Longrightarrow E_2$ surclasse fortement E_3

pour $(E_2,E4)$: $\frac{W^+(E_2,E4)}{W^-(E_2,E4)} = 0 < 1 \Longrightarrow$ l'hyphothese de surclasement est rejeteé.

⋮

⋮

En continuant anisi,On trouver la matrice des relastion de surclassement suivante : On bien :

	E1	E2	E3	E4	E5
E1	-	X	S_F	X	X
E2	S_F	-	S_F	X	S_F
E3	X	X	-	X	X
E4	S_F	S_F	S_F	-	S_F
E5	X	X	S_F	X	-

$S_F \Longrightarrow$ surclasement fort.

— **Etape 4** : On represente ces resultants dans un graphe :

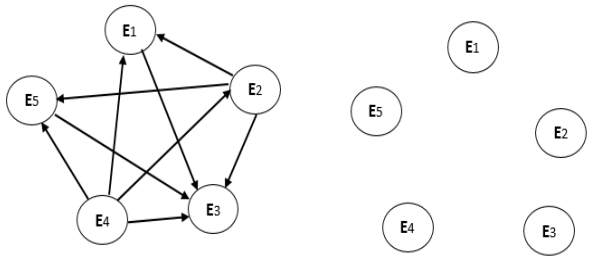


FIGURE 4.2 – Le graphe de surclassement fort $G_F^{'}$ Le graphe de surclassement faible $G_f^{'}$

On effectue maintenant les souclausements direct et inverse dont les itérations sont rêsumees dans les tableamx suivants :

1.Le classement diréct :

Etape l	Y_l	D	U	B	A_l	r_{l+1}
0	$\{E_1,E_2,E_3,E_4,E_5\}$	$\{E_4\}$	ϕ	$\{E_4\}$	$\{E_4\}$	1
1	$\{E_1,E_2,E_3,E_5\}$	$\{E_2\}$	ϕ	$\{E_2\}$	$\{E_2\}$	2
2	$\{E_1,E_3,E_5\}$	$\{E_1,E_5\}$	ϕ	$\{E_1,E_5\ \}$	$\{E_1,E_5\ \}$	3
3	$\{E_3\}$	$\{E_3\}$	ϕ	$\{E_3\}$	$\{E_3\}$	4

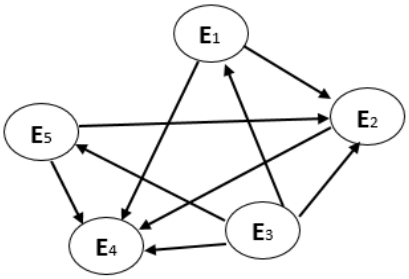
D : contient l'élemnents non surclassés.

U : élemnts de D qui sont reliés entre eux dans G_F .

B : U contient tout les somments de D qui ne sont pas surclassés par un élemnt de U.

Al :$\{D-U\} \cup$ B, $rang_1(a)= l+1$.

2.Le classement inverse : On inverse la direction des ares :



Etape l	Y_l	D	U	B	A_l	r_{l+1}
0	$\{E_1, E_2, E_3, E_4, E_5\}$	$\{E_3\}$	ϕ	$\{E_3\}$	$\{E_3\}$	4=1+4-1
1	$\{E_1, E_2, E_4, E_5\}$	$\{E_1, E_5\}$	ϕ	$\{E_1, E_5\}$	$\{E_1, E_5\}$	3
2	$\{E_2, E_4\}$	$\{E_2\}$	ϕ	$\{E_2\}$	$\{E_2\}$	2
3	$\{E_4\}$	$\{E_4\}$	ϕ	$\{E_4\}$	$\{E_4\}$	1

r_{l+1} :$rang_2(a)$= 1+$rang_1(a)_{max}$ - $rang_1(a)_{min}$.

On aura Alors le classement finale est donc : E_4, E_2, E_1 et E_5, E_3.

4.3 Les avantages et les inconvénients des différentes méthodes de résolution

Arrivés au terme de ce chapitre, nous pensons qu'un récapitulatif est nécessaire pour une meilleure lisibilité des méthodes présentées. Dans la "Table 4.2", nous illustrons quelques avantages et inconvénients des méthodes multi-attributs, de même dans
"la Table 4.3", nous défilons ceux des méthodes de surclassement.

Méthodes	les avantages	les inconvénients
SMART	la méthode SMART est facile à exploirer.	Elle exige une articulation a priori des préférences ,et une evaluation des actions sur une échelle unique.
AHP	la méthode AHP parmet la modélisation du probléme de décision par une structure hiérarchique.Elle utilise une échelle sémantique pour exprimer les préférences du décideur.	un grand nombre d'éléments dans le probléme de décision fait exploser le nombre de comparaisons par paires.-le probléme de renversement de rang(deux action peuvent voir leur ordre de priorité s'inverser suite à une modification ,ajout ou suppression d'une ou de plusieurs action) de l'ensemble des action .-l'association d'une échelle numérique à l'échelle sémantique est restrictive et introduit des biais.
TOPSIS	L'apporte de la méthode TOPSIS est l'introduction des notions d'idéal et d'anti-idéal. Elle est facile à appliquer.	Les attributs doivent étre de nature cardinale, les préférences sont fixées a priori. Si touts les actions sont mauvaises, la méthode propose la meilleure action parmi les mauvaises.

TABLE 4.2 – les avantages et les inconvénients des methodes multi-attribut.

Méthodes	les avantages	les inconvénients
ELECTRE I	la methode ELECTRE I est utilisée pour des problématiques de sélection .-elle introduit la notion de noyau qui permet de restreindre le domaine de l'etude pour s'intéresser uniquement aux meilleur action .	elle exige de traduire les performaces des actions en notes, ce qui suscile une gene chez certains utilisateurs qui y voient une perte de maitrise de leurs données.
ELECTRE II	la méthode ELECTRE II reléve des problématiques de classemet.-elle vise a classer les actions depuis les meilleures jusqu'aux moins bonnes.	elle est difficile de détermier le proérdre partiel P car les rangs des actions bougent beaucoup entre le classement direct et le classement inverse.-elle exige des evaluations cardinales et une articulation a priori des préféreces

TABLE 4.3 – les avantages et les inconvénients des methodes surclassement.

Conclusion

L'aide à la décision requiert l'implication du décideur dans le processus décisionnel, en tenant compte des caractéristiques du contexte et des intérêts du décideur. L'approche multicritère permet de prendre en compte simultanément les objectifs variés du décideur dans l'analyse des situations décisionnelles. Elle vise à développer des méthodes adaptées à ces situations, en particulier lorsque les critères sont conflictuels et incommensurables, ce qui est souvent le cas. Contrairement à l'approche monocritère classique qui cherche une solution optimale pour tous les contextes, l'approche multicritère cherche à construire, en collaboration étroite avec le décideur, une solution satisfaisante qui résulte du meilleur compromis. Les méthodes d'aide à la décision multicritère ont démontré leur efficacité et leur flexibilité pour modéliser différents types de contextes décisionnels. Pour le chapitre qui suit on va parler sur la machine Learning et aide a la décision.

Chapitre 5

Machine Learning et aide à la décision

Introduction

La prise de décision dans le domaine de l'investissement d'un projet exploration production est un processus complexe qui implique de nombreux facteurs et des données volumineuses. Les décideurs doivent prendre en compte des variables telles que les coûts, les rendements, les risques et les contraintes, pour s'assurer que leur décision est rentable et viable à long terme. Dans un contexte de plus en plus concurrentiel et incertain, la nécessité d'outils d'aide à la décision efficaces est plus importante que jamais.

Le machine learning offre une opportunité unique de concevoir des outils d'aide à la décision pour l'investissement de projets d'exploration et de production. En utilisant des algorithmes de machine learning, il est possible d'analyser des données volumineuses pour identifier des modèles et des relations qui ne seraient pas perceptibles à l'œil nu, afin de prédire des résultats futurs ou de prendre des décisions.

Dans ce chapitre , nous allons explorer les principes de base du machine learning, y compris les différents types d'apprentissage et les algorithmes les plus couramment utilisés pour concevoir des outils d'aide à la décision . Nous allons également exploré l'application du machine learning aux analyses prédictives, en mettant en évidence l'importance de l'analyse prédictive et l'utilisation du machine learning dans le domaine de l'aide à la décision.

5.1 Les principes de base du machine learning

Le machine learning est une branche de l'intelligence artificielle qui se concentre sur la création de modèles informatiques capables d'apprendre à partir de données sans être explicitement programmés. Il permet aux ordinateurs d'identifier des modèles dans les données et de les utiliser pour prendre des décisions, ce qui en fait une technologie très utile pour la conception d'outils d'aide à la décision pour l'investissement de projets d'exploration et de production.

5.1.1 Les différents types d'apprentissage

Il existe trois types d'apprentissage en machine learning :

L'apprentissage supervisé : Le machine learning supervisé est une technologie élémentaire mais stricte. Les opérateurs présentent à l'ordinateur des exemples d'entrées et les sorties souhaitées, et l'ordinateur recherche des solutions pour obtenir ces sorties en fonction de ces entrées. Le but est que l'ordinateur apprenne la règle générale qui mappe les entrées et les sorties[34]. Le machine learning supervisé peut être utilisé pour faire des prédictions sur des données indisponibles ou futures (on parle alors de "modélisation prédictive"). L'algorithme essaie de développer une fonction qui prédit avec précision la sortie à partir des variables d'entrée. Par exemple, pour la conception d'un outil d'aide à la décision pour l'investissement de projets d'exploration et de production, un modèle pourrait être entraîné à partir d'un ensemble de données historiques sur les projets réussis et les projets échoués pour prédire le succès futur d'un nouveau projet.

Le machine learning supervisé peut se subdiviser en deux types :

- **Classification :** la variable de sortie est une catégorie.
- **Régression :** la variable de sortie est une valeur spécifique.

Les principaux algorithmes du machine learning supervisé sont les suivants : forêts aléatoires, arbres de décision, algorithme K-NN (k-Nearest Neighbors), régression linéaire, algorithme de Naïve Bayes, machine à vecteurs de support (SVM), régression logistique et boosting de gradient.

L'apprentissage non supervisé : Dans le cadre du machine learning non supervisé, l'algorithme détermine lui-même la structure de l'entrée (aucune étiquette n'est appliquée à l'algorithme). Cette approche peut être un but en soi (qui permet de découvrir des structures enfouies dans les données) ou un moyen d'atteindre un certain but. Cette approche est également appelée « apprentissage des caractéristiques » (feature learning).

Par exemple, pour la conception d'un outil d'aide à la décision pour l'investissement de projets d'exploration et de production, un modèle pourrait être entraîné à partir d'un ensemble de données non étiquetées sur les projets pour identifier des modèles de coûts, de rendements et de risques.

Il existe deux types de machine learning non supervisé :

- **Clustering :** l'objectif consiste à trouver des regroupements dans les données.
- **Association :** l'objectif consiste à identifier les règles qui permettront de définir de grands groupes de données.

Les principaux algorithmes du machine learning non supervisé sont les suivants : K-Means, clustering/regroupement hiérarchique et réduction de la dimensionnalité.

