

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

**ORIENTER LA DÉCISION POUR LES PLANS D'ADAPTATIONS LIÉS AUX
CHANGEMENTS CLIMATIQUES POUR UNE COMPAGNIE PRODUCTRICE,
DISTRIBUTRICE ET TRANSPORTEUSE D'ÉLECTRICITÉ**

MÉMOIRE PRÉSENTÉ

**COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE INDUSTRIEL**

PAR

SAMAH BENNANI

DÉCEMBRE 2023

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire, de cette thèse ou de cet essai a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire, de sa thèse ou de son essai.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire, cette thèse ou cet essai. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire, de cette thèse et de son essai requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

MAÎTRISE EN INGÉNIERIE - CONCENTRATION GÉNIE INDUSTRIEL M. Sc. A.

Direction de recherche :

Georges Abdul Nour, Ph.D., directeur de recherche

Université du Québec à Trois-Rivières

François Gauthier, Ph.D., codirecteur de recherche

Université du Québec à Trois-Rivières

Jury d'évaluation :

Georges Abdul Nour, Ph.D., directeur de recherche

Université du Québec à Trois-Rivières

François Gauthier, Ph.D., codirecteur de recherche

Université du Québec à Trois-Rivières

Dragan Komljenovic, Ph.D., Membre externe

IREQ/HQ

Chantal Baril, Ph.D., Membre

Université du Québec à Trois-Rivières

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à exprimer ma gratitude envers mes parents et ma famille pour leur soutien constant et leurs encouragements tout au long de cette épreuve et de ce parcours pour l'accomplissement et la réalisation de ce mémoire.

Je voudrais également adresser mes sincères remerciements à mon directeur de mémoire, Georges Abdul-Nour, pour sa patience, son encadrement et ses précieux conseils. Son encouragement constant et son soutien infaillible m'ont permis de surmonter les obstacles et les difficultés rencontrés au cours de ces années et de transformer cette expérience en une expérience enrichissante.

Je souhaite également exprimer ma reconnaissance envers François Gauthier, mon codirecteur, pour son soutien.

Je ne peux pas oublier de remercier Raynald Vaillancourt pour son aide précieuse et ses conseils avisés.

Enfin, je tiens à souligner l'amitié et le soutien chaleureux de mes amis qui ont été présents à mes côtés tout au long de ce parcours.

Merci à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

« Le monde de demain sera le reflet des choix d'aujourd'hui »

— Dr. Sandrine Segovia-Kueny

RÉSUMÉ

Les impacts des changements climatiques devenant de plus en plus incertains, il sera essentiel pour les entreprises d'adapter leurs opérations afin de minimiser les risques et les perturbations. Parmi les entreprises particulièrement vulnérables aux effets des changements climatiques, on retrouve celles qui sont impliquées dans la production, la distribution et la transmission d'électricité. En raison de l'incertitude entourant l'impact des décisions prises, le processus décisionnel, pour les mesures d'adaptation des actifs et activités des entreprises face aux changements climatiques, est complexe en la matière. En vue d'évaluer les options possibles et de guider les décideurs, une approche multicritère est souvent utilisée.

Dans ce contexte, l'étude consiste à identifier la meilleure solution pour protéger et adapter les poteaux de bois électriques d'Hydro-Québec Distribution près du barrage de Paugan en Outaouais, des effets néfastes des changements climatiques, tels que la croissance de la végétation, la pourriture du bois, les pannes et bris, etc. Pour ce faire, l'approche multicritère est préconisée, impliquant l'évaluation simultanée de divers critères tels que la durabilité, la résistance aux conditions climatiques, le coût et l'entretien. Pour ce faire, il convient d'appliquer la méthode multicritère la plus appropriée à l'orientation du processus décisionnel.

Afin d'évaluer les différentes options en utilisant un ensemble de critères pondérés, le processus de hiérarchisation analytique (AHP) a été sélectionné. En effet, cette méthode permet de hiérarchiser et de pondérer les critères en fonction de leur importance relative dans le processus de prise de décision. En outre, en complément de l'analyse hiérarchique des processus (AHP), la méthode DELPHI a été mise en œuvre pour identifier les critères ainsi que leurs pondérations, en s'appuyant sur un consensus entre les experts.

Les critères ont permis d'identifier les plans les mieux adaptés pour atténuer les risques de changements climatiques pour Hydro-Québec Distribution. De plus, l'analyse met en évidence l'importance d'une approche holistique, tenant compte des interactions et des compromis entre ces critères.

En conclusion, l'utilisation réussie de l'AHP et de la méthode DELPHI a guidé les décisions pour l'adaptation aux changements climatiques chez Hydro-Québec Distribution, démontrant ainsi leur efficacité. De même, cette approche peut également être appliquée ailleurs pour évaluer des options et guider les décisions dans des situations d'incertitude.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	iv
RÉSUMÉ	vi
TABLE DES MATIÈRES.....	vii
LISTE DES FIGURES.....	xi
LISTE DES TABLEAUX.....	xiv
CHAPITRE 1 INTRODUCTION ET MISE EN CONTEXTE.....	15
1.1 Introduction	15
1.2 Présentation de l'entreprise Hydro-Québec.....	16
1.3 Mise en contexte et problématique	18
1.3.1 Scénarios utilisés à la modélisation du système climatique	20
1.3.2 Stratégie adoptée par Hydro-Québec.....	21
1.3.3 Vulnérabilités, impacts des changements climatiques sur l'industrie électrique	21
1.3.4 Aléas climatiques critiques pour HQD	23
1.3.5 Conclusion de l'analyse et recommandations de HQD.....	24
1.4 Question de recherche et objectifs.....	28
1.4.1 Questions de recherche	28
1.4.2 Objectif général.....	29
1.4.3 Objectif spécifique	29
1.5 Conclusion.....	29
CHAPITRE 2 LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES : NOTION DE BASE ET ÉVOLUTION	31
2.1 Introduction	31
2.2 Notion de base	31
2.3 Les modèles climatiques	33
2.3.1 Que sont les modèles climatiques?	33
2.3.2 Les limites des modèles climatiques.....	34
2.4 Scénarios d'émission et simulation climatique.....	35
2.5 Modèle climatique global	38
2.6 Incertitudes des projections climatiques.....	42
2.7 Les modèles climatiques au Québec.....	42

2.8	Évolution climatique	43
2.9	Impact et enjeux climatiques.....	47
2.10	Conclusion.....	48
	CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE	49
3.1	Introduction	49
3.2	Méthodologie.....	49
3.3	Définition de la MCDM	52
3.4	Principe général de la MCDM	52
3.4.1	Concepts et terminologie.....	54
3.5	Les méthodes multicritères d'aide à la décision.....	54
3.5.1	Agrégation complète.....	55
3.5.2	Agrégation partielle	58
3.5.3	Agrégation locale	60
3.5.4	Synthèse des trois familles de méthodes	61
3.6	Choix de la méthode	62
3.7	L'incertitude dans la MCDM	63
3.8	L'analyse hiérarchique du processus (AHP)	64
3.8.1	Aperçu historique.....	64
3.8.2	Principe de l'AHP	66
3.8.3	La démarche AHP	66
3.8.4	AHP software	71
3.8.5	Avantages et inconvénients	71
3.9	Méthode Delphi	73
3.9.1	Principe de la méthode Delphi.....	73
3.9.2	Étapes de la méthode Delphi.....	73
3.10	Conclusion.....	75
	CHAPITRE 4 IDENTIFICATION DES CRITÈRES DE DÉCISION	77
4.1	Introduction	77
4.2	Définir l'objectif de l'AHP.....	77
4.3	Définir les sous-systèmes/ alternatives	77
4.4	Choix des critères.....	78

4.5 Revue de littérature pour la sélection des critères.....	80
4.6 Fréquence de citation des critères les plus critiques de la revue	81
4.7 Le cadre conceptuel de la recherche	84
4.8 Justification du choix des critères	84
4.9 Approbation des critères	88
4.9.1 Réponses du questionnaire 1.....	89
4.10 Conclusion :.....	91
CHAPITRE 5 ÉTUDE DE CAS : APPLICATION DE LA MÉTHODE AHP POUR HQD FACE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES DANS LA RÉGION OUTAOUAIS-RIVIÈRES PAUGAN	92
5.1 Introduction	92
5.2 Présentation du cas.....	92
5.3 Application de l'AHP	94
5.3.1 Quantification des critères.....	97
5.3.2 Résultat de l'analyse par l'AHP-Software	106
5.4 Analyse de sensibilité.....	110
5.4.1 Définition	110
5.4.2 Mise en œuvre de l'analyse sensibilité	111
5.5 Conclusion.....	122
CHAPITRE 6 CONCLUSION.....	123
6.1 Synthèse de recherche.....	123
6.2 Contributions scientifiques	123
6.3 Limitations de l'étude	123
6.4 Impact potentiel sur le choix de l'alternative :	124
6.5 Conclusion et perspectives	125
REFERENCES.....	126
Lexique.....	135
ANNEXES.....	137
ANNEXE A : Vulnérabilité des actifs (Hydro-Québec Distribution, 2021).....	138
ANNEXE A : Vulnérabilité des actifs (Hydro-Québec Distribution, 2021) (suite).....	139
ANNEXE B : Exemple fiche de risque poteaux (Hydro-Québec Distribution, 2021)	140
ANNEXE B : Exemple fiche de risque poteaux (Hydro-Québec Distribution, 2021) (suite)...	141

ANNEXE C : Grille d'évaluation de risques (Hydro-Québec Distribution, 2021).....	142
ANNEXE D : Matrice de revue de littérature des 28 articles	143
ANNEXE E : Priorité des alternatifs par rapport aux sous critères	159

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Carte des grands équipements (Hydro-Québec, 2021).....	17
Figure 1-2 : Les groupes organisationnels et les principales participations d'Hydro-Québec (Hydro-Québec, 2020b).	17
Figure 1-3 : Exemples d'impacts des changements climatiques sur les activités de l'entreprise (Hydro-Québec, 2020c)	19
Figure 1-4 : Schéma d'interrelation des trois risques	27
Figure 2-1 : Météo, variabilité naturelle et changements climatiques modifiés de (Hydro-Québec Distribution, 2021).....	32
Figure 2-2 : Narratifs des scénarios d'émissions(Vailles, 2019).....	36
Figure 2-3 : Les 5 grandes trajectoires socio-économiques des SSP (Violaine Lepousez, 2022)	37
Figure 2-4 : Trajectoires d'émissions de CO ₂ selon les cinq scénarios du 6e rapport d'évaluation du GIEC, Groupe I (à droite), les catégories du Groupe III de scénarios d'émissions de CO ₂ -eq (en ppm) (à gauche) (Violaine Lepousez, 2022).....	39
Figure 2-5 : Carte des résultats moyens multimodèles CMIP5 pour les scénarios RCP2.6 et RCP8.5 en 2081-2100 (Charron, 2016)	45
Figure 3-1 : Méthodologie et démarche de travail	51
Figure 3-2 : Principe général d'analyse multicritère (Doumpos & Zopounidis, 2002) ..	54
Figure 3-3 : Structure hiérarchique de l'AHP (Doumpos & Zopounidis, 2002)	67
Figure 3-4 : Matrice de combinaison par paire (Doumpos & Zopounidis, 2002).....	68
Figure 3-5 : Démarche AHP	70
Figure 3-6 : Avantages de l'AHP (Saaty et al., 1984)	72
Figure 3-7 : Démarche de la méthode DELPHI (Habibi, Sarafrazi, & Izadyar, 2014)....	75
Figure 4-1 : Démarche de la sélection des critères dans la revue de littérature (Hydro-Québec Distribution, 2021).....	79
Figure 4-2 : Diagramme ISHIKAWA des critères sélectionnés	84

Figure 5-1: Poteau endommagé par de pic-bois (© Hydro-Québec, 2022)	93
Figure 5-2 : Poteaux dans le secteur de la traversée de rivière, non loin du barrage de Paugan, en Outaouais(Hydro-Québec, 2020a).....	94
Figure 5-3 : Structure hiérarchique (AHP) pour les mesures d'adaptation	96
Figure 5-4 : Question 1 du questionnaire 2 sur la comparaison des critères du niveau 1... <td>99</td>	99
Figure 5-5 : Matrice de comparaison des critères du niveau 1	100
Figure 5-6 : Question 2 sur la comparaison des sous-critères du niveau 2 par rapport aux critères techniques et sa matrice de comparaison	100
Figure 5-7 : Question 2 du questionnaire 2 sur la comparaison des sous-critères du niveau 2 par rapport au critère environnemental	101
Figure 5-8 : Question 3 du questionnaire 2 sur la comparaison des sous-critères du niveau 2 par rapport aux critères santé et sécurité et sa matrice de comparaison.....	101
Figure 5-9 : Question 4 du questionnaire 2 sur la comparaison des sous-critères du niveau 2 par rapport aux critères gouvernance et planification et sa matrice de comparaison.	102
Figure 5-10 : Question 5 du questionnaire 2 sur la comparaison des sous-critères du niveau 2 par rapport aux critères information et communication et sa matrice de comparaison	102
Figure 5-11 : Question 6 du questionnaire 2 sur la comparaison des sous-critères du niveau 2 par rapport au critère social et sa matrice de comparaison.....	103
Figure 5-12 : Question 7 du questionnaire 2 sur la comparaison des sous-critères du niveau 2 par rapport aux critères économique et sa matrice de comparaison.....	103
Figure 5-13 : La matrice de comparaison par paire des alternatifs par rapport aux sous-critères C1 à C8.....	104
Figure 5-14 : La matrice de comparaison par paire des alternatifs par rapport aux sous-critères C9 à C24.....	105
Figure 5-15 : La matrice de comparaison par paire des alternatifs par rapport aux sous-critères C25 à C32	106
Figure 5-16 : Décision hiérarchique par l'AHP-Software du cas étudié	107
Figure 5-21 : Priorité globale des alternatifs par rapport aux critères niveau 1 et 2	109

Figure 5-22 : Résultat de l'analyse AHP pour le critère SST à 10 %	114
Figure 5-23 : Résultat de l'analyse AHP pour le critère SST à 50 %	114
Figure 5-24 : Résultat de l'analyse AHP pour le critère environnemental à 10 %	115
Figure 5-25 : Résultat de l'analyse AHP pour le critère environnemental à 50 %	115
Figure 5-26 : Résultat de l'analyse AHP pour le critère technique à 10 %	116
Figure 5-27 : Résultat de l'analyse AHP pour le critère technique à 50 %	117
Figure 5-28 : Résultat de l'analyse AHP pour le critère économique à 10 %	117
Figure 5-29 : Résultat de l'analyse AHP pour le critère économique à 50 %	118
Figure 5-30 : Résultat de l'analyse AHP pour le critère social à 10 %.....	118
Figure 5-31 : Résultat de l'analyse AHP pour le critère social à 50 %.....	119
Figure 5-32 : Graphe de comparaison des différents scénarios d'analyse de sensibilité et leurs résultats.....	121
Figure 5-17 : Priorité des alternatifs par rapport aux sous critères C1 à C6	159
Figure 5-18 : Priorité des alternatifs par rapport aux sous critères C7 à C14	160
Figure 5-19 : Priorité des alternatifs par rapport aux sous critères C15 à C22	161
Figure 5-20 : Priorité des alternatifs par rapport aux sous critères C23 à C32	162

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1 : Les six risques principaux et leurs sources d'Hydro-Québec Distribution (Hydro-Québec Distribution, 2021).....	25
Tableau 2-1 : Cinq scénarios socio-économiques (Vailles, 2019).....	38
Tableau 2-2 : La correspondance entre les scénarios SSP et RCP retenus par le GIEC respectivement dans l'AR6 et l'AR5 (Violaine Lepousez, 2022).....	39
Tableau 2-3 : Explication des scénarios à fortes émissions de GES (Violaine Lepousez, 2022)	41
Tableau 3-1 : Récapitulatif des méthodes de critère d'agrégation complète	58
Tableau 3-2 : Résumées des procédures (Guitouni et al., 2010).....	59
Tableau 3-3 : Caractéristiques des différentes méthodes (Ayadi, 2010)	60
Tableau 3-4 : Liste les différents avantages et usages des trois différentes catégories des méthodes multicritères d'aide à la décision (Thorel, 2014)	62
Tableau 3-5 : L'échelle de Saaty (Guesdon, 2011)	68
Tableau 3-6 : <i>L'indice de cohérence moyen</i>	69
Tableau 4-1 : La fréquence des critères sélectionnés de la revue de littérature	82
Tableau 4-2 : Les justifications du choix des critères	85
Tableau 4-3 : Q 1 : Parmi les sous-critères choisis, quels sont ceux à retenir?	89
Tableau 4-4 : Q 2 : Parmi les alternatives choisies, quelles sont celles à retenir?	91
Tableau 5-1 : Scénarios de l'analyse de sensibilité	112
Tableau 5-2 : Résultats de l'analyse de sensibilité pour chaque scénario	120

CHAPITRE 1 INTRODUCTION ET MISE EN CONTEXTE

1.1 Introduction

Dire des changements climatiques que c'est un sujet d'actualité relève de l'euphémisme. En fait, c'est l'enjeu clé de ce siècle en raison de son impact sur la biodiversité et la société humaine.

Les conséquences de certains comportements entraînent des répercussions tellement complexes et importantes qu'il est difficile pour nous de les concevoir. En particulier, il est difficile d'imaginer des moyens de lutter contre ces impacts, qui sont liés à notre mode de vie, notamment notre consommation excessive, notre production de pollution et notre dépendance aux sources d'énergie.

Désormais, les changements climatiques sont l'affaire de tous : états, entreprises et citoyens. Toutefois, ce travail présente d'autres instances de réflexion susceptibles d'impacter les entreprises et peser sur leurs activités.

Par conséquent, les moyens à mettre en œuvre doivent être en mesure de répondre à l'ampleur du problème de manière que l'impact soit réduit et à ce que les entreprises s'y adaptent sur le long terme sans pour autant baisser les bras.

Cependant, la prise en compte d'un tel enjeu est un véritable défi dans la mesure où elle consiste à aborder le problème par une approche réaliste face aux changements climatiques en question.

La prise de conscience des problèmes climatiques est bien présente. Ainsi, des démarches sont mises en place pour mieux se préparer aux phénomènes climatiques extrêmes et améliorer les compétences en gestion de crise. Hydro-Québec contribue à modifier sa façon d'opérer et de produire en mettant en place des actions. De plus, le développement durable est considéré comme une composante essentielle de la création de valeur chez Hydro-Québec. Plusieurs initiatives ont vu le jour pour faire face aux problèmes liés aux changements climatiques en utilisant des moyens innovants et pragmatiques pour mieux s'adapter.

1.2 Présentation de l'entreprise Hydro-Québec

Fondée au début de 1944, ayant comme unique actionnaire le gouvernement du Québec, cette entreprise est une grande productrice d'électricité au Canada et une actrice majeure de l'industrie hydroélectrique mondiale. Celle-ci exploite un vaste réseau de transport à haute tension et est une entreprise impliquée dans la production, le transport et la distribution de l'électricité (Hydro-Québec, 2022).

Toutefois, elle se heurte à un double défi de taille qui consiste d'abord à mettre en place de grandes installations hydroélectriques en régions éloignées dont les températures varient jusqu'à – 40 °C, et ensuite à développer un réseau de transport d'électricité couvrant 34 775 kilomètres (Hydro-Québec, 2022) en raison de la concentration limitée du potentiel hydraulique du Québec dans sa région nord, alors que la majorité de sa population est localisée dans le sud de la province.

Hydro-Québec compte aujourd'hui 61 centrales hydroélectriques, 24 centrales thermiques et 2 centrales solaires, 34 775 km de lignes de transport, 542 postes électriques et 226 949 km en longueur du réseau de distribution (Hydro-Québec, 2021) si bien qu'elle distribue l'électricité à la plupart des régions desservies, par un réseau aérien soutenu par près de 2,6 millions de poteaux, dont 99 % sont en bois (Hydro-Québec, 2020c).

Selon (Hydro-Québec, 2022), un tel réseau compte plus de quatre millions de clients québécois bénéficiant d'un approvisionnement fiable en électricité, qui transite de larges volumes de courant vers les sites de vente du nord-est des États-Unis et des provinces canadiennes voisines.

La Figure 1-1 : Carte des grands équipements (Hydro-Québec, 2021) ci-dessous, présente la carte du réseau de distribution d'Hydro-Québec.

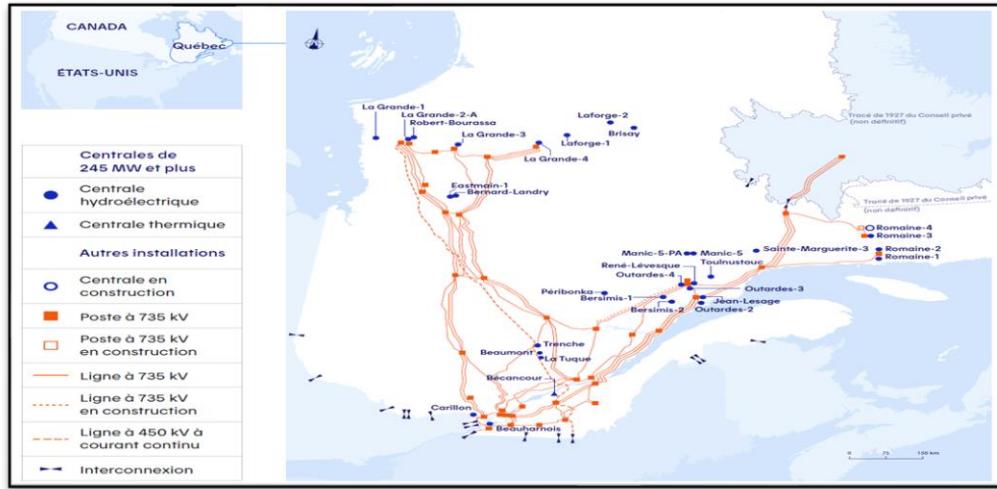


Figure 1-1 : Carte des grands équipements (Hydro-Québec, 2021)

Hydro-Québec est constituée de différents groupes organisationnels (voir Figure 1-2 : Les groupes organisationnels et les principales participations d'Hydro-Québec (Hydro-Québec, 2020b).) :

- Hydro-Québec Production;
- Hydro-Québec TransÉnergie et Équipement;
- Hydro-Québec Distribution et Services partagés (sujet de notre recherche).

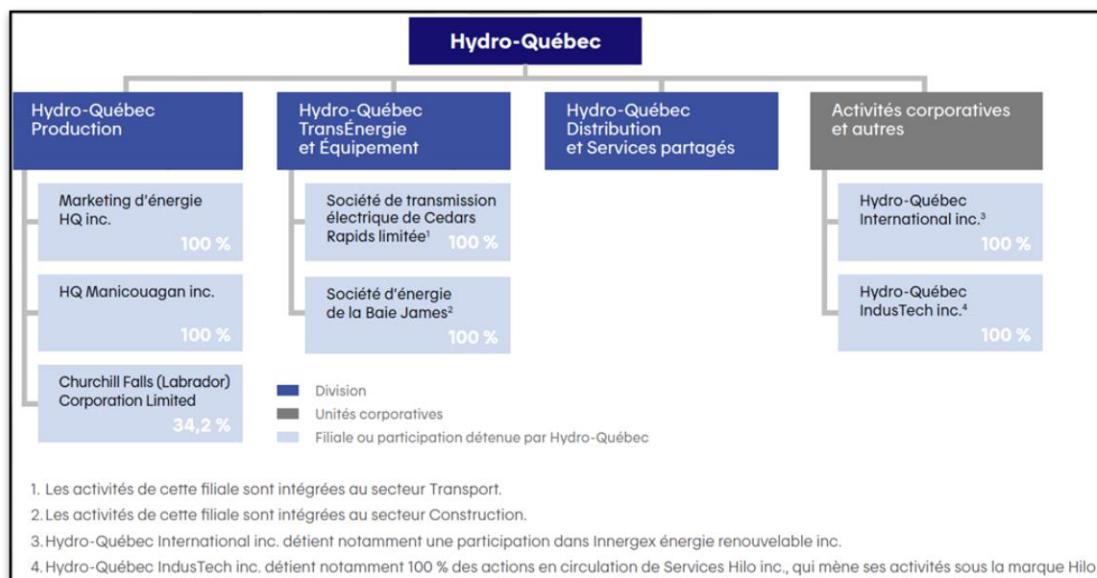


Figure 1-2 : Les groupes organisationnels et les principales participations d'Hydro-Québec (Hydro-Québec, 2020b).

1.3 Mise en contexte et problématique

Les changements climatiques représentent un défi majeur qui nécessite une gestion efficace afin de minimiser les risques qui y sont associés. Pour répondre à ce défi, Hydro-Québec doit élaborer des plans d'adaptation qui permettent de mettre en place des solutions pour faire face aux impacts des changements climatiques sur leurs actifs et activités. Le groupe intergouvernemental spécialisé dans l'étude des changements climatiques (GIECC), a élaboré des scénarios pour prévoir l'évolution et les conséquences environnementales des changements climatiques ainsi que pour se prémunir contre les conséquences néfastes qui pourraient en découler (Charron, 2016). Cependant, il est important de noter que ces scénarios ne sont que des hypothèses de déroulement des événements futurs liés aux émissions de gaz à effet de serre et à d'autres émissions dans l'atmosphère.

Les effets des changements climatiques sur les activités d'Hydro-Québec sont multiples, selon le rapport de l'entreprise (Hydro-Québec, 2020c). En premier lieu, la demande saisonnière d'électricité varie fortement en fonction du climat, tout comme la production hydroélectrique, qui dépend des précipitations et des apports naturels en eau. Les équipements du réseau peuvent également être soumis aux aléas climatiques, les événements extrêmes pouvant compromettre l'infrastructure ainsi que la continuité et la fiabilité des services.

Consciente de ces effets, Hydro-Québec, membre fondateur du consortium Ouranos depuis près de 20 ans, s'efforce de mieux comprendre l'impact des changements climatiques sur ses activités et infrastructures (Hydro-Québec, 2020c). En 2018, l'entreprise a même estimé que les changements climatiques et les conditions météorologiques extrêmes représentaient un risque commercial.

En effet, des événements extrêmes peuvent compromettre l'infrastructure de même que la continuité et la fiabilité de ses services (voir exemple dans Figure 1-3 suivante) :

Catégories	Aléas climatiques	Sommaire provincial	Tendance	Exemples d'impacts
	Chaleur	En général, les chaleurs extrêmes auront tendance à augmenter en fréquence, durée et intensité.		Santé-sécurité des travailleurs Hausse des besoins en climatisation des bâtiments
	Froid extrême	En général, les froids extrêmes ont tendance à diminuer en fréquence.		Réduction des problèmes pour des équipements électriques et/ou électroniques.
	Cycles de gel/dégel	En général, les cycles de gel/dégel ont tendance à maintenir une fréquence stable. Cependant, la saisonnalité est importante: un peu plus d'événements en hiver et un peu moins d'événements au printemps et à l'automne.		Problèmes liés aux fondations de bâtiments Besoins supplémentaires de maintenance en cas de dégradation des ouvrages et à l'inspection des bâtiments
	Précipitations extrêmes	En général, les précipitations extrêmes ont tendance à augmenter en fréquence, durée et intensité.		Variations de l'hydraulique selon la région Problèmes de refoulements des infrastructures de drainage Problèmes de difficulté d'accès pour des interventions d'urgence
	Neige	En général, les chutes et accumulations de neige abondantes ont tendance à diminuer en fréquence dans le sud et augmenter en fréquence plus au nord.		Impacts sur les toitures de bâtiments, chemins d'accès et campements, qui doivent être déneigés
	Verglas	En général, les événements de verglas ont tendance à augmenter en fréquence dans le nord du Québec, alors qu'ils diminuent dans le sud du Québec. Une étude en cours en collaboration avec Ouranos et l'UQAM permettra d'améliorer le niveau de confiance de ces projections.		Augmente les risques de pannes du réseau Déglâçage de certains actifs
	Vent	En général, les événements de vents forts ont tendance à augmenter en fréquence et intensité. D'autres études seront nécessaires pour mieux quantifier ces changements.		Impacts sur les lignes de transmission, sur les tours de télécommunication, et sur les poteaux des lignes aériennes Augmente les risques de pannes du réseau
	Croissance de la végétation	Il est prévu que la saison de croissance de la végétation augmente.		Impact sur les ressources/contraintes opérationnelles pour mettre en œuvre cette activité
	Feux de forêt	En général, les événements de feux de forêt ont tendance à augmenter en fréquence. Une étude en cours en collaboration avec Ouranos et l'UQAR permettra d'évaluer des pistes de solutions d'adaptation.		Perte ou destruction d'actifs Santé-sécurité des travailleurs

 Effet positif
 Effet négatif

Figure 1-3 : Exemples d'impacts des changements climatiques sur les activités de l'entreprise (Hydro-Québec, 2020c)

En réponse à cela, Hydro-Québec a pris des mesures pour gérer ses infrastructures et activités, reconstruisant la conception de ses équipements et renforçant leur durabilité, afin de se préparer et de s'adapter à ces changements.

En 2020, Hydro-Québec a analysé la vulnérabilité de ses actifs et de ses activités aux changements climatiques. À la suite de cette analyse, un plan d'adaptation aux changements climatiques sera établi conformément aux priorités d'action à court, moyen et long terme, qui prendra également en compte les risques liés au climat actuel et futur. Cette démarche repose sur les principes énoncés dans divers guides pratiques recommandés par le secteur ou les organismes gouvernementaux (Hydro-Québec, 2020c), notamment : l'Hydropower Sector Climate Resilience Guide de l'International Hydropower Association (Association, 2019), les lignes directrices générales d'Infrastructure Canada sur l'optique des changements climatiques (Canada, 2019), le guide de gestion du risque pour les entreprises d'électricité de l'Association canadienne de l'électricité (l'électricité, 2017), le rapport du Groupe de travail II du GIEC sur les incidences, l'adaptation et la vulnérabilité aux changements climatiques ((GIEC), 2014) ainsi que le rapport

du gouvernement du Québec, Ouranos, sur la vulnérabilité et l'adaptation des immeubles (Gagné, 2017).

Dans le but d'établir des critères d'évaluation du niveau de gravité des risques et de préciser les critères de hiérarchisation retenus pour l'établissement des mesures de prévention et d'adaptation, un comité composé de représentants de toutes les unités concernées s'est engagé en 2020 à cibler les classes d'actifs et les activités à risque face aux changements climatiques (Hydro-Québec, 2020a).

1.3.1 Scénarios utilisés à la modélisation du système climatique

Bien que les modèles de scénarios soient utilisés pour modéliser le système climatique, les simulations et les réponses proposées peuvent varier d'un groupe de recherche à l'autre, comme le souligne Ouranos (2015) (Ouranos, 2015). Par conséquent, il est essentiel de prendre en compte non seulement plusieurs scénarios, mais également le type de modèle et la période temporelle choisie pour minimiser l'incertitude.

Hydro-Québec s'appuie sur des guides pratiques et collabore avec Ouranos (Hydro-Québec, 2020c), pour utiliser deux scénarios de trajectoires de concentration représentative (RCP) qui sont des projections élaborées par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Ces scénarios décrivent différentes voies possibles pour l'évolution future des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre (GES) et d'autres facteurs radiatifs. Ils servent de base pour évaluer les impacts potentiels des changements climatiques sur différentes échelles de temps.

Le premier scénario, RCP 8.5, connu sous le nom de "statu quo", suppose que les émissions de GES continuent au même rythme que dans les décennies précédentes, autrement dit des émissions élevées et non contrôlées, conduisant à une augmentation significative de la température mondiale et à des impacts climatiques importants. Le deuxième scénario, RCP 4.5, suppose une réduction significative des émissions de GES pour atteindre des cibles de réduction.

De plus, Hydro-Québec utilise deux horizons temporels différents. Le premier, appelé « climat récent », couvre la période de 1981 à 2010, comme recommandé par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) en 2017 pour le calcul des normales climatiques. Le deuxième, appelé « climat futur », qui couvre généralement jusqu'à la fin du siècle (c'est-à-dire 2100), est

utilisé pour analyser les vulnérabilités liées à la durée de vie des actifs et aux cycles d'intervention des activités d'Hydro-Québec (Hydro-Québec, 2020c).

Étant donné que le Québec est une région géographiquement vaste et que les changements climatiques n'affectent pas uniformément l'ensemble de son territoire, Hydro-Québec a établi cinq zones climatiques afin de calculer les moyennes de différents paramètres climatiques et de déduire les cotes de probabilité d'occurrence pour obtenir un portrait global plus précis des risques auxquels elle fait face (Hydro-Québec, 2020c).

1.3.2 Stratégie adoptée par Hydro-Québec

Dans son plan de développement durable 2020-2024 (Hydro-Québec, 2020c), Hydro-Québec a élaboré une stratégie visant à atténuer les risques liés aux changements climatiques en mettant en place un plan d'adaptation. Pour y parvenir, la société a défini plusieurs objectifs, notamment :

- Améliorer sa compréhension du climat futur en utilisant des modèles climatiques;
- Évaluer les impacts potentiels des changements climatiques sur ses actifs et ses activités;
- Adapter ses actifs vulnérables pour les rendre plus résilients face aux risques climatiques;
- Protéger l'intégrité physique de ses installations et de ses équipements en identifiant les risques et en mettant en place des mesures de prévention adéquates;
- Renforcer la résilience de son réseau électrique en réévaluant ses pratiques de conception, de maintenance et d'investissement;
- Intensifier et améliorer la gestion de la végétation à proximité de son réseau afin de réduire les risques d'incidents.

1.3.3 Vulnérabilités, impacts des changements climatiques sur l'industrie électrique

Une analyse exhaustive a été menée par Hydro-Québec pour identifier les actifs et activités vulnérables aux changements climatiques. L'industrie électrique, au Québec comme au Canada, est particulièrement vulnérable aux impacts des changements climatiques, tant au niveau de sa capacité de production que de ses infrastructures de transport et de distribution (Ouranos, 2015).

L'industrie électrique, au Québec comme au Canada, a pris conscience de la vulnérabilité du système d'approvisionnement en hydroélectricité du Québec ainsi que des infrastructures de transport et de distribution d'électricité au climat, après une suite d'évènements météorologiques extrêmes et d'une succession inhabituelle d'années de faible hydraulique (Ouranos, 2015).

D'ici 2050, il est probable que les débits d'eau annuels moyens dans le nord du Québec augmenteront de près de 12 % et de 5 % dans le sud. Les crues printanières devraient avoir lieu une ou deux semaines plus tôt, avec des volumes et une intensité accrue au nord, accompagnées de débits hivernaux plus élevés. Cette augmentation des températures hivernales entraînera une diminution de la demande d'énergie pour le chauffage, mais une augmentation de la demande de refroidissement en été (Ouranos, 2015).

Si les changements climatiques ne se produisent pas conformément au scénario moyen d'Ouranos en 2050 (Ouranos, 2015), la demande d'énergie dans tous les secteurs (résidentiel, industriel, commercial et institutionnel) pourrait être réduite de 2,7 % par rapport à ce qu'elle aurait été.

Cependant, la fréquence et l'intensité de certains phénomènes météorologiques extrêmes tels que : les vents violents, les orages, les sécheresses, les grands incendies de forêt, les pluies torrentielles et les crues, les inondations, les tempêtes de verglas, les ouragans, les tornades, les foudroiements et la durée et l'ampleur des températures extrêmes pourraient peser lourdement sur les infrastructures de transport et de distribution d'électricité qui y sont exposées, selon Ouranos en 2015 (Ouranos, 2015).

Cela met en évidence l'importance de définir des critères pour créer un lien précis entre les variables décrivant les changements climatiques (leur fréquence et leur intensité), les paramètres techniques ainsi que les indicateurs nécessaires à la gestion des actifs et des activités d'Hydro-Québec.

Le manque de connaissance sur l'impact des changements climatiques sur les infrastructures et les installations d'Hydro-Québec présente un risque de pertes significatives à moyen et long terme, pouvant affecter le bon fonctionnement des actifs, voire un risque accru de pannes du réseau.

Toutefois, grâce aux modèles prédictifs permettant de mitiger ces impacts négatifs, il est possible d'identifier les zones où les pertes sont les plus importantes et de mettre en place des techniques de gestion actuelles pour réduire les risques, selon Ouranos en 2015 (Ouranos, 2015).

En résumé, Ouranos a révélé les risques liés aux activités hydroélectriques au Québec (Ouranos, 2015), ce qui a permis d'améliorer les bases méthodologiques pour la réalisation des analyses d'impact. La mise en place de méthodes d'adaptation pour limiter ces risques est désormais à la portée de tous les secteurs, ce qui pourrait être bénéfique.

1.3.4 Aléas climatiques critiques pour HQD

Selon Ouranos (2015) (Ouranos, 2015) et le rapport d'Hydro-Québec Distribution (HxD) sur le changement climatique et la vulnérabilité de ses actifs (2021) (Hydro-Québec Distribution, 2021), les aléas climatiques qui sont utilisés pour évaluer les risques des actifs et des activités de HQD sont regroupés en quatre catégories principales : température, précipitations, vent et divers (autres) (voir le tableau de l'ANNEXE A : Vulnérabilité des actifs).

Ces aléas climatiques peuvent inclure des aléas individuels, des combinaisons d'aléas, ou des conséquences d'événements météorologiques passés et futurs. Ces aléas sont évalués en fonction des critères de conception des actifs, des événements significatifs et des anticipations d'événements futurs qui pourraient avoir un impact significatif.

La méthode d'analyse des risques pour ces aléas climatiques dépend du type de scénario d'émission choisi (RCP 4.5 ou RCP 8.5), de la zone climatique analysée et de l'horizon temporel considéré, ainsi que du niveau de confiance de l'évaluation de la projection future.

Dans ce contexte, le rapport identifie divers actifs et activités vulnérables aux aléas climatiques, comme présenté par Hydro-Québec Distribution en 2021 (Hydro-Québec Distribution, 2021).

Ces vulnérabilités comprennent (voir le tableau de l'ANNEXE A : Vulnérabilité des actifs).

1. Les lignes aériennes, tant du point de vue de leur utilisation civile que de leur aspect électrique;
2. La végétation environnante, qui peut interagir de manière préjudiciable avec le réseau électrique;
3. Les lignes souterraines, qu'elles soient utilisées à des fins civiles ou électriques;
4. La gestion de l'ensemble du réseau, y compris sa résilience et sa réparabilité;
5. Les réseaux autonomes, qui peuvent être perturbés par les conditions climatiques défavorables;
6. L'infrastructure de mesurage, qui est essentielle pour surveiller et contrôler l'efficacité du réseau;
7. Les poteaux qui supportent les lignes électriques;
8. Les structures souterraines qui peuvent être affectées par des aléas climatiques.