L'apprentissage par renforcement : Dans le machine learning par renforcement, un programme informatique interagit avec un environnement dynamique dans lequel il doit atteindre un certain but. Le programme-apprenti reçoit du feedback sous forme de « récompenses » et de « punitions » pendant qu'il navigue dans l'espace du problème et qu'il apprend à identifier le comportement le plus efficace dans le contexte considéré[34].

Par exemple, pour la conception d'un outil d'aide à la décision pour l'investissement de projets d'exploration et de production, un modèle pourrait être entraîné à partir d'un ensemble de données qui comprennent des récompenses pour les projets réussis et des pénalités pour les projets échoués.

Il existe deux types de machine learning par renforcement :

- **Monte Carlo :** le programme reçoit ses récompenses à la fin de l'état «terminal».
- **Machine learning par différence temporelle (TD) :** les récompenses sont évaluées et accordées à chaque étape.

Les principaux algorithmes du machine learning par renforcement sont les suivants : Q-learning, Deep Q Network (DQN) et SARSA (State-Action-Reward-State-Action).

5.2 Les algorithmes couramment utilisés en machine learning

Il existe de nombreux algorithmes de machine learning différents, mais voici quelques-uns des plus couramment utilisés pour la prise d'aide a decision :

5.2.1 Les algorithmes de régression (linéaire ou logistique)

Linéaires ou logistiques, sont les algorithmes les moins puissants mais les plus facilement interprétables. Ils permettent de comprendre les relations existant entre les données.
Représentée classiquement sous forme de droites sur un graphique, la régression linéaire a pour rôle de déterminer la valeur d'une variable à prédire, appelée aussi "variable dépendante" à partir de la valeur d'une ou plusieurs autres variables explicatives, appelées aussi "variables indépendantes". Les termes dépendante/indépendante viennent de ce qu'on fait l'hypothèse que la variable dépendante dépend des variables indépendantes, qui elles n'en dépendent pas (le taux d'accident de la route dépend de la consommation d'alcool, et non l'inverse). Un exemple de régression linéaire est la prédiction des ventes annuelles d'un commercial en fonction de son niveau d'étude ou de son expérience.
La régression logistique est, elle,utilisée quand les variables dépendantes sont binaires. Lorsque les variables dépendantes sont plus difficiles à classifier, on utilise d'autres types d'algorithmes de régression comme la machine à vecteur de support (Support Vector Machine)[35].

5.2.2 L'algorithme de l'arbre de décision

Un arbre de décision constitue un outil d'aide à la décision. L'ensemble de choix est représenté sous la forme graphique d'un arbre, de là son nom. Aux extrémités des branches, les feuilles de l'arbre, on trouve les différentes décisions possibles. Ce type d'outil a l'avantage d'être lisible et rapide à exécuter mais également calculable automatiquement par des algorithmes d'apprentissage supervisé.
Un arbre de décision est une représentation visuelle d'un algorithme de classification de données suivant différents critères qu'on appellera décisions (ou nœuds)

5.2.3 Des algorithmes de clustering

Le clustering est une méthode d'apprentissage machine consistant à regrouper des points de données. Le data clustering (partitionnement de données en français) est une méthode en analyse des données utilisée en apprentissage non supervisé. Les algorithmes de clustering servent ainsi à répartir les données en sous-groupes nommés clusters. Le partitionnement de données a pour but de diviser un ensemble de données différents groupes homogènes, de manière que chaque sous-ensemble dispose de caractéristiques communes, selon des critères dit de proximité[35].

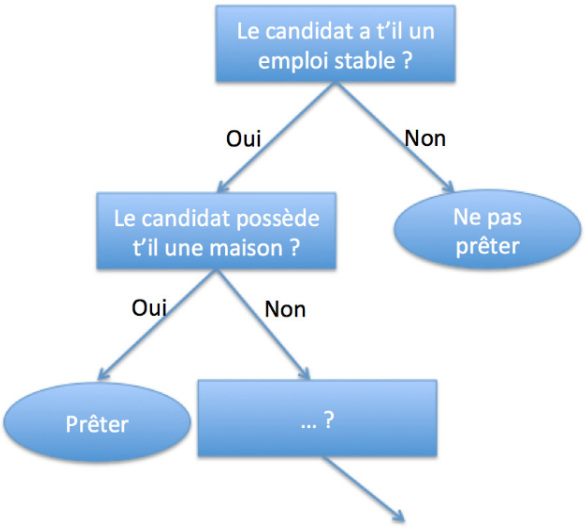


FIGURE 5.1 – Exemple d'un arbre de décision pour l'accord d'un prêt

5.2.4 Forêts aléatoires

La forêt aléatoire est un autre algorithme utilisé très couramment. Cet algorithme construit plusieurs arbres de classification et de régression (CART, Classification and Regression Tree), chaque arbre étant associé à différents scénarios et différentes variables initiales. L'algorithme est randomisé, ce qui n'est pas le cas des données. Ce type d'algorithme est utilisé pour la modélisation prédictive de classification et de régression[34].

5.2.5 Machine à vecteurs de support (SVM)

Les machines à vecteurs de support ou SVM (Séparateurs à vastes marges) sont des algorithmes qui séparent les données en classes. Pendant l'entraînement, un SVM trouve une ligne qui sépare les données d'un jeu en classes spécifiques et maximise les marges (les distances entre les frontières de séparation et les échantillons les plus proches) de chaque classe. Après avoir appris les lignes de classification, le modèle peut ensuite les appliquer aux nouvelles données.
Les spécialistes placent le SVM dans la catégorie des « classificateurs linéaires » : l'algorithme est idéal pour identifier des classes simples qu'il sépare par des vecteurs nommés hyperplans. Il est également possible de programmer l'algorithme pour les données non linéaires, que l'on ne peut pas séparer clairement par des vecteurs. Mais, avec des données d'entraînement hypercomplexes – visages, traits de personnalité, génomes et matériel génétique – les systèmes de classes deviennent plus petits et plus difficiles à identifier et nécessitent un peu plus d'assistance humaine.
Les machines à vecteurs de support sont très utilisées dans la finance. Elles offrent une grande

précision sur les données actuelles et futures. Les modèles associés peuvent servir à comparer virtuellement les performances financières relatives, la valeur et les retours sur investissement. Les SVM dits non linéaires sont souvent mis à contribution pour classifier des images (vision par ordinateur) ou des mots, des phrases et des entités (NLP)[36].

5.3 Méthode des k plus proches voisins (KNN)

La méthode des "k plus proches voisins" fait partie des méthodes les plus simples d'apprentissage supervisé pouvant être utilisée pour les cas de régression et de classification. Apparemment, au sein de l'industrie de la science des données, elle est plus largement utilisée pour résoudre les problèmes de classification. C'est un algorithme simple qui stocke tous les cas disponibles et classe tous les nouveaux cas en prenant un vote majoritaire de ses voisins k. Le cas est alors assigné à la classe avec laquelle il a le plus en commun. Une fonction de distance effectue cette mesure[37].
Dans le cadre d'un processus d'aide à la décision, KNN peut être utilisé pour classer de nouveaux cas en fonction des cas existants et étiquetés. Par exemple, dans le domaine de la finance, la méthode KNN peut être utilisée pour aider à la décision d'investissement. En comparant des données passées et en utilisant des informations provenant des k plus proches voisins, il est possible de prendre des décisions éclairées concernant des investissements futurs.

KNN peut être facilement compris en le comparant à la vie réelle. Par exemple, si vous voulez des informations sur une personne, il est logique de parler à ses amis et collègues !

5.3.1 Le classificateur du plus proche voisin K (KNN)

Le classificateur du plus proche voisin K (KNN) est un algorithme de classification supervisée utilisé en apprentissage automatique. L'idée de base de cette méthode est de prédire la classe d'un nouvel échantillon en trouvant les K échantillons les plus proches dans l'ensemble de données d'entraînement et en attribuant la classe majoritaire de ces K voisins à l'échantillon à prédire.
les étapes de l'algorithme KNN :

— Calcul de la distance : Le premier pas de KNN est de calculer la distance entre les échantillons dans l'ensemble de données. La distance la plus couramment utilisée

est la distance euclidienne. où a et b sont deux échantillons, et n est le nombre total de dimensions de la caractéristique. ai et bi sont la ime dimension de la caractéristique de a et b.

— Sélection de K échantillons les plus proches : Une fois que toutes les distances ont été calculées, l'algorithme sélectionne les K échantillons les plus proches de l'échantillon à prédire.

— Attribution de la classe majoritaire : Enfin, l'algorithme attribue la classe majoritaire parmi les K échantillons les plus proches à l'échantillon à prédire.

5.4 Machine learning et analyses prédictives

5.4.1 l'analyse prédictive

L'analyse prédictive consiste à utiliser des données pour prédire les résultats futurs. Ce processus utilise l'analyse des données, le machine learning, l'intelligence artificielle et les modèles statistiques pour identifier des tendances susceptibles de prédire les comportements futurs. Les organisations peuvent utiliser des données historiques et actuelles pour prévoir de manière fiable et précise les tendances et les comportements à quelques secondes, jours ou années dans le futur[38].

5.4.2 l'utilisation du machine learning pour les analyses prédictives sur le dommaie d'aide a decision

Dans le domaine de l'aide à la décision, le machine learning peut être utilisé pour les analyses prédictives afin de fournir des informations sur les résultats futurs possibles en fonction des données historiques et des variables d'entrée actuelles. Cela permet de prendre des décisions plus éclairées et plus précises en anticipant les résultats probables.

Par exemple, dans le domaine de l'investissement de projets d'exploration et de production, le machine learning peut être utilisé pour analyser les données historiques de production, les conditions du marché, les coûts de production et d'autres variables pertinentes pour prédire les résultats futurs possibles en fonction de différentes stratégies d'investissement. Cela permet aux investisseurs de prendre des décisions plus éclairées en tenant compte des risques et des avantages potentiels.

En utilisant des algorithmes de machine learning tels que les arbres de décision, la

régression logistique, les SVM et les réseaux de neurones, les analyses prédictives peuvent être effectuées en fonction des données disponibles pour fournir des résultats prédictifs. Ces résultats peuvent ensuite être utilisés pour prendre des décisions en temps réel et optimiser les résultats en fonction des objectifs spécifiques de l'utilisateur[39].

Conclusion

Le machine learning offre des outils et des techniques puissantes pour l'aide à la décision. Les différents algorithmes et méthodes présentés permettent de traiter des problèmes de prédiction et de classification, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives pour la prise de décision basée sur des modèles et des données.

L'utilisation appropriée du machine learning dans le domaine de l'aide à la décision peut permettre d'améliorer la précision et l'efficacité des analyses prédictives, facilitant ainsi la prise de décision éclairée. Cependant, il est essentiel de comprendre les avantages et les limites de chaque algorithme et de choisir la méthode la mieux adaptée au problème et au contexte spécifique.

Le prochain chapitre se concentrera sur la résolution du problème d'aide à la décision multicritère en utilisant les différentes méthodes développées précédemment.

Chapitre 6

Conception d'un outil d'aide a décision pour l'investissement d'un projet Exploration et Production

Introduction

La modélisation est une traduction des paramètres du problème dans un langage accessible par la méthode de résolution utilisée, ou bien, c'est une façon de décrire le problème sous une forme qui introduit sa réalisation.