Ces actifs sont ensuite analysés par HQD en fonction de trois critères d'impact pour évaluer leur vulnérabilité (Hydro-Québec Distribution, 2021) :

- L'état physique de l'actif : détérioration de l'intégrité structurelle de l'actif pouvant entraîner à la fois une usure accélérée, une défaillance prématuée ou une réduction de la durée de vie;
- La fonctionnalité ou fiabilité du service : il s'agit de l'impact sur l'exploitabilité, sur la qualité du service ou sur sa continuité;
- Les ressources ou contraintes opérationnelles : possibilité d'effectuer des entretiens, des réparations, des impacts sur l'accès aux installations et sur la productivité des travailleurs.

Cependant, l'évaluation des activités ne tient compte que des ressources ou contraintes opérationnelles (voir ANNEXE A : Vulnérabilité des actifs).

1.3.5 Conclusion de l'analyse et recommandations de HQD

Afin de définir les sources de risques et créer des fiches de risque correspondantes (voir ANNEXE B : Exemple fiche de risque poteaux (Hydro-Québec Distribution, 2021)), HQD a développé une matrice de risques basée sur les six risques confirmés.

Cette matrice de risque proposée par des spécialistes et des experts, et elle comprend des informations sur les mesures d'adaptation, notamment leurs avantages et inconvénients, leur applicabilité (actuelle ou future), ainsi que les données nécessaires (complètes ou manquantes), et les actions à entreprendre pour les collecter.

Après la collecte de données par les spécialistes, qui ont également pris en compte les effets des changements climatiques sur la région concernée, HQD a identifié six risques principaux et leurs sources dans la matrice de risques (voir Tableau 1-1 (Hydro-Québec Distribution, 2021)).

Des réunions ont été organisées avec des spécialistes de chaque risque afin de mettre en place des fiches de risques, qui répertorient les mesures d'adaptation nécessaires. Ces fiches détaillent les interrelations entre les causes et les effets de chaque risque, leur applicabilité (actuelle ou future), ainsi que les avantages et les inconvénients des mesures d'adaptation. De plus, elles précisent les actions à entreprendre pour combler les lacunes en matière d'information sur ces mesures.

Tableau 1-1 : Les six risques principaux et leurs sources d'Hydro-Québec Distribution (Hydro-Québec Distribution, 2021)

Risques	Sources de risques
Poteaux	Allongement de la période favorisant la pourriture des poteaux de bois, principale cause de leur remplacement plus fréquent. Ce mécanisme de dégradation pourrait apparaître dans certaines régions pour lesquels cette période n'est pas suffisamment longue pour qu'il se développe.
	Accroissement du territoire et de la population de pic-bois et de fourmis, deux autres causes prépondérantes de remplacement prématué des poteaux de bois.
	Occurrence d'aléas climatiques extrêmes atteignant ou dépassant leurs critères de conception actuels
Pannes et bris	Augmentation du nombre de pannes et bris occasionné par l'augmentation du nombre et de l'intensité des événements météorologiques (forts vents, verglas, neige humide, etc.).
	Occurrence d'aléas climatiques extrêmes atteignant ou dépassant les critères de conception et d'exploitation actuelle du réseau aérien.
	Sans ressources additionnelles, diminution du nombre de travaux d'inspection, de maintenance et de projets.
Ressources et main-d'œuvre	Sans ressources additionnelles, diminution du nombre de travaux d'inspection, de maintenance et de projets. Par exemple, l'augmentation probable des pannes et bris ainsi que des demandes clients auront un impact sur les ressources disponibles.
	Retard ou ralentissement de plusieurs activités d'inspections et de maintenance à cause des conditions météorologiques plus fréquentes ou plus intenses. Citons pour exemple une diminution de l'accès aux structures lors de verglas ou l'impossibilité de réaliser des thermographies lors de pluies.
	Diminution du temps de travail effectif pour assurer la santé et la sécurité des travailleurs. Par exemple, l'augmentation du nombre de jours avec des températures supérieures à 28 °C.

Tableau 1-1 : Les six risques principaux et leurs sources d'Hydro-Québec Distribution (Hydro-Québec Distribution, 2021) (Suite)

Risques	Sources de risques
Contrôle de la végétation	Augmentation du nombre et de l'intensité des événements météorologiques causant la fragilisation, la cassure des branches surplombantes ou le fléchissement, le déracinement (chablis) des arbres.
	Augmentation de la période de croissance avérée.
	Accroissement à démontrer de certaines espèces dans certaines régions.
	Évolution des ravageurs forestiers et des maladies affectant les arbres.
Réseau autonome	Les équipements situés près des côtes et peu élevés par rapport au niveau des océans sont sensibles à l'augmentation du niveau des océans combinés à l'érosion côtière. Le risque le plus important est une inondation d'une centrale lors d'une tempête en période de grande marée.
	La diminution de la production des éoliennes lors d'événements météorologiques extrêmes (rafales, vents, verglas, givre lourd, etc.).
	Impact du pergélisol sur les bâtiments et autres structures civiles.
	Risques identifiés sur les actifs et activités similaires des autres groupes (production, transport, distribution, bâtiments).
Clientèle	Augmentation du nombre d'appels et/ou de contacts, de réclamations et de plaintes, de demandes d'interventions terrain, du délai de traitement et des demandes de support.
	Augmentation des interventions terrain de la part des responsables du côté réseau (HQD ou HQT) pour réparer ou apporter des correctifs (postes, lignes, végétation, etc.) sur le réseau.
	Augmentation des visites client de la part des délégué(e)s et ingénieur qualité de l'onde peuvent dépendre de la météo.
	Augmentation des déplacements chez les clients de la part des ingénieurs commerciaux (Électro technologies et efficacité énergétique) pour les aider à être plus performants sur l'utilisation de l'énergie.

En outre, il convient de souligner que la réalité de la situation est complexe, car les risques et les sources sont diversifiés. Toutefois, une corrélation entre ces facteurs de risques a été constatée.

En effet, l'ensemble des trois risques liés à la végétation, aux poteaux et aux ressources, ainsi que la variabilité climatique, sont à l'origine des pannes et des bris, notamment au niveau des poteaux.

En cas de première variabilité climatique, une augmentation des pannes est à prévoir, en raison de la pourriture du bois et du manque de ressources pour la maintenance.

Le schéma d'interrelation des trois risques est présenté dans la Figure 1-4 :

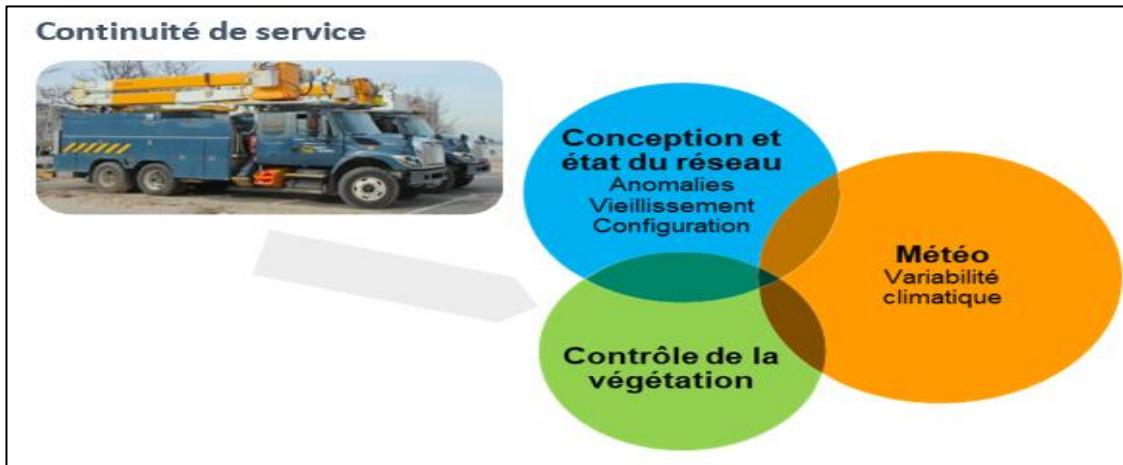


Figure 1-4 : Schéma d'interrelation des trois risques

Ces relations de cause à effet peuvent affecter un risque ou plusieurs risques en même temps comme :

- Traiter le poteau (à noter que c'est une solution qui vise un seul risque);
- Une bonne maîtrise et contrôle de la végétation peut réduire le volume de pannes et bris de 50 % (une solution qui vise deux risques);
- Le changement de la conception des poteaux et de l'emplacement à savoir l'enfouissement des lignes (maîtrise de la végétation) réduira les pannes et la fréquence de maintenances c.-à-d. moins de ressources et main-d'œuvre (une solution qui affecte plusieurs risques).

À la suite du choix des mesures d'adaptation face aux risques, il est primordial de prendre en compte leur interrelation. Bien qu'une solution applicable à plusieurs risques engendre un coût élevé, elle apporte beaucoup plus de bénéfices sur le long terme qu'une solution visant un seul

risque. Par conséquent, il est important de considérer la globalité des risques encourus pour maximiser les avantages des solutions mises en place.

D'un autre côté, il est important de prendre en compte les deux grandes incertitudes de ce projet. Tout d'abord, il y a l'évaluation des aléas climatiques avec des données incertaines ou inconnues. De plus, il y a un manque d'informations concernant l'application de certaines mesures d'adaptation et les conséquences de chaque mesure en fonction de la tolérance au risque et du budget prévu.

Enfin, en raison de l'étendue de la superficie des régions étudiées, le rapport d'Hydro-Québec Distribution (2021) (Hydro-Québec Distribution, 2021) note des limitations sur la zone climatique à étudier. Il est donc nécessaire de réaliser des prévisions sur des zones plus restreintes et mieux adaptées aux opérations de HQD. Toutefois, le niveau de confiance envers ces prévisions est peu fiable en raison du manque de données pertinentes et d'études cohérentes. Il est donc important de prendre en compte ces incertitudes lors de la priorisation des actions suivant la méthodologie multicritère recommandée par HQD pour minimiser les risques liés aux changements climatiques.

1.4 Question de recherche et objectifs

1.4.1 Questions de recherche

L'ampleur du problème auquel HQD fait face est un enjeu considérable constituant ainsi un véritable défi de sorte que plusieurs interrogations majeures viennent s'y greffer.

À cet égard, les questions centrales que l'on pourrait se poser sont les suivantes :

- Quels sont les facteurs de risques qui affectent les actifs et les activités d'HQD?
- Quels sont les impacts de ces facteurs menaçant les actifs et activités d'Hydro-Québec par la variabilité naturelle du climat, et ceux qui contribuent activement à aggraver leur vulnérabilité?
- Quels sont les critères de décision pour classer les options d'adaptation pour chacun des scénarios?
- Quelles sont les préférences ou priorités à indiquer pour chaque décision alternative en termes de sa contribution à chaque critère?

- Quel est donc le ou les plan(s) d'adaptation le(s) plus flexible face au changement périodique des risques menaçant les actifs et activités d'Hydro-Québec?

1.4.2 Objectif général

Cette étude a pour objectif d'orienter Hydro-Québec Distribution dans le secteur de la traversée de la rivière, à proximité du barrage de Paugan, en Outaouais vers le plan d'adaptation le plus optimale visant à atténuer les risques liés aux changements climatiques pour cette zone en utilisant la méthode multicritère la plus adaptée à cette étude.

L'étude se concentre sur l'impact des changements climatiques sur les poteaux électriques, les pannes et bries et la végétation de cette compagnie dans le secteur distribution. Il s'agit donc de prendre une décision éclairée dans des conditions d'incertitude qui permettra à l'entreprise de s'adapter efficacement à l'évolution du climat.

1.4.3 Objectif spécifique

- Classer et prioriser les critères liés aux risques dus aux changements climatiques selon l'incertitude relative aux options d'adaptation face aux variabilités climatiques pour les poteaux électriques, pannes et bris, végétations.
- Procéder à une analyse de sensibilité pour évaluer la fiabilité des décisions des résultats des options d'adaptation choisies par la méthode multicritère choisie.

1.5 Conclusion

Les différents concepts de la recherche ainsi que les indices de performance feront l'objet de cette étude, tout en incluant des notions telles que les changements climatiques, son impact, ses différents modèles et scénarios, l'approche multicritère, les critères de sélection, la structure hiérarchique et les actifs et produits hydro-électriques.

En outre, l'étude de cas des différentes solutions d'adaptation contre les changements climatiques pour les actifs et activités d'HQD est réalisée en se basant sur les approches et simulations réalisées et prouvées par les auteurs des articles de la revue de littérature et des fiches de risques.

Par ailleurs, une étude comparative par AHP des critères et solutions doit être réalisée afin de pouvoir répondre à l'objectif principal de la recherche.

Enfin, l'élaboration du choix des critères ne peut se faire qu'à travers l'extraction des variables indépendantes et le déploiement des méthodes opérationnelles puisées dans la littérature existante.

CHAPITRE 2 LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES : NOTION DE BASE ET ÉVOLUTION

2.1 Introduction

Le système climatique est un défi scientifique complexe, non linéaire et turbulent, qui comprend des éléments très différents, mais couplés (Bernier et al., 2016). Les principaux éléments composant ce système sont l'atmosphère, l'hydrosphère, la lithosphère, la biosphère et l'écosphère. Il s'agit d'un système dynamique qui est constamment influencé par des facteurs internes et externes, qui ont un impact considérable sur l'environnement.

La science du climat s'intéresse à l'étude de l'interaction entre ces facteurs, au système climatique et à l'analyse des mécanismes qui sous-tendent ces changements. Elle s'efforce également d'élaborer des modèles prédictifs pour déterminer le cours probable des changements climatiques à long terme (Merle, Voituriez, & Dandonneau, 2016).

L'analyse méticuleuse des données climatiques depuis le XVII^e siècle a ouvert une ère où les observations et les statistiques ont offert une compréhension approfondie des tendances planétaires. Cependant, ce processus montre que notre planète s'est régulièrement réchauffée ces deux derniers siècles. À ce titre, force de conclure que les temps récents connaissent un réchauffement climatique comme le prouvent les données futures (Bernier et al., 2016).

Le climat actuel est une symbiose fragile et complexe qui fluctue constamment. En effet, celui-ci subit des variations constantes à des échelles temporelles allant de décennies à des millions d'années (Godard & Tabeaud, 2004).

Il est donc important de comprendre comment le système climatique réagit aux changements internes et externes afin de mieux concevoir et prévoir les changements climatiques et leurs impacts sur l'environnement. Ce chapitre donne ainsi un aperçu global et approfondi sur le climat, ses concepts, ses modèles, ses scénarios ainsi que sur son évolution dans le temps.

2.2 Notion de base

Le climat est défini comme étant les statistiques moyennes des conditions météorologiques sur une longue période (généralement 30 ans, selon la convention). Elle est régie par un certain

nombre de paramètres nécessaires pour décrire le temps et le climat actuel : la température, la pression, les précipitations, le vent et l'isolation thermique (Bernier et al., 2016).

La variabilité climatique, quant à elle, se réfère aux changements naturels et réguliers du climat à travers le temps. Elle peut être causée par des processus internes du système climatique, comme les fluctuations de l'activité solaire ou les oscillations naturelles de l'océan et de l'atmosphère, ainsi que par des facteurs externes comme les éruptions volcaniques et les variations de l'orbite terrestre (Godard & Tabeaud, 2004).

De plus, elle peut avoir des impacts significatifs sur les systèmes naturels et les activités humaines. Par exemple, des épisodes prolongés de sécheresse ou de précipitations extrêmes peuvent affecter la production agricole, les réserves en eau et les écosystèmes locaux.

Des variations de la température de l'eau de mer peuvent avoir des effets sur la pêche et les écosystèmes marins, tandis que des événements météorologiques extrêmes comme les ouragans, les tempêtes de neige et les inondations peuvent causer des dommages matériels et des pertes en vies humaines (Godard & Tabeaud, 2004).

En outre, il est important de noter que la variabilité climatique est distincte des changements climatiques causés par les activités humaines. Bien que les deux phénomènes soient liés, la variabilité climatique est une caractéristique naturelle et régulière du climat, tandis que les changements climatiques sont un résultat des activités humaines qui émettent des GES dans l'atmosphère, modifiant ainsi les conditions climatiques de manière permanente et accélérée (Godard & Tabeaud, 2004)(voir Figure 2-1 ci-dessous).



Figure 2-1 : Météo, variabilité naturelle et changements climatiques modifiés de (Hydro-Québec Distribution, 2021)

Enfin, il est désormais possible d'analyser cette variabilité, d'en mesurer les retombées matérielles et humaines et de comprendre de toute autre manière les évènements extrêmes qui font à ce jour l'objet de tant de débats chez les décideurs et dans la société. Autrement dit, ces recherches doivent alimenter ce que l'on appelle les « modèles climatiques » en termes de prédition et de prévention (Bernier et al., 2016).

2.3 Les modèles climatiques

Afin de comprendre les processus physiques complexes qui contrôlent le système climatique, des outils essentiels existent : les modèles climatiques (Gosse, barriat, loutre, & zunz, 2010).

2.3.1 Que sont les modèles climatiques?

Un modèle climatique physique est un simulateur renfermant un code informatique représentatif des équations fondamentales de physique des fluides discrets dans l'espace et le temps et résolu par un schéma numérique. Ceci permettant de représenter le comportement et les échanges entre l'atmosphère, la lithosphère, l'hydrosphère, la cryosphère et la biosphère en fonction des forçages environnementaux tels que le rayonnement solaire, les aérosols et les différentes émissions de GES naturelles et anthropiques (Charron, 2016). Par ailleurs, de tels modèles passent par des exercices de comparaison par rapport à la planète réelle en vue de vérifier leur fonctionnement.

On dénombre d'ailleurs une vingtaine de laboratoires et une quarantaine de modèles dans le monde, les plus performants étant constamment améliorés par des exercices de simulation coordonnés au niveau international (Bernier et al., 2016). Dans le monde entier, chaque centre de recherche et chaque spécialiste du climat utilise un modèle différent. À titre d'exemple, le Centre canadien de modélisation et d'analyse du climat, qui depuis les années 1980 élabore une série d'excellents modèles climatiques. (Climate_atlas, 2019).

En outre, des modèles idéalisés de température surfacique de mer (SST) servent à orienter les modèles climatiques vers des résultats précis (Schubert et al., 2009).

Cinq modèles de circulation générale de l'atmosphère (MCGA) et un modèle couplé atmosphère-océan peuvent ainsi être continuellement amenés à se rapprocher du forçage de température

surfacique de mer imposée (Schubert et al., 2009). En outre, toute une série de simulations de modèles climatiques mondiaux est en cours afin de lever les incertitudes entourant l'impact du forçage du SST et des rétroactions terre-atmosphère sur la sécheresse régionale (Schubert et al., 2009). Les résultats de ces modélisations montrent une réponse robuste des précipitations avec une séparation claire entre les années humides (PwAn) et les années sèches (PcAn), tandis que la réponse de température surfacique au forçage du Pacifique présente des valeurs R plus faibles et un accord moindre entre les modèles (Schubert et al., 2009). Les écarts entre les modèles de surface terrestre expliquent probablement certaines de ces disparités, comme les réponses des modèles de surface terrestre au forçage chaud du SST du Pacifique qui tendent à placer le pic de réponses au niveau supérieur, au-dessus de l'Amérique du Nord, considérablement plus au sud que les autres modèles, ce qui entraîne des anomalies de température de surface chaude qui s'étendent jusque dans la partie sud des États (Schubert et al., 2009).

2.3.2 Les limites des modèles climatiques

La simulation de phénomènes physiques complexes est un défi majeur qui requiert une quantité considérable de données pour valider et améliorer les modèles mathématiques et informatiques utilisés pour fournir des scénarios d'évolution climatique mondiale (Godard & Tabeaud, 2004). Cependant, les prévisions des modèles ont une dispersion allant jusqu'à un degré de part et d'autre de la moyenne, rendant impossible de prédire avec précision l'avenir (Bernier et al., 2016).

Les modèles sont imparfaits, car ils sont basés sur un maillage qui représente la planète avec des points séparés par une certaine distance, ce qui rend leur fiabilité moins élevée pour les régions éloignées (Jancovici, 2002). Par exemple, les paramétrisations de la surface terrestre sont des algorithmes qui décrivent le flux de chaleur et d'humidité entre les surfaces terrestres et l'atmosphère (Dickinson, 1995), mais ces processus se produisent à des échelles trop petites pour être capturées par les maillages du modèle global. Aussi, le coût de calcul est élevé et certaines données ne sont pas correctement prises en compte.

Selon (André, Fellous, & Gautier, 2007), malgré les améliorations constantes des modèles climatiques, l'incertitude dans l'estimation des réponses du climat persiste. En effet, les modèles climatiques produisent plusieurs projections climatiques qui dépendent du modèle et des scénarios choisis, ce qui rend difficile la collecte d'informations climatiques proches du climat réel futur (Charron, 2016). Les différences entre les modèles sont principalement dues aux

différences dans l'effet des nuages simulés, ce qui peut conduire à des rétroactions positives ou négatives.

Il reste des lacunes dans la compréhension des processus, tels que le manque de données d'observation dans l'hémisphère sud, une compréhension limitée des mécanismes de rétroaction, une connaissance incomplète de la dynamique des calottes polaires et une compréhension insuffisante de la dynamique des plateformes de glace flottante (André et al., 2007)

En outre, les modèles rencontrent des difficultés à représenter la dynamique des glaciers et calottes polaires, ce qui nécessite une réduction de la maille des modèles pour mieux prendre en compte les forçages climatiques et la variabilité (André et al., 2007).

Enfin, il y a aussi le manque de représentations précises des débordements océaniques dans ces modèles (Legg et al., 2009).

Ces débordements sont des courants de densité piégés par le fond qui proviennent de bassins semi-fermés ou de plateaux continentaux, et ils peuvent se mélanger vigoureusement avec les eaux océaniques environnantes, modifiant considérablement leur densité et leur transport (Legg et al., 2009).

2.4 Scénarios d'émission et simulation climatique

« Un scénario n'est pas une prévision ou une prédiction, plutôt une méthodologie pour représenter et explorer une gamme d'états futurs possibles » (André et al., 2007).

Les simulations climatiques permettent de comprendre de manière fiable comment le climat évolue et ses conséquences, mais ne parviennent pas à tout prévoir avec précision. Elles sont produites à l'aide d'une variété de modèles. Chacun de ces derniers présente un choix spécifique de graphiques numériques, de degré de simplification et de représentation physique (Charron, 2016).

Ces modélisations sont utilisées pour créer des scénarios futurs permettant d'évaluer les impacts quantitatifs et qualitatifs des changements climatiques afin de mieux comprendre l'impact global des émissions de GES et de prendre des mesures pour les réduire (Vailles, 2019). Par ailleurs, les projections climatiques reposent sur des hypothèses concernant les phénomènes fondamentaux

tels que l'évolution technologique, la croissance démographique et le développement socio-économique (Charron, 2016).

D'une part, cinq projections sont élaborées par le GIEC dans son dernier rapport, nommée scénarios SSP (Shared Socio-economic Pathways) qui représente différents développements futurs des facteurs anthropiques des changements climatiques, chacun numéroté de 1 à 5 dans la Figure 2-2 :

SSP1 Développement durable	Forte coopération internationale, priorité donnée au développement durable, amélioration des conditions de vie et préférences des consommateurs pour des biens et services respectueux de l'environnement, peu intensifs en ressources et en énergie.
SSP2 Poursuite des tendances	Les tendances sociales, économiques et technologiques actuelles se poursuivent, le développement et la croissance progressent de manière inégale selon les pays et les régions. Les institutions nationales et internationales œuvrent à la réalisation des objectifs de développement durable qui progresse lentement. L'environnement se dégrade malgré un développement moins intensif en ressources et en énergie.
SSP3 Rivalités régionales	Résurgence des nationalismes, développement économique lent, persistance des inégalités et des conflits régionaux. Les pays sont guidés par des préoccupations en matière de sécurité et de compétitivité. Ils se concentrent sur les problèmes nationaux voire régionaux et sur les enjeux de sécurité alimentaire et énergétique. Faible priorité internationale pour la protection de l'environnement, qui se dégrade fortement dans certaines régions.
SSP4 Inégalités	Développement marqué par de fortes inégalités entre et à l'intérieur des pays. Dégradation de la cohésion sociale et multiplication des conflits. Fossé croissant entre une élite connectée et mondialisée, responsable de la majorité des émissions de GES, et un ensemble fragmenté de populations à faible revenu, peu éduqué et vulnérable au changement climatique. Le secteur énergétique se diversifie entre sources d'énergie fortement carbonées et décarbonées. Les politiques environnementales se concentrent sur les enjeux locaux.
SSP5 Développement conventionnel	Développement adossé à l'exploitation forte des énergies fossiles et marqué par des investissements élevés dans la santé, l'éducation et les nouvelles technologies. Adoption de modes de vie intensifs en ressources et en énergie à travers le monde. La croissance économique et le progrès technologique sont élevés. Les problèmes de pollution locale sont bien gérés et l'adaptation est facilitée notamment grâce au recul de la pauvreté.

Figure 2-2 : Narratifs des scénarios d'émissions(Vailles, 2019)

D'autre part, une trajectoire de forçage radiatif (Figure 2-3) provient d'une gamme diversifiée de ces scénarios de développement socio-économique et technologique, selon le terme « SSPx-y » avec x le numéro du SSP et y le niveau de forçage radiatif approximatif (en W/m²) en 2100 (Vailles, 2019).

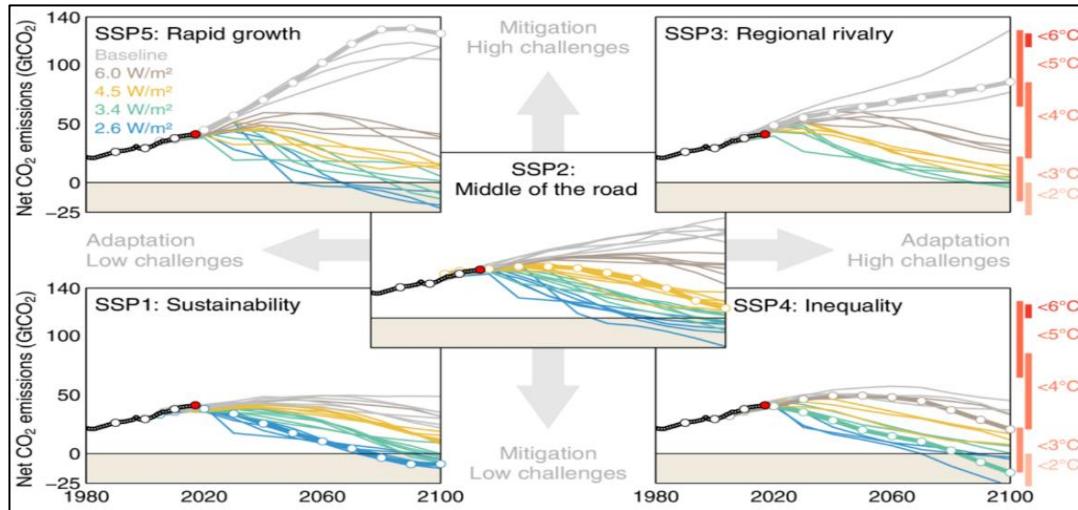


Figure 2-3 : Les 5 grandes trajectoires socio-économiques des SSP (Violaine Lepousez, 2022)

Dans le niveau de forçage radiatif « y », on retrouve les scénarios d'évolution RCP (trajectoires de concentration représentative) (Violaine Lepousez, 2022). Ces scénarios contiennent les trajectoires d'émissions, de concentration et d'utilisation des terres et qui étaient représentatives des publications sur les émissions et la concentration de GES (Charron, 2016), mais ne tiennent pas compte des choix politiques ou économiques qui peuvent influencer ces concentrations.

Puis, les SSP diffèrent des RCP dans la mesure où ils offrent un niveau de précision et de détail plus élevé pour les entrées des modèles climatiques. Encore, ils permettent l'étude de combinaisons non couvertes par les RCP. En effet, les SSP permettent d'étudier la combinaison de faibles efforts d'atténuation et de faibles contrôles de la pollution atmosphérique affectant les émissions d'aérosols (Vailles, 2019). Le principe de la répartition des émissions dans le temps et entre les différents gaz et aérosols diffère tant pour les PCR que pour les SSP, lesquels sont toutefois classés en fonction du niveau approximatif de forçage radiatif atteint en 2100 (Vailles, 2019).

Le sixième rapport du GIEC a évalué la réponse du climat sur ces cinq scénarios socio-économiques (Vailles, 2019) :

Tableau 2-1 : Cinq scénarios socio-économiques (Vailles, 2019)

SSP1	1.9 :	Scénario très ambitieux pour représenter l'objectif 1,5 °C de l'Accord de Paris
SSP1	2.6 :	Scénario de développement durable
SSP2	4.5 :	Scénario intermédiaire
SSP3	7.0 :	Scénario de rivalités régionales
SSP5	8.5 :	Développement basé sur les énergies fossiles

Le modèle RCP continue néanmoins d'être utilisé dans la littérature scientifique pour certains sujets, notamment l'élévation du niveau des mers ou les projections régionales. C'est le cas pour cette étude. En effet, les résultats des simulations forcées par RCP sont présentés dans la partie portrait climatique du Québec qui est priorisée pour ce projet.

2.5 Modèle climatique global

Il existe plusieurs centres de modélisation du climat dans le monde, chacun développant son propre modèle climatique global. Notamment, les modèles proposés par les laboratoires internationaux utilisant 32 modèles de type RCP 2,6 et 39 modèles de type RCP 8,5 pour simuler l'évolution des concentrations et l'évolution du climat (Bernier et al., 2016).

Il existe quatre scénarios d'émissions possibles pour les simulations climatiques, mais leur exécution avec un modèle RCP nécessite beaucoup de temps de calcul pour une période de simulation de 1850 à 2100, ce qui rend impossible pour chaque centre de modélisation de les exécuter tous. Pour résoudre ce problème, ces derniers collaborent à travers le Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) en exécutant leurs propres modèles avec différents RCP et en rendant les résultats disponibles à la communauté climatique (Ouranos, 2015).

À l'heure actuelle, la communauté scientifique utilise le sixième ensemble, appelé CMIP6. Cette nouvelle génération de modèles est exécutée au moyen des SSP, alors que les simulations du CMIP5 précédent utilisaient les scénarios RCP.

Pour assurer un certain recouplement avec les niveaux de forçage radiatif des RCP à l'horizon 2100, le Tableau 2-2 présente la correspondance entre les scénarios SSP et RCP retenus par le GIEC respectivement dans l'AR6 et l'AR5 (Violaine Lepousez, 2022).

Tableau 2-2 : La correspondance entre les scénarios SSP et RCP retenus par le GIEC respectivement dans l'AR6 et l'AR5 (Violaine Lepousez, 2022)

SCÉNARIO SSP	SCÉNARIO RCP LE PLUS PROCHE	COMMENTAIRES
SSP1-1.9	Pas de scénario RCP équivalent	
SSP1-2.6	RCP2.6	Le RCP2.6 induit un réchauffement légèrement plus faible.
SSP2-4.5	RCP4.5	Le scénario RCP6.0 est lui aussi proche du SSP2-4.5, jusqu'à 2050.
SSP3-7.0	Entre le RCP6.0 et le RCP8.5	Dans SSP3-7.0, les émissions d'autres GES que le CO2 et d'aérosols sont plus élevées que dans n'importe lequel des RCP.
SSP5-8.5	RCP8.5	Le scénario SSP5 est le seul narratif SSP dont les émissions sont suffisamment élevées pour produire un forçage radiatif de 8,5 W.m ⁻² en 2100.

Par conséquent, les ensembles CMIP5 et CMIP6 (produits avec des émissions SSP et qui ont une résolution de 50 km) sont respectivement, à la base des résultats du 5^e et du 6^e rapport synthèse du GIEC.

La Figure 2-4 suivante montre les changements de température simulés avec les deux ensembles (CMIP5 sur le panneau gauche et CMIP6 sur le panneau droit).

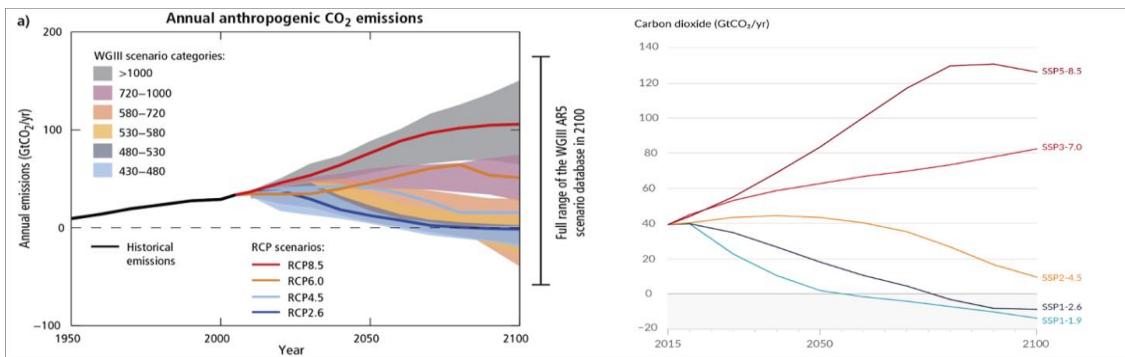


Figure 2-4 : Trajectoires d'émissions de CO2 selon les cinq scénarios du 6e rapport d'évaluation du GIEC, Groupe I (à droite), les catégories du Groupe III de scénarios d'émissions de CO2-eq (en ppm) (à gauche) (Violaine Lepousez, 2022)

Pour le CMIP6 (Violaine Lepousez, 2022) :

- Deux scénarios avec des émissions de GES élevées et très élevées SSP3-7.0 et SSP5-8.5;
- Un scénario avec des émissions de GES intermédiaires : SSP2-4.5;
- Deux scénarios avec des émissions de GES très faibles et faibles : SSP1-1.9 et SSP1-2.6.

Aucune projection présentée dans le résumé pour décideur ne dérive du scénario SSP4 bien que les simulations existent pour tous les scénarios. En associant les RCP aux SSP, il est possible de mieux comprendre les implications des choix socio-économiques sur les concentrations de GES et donc sur l'évolution du climat. Par exemple, un RCP 8.5 (qui correspond à une augmentation de la température moyenne mondiale de 4,5 °C à la fin du siècle) peut être associé à différentes SSP, qui décrivent des trajectoires socio-économiques distinctes (Violaine Lepousez, 2022).

Les deux nouveaux scénarios SSP3-7.0 et SSP1-1.9 sont également très importants. Le SSP3-7.0 décrit un monde où il n'y aurait pas de politique climatique supplémentaire, ce qui conduirait à une augmentation importante des émissions de GES et à un réchauffement important. Le SSP1-1.9, quant à lui, est conforme à l'objectif de l'accord de Paris visant à limiter l'augmentation de la température moyenne mondiale à 1,5 °C (Violaine Lepousez, 2022).

Ces nouveaux scénarios SSP permettent donc de mieux comprendre les conséquences de différents choix politiques et économiques sur le climat et sur la capacité de l'humanité à atteindre les objectifs climatiques fixés par l'accord de Paris (Violaine Lepousez, 2022).

Le

Tableau 2-3 explique les scénarios à fortes émissions de GES (Violaine Lepousez, 2022).

Tableau 2-3 : Explication des scénarios à fortes émissions de GES (Violaine Lepousez, 2022)

Le scénario SSP2-4.5	C'est un scénario tendanciel "business as usual" avec des niveaux d'émissions correspondant aux NDC (Contributions déterminées au niveau national) et pas de changements brusques majeurs des taux d'émissions. Il peut donc être considéré comme le plus probable.
Le scénario SSP5-8.5	Il est susceptible de se produire d'ici 2050, il traduit l'échec des politiques d'atténuation et la poursuite des tendances de consommation d'énergie primaire et du mix énergétique. Toutefois, ce scénario semble peu probable à long terme, étant donné qu'il ne tient pas compte des répercussions des changements climatiques par rapport aux activités humaines (et donc aux émissions) et qu'il prévoit une disponibilité "infinie" des combustibles fossiles et des ressources naturelles. Il est intéressant pour des systèmes très sensibles aux aléas climatiques (comme les villes côtières) ou très critiques pour les activités humaines (comme les centrales nucléaires) voire à longue durée de vie (comme les Infrastructures).
Le scénario SSP3-7.0	Pour les mêmes raisons que SSP5-8.5, et d'ici 2050, il est également probable, mais moins probable à long terme. Il s'agit du scénario le plus pessimiste pour la résilience climatique : <ul style="list-style-type: none"> - Dans ce cas, la croissance du PIB est la plus faible, la population est peu instruite et la démographie est élevée; - Les émissions y sont élevées parce que les pays privilégient la souveraineté énergétique à la coopération; - La résilience de la société est faible parce qu'elle est contrainte par les conflits régionaux et la faiblesse des progrès technologiques.

Les scénarios SSP1-1.9 et SSP1-2.6	Ils correspondent à des trajectoires socio-économiques, en supposant un pic d'émissions vers 2020, suivi d'une réduction significative des émissions après 2020. Par conséquent, à ce stade, les deux scénarios semblent peu probables.
---	---

En somme, le choix du scénario de gestion des risques doit être basé sur un équilibre entre les risques les plus importants et leur probabilité d'occurrence. Le scénario SSP5-8.5 peut être considéré pour la préparation et l'atténuation des risques les plus graves, tandis que le scénario SSP2-4.5 peut être pris en compte pour la prise de décision concrète en termes de gestion/prévention des risques.

Neanmoins, il est important de ne pas négliger la notion de prospective des scénarios climatiques et de ne pas se concentrer uniquement sur le scénario le plus pessimiste.

Il faut éviter les effets négatifs qui peuvent découler d'une approche trop pessimiste. Par conséquent, il est nécessaire de trouver un juste équilibre pour une gestion efficace des risques climatiques.

Enfin, pour les scénarios comme le SSP4-8.5 et le SSP2-4.5, les chercheurs peuvent utiliser les simulations du scénario équivalent RCP 8.5 et RCP 4.5, qui ont été utilisées depuis 2013 et qui ont pu bénéficier de l'ajustement des données régionales. Pour ces scénarios, des données plus fiables, avec une résolution allant jusqu'à 12 km, sont disponibles et sont préférées (Violaine Lepousez, 2022).

Il est important de noter que le portrait des changements attendus pour le Québec, dans cette étude, présente principalement des résultats des simulations forcées par RCP 4.5 et 8.5 du projet CMIP5.

2.6 Incertitudes des projections climatiques

Le fait d'utiliser plusieurs simulations implique une plage de futurs plausibles, souvent appelée l'incertitude des projections climatiques. Il y a trois éléments principaux d'incertitude en matière de changement climatique : la variabilité naturelle du climat, les émissions futures de gaz à effet de serre et les imprécisions des modèles climatiques (Ouranos, 2015).

La part relative de chaque source d'incertitude dépend de la période temporelle envisagée (Ouranos, 2015). Par exemple, la variabilité naturelle du climat est généralement la principale source d'incertitude sur quelques décennies. Pour des périodes plus courtes, le choix de scénarios d'émissions a relativement peu d'importance. Cependant, sur des horizons temporels plus longs, le choix d'un scénario d'émissions devient crucial, tandis que l'incertitude associée au modèle reste relativement constante, quelle que soit l'échelle de temps considérée (Ouranos, 2015).

2.7 Les modèles climatiques au Québec

Les modèles climatiques sont des outils très importants pour comprendre et gérer les répercussions des changements climatiques. Au Québec, le MRCC (modèle régional canadien du climat) est le modèle climatique le plus largement utilisé. Ce modèle a été élaboré en utilisant des données climatiques à partir de tout le Canada et il est capable de simuler les tendances climatiques passées et futures, y compris les températures moyennes et les précipitations et les évènements météorologiques extrêmes (Canada.ca, 2017). Il est très utile pour aider à mieux comprendre les dynamiques des systèmes climatiques et à prédire leurs réponses aux changements externes et aux activités humaines.

D'autres modèles climatiques ont également été développés pour le Québec, comme le modèle global des océans et de l'atmosphère (GCM), le modèle climatique canadien (CMC) et le modèle de circulation générale (MCG) (Canada.ca, 2016). Ces modèles sont utilisés pour produire des projections climatiques à plus long terme et pour évaluer les impacts des changements climatiques sur les secteurs d'activité, notamment l'agriculture, la foresterie, l'énergie et les infrastructures (Canada.ca, 2016).

L'INRS, par exemple, a développé un modèle climatique spécifique pour le secteur de l'hydroélectricité au Québec, pour mieux comprendre les impacts des changements climatiques sur la production d'énergie hydraulique et pour planifier des mesures d'adaptation (Voltaire Aurore, 2020).

Un autre exemple est le Modèle régional canadien du Climat, qui est un modèle climatique utilisé dans le programme COordinated Regional Climate Downscaling EXperiment (CORDEX), financé par le Consortium Ouranos sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques, Hydro-Québec, la Fondation canadienne pour la science du climat et de l'atmosphère (FCSCA), le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) et le

ministère du Développement économique, Innovation et Exportation (MDEIE) du Québec (Martynov et al., 2013).

En dernier lieu, les modèles climatiques sont également utiles pour aider à évaluer les risques et planifier des mesures d'adaptation pour les communautés côtières qui sont susceptibles d'être affectées par la montée des eaux et les tempêtes extrêmes (Drobinski, 2015).

2.8 Évolution climatique

Depuis le début du XIX^e siècle, la combustion de combustibles fossiles a libéré de grandes quantités de GES, dont le dioxyde de carbone, dans l'atmosphère. Ces gaz emprisonnent la chaleur et agissent comme une couverture autour de la terre, affectant le climat (Jancovici, 2002). En conséquence, les températures mondiales ont augmenté témoignant de l'impact des activités humaines sur le climat (canada.ca, 2019).

Par ailleurs, d'autres activités humaines, comme celles liées à l'utilisation des sols, à la déforestation et aux pratiques agricoles, exacerbent cet effet, mais il convient de noter que des facteurs non humains, comme les modifications de l'énergie solaire et les éruptions volcaniques, contribuent également au changement climatique (André et al., 2007). Néanmoins, force est de constater que l'industrialisation demeure le principal vecteur des changements climatiques.

2.8.1 Évolution climatique du XX^e et XXI^e siècles

Les preuves du réchauffement actuel sont largement visibles dans les enregistrements météorologiques des dernières centaines d'années, collectés à l'aide de satellites, de thermomètres et de pluviomètres (La Branche & Vergara, 2008).

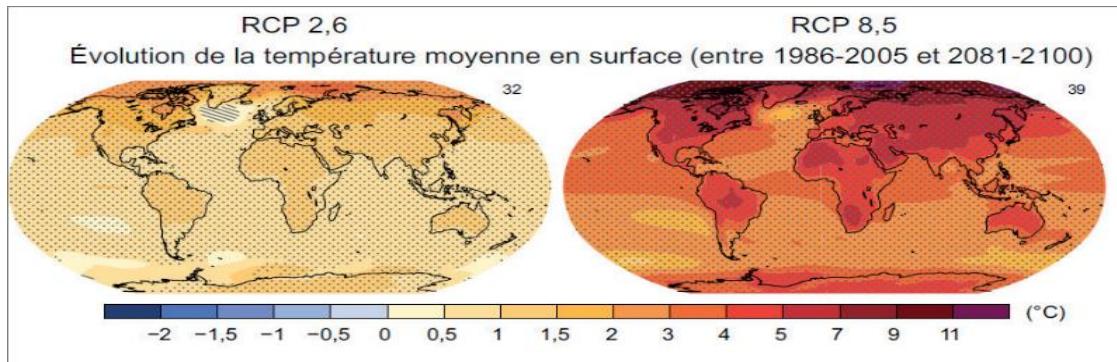
Des données statistiques indiquent que la tendance au réchauffement climatique est confirmée par des années chaudes observées depuis 2000, avec une augmentation moyenne de 0,74 °C entre 1906 et 2005, et une augmentation de près de 2 °C dans les régions des latitudes élevées de l'hémisphère nord. En effet, le réchauffement des terres émergées sera plus important que celui des océans, provoquant dans les régions septentrionales de l'Amérique du Nord et de l'Asie centrale une augmentation de température de 40 % supérieure au réchauffement global. Cette hausse thermique entraînera une fonte importante de la glace terrestre, des glaciers et de la glace de mer (Godard & Tabeaud, 2004). Quant à l'Antarctique, il subira peu de changements. En revanche, les régions tropicales connaîtront un réchauffement inférieur à la moyenne, notamment

dans le sud et le sud-est de l'Asie en été et dans le sud de l'Amérique du Sud en hiver. Selon plusieurs modèles, le Pacifique tropical adoptera une configuration semblable à celle d'El Niño, dans la mesure où le Pacifique oriental connaîtra un réchauffement plus rapide et plus marqué que le Pacifique occidental (Godard & Tabeaud, 2004). De plus l'accroissement du niveau des océans s'est également accéléré entre 1993 et 2013 (Merle et al., 2016). En effet, une augmentation constante de la température moyenne mondiale et un important recul de la cryosphère sont observés notamment depuis la seconde moitié du XX^e siècle, avec une diminution constante de la glace en Arctique depuis les années 1980 et une réduction rapide de la masse de glace du Groenland entraînant une élévation du niveau moyen des océans entre 29 et 82 cm d'ici à la fin du 21^e siècle. Par ailleurs, tous les modèles s'accordent sur une variabilité accrue de la température tant que la glace de mer existe, suivis d'une variabilité de température rapidement décroissante lorsque la banquise est perdue (La Branche & Vergara, 2008).

Les changements climatiques entraînent des risques nouveaux pour les sociétés humaines, car ils perturbent les écosystèmes terrestres et les migrations animales et engendrent des phénomènes météorologiques extrêmes tels que des précipitations orageuses intenses et des canicules prolongées (Merle et al., 2016).

Le rapport d'évaluation du GIEC prévoit que les impacts des changements climatiques seront néfastes pour l'écosystème dans sa globalité, avec une augmentation continue de la température moyenne et du niveau de la mer au-delà de 2100. Ils indiquent également que les événements climatiques extrêmes seront plus intenses et plus fréquents et les régions normalement humides pourraient subir des précipitations diluviales alors que les régions sèches deviendront encore plus sèches (Merle et al., 2016).

Enfin, les niveaux de réchauffement par horizon et par scénario présentés en Figure 2-5 montrent bien que l'évolution de la température moyenne projette un réchauffement à horizon 2100.



2.8.2 Évolution climatique au Québec

Les changements climatiques sont parmi les principaux défis auxquels font face les êtres humains. Ils se manifestent sous plusieurs formes et entraînent des répercussions à l'échelle mondiale et le Québec ne fait pas exception. Selon les modèles climatiques, les températures moyennes annuelles ont augmenté de 1 à 3 °C depuis 1950 et devraient augmenter de 2 à 4 °C pour la période 2041-2070 et de 4 à 7 °C pour la période 2071-2100 (Ouranos, 2015), d'autant que, les changements les plus marqués seront prévus pour la saison hivernale dans le nord du Québec, avec des réchauffements pouvant atteindre 10 à 15 °C selon le scénario d'émissions.

De plus, les températures maximales de la journée la plus chaude et minimale de la journée la plus froide devraient augmenter de 3 à 7 °C et de 5 à 10 °C, respectivement, selon la région et le scénario (Ouranos, 2015). En outre, il est prévu une forte augmentation dans la durée des vagues de chaleur et la fréquence des nuits chaudes, ainsi qu'une forte réduction dans le nombre annuel de jours de gel, de nuits froides et de jours froids (Ouranos, 2015).

En termes de précipitations, les cumuls devraient augmenter pour toutes les régions du Québec en hiver et en printemps, tandis que les augmentations en été et en automne devraient être plus modestes pour le Nord et le Centre-du-Québec (Ouranos, 2015). De même, des augmentations significatives sont attendues pour les indices de précipitations abondantes et extrêmes pour toutes les régions du Québec, avec davantage de changements dans le nord que dans le sud (Ouranos, 2015).

La neige au sol devrait également diminuer pour la période 2041-2070, surtout dans le sud de la province et une baisse de la durée de l'enneigement est également constatée. D'une part, les rivières du nord du Québec devraient s'attendre à des augmentations des débits moyens au printemps et en automne pour la période 2041-2070, d'autre part la plupart des rivières du sud du Québec devraient s'attendre à une baisse des débits moyens en été, au printemps et en automne (Ouranos, 2015).

Les conditions plus sèches du sol sont également prévues pour les sécheresses agricoles annuelles et pour la saison estivale. De même, exception faite de l'ozone de surface dans les simulations forcées, le niveau relatif de la mer le long des côtes de la baie et du détroit d'Hudson est prévu de baisser (Ouranos, 2015).

Pour résumer, en raison des fluctuations de température et des perturbations du cycle de l'eau, les écosystèmes du Québec, notamment les plantes et les animaux se retrouvent souvent en position vulnérable. Certes, ils peuvent migrer, mais cela n'est possible que s'ils trouvent un environnement plus favorable ou s'ils sont capables de se déplacer à une cadence plus rapide que celle des changements climatiques (Davidson, 2021). Par conséquent, un grand nombre d'espèces sont obligées de migrer vers des régions polaires ou vers de plus hautes altitudes.

Toutefois, les espèces vivantes dans les montagnes canadiennes sont particulièrement vulnérables du fait qu'elles ne bénéficient plus d'un refuge sûr (Davidson, 2021).

2.9 Impact et enjeux climatiques

Les prévisions sont un outil utile pour créer des stratégies d'atténuation des risques et d'adaptation au changement, en particulier dans le contexte des changements climatiques (André et al., 2007). Ce dernier se définit comme une modification durable des régimes météorologiques qui déterminent les climats locaux et mondiaux (Jancovici, 2002). Selon le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), « Il est extrêmement probable que l'influence humaine ait été la cause dominante du réchauffement observé depuis le milieu du XX^e siècle » (Rapport du GIEC, 2014).

Le GIEC est l'organisme international de référence pour l'évaluation des changements climatiques (André et al., 2007). Celui-ci a recourt à des modèles informatiques pour faire ces projections

climatiques. Ces modèles prennent en compte différents scénarios qui reflètent les hypothèses sur les émissions futures de CO₂, la croissance démographique et la technologie. Ainsi, le GIEC explore toute une gamme de futurs possibles et aide les décideurs à comprendre les conséquences potentielles des choix politiques à prendre (Charron, 2016).

De plus, il publie régulièrement des rapports scientifiques en matière de changements climatiques, leurs impacts et les risques futurs, mais aussi sur les stratégies à mettre en œuvre pour cerner ces effets et les limiter (Merle et al., 2016).

Par ailleurs, son sixième et dernier rapport (AR6), publié en partie sur une période de 2021 à 2022, rapporte que les conséquences des changements climatiques sont largement répandues et continuent de s'aggraver, entraînant des répercussions sur les systèmes physiques et biologiques et mettant en danger la santé des personnes et leur sécurité (J. Lee et al., 2021). Ce rapport souligne également l'importance d'adapter des changements rapides et profonds aux secteurs de l'énergie, des sols, de l'urbanisme et des systèmes d'infrastructure (y compris les transports et les bâtiments), sans oublier les systèmes industriels (J. Lee et al., 2021).

Les changements climatiques ont de multiples conséquences sur les populations, particulièrement sur les plus vulnérables, qui sont confrontées à une augmentation des risques et des dommages qui y sont liés (La Branche & Vergara, 2008). En effet, au Québec par exemple, des recherches soulignent l'importance de la prise en compte des impacts des changements climatiques dans la planification et la gestion de la distribution d'électricité dans la mesure où les événements météorologiques extrêmes, tels que les tempêtes de verglas, peuvent entraîner des conséquences significatives sur la distribution électrique au Québec. La recherche a souligné que les tempêtes de verglas ont des impacts importants sur le réseau électrique, causant des pannes de courant généralisées et prolongées (J. H. Hydro-Québec, Maryse Lambert, Frédéric Vigeant 2017).

D'autres risques plus fréquents sont les inondations, les épidémies et les problèmes sanitaires, les catastrophes naturelles telles que les sécheresses, les incendies de forêt et les tempêtes plus violentes et leurs répercussions directes sur les systèmes économiques et politiques des pays (Segovia-Kueny, 2009). Par ailleurs, les populations les plus pauvres sont les plus vulnérables à ces effets, ce qui entraîne une aggravation des inégalités et une plus grande probabilité de conflits. Il est donc crucial de prendre des mesures pour aider les populations à mieux se préparer et à réduire leur vulnérabilité face à ces effets (La Branche & Vergara, 2008).

Enfin, il est également important de noter que les répercussions des changements climatiques se produisent progressivement sur une longue période, il est donc crucial de prendre des mesures pour limiter leurs impacts à l'avenir. Il s'agit d'un réel défi pour toute l'humanité et une prise de conscience rapide, efficace et nécessaire pour sauver l'avenir (La Branche & Vergara, 2008).

2.10 Conclusion

Les changements dans le système climatique exigent que les gens s'adaptent. En effet, les populations sont confrontées à bon nombre des conséquences du dérèglement planétaire du climat, notamment des températures plus élevées, un risque accru d'inondations et un accès réduit à l'eau douce. Malheureusement, cela ne fera que s'aggraver avec l'augmentation de la population mondiale (André et al., 2007).

Par conséquent, de nombreux pays se tournent vers les résultats des dernières études scientifiques pour savoir comment gérer au mieux leurs ressources naturelles. Ces pays doivent s'engager auprès des décideurs et du public pour élaborer des politiques visant à lutter contre les effets néfastes des changements climatiques avant qu'ils ne soient irréversibles. Celles-ci doivent être axées sur la meilleure utilisation possible des ressources et la minimisation des déchets (André et al., 2007).

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE

3.1 Introduction

Le travail effectué dans le cadre de cette recherche consistera à prioriser les mesures d'adaptation par rapport aux risques développés dans la matrice des risques HQD afin d'orienter Hydro-Québec Distribution dans le secteur de la traversée de la rivière, à proximité du barrage de Paugan, en Outaouais vers le plan d'adaptation le plus optimale visant à atténuer les risques liés aux changements climatiques en utilisant la méthode multicritère la plus adaptée à cette étude.

Dans ce contexte, on peut dire que ce projet se fonde, alors, sur une démarche hybride (quantitative et qualitative) visant à hiérarchiser les critères et l'évaluation du risque réalisé par Hydro-Québec (voir ANNEXE A : Vulnérabilité des actifs (Hydro-Québec Distribution, 2021)). Toutefois, pour mener à bien cette analyse, il convient d'utiliser également la méthode Delphi, dont l'objectif est de coter les poids des critères de ladite approche.

Dans la perspective de la mise en place d'une démarche adaptée à ce projet, il faut dans un premier temps appréhender ce qu'est l'approche multicritère, choisir parmi ses différentes méthodologies et enfin de comprendre le principe de la méthode Delphi.

3.2 Méthodologie

La méthodologie de recherche adoptée consiste à présenter :

Tout d'abord, l'approche réalisée par HQD qui intègre l'évaluation de l'impact des changements climatiques, puis l'identification des vulnérabilités et les solutions d'adaptation. Ensuite, l'évaluation des options ainsi que la participation de plusieurs parties prenantes par le biais d'une méthodologie multicritère permettant d'orienter la décision pour les plans d'adaptations qui vise à atténuer les risques liés aux changements climatiques pour Hydro-Québec Distribution.

En effet, ce travail vise dans un premier temps à mettre en contexte le projet en assemblant la collecte de données et en identifiant les paramètres principaux par une revue de littérature complète de manière à comparer un grand nombre d'articles et de rapports publiés au cours de ces dix dernières années.

Dans un deuxième temps, le document portera sur l'application de la méthode multicritère, la méthode Delphi et le choix de l'AHP en expliquant son concept, le processus du choix, la pondération des critères et des alternatives, ainsi que la construction de la matrice de comparaison et le calcul des poids relatifs de décision.

Pour finir, un bilan présentant le résultat à approuver par les parties prenantes en plus de l'analyse de sensibilité.

Le schéma dans la Figure 3-1 résume la démarche de ce travail :

- Réaliser et identifier par HQD
- Réaliser dans cette étude
- Résultats et livrable à donner à HQD

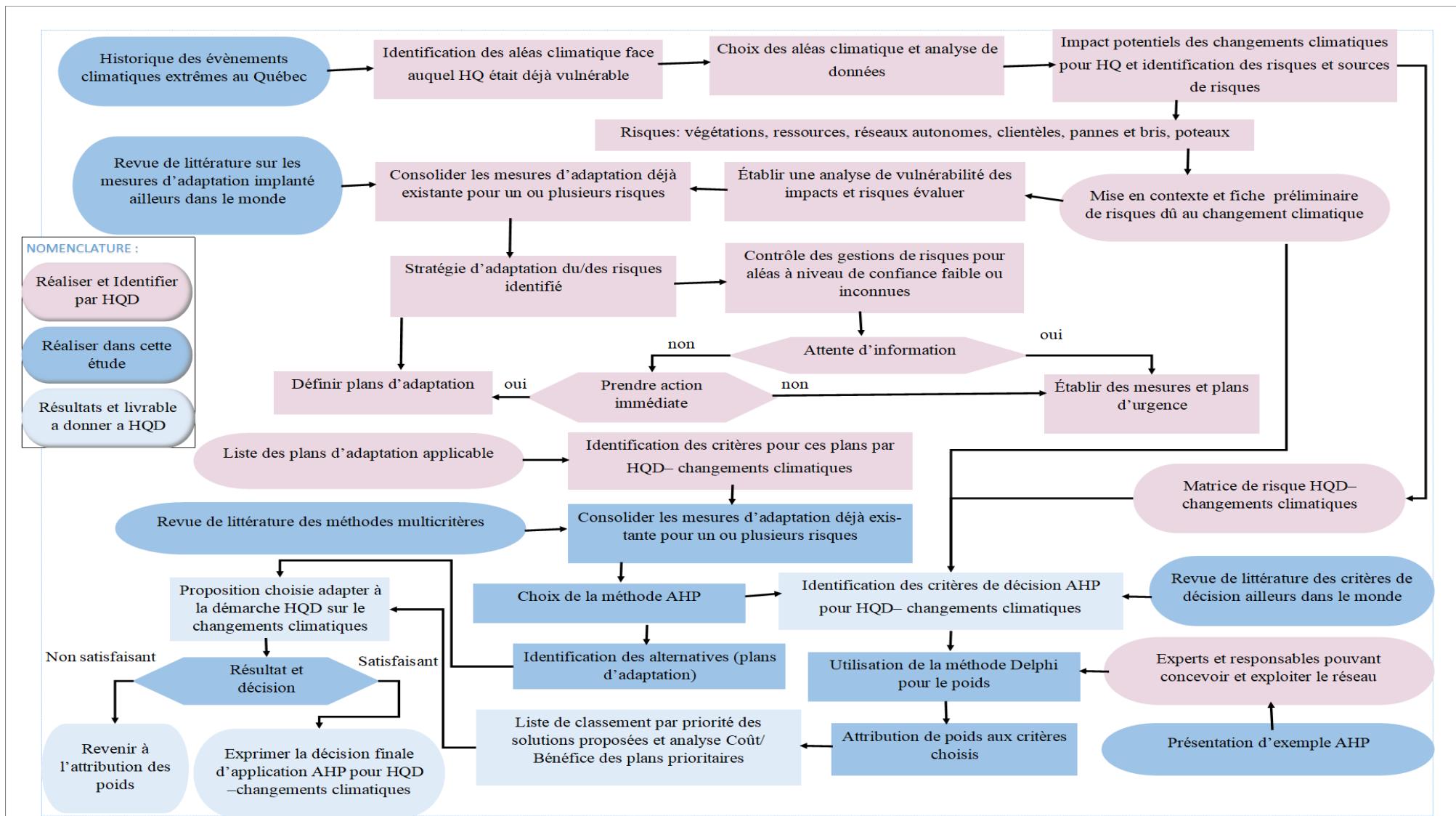


Figure 3-1 : Méthodologie et démarche de travail

3.3 Définition de la MCDM

L'approche multicritère ou Multiple-Criteria Decision-Making (MCDM) est une sous-discipline de la recherche opérationnelle prenant en compte les multicritères dans la prise de décision. Cet outil peut être appliqué à de nombreuses décisions complexes portant sur la structuration et la résolution de problèmes liés à la planification impliquant de nombreux critères (Belton & Stewart, 2002).

En outre, elle est principalement applicable à la résolution de problèmes comportant un choix parmi diverses alternatives. Elle vise à établir une liste cohérente de critères destinés à concevoir, justifier et transformer les choix dans le cadre d'un processus décisionnel, à aider à prendre une décision ou à évaluer plusieurs options dans des situations où aucune possibilité n'est parfaite, de manière à satisfaire la cohésion des aspects économiques, conceptuels, technologiques, environnementaux, sociaux, etc. (Innocent Ndo Mbue, 2017).

En effet, La MCDM dispose de techniques qui peuvent être utilisées pour identifier une seule option élue, de façon à classer les autres options, à en présélectionner un nombre limité en vue d'une évaluation détaillée ultérieure, ou simplement pour distinguer les possibilités acceptables des possibilités inacceptables.

Son objectif est donc de venir en aide aux décideurs pour synthétiser les diverses opinions pouvant être exprimées et de mener à des recommandations conformes aux attentes intuitives présentées dans ces opinions (Saaty, Dahan, & Hirsch, 1984).

3.4 Principe général de la MCDM

En règle générale le principe de la MCDM repose sur le processus de recherche d'une solution efficace, indépendamment de la méthode utilisée, cette solution se déroule en 4 étapes (Schärlig, 1985) (voir Figure 3-2) :

- Identifier l'objectif général du processus et lister les différentes alternatives possibles ou envisageables : Identifier aussi la problématique soumise par le décideur afin de l'associer à un des problèmes existants liés à la prise de décision multicritère et dresser l'ensemble des actions ou alternatives « A » servant de base à la prise de décision. De cette étape découle l'élaboration du modèle décisionnel associé au problème.

- Lister les critères à prendre en compte et leur donner un poids : ces critères sont dérivés à travers les retombées des décisions dont tout effet ou attribut de ces dernières pouvant interférer avec les objectifs ou le poids d'un acteur dans celle-ci, et constituant l'élément principal permettant d'élaborer, de justifier ou de transformer ses choix.
- Juger chaque solution par rapport à chacun des critères : l'analyste est amené à dresser un tableau de performance contenant toutes les alternatives potentielles et tous les critères construits lors de l'étape qui précède, de manière à apporter et à proposer des réponses. Cette phase constitue un aspect essentiel du processus d'aide à la décision puisqu'elle permet de prévoir l'approche qui sera utilisée dans la recherche d'un compromis entre les alternatives.
- Agréger ces jugements pour sélectionner la solution la plus adéquate : l'objectif ici est de formaliser la représentation de ces critères par rapport à un ensemble « A » d'alternatifs potentiels, considérés comme appropriés au problème. Au cours de cette étape, et conformément aux exigences et au type de problème décisionnel soumis par le décideur, un choix d'une des méthodes d'agrégation est à entreprendre afin de déterminer si le compromis souhaité est présenté pour aboutir en fin de compte à une recommandation permettant d'atteindre les objectifs de la recherche.

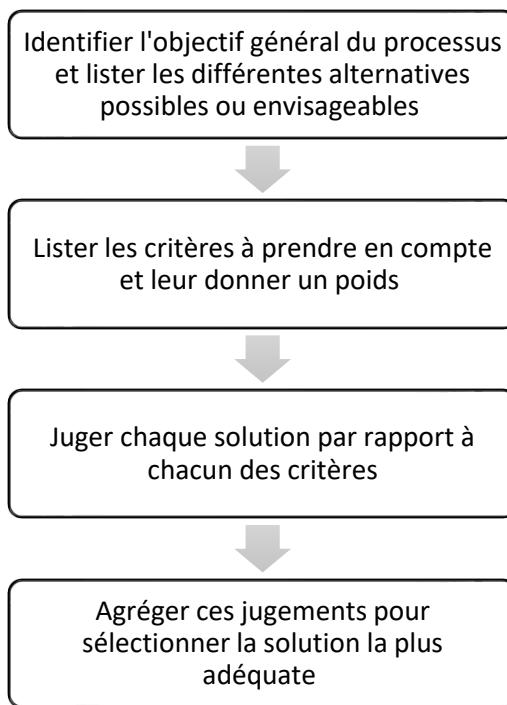


Figure 3-2 : Principe général d'analyse multicritère (Doumpos & Zopounidis, 2002)

La différence entre ces diverses méthodes d'analyse multicritère consiste dans la manière dont cette dernière étape est réalisée, à savoir la manière dont chaque solution est évaluée en fonction des critères retenus.

3.4.1 Concepts et terminologie

Cette partie rappelle la terminologie couramment utilisée dans la MCDM. Les termes essentiels pour décrire la problématique d'une décision sont :

- a- Alternatives : fait référence à l'ensemble des solutions, scénarios, etc., réalisables sur lesquels la décision est basée.
- b- Objectifs : indique les améliorations à apporter à un système au moment de son évaluation. Il est soit maximisé (ex. : profit), minimisé (ex. : coût) ou maintenu à un niveau donné (ex. : un équilibre économique).
- c- Attributs : détermine les caractéristiques des alternatives.
- d- Critères : c'est une fonction pour évaluer une solution potentielle selon un aspect élaboré.
- e- Poids : utilisé pour indiquer l'importance des critères.
- f- Priorités des critères : Les décisions sont prises en fonction de plusieurs critères. Certains sont définis, d'autres non. Ceux-ci incluent les probabilités, les cotes, les résultats des décisions précédentes et les préférences. Un processus de décision implique de choisir des options, de déterminer des contraintes et de justifier des arguments, ce qui suscite un amalgame de problèmes au niveau du choix, du tri et du rangement.

3.5 Les méthodes multicritères d'aide à la décision

Lors de la sélection des mesures, il arrive souvent que les problèmes deviennent subjectifs et dépendent des convictions personnelles de chaque individu. C'est pourquoi, au cours des trois dernières décennies, les méthodes issues de la science de la décision et de la recherche opérationnelle ont joué un rôle essentiel dans le domaine de la prise de décision multicritères (MCDM). Ces domaines prennent en compte les attitudes, les pensées et les croyances des individus lorsqu'ils formulent une proposition. Cette synthèse du travail est ensuite utilisée pour créer un rapport qui reflète au mieux les attentes de chacun.

L'objectif principal d'une approche multicritère est d'examiner divers aspects sans qu'aucun d'entre eux ne soit en conflit avec les autres. Il ne s'agit pas tant de trouver la solution optimale, mais plutôt de parvenir à un compromis entre les différents critères.

Plusieurs méthodes d'analyse multicritère coexistent, la différence réside dans la manière de réalisation de la dernière étape, c'est-à-dire dans la manière d'évaluer chaque solution en fonction des critères retenus. Ces méthodes sont divisées en trois catégories selon la façon dont les jugements seront agrégés (Schärlig, 1985).

3.5.1 Agrégation complète

Cette catégorie consiste à chercher l'agrégation complète des critères dans le but de les réduire à un critère unique. En outre, chaque critère se voit attribuer un poids, indiquant son importance. Puis un indice numérique pour chaque alternative est calculé de sorte que celle ayant le score le plus élevé l'emporte.

Malgré leur aspect plus ou moins rigoureux, ces approches sont extrêmement complexes, pouvant aller jusqu'à exclure certaines solutions encore optimales dues à la loi de compensation qui implique un équilibre entre les critères où une amélioration sur un critère peut "compenser" une détérioration équivalente sur un autre critère, permettant ainsi de prendre des décisions éclairées en fonction des priorités et des compromis des décideurs.

Parmi les différentes méthodes de cette agrégation, on cite :

- a.** Méthode WSM (Weight Sum Method ou Somme de notes) (Bridgman, 1922): la méthode la plus connue et ayant le moins de calcul, elle est idéale pour les problèmes à une seule dimension.
- b.** Méthode WPM (Weight Product Method ou Multiplication de ratios) (Bridgman, 1922) : est une approche classique de la prise de décision multicritères (MCDM). Elle est comparable au modèle de la somme pondérée (WSM). Sa principale divergence réside dans la multiplication au lieu de l'addition.
- c.** Méthode AHP (Analytic Hierarchy Process)(Saaty et al., 1984) : Cette méthode est utilisée pour appuyer la prise des décisions en organisant et en hiérarchisant les informations et les évaluations. En effet, son principe repose sur une représentation et une décomposition

hiérarchique, l'établissement des priorités et leurs synthèses, tout en gardant une cohérence logique. Par ailleurs, c'est l'une des méthodes multicritères les plus populaires dans plusieurs domaines, notamment la résolution de conflits, l'allocation des ressources et la planification.

Celle-ci fera le choix de la méthode d'application d'aide multicritère à la décision de notre travail par rapport :

- Gestion de la complexité : L'AHP est particulièrement adapté lorsque le problème comporte une hiérarchie de critères et de sous-critères, permettant ainsi de structurer et de gérer la complexité des décisions en les décomposant en éléments plus gérables.
 - Prise en compte des opinions/expertises : L'AHP intègre souvent les opinions ou les évaluations subjectives des experts, ce qui en fait un choix favorable lorsque les préférences et les jugements qualitatifs jouent un rôle important dans le processus de décision.
 - Comparaison des alternatives : L'AHP fournit un cadre pour comparer et hiérarchiser plusieurs alternatives selon plusieurs critères, en permettant aux décideurs d'évaluer les avantages et les inconvénients de manière systématique.
 - Sensibilité aux pondérations : Par rapport à certaines autres méthodes telles que WSM ou WPM, l'AHP offre une meilleure sensibilité aux pondérations des critères en permettant aux décideurs de comparer directement l'importance relative des critères.
 - Facilité d'application et de communication : L'AHP est souvent considéré comme relativement simple à comprendre et à appliquer, ce qui peut faciliter sa communication auprès des parties prenantes et son adoption dans le processus décisionnel.
 - Volonté d'Hydro-Québec : Hydro-Québec souhaite l'utilisation de l'AHP pour cette étude.
- d.** Méthode MAUT (Multi Attribute Utility Theory) (Kim & Song, 2009) : est une méthode systématique d'identification et d'analyse de multiples variables visant à fournir une base commune pour parvenir à une décision. Elle consiste à dériver une fonction d'utilité multiattribut pour laquelle des fonctions d'utilité uniques et leurs facteurs de pondération sont nécessaires.
- e.** TOPSIS (Technique for order preference by similary to ideal solution) (Hwang, Yoon, Hwang, & Yoon, 1981) : stipule qu'un décideur doit comparer toutes les solutions potentielles au résultat final souhaité. Concrètement, cela revient à comparer leur distance aux alternatives par rapport à l'idéal positif et négatif (anti-idéales), c'est-à-dire une distance courte pour le

positif et longue pour le négatif. Ainsi un espace à n-dimensions est réduit à deux par une série de compromis de premier ordre, notamment, par l'utilisation des fonctions d'appartenance de la théorie des ensembles flous pour représenter le niveau de satisfaction des deux critères. Un processus de compromis de second ordre est ensuite effectué à l'aide de l'opérateur max-min pour créer le problème de programmation final à objectif unique.

- f.** D'autres méthodes sont incluses comme : la méthode EVAMIX : EVAluation of MIXed Criteria créer par Voogd en 1983, la méthode UTA : Utility Theory Additive développée par Jacquet-Lagreze en 1982 et la méthode MAVT : Multiple Attribute Value Theory de Keeney et Raifa établie en 1976.

Pour résumer, le WSM (Weighted Sum Model) et le WPM (Weighted Product Model) sont des méthodes simples et directes pour agréger les scores des critères, mais ils présentent des limitations dans la prise en compte des préférences et des jugements subjectifs des décideurs.

En revanche, la MAUT (Multi-Attribute Utility Theory) permet de modéliser les préférences de manière plus flexible, mais elle peut nécessiter des données précises sur les préférences individuelles, ce qui peut être difficile à obtenir.

Le TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) permet de classer les alternatives en se basant sur la distance par rapport à une solution idéale, mais il peut être sensible aux variations dans la normalisation des données.

Comparativement, l'AHP offre une approche hiérarchique permettant de structurer les critères, tout en permettant une évaluation explicite des pondérations des critères par les décideurs. Cependant, l'AHP peut être plus complexe à mettre en œuvre, nécessitant parfois plus de temps et de ressources pour collecter les évaluations des critères et effectuer les calculs nécessaires.

Ainsi, chaque méthode a ses avantages et ses limites, et le choix dépendra souvent de la nature du problème et des préférences des décideurs en termes de facilité d'utilisation, de précision et de prise en compte des jugements subjectifs.

Un Récapitulatif des méthodes de critères d'agrégation complète est donné dans le Tableau 3-1 : suivant :

Tableau 3-1 : Récapitulatif des méthodes de critère d'agrégation complète

Méthodes	Avantage	Inconvénient	Remarque
WSM	Le moins de calcul	Effet de compensation	Idéale pour les problèmes à une seule dimension
WPM	Moins de calcul	Forte pénalisation des alternatives particulièrement mauvaises pour un critère	Similaire à la méthode WSM
AHP	Simplification du problème et prend en compte les avis des acteurs	Nombre de comparaisons par paires Difficultés opérationnelles pour choisir des critères	Méthode très populaire, adaptée à la plupart des objectifs au nombre restreint de critères, susceptible d'être autonome en fonction des critères et de leurs relations hiérarchiques
MAUT	Elle prend en compte l'incertitude, en lui assignant une fonction d'utilité	La complexité d'estimer la fonction d'utilité	Elle ne fournit pas une méthode claire pour attribuer les poids
TOPSIS	Facile à appliquer	L'incertitude liée à l'obtention des pondérations uniquement par des méthodes objectives ou des méthodes subjectives	Classe et sélectionne parmi un certain nombre d'alternatives via la distance euclidienne

3.5.2 Agrégation partielle

Celle-ci implique la comparaison séquentielle des alternatives deux par deux, en établissant des relations de préférence ou de surclassement entre elles, sans nécessairement comparer toutes les alternatives directement, afin de simplifier le processus de décision et de faciliter l'établissement d'un classement global. Cela permet de réduire la complexité de la comparaison dans les situations où comparer toutes les alternatives à la fois est difficile ou peu pratique. À en citer :

- a. ELECTRE I, II, III, IV (Roy, 1968) : Famille de méthodes dites de surclassement conçue par Bernard Roy est basées sur la comparaison d'alternatives par paires (Roy, 1968). Elles

nécessitent peu d'informations pour être mises en œuvre, lesquelles sont facilement accessibles au décideur, de sorte qu'elles fournissent des résultats concrets. Leurs procédures sont résumées dans le Tableau 3-2 comme suit (Guitouni, Bélanger, & Martel, 2010).

Tableau 3-2 : Résumées des procédures (Guitouni et al., 2010)

Propriétés	Procédures ELECTRE					
	I	IS	II	III	IV	Tri
Possibilité se tenir compte des seuils d'indifférence et/ou préférence	Non	Oui	Non	Oui	Oui	Oui
Nécessité de fixer des coefficients d'importance des critères	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Oui
Nombre et nature des relations de surclassement	1	1	2	1 floue	5	1 floue
Problématique décisionnelle	Choix (P,α)	Choix (P,α)	Rangement (P,γ)	Rangement (P,γ)	Rangement (P,γ)	Tri (P,β)
Résultat final	Noyau	Noyau avec indices de concordances et niveau de discordance	Préordre partiel	Préordre partiel	Préordre partiel	Affectation à des catégories ordonnées

- b.** PROMETHEE I, II, III, IV, V (Brans, Nadeau, & Landry, 1982) : créée en 1980 par Jean-Pierre Brans comme une alternative aux procédures de type ELECTRE.

Elle reprend certaines idées clés liées aux critères plus faciles à appréhender qu'Electre III notamment. Son principe est d'utiliser des comparaisons numériques pour déterminer les meilleures options parmi toutes les autres, en déterminant leurs avantages et leurs inconvénients, en calculant leurs positions relatives, ce qui établit un système de classifications ordonnées. Les différentes méthodes se caractérisent par (Ayadi, 2010) sont dans le Tableau 3-3 : Caractéristiques des différentes méthodes (Ayadi, 2010).

Tableau 3-3 : Caractéristiques des différentes méthodes (Ayadi, 2010)

Méthodes	Caractéristiques
PROMÉTHÉE I	Préordre partiel (préférence stricte, indifférence et incomparabilité)
PROMÉTHÉE II	Préordre complet (indifférence et préférence stricte)
PROMÉTHÉE III	Un ordre d'intervalle
PROMÉTHÉE IV	L'ensemble des solutions admissible est continuum
PROMÉTHÉE V	Choix multicritères avec contraintes de segmentation

c. D'autres méthodes sont incluses comme : Melchior créée par J. P. Leclerc en 1984, Qualifex conçu par J. Paolinck en 1976, Oreste développée par M. Reubens en 1979, etc.

Les méthodes de surclassement sont issues d'une analyse critique de l'approche traditionnelle de l'utilité multiattribut. Elles tentent d'établir un système de préférences basé sur les choix clairement établis du décideur. Contrairement aux théories utilitaristes, qui considèrent l'utilité de tous les résultats, la prise de décision comparative ne considère que des alternatives spécifiées. Cela se traduit par l'agrégation de leurs résultats, similaires aux procédures de vote pondérées (Bouyssou, Marchant, & Perny, 2005).