La modélisation d'un problème d'aide multicritère à la décision consiste à créer un modèle structuré qui permet d'analyser et de résoudre des problèmes de prise de décision complexes impliquant plusieurs critères. Dans un tel problème, il y a plusieurs alternatives possibles qui ont des avantages et des inconvénients selon différents critères. Le processus de modélisation implique la définition des critères pertinents, la collecte de données, l'analyse des alternatives, la pondération des critères en fonction de leur importance relative, et la recherche d'une solution optimale ou satisfaisante en utilisant des méthodes d'analyse multicritère. En somme, la modélisation d'un problème d'aide multicritère à la décision permet de prendre des décisions éclairées et fondées sur une analyse rigoureuse des alternatives.

Nous utiliserons dans ce chapitre le langage Python pour la programmation des algorithmes.

6.1 Présentation et identification du problème

Notre problème dans cette étude consiste à concevoir un outil visant à faciliter la tâche des décideurs dans l'appréciation de nombreuses propositions de projets et la sélection des projets

les plus en adéquation avec leurs objectifs. Dans cette perspective, la problématique de référence pour l'aide multicritère à la décision est la problématique de rangement qui permet de classer les différents projets selon leurs performances, de la meilleure à la moins bonne.
Ce classement permettra aux décideurs d'élaborer un planning adapté à leurs préférences et à la stratégie de l'entreprise. Toutefois, ce seul classement ne suffit pas à répondre aux besoins de l'entreprise, il est nécessaire de ranger les projets en différentes catégories caractérisées par leurs priorités.

6.2 Structure du modèle

6.2.1 L'ensemble des actions :

Comme il a été dèja mentionné, notre objectif consiste à ordonner les projets selon leurs performances. Alors l'ensemble des actions potentielles dans notre modèle de décision n'est autre que l'ensemble des projets que l'on notera p qui contient 28 projets.
Alors, l'ensemble d'actions sera défini comme suit :
P_i : Le $i^{éme}$ projet, pour i={1,2,.....n}
n :le nombre de projets qui vaut 28 dans notre cas.

6.2.2 L'ensemble des critères :

L'étape suivante revêt une importance tout aussi cruciale que la précédente, car c'est en utilisant ces critères que nous allons évaluer nos projets d'investissement. Suite à des entretiens avec nos encadreurs d'entreprise, nous avons réussi à identifier trois familles de critères :

Critères économiques :
1.Valeur Actuelle Nette (VAN).
2.Taux de Rentabilité Interne(TRI).
3.Enrichissement Relatif en Capital (ERC).
Critères stratégiques :
4.Catégorie du Prospect (CP) .
5.Ressource en place (Pmean).
6.Proximité aux instalation (PI).

Critère du risque :

7.Probabilité de Succès (POS).

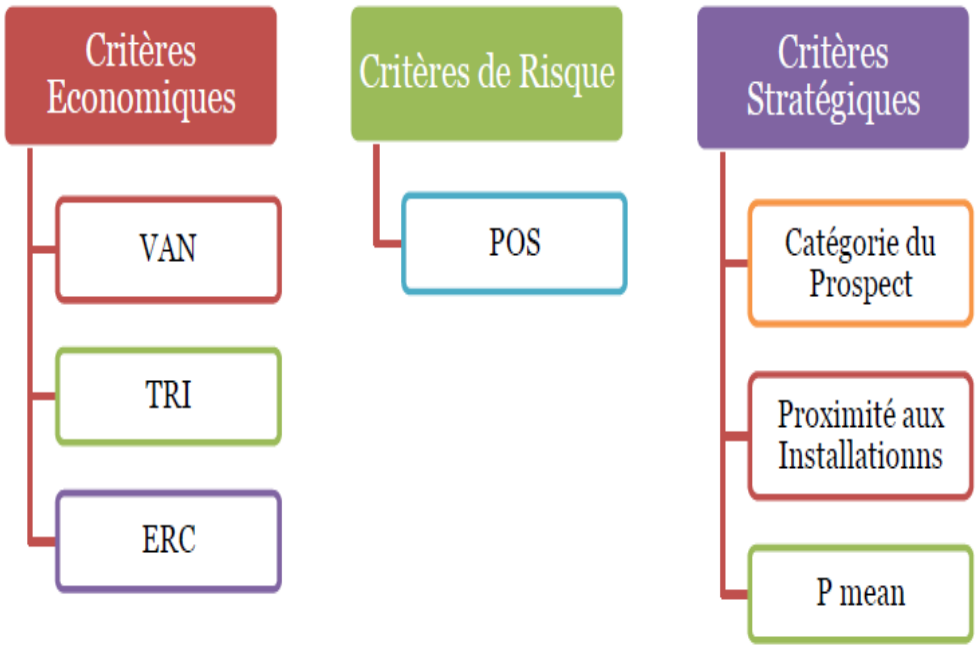


FIGURE 6.1 – Structure Du Problème.

Famille de critère	Critère	Unité de mesure	Type de critère	sens d'opt
Critère éconimique	VAN	MMUSS	Quantitatif	Max
	TRI	%	Quantitatif	Max
	ERC		Quantitatif	Max
Critère stratégiques	catégorie du prospect		Quantitatif	Max
	Pmean	MMm3	Quantitatif	Max
	Proximit e aux instalation	Km	Quantitatif	Min
Critère de Risque	POS	%	Quantitatif	Max

TABLE 6.1 – Famille de critère

6.2.3 Propriétés des critères

L'ensemble des critères choisis vérifie les conditions nécessaires à l'établissement d'une famille cohérente :

Exhaustivité : Cette condition est très importante, car elle permet d'intégrer toutes les considérations et points de vue du décideur. Nous voyons que notre famille de critères ne déroge pas à cette règle et recouvre entièrement les aspects qui doivent être considérés dans notre processus décisionnel. Autrement dit, il n'existe pas de critères omis par le décideur.

Cohérence : On remarque que chacun des critères retenus suit une certaine monotonie (Croit ou décroît et suit donc un sens de préférence), cela permet de cerner l'effet de l'évaluation de la performance sur la préférence globale.

Non-redondance : Nous remarquons que les critères retenus sont pratiquement bien définis sans représenter un dédoublement d'impact ou une redondance dans l'évaluation du processus.

6.3 Pondération des critères

Après avoir déterminé une famille cohérente de critères, nous procéderons à l'évaluation de l'importance relative de chacun de ces critères en calculant leurs poids respectifs. Cette étape est cruciale et requiert une coopération étroite entre le décideur et le chargé d'étude. D'un côté, le décideur doit exprimer clairement ses préférences quant à l'importance de chaque critère

dans le processus de décision, et de l'autre côté, le chargé d'étude doit exploiter ces suggestions de la meilleure manière possible afin de déterminer les poids qui correspondent le mieux aux exigences du décideur.

Vu l'importance de cette étape, nous avons pris le temps de recueillir toutes les suggestions du décideur concernant la pondération des critères, afin de choisir la méthode la plus adéquate qui représente le meilleur compromis entre simplicité, efficacité, fiabilité et compréhensibilité de la méthode pour le décideur. C'est pourquoi nous avons opté pour la méthode AHP pour le calcul des poids des critères d'évaluation, étant donné qu'elle est la plus adaptée pour ce type de manipulation[43].

6.3.1 Outil de pondération basée sur la méthode AHP

Dans un premier temps, nous avons demandé aux décideurs d'exprimer leurs préférences, qui ont été ensuite converties en nombres à l'aide de l'échelle de SAATY. Ensuite, nous avons élaboré la matrice de jugements à partir de ces préférences exprimées.

Suite à une discussion avec les décideurs, ils nous ont proposé l'évaluation suivante :

VAN : Egalement important que **VAN** ,légèrement plus important que **TRI**, légèrement plus important que **ERC**, fortement plus importante que **Catégorie du Prospect**, fortement plus importante que**Pmean**, très fortement plus importante que **POS**, absolument plus importante que **PI**, **TRI** : Egalement important que **TRI**, légèrement plus important que **ERC**,légérement plus important que **Catégorie du Prospect**, fortement plus importante que **Pmean**,Trés fortement plus importante que **POS**, absolument plus importante que **PI**,

ERC : Egalement important que **ERC**,légérement plus important que **Catégorie du Prospect**, légérement plus important que **Pmean**,fortement plus importante que **POS**, térs fortement plus importante que **PI**,

Catégorie du Prospect : Egalement important que **Catégorie du Prospect**, légérement plus important que**Pmean**, fortement plus importante que **POS**,Trés fortement plus importante que **POS**, absolument plus importante que **PI**,

Pmean : Egalement important que **Pmean**, légérement plus important que **POS**,fortement plus importante que **PI** ,

POS : Egalement important que **POS**, légérement plus important que **PI**,

PI : Egalement important que **PI**.

la matrice de comparaison entre les critères :

	VAN	TRI	ERC	CP	Pmean	POS	PI
VAN	1	3	3	5	5	7	9
TRI	0.333333	1	3	3	5	7	9
ERC	0.333333	0.333333	1	3	3	5	7
CP	0.2	0.3333333	0.333333	1	3	5	7
Pmean	0.2	0.2	0.333333	0.3333333	1	3	5
POS	0.1428571	0.1428571	0.2	0.2	0.3333333	1	3
PI	0.111111	0.111111	0.1428571	0.1428571	0.2	0.3333333	1

TABLE 6.2 – la matrice de comparaison

En utilisant la méthode AHP, nous avons calculé les pondérations des critères à l'aide de Python, comme illustré dans le tableau suivant :

	Poids
VAN(MMUS$)	0.329263
TRI(%)	0.227658
ERC	0.151905
Catégorie du Prospect	0.115239
Pmean(MMTEP)	0.076497
POS(%)	0.049246
Proximité aux installations(KM)	0.035462

FIGURE 6.2 – Les poids des critéres

6.3.2 Table de Synthèse de l'entreprise SONATRACH

La table ci dessous regroupe les différentes données réalisées par SONATRACH.