3.5.3 Agrégation locale

Elle vise à spécifier et à enrichir progressivement une structure de préférence globale et à sélectionner une ou plusieurs alternatives, en fonction d'une structure de préférence implicite connue plus ou moins bien. En d'autres termes, elle cherche en premier lieu une solution de départ puis procède à une exploration locale et itérative pour trouver une meilleure solution. De plus, ce sont les étapes de dialogue qui sont privilégiées dans ces méthodes. En effet, celles-ci permettent de souligner les préférences du décideur. Pour cela, des informations qualitatives (comparaison entre alternatives, critères à améliorer, etc.) ou quantitatives (niveaux minimaux de critères, taux de substitution, concessions, etc.) sont demandées (Roy & Bouyssou, 1993). Les plus connus sont :

a. Méthode des cônes d'amélioration (Geoffrion, Dyer, & Feinberg, 1972) : une méthode qui parcourt à chaque itération ce qu'on appelle un "cône d'amélioration", c'est-à-dire un ensemble

de vecteurs permettant, depuis un point V, de ne retenir que les points préférés à celui-ci. La procédure est ensuite réitérée jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'amélioration possible.

- b.** Goal Programming (Masud & Hwang, 1981) : cette technique permet la poursuite simultanée de plusieurs objectifs. Elle aboutit à une priorisation des écarts entre les objectifs et les réalisations. En effet, pour obtenir les meilleurs résultats possibles, il faut minimiser ces écarts en les priorisant par ordre d'importance. Ainsi, au lieu de s'accrocher à l'objectif optimal, il faut se concentrer sur la poursuite d'une approche pragmatique.
- c.** D'autres méthodes sont incluses comme : STEM de Benayoun et Tergny établi en 1969, Méthode ZIONT-WALLENIUS conçut par S. Zionts en 1974, Etc.

Par ailleurs, la stabilité des préférences déclarées est une notion importante pour ces méthodes. En effet, si certaines approches admettent la remise en question des préférences déclarées et acceptent même les contradictions, d'autres ne le font pas. En outre, l'arrêt d'un processus est toujours un élément délicat et relativement arbitraire (Roy & Bouyssou, 1993).

3.5.4 Synthèse des trois familles de méthodes

Le Tableau 3-4 (Thorel, 2014) liste les différents avantages et usages des trois différentes catégories des méthodes multicritères d'aide à la décision. Son étude peut aider un chercheur à identifier la meilleure option pour sa problématique :

Tableau 3-4 : Liste les différents avantages et usages des trois différentes catégories des méthodes multicritères d'aide à la décision (Thorel, 2014)

	Agrégation complète	Agrégation partielle	Agrégation locale
Taille des ensembles d'actions à comparer	Petite à très grande	Petite à modérée	Très grande à ∞
Compensation entre critères	Totalle	Partielle	-
Modulation des préférences	Paramètres intercritères (poids) et intracritères (seuils)		-
Prise en compte des incertitudes sur les valeurs des critères	Possible	Oui	-
Détection des conflits (incomparabilités)	Non	Oui	-
Niveau des interactions avec le décideur	Faible	Moyenne	Élevé
Complexité des calculs	Faible	Moyenne à importante	Souvent importante
Automatisation du processus	Oui	Oui	Au cas par cas

3.6 Choix de la méthode

En tenant compte des préférences du décideur, ces méthodes de décision se heurtent à la difficulté de trouver des moyens pour comparer avec précision toutes les solutions possibles les unes par rapport aux autres. Par ailleurs, la formalisation minutieuse de ces décisions est difficile vu que ce processus demande un temps considérable et beaucoup d'efforts.

Or, il est difficile d'ajouter de nouvelles données à ces approches, compte tenu de leur aspect statique. En plus, la nature peu précise de leurs calculs rend ces modèles difficiles à comprendre et à utiliser par les décideurs.

Toutefois, le bon choix d'une méthode repose selon (Guitouni, Martel, & Vincke, 1999; Lehoux & Vallée, 2004) sur :

- La nature des données et informations disponibles devant être traitées par cette méthode;
- Les choix du décideur;
- Les paramètres de chaque critère;

- La problématique décisionnelle;
- La logique « compensatoire » de la méthode;
- Les hypothèses avancées;
- Le système ou algorithme (calcul) qui accompagne la méthode.
-

Dans le cas de l'Analytic Hierarchy Process (AHP), plusieurs éléments en font un choix judicieux pour cette étude. Tout d'abord, L'AHP est particulièrement adapté pour structurer et gérer les décisions complexes impliquant une hiérarchie de critères et de sous-critères, ce qui permet de décomposer le problème en éléments plus gérables.

De plus, l'intégration des opinions et évaluations subjectives des experts est une caractéristique favorable de l'AHP, ce qui en fait un choix approprié lorsque les préférences et jugements qualitatifs ont un rôle crucial dans le processus de décision.

L'AHP offre également un cadre systématique pour comparer et hiérarchiser plusieurs alternatives en fonction de multiples critères, permettant ainsi aux décideurs d'évaluer méthodiquement les avantages et inconvénients de chaque option.

Par rapport à certaines autres méthodes telles que WSM ou WPM, l'AHP offre une meilleure sensibilité aux pondérations des critères en permettant aux décideurs de comparer directement l'importance relative des critères.

De plus, sa relative simplicité d'application et de communication en fait un outil attrayant, favorisant sa compréhension et son adoption dans le processus décisionnel, ce qui répond également à la volonté d'Hydro-Québec d'utiliser l'AHP pour cette étude.

3.7 L'incertitude dans la MCDM

Il existe trois types différents d'incertitude à considérer dans les problèmes d'aide à la décision multicritères (Taillandier, Sbartaï, & Breysse, 2013). Seuls ou combinés, ils peuvent avoir un impact considérable sur le résultat recherché (classement, tri, choix, etc.). Ces incertitudes sont (Zanakis, Solomon, Wishart, & Dublish, 1998) :

- a) Incertitude des données : toute donnée collectée peut s'avérer inexacte;

- b) Incertitude des paramètres : quelle que soit la méthode utilisée, les paramètres de choix (seuils, pondérations) sont soumis à des ajustements et leur définition peut se révéler difficile;
- c) Incertitude sur la méthode : différentes méthodes employant les mêmes paramètres et se servant des mêmes données sont susceptibles de fournir des résultats différents.

Pour cette raison, il est recommandé d'en tenir compte lors de l'utilisation des méthodes multicritères, et d'effectuer une analyse de sensibilité. Cette analyse aide le processus à devenir plus fiable en déterminant la robustesse des résultats obtenus.

3.8 L'analyse hiérarchique du processus (AHP)

L'acronyme AHP fait référence à la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process). Selon (Saaty et al., 1984), celle-ci se caractérise par le mot "priorités". En effet, l'AHP permet à toute personne confrontée à des problèmes décisionnels de trier et de hiérarchiser ses solutions potentielles. Pour se faire, il convient d'appliquer l'expérience professionnelle et le jugement de l'utilisateur à un problème donné ou à une situation complexe. Cette méthode peut être appliquée dans n'importe quel domaine, notamment dans le secteur privé ou public. Aussi, elle peut être utilisée par toute personne travaillant sur plusieurs projets à la fois ou essayant de résoudre ses propres problèmes décisionnels. Parallèlement, l'AHP permet de tester la cohérence des préférences d'une personne pour un certain résultat. Ce qui est utile pour les personnes compétentes dans leur domaine de prédilection, du fait qu'elles doivent décider de la meilleure façon d'atteindre leurs objectifs. Certaines décisions à court terme peuvent même être facilitées par ce processus (Saaty et al., 1984).

3.8.1 Aperçu historique

En 1970, Saaty a été le premier à proposer la méthode Analytic Hierarchy Process (AHP) pour traiter les problèmes complexes de décision multicritères. Celle-ci est particulièrement bien adaptée aux problèmes où les critères d'évaluation peuvent être organisés hiérarchiquement en sous-critères. Au cours des dernières décennies, la méthode est devenue très populaire parmi les spécialistes des opérations et de la décision, notamment aux États-Unis (Doumpos & Zopounidis, 2002).

Néanmoins, elle a été fortement critiquée en raison de défauts théoriques majeurs dans son fonctionnement. En effet, le problème de « l'inversion de rang » est au cœur de ces critiques. Ce dernier a été identifié pour la première fois par (Belton & Gear, 1983), qui ont constaté que lorsqu'une nouvelle alternative est ajoutée à un ensemble existant d'alternatives « A » de telle sorte qu'elle est identique à une alternative existante, les classements du nouvel ensemble sont incompatibles ou incohérents avec les classements du premier ensemble (ce qui n'est pas le cas de cette étude). En outre, plusieurs chercheurs ont proposé des méthodes pour traiter ce problème, comme utiliser des versions alternatives de l'AHP, telles que l'AHP multiplicatif (MAHP), ou inclure tous les critères et alternatives dès le début afin d'éviter de supprimer ou d'ajouter plus tard (Ramanathan, 2004).

Selon une étude de (Khan & Ali, 2020), la littérature a fait état d'un certain nombre d'applications de la méthode AHP sur une variété de problèmes de décision dans de nombreux domaines différents. Par exemple : une des recherches a ciblé le domaine de l'application des parcs éoliens (Zohoori, Vahedi, Meo, & Sorrentino, 2016), une autre a mis en évidence le problème des décharges à travers l'utilisation des applications AHP et SIG, ce qui prouve l'adaptabilité de l'AHP lorsqu'il est utilisé avec d'autres méthodes (Chabuk, Al-Ansari, Hussain, Knutsson, & Pusch, 2017).

De même, des applications de l'AHP peuvent être trouvées dans le secteur de la construction (Darko et al., 2019), dans la 3D technologie (Di Angelo, Di Stefano, Fratocchi, & Marzola, 2018) ou dans les domaines de maintenance de la production (Shinde & Prasad, 2018). De plus, l'AHP a été utilisée pour le choix de l'emplacement des lignes de transmission efficaces dans les zones urbaines (Al Garni & Awasthi, 2017), la gestion des actifs dans des entreprises de production et de transport d'énergie (Biard & Abdul-Nour, 2020) et en gestion municipale (Wu & Abdul-Nour, 2020).

L'AHP a également été utilisée pour l'amélioration des recommandations de projets dans une entreprise de production d'électricité (Ezzabadi, Saryazdi, & Mostafaeipour, 2015). En somme, l'AHP ne se limite pas aux applications technologiques. Par exemple, dans une étude, l'AHP a été utilisé pour la sélection d'emplacements de magasins en Turquie (Koç & Burhan, 2015).

Cela donne une vision claire des nombreux et différents domaines qui ont été touchés par les applications AHP au cours des deux dernières décennies.

3.8.2 Principe de l'AHP

L'AHP est une méthode d'aide à la décision qui prend en compte plusieurs critères dans le but de choisir la meilleure option possible. Si la décision est optimale, précise et systématique, elle répond aux exigences de l'approche. Elle détermine quelles solutions correspondent à certains critères en comparant deux options et leurs caractéristiques.

Elle peut également aider les décideurs à déterminer la stabilité de la solution en identifiant les incohérences dans les évaluations et préférences des participants, lesquels donnent des conclusions fausses et inauthentiques (Wang, Yue, Gao, & Chen, 2018).

Pour prévoir l'avenir et éviter les risques et les incertitudes, l'AHP suffit à lui seul à remplacer divers systèmes. En résumé, il repose sur les trois principes fondamentaux suivants (Saaty et al., 1984) :

- La représentation hiérarchique et la décomposition, qui consiste à décomposer un problème en ses éléments constitutifs;
- La hiérarchisation et la synthèse (structuration des priorités), qui consiste à classer les éléments en fonction de leur importance relative;
- La cohérence logique, qui consiste à regrouper les éléments de manière logique et à les classer de manière cohérente selon des critères logiques, en suivant une échelle de mesure qui permet d'évaluer les propriétés immatérielles.

En somme, elle est flexible et permet de prendre des décisions de manière logique, en tenant compte des opinions et des valeurs individuelles.

3.8.3 La démarche AHP

L'AHP suit une démarche précise et structurée de sa première étape à sa dernière. Elle utilise un processus en quatre étapes pour modéliser un problème de décision.

- Étape 1 : Structuration du problème de manière hiérarchique :

Elle commence en décomposant les éléments d'un problème en une structure hiérarchique comme schématisée dans la Figure 3-3 :

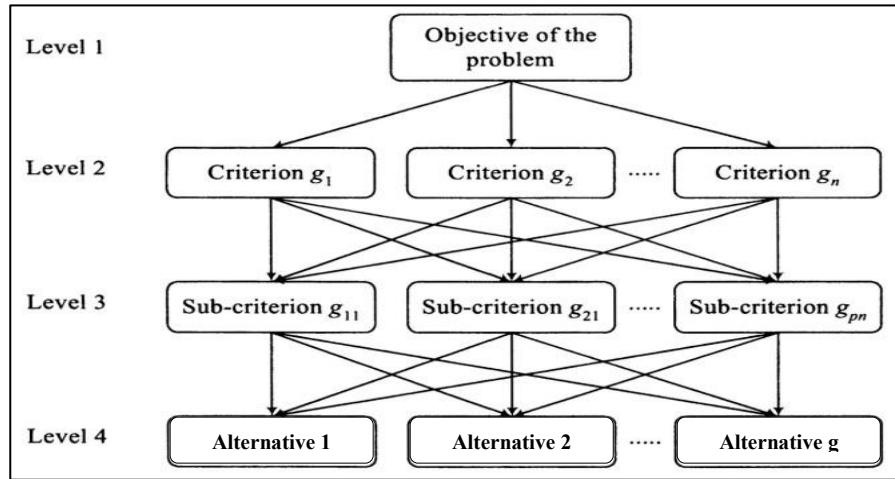


Figure 3-3 : Structure hiérarchique de l'AHP (Doumpos & Zopounidis, 2002)

Dû au problème de « l'inversion de rang », le choix des critères à cette étape est très important étant donné qu'elle est difficilement rectifiable une fois la démarche commencée.

En effet, l'inversion de rang est un phénomène qui peut se produire dans l'Analytic Hierarchy Process (AHP) lorsqu'il y a une discordance entre les préférences exprimées par les comparaisons deux à deux des critères ou des alternatives. Par exemple, si lors des comparaisons deux à deux, un décideur classe l'option A au-dessus de B et B au-dessus de C, mais classe simultanément C au-dessus de A, cela crée une incohérence dans les préférences exprimées et peut entraîner des résultats non fiables ou contradictoires dans la hiérarchisation des options.

- Étape 2 : saisie des données (critères et alternatives) :

Dans le but de donner un poids pour chaque critère, et établir les différences entre les critères d'un niveau inférieur (level 3) et supérieur (level 2) en utilisant des comparaisons binaires sur l'échelle de Saaty (Tableau 3-5 (Guesdon, 2011)), un questionnaire a été réalisé suivant la méthode Delphi. L'importance de cette étape réside dans la participation des experts dans le domaine d'étude et la cohérence de leurs réponses.

Tableau 3-5 : L'échelle de Saaty (Guesdon, 2011)

Degrés d'importance	Définitions	Explications
1	Importance égale des deux éléments ou critères	Deux éléments contribuent autant à la propriété
3	Un élément est un peu plus important que l'autre	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent légèrement un élément par rapport à un autre
5	Un élément est plus important que l'autre	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent fortement un élément par rapport à un autre
7	Un élément est beaucoup plus important que l'autre	Un élément est fortement favorisé et sa dominance est attestée dans la pratique
9	Un élément est absolument plus important que l'autre	Les preuves favorisant un élément par rapport à un autre sont aussi convaincantes que possible
Degrés de 2, 4, 6 et 8 sont utilisés pour exprimer les valeurs intermédiaires		

- Étape 3 : Estimation des poids relatifs des critères de classement :

L'estimation se fait par une combinaison par paire de la matrice nxn W_k où n désigne le nombre d'éléments du niveau k, puis en calculant les vecteurs propres correspondants aux valeurs propres maximales des matrices de comparaisons (Figure 3-4).

$$W_k = \begin{bmatrix} w_{k1} / w_{k1} & w_{k1} / w_{k2} & \dots & w_{k1} / w_{kn} \\ w_{k2} / w_{k1} & w_{k2} / w_{k2} & \dots & w_{k2} / w_{kn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{kn} / w_{k1} & w_{kn} / w_{k2} & \dots & w_{kn} / w_{kn} \end{bmatrix}$$

Figure 3-4 : Matrice de combinaison par paire (Doumpos & Zopounidis, 2002)

Où : $W_k = [W_{k1}, W_{k2}, \dots, W_{kn}]$ désigne les poids réels attribués à chaque élément inclus au niveau k de la hiérarchie par opposition à un élément spécifique du niveau k-1.

- Étape 4 : Combinaison des poids relatifs pour effectuer une évaluation globale des alternatives (agrégation des critères) :

Cette étape détermine, par la matrice de comparaison de l'étape précédente, les priorités des critères et évalue la cohérence et l'interdépendance de ces jugements.

De ces dernières, l'indice de cohérence IC est d'abord calculé :

Équation 1 : Indice de cohérence

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

Où : λ_{max} est la valeur propre maximale correspondant à la matrice des comparaisons par paires et n est le nombre d'éléments comparés.

Puis le ratio de cohérence (RC) définit par :

Équation 2 : Ratio de cohérence

$RC = 100 \frac{IC}{RI}$ Où RI est l'indice de cohérence moyen obtenu en générant aléatoirement des matrices de jugement de même taille (voir Tableau 3-6) (Innocent Ndoh Mbue, 2017).

Tableau 3-6 : L'indice de cohérence moyen

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Il est admis que la compilation des priorités, pour les actions et les critères définis, doit être cohérente. Pour évaluer cette cohérence globale, le AHP utilise un ratio de cohérence. Afin que ce dernier soit consistant, les scores doivent être inférieurs à 10 %. Tout ratio supérieur à cette valeur peut conduire à des résultats incohérents nécessitant des ajustements supplémentaires (Saaty et al., 1984).

Au finale, la performance relative de chacune des alternatives est établie suivant la formule :

Équation 3 : performance relative de chacune des alternatives

$$P_k(w_i^k) = \sum_{i=1}^{n_{k-1}} P_{k-1}(w_i^{k-1}) P_k \left(\frac{w_i^k}{w_i^{k-1}} \right), \text{ avec } \sum_{i=1}^{n_k} P_k(w_i^k) = 1$$

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

On peut résumer cette démarche dans le schéma de la Figure 3-5 ci-dessous :

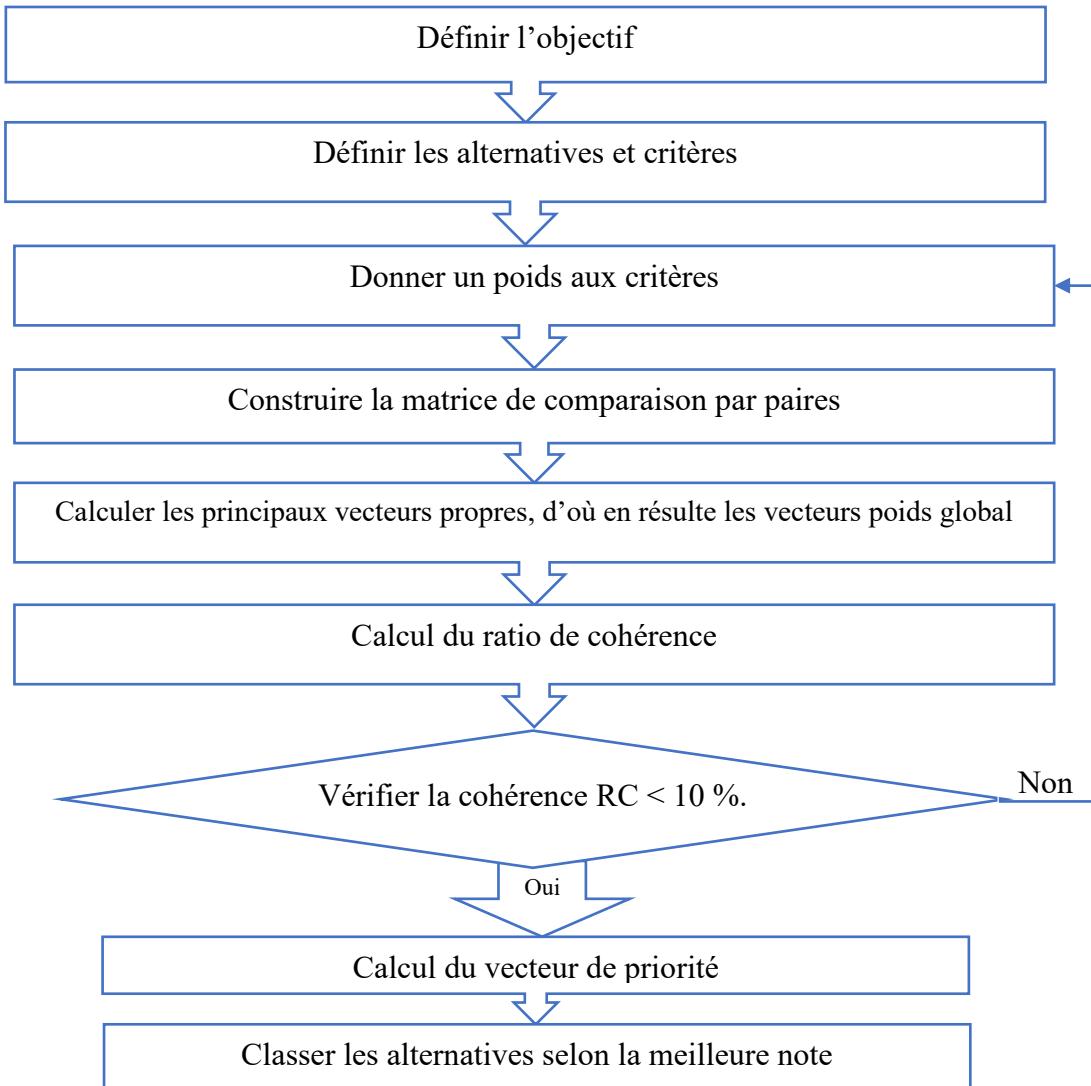


Figure 3-5 : *Démarche AHP*

En somme, l'AHP est un outil utile pour intégrer la planification d'une manière qui tient compte de la contribution de toutes les parties prenantes. En analysant et en interprétant les points de vue de ces derniers, elle peut être utilisée pour atteindre dynamiquement un ensemble d'objectifs. En outre, elle peut être utilisée de manière proactive pour aider à planifier et à suivre les progrès vers la réalisation d'un ensemble d'objectifs. Cette approche est un cadre pour la prise de décision flexible et qui prend en compte les préférences et opinions de toutes les personnes impliquées (Saaty et al., 1984).

3.8.4 AHP software

Une large gamme de logiciels commerciaux est disponible avec différentes fonctionnalités interactives et des outils d'analyse de sensibilité dans le cadre de la méthodologie AHP, le choix pour cette recherche se porte sur le logiciel AHP Online System - AHP-OS, développé par Klaus D. Goepel, BPMSG : <https://bpmsg.com/ahp/>, qui est un outil d'aide au processus de décision en ligne gratuit doté de caractéristiques remarquables pour l'analyse détaillée des problèmes de décision. Il fournit un outil complet pour l'enseignement et la recherche, avec des calculs et des algorithmes bien documentés, et l'exportation en format ouvert des données d'entrée et des résultats pour un traitement ou une présentation ultérieurs (Goepel, 2018).

3.8.5 Avantages et inconvénients

- Avantages

L'AHP est parmi les méthodes les plus utilisées dans la catégorie des agrégations complètes. Grâce au plusieurs avantages (Figure 3-6) offerts par celle-ci dans les principaux sont :

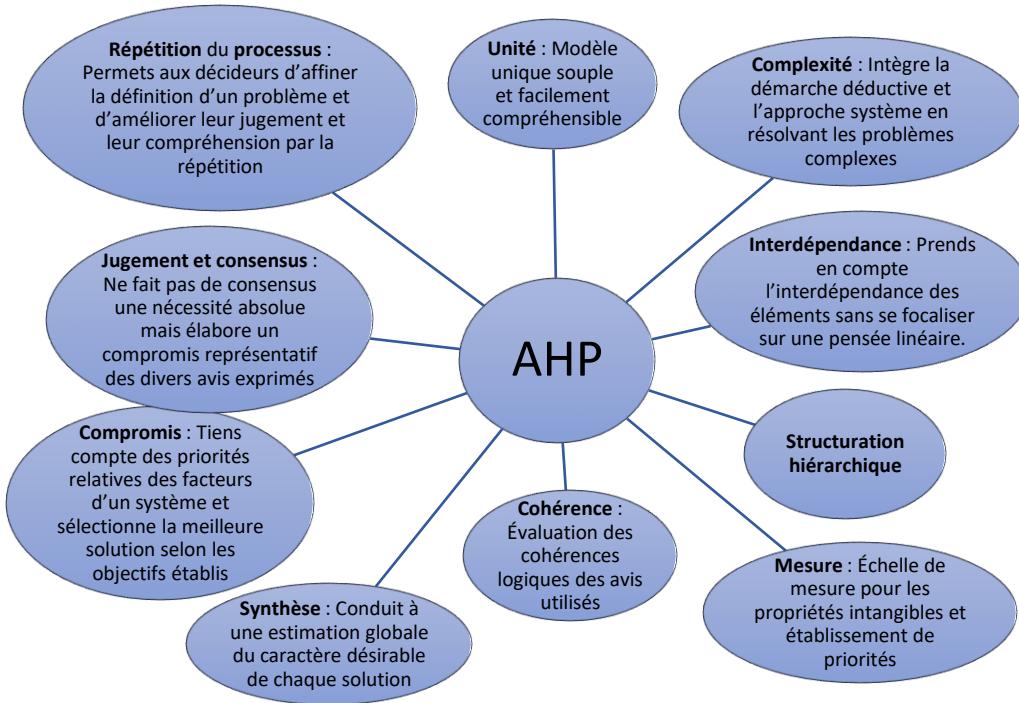


Figure 3-6 : Avantages de l'AHP (Saaty et al., 1984)

- Inconvénients

Néanmoins, la méthode AHP fait l'objet de nombreuses critiques. Les matrices de comparaisons par paires s'avèrent lourdes lorsque les problèmes en jeu deviennent importants. Par ailleurs, après avoir changé les alternatives ou critères d'un groupe, des problèmes d'inversion des rangs apparaissent (Belton & Gear, 1983). L'échelle de base (9 points) constitue également un inconvénient mineur. En effet, au moment de comparer deux critères ou alternatives, le décideur doit déterminer la force de la préférence entre les deux. Dans le cas où il est nécessaire de différencier suffisamment les éléments individuels, une échelle donnée peut ne pas être suffisante pour un grand nombre de critères ou d'alternatives. Ce défaut est suivi d'une autre faiblesse en termes de cohérence, un problème relativement courant lors de l'utilisation de l'AHP. En ce sens, la cohérence totale de la matrice ne peut être atteinte si l'échelle à neuf points est insuffisante (Siekelova, Podhorska, & Impola, 2021).

3.9 Méthode Delphi

L'AHP fait partie des méthodes dites interactives. Autrement dit, selon les besoins de la situation, elle peut être combinée avec d'autres outils de collecte et d'analyse de données (Chabuk et al., 2017). Dans cette recherche, les combinaisons suivantes sont utilisées :

- Questionnaire Delphi :

Il est généralement utilisé avec l'AHP pour établir un poids aux critères retenus.

- Analyse de sensibilité :

L'analyse de sensibilité dans l'AHP est un outil essentiel pour évaluer la fiabilité des décisions et comprendre comment les variations des paramètres clés peuvent affecter les résultats, permettant ainsi de prendre des décisions plus robustes

3.9.1 Principe de la méthode Delphi

Dans le contexte de cette recherche, une définition de Linstone et Turoff (1975) peut être utilisée, c'est-à-dire la technique Delphi est : « une méthode permettant de structurer un processus de communication de groupe de manière à ce que ce processus permette à un groupe d'individus, dans son ensemble, de traiter un problème complexe » (Linstone & Turoff, 1975). Le principal objectif de la méthode Delphi est de rassembler le maximum de consensus sur les points de vue d'un groupe d'experts, par le biais d'une série de questionnaires exhaustifs doublée d'un retour d'opinion contrôlé (Dalkey & Helmer, 1963).

3.9.2 Étapes de la méthode Delphi

Faute de définition pratique définitive, de nombreux chercheurs doivent ajuster et modifier l'approche de travail qu'ils utilisent pour créer leur propre questionnaire. Toutefois quatre aspects de ses caractéristiques restent invariables : l'anonymat, l'itération, la rétroaction contrôlée et la réponse statistique en groupe (Heiko, 2012). La démarche de la méthode peut donc être listée comme suit (Florian Elmer, 2010) :

- 1) Définir les objectifs et les questions à aborder et désigner également un animateur pour guider le processus et assurer la cohérence de l'ensemble. Il est également nécessaire de constituer un groupe de participants représentatifs et qualifiés pour traiter le sujet;

- 2) Participation d'experts : Essentiellement, l'approche de la méthode Delphi repose sur la collecte d'informations et le développement de solutions grâce à la coopération entre experts. En effet, cette méthode fonctionne mieux lorsque toutes les parties impliquées sont conscientes des étapes à suivre pour que des solutions se produisent;
- 3) Anonymat des réponses individuelles : les participants peuvent anonymement partager leurs opinions et leurs idées sans craindre d'être affectés par les opinions d'autres participants. Cela est particulièrement important, car il est plus facile pour les participants d'être honnêtes et ouverts lorsqu'ils n'ont pas à se soucier de la réaction des autres;
- 4) Agrégation statistique des réponses individuelles en une réponse de groupe : c'est la plus importante et consiste à incorporer les commentaires des participants pour modifier et améliorer la démarche;
- 5) Retour d'information : un médiateur peut alors réutiliser les informations nécessaires pour créer une nouvelle version de la démarche, en intégrant les commentaires et les suggestions des participants;
- 6) Itération (au moins deux tours) de ces questionnaires : Le processus est répété jusqu'à ce que le consensus soit atteint sur le sujet et que des conclusions claires puissent être tirées. Une fois le consensus atteint, le résultat de la méthode Delphi est traduit en un plan d'action pour poursuivre le développement ou résoudre le problème initial. Ce plan est ensuite mis en œuvre par les différentes parties impliquées.

Les résultats obtenus à l'aide de la méthode Delphi peuvent varier selon l'expertise, le nombre de participants et le type de questions posées. Une bonne pratique est de s'assurer que tous les participants disposent du même niveau de connaissance et d'opinion sur le sujet afin d'obtenir les meilleurs résultats.

Le schéma suivant, Figure 3-7 : démarche de la méthode DELPHI (Habibi, Sarafrazi, & Izadyar, 2014), parcourt le trajet de la méthode.

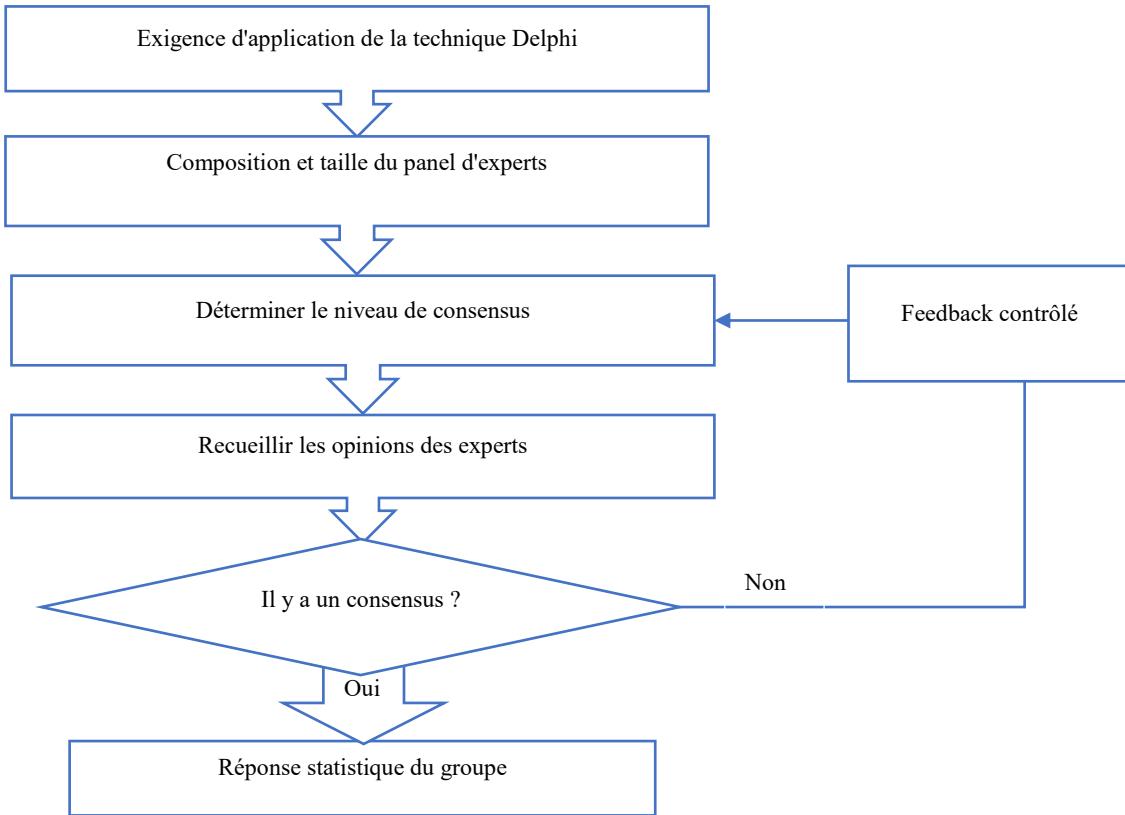


Figure 3-7 : démarche de la méthode DELPHI (Habibi, Sarafrazi, & Izadyar, 2014)

3.10 Conclusion

Le choix de la méthode appropriée pour chaque problème n'est pas facile, car certaines méthodes peuvent comporter des pièges cachés (par exemple, la somme pondérée) ou être difficiles à comprendre pour un novice en analyse multicritère (par exemple, le MAUT).

Par conséquent, il est recommandé de faire appel à un expert en analyse multicritère ou d'utiliser un logiciel spécialisé qui peut fournir un soutien précieux et simplifier le processus de prise de décision. Dans ce contexte, l'utilisation de logiciels d'analyses multicritères est préférable, car la plupart d'entre eux sont conviviaux et ne nécessitent pas d'adaptation particulière. Parmi ces méthodes, l'AHP (Analytic Hierarchy Process) est une option polyvalente et performante, largement utilisée et adaptée à la plupart des objectifs impliquant un nombre limité de critères. De plus, son logiciel est simple à utiliser.

D'autre part, la méthode Delphi est souvent utilisée pour réduire les divergences d'opinions et parvenir à un consensus parmi les participants. Chaque participant peut proposer ses idées et arguments, qui sont ensuite discutés en groupe. Les participants peuvent modifier leurs points de vue, ajouter de nouvelles informations ou des contre-arguments, et apporter des ajustements aux hypothèses initiales. Les résultats convergent alors vers un consensus qui reflète le meilleur jugement des experts.

CHAPITRE 4 IDENTIFICATION DES CRITÈRES DE DÉCISION

4.1 Introduction

Ce travail consiste à identifier les critères de la méthode multicritère AHP en passant tout d'abord par la définition de l'objectif de l'approche. Puis, lister les plans d'adaptation (alternatives) proposés par Hydro-Québec pour enfin déterminer lequel devra être utilisé.

4.2 Définir l'objectif de l'AHP

Étant donné l'interrelation entre les 3 risques : pannes & bris, végétations, poteaux, les critères et mesures d'adaptation (ou les sous-systèmes) de ces derniers sont communs. Par conséquent, l'objectif de l'AHP devient : Mesure d'adaptation contre les changements climatiques pour les poteaux électriques, pannes & bris, végétations.

4.3 Définir les sous-systèmes/ alternatives

Dans le cadre de cet objectif, les sous-systèmes sont définis comme les mesures d'adaptation sélectionnées parmi les propositions soulignées en vert et jaune (voir ANNEXE B : Exemple fiche de risque poteaux (Hydro-Québec Distribution, 2021)) par les spécialistes et experts du département HQ.

Ces mesures sont spécifiquement conçues pour faire face aux risques associés aux pannes, aux végétations et aux poteaux, comme décrit dans les fiches de risques correspondantes (voir ANNEXE B : Exemple fiche de risque poteaux (Hydro-Québec Distribution, 2021)) :

- A1 - Poteau en composite;
- A2 - Enfouissement des lignes;
- A3 - Enfouissement allégé des lignes;
- A4 - Inspection et retraitement plus fréquent des poteaux de bois.

4.4 Choix des critères

Le processus de sélection des critères pour évaluer ces sous-systèmes est déterminé de trois manières distinctes :

1. Les critères émanant de la matrice de risque, dont le détail se trouve dans l'ANNEXE C :

Grille d'évaluation de risques (Hydro-Québec Distribution, 2021), qui englobe :

- Les exigences et les attentes des clients;
- Les considérations liées à la santé et à la sécurité;
- Les préoccupations environnementales;
- L'impact sur la réputation de l'entreprise;
- Les implications financières.

2. Les fiches de risque (voir ANNEXE B : Exemple fiche de risque poteaux) apportent des critères supplémentaires qui sont déduits des informations contenues dans ces documents.

Ces critères comprennent :

- Incertitude due au niveau de confiance des aléas;
- Incertitude due au manque d'information sur les solutions proposées;
- Les ressources disponibles pour mettre en œuvre les sous-systèmes.

3. Les critères pertinents et/ou récurrents dans la revue de littérature suivant une démarche précise, Figure 4-1 :

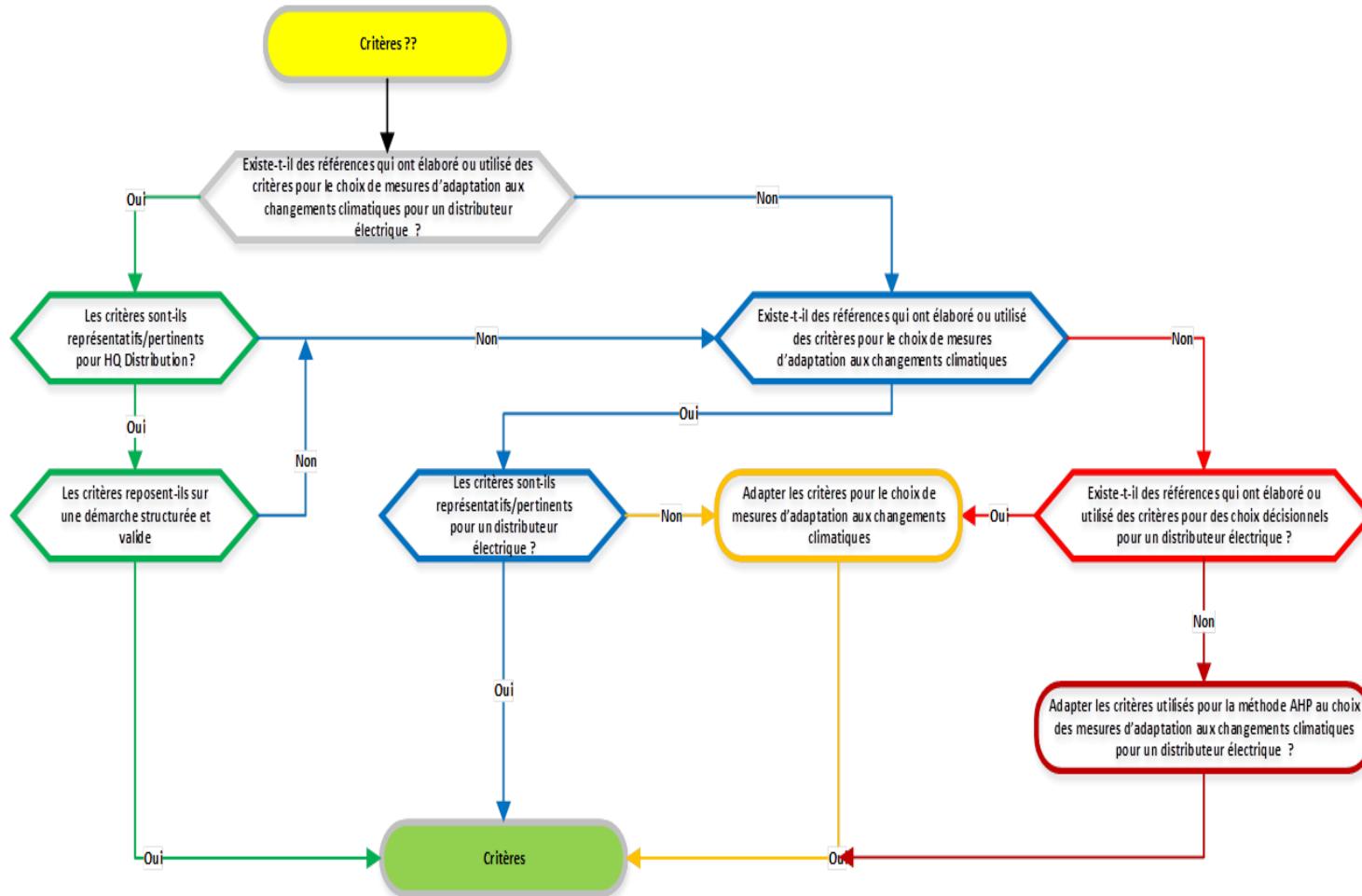


Figure 4-1 : Démarche de la sélection des critères dans la revue de littérature (Hydro-Québec Distribution, 2021)

En résumé, cette approche détaillée de la sélection des critères assure une évaluation complète et nuancée des options disponibles pour minimiser les risques et optimiser les performances du système.

4.5 Revue de littérature pour la sélection des critères

Il est possible de trouver un grand nombre d'articles de recherche qui utilisent la méthode AHP pour l'analyse dans diverses revues de la littérature (Khan & Ali, 2020). Pour cette étude, 28 articles ont été sélectionnés initialement afin d'identifier les critères liés à la méthode AHP qui pourraient orienter le choix d'un plan d'adaptation au changement climatique. Ensuite, toutes les recherches pertinentes sur ce sujet ont été examinées de manière exhaustive afin d'énumérer les critères d'évaluation de chaque article. Dans ce contexte, les références abordent divers sujets clés liés à l'évaluation des risques liés aux changements climatiques.

En effet, ces sujets comprennent l'évaluation des risques spécifiques liés au climat, tels que les tempêtes, les inondations, les vagues de chaleur et les sécheresses, qui peuvent compromettre la fiabilité et la résilience du réseau électrique (Biloslavo & Dolinsek, 2008; Chen, Wang, Wang, He, & Wang, 2014; González, Rodríguez, Fernández, Blanco, & Oxilia, 2019; Salmanpour, Noorali, Gholizadeh, Ghadikolaei, & Mehr, 2021).

De plus, l'impact des changements climatiques sur les infrastructures existantes, notamment les lignes de transmission, les sous-stations, les transformateurs et les poteaux électriques (Kayal, Khan, & Chanda, 2014; Neto et al., 2010; Özcan, Ünlüsoy, & Eren, 2017; Zohoori et al., 2016), est évalué pour déterminer leur vulnérabilité aux conditions météorologiques extrêmes (Bailey, 2006; Husain, Sulaiman, Hashim, & Samad, 2012; Sahin, Bertone, & Baker, 2015; Zhang, Guo, Wang, Liu, & Huang, 2019; Zhiling, Liqun, Dapeng, Ping, & Yang, 2006).

En outre, des stratégies pour améliorer la résilience du réseau électrique aux événements météorologiques extrêmes (Inès & Ammar, 2020; S. K. Lee, Mogi, Koike, Hui, & Kim, 2009; Samad, Sahriman, Anggong, Ruslan, & Adnan, 2016; Zhiling et al., 2006), telles que la maintenance préventive, la planification d'urgence et les mesures d'atténuation des risques, sont examinées (Alshehri, Rezgui, & Li, 2015; Samal & Kansal, 2015).

Par ailleurs, l'évaluation de mesures visant à réduire l'impact environnemental du réseau de distribution électrique, telles que la promotion des énergies renouvelables, l'efficacité énergétique

et la réduction des émissions de gaz à effet de serre, est envisagée (Achilean, Badea, Giurca, Naghiu, & Iloaie, 2017; Kayal et al., 2014).

D'un autre côté, les coûts liés à la mise en œuvre des mesures d'adaptation au changement climatique, tels que l'investissement, l'entretien, l'exploitation et les coûts potentiels des dommages causés par les phénomènes météorologiques extrêmes sont également évalués (Alshehri et al., 2015; Biloslavo & Dolinsek, 2008; Neto et al., 2010; Özcan et al., 2017; Sahin et al., 2015).

De même, les parties prenantes, telles que les clients, les communautés locales et les autorités de régulation (Aalianvari, Katibeh, & Sharifzadeh, 2012; Calabrese, Costa, Levialdi, & Menichini, 2019; Salmanpour et al., 2021; Yu, Ma, Wang, Zhai, & Du, 2017), sont consultées pour garantir l'acceptabilité sociale des mesures d'adaptation proposées (Achilean et al., 2017; Bailey, 2006; Chien, Wang, Nguyen, Nguyen, & Chau, 2020; González et al., 2019; Hosseini & Bahmani, 2011).

Enfin, les contraintes techniques, telles que la durée de vie des installations du réseau électrique existant et la fiabilité des installations sont également prises en compte (Husain et al., 2012; Išlić, Marušić, & Havelka, 2017; Yu et al., 2017; Zhang et al., 2019).

En somme, les études recensées témoignent de la souplesse et de la pertinence de différents cadres et méthodologies, y compris la méthode AHP, dans le processus de prise de décision dans des domaines variés. Elles soulignent également l'importance de prendre en compte les enjeux de durabilité et autres défis liés aux systèmes énergétiques pour favoriser un avenir viable.

Par conséquent, une synthèse des principaux éléments sous forme de matrice (voir ANNEXE D : Matrice de revue de littérature des 28 articles) peut être conçue afin de pouvoir établir la liste des critères dans la partie qui suit.

4.6 Fréquence de citation des critères les plus critiques de la revue

La fréquence des critères sélectionnés de la revue de littérature (Tableau 4-1) et qui sont adaptés au projet de recherche est donc :

Tableau 4-1 : La fréquence des critères sélectionnés de la revue de littérature

CRITÈRES ET SOUS CRITÈRES CRITIQUES	NOMBRE	FRÉQUENCE
TECHNIQUE :	17	60,71 %
• Accessibilité aux installations et infrastructures critiques (C1)	6	21,42 %
• Faisabilité et facilité de réalisation (C2)	4	14,28 %
• Durée de vie des installations (C3)	4	14,28 %
• Fiabilité des installations (C4)	5	17,85 %
• Taux de défaillance (C5)	9	32,14 %
• Fréquence de défaillance (C6)	4	14,28 %
ENVIRONNEMENTALES :	19	67,85 %
• Protection et santé de l'écosystème (C7)	8	28,57 %
• Résistance aux conditions météorologiques critiques (C8)	8	28,57 %
• Paramètre du sol/terrain (C9)	8	28,57%
• Impact visuel et sonore (C10)	4	14,28%
• Réduction des émissions (C11)	4	14,28%
SANTÉ ET SÉCURITÉ :	8	28,57 %
• Santé humaine (C12)	5	17,85 %
• Ressources humaines et matérielles (C13)	8	28,57 %
• Perception et gravité des risques (C14)	5	17,85%
GOUVERNANCE ET PLANIFICATION :	8	28,57%
• Développement et innovation (C15)	8	28,57 %
• Image de l'entreprise (C16)	5	17,85%
• Intégration aux politiques de développement d'HQD (C17)	5	17,85 %
• Facteurs réglementaires (C18)	4	14,28 %
INFORMATION ET COMMUNICATION :	9	32,14 %
• Transparence et partage d'information (C21)	5	17,85 %
• Service à la clientèle (C22)	6	21,42 %
• Cadre de collaboration, coordination internationale et synergie avec d'autres projets (C23)	9	32,14 %

Tableau 4-1 : La fréquence des critères sélectionnés de la revue de littérature (suite)

CRITÈRES ET SOUS CRITÈRES CRITIQUES	NOMBRE	FRÉQUENCE
SOCIAL :	15	53,57 %
• Zone de contournement (résidentielle et service public aériens ou souterrains existants) (C24)	6	21,42 %
• Zone de contournement (historique, archéologique, environnementale et biologiquement sensible) (C25)	5	17,85 %
• Disponibilité, restrictions ou limitation de l'utilisation des droits de passage publics (respect de la vie privée autorisé et légal) (C26)	5	17,85 %
• Sensibilisation, formation et implication des parties prenantes (C27)	5	17,85 %
ÉCONOMIQUE :	16	57,14 %
• Coût projet/ investissement (C28)	10	35,71 %
• Coût exploitation/ entretien (C29)	9	32,14 %
• Rentabilité (C30)	5	17,85 %
• Temps d'arrêt/ d'indisponibilité (C31)	7	25 %
• Condition et état des équipements / installations (C32)	5	17,85 %

4.7 Le cadre conceptuel de la recherche

Les critères trouvés dans les articles de la revue, sont assemblés dans le diagramme d'Ishikawa (Figure 4-2), puis selon la fréquence de citation dans les articles, leur adaptation au projet de recherche les plus pertinents sont alors retenus puis fusionner avec ceux établis par HQD dans leur matrice et fiches de risque, afin d'obtenir la liste des critères à valider par le panel d'experts sélectionné par HQD dans le questionnaire 1.

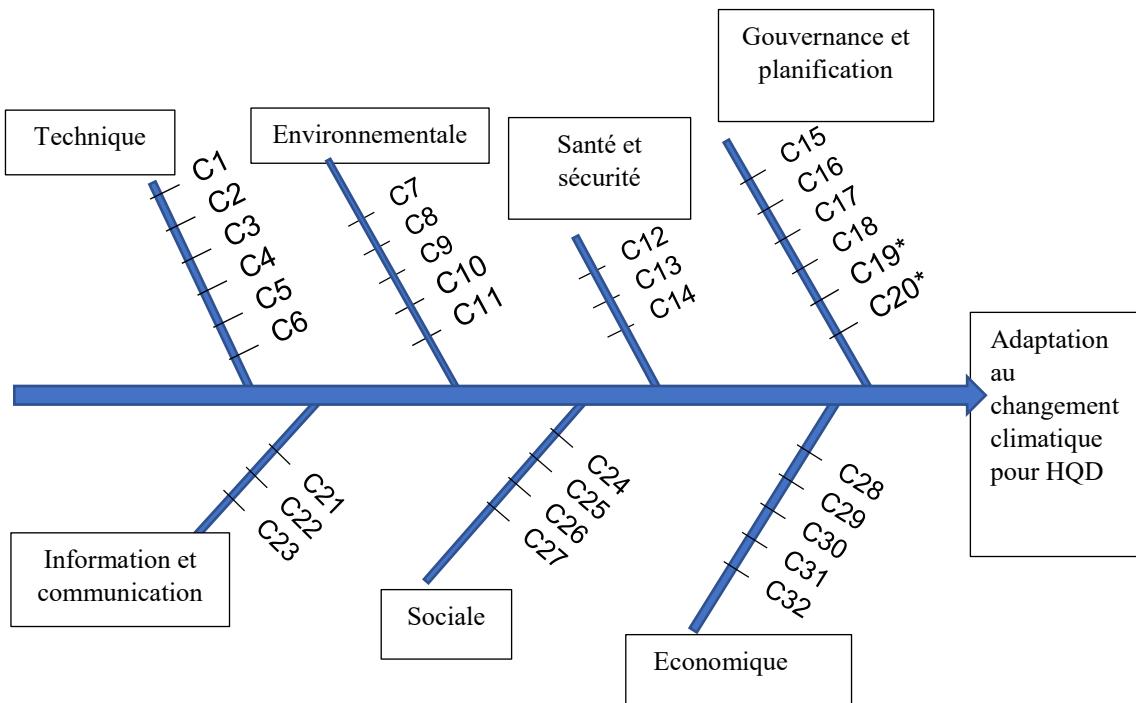


Figure 4-2 : diagramme ISHIKAWA des critères sélectionnés

Avec : * C19 : Incertitude due aux données manquantes sur les solutions proposées

*C20 : Incertitude due au niveau de confiance des aléas climatiques

4.8 Justification du choix des critères

À la suite de la détermination de nos critères, les justifications suivant leurs sélections sont ensuite détaillées dans le Tableau 4-2 ci-dessous :

Tableau 4-2 : Les justifications du choix des critères

Critères	Sous-critères	Justification
Technique	1. Accessibilité aux installations et infrastructures critiques (C1)	Le plan d'adaptation devra tenir compte de l'accessibilité des installations pour faciliter son implantation
	2. Faisabilité et facilité de réalisation (C2)	Tout plan difficile à réaliser nécessitera plus de coût et de ressources
	3. Durée de vie des installations (C3)	Chaque nouvelle installation doit avoir une durée de vie supérieure à l'ancien pour éviter un temps plus court entre leur changement
	4. Fiabilité des installations (C4)	Diminution de risque de panne et de coût de réparation si leur fiabilité est élevée
	5. Taux de défaillance (C5)	Pour pouvoir prioriser les installations
	6. Fréquence de défaillance (C6)	Affecter les dépenses et l'image de l'entreprise
Environnementales	1. Protection et santé de l'écosystème (C7)	À la suite de la démarche d'HQ sur le développement durable
	2. Résistance aux conditions météorologiques critiques (C8)	Plus les installations sont résistantes aux conditions météorologiques moins de risque de pannes et de dépenses
	3. Paramètre du sol/terrain (C9)	Tenir compte avant installation de l'élévation, affaissement, et tout danger environnemental tel que les glissements, l'érosion ou fragilité du sol et la déforestation
	4. Impact visuel et sonore (C10)	Peut causer une obstruction des citoyens sur le projet
	5. Réduction des émissions (C11)	À la suite de la démarche d'HQ sur le développement durable

Tableau 4-2 : Les justifications du choix des critères(suite)

Critères	Sous-critères	Justification
Santé et sécurité :	1. Santé et sécurité humaine (C12)	Pouvoir assurer la sécurité et la santé des ouvriers et employés durant l'implémentation du projet
	2. Ressources humaines et matérielles (C13)	Le manque de ressources peut affecter la réalisation du plan d'adaptation
	3. Perception et gravité des risques (C14)	Prioriser les plans ayant une solution applicable sur les actifs et activités à risque élevé
Gouvernance et planification :	1. Développement et innovation (C15)	À la suite de la démarche d'HQ sur le développement durable
	2. Image de l'entreprise (C16)	Risque de perdre la confiance des clients
	3. Intégration aux politiques de développement d'HQD (C17)	Conformité du plan par rapport à la vision d'HQ pour les prochaines années
	4. Facteurs réglementaires (C18)	Respect des lois et normes gouvernementales
	5. Incertitude due aux données manquantes sur les solutions proposées (C19)	Certains plans proposent des solutions innovantes, mais faute d'outils technologiques pas encore élaborés restent flous sur certaines applications
	6. Incertitude due au niveau de confiance des aléas climatiques (C20)	Les aléas climatiques contiennent une marge d'erreur pouvant changer la donne sur les simulations établies
Information et communication :	1. Transparence et partage d'information (C21)	Peut affecter la confiance des partenaires
	2. Service à la clientèle (C22)	Pouvoir répondre aux plaintes du client
	3. Cadre de collaboration, coordination internationale et synergie avec d'autres projets (C23)	Tenir compte des projets en cours d'HQ et de ces partenaires ainsi que tout projet se situant à l'emplacement du plan adopté et pouvant l'affecter

Tableau 4-2 : Les justifications du choix des critères (suite)

Critères	Sous-critères	Justification
Social :	1. Zone de contournement (résidentielle et service public aériens ou souterrains existants) (C24)	Risque d'arrêt des travaux si le plan ne contourne pas tout endroit ayant une forte densité résidentielle ou forte exposition visuelle des maisons ainsi que tout service aérien ou souterrain existant comme les tuyaux de gaz, d'eau, etc.
	2. Zone de contournement (historique, archéologique, environnementale et biologiquement sensible) (C25)	Risque d'arrêt des travaux si le plan ne contourne pas tout endroit pouvant avoir une valeur historique, archéologique ou étant biologiquement sensible
	3. Disponibilité, restrictions ou limitation de l'utilisation des droits de passage publics (respect de la vie privée autorisée et légale) (C26)	Peut causer une obstruction des citoyens sur le projet
	4. Sensibilisation, formation et implication des parties prenantes (C27)	À la suite de la démarche d'HQ sur le développement durable et conforme à sa politique d'engagement
Économique :	1. Coût projet/ investissement (C28)	Respect du fonds d'investissement disponible
	1. Coût exploitation/ entretien (C29)	Si la solution est fiable donc moins de maintenance, d'entretien et de dépenses
	2. Rentabilité (C30)	Moins de dépenses et plus de bénéfices
	3. Temps d'arrêt/ d'indisponibilité (C31)	Pour pouvoir prioriser les installations et diminuer le risque de pertes de clients
	4. Condition et état des équipements / installations (C32)	Pour pouvoir prioriser les installations

4.9 Approbation des critères

Dans le cadre de ce projet d'adaptation aux changements climatiques d'Hydro-Québec Distribution, l'un des objectifs est de valider une liste de critères pertinents. Pour ce faire, la recherche a compilé une liste exhaustive de critères en se basant sur 28 articles scientifiques. En outre, des matrices de risques et des fiches d'analyse (HQD) ont été incluses dans l'élaboration de cette liste.

Afin de garantir la pertinence et l'adéquation de cette liste de critères, un questionnaire a été élaboré pour recueillir les commentaires des parties prenantes. Par ailleurs, il convient de souligner que les critères retenus doivent être évalués avec un poids égal ou supérieur à 2 sur une échelle de 0 (non approuvé) à 3 (importance élevée).

Par conséquent, ce questionnaire a été présenté aux membres du comité de gestion des actifs d'Hydro-Québec, sous la direction de Christine Emond, ingénierie en chef et certifiée LSSBB (Lean Six Sigma Black Belt).

De plus, ce comité est composé d'experts multidisciplinaires, parmi lesquels figurent Christine Emond (ingénierie en chef et certifiée LSSBB (Lean Six Sigma Black Belt)), Isabelle Chartier (chercheur – Recherche et innovation (Gestion des actifs)), Jean-Michel Goulet (Chef de projet - Chef performance des actifs) et Jean-Philippe Martin (conseiller en développement durable), spécialisés dans les domaines nécessaires pour répondre de manière exhaustive à ce questionnaire.

En définitive, les réponses obtenues seront analysées de manière collaborative par l'équipe pour finaliser la liste des critères retenus pour ce projet, en prenant en considération les évaluations pondérées de chaque membre du comité.

Pour résumé, le comité de gestion des actifs d'Hydro-Québec a collaborativement rempli ce questionnaire, garantissant ainsi la qualité et la pertinence des critères retenus pour ce projet.

4.9.1 Réponses du questionnaire 1

Q 1 : Parmi les sous-critères choisis, quels sont ceux à retenir?

Tableau 4-3 : Q 1 : Parmi les sous-critères choisis, quels sont ceux à retenir?

Critères	Sous-critères	Poids d'importance
Technique	Accessibilité aux installations et infrastructures critiques (C1)	<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input checked="" type="checkbox"/> 3
	Faisabilité et facilité de réalisation (C2)	<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1 <input checked="" type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3
	Durée de vie des installations (C3)	<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input checked="" type="checkbox"/> 3
	Fiabilité des installations (C4)	<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input checked="" type="checkbox"/> 3
	Taux de défaillance (C5)	<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input checked="" type="checkbox"/> 3
	Fréquence de défaillance (C6)	<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input checked="" type="checkbox"/> 3
Environnementales	Protection et santé de l'écosystème (C7)	<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input checked="" type="checkbox"/> 3
	Résistance aux conditions météorologiques critiques (C8)	<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input checked="" type="checkbox"/> 3
	Paramètres du sol/terrain (C9)	<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1 <input checked="" type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3
	Impact visuel et sonore (C10)	<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1 <input checked="" type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3
	Réduction des émissions (C11)	<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input checked="" type="checkbox"/> 3

Tableau 4-3 : Q 1 : Parmi les sous-critères choisis, quels sont ceux à retenir? (suite)

Critères	Sous-critères	Poids d'importance
Santé et Sécurité	Santé et sécurité humaine (C12)	<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1 <input checked="" type="checkbox"/> 2 <input checked="" type="checkbox"/> 3
	Ressources humaines et matérielles (C13)	<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1 <input checked="" type="checkbox"/> 2 <input checked="" type="checkbox"/> 3
	Perception et gravité des risques (C14)	<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1 <input checked="" type="checkbox"/> 2 <input checked="" type="checkbox"/> 3
Gouvernance et Planification	Développement et innovation (C15)	<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1 <input checked="" type="checkbox"/> 2 <input checked="" type="checkbox"/> 3
	Image de l'entreprise (C16)	<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1 <input checked="" type="checkbox"/> 2 <input checked="" type="checkbox"/> 3
	Intégration aux politiques de développement d'HQD (C17)	<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1 <input checked="" type="checkbox"/> 2 <input checked="" type="checkbox"/> 3
	Facteurs réglementaires (C18)	<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1 <input checked="" type="checkbox"/> 2 <input checked="" type="checkbox"/> 3
	Incertitude due aux données manquantes sur les solutions proposées (C19)	<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1 <input checked="" type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3
	Incertitude due au niveau de confiance des aléas climatiques (C20)	<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1 <input checked="" type="checkbox"/> 2 <input checked="" type="checkbox"/> 3
Information et Communication	Transparence et partage d'information (C21)	<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1 <input checked="" type="checkbox"/> 2 <input checked="" type="checkbox"/> 3
	Service à la clientèle (C22)	<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1 <input checked="" type="checkbox"/> 2 <input checked="" type="checkbox"/> 3
	Cadre de collaboration, coordination internationale et synergie avec d'autres projets (C23)	<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1 <input checked="" type="checkbox"/> 2 <input checked="" type="checkbox"/> 3
Social	Zone de contournement (résidentielle et service public aériens ou souterrains existants) (C24)	<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1 <input checked="" type="checkbox"/> 2 <input checked="" type="checkbox"/> 3
	Zone de contournement (historique, archéologique, environnementale et biologiquement sensible) (C25)	<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1 <input checked="" type="checkbox"/> 2 <input checked="" type="checkbox"/> 3
	Disponibilité, restrictions ou limitation de l'utilisation des droits de passage publics (respect de la vie privée autorisée et légale) (C26)	<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1 <input checked="" type="checkbox"/> 2 <input checked="" type="checkbox"/> 3
	Sensibilisation, formation et implication des parties prenantes (C27)	<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1 <input checked="" type="checkbox"/> 2 <input checked="" type="checkbox"/> 3
	Coût projet/ investissement (C28)	<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1 <input checked="" type="checkbox"/> 2 <input checked="" type="checkbox"/> 3
Économique	Coût exploitation/ entretien (C29)	<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1 <input checked="" type="checkbox"/> 2 <input checked="" type="checkbox"/> 3
	Rentabilité (C30)	<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1 <input checked="" type="checkbox"/> 2 <input checked="" type="checkbox"/> 3
	Temps d'arrêt/ d'indisponibilité (C31)	<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1 <input checked="" type="checkbox"/> 2 <input checked="" type="checkbox"/> 3
	Condition et état équipements / installations (C32)	<input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1 <input checked="" type="checkbox"/> 2 <input checked="" type="checkbox"/> 3

Q 2 : Parmi les alternatives choisies, quelles sont celles à retenir?

Tableau 4-4 : Q 2 : Parmi les alternatives choisies, quelles sont celles à retenir?

Alternatifs	Valide	Non valide	Autre (donner la modification à retenir)
A1- Poteau en Composite	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> : Valide avec une stratégie en fonction d'emplacement choisi
A2-Enfouissement des Lignes	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> : Ne pas distinguer les 2 types d'enfouissement, il y aura plusieurs techniques d'enfouissement donc combiner ces 2 éléments (A2 et A3). Valide avec une stratégie en fonction d'emplacement choisi.
A3-Enfouissement Allégé des Lignes	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> : Ne pas distinguer les 2 types d'enfouissement, il y aura plusieurs techniques d'enfouissement donc combiner ces 2 éléments (A2 et A3). Valide avec une stratégie en fonction d'emplacement choisi.
A4-Inspection Plus fréquente des poteaux de bois	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> : Très important

4.10 Conclusion :

Dans le processus de sélection, seuls les critères ayant un niveau d'importance égal ou supérieur à 2 sont pris en compte, mettant en évidence leur rôle crucial dans la prise de décision. En ce qui concerne les alternatives, toutes celles qui ont été approuvées sont retenues, notamment en fusionnant les options A2 et A3 afin de former une solution optimale qui répond aux critères établis.

En résumé, seules les options répondant aux critères les plus importants sont prises en considération, et les alternatives sont sélectionnées en fonction de leur pertinence par rapport à ces critères. Par conséquent, tous les critères et sous critères sont retenues.

Tandis que les alternatives retenues sont :

- A1 - Poteau en Composite;
- A2 - Enfouissement des Lignes;
- A3 - Inspection Plus fréquente des poteaux de bois.

CHAPITRE 5 ÉTUDE DE CAS : APPLICATION DE LA MÉTHODE AHP POUR HQD FACE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES DANS LA RÉGION OUTAOUAIS-RIVIÈRES PAUGAN

5.1 Introduction

Le principal objectif de ce chapitre consiste à mettre en pratique la méthode AHP à travers une étude approfondie d'un cas concret, spécifiquement tiré de la division d'Hydro-Québec distribution. Pour se faire, les différentes étapes clés seront les suivantes.

Dans un premier temps, la quantification des critères sera entreprise en utilisant un deuxième questionnaire qui suit rigoureusement l'échelle de Saaty. Il est important de souligner que ces critères ont été minutieusement approuvés grâce au premier questionnaire, une étape cruciale dans l'application efficace de la méthode AHP. Une fois les critères quantifiés, l'application proprement dite de la méthode AHP sera effectuée en utilisant le logiciel spécialisé AHP-Software. Cette étape permettra d'analyser et de comparer les différentes alternatives selon les critères établis. Ainsi, il sera possible de déterminer les choix prioritaires les plus pertinents en fonction des résultats obtenus grâce à l'AHP.

Enfin, une dernière phase consistera à évaluer la fiabilité des décisions par rapport aux incertitudes ou aux variations dans la méthode AHP. Il sera possible de fournir une perspective complète pour faciliter une prise de décisions plus éclairées et d'identifier les domaines où des ajustements ou des clarifications sont nécessaires dans le modèle.

En somme, ce chapitre vise à approfondir la compréhension de la méthode AHP en la mettant en œuvre dans un cas pratique, en soulignant l'importance de la quantification des critères, de l'application de la méthode AHP et de l'évaluation de l'impact potentiel de chaque poids sur le classement de l'AHP pour juger de la robustesse des capacités décisionnelles.

5.2 Présentation du cas

Dans cette étude de cas, l'objectif est de présenter le cas d'étude dans la région de l'Outaouais-rivières Paugan, au Québec, concernant les poteaux électriques et l'application de la méthode AHP pour évaluer les mesures d'adaptation face aux changements climatiques.

Hydro-Québec Distribution met en place différentes initiatives pour renforcer la résilience de son réseau de distribution face aux impacts des changements climatiques (Hydro-Québec Distribution, 2021). Parmi les mesures d'adaptation considérées dans cette étude, il y a le remplacement des poteaux de bois par des poteaux en composite, l'enfouissement des lignes électriques et l'inspection plus fréquente des poteaux de bois existants (ANNEXE B : Exemple fiche de risque poteaux (Hydro-Québec Distribution, 2021)). Ces mesures visent à améliorer la résistance du réseau électrique aux conditions météorologiques extrêmes et aux événements climatiques.

L'analyse hiérarchique (AHP) sera utilisée pour évaluer ces mesures d'adaptation en fonction de critères tels que l'efficacité, la durabilité, les coûts économiques, l'acceptabilité sociale et les contraintes techniques. L'étude se concentrera sur la traversée de rivière, non loin du barrage de Paugan, en Outaouais (Figure 5-2 : poteaux dans le secteur de la traversée de rivière, non loin du barrage de Paugan, en Outaouais(Hydro-Québec, 2020a)) et examinera comment les mesures mises en place par Hydro-Québec Distribution peuvent être adaptées et appliquées dans ce contexte.

En effet, cette région subit certains des pires dommages aux poteaux d'Hydro-Québec, comme la pourriture, les trous de pic-bois à la recherche de nourriture ou d'un abri et l'infestation de fourmis charpentières (voir Figure 5-1: Poteau endommagé par de pic-bois (© Hydro-Québec, 2022)). Ces derniers abîment en moyenne 42 % des poteaux remplacés chaque année dans le cadre du programme Inspection des poteaux (Hydro-Québec, 2020a).

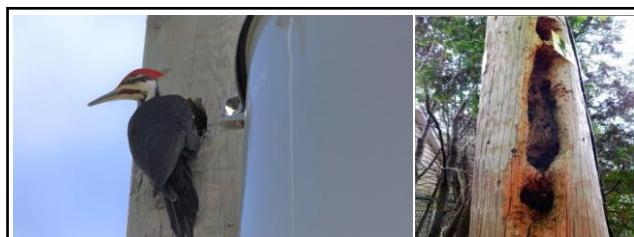


Figure 5-1: Poteau endommagé par de pic-bois (© Hydro-Québec, 2022)

En outre, la hausse des températures et les évènements météorologiques extrêmes plus fréquents et plus intenses dépassent parfois les normes de conception et causent plus de bris de poteaux et allongent les périodes où les conditions sont favorables à la pourriture (© Hydro-Québec, 2022).



Figure 5-2 : poteaux dans le secteur de la traversée de rivière, non loin du barrage de Paugan, en Outaouais(Hydro-Québec, 2020a)

Cette étude de cas met en évidence le rôle d'Hydro-Québec Distribution en tant qu'entreprise exemplaire dans la mise en œuvre de mesures d'adaptation aux changements climatiques. Les résultats de cette analyse fourniront des recommandations pour les acteurs du secteur de la distribution d'électricité qui cherchent à renforcer la résilience de leurs réseaux dans des régions confrontées à des défis similaires liés aux changements climatiques.

5.3 Application de l'AHP

L'approche choisie pour évaluer les mesures d'adaptation face aux changements climatiques dans cette étude de cas est connue sous le nom de méthode AHP (Analytic Hierarchy Process). Cette méthode permet de comparer et de hiérarchiser de manière systématique les critères et les

alternatives en tenant compte des préférences et des poids attribués à chaque élément (Saaty et al., 1984).

Dans le contexte de cette étude, l'AHP sera utilisée pour évaluer les différentes options d'adaptation pour les poteaux électriques dans la région de l'Outaouais, où un poteau neuf est requis tous les 12 ans, alors que la durée de vie des poteaux dans ce secteur est normalement de 65 ans (Hydro-Québec, 2020a). Cette étude permettra de prendre en considération des facteurs tels que la durabilité, l'efficacité et la faisabilité technique, afin de prendre des décisions éclairées et de formuler des recommandations basées sur une évaluation rigoureuse des options disponibles.

Structuration hiérarchique

La méthode AHP utilise une approche de structuration hiérarchique pour évaluer les critères et les alternatives de manière claire et précise. Cette méthode se divise en trois niveaux : le niveau objectif, le niveau des critères et le niveau des alternatives (voir Figure 5-3 : structure hiérarchique (AHP) pour les mesures d'adaptation). Au niveau objectif, l'objectif principal de l'étude est défini, à savoir trouver les meilleures mesures d'adaptation pour les poteaux électriques dans la région de l'Outaouais. Ensuite, au niveau des critères, les différents aspects à prendre en compte sont décomposés en sous-critères pertinents tels que la durabilité, l'efficacité, la faisabilité technique et d'autres critères spécifiques.

Enfin, au niveau des alternatives, différentes options d'adaptation sont identifiées, comme le remplacement des poteaux en bois par des poteaux en composite (A1), l'enfouissement des lignes (A2) ou une inspection plus fréquente des poteaux de bois (A3). Grâce à cette structuration hiérarchique, la méthode AHP permet une analyse systématique et rationnelle des différentes possibilités d'adaptation, aboutissant à une évaluation globale.

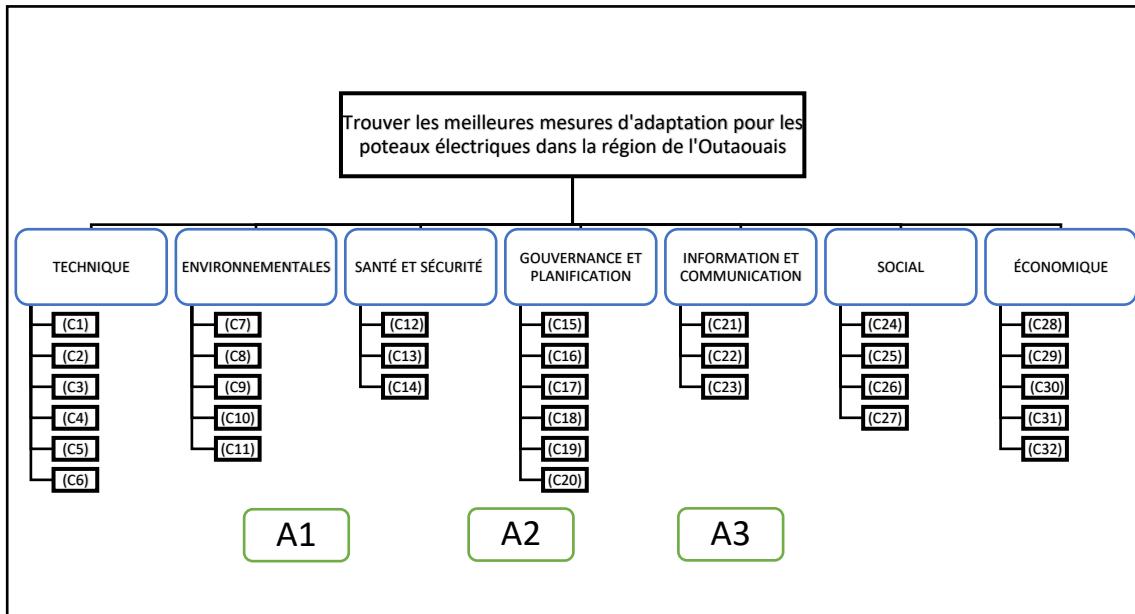


Figure 5-3 : structure hiérarchique (AHP) pour les mesures d'adaptation

Les notations C1 à C32 correspondent aux différents sous-critères, répartis en catégories telles que :

- | | | |
|---|--|---|
| (C1) : Accessibilité aux installations et infrastructure critique | (C12) : Santé humaine | (C21) : Transparence et partage d'information |
| (C2) : Faisabilité et facilité de réalisation | (C13) : Ressources humaines et matérielles | (C22) : Service à la clientèle |
| (C3) : Durée de vie des installations | (C14) : Perception et gravité des risques | (C23) : Cadre de collaboration, coordination internationale et synergie avec d'autres projets |
| (C4) : Fiabilité des installations | (C15) : Développement et innovation | (C24) : Zone de contournement (résidentielle et service public aériens ou souterrains existants) |
| (C5) : Taux de défaillance | (C16) : Image de l'entreprise | (C25) : Zone de contournement (historique, archéologique, environnementale et biologiquement sensible) |
| (C6) : Fréquence de défaillance | (C17) : Intégration aux politiques de développement d'HQD | (C26) : Disponibilité, restrictions ou limitation de l'utilisation des droits de passage publics (respect de la vie privée autorisé et légal) |
| (C7) : Protection et santé de l'écosystème | (C18) : Facteurs réglementaires | (C27) : Sensibilisation, formation et implication des parties prenantes |
| (C8) : Résistance aux conditions météorologiques critiques | (C19) : Incertitude due aux données manquantes sur les solutions proposées | |
| (C9) : Paramètre du sol/terrain | (C20) : Incertitude due au niveau de confiance des aléas climatiques | |
| (C10) : Impact visuel et sonore | | |
| (C11) : Réduction des émissions | | |

(C28) : Coût projet/ investissement	(C30) : Rentabilité (C31) : Temps d'arrêt/ d'indisponibilité	(C32) : Condition et état des équipements / installations
(C29) : Coût exploitation/ entretien		

5.3.1 Quantification des critères

À la suite des réponses obtenues du premier questionnaire, un deuxième questionnaire a été développé pour quantifier les critères retenus dans l'évaluation des mesures d'adaptation des poteaux électriques dans la région de l'Outaouais, en particulier pour la traversée de la rivière Paugan. Ces 32 critères ont abordé divers aspects, tels que la stabilité du sol, la résistance aux conditions météorologiques, la durabilité des matériaux et les impacts environnementaux. Le nouveau questionnaire se concentre sur les critères les plus importants permettant ainsi d'approfondir l'évaluation de ces critères en demandant des informations supplémentaires et en clarifiant certains aspects spécifiques.