Bassin	Périmètre	Option de développements	Investissement (MM$)	Coût de Forage 2022 (MM$)	CAPEX développement (MM$US)		Distance		MMBEP	MMTEP	POS	Catégorie	Cas déterministe		Cas probabiliste
						ERC	Distance par rapport aux infrastructures	Expédition					VAN @10% (MMUS$)	TRI	EMV (MMUS$)
Nord	Périmètre 1	Projet 1	480,40	46,10	434,30	34%	237	HASSI R'MEL	61,03	7,77	45%	C	161,43	14,2%	50,31
	Périmètre 2	Projet 2	308,51	13,86	294,66	14%	138	Rac Toumb puis vers Bickra	29,85	3,80	74%	C	42,83	13,3%	28,62
Berkine	Périmètre 3	Projet 3	311,69	43,99	267,70	103%	59	Gaz (Ligne BRN-MLE) / Huile BBK	158,14	21,85	64%	C	340,3	25,8%	201,5
	Périmètre 5	Projet 4	67,29	12,41	54,87	18%	50	CPF Gassi Touil	20,82	2,31	28%	C	11,37	12,3%	-4,76
	Périmètre 5	Projet 5	221,78	54,64	167,13	2%	90	CPF Gassi Touil	41,78	5,83	28%	B	4,21	10,3%	-34,84
	Périmètre 6	Projet 6	116,05	12,67	103,38	51%	50	CPF MLE	56,19	7,87	39%	C	59,75	12,9%	41,41
	Périmètre 7	Projet 7	241,76	9,57	232,19	19%	43	CPF MLE-FCP	80,37	11,20	45%	A	46,90	11,3%	38,63
	Périmètre 7	Projet 8	243,96	11,76	232,19	82%	43	CPF MLE-FCP	118,22	16,49	35%	C	139,40	14,8%	118,87
	Périmètre 8	Projet 9	55,96	10,60	45,36	29%	18	CPF MLE-FCP	6,76	0,86	45%	A	16,10	16,6%	1,34
Illizi	Périmètre 9	Projet 10	299,74	9,70	290,04	57%	29	CPF Ohanet	101,29	14,08	34%	B	171,17	13,7%	158,71
	Périmètre 9	Projet 11	257,58	8,65	248,93	56%	29	CPF Ohanet	94,25	13,13	34%	B	144,77	13,2%	144,77
	Périmètre 10	Projet 12	159,51	10,82	148,68	16%	105	CPF Alrar	34,53	4,83	26%	B	25,87	12%	15,13
	Périmètre 10	Projet 13	154,46	10,40	144,06	36%	83	CPF Alrar	41,01	5,74	38%	B	55,70	14,1%	35,96
	Périmètre 11	Projet 14	151,47	7,42	144,06	137%	83	CPF Zarzaitine	98,67	13,74	33%	B	206,83	16,7%	113,86
	Périmètre 12	Projet 15	160,24	6,47	153,77	43%	145	CPF Tiguentourine	42,08	5,89	30%	C	69,05	13,1%	54,37
	Périmètre 12	Projet 16	83,77	5,69	78,08	114%	75	CPF Tiguentourine	42,12	5,90	30%	C	95,86	25,3%	76,82
Centre	Périmètre 13	Projet 17	1627,75	11,20	1616,55	18%	273	Rhourde Chegga	155,37	19,76	35%	A	299,49	13,4%	289,68
	Périmètre 13	Projet 18	1630,60	10,72	1619,88	18%	284	Rhourde Chegga	154,49	19,65	28%	A	291,15	13,3%	281,76
	Périmètre 13	Projet 19	1632,35	10,96	1621,39	28%	289	Rhourde Chegga	177,01	22,51	26%	A	464,79	15,1%	412,21
	Périmètre 14	Projet 20	109,91	11,10	98,81	48%	15	Hassi Terfa	16,78	2,13	24%	B	52,27	22,5%	3,97
	Périmètre 14	Projet 21	107,81	10,84	96,97	92%	8	Rhourde El Baguel	26,51	3,37	19%	C	98,97	31,6%	9,86
	Périmètre 15	Projet 22	309,71	10,56	299,15	73%	325	GASSI EL AGREB ZOTTI	71,38	9,56	63%	C	243,96	31,0%	164,43
	Périmètre 16	Projet 23	118,27	8,45	109,82	36%	50	Ngousa	15,99	2,03	26%	A	43,04	18,8%	30,92
	Périmètre 17	Projet 24	147,95	0,00	147,95	116%	205	Guellala	45,74	5,92	100%	A	171,36	32,7%	171,4
	Périmètre 17	Projet 25	231,74	11,00	220,74	113%	303	Guellala	65,43	8,42	28%	A	261,8	33,6%	201,1
	Périmètre 17	Projet 26	233,87	11,28	222,59	101%	310	Guellala	61,20	7,88	29%	A	237,2	31,6%	183,7
	Périmètre 17	Projet 27	234,31	11,00	223,31	72%	315	Guellala	43,26	6,37	30%	A	168,3	26,1%	158,6
	Périmètre 17	Projet 28	230,38	11,28	219,10	93%	293	Guellala	59,65	7,69	30%	C	229,2	31,2%	187,0

FIGURE 6.3 – Synthèse des résultats économiques par projet.

6.3.3 Matrice de décision

Suite à l'échange avec le décideur au sujet des Catégorie de Prospect, ils ont exprimé une préférence pour une zone spécifique par rapport à une autre. Ils ont établi une classification des zones de 1 à 3, en fonction des taux de taxes applicables, selon l'ordre suivant :$A > B > C$. Les valeurs suivantes sont définies :

	Catégorie de Prospect
A	3
B	2
C	1

TABLE 6.3 – Critéres Qualitatif

La table ci dessous définie la matrice de décision regroupant la performance du projet P_i par rapport au critère C_j pour i = 1,2,....,28 et j = 1,2, ...,7 est définit comme suit :

	VAN(MMUS$)	TRI(%)	ERC	Catégorie du Prospect	Pmean(MMTEP)	POS(%)	Proximité aux installations(KM)
PROJET 1	161.430610	0.141534	0.336037	1.0	7.769600	0.453503	237.0
PROJET 2	42.828696	0.133385	0.138823	1.0	3.796800	0.740000	138.0
PROJET 3	340.322397	0.257578	1.091866	1.0	21.847655	0.635025	59.3
PROJET 4	11.971709	0.123256	0.177924	1.0	2.914380	0.280681	50.0
PROJET 5	4.210000	0.103000	0.018983	2.0	5.825960	0.280000	90.0
PROJET 6	59.748357	0.129227	0.514864	1.0	7.866032	0.390000	50.0
PROJET 7	46.898495	0.112603	0.193988	3.0	11.197384	0.450000	43.0
PROJET 8	199.403286	0.147558	0.817369	1.0	16.486118	0.350000	43.0
PROJET 9	16.100000	0.166000	0.287683	3.0	0.860000	0.450000	18.0
PROJET 10	171.173187	0.136504	0.571074	2.0	14.075660	0.340000	29.0
PROJET 11	144.765056	0.132294	0.562018	2.0	13.132020	0.340000	29.0
PROJET 12	25.865597	0.119660	0.162161	2.0	4.834071	0.260000	105.0
PROJET 13	55.697226	0.140777	0.360590	2.0	5.741271	0.390000	83.0
PROJET 14	206.833996	0.167116	1.365480	2.0	13.739763	0.330000	83.0
PROJET 15	69.053872	0.190750	0.430952	1.0	5.891130	0.300000	145.0
PROJET 16	95.864606	0.253026	1.144441	1.0	5.869800	0.300000	75.0
PROJET 17	299.485331	0.133518	0.183988	3.0	19.760000	0.350000	272.5
PROJET 18	291.152124	0.132602	0.178555	3.0	19.648000	0.280000	283.5
PROJET 19	464.786391	0.150572	0.284735	3.0	22.512000	0.260000	288.5
PROJET 20	52.274271	0.225043	0.475589	2.0	2.134000	0.237807	15.0
PROJET 21	98.973242	0.315736	0.918040	1.0	3.372000	0.188505	8.0
PROJET 22	243.964486	0.309830	0.787723	1.0	9.560057	0.686586	325.0
PROJET 23	43.041351	0.187832	0.363919	3.0	2.034000	0.258994	50.0
PROJET 24	171.361355	0.327211	1.158214	3.0	5.918990	1.000000	205.0
PROJET 25	261.841392	0.336224	1.129895	3.0	8.422990	0.280000	303.0
PROJET 26	237.231835	0.316443	1.014380	3.0	7.884990	0.293469	310.0
PROJET 27	168.346918	0.260966	0.716656	3.0	6.366990	0.299821	315.0
PROJET 28	229.172905	0.312095	0.994749	1.0	7.688990	0.300000	293.0

FIGURE 6.4 – Matrice de décision des projet

6.4 Choix de l'application

Anaconda :

Anaconda est un outil dont la distribution est libre et open source. Il est destiné à la programmation dans un environnement Python et R. Anaconda est largement utilisé en sciences de données,

en intelligence artificielle ou Machine Learning. Cette distribution scientifique de Python renferme de nombreux packages nécessaires à l'analyse de données. Anaconda est également un gestionnaire d'environnement open source.

Cet outil qui recense plus de 20 millions d'utilisateurs dans le monde comprend entre autres :

- une installation de l'environnement Python,
- Des IDE (environnement de développement intégré) de dernière génération à l'instar de Jupyter ou de Spyder,
- Des packages de Data Science comme Panda, Numpy, Scikit-Learn. . . l'outil Conda pour la gestion des environnements et des répertoires de package.

Anaconda assure grâce à ses différents outils et à l'environnement Python, une collecte, et une transformation à grande échelle des données. Jupyter, l'un des IDE présents dans Anaconda, prend en charge désormais plus de 40 langages de programmation[40].

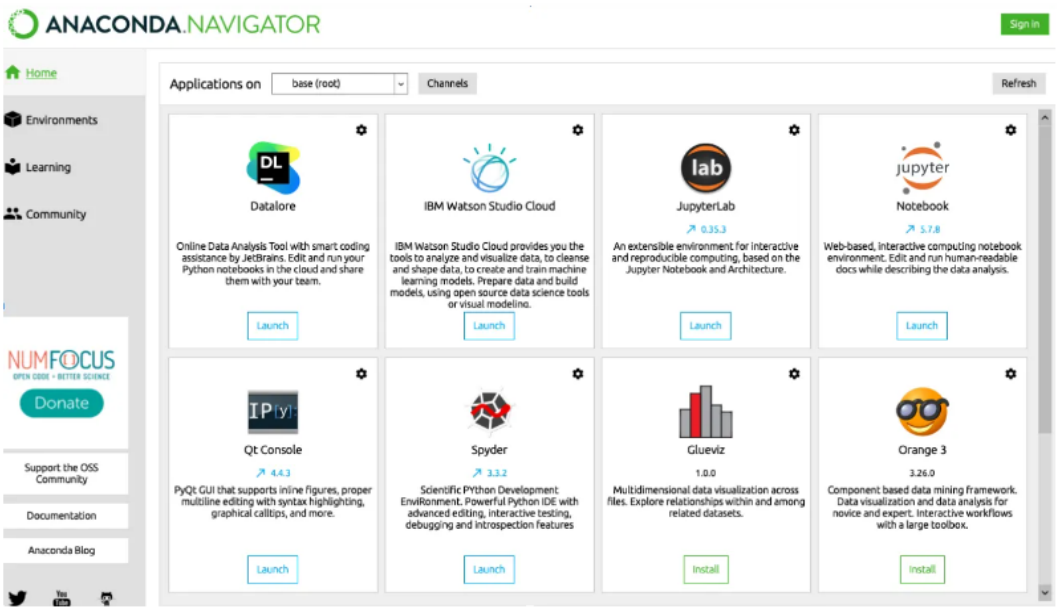


FIGURE 6.5 – L'interface Du Logciel

Dans ce chapitre nous allons utiliser jupyter du logiciel Anaconda pour les algorithmes en language Python.