Par ailleurs, celui-ci a été transmis au comité d'experts multidisciplinaires d'Hydro-Québec, composé notamment de Christine Emond ((ingénierie en chef et certifiée LSSBB (Lean Six Sigma Black Belt))), Isabelle Chartier (chercheur – Recherche et innovation (Gestion des actifs)), Jean-Michel Goulet (Chef de projet - Chef performance des actifs) et Jean-Philippe Martin (conseiller en développement durable), a été maintenu pour répondre à ce deuxième questionnaire. Cette décision s'est appuyée sur leur expertise spécifique, leur connaissance approfondie du projet, et l'objectif de réduire la courbe d'apprentissage, garantissant ainsi la cohérence et la continuité dans le processus d'évaluation.

Ensuite, la méthode AHP est appliquée pour faciliter la comparaison des options disponibles et aide à identifier les mesures d'adaptation les plus appropriées en accordant des pondérations proportionnelles à l'importance de chaque critère dans la prise de décision. L'objectif ultime étant d'assurer la fiabilité et la durabilité des poteaux électriques dans la région, tout en minimisant les perturbations pour les résidents de l'Outaouais et en préservant l'environnement naturel. Grâce aux réponses détaillées fournies à ce questionnaire, Hydro-Québec pourra choisir la solution d'adaptation la plus efficace et durable pour les poteaux électriques traversant la rivière Paugan.

- Questionnaire de quantification des critères :

Le questionnaire de quantification des critères comprend également l'évaluation du rapport de cohérence (CR) de manière simultanée. Le CR permet de mesurer la cohérence des jugements par rapport aux poids attribués aux différents critères. Il s'agit d'une étape cruciale pour assurer la fiabilité et la validité des résultats obtenus à partir du questionnaire. Les participants sont invités à évaluer les critères deux par deux en utilisant des échelles de comparaison et à indiquer leur préférence relative. Ces évaluations sont ensuite utilisées pour calculer les poids relatifs des critères en utilisant la méthode AHP. En parallèle, le CR est calculé pour vérifier la cohérence des évaluations fournies. Un CR inférieur à 0,1 indique une cohérence acceptable des jugements, tandis qu'un CR supérieur à 0,1 suggère une incohérence qui nécessite une révision ou une clarification des évaluations.

En intégrant le calcul du CR de manière simultanée, le questionnaire garantit une approche méthodologique rigoureuse et renforce la confiance dans les résultats obtenus.

La première question du questionnaire (voir la Figure 5-4 : question 1 du questionnaire 2 sur la comparaison des critères du niveau 1 ci-dessous) est sur l'importance des critères du niveau 1 suivant l'échelle de Saaty (voir Tableau 3-5 : L'échelle de Saaty (Guesdon, 2011))

		A - wrt mesures d_adaptation - or B?	Equal	How much more?
1	<input checked="" type="radio"/> TECHNIQUE	<input type="radio"/> ENVIRONNEMENTALES	<input checked="" type="radio"/> 1	○ 2 ○ 3 ○ 4 ○ 5 ○ 6 ○ 7 ○ 8 ○ 9
2	<input checked="" type="radio"/> TECHNIQUE	<input type="radio"/> SANTE ET SECURITE	<input checked="" type="radio"/> 1	○ 2 ○ 3 ○ 4 ○ 5 ○ 6 ○ 7 ○ 8 ○ 9
3	<input checked="" type="radio"/> TECHNIQUE	<input type="radio"/> GOUVERNANCE ET PLANIFICATION	<input checked="" type="radio"/> 1	○ 2 ○ 3 ○ 4 ○ 5 ○ 6 ○ 7 ○ 8 ○ 9
4	<input checked="" type="radio"/> TECHNIQUE	<input type="radio"/> INFORMATION ET COMMUNICATION	<input checked="" type="radio"/> 1	○ 2 ○ 3 ○ 4 ○ 5 ○ 6 ○ 7 ○ 8 ○ 9
5	<input checked="" type="radio"/> TECHNIQUE	<input type="radio"/> SOCIAL	<input type="radio"/> 1	○ 2 ○ 3 ○ 4 ○ 5 ○ 6 ○ 7 ○ 8 ○ 9
6	<input checked="" type="radio"/> TECHNIQUE	<input type="radio"/> ECONOMIQUE	<input checked="" type="radio"/> 1	○ 2 ○ 3 ○ 4 ○ 5 ○ 6 ○ 7 ○ 8 ○ 9
7	<input type="radio"/> ENVIRONNEMENTALES	<input type="radio"/> SANTE ET SECURITE	<input checked="" type="radio"/> 1	○ 2 ○ 3 ○ 4 ○ 5 ○ 6 ○ 7 ○ 8 ○ 9
8	<input type="radio"/> ENVIRONNEMENTALES	<input type="radio"/> GOUVERNANCE ET PLANIFICATION	<input type="radio"/> 1	○ 2 ○ 3 ○ 4 ○ 5 ○ 6 ○ 7 ○ 8 ○ 9
9	<input type="radio"/> ENVIRONNEMENTALES	<input type="radio"/> INFORMATION ET COMMUNICATION	<input type="radio"/> 1	○ 2 ○ 3 ○ 4 ○ 5 ○ 6 ○ 7 ○ 8 ○ 9
10	<input type="radio"/> ENVIRONNEMENTALES	<input type="radio"/> SOCIAL	<input type="radio"/> 1	○ 2 ○ 3 ○ 4 ○ 5 ○ 6 ○ 7 ○ 8 ○ 9
11	<input type="radio"/> ENVIRONNEMENTALES	<input type="radio"/> ECONOMIQUE	<input checked="" type="radio"/> 1	○ 2 ○ 3 ○ 4 ○ 5 ○ 6 ○ 7 ○ 8 ○ 9
12	<input checked="" type="radio"/> SANTE ET SECURITE	<input type="radio"/> GOUVERNANCE ET PLANIFICATION	<input type="radio"/> 1	○ 2 ○ 3 ○ 4 ○ 5 ○ 6 ○ 7 ○ 8 ○ 9
13	<input checked="" type="radio"/> SANTE ET SECURITE	<input type="radio"/> INFORMATION ET COMMUNICATION	<input type="radio"/> 1	○ 2 ○ 3 ○ 4 ○ 5 ○ 6 ○ 7 ○ 8 ○ 9
14	<input checked="" type="radio"/> SANTE ET SECURITE	<input type="radio"/> SOCIAL	<input type="radio"/> 1	○ 2 ○ 3 ○ 4 ○ 5 ○ 6 ○ 7 ○ 8 ○ 9
15	<input checked="" type="radio"/> SANTE ET SECURITE	<input type="radio"/> ECONOMIQUE	<input type="radio"/> 1	○ 2 ○ 3 ○ 4 ○ 5 ○ 6 ○ 7 ○ 8 ○ 9
16	<input checked="" type="radio"/> GOUVERNANCE ET PLANIFICATION	<input type="radio"/> INFORMATION ET COMMUNICATION	<input checked="" type="radio"/> 1	○ 2 ○ 3 ○ 4 ○ 5 ○ 6 ○ 7 ○ 8 ○ 9
17	<input checked="" type="radio"/> GOUVERNANCE ET PLANIFICATION	<input type="radio"/> SOCIAL	<input checked="" type="radio"/> 1	○ 2 ○ 3 ○ 4 ○ 5 ○ 6 ○ 7 ○ 8 ○ 9
18	<input checked="" type="radio"/> GOUVERNANCE ET PLANIFICATION	<input type="radio"/> ECONOMIQUE	<input checked="" type="radio"/> 1	○ 2 ○ 3 ○ 4 ○ 5 ○ 6 ○ 7 ○ 8 ○ 9
19	<input type="radio"/> INFORMATION ET COMMUNICATION	<input type="radio"/> SOCIAL	<input checked="" type="radio"/> 1	○ 2 ○ 3 ○ 4 ○ 5 ○ 6 ○ 7 ○ 8 ○ 9
20	<input type="radio"/> INFORMATION ET COMMUNICATION	<input type="radio"/> ECONOMIQUE	<input checked="" type="radio"/> 1	○ 2 ○ 3 ○ 4 ○ 5 ○ 6 ○ 7 ○ 8 ○ 9
21	<input checked="" type="radio"/> SOCIAL	<input type="radio"/> ECONOMIQUE	<input checked="" type="radio"/> 1	○ 2 ○ 3 ○ 4 ○ 5 ○ 6 ○ 7 ○ 8 ○ 9
CR = 9.8% OK				

Figure 5-4 : question 1 du questionnaire 2 sur la comparaison des critères du niveau 1

La matrice de comparaison des critères et leurs priorités sont représentées dans la Figure 5-5 : matrice de comparaison des critères du niveau 1

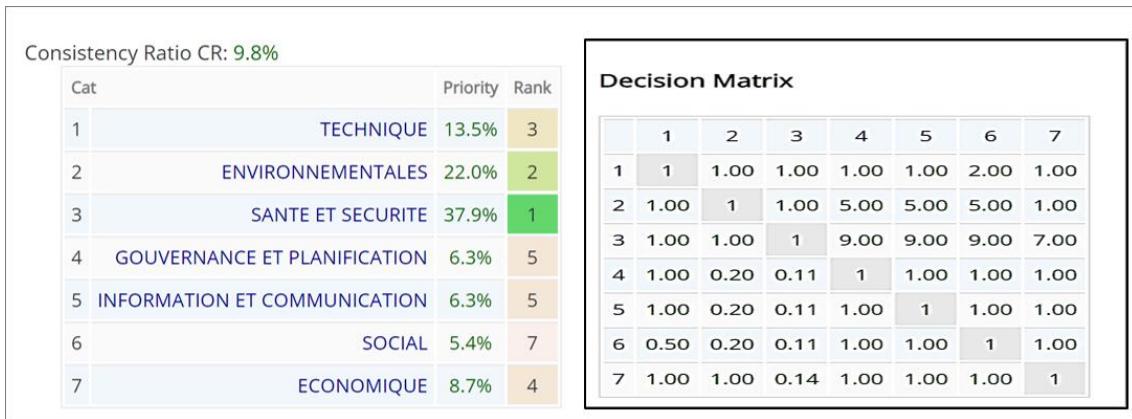


Figure 5-5 : matrice de comparaison des critères du niveau 1

La deuxième question du questionnaire Figure 5-6 est sur l'importance des sous-critères du niveau 2 par rapport au critère technique suivant la même échelle et sa matrice de comparaison :

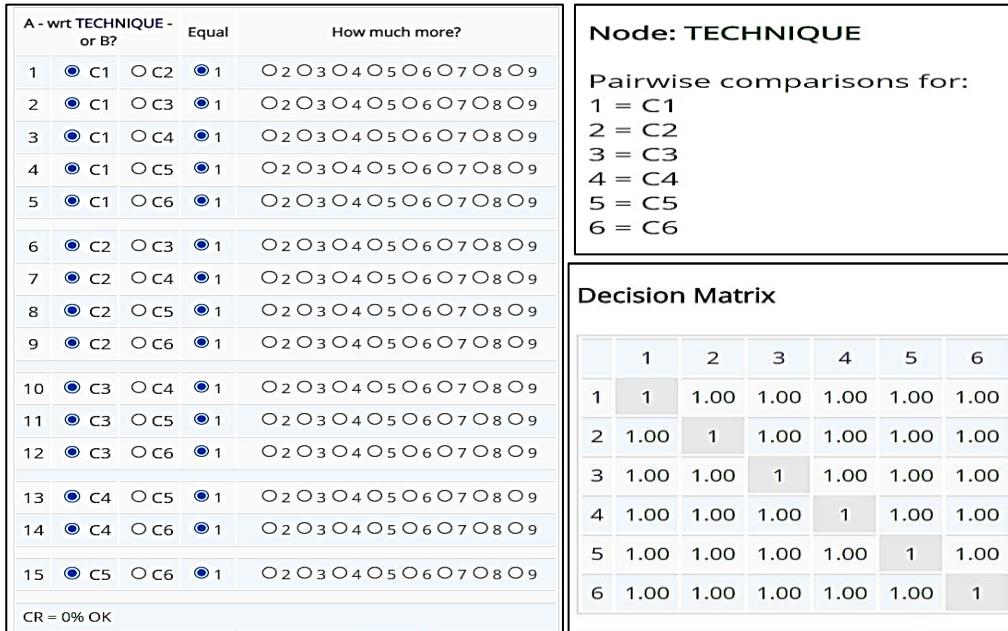


Figure 5-6 : question 2 sur la comparaison des sous-critères du niveau 2 par rapport aux critères techniques et sa matrice de comparaison

La troisième question du questionnaire (voir Figure 5-7 : question 2 du questionnaire 2 sur la comparaison des sous-critères du niveau 2 par rapport au critère environnemental) est sur l'importance des sous-critères du niveau 2 par rapport au critère environnemental suivant l'échelle de Saaty :

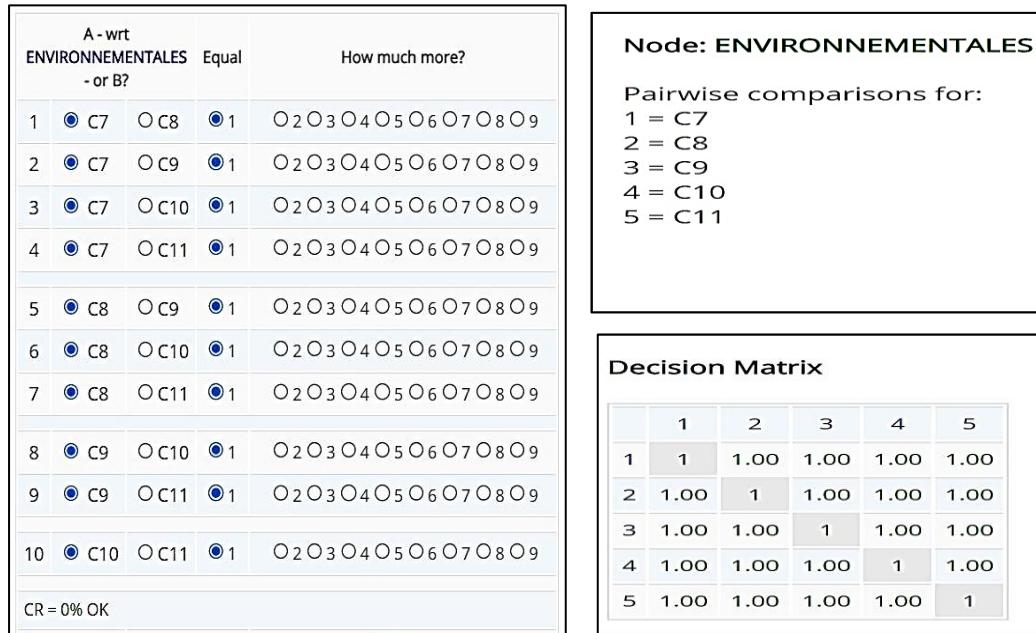


Figure 5-7 : question 2 du questionnaire 2 sur la comparaison des sous-critères du niveau 2 par rapport au critère environnemental

Ensuite, la Figure 5-8 : question 3 du questionnaire 2 sur la comparaison des sous-critères du niveau 2 par rapport aux critères santé et sécurité et sa matrice de comparaison suivant l'échelle de Saaty :

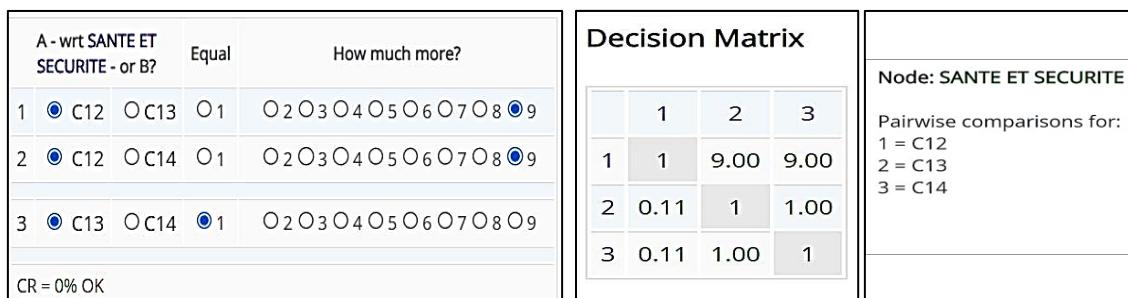


Figure 5-8 : question 3 du questionnaire 2 sur la comparaison des sous-critères du niveau 2 par rapport aux critères santé et sécurité et sa matrice de comparaison

L'importance des sous-critères du niveau 2 par rapport aux critères de gouvernance et planification suivant l'échelle de Saaty (Figure 5-9) ci-dessous :

A - wrt GOUVERNANCE ET PLANIFICATION - or B?		Equal	How much more?	Node: GOUVERNANCE ET PLANIFICATION							
1	<input checked="" type="radio"/> C15	<input type="radio"/> C16	<input type="radio"/> 1	O2	<input checked="" type="radio"/> 3	O4	O5	O6	O7	O8	O9
2	<input checked="" type="radio"/> C15	<input type="radio"/> C17	<input type="radio"/> 1	O2	O3	O4	<input checked="" type="radio"/> 5	O6	O7	O8	O9
3	<input checked="" type="radio"/> C15	<input type="radio"/> C18	<input checked="" type="radio"/> 1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9
4	<input checked="" type="radio"/> C15	<input type="radio"/> C19	<input type="radio"/> 1	O2	O3	O4	<input checked="" type="radio"/> 5	O6	O7	O8	O9
5	<input checked="" type="radio"/> C15	<input type="radio"/> C20	<input type="radio"/> 1	O2	O3	O4	<input checked="" type="radio"/> 5	O6	O7	O8	O9
6	<input checked="" type="radio"/> C16	<input type="radio"/> C17	<input type="radio"/> 1	O2	<input checked="" type="radio"/> 3	O4	O5	O6	O7	O8	O9
7	<input checked="" type="radio"/> C16	<input type="radio"/> C18	<input checked="" type="radio"/> 1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9
8	<input checked="" type="radio"/> C16	<input type="radio"/> C19	<input type="radio"/> 1	O2	<input checked="" type="radio"/> 3	O4	O5	O6	O7	O8	O9
9	<input checked="" type="radio"/> C16	<input type="radio"/> C20	<input checked="" type="radio"/> 1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9
10	<input checked="" type="radio"/> C17	<input type="radio"/> C18	<input checked="" type="radio"/> 1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9
11	<input checked="" type="radio"/> C17	<input type="radio"/> C19	<input checked="" type="radio"/> 1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9
12	<input checked="" type="radio"/> C17	<input type="radio"/> C20	<input checked="" type="radio"/> 1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9
13	<input checked="" type="radio"/> C18	<input type="radio"/> C19	<input type="radio"/> 1	O2	O3	O4	<input checked="" type="radio"/> 5	O6	O7	O8	O9
14	<input checked="" type="radio"/> C18	<input type="radio"/> C20	<input type="radio"/> 1	O2	O3	O4	<input checked="" type="radio"/> 5	O6	O7	O8	O9
15	<input checked="" type="radio"/> C19	<input type="radio"/> C20	<input checked="" type="radio"/> 1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9
CR = 7.7% OK											

Decision Matrix						
	1	2	3	4	5	6
1	1	3.00	5.00	1.00	5.00	5.00
2	0.33	1	3.00	1.00	3.00	1.00
3	0.20	0.33	1	1.00	1.00	1.00
4	1.00	1.00	1.00	1	5.00	5.00
5	0.20	0.33	1.00	0.20	1	1.00
6	0.20	1.00	1.00	0.20	1.00	1

Figure 5-9 : question 4 du questionnaire 2 sur la comparaison des sous-critères du niveau 2 par rapport aux critères gouvernance et planification et sa matrice de comparaison

L'importance des sous-critères du niveau 2 par rapport au critère information et communication suivant l'échelle de Saaty (Figure 5-10)ci-dessous :

A - wrt INFORMATION ET COMMUNICATION - or B?		Equal	How much more?	Decision Matrix			Node: INFORMATION ET COMMUNICATION				
1	<input checked="" type="radio"/> C21	<input type="radio"/> C22	<input checked="" type="radio"/> 1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9
2	<input checked="" type="radio"/> C21	<input type="radio"/> C23	<input checked="" type="radio"/> 1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9
3	<input checked="" type="radio"/> C22	<input type="radio"/> C23	<input checked="" type="radio"/> 1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9
CR = 0% OK											
				1	2	3					
1		1	1.00	1.00							
2		1.00	1	1.00							
3		1.00	1.00	1							

Figure 5-10 : question 5 du questionnaire 2 sur la comparaison des sous-critères du niveau 2 par rapport aux critères information et communication et sa matrice de comparaison

L'importance des sous-critères du niveau 2 par rapport au critère social (Figure 5-11) suivant l'échelle de Saaty :

A - wrt SOCIAL - or B?		Equal	How much more?			
1	<input checked="" type="radio"/> C24	<input type="radio"/> C25	<input checked="" type="radio"/> 1	O	2	O
2	<input checked="" type="radio"/> C24	<input type="radio"/> C26	<input checked="" type="radio"/> 1	O	2	O
3	<input checked="" type="radio"/> C24	<input type="radio"/> C27	<input checked="" type="radio"/> 1	O	2	O
4	<input checked="" type="radio"/> C25	<input type="radio"/> C26	<input checked="" type="radio"/> 1	O	2	O
5	<input checked="" type="radio"/> C25	<input type="radio"/> C27	<input checked="" type="radio"/> 1	O	2	O
6	<input checked="" type="radio"/> C26	<input type="radio"/> C27	<input checked="" type="radio"/> 1	O	2	O
CR = 0% OK						

Node: SOCIAL
 Pairwise comparisons for:
 1 = C24
 2 = C25
 3 = C26
 4 = C27

Decision Matrix

	1	2	3	4
1	1	1.00	1.00	1.00
2	1.00	1	1.00	1.00
3	1.00	1.00	1	1.00
4	1.00	1.00	1.00	1

Figure 5-11 : question 6 du questionnaire 2 sur la comparaison des sous-critères du niveau 2 par rapport au critère social et sa matrice de comparaison

Enfin, l'importance des sous-critères du niveau 2 par rapport au critère économique (Figure 5-12) suivant l'échelle de Saaty :

A - wrt ECONOMIQUE - or B?		Equal	How much more?			
1	<input checked="" type="radio"/> C28	<input type="radio"/> C29	<input checked="" type="radio"/> 1	O	2	O
2	<input checked="" type="radio"/> C28	<input type="radio"/> C30	<input checked="" type="radio"/> 1	O	2	O
3	<input checked="" type="radio"/> C28	<input type="radio"/> C31	<input checked="" type="radio"/> 1	O	2	O
4	<input checked="" type="radio"/> C28	<input type="radio"/> C32	<input checked="" type="radio"/> 1	O	2	O
5	<input checked="" type="radio"/> C29	<input type="radio"/> C30	<input checked="" type="radio"/> 1	O	2	O
6	<input checked="" type="radio"/> C29	<input type="radio"/> C31	<input checked="" type="radio"/> 1	O	2	O
7	<input checked="" type="radio"/> C29	<input type="radio"/> C32	<input checked="" type="radio"/> 1	O	2	O
8	<input checked="" type="radio"/> C30	<input type="radio"/> C31	<input checked="" type="radio"/> 1	O	2	O
9	<input checked="" type="radio"/> C30	<input type="radio"/> C32	<input checked="" type="radio"/> 1	O	2	O
10	<input checked="" type="radio"/> C31	<input type="radio"/> C32	<input checked="" type="radio"/> 1	O	2	O
CR = 0% OK						

Node: ECONOMIQUE
 Pairwise comparisons for:
 1 = C28
 2 = C29
 3 = C30
 4 = C31
 5 = C32

Decision Matrix

	1	2	3	4	5
1	1	1.00	1.00	1.00	1.00
2	1.00	1	1.00	1.00	1.00
3	1.00	1.00	1	1.00	1.00
4	1.00	1.00	1.00	1	1.00
5	1.00	1.00	1.00	1.00	1

Figure 5-12 : question 7 du questionnaire 2 sur la comparaison des sous-critères du niveau 2 par rapport aux critères économique et sa matrice de comparaison

En outre, une étape clé dans le processus consiste à comparer les différentes alternatives pour chaque sous-critère (Figure 5-13, Figure 5-14, et Figure 5-15). Cette comparaison permet d'évaluer et de classer les options disponibles en fonction de leur performance relative dans chaque domaine spécifique.

Pour chaque sous-critère, une échelle de comparaison est utilisée pour attribuer des scores aux différentes alternatives, reflétant leur niveau de conformité ou de performance. Ces scores fournissent ensuite une indication de l'importance relative de chaque alternative pour chaque sous-critère. En réalisant cette comparaison pour chaque sous-critère, une vue d'ensemble complète des performances des différentes alternatives émerge, en prenant en compte tous les critères et sous-critères évalués. Cette approche facilite le processus décisionnel en identifiant les alternatives les mieux adaptées dans le contexte spécifique du cas étudié.

Par conséquent, l'importance des alternatifs par rapport aux sous-critères C1 à C32 suivant l'échelle de Saaty sont :

Criterion: C1	Decision Matrix	Criterion: C5	Decision Matrix																																
Pairwise comparisons for: 1 = Poteau En Composite(A1) 2 = Enfouissement Des Lignes(A2) 3 = Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th><th>1</th><th>2</th><th>3</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td><td>1</td><td>9.00</td><td>9.00</td></tr> <tr> <td>2</td><td>0.11</td><td>1</td><td>1.00</td></tr> <tr> <td>3</td><td>0.11</td><td>1.00</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>		1	2	3	1	1	9.00	9.00	2	0.11	1	1.00	3	0.11	1.00	1	Pairwise comparisons for: 1 = Poteau En Composite(A1) 2 = Enfouissement Des Lignes(A2) 3 = Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th><th>1</th><th>2</th><th>3</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td><td>1</td><td>1.00</td><td>5.00</td></tr> <tr> <td>2</td><td>1.00</td><td>1</td><td>2.00</td></tr> <tr> <td>3</td><td>0.20</td><td>0.50</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>		1	2	3	1	1	1.00	5.00	2	1.00	1	2.00	3	0.20	0.50	1
	1	2	3																																
1	1	9.00	9.00																																
2	0.11	1	1.00																																
3	0.11	1.00	1																																
	1	2	3																																
1	1	1.00	5.00																																
2	1.00	1	2.00																																
3	0.20	0.50	1																																
Criterion: C2	Decision Matrix	Criterion: C6	Decision Matrix																																
Pairwise comparisons for: 1 = Poteau En Composite(A1) 2 = Enfouissement Des Lignes(A2) 3 = Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th><th>1</th><th>2</th><th>3</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td><td>1</td><td>9.00</td><td>9.00</td></tr> <tr> <td>2</td><td>0.11</td><td>1</td><td>1.00</td></tr> <tr> <td>3</td><td>0.11</td><td>1.00</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>		1	2	3	1	1	9.00	9.00	2	0.11	1	1.00	3	0.11	1.00	1	Pairwise comparisons for: 1 = Poteau En Composite(A1) 2 = Enfouissement Des Lignes(A2) 3 = Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th><th>1</th><th>2</th><th>3</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td><td>1</td><td>1.00</td><td>5.00</td></tr> <tr> <td>2</td><td>1.00</td><td>1</td><td>2.00</td></tr> <tr> <td>3</td><td>0.20</td><td>0.50</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>		1	2	3	1	1	1.00	5.00	2	1.00	1	2.00	3	0.20	0.50	1
	1	2	3																																
1	1	9.00	9.00																																
2	0.11	1	1.00																																
3	0.11	1.00	1																																
	1	2	3																																
1	1	1.00	5.00																																
2	1.00	1	2.00																																
3	0.20	0.50	1																																
Criterion: C3	Decision Matrix	Criterion: C7	Decision Matrix																																
Pairwise comparisons for: 1 = Poteau En Composite(A1) 2 = Enfouissement Des Lignes(A2) 3 = Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th><th>1</th><th>2</th><th>3</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td><td>1</td><td>4.00</td><td>9.00</td></tr> <tr> <td>2</td><td>0.25</td><td>1</td><td>1.00</td></tr> <tr> <td>3</td><td>0.11</td><td>1.00</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>		1	2	3	1	1	4.00	9.00	2	0.25	1	1.00	3	0.11	1.00	1	Pairwise comparisons for: 1 = Poteau En Composite(A1) 2 = Enfouissement Des Lignes(A2) 3 = Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th><th>1</th><th>2</th><th>3</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td><td>1</td><td>9.00</td><td>5.00</td></tr> <tr> <td>2</td><td>0.11</td><td>1</td><td>1.00</td></tr> <tr> <td>3</td><td>0.20</td><td>1.00</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>		1	2	3	1	1	9.00	5.00	2	0.11	1	1.00	3	0.20	1.00	1
	1	2	3																																
1	1	4.00	9.00																																
2	0.25	1	1.00																																
3	0.11	1.00	1																																
	1	2	3																																
1	1	9.00	5.00																																
2	0.11	1	1.00																																
3	0.20	1.00	1																																
Criterion: C4	Decision Matrix	Criterion: C8	Decision Matrix																																
Pairwise comparisons for: 1 = Poteau En Composite(A1) 2 = Enfouissement Des Lignes(A2) 3 = Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th><th>1</th><th>2</th><th>3</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td><td>1</td><td>1.00</td><td>1.00</td></tr> <tr> <td>2</td><td>1.00</td><td>1</td><td>1.00</td></tr> <tr> <td>3</td><td>1.00</td><td>1.00</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>		1	2	3	1	1	1.00	1.00	2	1.00	1	1.00	3	1.00	1.00	1	Pairwise comparisons for: 1 = Poteau En Composite(A1) 2 = Enfouissement Des Lignes(A2) 3 = Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th><th>1</th><th>2</th><th>3</th></tr> </thead> </table>		1	2	3												
	1	2	3																																
1	1	1.00	1.00																																
2	1.00	1	1.00																																
3	1.00	1.00	1																																
	1	2	3																																

Figure 5-13 : la matrice de comparaison par paire des alternatifs par rapport aux sous-critères C1 à C8

Criterion: C9	Decision Matrix	Criterion: C13	Decision Matrix
Pairwise comparisons for:		Pairwise comparisons for:	
1 = Poteau En Composite(A1)		1 = Poteau En Composite(A1)	
2 = Enfouissement Des Lignes(A2)		2 = Enfouissement Des Lignes(A2)	
3 = Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)		3 = Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)	
Criterion: C10	Decision Matrix	Criterion: C14	Decision Matrix
Pairwise comparisons for:		Pairwise comparisons for:	
1 = Poteau En Composite(A1)		1 = Poteau En Composite(A1)	
2 = Enfouissement Des Lignes(A2)		2 = Enfouissement Des Lignes(A2)	
3 = Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)		3 = Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)	
Criterion: C11	Decision Matrix	Criterion: C15	Decision Matrix
Pairwise comparisons for:		Pairwise comparisons for:	
1 = Poteau En Composite(A1)		1 = Poteau En Composite(A1)	
2 = Enfouissement Des Lignes(A2)		2 = Enfouissement Des Lignes(A2)	
3 = Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)		3 = Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)	
Criterion: C12	Decision Matrix	Criterion: C16	Decision Matrix
Pairwise comparisons for:		Pairwise comparisons for:	
1 = Poteau En Composite(A1)		1 = Poteau En Composite(A1)	
2 = Enfouissement Des Lignes(A2)		2 = Enfouissement Des Lignes(A2)	
3 = Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)		3 = Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)	
Criterion: C17	Decision Matrix	Criterion: C21	Decision Matrix
Pairwise comparisons for:		Pairwise comparisons for:	
1 = Poteau En Composite(A1)		1 = Poteau En Composite(A1)	
2 = Enfouissement Des Lignes(A2)		2 = Enfouissement Des Lignes(A2)	
3 = Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)		3 = Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)	
Criterion: C18	Decision Matrix	Criterion: C22	Decision Matrix
Pairwise comparisons for:		Pairwise comparisons for:	
1 = Poteau En Composite(A1)		1 = Poteau En Composite(A1)	
2 = Enfouissement Des Lignes(A2)		2 = Enfouissement Des Lignes(A2)	
3 = Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)		3 = Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)	
Criterion: C19	Decision Matrix	Criterion: C23	Decision Matrix
Pairwise comparisons for:		Pairwise comparisons for:	
1 = Poteau En Composite(A1)		1 = Poteau En Composite(A1)	
2 = Enfouissement Des Lignes(A2)		2 = Enfouissement Des Lignes(A2)	
3 = Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)		3 = Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)	
Criterion: C20	Decision Matrix	Criterion: C24	Decision Matrix
Pairwise comparisons for:		Pairwise comparisons for:	
1 = Poteau En Composite(A1)		1 = Poteau En Composite(A1)	
2 = Enfouissement Des Lignes(A2)		2 = Enfouissement Des Lignes(A2)	
3 = Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)		3 = Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)	

Figure 5-14 : la matrice de comparaison par paire des alternatifs par rapport aux sous-critères C9 à C24

Criterion: C25	Decision Matrix	Criterion: C29	Decision Matrix																																
Pairwise comparisons for: 1 = Poteau En Composite(A1) 2 = Enfouissement Des Lignes(A2) 3 = Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)	<table border="1"> <tr> <td></td><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr> <tr> <td>1</td><td>1</td><td>1.00</td><td>1.00</td></tr> <tr> <td>2</td><td>1.00</td><td>1</td><td>1.00</td></tr> <tr> <td>3</td><td>1.00</td><td>1.00</td><td>1</td></tr> </table>		1	2	3	1	1	1.00	1.00	2	1.00	1	1.00	3	1.00	1.00	1	Pairwise comparisons for: 1 = Poteau En Composite(A1) 2 = Enfouissement Des Lignes(A2) 3 = Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)	<table border="1"> <tr> <td></td><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr> <tr> <td>1</td><td>1</td><td>1.00</td><td>5.00</td></tr> <tr> <td>2</td><td>1.00</td><td>1</td><td>5.00</td></tr> <tr> <td>3</td><td>0.20</td><td>0.20</td><td>1</td></tr> </table>		1	2	3	1	1	1.00	5.00	2	1.00	1	5.00	3	0.20	0.20	1
	1	2	3																																
1	1	1.00	1.00																																
2	1.00	1	1.00																																
3	1.00	1.00	1																																
	1	2	3																																
1	1	1.00	5.00																																
2	1.00	1	5.00																																
3	0.20	0.20	1																																
Criterion: C26	Decision Matrix	Criterion: C30	Decision Matrix																																
Pairwise comparisons for: 1 = Poteau En Composite(A1) 2 = Enfouissement Des Lignes(A2) 3 = Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)	<table border="1"> <tr> <td></td><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr> <tr> <td>1</td><td>1</td><td>1.00</td><td>1.00</td></tr> <tr> <td>2</td><td>1.00</td><td>1</td><td>1.00</td></tr> <tr> <td>3</td><td>1.00</td><td>1.00</td><td>1</td></tr> </table>		1	2	3	1	1	1.00	1.00	2	1.00	1	1.00	3	1.00	1.00	1	Pairwise comparisons for: 1 = Poteau En Composite(A1) 2 = Enfouissement Des Lignes(A2) 3 = Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)	<table border="1"> <tr> <td></td><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr> <tr> <td>1</td><td>1</td><td>9.00</td><td>9.00</td></tr> <tr> <td>2</td><td>0.11</td><td>1</td><td>1.00</td></tr> <tr> <td>3</td><td>0.11</td><td>1.00</td><td>1</td></tr> </table>		1	2	3	1	1	9.00	9.00	2	0.11	1	1.00	3	0.11	1.00	1
	1	2	3																																
1	1	1.00	1.00																																
2	1.00	1	1.00																																
3	1.00	1.00	1																																
	1	2	3																																
1	1	9.00	9.00																																
2	0.11	1	1.00																																
3	0.11	1.00	1																																
Criterion: C27	Decision Matrix	Criterion: C31	Decision Matrix																																
Pairwise comparisons for: 1 = Poteau En Composite(A1) 2 = Enfouissement Des Lignes(A2) 3 = Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)	<table border="1"> <tr> <td></td><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr> <tr> <td>1</td><td>1</td><td>1.00</td><td>1.00</td></tr> <tr> <td>2</td><td>1.00</td><td>1</td><td>1.00</td></tr> <tr> <td>3</td><td>1.00</td><td>1.00</td><td>1</td></tr> </table>		1	2	3	1	1	1.00	1.00	2	1.00	1	1.00	3	1.00	1.00	1	Pairwise comparisons for: 1 = Poteau En Composite(A1) 2 = Enfouissement Des Lignes(A2) 3 = Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)	<table border="1"> <tr> <td></td><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr> <tr> <td>1</td><td>1</td><td>3.00</td><td>7.00</td></tr> <tr> <td>2</td><td>0.33</td><td>1</td><td>5.00</td></tr> <tr> <td>3</td><td>0.14</td><td>0.20</td><td>1</td></tr> </table>		1	2	3	1	1	3.00	7.00	2	0.33	1	5.00	3	0.14	0.20	1
	1	2	3																																
1	1	1.00	1.00																																
2	1.00	1	1.00																																
3	1.00	1.00	1																																
	1	2	3																																
1	1	3.00	7.00																																
2	0.33	1	5.00																																
3	0.14	0.20	1																																
Criterion: C28	Decision Matrix	Criterion: C32	Decision Matrix																																
Pairwise comparisons for: 1 = Poteau En Composite(A1) 2 = Enfouissement Des Lignes(A2) 3 = Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)	<table border="1"> <tr> <td></td><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr> <tr> <td>1</td><td>1</td><td>9.00</td><td>9.00</td></tr> <tr> <td>2</td><td>0.11</td><td>1</td><td>1.00</td></tr> <tr> <td>3</td><td>0.11</td><td>1.00</td><td>1</td></tr> </table>		1	2	3	1	1	9.00	9.00	2	0.11	1	1.00	3	0.11	1.00	1	Pairwise comparisons for: 1 = Poteau En Composite(A1) 2 = Enfouissement Des Lignes(A2) 3 = Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)	<table border="1"> <tr> <td></td><td>1</td><td>2</td><td>3</td></tr> <tr> <td>1</td><td>1</td><td>5.00</td><td>5.00</td></tr> <tr> <td>2</td><td>0.20</td><td>1</td><td>2.00</td></tr> <tr> <td>3</td><td>0.20</td><td>0.50</td><td>1</td></tr> </table>		1	2	3	1	1	5.00	5.00	2	0.20	1	2.00	3	0.20	0.50	1
	1	2	3																																
1	1	9.00	9.00																																
2	0.11	1	1.00																																
3	0.11	1.00	1																																
	1	2	3																																
1	1	5.00	5.00																																
2	0.20	1	2.00																																
3	0.20	0.50	1																																

Figure 5-15 : la matrice de comparaison par paire des alternatifs par rapport aux sous-critères C25 à C32

5.3.2 Résultat de l'analyse par l'AHP-Software

L'utilisation de l'AHP-Software, qui applique la méthode de l'Analytic Hierarchy Process (AHP), permet une évaluation objective et hiérarchisée des critères en se basant sur des jugements relatifs.