6.5 Choix et justification de la méthode de résolution

Notons tout d'abord que la phase du choix des méthodes multicritères pour la résolution d'un problème n'est pas indépendante de la phase modélisation. On a vu dans le 4ième chapitre que les méthodes d'aide à la décision multicritère sont groupées en deux grandes familles :
La théorie de l'utilité multi-attribut,les méthodes de surclassement.
Les méthodes de surclassement reposent sur l'utilisation de la relation de surclassement. Elles sont intéressantes car elles permettent au décideur d'examiner toutes les relations de surclassement entre les différentes actions, afin de résoudre les contradictions et les conflits.
Le principe des méthodes multi-attribut, consiste en l'agrégation des différents critères et alternatives en une seule fonction représente les préférences du décideur. Donc, la structure de préférence correspondante est un pré-ordre ou un ordre total. Par conséquent, l'incomparabilité n'est pas admise (ou assimilée à l'indifférence). Il est également utile de remarquer que dans une problématique de rangement, le résultat final est un pré-ordre.
Notre choix s'est porté sur les méthode ELECTRE I,ELECTRE II qui appartenant à la famille des méthodes de surclassement et la méthode SMART, AHP et TOPSIS appartenant à la famille des méthodes de multi-attribut, que nous avons présentées dans le chapitre 4, on a choisi aussi une hybridation entre les deux methodes electre 1 et smart . Ces derniers ont été retenus, et ce, pour des raisons principales. Ils sont simples à exploiter et présentent l'avantage d'être facilement comprises par le décideur. Elles permettent de répondre à une problématique en termes de procédure de classement.

6.6 Application des méthodes d'Aide à la Décision Multicritère

6.6.1 Implémentation de la résolution :

Pour faciliter la manipulation et l'utilisation du modèle par l'équipe de l'évaluation économique des projets d'implantation, et afin de gagner le temps et avoir de la précision dans ce travail,

nous avons crée une interface graphique (sous forme HTML.CSC), outil puissant traitant les matrices en programmant les méthodes multicritères choisi.

6.6.2 Présentation du modèle :

La modèle est structuré autour de plusieurs feuilles :

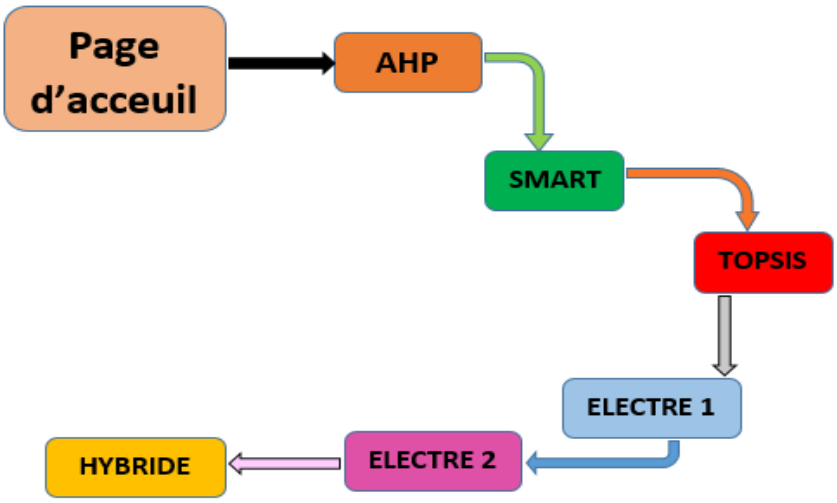


FIGURE 6.6 – Structure du modèle.

Page d'accueil :

FIGURE 6.7 – Page d'accueil de l'interface graphique.

6.6.3 Résolution avec la méthode AHP

Les résultats obtenus à l'aide de la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) fournissent une classement des actions évaluées en fonction de leur performance par rapport aux critères définis. Ce classement est basé sur l'analyse comparative des critères et des évaluations des actions, ainsi que sur les poids attribués à chaque critère.

les résultats qui sont résumés dans le tableau suivant :

Classement des Projets

"Actions classées du meilleur au moins bon"

	Action	Score	Classement
0	Action 25	0.740875	1
1	Action 24	0.688409	2
2	Action 26	0.666851	3
3	Action 19	0.645872	4
4	Action 3	0.642901	5
5	Action 22	0.563665	6
6	Action 28	0.551892	7
7	Action 27	0.550874	8
8	Action 14	0.482396	9
9	Action 17	0.455771	10
10	Action 18	0.454179	11
11	Action 21	0.406999	12
12	Action 16	0.364300	13
13	Action 8	0.344185	14
14	Action 10	0.338377	15
15	Action 23	0.305623	16
16	Action 11	0.302126	17
17	Action 20	0.271411	18
18	Action 1	0.234632	19
19	Action 9	0.227953	20
20	Action 13	0.213162	21
21	Action 7	0.211948	22
22	Action 15	0.205849	23
23	Action 6	0.152704	24
24	Action 12	0.119905	25
25	Action 2	0.117068	26
26	Action 5	0.080042	27
27	Action 4	0.052463	28

FIGURE 6.8 – Résolution de la méthode AHP Avec Python

6.6.4 Résolution avec la méthode ELECTRE I

La méthode ELECTRE I permet d'obtenir des résultats en classant des actions en fonction de critères prédéfinis. Ces critères sont pondérés et les actions sont évaluées selon leur concordance et leur discordance par rapport aux autres actions. Les résultats obtenus à l'aide de la méthode ELECTRE I sont basés sur une mesure agrégée des concordances et discordances, qui permet de déterminer un classement des actions en fonction de leur performance par rapport aux critères établis.

les résultats qui sont résumés dans le tableau suivant :

Classement des Projets

"Actions classées du meilleur au moins bon"

	Action	Score	Classement
0	Action 25	98.211732	1
1	Action 19	165.425965	2
2	Action 24	64.790871	3
3	Action 17	110.205761	4
4	Action 26	90.294405	5
5	Action 3	116.200800	6
6	Action 18	107.838978	7
7	Action 22	92.924233	8
8	Action 14	72.589403	9
9	Action 27	67.616789	10
10	Action 28	86.788920	11
11	Action 8	68.732384	12
12	Action 10	58.831208	13
13	Action 11	50.061466	14
14	Action 1	62.372842	15
15	Action 16	35.034817	16
16	Action 21	33.465737	17
17	Action 6	22.289837	18
18	Action 15	28.568448	19
19	Action 20	18.272830	20
20	Action 9	6.454610	21
21	Action 13	22.058092	22
22	Action 23	16.557140	23
23	Action 7	18.246362	24
24	Action 2	19.489253	25
25	Action 12	12.905053	26
26	Action 4	6.122037	27
27	Action 5	5.294053	28

FIGURE 6.9 – Résolution de la méthode ELECTRE 1 Avec Python

6.6.5 Résolution avec la méthode ELECTRE II

La méthode ELECTRE II évalue et classe des actions en fonction de critères prédéfinis en utilisant des matrices de performance, de concordance et de discordance. Elle établit des relations de surclassement fort et faible pour déterminer le classement direct et inverse des actions. Les résultats sont présentés sous forme de classements et de matrices, permettant d'identifier les actions performantes. Cette méthode facilite la prise de décision dans des situations complexes en prenant en compte plusieurs critères.

On attribue trois de concordance : C^{-}= 0.25 , C^{0}=0.25 , C^{+}=0.5

les résultats qui sont résumés dans les tableaux suivant :

Classement direct

	Action	Classement direct
0	Action 25	1
1	Action 19	2
2	Action 24	3
3	Action 17	4
4	Action 18	5
5	Action 26	6
6	Action 3	7
7	Action 22	8
8	Action 28	9
9	Action 27	10
10	Action 14	11
11	Action 8	12
12	Action 10	13
13	Action 11	14
14	Action 1	15
15	Action 16	16
16	Action 21	17
17	Action 15	18
18	Action 6	19
19	Action 20	20
20	Action 13	21
21	Action 9	22
22	Action 7	23
23	Action 23	24
24	Action 2	25
25	Action 12	26
26	Action 4	27
27	Action 5	28

FIGURE 6.10 – Classement direct de la méthode ELECTRE 2 Avec Python

Classement inverse

	Action	Classement inverse
0	Action 5	1
1	Action 4	2
2	Action 12	3
3	Action 7	4
4	Action 2	5
5	Action 9	6
6	Action 23	7
7	Action 13	8
8	Action 6	9
9	Action 20	10
10	Action 15	11
11	Action 16	12
12	Action 21	13
13	Action 11	14
14	Action 1	15
15	Action 10	16
16	Action 27	17
17	Action 8	18
18	Action 28	19
19	Action 18	20
20	Action 14	21
21	Action 17	22
22	Action 22	23
23	Action 24	24
24	Action 26	25
25	Action 19	26
26	Action 25	27
27	Action 3	28

FIGURE 6.11 – Classement inverse de la méthode ELECTRE 2 Avec Python

Classement des Projets

"Actions classées du meilleur au moins bon"

	Action	Score	Classement
0	Action 25	1.00	1
1	Action 19	1.00	2
2	Action 24	0.93	3
3	Action 17	0.93	4
4	Action 18	0.89	5
5	Action 26	0.89	6
6	Action 3	0.89	7
7	Action 22	0.74	8
8	Action 28	0.70	9
9	Action 27	0.70	10
10	Action 14	0.70	11
11	Action 8	0.63	12
12	Action 10	0.56	13
13	Action 11	0.48	14
14	Action 1	0.44	15
15	Action 16	0.44	16
16	Action 21	0.44	17
17	Action 15	0.33	18
18	Action 6	0.33	19
19	Action 20	0.26	20
20	Action 13	0.26	21
21	Action 9	0.26	22
22	Action 7	0.22	23
23	Action 23	0.22	24
24	Action 2	0.11	25
25	Action 12	0.07	26
26	Action 4	0.04	27
27	Action 5	0.00	28

FIGURE 6.12 – Résolution de la méthode ELECTRE 2 Avec Python

6.6.6 Résolution avec la méthode SMART

Les résultats de la méthode SMART fournissent un classement des alternatives en fonction de critères prédéfinis. Les scores sont calculés en normalisant la matrice de décision, permettant de comparer les valeurs. En triant les scores, on obtient un classement des meilleures alternatives. Cela aide à prendre des décisions éclairées en identifiant les options les plus performantes selon les critères choisis.

les résultats qui sont résumés dans le tableau suivant :

Classement des Projets

"Actions classées du meilleur au moins bon"

	Action	Score	Classement
0	25	0.717678	1
1	24	0.671275	2
2	26	0.667443	3
3	19	0.633134	4
4	3	0.619197	5
5	22	0.556444	6
6	28	0.537786	7
7	27	0.526038	8
8	17	0.480898	9
9	14	0.479446	10
10	18	0.470021	11
11	21	0.385707	12
12	16	0.370899	13
13	8	0.342031	14
14	10	0.330203	15
15	11	0.302859	16
16	23	0.277844	17
17	20	0.270899	18
18	1	0.251890	19
19	9	0.232536	20
20	7	0.231180	21
21	15	0.218355	22
22	13	0.207705	23
23	6	0.162926	24
24	12	0.134747	25
25	2	0.129174	26
26	5	0.089890	27
27	4	0.060803	28

FIGURE 6.13 – Résolution de la méthode SMART Avec Python

6.6.7 Résolution avec la Méthode TOPSIS

La méthode TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) est une méthode d'aide à la décision qui permet de comparer et classer des alternatives en fonction de critères prédéfinis.