En effet, cette approche permet d'obtenir une évaluation cohérente et transparente, simplifiant la comparaison entre différentes options et la sélection des meilleures mesures d'adaptation en se basant sur les critères essentiels.

Par conséquent, les données recueillies à partir du questionnaire de quantification des critères sont traitées et des calculs complexes sont effectués (voir Figure 5-16 : Décision hiérarchique par l'AHP-Software du cas étudié). Ainsi, les résultats de cette analyse réalisée avec l'AHP-Software fournissent une perspective impartiale et détaillée sur les meilleures mesures d'adaptation pour les poteaux électriques dans la région de l'Outaouais. Ils constituent une base solide pour prendre

des décisions éclairées, en identifiant les options les plus efficaces et les plus appropriées pour la traversée de la rivière Paugan.

Decision Hierarchy						
Level 0	Level 1	Level 2	Glb Prio.	Poteau En Composi te(A1)	Enfouiss ement Des Lignes(A 2)	Inspectio n Plus Fréquent e Poteaux De Bois(A3)
		C1 0.167	2.3%	0.818	0.091	0.091
		C2 0.167	2.3%	0.818	0.091	0.091
	TECHNIQUE 0.135	C3 0.167	2.3%	0.748	0.143	0.109
		C4 0.167	2.3%	0.333	0.333	0.333
		C5 0.167	2.3%	0.498	0.367	0.135
		C6 0.167	2.3%	0.498	0.367	0.135
		C7 0.200	4.4%	0.769	0.104	0.127
	ENVIRONNEMENTALES 0.220	C8 0.200	4.4%	0.474	0.474	0.053
		C9 0.200	4.4%	0.818	0.091	0.091
		C10 0.200	4.4%	0.333	0.333	0.333
		C11 0.200	4.4%	0.333	0.333	0.333
		C12 0.818	31.0%	0.714	0.143	0.143
	SANTE ET SECURITE 0.379	C13 0.091	3.4%	0.714	0.143	0.143
		C14 0.091	3.4%	0.333	0.333	0.333
		C15 0.352	2.2%	0.467	0.467	0.067
	GOUVERNANCE ET PLANIFICATION 0.063	C16 0.166	1.0%	0.467	0.467	0.067
		C17 0.094	0.6%	0.333	0.333	0.333
		C18 0.243	1.5%	0.333	0.333	0.333
		C19 0.064	0.4%	0.333	0.333	0.333
		C20 0.081	0.5%	0.333	0.333	0.333
		C21 0.333	2.1%	0.333	0.333	0.333
	INFORMATION ET COMMUNICATION 0.063	C22 0.333	2.1%	0.333	0.333	0.333
		C23 0.333	2.1%	0.333	0.333	0.333
		C24 0.250	1.3%	0.333	0.333	0.333
	SOCIAL 0.054	C25 0.250	1.3%	0.333	0.333	0.333
		C26 0.250	1.3%	0.333	0.333	0.333
		C27 0.250	1.3%	0.333	0.333	0.333
		C28 0.200	1.7%	0.818	0.091	0.091
	ECONOMIQUE 0.087	C29 0.200	1.7%	0.455	0.455	0.091
		C30 0.200	1.7%	0.818	0.091	0.091
		C31 0.200	1.7%	0.649	0.279	0.072
		C32 0.200	1.7%	0.709	0.179	0.113
			1.0	58.5%	23.4%	18.1%

Figure 5-16 : Décision hiérarchique par l'AHP-Software du cas étudié

Les résultats de l'analyse des 32 critères révèlent des variations significatives dans les priorités attribuées aux alternatives (A1) le remplacement des poteaux en bois par des poteaux en composite (A2) l'enfouissement des lignes et (A3) une inspection plus fréquente des poteaux de bois (voir les Figure 6-1, Figure 6-2, Figure 6-3 et Figure 6-4 pour les variations significatives dans les priorités attribuées aux alternatives A1, A2 et A3 des 32 critères dans l'ANNEXE E : Priorité des alternatifs par rapport aux sous critères).

En effet, pour certains critères tels que C1 (Accessibilité aux installations et infrastructure critique), C2 (Faisabilité et facilité de réalisation), C9 (Paramètre du sol/terrain), C28 (Coût projet/ investissement) et C30 (Rentabilité), l'alternative A1 (le remplacement des poteaux en bois par des poteaux en composite) se démarquent clairement avec une priorité de 81,8 %, tandis que les alternatives A2 (l'enfouissement des lignes) et A3 (une inspection plus fréquente des poteaux de bois) obtiennent des priorités moins élevées de 9,1 %. De même, les critères C3 (Durée de vie des installations) et C12 (Santé humaine) montrent une préférence marquée pour l'alternative A1 (le remplacement des poteaux en bois par des poteaux en composite) avec des priorités respectives de 74,8 % et 71,4 %.

En revanche, le critère C8 (Résistance aux conditions météorologiques critiques) révèle une préférence partagée entre les alternatives A1 (le remplacement des poteaux en bois par des poteaux en composite) et A2 (l'enfouissement des lignes), qui obtiennent toutes deux une priorité de 47,4 %, tandis que l'alternative A3 (une inspection plus fréquente des poteaux de bois) obtient une priorité plus faible de 5,3 %. Pour d'autres critères tels que C4 (Fiabilité des installations), C5 (Taux de défaillance), C6 (Fréquence de défaillance), C10 (Impact visuel et sonore), C11 (Réduction des émissions) et C14 (Perception et gravité des risques), les trois alternatives obtiennent des priorités égales de 33,3 %, indiquant une préférence équilibrée entre elles. Ces résultats mettent en évidence l'importance d'analyser les critères spécifiques pour déterminer les meilleures mesures d'adaptation pour les poteaux électriques dans la région de l'Outaouais, en tenant compte des variations de priorités selon les aspects évalués.

Les résultats de l'analyse réalisée à l'aide du logiciel AHP révèlent une nette préférence en faveur de l'alternative A1, qui consiste à remplacer des poteaux en bois par des poteaux en composite, avec une priorité globale de 58,5 % par rapport aux autres alternatives. En comparaison, les alternatives A2 (enfouissement des lignes) et A3 (inspection plus fréquente des poteaux en bois)

obtiennent respectivement des priorités de 23,4 % et 18,1 % (voir Figure 5-17 : Priorité globale des alternatifs par rapport aux critères niveau 1 et 2). Ces résultats démontrent que l'utilisation de poteaux en composite est considérée comme étant la meilleure option en termes de fiabilité et de durabilité pour les poteaux électriques dans la région.

De plus, le coefficient de cohérence (CR_{max}) de 9,8 % (<10 %) indique une cohérence acceptable des évaluations réalisées lors de l'analyse. Ces résultats confirment ainsi l'efficacité potentielle de l'alternative A1 (le remplacement des poteaux en bois par des poteaux en composite) dans l'adaptation du réseau électrique de la région de l'Outaouais, en assurant une stabilité accrue et une plus grande durée de vie des poteaux électriques.

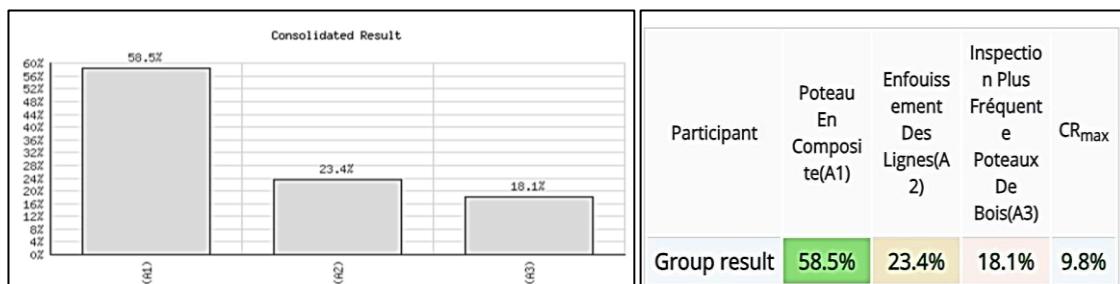


Figure 5-17 : Priorité globale des alternatives par rapport aux critères niveau 1 et 2

En résumé, les résultats globaux concernant les priorités des alternatives A1 (le remplacement des poteaux en bois par des poteaux en composite), A2 (enfouissement des lignes) et A3 (inspection plus fréquente des poteaux en bois) indiquent une préférence dominante pour l'alternative A1, avec des priorités spécifiques (qui font référence aux pondérations ou valeurs attribuées à des sous-critères ou à des alternatives spécifiques à l'intérieur de chaque critère) élevées pour plusieurs critères clés.

Néanmoins, il convient de noter que certaines alternatives ont également atteint une priorité significative pour des critères spécifiques. Ces résultats soulignent la nécessité de prendre en compte tous les critères dans la détermination des meilleures mesures d'adaptation pour les poteaux électriques dans la région de l'Outaouais.

5.4 Analyse de sensibilité

Dans le prolongement de cette recherche, l'analyse de sensibilité est entreprise pour mieux comprendre comment les variations des paramètres clés peuvent potentiellement influencer les résultats. Cette démarche vise à renforcer la confiance dans les décisions en identifiant les zones de vulnérabilité de la méthode AHP, et d'explorer différentes perspectives pour des décisions plus robustes et éclairées.

5.4.1 Définition

L'analyse de sensibilité, telle qu'expliquée par Saltelli et al. et étant réadaptée à ce cas, implique l'étude des interactions entre les principaux critères de l'AHP et leurs poids respectifs (Muma, Gumiere, & Rousseau, 2014; Saltelli, Chan, & Scott, 2000).

Cette approche permet de mieux comprendre comment les fluctuations de ces pondérations peuvent affecter les décisions finales de l'AHP. En scrutant attentivement la réaction de la méthode aux modifications des poids, l'analyse confirme la cohérence de l'AHP avec la réalité. Elle permet également d'évaluer l'impact potentiel de chaque poids sur le classement de l'AHP et de juger de la robustesse des capacités décisionnelles.

D'un autre côté, Nearing et al. suggèrent que l'ajustement des valeurs clés des paramètres (dans ce cas-ci des poids) dans une plage spécifique offre un moyen d'évaluer la solidité de la prise de décision (Muma et al., 2014; Nearing, Deer-Ascough, & Laflen, 1990). Tandis que Meier et ses collaborateurs notent que l'analyse de sensibilité est couramment utilisée pour déterminer l'importance relative de la collecte et de la formalisation des données nécessaires à l'alimentation du modèle (ici l'AHP) (Meier, Weiss, Puentes, & Moseley, 1971).

En fin de compte, cette analyse renforce la confiance dans le modèle (l'AHP) et dans les décisions qu'il génère en fournissant une meilleure compréhension de la manière dont il réagit face aux variations des paramètres (poids relatifs des critères)(Muma et al., 2014; Tarantola & Saltelli, 2003).

5.4.2 Mise en œuvre de l'analyse sensibilité

Dans le cadre de cette étude, l'analyse de sensibilité est menée de la manière suivante :

1- Identification des paramètres sensibles

Tout d'abord, l'accent est mis sur l'identification des paramètres qui nécessitent une analyse de sensibilité. Cela comprend l'identification des composants cruciaux dans l'analyse AHP exerçant une influence remarquable sur les décisions finales (Saltelli, Tarantola, & Campolongo, 2000). Ces paramètres sensibles comprennent les pondérations des critères, les évaluations des alternatives ou les valeurs des matrices de comparaison par paires d'arches qui consistent à exercer une influence significative sur les priorités accordées aux alternatives, compte tenu de l'importance des pondérations des critères individuels. L'analyse de sensibilité permet de visualiser les variations potentielles dans les résultats finaux si les pondérations des critères avaient été différentes. À l'aide de cette évaluation, il devient évident comment des ajustements dans les pondérations des critères majeurs (niveau 1) pourraient avoir un impact sur la hiérarchisation des diverses alternatives (Mohamed & Mahfoudh, 2022).

Par conséquent, les paramètres sensibles ont été identifiés en examinant attentivement les pondérations relatives de certains de ces critères : tels que la santé et la sécurité du travail et l'environnement et la technique qui ont été mis en avant en raison de leur pertinence significative par rapport à l'objectif global, ainsi que les critères économique et social, en raison de leurs pondérations relativement basses par rapport à cet objectif.

2- Crédit de scénarios

Une fois les paramètres nécessitant une analyse de sensibilité identifiés, la création de scénarios prenant en compte cette sensibilité devient essentielle. Cela implique la définition d'une plage de valeurs plausibles pour ces paramètres (Muma et al., 2014; Nearing et al., 1990), obtenue en ajustant les poids des critères, qui sont le cas de cette analyse, ou en modifiant les valeurs attribuées aux comparaisons par paires.

De ce fait, une augmentation graduelle de l'importance de certains critères sensibles par rapport aux autres a été entreprise, jusqu'à ce qu'ils représentent respectivement 10 % (dans le premier cas pour chaque critère) et 50 % (dans le deuxième cas) de la contribution globale à l'objectif.

À l'heure actuelle, la somme des pondérations attribuées à l'ensemble des critères demeure inférieure à 50 % de l'importance totale de l'objectif (Mohamed & Mahfoudh, 2022). En partant du scénario initial, les scénarios de l'analyse de sensibilité, liés à la modification du poids des critères, sont élaborés en ajustant un critère à la fois (Mohamed & Mahfoudh, 2022). Par conséquent, un total de 11 scénarios distincts sont obtenus (voir Tableau 5-1 ci-dessous) :

- Scénario 1 : initial;
- Scénario 2 : Analyse de sensibilité par rapport au critère santé et sécurité du travail à 10 %;
- Scénario 3 : Analyse de sensibilité par rapport au critère santé et sécurité du travail à 50 % ;
- Scénario 4 : Analyse de sensibilité par rapport au critère environnementale 10 %;
- Scénario 5 : Analyse de sensibilité par rapport au critère environnementale à 50 %;
- Scénario 6 : Analyse de sensibilité par rapport au critère technique 10 %;
- Scénario 7 : Analyse de sensibilité par rapport au critère technique à 50 %;
- Scénario 8 : Analyse de sensibilité par rapport au critère économique 10 %;
- Scénario 9 : Analyse de sensibilité par rapport au critère économique à 50 %;
- Scénario 10 : Analyse de sensibilité par rapport au critère social 10 %;
- Scénario 11 : Analyse de sensibilité par rapport au critère social à 50 %.

Tableau 5-1 : Scénarios de l'analyse de sensibilité

SCÉNARIOS		VARIATIONS	SST	ENV	TEC	GOUV	INFO	ECO	SOCIAL	TOTAL POIDS
INITIAL		0 %	0,379	0,220	0,135	0,063	0,063	0,087	0,054	1
SST	2	10 %	0,100	0,319	0,196	0,091	0,091	0,126	0,078	1
	3	50 %	0,500	0,177	0,109	0,050	0,050	0,070	0,043	1
ENV	4	10 %	0,437	0,100	0,156	0,072	0,072	0,100	0,062	1
	5	50 %	0,243	0,500	0,087	0,040	0,040	0,056	0,035	1
TEC	6	10 %	0,394	0,229	0,100	0,065	0,065	0,091	0,056	1
	7	50 %	0,219	0,127	0,500	0,036	0,036	0,050	0,031	1
ECO	8	10 %	0,374	0,217	0,133	0,062	0,062	0,100	0,053	1
	9	50 %	0,208	0,120	0,074	0,034	0,034	0,500	0,030	1
SOCIAL	10	10 %	0,361	0,209	0,128	0,059	0,059	0,083	0,100	1
	11	50 %	0,200	0,116	0,071	0,033	0,033	0,046	0,500	1

Il est évident que si le poids d'un critère augmente plus que les autres critères, alors la réduction de ces derniers est proportionnelle, puisque la somme totale des poids demeure constamment égale à 1 (Saaty et al., 1984). Par conséquent, la normalisation du reste des critères afin de garder le total des poids égal à 1 est :

- Pour 10 % : nouveau poids du critère = $(\text{Poids actuel du critère} / \text{Somme totale des poids actuels}) * (1 - 0,10)$
- Pour 50 % : nouveau poids du critère = $\text{Poids actuel du critère} / (\text{Somme totale des poids actuels sans le critère à varier} - (\text{Poids actuel du critère à varier} - 0,5) + 0,5)$

3- Résultats du modèle AHP pour chaque scénario

Après avoir défini des valeurs de paramètres spécifiques, les résultats du modèle AHP sont recalculés pour chaque combinaison de ces valeurs dans le logiciel AHP Online System - AHP-OS. Ce recalculation nécessite la résolution du modèle AHP en utilisant les valeurs de paramètres mises à jour et de réinclure des réponses du questionnaire pour chaque sous-critère.

- Scénario 1 : Dans le scénario de référence, les poids des critères sont fixés à leurs valeurs initiales, sans aucune variation. Les priorités des alternatives sont les suivantes A1 (58,5 %), A2 (23,4 %), A3 (18,1 %).
- Scénario 2 : Analyse de sensibilité par rapport au critère santé et sécurité du travail à 10 %. (Voir Tableau 5-1 : Scénarios de l'analyse de sensibilité scénarios 2)

Dans ce premier scénario, le poids du critère SST est fixé à 10 %. Les nouvelles priorités des alternatives sont A1 (54,30 %), A2 (26,70 %), A3 (19 %).

Le résultat (voir Figure 5-18) démontre que l'augmentation de SST a réduit la priorité d'A1 tout en augmentant légèrement celles d'A2 et d'A3.

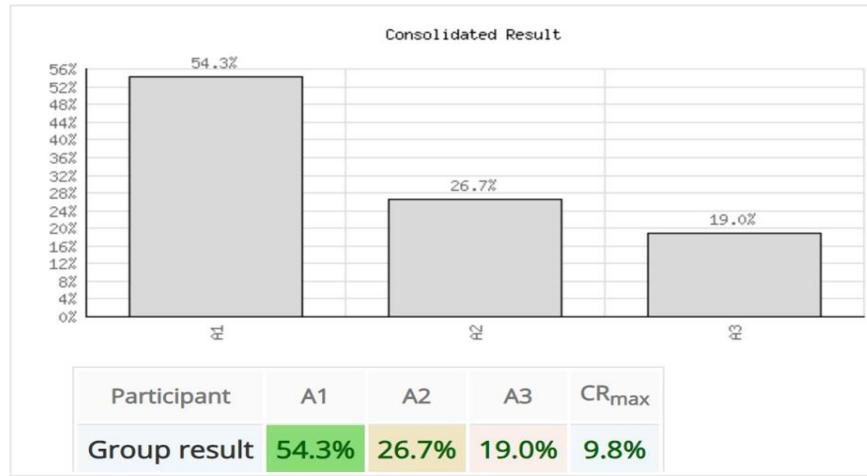


Figure 5-18 : Résultat de l'analyse AHP pour le critère SST à 10 %

- Scénario 3 : Analyse de sensibilité par rapport au critère santé et sécurité du travail à 50 % (voir Tableau 5-1 : Scénarios de l'analyse de sensibilité, scénarios 3).

En poursuivant les variations de poids, le poids de SST est augmenté à 50 %. Les nouvelles priorités des alternatives se répartissent comme suit A1 (60,40 %), A2 (21,90 %), A3 (17,70 %). Cette augmentation importante de SST a fortement accru la priorité d'A1, reléguant les deux autres alternatives en arrière-plan (voir Figure 5-19).



Figure 5-19 : Résultat de l'analyse AHP pour le critère SST à 50 %

- Scénario 4 : Analyse de sensibilité par rapport au critère environnementale 10 %. (Voir Tableau 5-1 : Scénarios de l'analyse de sensibilité scénarios 4)

Dans ce scénario, le poids du critère environnemental est augmenté à 10 %. L'augmentation de ce critère a légèrement augmenté la priorité d'A1 (59,10 %), tout en réduisant légèrement celles d'A2 (22,90 %) et d'A3 (18 %) (voir Figure 5-20).

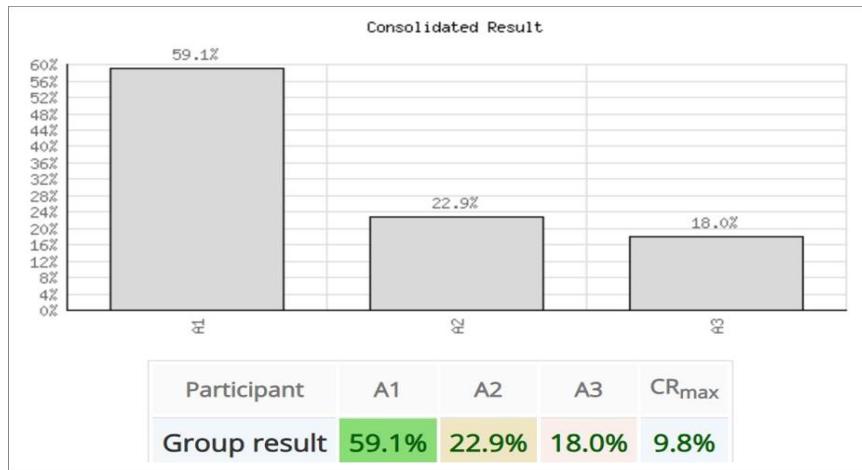


Figure 5-20 : Résultat de l'analyse AHP pour le critère environnemental à 10 %

- Scénario 5 : Analyse de sensibilité par rapport au critère environnementale à 50 % (voir Tableau 5-1 : Scénarios de l'analyse de sensibilité, scénarios 5).

En augmentant le poids du critère environnemental à 50 %, les nouvelles priorités des alternatives deviennent A1 (57,10 %), A2 (24,60 %), A3 (18,30 %). Cette variation significative du poids a augmenté les priorités d'A1 et d'A2, tout en diminuant légèrement celle d'A3 (voir Figure 5-21).



Figure 5-21 : Résultat de l'analyse AHP pour le critère environnemental à 50 %

- Scénario 6 : Analyse de sensibilité par rapport au critère technique 10 % (voir Tableau 5-1 : Scénarios de l'analyse de sensibilité scénarios 6)

Une fois les données introduites, les résultats obtenus sont les suivants A1 (58,40 %), A2 (23,40 %), A3 (18,20 %). Une augmentation légère de la priorité d'A1 avec un maintien des priorités d'A2 et d'A3 relativement stables est remarquée (voir Figure 5-22).



Figure 5-22 : Résultat de l'analyse AHP pour le critère technique à 10 %

- Scénario 7 : Analyse de sensibilité par rapport au critère technique à 50 % (voir Tableau 5-1 : Scénarios de l'analyse de sensibilité, scénarios 7)

En augmentant de manière significative, le poids du critère technique à 50 %, la priorité d'A1 (59,90 %) a considérablement augmenté tout en réduisant celles d'A2 (23,30 %) et d'A3 (16,80 %) (voir Figure 5-23).

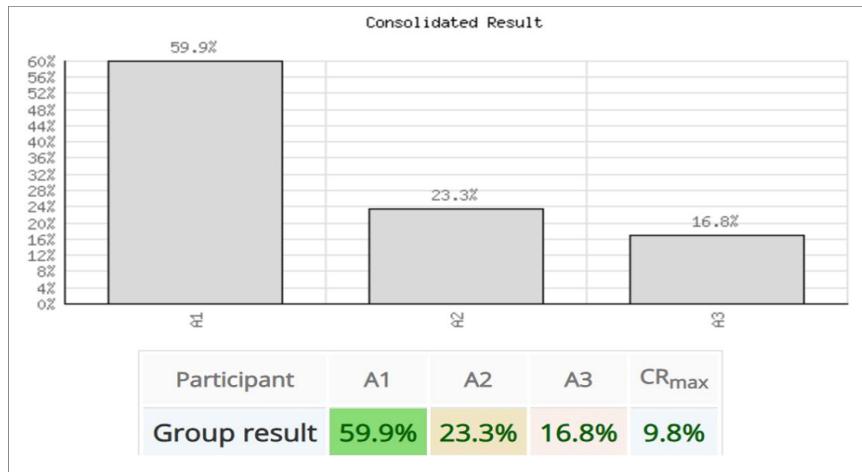


Figure 5-23 : Résultat de l'analyse AHP pour le critère technique à 50 %

- Scénario 8 : Analyse de sensibilité par rapport au critère économique 10 % (voir Tableau 5-1 : Scénarios de l'analyse de sensibilité, scénarios 8).

Dans ce scénario, le poids du critère économique est fixé à 10 %, ce qui a légèrement augmenté la priorité d'A1 (58,70 %) tout en maintenant les priorités d'A2 (23,40 %), et d'A3 (18 %) relativement stables (voir Figure 5-24).



Figure 5-24 : Résultat de l'analyse AHP pour le critère économique à 10 %

- Scénario 9 : Analyse de sensibilité par rapport au critère économique à 50 % (voir Tableau 5-1 : Scénarios de l'analyse de sensibilité, scénarios 9).

L'augmentation de manière significative du poids du critère économique à 50 %, a fortement accru la priorité d'A1 au détriment des deux autres alternatives. Ainsi, les nouvelles priorités des alternatives deviennent A1 (63,30 %), A2 (22,70 %) et A3 (14,10 %) (voir Figure 5-25).



Figure 5-25 : Résultat de l'analyse AHP pour le critère économique à 50 %

- Scénario 10 : Analyse de sensibilité par rapport au critère social 10 % (voir Tableau 5-1 : Scénarios de l'analyse de sensibilité, scénarios 10).

Dans ce scénario, le poids du critère social est fixé à 10 %. Cette augmentation du poids du critère social a légèrement rehaussé la priorité d'A1(57,30 %), tout en maintenant les priorités d'A2 (23,90 %) et d'A3 (18,80 %) relativement stables (voir Figure 5-26).

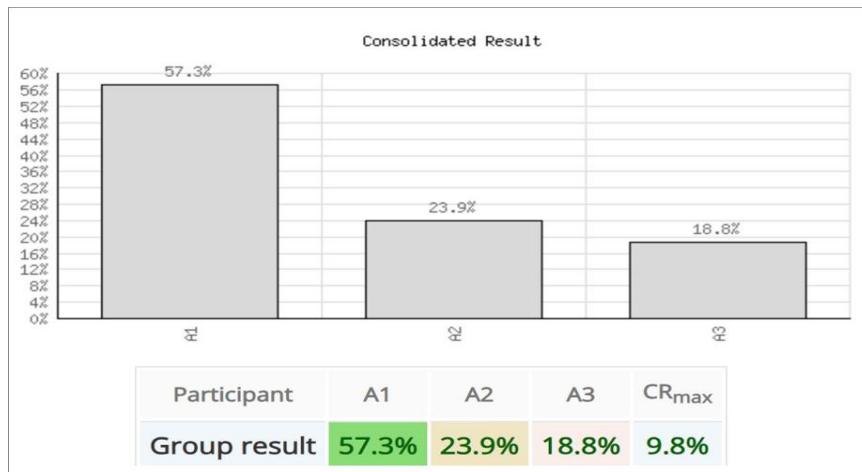


Figure 5-26 : Résultat de l'analyse AHP pour le critère social à 10 %

- Scénario 11 : Analyse de sensibilité par rapport au critère social à 50 % (voir Tableau 5-1 : Scénarios de l'analyse de sensibilité, scénarios 11).

En augmentant de manière significative le poids du critère social à 50 %, les nouvelles priorités des alternatives évoluent comme suit A1 (46,60 %), A2 (28,10 %), A3 (25,30 %). Cette augmentation substantielle du poids du critère social a nettement diminué la priorité d'A1 tout en augmentant de manière significative celles d'A2 et d'A3 (voir Figure 5-27).

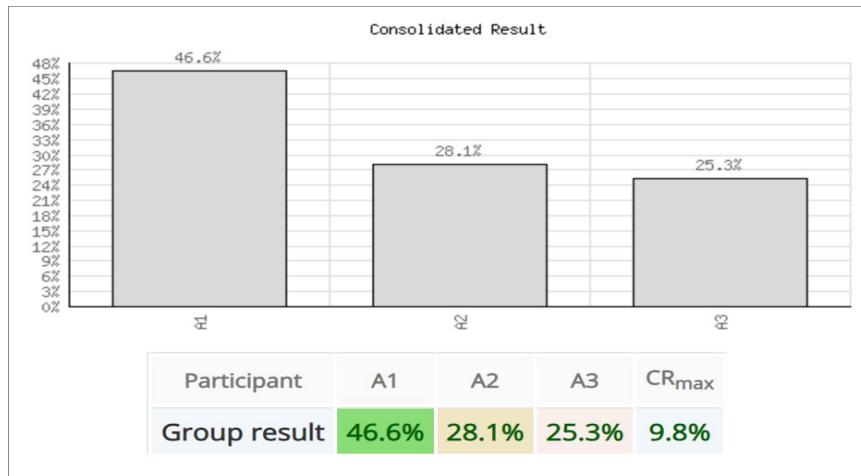


Figure 5-27 : Résultat de l'analyse AHP pour le critère social à 50 %

4- Analyse et interprétation des résultats

Enfin, une analyse et interprétation des résultats obtenus dans chaque scénario de sensibilité est entreprise. Notamment l'identification des tendances et des effets des variations de paramètres sensibles sur les décisions finales est cruciale.

Dans cette optique, l'analyse de sensibilité réalisée via différents scénarios dans le cadre de l'Analyse hiérarchique des Processus (AHP) a permis de mettre en évidence l'impact significatif que peuvent avoir de légères variations dans les poids des critères sur les priorités des alternatives. Cette exploration démontre l'importance cruciale de la prise en compte de la sensibilité des résultats dans le processus de prise de décision, mais aussi, d'évaluer la force et la stabilité des décisions face aux incertitudes ou aux variations au sein du modèle AHP. Ainsi, cette partie présente les variations de poids des critères majeurs sélectionnés et leurs impacts sur les priorités des alternatives A1 (le remplacement des poteaux en bois par des poteaux en composite), A2

(l'enfouissement des lignes) et A3 (une inspection plus fréquente des poteaux de bois) (voir Tableau 5-2 : résultats de l'analyse de sensibilité pour chaque scénario).

Tableau 5-2 : résultats de l'analyse de sensibilité pour chaque scénario

SCÉNARIOS		VARIATIONS	A1	A2	A3
INITIAL		0 %	58,5%	23,4 %	18,1 %
SST	2	10 %	54,30 %	26,70 %	19,00 %
	3	50 %	60,40 %	21,90 %	17,70 %
ENV	4	10 %	59,10 %	22,90 %	18,00 %
	5	50 %	57,10 %	24,60 %	18,30 %
TEC	6	10 %	58,40 %	23,40 %	18,20 %
	7	50 %	59,90 %	23,30 %	16,80 %
ECO	8	10 %	58,70 %	23,40 %	18,00 %
	9	50 %	63,30 %	22,70 %	14,10 %
SOCIAL	10	10 %	57,30 %	23,90 %	18,80 %
	11	50 %	46,60 %	28,10 %	25,30 %

Dans le scénario initial, les priorités des alternatives étaient établies avec A1 (le remplacement des poteaux en bois par des poteaux en composite) à 58,5 %, A2 (l'enfouissement des lignes) à 23,4 % et A3 (une inspection plus fréquente des poteaux de bois) à 18,1 %. Cela représentait la base de référence à partir de laquelle est entreprise une série de scénarios de variations de poids pour chaque critère.

La variation à 10 % dans le poids du critère SST a légèrement réduit la priorité d'A1, illustrant la sensibilité des résultats aux changements de pondération. Cependant, lorsque cette augmentation de pondération a été poussée à 50 %, la priorité d'A1 a considérablement augmenté, dominant les autres alternatives. Ceci met en évidence l'effet exponentiel des variations importantes dans les pondérations.

De même, les variations de poids dans les critères environnementaux, techniques, économiques et sociaux ont eu des impacts notables sur les priorités des alternatives. Par exemple, une augmentation de 50 % du poids du critère social a largement diminué la priorité d'A1 à 46,60 % tout en favorisant A2 à 28,10 % et A3 à 25,30 % soulignant l'importance de l'équilibre entre les critères dans la prise de décision. Toutefois, malgré une diminution significative de la priorité

d'A1 à 46,60 %, due à une augmentation de 50 % du poids attribué au critère social, cette alternative reste toujours la meilleure option. (Voir Figure 5-28).

En conclusion, cette analyse de sensibilité met en évidence la nécessité pour les décideurs d'examiner attentivement les pondérations des critères dans le cadre de l'AHP. De petites variations peuvent avoir un impact significatif sur les priorités des alternatives, ce qui peut entraîner des conséquences importantes dans le choix final.

Il est essentiel de maintenir un équilibre entre les critères pour éviter des distorsions excessives et garantir des décisions éclairées et équilibrées.

Le graphe de la Figure 5-28 résume cette analyse de sensibilité :

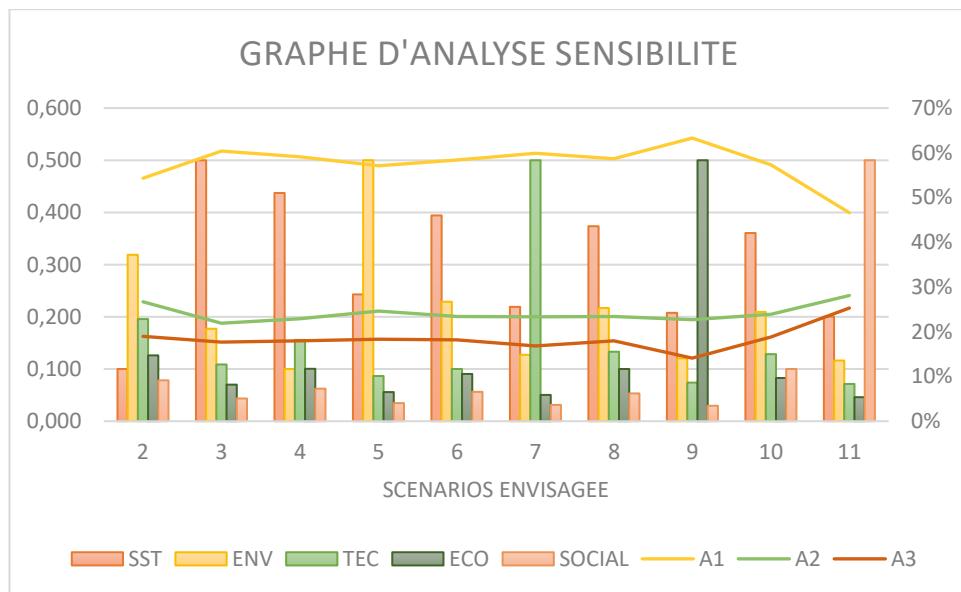


Figure 5-28 : graphe de comparaison des différents scénarios d'analyse de sensibilité et leurs résultats

Les critères sont disposés le long de l'axe horizontal (x) du graphique, représentant chacun des critères SST (Santé et Sécurité du Travail), ENV (Environnement), TEC (Technique), GOUV (Gouvernance et Planification), INFO (Information et Communication), ECO (économique) et SOCIAL. Chaque critère est associé à une barre sur l'axe horizontal. Les valeurs de poids, qui leur sont attribuées, sont affichées sur l'axe vertical (y) du graphique.

Par ailleurs, chaque ligne tracée pour les alternatives A1 (le remplacement des poteaux de bois par des poteaux en composite), A2 (enfouissement des lignes) et A3 (inspection plus fréquente des poteaux en bois) évolue verticalement pour illustrer les pourcentages respectifs attribués à chaque alternative en réponse aux variations des critères.

Dans ce graphe, les variations observées dans les pourcentages attribués aux alternatives A1, A2 et A3 à la suite des changements des critères tels que SST, ENV, TEC, ECO et SOCIAL soulignent des tendances distinctes dans leurs priorités respectives. Par exemple, lorsque le critère SST augmente de 50 %, le pourcentage attribué à A1 augmente de façon notable, tandis que celui d'A2 diminue légèrement et celui d'A3 reste relativement stable. Ces variations reflètent l'impact différentiel des changements de critères sur les préférences relatives entre les alternatives, soulignant ainsi l'importance de chaque critère dans la pondération finale des alternatives.

5.5 Conclusion

Après avoir accompli les étapes précédentes, il est maintenant possible de procéder à la prise de décision, marquant ainsi la phase finale de l'analyse AHP.

Les scénarios de sensibilité ont clairement mis en évidence l'impact significatif que de légères modifications des pondérations des critères peuvent avoir sur les priorités des alternatives. Ces variations ont été minutieusement explorées pour les critères SST, environnemental, technique, économique et social, mettant en évidence l'importance d'équilibrer la pondération des critères.

À la lumière de ces variations, A1 demeure la meilleure option parmi les alternatives. Dans la situation de départ, il détenait la priorité la plus élevée, et même lorsque les pondérations des critères ont été ajustées de manière significative, A1 a conservé son avantage.

CHAPITRE 6 CONCLUSION

6.1 Synthèse de recherche

L'analyse méticuleuse des critères et les pondérations démontrent que le remplacement des poteaux en bois par des poteaux en composite (A1) se démarque comme la solution préférée. La considération minutieuse de critères tels que la résilience face aux changements climatiques, la durabilité environnementale et la viabilité économique a guidé cette conclusion. Toutefois, il convient de noter que la prise de décision est une opération complexe influencée par de multiples facteurs (Saaty et al., 1984).

6.2 Contributions scientifiques

Les résultats de l'AHP offrent une fondation solide pour orienter la décision, cependant, il est important de noter que d'autres facteurs tels que les limitations financières, les ressources à disposition et les objectifs particuliers peuvent également avoir un impact sur la conclusion.

En effet, dans ce cas précis, la combinaison des résultats de l'analyse AHP avec une analyse coût-bénéfice approfondie permettra de sélectionner la meilleure mesure d'adaptation pour les poteaux électriques de la région de l'Outaouais, en tenant compte des priorités et des limites budgétaires. Dans ce contexte, l'analyse coût-bénéfice revêt une importance cruciale.

6.3 Limitations de l'étude

Dans le contexte de cette étude, l'analyse coût-bénéfice revêt une importance cruciale. Malheureusement, les données nécessaires pour mener cette analyse de manière approfondie, telle que :

Les poteaux actuels (le nombre total de poteaux en bois actuellement en place, leur état de dégradation et le coût actuel d'entretien et de réparation de ceux-ci), les options de remplacement, les coûts initiaux, les coûts opérationnels, les bénéfices attendus, les coûts liés à la conformité aux réglementations pour chaque option, le taux d'actualisation pour ramener les coûts et les avantages futurs à la valeur actuelle, les données historiques sur la rivière Paugan, concernant tout évènement climatique majeur qui pourrait avoir un impact sur la durabilité des poteaux de bois

ou des options de remplacement, les évaluations des risques et des incertitudes associés aux coûts et aux bénéfices (facteurs de risque spécifiques à chaque option, probabilité des évènements indésirables tels que les tempêtes, les incendies, etc.) et les informations sur d'autres alternatives possibles qui n'ont pas été initialement envisagées, mais pourraient être compétitives, n'ont pas été fournies.