En utilisant la matrice de décision et les poids des critères donnés. Les résultats obtenus, tels que la matrice normalisée, la matrice pondérée, les solutions idéales positive et négative, les distances positives et négatives(dont nous avons besoin dans la partie de machine learning), le score de proximité relative et le classement des alternatives, seront affichés pour analyse et interprétationqui sont dans le tableau ci dessous :

Les projets	Mesure de séparation idéale	Mesure de séparation Anti-idéale
Projet 1	0.11958303	0.05568505
Projet 2	0.15705839	0.02027647
Projet 3	0.05138986	0.12669992
Projet 4	0.16716916	0.00895604
Projet 5	0.17104081	0.0125991
Projet 6	0.14790513	0.02974189
Projet 7	0.15436404	0.02972749
Projet 8	0.10212402	0.07565479
Projet 9	0.16152144	0.02737085
Projet 10	0.11245888	0.06323631
Projet 11	0.12053553	0.05521856
Projet 12	0.1620981	0.01557828
Projet 13	0.14934228	0.02675182
Projet 14	0.09461491	0.08992728
Projet 15	0.14322277	0.03378309
Projet 16	0.12784359	0.06362415
Projet 17	0.08524292	0.10331579
Projet 18	0.08750044	0.10067334
Projet 19	0.06072016	0.15666615
Projet 20	0.14676006	0.03654014
Projet 21	0.1279315	0.06519197
Projet 22	0.08140893	0.09704325
Projet 23	0.15164483	0.03294932
Projet 24	0.09952246	0.09033998
Projet 25	0.07179183	0.11044768
Projet 26	0.08031404	0.10050549
Projet 27	0.10565717	0.07342367
Projet 28	0.08547116	0.09554649

TABLE 6.4 – Mesure de séparation idéale etn Anti-idéal eAvec Python

Et après avoir suivie les autres étapes, nous somme arrivée sur les résultats qui sont résumés dans le tableau suivant :

Classement des Projets

"Actions classées du meilleur au moins bon"

	Action	Score	Classement
0	action 19	0.317714	1
1	action 3	0.114340	2
2	action 25	0.711438	3
3	action 26	0.050850	4
4	action 17	0.068608	5
5	action 22	0.167421	6
6	action 18	0.161482	7
7	action 28	0.425556	8
8	action 14	0.144902	9
9	action 24	0.359921	10
10	action 8	0.314181	11
11	action 27	0.087678	12
12	action 10	0.151918	13
13	action 21	0.487299	14
14	action 16	0.190859	15
15	action 1	0.332297	16
16	action 11	0.547924	17
17	action 20	0.535002	18
18	action 15	0.720681	19
19	action 23	0.199346	20
20	action 6	0.337566	21
21	action 7	0.543805	22
22	action 13	0.178496	23
23	action 9	0.475818	24
24	action 2	0.606058	25
25	action 12	0.555833	26
26	action 5	0.410003	27
27	action 4	0.527830	28

FIGURE 6.14 – Résolution de la méthode TOPSIS Avec Python

6.6.8 Résolution avec la méthode Hybride

La méthode hybride d'aide à la décision est une approche qui combine plusieurs méthodes d'aide à la décision afin d'obtenir des résultats plus complets et plus précis. Cette méthode consiste à utiliser différents modèles ou techniques pour prendre en compte plusieurs critères

ou variables qui influencent la décision.

Les résultats obtenus à l'aide de la méthode hybride, qui combine l'approche de l'Electre 1 et de SMART, sont calculés en utilisant une matrice de performance normalisée et des poids de critères. La méthode hybride effectue une moyenne pondérée des scores SMART et ELECTRE pour obtenir des scores hybrides. En utilisant un seuil de concordance, les alternatives sont classées selon leur performance relative.

les résultats qui sont résumés dans le tableau suivant :

Classement des Projets

"Actions classées du meilleur au moins bon"

	Actions	Score hybride	Classement
0	Action 25	6.180292	1
1	Action 19	1.619457	2
2	Action 24	12.343680	3
3	Action 17	0.589663	4
4	Action 3	0.097534	5
5	Action 26	4.638454	6
6	Action 18	3.155594	7
7	Action 22	8.724232	8
8	Action 28	3.649047	9
9	Action 27	7.710892	10
10	Action 14	6.698005	11
11	Action 8	1.117450	12
12	Action 10	3.649745	13
13	Action 11	9.780203	14
14	Action 16	4.657522	15
15	Action 21	6.223934	16
16	Action 1	12.776194	17
17	Action 15	12.271317	18
18	Action 6	13.849456	19
19	Action 20	3.669871	20
20	Action 13	6.223028	21
21	Action 9	10.305210	22
22	Action 23	3.169259	23
23	Action 7	12.839382	24
24	Action 2	13.864780	25
25	Action 12	12.342740	26
26	Action 4	9.780848	27
27	Action 5	9.797809	28

FIGURE 6.15 – Résolution de la méthode HYBRIDE Avec Python

6.7 Discussion des résultats

Les méthodes de classement reposent sur l'utilisation de la relation de classement, et leur pertinence repose sur la capacité du décideur à examiner toutes les relations de classement entre les différentes actions. Cela lui permet d'explorer et de résoudre les zones de contradictions et de conflits qui peuvent émerger.

Nous avons opté pour la résolution du problème avec six différentes méthodes, bien connues pour leurs efficacités et ayant une large utilisation par les théoriciens et les praticiens notamment dans l'industrie pétrolière et gazière.Dans le tableau ci dessous on retrouve le classement de chaque méthode et le classement réel de l'entreprise SONATRACH :

Rank	AHP	ELECTRE I	ELECTRE II	SMART	HYBRIDE	TOPSIS	SONATRACH
1	p25	p25	p25	p25	p25	p19	p19
2	p24	p19	p19	p24	p19	p3	p17
3	p26	p24	p24	p26	p24	p25	p18
4	p19	p17	p17	p19	p17	p26	p3
5	p3	p26	p18	p3	p3	p17	p25
6	p22	p3	p26	p22	p26	p22	p26
7	p28	p18	p3	p28	p18	p18	p28
8	p27	p22	p22	p27	p22	p28	p24
9	p14	p14	p28	p17	p28	p14	p22
10	p17	p27	p27	p14	p27	p24	p10
11	p18	p28	p14	p18	p14	p8	p27
12	p21	p8	p8	p21	p8	p27	p11
13	p16	p10	p10	p16	p10	p10	p8
14	p8	p11	p11	p8	p11	p21	p14
15	p10	p1	p1	p10	p16	p16	p16
16	p23	p16	p16	p11	p21	p1	p15
17	p11	p21	p21	p23	p1	p11	p1
18	p20	p6	p15	p20	p15	p20	p6
19	p1	p15	p6	p1	p6	p15	p7
20	p9	p20	p20	p9	p20	p23	p13
21	p13	p9	p13	p7	p13	p6	p23
22	p7	p13	p9	p15	p9	p7	p2
23	p15	p23	p7	p13	p23	p13	p12
24	p6	p7	p23	p6	p7	p9	p21
25	p12	p2	p2	p12	p2	p2	p20
26	p2	p12	p12	p2	p12	p12	p9
27	p5	p4	p4	p5	p4	p5	p4
28	p4	p5	p5	p4	p5	p4	p5

TABLE 6.5 – Classement des projets avec les six méthodes.

La compagnie SOATRACH classe ses projets d'exploration sur la base d'un seul critère, elle s'agit d'une étude monocritère. Le critère pris en considération est la Valeur Monétaire Espérée (EMV).

Lors de l'analyse des résultats des méthodes AHP, ELECTRE 1, ELECTRE 2, SMART et de la méthode HYBRIDE, nous pouvons observer les classements suivants pour les projets évalués :

AHP : PROJET 25
ELECTRE 1 : PROJET 25
ELECTRE 2 : PROJET 25
SMART : PROJET 25
TOPSIS : PROJET 19
HYBRIDE : PROJET 25
L'analyse de ces résultats permet d'identifier des tendances et des différences entre les méthodes utilisées.

6.7.1 Discussion des résultats de la méthode AHP :

Selon la méthode AHP, le meilleur projet est le PROJET 25 avec un score de 0.74,suivi par le PROJET 24 avec un score de 0.68.

6.7.2 Discussion des résultats de la méthode ELECTRE I :

Le meilleur projet selon ELECTRE 1 est aussi le PROJET 25, avec un score de 98.21, suivi par le PROJET 19 avec un score de 165.42.

6.7.3 Discussion des résultats de la méthode ELECTRE II :

L'analyse des résultats montre que le meilleur projet est le PROJET 25, avec un score de 1.0, suivi par le PROJET 19 avec le méme score de 1.0 .

6.7.4 Discussion des résultats de la méthode SMART :

Les résultats obtenues par SMART montrent que le meilleur projet est le PROJET 25 avec un score de 0.71, suivi par le PROJET 24 avec une performance de 0.67 .

6.7.5 Discussion des résultats de la méthode TOPSIS :

Les résultats de TOPSIS prouvent que le meilleur projet est le PROJET 19 , avec un score de 0.31, suivi par le PROJET 3 avec un score de 0.11 .

6.7.6 Discussion des résultats de la méthode HYBRIDE

Le meilleur projet selon HYBRIDE est proposé aussi PROJET 25 , avec un score de 6.18, suivi par le PROJET 19 avec un score de 1.61.
Ces résultats soulignent l'importance de considérer plusieurs méthodes d'aide à la décision pour obtenir une évaluation plus complète et plus fiable des alternatives. Chaque méthode apporte sa propre perspective et ses propres critères, et l'hybridation permet de combiner ces approches pour une prise de décision plus éclairée.

Il convient de noter que les scores reflètent la performance de chaque projet de manière simultanée, en fonction de tous les critères d'évaluation. Une analyse de la gamme des scores des projets pour chaque méthode, telle qu'illustrée dans le tableau ci-dessous, révèle une variation considérable entre les scores des projets. Cette constatation nous permet de conclure que les écarts de performance entre les projets sont significatifs.

	Max des scores	Mindes scores	L'étendue
AHP	0.74	0.05	0.69
ELECTRE I	165.42	5.29	160.13
ELECTRE II	1	0	1
SMART	0.71	0.06	0.65
TOPSIS	0.72	0.05	0.67
HYBRIDE	13.86	0.09	13.77

TABLE 6.6 – Analyse de l'étendue des scores des projets

6.8 Comparaison des méthodes AMD a l'aide de Machine Learning

Dans cette section, nous allons établir une comparaison entre les méthodes d'aide a décision et machine learning en utilisant nos résultats précédemment obtenus dans le cas de SONATRACH. Pour cette problématique, nous avons opté pour l'algorithme de régression linéaire .

6.8.1 Choix de l'application

Jupyter Notebook est une application web open source que vous pouvez utiliser pour créer et partager des documents qui contiennent du code en direct, des équations, des visualisations et du texte. Jupyter Notebook est entretenu par les gens du projet Jupyter.
Jupyter Notebooks est un projet dérivé du projet IPython, qui avait un projet IPython Notebook lui-même. Le nom, Jupyter, vient des langages de programmation supportés par le noyau : Julia, Python et R. Jupyter est livré avec le noyau IPython, qui vous permet d'écrire vos programmes en Python, mais il y a actuellement plus de 100 autres noyaux que vous pouvez également utiliser[42].
Les utilisations comprennent : Le nettoyage et la transformation des données, la simulation numérique, la modélisation statistique, la visualisation des données, l'apprentissage automatique (machine learning) et bien plus encore.

FIGURE 6.16 – Logo jupyter

6.8.2 Bibliothèques Python pour l'apprentissage automatique

1. NumPy

NumPy est une bibliothèque Python populaire pour le traitement multidimensionnel de tableaux et de matrices car elle peut être utilisée pour effectuer une grande variété d'opérations mathématiques. Sa capacité à gérer l'algèbre linéaire, la transformation de Fourier, et plus encore, rend NumPy idéal pour les projets d'apprentissage automatique et d'intelligence artificielle (IA), permettant aux utilisateurs de manipuler la matrice pour améliorer facilement les performances d'apprentissage automatique. NumPy est plus rapide et plus facile à utiliser que la plupart des autres bibliothèques Python.

2. Scikit-learn

Scikit-learn est une bibliothèque d'apprentissage automatique très populaire qui est construite sur NumPy et SciPy. Il prend en charge la plupart des algorithmes d'apprentissage classiques supervisés et non supervisés, et peut également être utilisé pour l'exploration de données, la modélisation et l'analyse. La conception simple de Scikit-learn offre une bibliothèque conviviale pour ceux qui découvrent l'apprentissage automatique.

3. Pandas

Pandas est une autre bibliothèque Python qui est construite sur NumPy, responsable de la préparation des ensembles de données de haut niveau pour l'apprentissage automatique et la formation. Elle repose sur deux types de structures de données, une (série) et deux (DataFrame). Cela permet à Pandas d'être applicable dans une variété d'industries, y compris la finance, l'ingénierie et les statistiques. Contrairement aux animaux eux-mêmes qui se déplacent lentement, la bibliothèque Pandas est rapide, conforme et flexible.

5. Matplotlib

Matplotlib est une bibliothèque Python axée sur la visualisation de données et principalement utilisée pour créer de beaux graphiques, histogrammes et graphiques à barres. Il est compatible pour tracer les données de SciPy, NumPy et Pandas[41].

6.8.3 Résolution du problème

Nous allons effectuer une comparaison des méthodes d'aide à décision dans cette partie . Pour ce faire, nous nécessitons les mesures de séparation de chaque alternative de la solution idéale précédemment obtenue dans la méthode TOPSIS. Ensuite, nous procéderons à leur classement tel qu'indiqué dans le tableau de classement ci-dessus, ce qui nous permettra d'obtenir :

	Ranking	AHP	ELECTRE1	ELECTRE2	SMART	HYBRIDE	TOPSIS	SONATRACH
0	1	0.071792	0.071792	0.071792	0.071792	0.071792	0.060720	0.060720
1	2	0.099522	0.060720	0.060720	0.099522	0.060720	0.051390	0.085243
2	3	0.080314	0.099522	0.099522	0.080314	0.099522	0.071792	0.087500
3	4	0.060720	0.085243	0.085243	0.060720	0.085243	0.080314	0.051390
4	5	0.051390	0.080314	0.087500	0.051390	0.051390	0.085243	0.071792
5	6	0.081409	0.051390	0.080314	0.081409	0.080314	0.081409	0.080314
6	7	0.085471	0.087500	0.051390	0.085471	0.087500	0.087500	0.085471
7	8	0.105657	0.081409	0.081409	0.105657	0.081409	0.085471	0.099522
8	9	0.094615	0.094615	0.085471	0.085243	0.085471	0.094615	0.081409
9	10	0.085243	0.105657	0.105657	0.094615	0.105657	0.099522	0.112459
10	11	0.087500	0.085471	0.094615	0.087500	0.094615	0.102124	0.105657
11	12	0.127932	0.102124	0.102124	0.127932	0.102124	0.105657	0.120536
12	13	0.127844	0.112459	0.112459	0.127844	0.112459	0.112459	0.102124
13	14	0.102124	0.120536	0.120536	0.102124	0.120536	0.127932	0.094615
14	15	0.112459	0.119583	0.119583	0.112459	0.127844	0.127844	0.127844
15	16	0.151645	0.127844	0.127844	0.120536	0.127932	0.119583	0.143223
16	17	0.120536	0.127932	0.127932	0.151645	0.119583	0.120536	0.119583
17	18	0.146760	0.147905	0.143223	0.146760	0.143223	0.146760	0.147905
18	19	0.119583	0.143223	0.147905	0.119583	0.147905	0.143223	0.154364
19	20	0.161521	0.146760	0.146760	0.161521	0.146760	0.151645	0.149342
20	21	0.149342	0.161521	0.149342	0.154364	0.149342	0.147905	0.151645
21	22	0.154364	0.149342	0.161521	0.143223	0.161521	0.154364	0.157058
22	23	0.143223	0.151645	0.154364	0.149342	0.151645	0.149342	0.162098
23	24	0.147905	0.154364	0.151645	0.147905	0.154364	0.161521	0.127932
24	25	0.162098	0.157058	0.157058	0.162098	0.157058	0.157058	0.146760
25	26	0.157058	0.162098	0.162098	0.157058	0.162098	0.162098	0.161521
26	27	0.171041	0.167169	0.167169	0.171041	0.167169	0.171041	0.167169
27	28	0.167169	0.171041	0.171041	0.167169	0.171041	0.167169	0.171041

FIGURE 6.17 – Classement des projets : mesures de séparation de chaque alternative.

Puisque nous somme dans un apprentissage supervisé, donc nous allons diviser notre dataset en deux partie :

y = SONATRACH "données de sortie"

X = (SMART,AHP,TOPSIS, ELECTRE1, ELECTRE2, HYBRIDE) "données d'entrée".

La figure ci dessous résume notre travail effectuer avec l'aide de technique de machine learning :

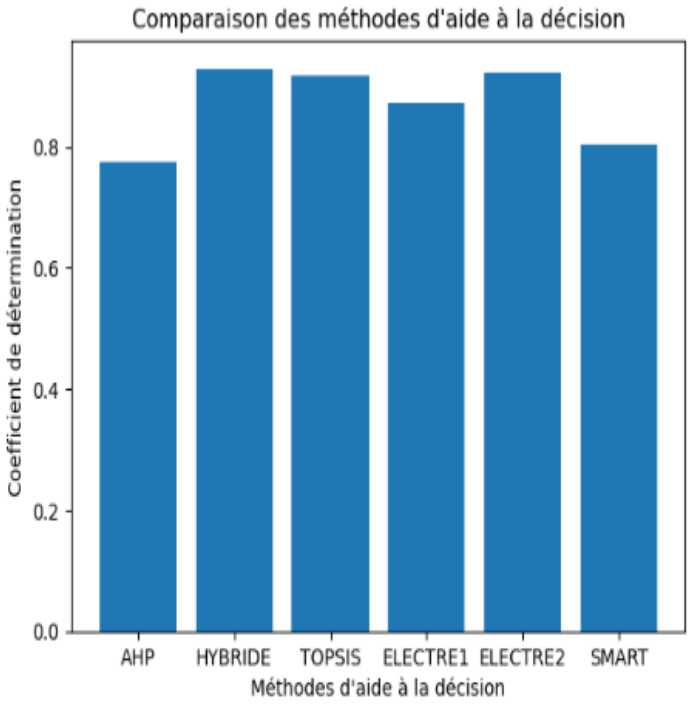
```python
import pandas as pd

df = pd.DataFrame({'Ranking': [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27,
                   'AHP': [0.07179183, 0.09952246, 0.08031404, 0.06072016, 0.05138986, 0.08140893, 0.08547116, 0.10565717, 0.094
                   'ELECTRE1': [0.07179183, 0.06072016,0.09952246 ,0.08524292 ,0.08031404 , 0.05138986, 0.08750044,0.08140893 ,0.
                   'ELECTRE2': [0.07179183, 0.06072016,0.09952246 ,0.08524292,0.08750044 ,0.08031404 ,0.05138986 ,0.08140893 ,0.6
                   'SMART': [0.07179183, 0.09952246,0.08031404 ,0.06072016, 0.05138986,0.08140893 ,0.08547116 ,0.10565717 ,0.0852
                   'HYBRIDE': [0.07179183, 0.06072016,0.09952246 ,0.08524292 ,0.05138986 ,0.08031404 ,0.08750044 ,0.08140893 ,0.6
                   'TOPSIS': [0.06072016,0.05138986 ,0.07179183 ,0.08031404 ,0.08524292 ,0.08140893 ,0.08750044 ,0.08547116 ,0.09
                  'SONATRACH': [0.06072016,0.08524292 ,0.08750044 ,0.05138986 ,0.07179183 ,0.08031404 ,0.08547116 ,0.09952246 ,0.

# Enregistrer le DataFrame dans un fichier CSV
df.to_csv('donner.csv', index=False)

df
```

```python
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.linear_model import LinearRegression
from sklearn.metrics import r2_score

# Charger les données à partir du fichier CSV
df = pd.read_csv('donner.csv')

# Diviser les données en variables d'entrée (X) et de sortie (y)
X = df[['SMART', 'AHP', 'TOPSIS', 'ELECTRE1', 'ELECTRE2', 'HYBRIDE']]
y = df['SONATRACH']

# Diviser les données en ensembles d'apprentissage et de test
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2, random_state=42)

# Créer le modèle de régression linéaire
regressor = LinearRegression()

# Entraîner le modèle sur l'ensemble d'apprentissage
regressor.fit(X_train, y_train)

# Prédire les sorties pour l'ensemble de test
y_pred = regressor.predict(X_test)

# Calculer le coefficient de détermination (R^2) du modèle
r2 = r2_score(y_test, y_pred)
print("Coefficient de détermination du modèle de régression linéaire : {:.2f}".format(r2))
```

```python
# Comparer les méthodes d'aide à la décision
methods = ['AHP', 'HYBRIDE', 'TOPSIS', 'ELECTRE1', 'ELECTRE2', 'SMART']
scores = []
for method in methods:
    X_method = df[method].values.reshape(-1, 1)
    X_method_train, X_method_test, y_train, y_test = train_test_split(X_method, y, test_size=0.2, random_state=42)
    regressor_method = LinearRegression()
    regressor_method.fit(X_method_train, y_train)
    y_method_pred = regressor_method.predict(X_method_test)
    method_score = r2_score(y_test, y_method_pred)
    scores.append(method_score)

# Afficher les scores des méthodes d'aide à la décision
plt.bar(methods, scores)
plt.xlabel("Méthodes d'aide à la décision")
plt.ylabel('Coefficient de détermination')
plt.title("Comparaison des méthodes d'aide à la décision")
plt.show()

# Créer un DataFrame des scores des méthodes
scores_df = pd.DataFrame({'Méthode': methods, 'Coefficient de détermination': scores})

# Afficher le DataFrame des scores des méthodes
scores_df
```

FIGURE 6.18 – Algorithme machine learning

Après avoir effectuer l'algorithme nous avons obtenu le score et le graphe suivant :



	Méthode	Coefficient de détermination
0	AHP	0.775927
1	HYBRIDE	0.929334
2	TOPSIS	0.918674
3	ELECTRE1	0.873743
4	ELECTRE2	0.923334
5	SMART	0.805167

AHP= 0.775927

Hybride= 0.929334

Topsis= 0.918674

Electre 1= 0.87374

Electre 2= 0.923334

Smart= 0.805167

Dans ce programme, le score est calculé pour le modèle de régression linéaire utilisant toutes les variables d'entrée par rapport à la variable de sortie 'SONATRACH'.
Le score obtenu représente à quel point les variables d'entrée peuvent expliquer la variation de 'SONATRACH'. Si le score est élevé, cela signifie que les variables d'entrée sont de bons prédicteurs de 'SONATRACH' et que le modèle de régression linéaire est capable de fournir de bonnes prédictions.

De plus, dans la partie où les méthodes d'aide à la décision sont comparées, le score est également calculé pour chaque méthode afin de comparer leur capacité à expliquer la variation de 'SONATRACH'. Cette comparaison permet de déterminer quelle méthode d'aide à la décision est la plus performante pour ce problème spécifique, donc on a les méthodes HYBRIDE et ELECTRE 2 qui sont égaux, l'une ou l'autre sont meilleures que les méthodes AHP, TOPSIS, ELECTRE 1 et SMART dans cegenre de problème et ils sont équivalents.
Pour un problème de ranking de projet, les méthodes HYBRIDE et ELECTRE 2 sont plus adéquates pour un meilleur résultat.

Conclusion :

Dans le cadre de créer un système d'aide à la décision multicritère pour résoudre le problème de ranking. Nous avons examiné six méthodes différentes : TOPSIS, SMART, ELECTRE1, ELECTRE 2, AHP et HYBRIDE, afin de déterminer laquelle convient le mieux aux décideur. Nous avons utilisé un processus basé sur le machine learning appelé KNN. Les résultats ont montré que les méthodes HYBRIDE et ELECTRE 2 ont obtenu le même score, tandis que les méthodes ELECTRE 1, AHP, TOPSIS et SMART ont été éliminées,ceci prouve que les deux prémiers méthodes sont les meilleures, et nous encourageonsl'entreprise SONATRACH à continer à explores et à exploiter davantage des données pour leurs futures projets.

Conclusion générale

Le présent travail, que nous avons étalé tout au long de ce mémoire, consistait à modéliser, à concevoir et à mettre en oeuvre un système interactif d'aide multicritère à la décision pour traiter un problème d'évaluation, classer et de sélection des projets d'investissement.

Notre étude visait à déterminer les actions, les critères et leurs poids pour établir une famille de critères cohérente. Dans le processus de résolution, nous avons choisi d'utiliser six méthodes d'aide à la décision multicritères (TOPSIS, SMART, ELECTRE 1, ELECTRE 2, AHP et HYBRIDE) ces méthode que nous avons utilisées permet de mieux respecter les nuances rèels. Elles nous ont permet de classer les projets du meilleur au moins bon, ensuite de faire une comparaison entre ces méthodes pour savoir laquelle est la plus adéquate pour ce genre de problème.

Nous avons proposé un processus basé sur la méthode de machine learning (ML) appelé la régression linéaire pour identifier la meilleure méthode parmi celles utilisées.

Nous avons trouvé que les méthodes ELECTRE2 et HYBRIDE ont le même score contrairement à les méthode SMART, ELECTRE 1,AHP et TOPSIS qui est éliminée.

Afin de rendre exploitable cette modélisation, un programme informatique intitulé classement des projets a été développé en utilisant langage PYTHON.

Les résultats obtenus lors de notre étude ont montré que l'aide multicritére à la décision représente certainement l'outil le plus adéquat pour permettre à une compagnie telle que la SONATRACH d'évoluer dans un environnement multicritére ou plusieurs exigences entrent en conflit.

Notre travail met en évidence que l'adoption d'une méthodologie rigoureuse d'aide à la décision permet d'obtenir des réponses satisfaisantes pour le décideur, en répondant de manière optimale à ses exigences.

Cependant, ce travail n'a pas prétention d'exhaustivité de ce type d'analyse mais pour mener

une étude approfondie, ces méthodes de classification restent flexible à travers :

- Le changement des coefficients de la matrice de comparaison par paires pour la méthode AHP, ainsi le type d'investissement.
- L'intégration de nouveaux (critères, projets) et voir l'incidence au niveau de la classification des projets.
- La manipulation et l'utilisation du modèle conçu.

En conclusion, nous avons réalisé que notre objectif n'était pas de leur imposer une solution, mais de proposer un compromis afin de répondre à la problématique soulevée. Il est important de souligner que le but d'un travail de recherche n'est pas nécessairement de fournir des réponses concrètes, mais plutôt de contribuer, même de manière limitée, aux problématiques actuelles.

Bibliographie

a. Bibliographie :

[2] Saber Houssem Eddine Criguene. L'organisation structurelle de la division exploration. Technical report, 2016.

[3] Valentinas Podvezko. The comparative analysis of mcda methods saw and copras. Engineering Economics, 2011.

[5] Denis Bouyssou, Didier Dubois, Marc Pirlot, and Henri Prade. Concepts et méthodes pour l'aide à la décision, volume 3, analyse multicritère. Hermès, 2006.

[4]Bernard Biju-Duval. Géologie sédimentaire : bassins, environnements de dépôts, formation du pétrole. Editions Technip, 1999.

[5]Salma Mostefai and Dihia Mohamed Yahiaoui. Etude de la rentabilité d'un projet pétrolier exploration-production Cas de la SONATRACH «IAP» de Boumerdes. PhD thesis, Université Mouloud Mammeri, 2021.

[6]year = 2015 address = Paris Voltaire Brice Etou OBAMI , title = Comptabilisation et audit des coûts pétroliers dans une société nonopératrice .

[7] Jean-Jacques Biteau and François Baudin. Géologie du pétrole : Historique, genèse, exploration, ressources. Dunod, 2017.

[8] L'aide multicritére à la décison. le cerveau du décideur.

[9] Farouk Aissanou. Décisions multicritères dans les réseaux de télécommunications autonomes. PhD thesis, 2012.

[10]A. NAFI et C. WEREY. Aide a la decision multicritere : introduction aux methodes d'analyse multicritere de type electre 2009.

[11] Jean-Pierre Brans and Ph Vincke. Note—a preference ranking organisation method :

(the promethee method for multiple criteria decisionmaking). Management science,31(6) :647–656, 1985.

[12] cour AIDE MULTICRITÈRE À LA DÉCISION .

[13] Matthias Ehrgott, Kathrin Klamroth, and Christian Schwehm. An mcdm approach to portfolio optimization. European Journal of Operational Research, 155(3) :752–770, 2004.

[14] Peter C Fishburn. Intransitive indifference with unequal indifference intervals. Journal of Mathematical Psychology, 7(1) :144–149, 1970.

[15] H.BOUNEIRAT. Conception d'un outil d'aide à la décision pour les problémes de forages.

[16] B.ROY et D. BOUYSSOU. Aide multicritère à la décision 1993.

[17]B.ROY. Méthodologie multicritère d'aide à la décision. 1986

[18] B Roy. Préférence, indifférence, incomparabilité. In Documents du LAMSADE, volume 9. Université de Paris-Dauphine, 1980.

[22] Bernard Roy. Méthodologie multicritère d'aide à la décision. Number BOOK. Economica, 1985.

[20] Serpil Sayin. Kaisa m. miettinen nonlinear multiobjective optimization kluwer academic publishers, 1999 isbn 0-7923-8278-1, 320 pages eur 134.00/usd 129.95. European Journal of Operational Research, 148(1) :229–230, 2003.

[21] Vincke. L'aide à la décision multicritère. 1998.

[22] Philippe Vincke. La modélisation des préférences. 1985.

[23] Philippe Vincke. L'aide multicritère à la décision. Editions de l'ULB et Editions Ellipses, 1989.

[24] J. SIMOS. Evaluer l'Impact sur l'Environnement : une approche originale par l'analyse multicritere et la negociation1990.

[*Ayadi*, 2010] Ayadi, D. (2010). Optimisation multicritère de la fiabilité : application du modèle de goal programming avec les fonctions de satisfactions dans l'industrie de traitement de gaz. Thèse de doctorat, Université d'Angers.

[25] Yves Bernard and J-C Colli. Dictionnaire économique et financier. 1989.

[26] Denis Babusiaux. Recherche et production du pétrole et du gaz : réserves, coûts, contrats. Editions TECHNIP, 2002.

[27] Denis Babusiaux. Décision d'investissement et création de valeur. Éditions Technip, Paris, 2005.

[36]Hicham Lmoussaoui, Hafida et Jamouli. Evaluation des risques-projet par une approche ahp/wpm : Application à un projet réel btp. 2015.

[37] Ward Edwards. Social utilities. Engineering Economist, 6 :119–129, 1971.

[38] Yoram Wind and Thomas L. Saaty. Marketing applications of the analytic hierarchy process. Management science, 26(7) :641–658, 1980.

[39]Yoram Wind and Thomas L. Saaty. Marketing applications of the analytic hierarchy process. Management science, 26(7) :641–658, 1980. [40] Abdelkader Hammami. Modélisation technico-économique d'une chaîne logistique dans une entreprise réseau. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Laval, 2003.

[41]Philippe Vincke et al. La modélisation des préférences. 1985.

[42] Berthier Roy and Patrice Bertier. La méthode ELECTRE II : une méthode de classement en prédence de critères multiples. 1971.

[43] IEF S&amp ;P Global Investment eport.pdf

[50] slimani leila .Modélisation d'un outil d'aide multicritére à la décision d'investissement dans les projets exploration-production pdf. [51] Division Exploration-SONATRACH.

[52]Rapport annuel de SONATRACH.

b. Webographie :

[1]http : www.sonatrach.dz.

[28] https ://www.talend.com/fr/resources/what-is-machine-learning/.

[29] https ://kobia.fr/quest-ce-que-le-machine-learning/.

[36] https ://www.lemagit.fr/conseil/Machine-Learning-les-9-types-dalgorithmes-les-plus-pertinents-en-entreprise.

[30] https ://www.simplilearn.com/10-algorithms-machine-learning-engineers-need-to-know-article.

[31]https ://cloud.google.com/learn/what-is-predictive-analytics ?hl=fr.

[32]https ://www.voxco.com/fr/blog/le-role-du-machine-learning-dans-lanalyse-predictive/.

[33] https ://www.jedha.co/formation-python/ananconda-python.

[34] https ://www.coursera.org/articles/python-machine-learning-library

[35] https ://realpython.com/jupyter-notebook-introduction/

[44] https ://attaqa.net/2022/12/25/guerre-en-ukraine-donc-gardons-l'OPEP-sur-un/

[45] https ://mostaql.com/portfolio/1175698-logo-of-sonatrach-celebration-of-the-60th-anniversary

[46]http ://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s3/combustibles.fossiles.html.

[47]https ://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/prospection-exploration-gaziere-et-petroliere.

[48]https ://www.alamyimages.fr/infographie-sur-le-processus-de-raffinage-du-petrole-raffinage-du-petrole-brut-illustration-vectorielle-image397407892.html

[49]https ://www.rts.ch/emissions/geopolitis/divers/4756191.html/BINARY/Dossier-gaz-de-schiste-SIG.pdf.

[50]https ://nexacu.com/insights-blog/python-magic-commands/

[51]https ://www.moyens.net/linux/comment-installer-anaconda-sur-ubuntu/