6.4 Impact potentiel sur le choix de l'alternative :

Une analyse coût-bénéfice est nécessaire pour comparer les coûts actuels, les coûts potentiels de remplacement et les avantages anticipés pour chaque option. Cependant, en l'absence de données complètes sur les coûts opérationnels, les bénéfices escomptés, les risques associés et d'autres alternatives potentielles, cette analyse reste incomplète.

Une fois ces données en main, l'analyse des coûts et des avantages pourra être réalisée afin de déterminer la valeur actuelle nette (VAN) de chaque alternative, en soustrayant les coûts courants des bénéfices actuels, ajustés en fonction du taux d'actualisation sélectionné.

De plus, il est crucial de prendre en compte les risques et incertitudes associés à chaque alternative, y compris la probabilité d'évènements indésirables. La comparaison des VAN des différentes options permettra de déterminer la plus favorable du point de vue de l'analyse coût-bénéfice.

L'analyse coût-bénéfice dépend de ces données pour être menée de manière exhaustive et précise. Il est impératif de poursuivre la collecte des données manquantes pour parvenir à une décision définitive et éclairée.

Par conséquent, ces lacunes de données entravent la capacité à déterminer avec précision les valeurs actuelles nettes (VAN) pour chaque option. En conséquence, la décision finale demeure entourée d'un voile d'incertitudes et requiert une approche prudente et réfléchie.

6.5 Conclusion et perspectives

En fin de compte, l'Analyse hiérarchique des processus a fourni une méthode organisée pour évaluer et classer les options de mesure d'adaptation en fonction de divers critères. Cette approche a clairement mis en évidence l'importance de l'analyse de sensibilité dans le processus décisionnel, tout en insistant sur la nécessité de considérer le choix final dans un contexte plus global, en intégrant l'ensemble des informations pertinentes.

En outre, cette étude pionnière, qui a mis en œuvre l'AHP dans le processus de priorisation et de sélection des solutions face au changement climatique pour Hydro-Québec, servira de référence pour les futurs choix de mesures d'adaptation face aux changements climatiques de HQ dans différentes régions du Québec.

RÉFÉRENCES

- (GIEC), G. d. e. i. s. l. é. d. c. (2014). Changements climatiques: incidences, adaptation et vulnérabilité – Résumé à l'intention des décideurs. Contribution du Groupe de travail II au cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Retrieved from https://igm.univ-mlv.fr/~riazano/enseignement/SR-UTA-CONF/UTA-02/WGIIIAR5_SPM_TS_Volume_fr.pdf
- Aalianvari, A., Katibeh, H., & Sharifzadeh, M. (2012). Application of fuzzy Delphi AHP method for the estimation and classification of Ghomrud tunnel from groundwater flow hazard. *Arabian Journal of Geosciences*, 5(2), 275-284.
- Al Garni, H. Z., & Awasthi, A. (2017). Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia. *Applied energy*, 206, 1225-1240.
- Alhamrouni, I., Khairuddin, A. B., Salem, M., & Ismail, B. (2015, 19-20 Oct. 2015). *Analytical hierarchy process for scheduling the priorities of the environmental factors in transmission lines maintenance*. Paper presented at the 2015 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON).
- Alshehri S, R. Y., Li H (2013). Public perception of the risk of disasters in a developing economy: the case of Saudi Arabia. *Nat Hazards*. doi: 65:1813–1830
- Alshehri, S. A., Rezgui, Y., & Li, H. (2015). Disaster community resilience assessment method: a consensus-based Delphi and AHP approach. *Natural Hazards*, 78(1), 395-416. doi:10.1007/s11069-015-1719-5
- André, J. C., Fellous, J. L., & Gautier, C. (2007). *Comprendre le changement climatique*. Paris: O. Jacob.
- A chilean, I., Badea, G., Giurca, I., Naghiu, G. S., & Iloaie, F. G. (2017). Choosing the Optimal Technology to Rehabilitate the Pipes in Water Distribution Systems Using the AHP Method. *Energy Procedia*, 112, 19-26. doi:10.1016/j.egypro.2017.03.1109
- Asro. (2006). Alimentări cu apă. Determinarea cantităților de apă potabilă pentru localități urbane ale (Water supply. Determining the quantities of drinking water for towns and villages); SR 1343-1:2006 In. Bucure ,Romania.
- Association, I. H. (2019). Hydropower sector climate resilience guide. *International Hydropower Association: London, UK*.
- 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*. Université d'Angers,
- Bailey, K. (2006, 29 Oct.-1 Nov. 2006). *Principles of the EP-AMIS GIS/Multicriteria methodology for Participatory Electric Power Transmission Line Routing*. Paper presented at the 2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition.

- Belton, V., & Gear, T. (1983). On a short-coming of Saaty's method of analytic hierarchies. *Omega*, 11(3), 228-230.
- Belton, V., & Stewart, T. (2002). *Multiple criteria decision analysis: an integrated approach*: Springer Science & Business Media.
- Bernier, J.-C., Bréchet, Y., Brasseur, G., Candel, S. b., Cazenave, A., Courtillot, V., . . . Maison de la, c. (2016). *Chimie et changement climatique*. Les Ulis: EDP Sciences.
- Biard, G., & Abdul-Nour, G. (2020). Determining the lifecycle and future replacement cost of distribution network equipment. *Int J Mod Eng Res*, 10(3), 51-60.
- Biloslavov, R., & Dolinsek, S. (2008, 27-31 July 2008). *Scenario planning for climate strategies development by integrating group Delphi, AHP and dynamic fuzzy cognitive maps*. Paper presented at the PICMET '08 - 2008 Portland International Conference on Management of Engineering & Technology.
- Bouyssou, D., Marchant, T., & Perny, P. (2005). Théorie du choix social et aide multicritère à la décision. *Concepts et méthodes pour l'aide à la décision*, 3, 235-270.
- Brans, J., Nadeau, R., & Landry, M. (1982). Élaboration d'instruments d'aide à la décision. Méthode PROMETHEE. *Laide à la Decision: Nature, Instruments et perspectives Davenir, Presses de Université Laval, Québec, Canada*, 183-214.
- Bridgman, P. W. (1922). *Dimensional analysis*: Yale university press.
- Calabrese, A., Costa, R., Levialdi, N., & Menichini, T. (2019). Integrating sustainability into strategic decision-making: A fuzzy AHP method for the selection of relevant sustainability issues. *Technological Forecasting & Social Change*, 139, 155-168. doi:10.1016/j.techfore.2018.11.005
- Canada, g. d. (2019). Optique des changements climatiques – Lignes directrices générales (2019), Infrastructure Canada;. *Infrastructure Canada*. Retrieved from <https://www.infrastructure.gc.ca/pub/other-autre/cl-occ-fra.html>
- Canada.ca, L. s. o. d. g. d. C. (2016). Annexe A: Modèles climatiques. Retrieved from <https://ressources-naturelles.canada.ca/changements-climatiques/impacts-adaptation/annexe-modeles-climatiques/10086>
- Canada.ca, L. s. o. d. g. d. C. (2017). Modèle régional canadien du climat. Retrieved from <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/changements-climatiques/recherche-donnees/modelisation-analyse-climatique/centre-modelisation-analyse/modeles/modele-regional.html>
- canada.ca, L. s. o. d. g. d. C. (2019). Causes des changements climatiques. Retrieved from <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/changements-climatiques/causes.html>
- Chabuk, A. J., Al-Ansari, N., Hussain, H. M., Knutsson, S., & Pusch, R. (2017). GIS-based assessment of combined AHP and SAW methods for selecting suitable sites for landfill in Al-Musayib Qadhaa, Babylon, Iraq. *Environmental Earth Sciences*, 76, 1-12.
- Charron, I. (2016). *Guide sur les scénarios climatiques : Utilisation de l'information climatique pour guider la recherche et la prise de décision en matière*

- d'adaptation.* In Ouranos (Ed.), (2016 ed., pp. 94 p). Retrieved from https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/GuideScenarios2016_FR.pdf
- Chen, B., Wang, J., Wang, L., He, Y., & Wang, Z. (2014). Robust Optimization for Transmission Expansion Planning: Minimax Cost vs. Minimax Regret. *IEEE Transactions on Power Systems*, 29(6), 3069-3077. doi:10.1109/TPWRS.2014.2313841
- Chien, F., Wang, C.-N., Nguyen, V. T., Nguyen, V. T., & Chau, K. Y. (2020). An Evaluation Model of Quantitative and Qualitative Fuzzy Multi-Criteria Decision-Making Approach for Hydroelectric Plant Location Selection. *Energies*, 13(11), 2783. Retrieved from <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/11/2783>
- Ciupăgeanu, D., & Costinas, S. (2017, 19-20 Oct. 2017). *Improving predictive maintenance for HVDC transmission systems through analytic hierarchy process.* Paper presented at the 2017 International Conference on ENERGY and ENVIRONMENT (CIEM).
- Climate_atlas, c. (2019). Projections en matière de changements climatiques. Retrieved from <https://atlasclimatique.ca/projections-en-matiere-de-changements-climatiques>
- Dalkey, N., & Helmer, O. (1963). An experimental application of the Delphi method to the use of experts. *Management science*, 9(3), 458-467.
- Darko, A., Chan, A. P. C., Ameyaw, E. E., Owusu, E. K., Pärn, E., & Edwards, D. J. (2019). Review of application of analytic hierarchy process (AHP) in construction. *International journal of construction management*, 19(5), 436-452.
- Davidson, D. (2021). Changement climatique. *L'Encyclopédie Canadienne*. Retrieved from <https://www.thecanadianencyclopedia.ca/fr/article/changement-climatique>
- Di Angelo, L., Di Stefano, P., Fratocchi, L., & Marzola, A. (2018). An AHP-based method for choosing the best 3D scanner for cultural heritage applications. *Journal of Cultural Heritage*, 34, 109-115.
- Dickinson, R. E. (1995). Land processes in climate models. *Remote Sensing of Environment*, 51(1), 27-38. doi:[https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)00062-R](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)00062-R)
- Doumpos, M., & Zopounidis, C. (2002). Multicriteria Decision Aid Classification Methods. doi:10.1007/b101986
- Drobinski, P. (2015). Modèles globaux ou régionaux : comment zoomer le climat ? Retrieved from <https://interstices.info/modeles-globaux-ou-regionaux-comment-zoomer-le-climat/>
- Ezzabadi, J. H., Saryazdi, M. D., & Mostafaeipour, A. (2015). Implementing Fuzzy Logic and AHP into the EFQM model for performance improvement: A case study. *Applied Soft Computing*, 36, 165-176.
- Florian Elmer, I. S., Heidi Kreibich, and Annegret H. Thielen. (2010). A Delphi Method Expert Survey to Derive Standards for Flood Damage Data Collection. *Risk Analysis*, 30(1), 107-124.
- Gagné, M. (2017). Changements climatiques-Vulnérabilité et adaptation des immeubles-Répertoire des guides de planification immobilière.

- Geoffrion, A. M., Dyer, J. S., & Feinberg, A. (1972). An interactive approach for multi-criterion optimization, with an application to the operation of an academic department. *Management science*, 19(4-part-1), 357-368.
- Godard, A., & Tabeaud, M. (2004). *LES CLIMATS Mécanismes, Variabilités, Répartition* (A. Colin Ed. 4e ed.).
- Goepel, K. D. (2018). Implementation of an online software tool for the analytic hierarchy process (AHP-OS). *International journal of the analytic hierarchy process*, 10(3).
- González, A., Rodríguez, J., Fernández, F., Blanco, G., & Oxilia, V. (2019, 13-27 Nov. 2019). *Multi-criteria Analysis of the Expansion Plan of the Transmission System of Paraguay*. Paper presented at the 2019 IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON).
- Goosse, h., barriat, p.-y., loutre, m.-f., & zunn, v. (2010). *Introduction to climate dynamics and climate modeling*: Centre de recherche sur la Terre et le climat Georges Lemaître-UCLouvain.
- Guesdon, G. (2011). Méthodes et outils d'aide multicritère à la décision-Comparaison de Saaty. 5e, Cours d'évaluation des impacts environnementaux (EIE). *Faculté des sciences et de génie, Université Laval*.
- Guitouni, A., Bélanger, M., & Martel, J. (2010). *Cadre méthodologique pour différencier les méthodes multicritères*: Defence [sic] R&D pour la défense [sic] Canada-Valcartier.
- Guitouni, A., Martel, J.-M., & Vincke, P. (1999). *Un cadre de référence pour le choix d'une procédure d'agrégation multicritère*: Faculté des sciences de l'administration de l'Université Laval, Direction de
- Habibi, A., Sarafrazi, A., & Izadyar, S. (2014). Delphi Technique Theoretical Framework in Qualitative. *Int J Eng Sci*, 3, 8-13.
- Heiko, A. (2012). Consensus measurement in Delphi studies: review and implications for future quality assurance. *Technological forecasting and social change*, 79(8), 1525-1536.
- Hosseini, M., & Bahmani, H. F. (2011, 20-23 March 2011). *Evaluation and routing of power transmission lines by using AHP method and genetic algorithm*. Paper presented at the 2011 IEEE Symposium on Computers & Informatics.
- Husain, F., Sulaiman, N. A., Hashim, K. A., & Samad, A. M. (2012, 11-12 Sept. 2012). *Multi-criteria selection for TNB transmission line route using AHP and GIS*. Paper presented at the 2012 International Conference on System Engineering and Technology (ICSET).
- Hwang, C.-L., Yoon, K., Hwang, C.-L., & Yoon, K. (1981). Methods for multiple attribute decision making. *Multiple attribute decision making: methods and applications a state-of-the-art survey*, 58-191.
- Hydro-Québec (2020a, 28 juillet 2020). Projet pilote de poteaux composites. Retrieved from <https://www.facebook.com/hydroquebec1944/posts/projet-pilote-de->

- [poteaux-compositessavez-vous-que-certains-des-pires-dommages-a/3707803929235790/](https://www.hydroquebec.com/data/documents-donnees/pdf/rapport-annuel-2020.pdf)
- Hydro-Québec. (2020b). *RAPPORT ANNUEL 2020*. Retrieved from <https://www.hydroquebec.com/data/documents-donnees/pdf/rapport-annuel-2020.pdf>
- Hydro-Québec. (2020c). *Rapport sur le développement durable 2020* Retrieved from <https://www.hydroquebec.com/data/documents-donnees/pdf/rapport-developpement-durable-2020.pdf>
- Hydro-Québec. (2021). *Rapport sur le développement durable 2021*. Retrieved from <https://www.hydroquebec.com/data/documents-donnees/pdf/rapport-developpement-durable.pdf>
- Hydro-Québec. (2022). HYDRO-QUÉBEC en bref. Retrieved from <https://www.hydroquebec.com/fournisseur-energie-propre/hydro-en-bref/>
- Hydro-Québec. (2022). *Plan d'adaptation aux changements climatiques 2022-2024*. Retrieved from https://www.hydroquebec.com/themes/plan-adaptation-changements-climatiques/pdf/2022G344D-5663-plan-climatiques2022-2024_sept2022_V06a.pdf?20221111
- Hydro-Québec Distribution, R. V. (2021). *Impact des changements climatiques sur les actifs et activités de HQD*. Retrieved from
- Hydro-Québec, J. H., Maryse Lambert, Frédéric Vigeant (2017). *ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES – ÉTAT DE LA SITUATION À HYDRO-QUÉBEC*. Retrieved from
- Inès, H., & Ammar, F. B. (2020, 20-23 July 2020). *Multi-criteria decision making for reconductoring overhead lines*. Paper presented at the 2020 17th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD).
- Innocent Ndoh Mbue, P. (2017). Tools for Environmental Analyses, course of Multiple Criteria Decision Making (MCDM). *University of Douala*.
- Išlić, M., Marušić, A., & Havelka, J. (2017, 3-6 July 2017). *Distance protection relays installation prioritization in distribution networks using analytic hierarchy process and cost-benefit analysis*. Paper presented at the 2017 25th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED).
- Jancovici, J.-M. (2002). *L'avenir climatique : quel temps ferons-nous?* Paris: éditions du Seuil.
- Kayal, P., Khan, C. M., & Chanda, C. K. (2014, 31 Jan.-2 Feb. 2014). *Selection of distributed generation for distribution network: A study in multi-criteria framework*. Paper presented at the Proceedings of The 2014 International Conference on Control, Instrumentation, Energy and Communication (CIEC).
- Khan, A. U., & Ali, Y. (2020). Analytical hierarchy process (AHP) and analytic network process methods and their applications: a twenty year review from 2000-2019: AHP & ANP techniques and their applications: Twenty years review from 2000 to 2019. *International journal of the analytic hierarchy process*, 12(3).

- Kim, S.-K., & Song, O. (2009). A MAUT approach for selecting a dismantling scenario for the thermal column in KRR-1. *Annals of Nuclear Energy*, 36(2), 145-150. doi:<https://doi.org/10.1016/j.anucene.2008.11.034>
- Koç, E., & Burhan, H. A. (2015). An application of analytic hierarchy process (AHP) in a real world problem of store location selection. *Advances in Management and Applied Economics*, 5(1), 41.
- l'électricité, A. c. d. (2017). Adaptation aux changements climatiques: guide de gestion du risque pour les entreprises d'électricité Retrieved from <https://www.electricity.ca/wp-content/uploads/2017/11/ADAPTATION-AUX-CHANGEMENTS-CLIMATIQUES.pdf>
- La Branche, S. p., & Vergara, P. (2008). *Le changement climatique dans tous ses états*. Grenoble [France]: Presses universitaires de Grenoble.
- Lee, J., Marotzke, J., Bala, G., Cao, L., Corti, S., Dunne, J., . . . Jones, C. (2021). IPCC. Climate change 2021: The physi-cal science basis. *Future Global Climate: Scenario-42 Based Projections and Near-Term Information; Cambridge University Press: Cambridge, UK*, 1-195.
- Lee, S. K., Mogi, G., Koike, M., Hui, K. S., & Kim, J. W. (2009, 20-24 Aug. 2009). *Fuzzy integrated analytic hierarchy process approach for selecting strategic big-sized R&D programs in the sector of energy technology development*. Paper presented at the 2009 IEEE International Conference on Fuzzy Systems.
- Legg, S., Briegleb, B., Chang, Y., Chassignet, E. P., Danabasoglu, G., Ezer, T., . . . Yang, J. (2009). Improving Oceanic Overflow Representation in Climate Models: The Gravity Current Entrainment Climate Process Team. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(5), 657-670. doi:10.1175/2008bams2667.1
- Lehoux, N., & Vallée, P. (2004). Analyse multicritère. *École Polytechnique de Montréal: Montréal*.
- Linstone, H. A., & Turoff, M. (1975). *The delphi method*: Addison-Wesley Reading, MA.
- Martynov, A., Laprise, R., Sushama, L., Winger, K., Šeparović, L., & Dugas, B. (2013). Reanalysis-driven climate simulation over CORDEX North America domain using the Canadian Regional Climate Model, version 5: model performance evaluation. *Climate Dynamics*, 41(11), 2973-3005. doi:10.1007/s00382-013-1778-9
- Masud, A. S., & Hwang, C.-L. (1981). Interactive sequential goal programming. *Journal of the Operational Research Society*, 32, 391-400.
- Meier, W., Weiss, A., Puentes, C., & Moseley, J. C. (1971). SENSITIVITY ANALYSIS: A NECESSITY IN WATER PLANNING 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 7(3), 529-541.
- Merle, J., Voituriez, B., & Dandonneau, Y. (2016). *Changement climatique : histoire et enjeux*. Paris: éditions l'Harmattan.
- Mohamed, A., & Mahfoudh, D. (2022). Utilisation d'un modèle d'aide à la décision multicritère basée sur la méthode AHP pour la sélection de projets

- d'infrastructures sanitaires. *Revue Algérienne de Finances Publiques ISSN*, 12(02), P199 -219.
- Muma, M., Gumiere, S. J., & Rousseau, A. N. (2014). Analyse de sensibilité globale du modèle CATHY aux propriétés hydrodynamiques du sol d'un micro-bassin agricole drainé. *Hydrological Sciences Journal*, 59(8), 1606-1623. doi:10.1080/02626667.2013.843778
- Nearing, M., Deer-Ascough, L., & Laflen, J. (1990). Sensitivity analysis of the WEPP hillslope profile erosion model. *Transactions of the ASAE*, 33(3), 839-0849.
- Neto, E. A. C. A., Coelho, J., Camargo, C. C. B., Rodigheri, A., Reis, M. M., Cimino, L., . . . Reinig, A. O. (2010, 8-10 Nov. 2010). *An AHP multiple criteria model applied to transmission expansion of a Brazilian southeastern utility*. Paper presented at the 2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA).
- Nie, D., Fan, L., Wang, K., Song, Y., Gao, Y., & Miao, G. (2021, 7-9 April 2021). *Research on AHP-based Multi-factor Medium Voltage Distribution Network Line Risk Quantitative Assessment Method*. Paper presented at the 2021 China International Conference on Electricity Distribution (CICED).
- Ouranos, H. C., Travis Logan, Isabelle Charron. (2015). *Vers l'adaptation. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec*. In Ouranos (Ed.), (2015 ed., pp. 415 p). Retrieved from <https://www.ouranos.ca/synthese-2015/>
- Özcan, E. C., Ünlüsoy, S., & Eren, T. (2017). A combined goal programming – AHP approach supported with TOPSIS for maintenance strategy selection in hydroelectric power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 1410-1423. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.039>
- Porter, M. E., & Kramer, M. R. (2006). The link between competitive advantage and corporate social responsibility. *Harvard business review*, 84(12), 78-92.
- Ramanathan, R. (2004). Multicriteria Analysis of Energy. In C. J. Cleveland (Ed.), *Encyclopedia of Energy* (pp. 77-88). New York: Elsevier.
- Rapport du GIEC, L. (2014). GIEC a produit à ce jour a produit cinq rapports scientifiques sur les questions suivantes: évolution du climat, mesures d'adaptation et d'atténuation et une synthèse pour les décideurs. *Le dernier rapport, le AR5, a été publié en*.
- Roy, B. (1968). Classement et choix en présence de points de vue multiples. *Revue française d'informatique et de recherche opérationnelle*, 2(8), 57-75.
- Roy, B., & Bouyssou, D. (1993). *Aide multicritère à la décision: méthodes et cas*: Economica Paris.
- Saaty, T. L., Dahan, L., & Hirsch, G. (1984). *Décider face la complexité : une approche analytique multicritère d'aide la décision*. Paris: Entreprise Moderne d'Edition.
- Sahin, O., Bertone, E., & Baker, M. (2015, 6-9 Dec. 2015). *Evaluating design alternatives of constructed storm-water treatment wetlands*. Paper presented at

- the 2015 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM).
- Salmanpour, A., Noorali, N. E., Gholizadeh, M., Ghadikolaei, M. B., & Mehr, G. R. (2021, 20-23 Sept. 2021). *Impact of climate change on network components: Root Cause Analysis of overhead distribution network failures due to heavy Snowfall- a Case Study Gilan, Iran, Feb. 2020.* Paper presented at the CIRED 2021 - The 26th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution.
- Saltelli, A., Chan, K., & Scott, M. (2000). Handbook of sensitivity analysis. Probability and Statistics Series. In: John Wiley & Sons Publishers, New York, NY.
- Saltelli, A., Tarantola, S., & Campolongo, F. (2000). Sensitivity analysis as an ingredient of modeling. *Statistical science*, 377-395.
- Samad, A. M., Sahriman, N., Anggong, R., Ruslan, F. A., & Adnan, R. (2016, 4-6 March 2016). *A study of Sabah Electricity Sdn.Bhd. (SESB) best route transmission line using AHP.* Paper presented at the 2016 IEEE 12th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications (CSPA).
- Samal, R. K., & Kansal, M. L. (2015, 12-13 June 2015). *Sustainable development contribution assessment of renewable energy projects using AHP and compromise programming techniques.* Paper presented at the 2015 International Conference on Energy, Power and Environment: Towards Sustainable Growth (ICEPE).
- Schärlig, A. (1985). *Décider sur plusieurs critères: panorama de l'aide à la décision multicritère* (Vol. 1): PPUR presses polytechniques.
- Schubert, S., Gutzler, D., Wang, H., Dai, A., Delworth, T., Deser, C., . . . Zeng, N. (2009). A U.S. CLIVAR Project to Assess and Compare the Responses of Global Climate Models to Drought-Related SST Forcing Patterns: Overview and Results. *Journal of Climate*, 22(19), 5251-5272. doi:10.1175/2009jcli3060.1
- Segovia-Kueny, S. (2009). *Enjeux du changement climatique.* La Plaine-Saint-Denis: AFNOR éd.
- Shinde, D. D., & Prasad, R. (2018). Application of AHP for ranking of total productive maintenance pillars. *Wireless Personal Communications*, 100, 449-462.
- Siekelova, A., Podhorska, I., & Imppola, J. J. (2021). Analytic Hierarchy Process in Multiple-Criteria Decision-Making: A Model Example. *SHS Web of Conf.*, 90, 01019. Retrieved from <https://doi.org/10.1051/shsconf/20219001019>
- Souza, D. G. B., Silva, C. E. S., & Soma, N. Y. (2020). Selecting Projects on the Brazilian R&D Energy Sector: A Fuzzy-Based Approach for Criteria Selection. *IEEE Access*, 8, 50209-50226. doi:10.1109/ACCESS.2020.2979666
- Tahmasebi Birgani, Y., & Yazdandoost, F. (2018). An Integrated Framework to Evaluate Resilient-Sustainable Urban Drainage Management Plans Using a Combined-adaptive MCDM Technique. *Water Resources Management*, 32(8), 2817-2835. doi:10.1007/s11269-018-1960-2

- Taillandier, F., Sbartaï, Z., & Breysse, D. (2013). Hiérarchisation de la maintenance d'un parc immobilier—Développement méthodologique et étude de cas. *31e Rencontres de l'AUGC, ENS Cachan*, 29.
- Tarantola, S., & Saltelli, A. (2003). SAMO 2001: methodological advances and innovative applications of sensitivity analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 79(2), 121-122.
- Thorel, M. (2014). *Aide à la décision multicritère pour la prescription de scénarios d'amélioration énergétique via une approche globale*. Université de Grenoble,
- Vailles, C. (2019). D’OÙ VIENNENT LES CINQ NOUVEAUX SCENARIOS DU GIEC ? Retrieved from <https://www.i4ce.org/dou-viennent-les-cinq-nouveaux-scenarios-du-giec-climat/#top-page>
- Violaine Lepousez, M. A. (2022). *Les scénarios SSP*. CARBONE4. Retrieved from <https://www.carbone4.com/publication-scenarios-ssp-adaptation>
- Voltaire Aurore, S.-m. D. (2020). Modèles de climat. Retrieved from <https://www.encyclopedie-environnement.org/climat/modeles-climat/>
- Wang, M., Yue, X., Gao, C., & Chen, Y. (2018). Feature selection ensemble for symbolic data classification with AHP. Paper presented at the 2018 24th International Conference on Pattern Recognition (ICPR).
- Wu, Z., & Abdul-Nour, G. (2020). Comparison of multi-criteria group decision-making methods for urban sewer network plan selection. *CivilEng*, 1(1), 3.
- Yu, H., Ma, Y., Wang, L., Zhai, Y., & Du, Z. (2017, 6-9 Aug. 2017). *A method for evaluating the rescue priority level of power line post-disaster based on AHP*. Paper presented at the 2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA).
- Zanakis, S. H., Solomon, A., Wishart, N., & Dubliss, S. (1998). Multi-attribute decision making: A simulation comparison of select methods. *European journal of operational research*, 107(3), 507-529.
- Zhang, S., Guo, J., Wang, Y., Liu, E., & Huang, Y. (2019, 8-10 Nov. 2019). *Effectiveness Evaluation System and Evaluation Method For Anti-birds Damage Technical Transformation Projects of Overhead Lines*. Paper presented at the 2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2).
- Zhilin, L., Liqun, G., Dapeng, Z., Ping, R., & Yang, L. (2006, 21-23 June 2006). *Application of Analytic Hierarchy Process in Power Lines Maintenance*. Paper presented at the 2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation.
- Zohoori, A., Vahedi, A., Meo, S., & Sorrentino, V. (2016). An improved AHP method for multi-objective design of FSPM machine for wind farm applications. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 30(1), 159-169.

Lexique

- **Adaptation** : Toute modification apportée à un système ou à un processus pour répondre aux défis posés par le changement climatique.
- **Atténuation** : Réduction du changement climatique par des interventions humaines, visant à limiter les émissions de gaz à effet de serre ou à accroître leur absorption. Cela vise à minimiser ou à prévenir les effets du changement climatique, complémentant ainsi les mesures d'adaptation.
- **Changement climatique** : Toute altération du climat dans le temps qu'elle soit due à des facteurs naturels, à l'activité humaine ou à une combinaison des deux.
- **Conséquence** : Les résultats ou les effets d'un évènement qui entravent la réalisation des objectifs visés.
- **Évaluation des risques** : Processus systématique pour identifier et évaluer les évènements qui pourraient entraver la réalisation des objectifs.
- **Évènement météorologique extrême** : Phénomène météorologique sévère, se situant aux limites extrêmes de la distribution historique.
- **Un facteur de risque** : Circonstance ou condition augmentant la probabilité d'un évènement indésirable ou de conséquences négatives.
- **Gestion du risque** : Approche méthodique pour sélectionner la meilleure stratégie afin de réduire le risque. Elle implique l'élaboration de politiques, de procédures et de pratiques pour analyser, évaluer, contrôler et communiquer le risque.
- **Infrastructure essentielle** : Les systèmes et services vitaux pour le bien-être de la société.
- **Incertitude** : Niveau de connaissances sur un sujet. En sciences, une certitude totale est souvent impossible, donc l'information est qualifiée par des descriptions du niveau de certitude, comme "très probable", signifiant une certitude supérieure à 90 %.

- **Mesures d'adaptation :** Actions renforçant la capacité d'une organisation à faire face à divers effets du climat. Cela peut inclure des ajustements administratifs.
- **Résilience :** Capacité d'un système à résister aux effets des aléas sans subir de changement fondamental.
- **Risque :** La probabilité qu'un évènement survienne et perturbe l'atteinte des objectifs, combinée à la gravité de ses conséquences.
- **Vulnérabilité :** Le degré auquel un système est susceptible ou incapable de résister aux effets nuisibles des changements climatiques. Cette vulnérabilité est influencée par la nature du changement climatique, la sensibilité du système et sa capacité d'adaptation à ce changement.

ANNEXES

ANNEXE A : Vulnérabilité des actifs (Hydro-Québec Distribution, 2021)

Aléas climatiques						Activités HQ Distribution																
Cat	Paramètre		Seuils	Confiance	Tendance	Ligne aérienne	Poteaux	Végétation	Lignes souterraines	Structures souterraines	Conduite du réseau	Réseaux autonomes	Infrastructure de mesure									
Température	Chaleur	Extrême		T ≥ 30 °C	Modéré à élevé	↑ (H)	(1) Faible: quelques équipements	(3) Élevé: Pourriture Non	(1) Faible à (2) Moyen: Transformateurs	Non	Non	(1) Faible	Non									
		T ≥ 35 °C																				
	Vague de chaleur		T ≥ 30 °C pendant ≥ 3 jrs		Modéré	↓ (B)	(2) Moyen à (3) Élevé: petits conducteurs; (3) Élevé à (4) Très élevé: Batteries des boîtiers de commande pour T ≤ -30°C	(2) Moyen: Plus difficile de grimper Non	(1) Interruuteurs souterrains	Non	Non	(3) Élevé à (4) Très élevé	(1) Faible									
	Extrême		T ≤ -20, -30 ou -40 °C																			
	Vague de froid		T ≤ -30°C pendant ≥ 7 jrs																			
	Froid & vents		T ≤ -14°C (& Vents ≥ 35 km/h)																			
	Cycle gel & dégel			Moy. historique et variation future	Faible à modéré	= (S)	(2) Moyens: Plusieurs équipements	(1) Faible: Fissures à la tête	(1) Faible	Non	(1) Faible	Non	(2) Moyen									
	Degrés-jours	Chauffage		Moy. historique et variation future																		
		Climatisation		Moy. historique et variation future	Élevé	↑ (H)	(2) Moyen: transformateurs	Non	Non	Non	Non	(3) Élevé: Réservoir près des côtes	Non									
	Couverture de glace			Évaluation qualitative																		
Précipitations	Pluie	Événement de courte durée		≥ 50 mm en ≤ 24 hrs	Modéré	↑ (H)	Non	(2) Moyen	(2) Moyen: Fragilisation de l'encraînement de certains arbres Non	(1) Faible à (2) Moyen: Transformateurs	Non	Non	(1) Faible: Plus de drainage manuel (1) Faible									
		Accumulation pendant x jrs		mm pendant 3 jrs ou 5 jrs																		
	Neige	Accumulation		1,2 m	Faible à modéré	↓ (B)	(1) Faible: Quelques équipements	Non	(4) Très élevé: Fragilisation branches surplombantes + arbres fléchissants	Non	Non	(1) Faible à (2) Moyen: panneaux solaires, Biomasse (2) Moyen: Éolien										
		Abondante pendant 24 hrs		≥ 25 cm ou ≥ 50 cm																		
		Humide		Densité de 105 à 120 kg/m³																		
	Ratio neige/ précipitation totale	Moy. historique et variation future		Faible à modéré	= (S) ou ↑ (H)	Non	(1) Faible: Boîtier de commande	Non	Non	Non	Non	Non	Non									
		Pluie hivernale		Augmentation de 10% du nombre d'événements/an																		
	Verglas	Accumulation de glace, pluie verglaçante		≤ 10 mm, ≥ 10 mm, ≥ 35 mm	Faible	↓ (B) ou ↑ (H)	(2) Moyen à (4) Très élevé: Plusieurs équipements	Non	(1) Faible à (3) élevé: Selon la quantité de verglas, fragilisation branches surplombantes + arbres fléchissants (3) Élevé à (4) Très élevé: Selon la quantité de verglas, fragilisation branches surplombantes + arbres fléchissants	Non	Non	Non	(2) Moyen à (3) élevé: Éolien, centrale diesel									
		≥ 12,5 mm & ≥ 93 km/hr																				
		≥ 19 mm & ≥ 93 km/hr																				
	Vague de sécheresse (variation dans l'intensité de la précipitation)				Modéré	= (S)	(1) Faible: Petits conducteurs	(2) Moyen: Fissuration de la tête	(1) Faible: Feux de forêt (évapotranspiration)	Non	Non	Non	Non	Non								
	Crues printanières (inondations)		Combinaison température + précipitation + couverture de neige		Modéré à élevé	↑ (H)	(2) Moyen: Boîtier de commande	(2) Moyen: Favorise pourriture et inclinaison	Non	(1) Faible: Transformateurs	Non	Non	Non	(3) Élevé								

ANNEXE A : Vulnérabilité des actifs (Hydro-Québec Distribution, 2021) (suite)

Aléas climatiques							Activités HQ Distribution										
Cat	Paramètre	Seuils		Confiance	Tendance	Ligne aérienne	Poteaux	Végétation	Lignes souterraines	Structures souterraines	Conduite du réseau	Réseaux autonomes	Infrastructure de mesure				
Vents	Rafales	Rafales	70, 90, 100 ou 120 km/hr	Faible à modéré	↑ (H)	(2) Moyen à Élevée selon la force des rafales: Petits conducteurs	(2) Moyen: Mouvement dû aux vents de > 90km/hr. Exigera une augmentation des standards futurs de construction	Non	Non	Non	Non	(2) Moyen: Éolien	(1) Faible (>100 km/hr)				
		Résultant de vents soutenus 110 km/h pendant 10 minutes	160 km/hr			(2) Moyen à (3) Élevée: Plusieurs équipements	(3) Élevé: Pannes et bris possibles dus à la végétation					(2) Moyen: Éolien					
		Avec présence de feuilles (1er juin au 31 octobre)	70 km/hr			(3) Élevé: Pannes et bris possibles dus à la végétation						(3) Élevé: Pannes et bris possibles dus à la végétation		(2) Moyen: Éolien			
	Vents forts	Vents soutenus pendant 10 mins	110 km/hr			(2) Moyen à (3) Élevée: Plusieurs équipements						(2) Moyen: Mouvement dû aux vents de > 90km/hr. Exigera une augmentation des standards futurs de construction.		(2) Moyen: Éolien, (1) Faible: Biomasse			
	Tornades	Évaluation qualitative				(3) Élevé à (4) très élevé: Pannes et bris possible						(1) Faible					
Divers	Foudre			Modéré	↑ (H)	(3) Élevée à (4) très élevé: Plusieurs équipements	(2) Moyen: Brûlures ou explosion de la tête	(1) Faible: Feux de forêt (évapotranspiration)	(1) Faible: Transformateurs	Non	Non	(2) Moyen: Éolien	(1) Faible				
	Orages et dépressions	Orages convectifs		Modéré	= (S)	(4) Très élevé: Selon le type de montage, il pourra avoir des pannes et bris		(3) Élevé à (4) Très élevé: Fragilisation branches surplombantes + arbres flétrissants	Non			Non	Non				
		Dépression du Colorado			= (S)												
	Givre (diminution du plancher de formation du givre)	> 750m d'altitude	Faible	↓ (B)	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non				
	Pergélisol (profondeur)	Évaluation qualitative	Modéré à élevé	↑ (H)	(1) Faible: Bris de structures en premier -Peu d'unités seront touchées												
	Érosion côtière	Évaluation qualitative		Faible à modéré	↑ (H)	(3) Élevé: Certains systèmes de refroidissements sont situés près des côtes et peu élevés par rapport au niveau des océans	Non										
	Niveau des océans	Augmentation future	Modéré à élevé	= (S) ou ↑ (H)				Non	(3) Élevé: temps et coûts de relocalisation du réseau très onéreux.								
	Intensité du soleil/Couverture nuageuse/nombre de jours de rayonnement solaire (flux incident et ondes courtes W/2)	Évaluation qualitative	Faible	??	(1) Faible: Isolateur	Non	Non	Non	Non			(1) Faible	(1) Faible				
	Croissance ou couverture de la végétation/Augmentation de la période de croissance		Modéré à élevé	↑ (H)	(1) Faible à (2) moyen: Bris de conducteurs lors de chute de branche	Non	(3) Élevé: Contrôle de la végétation	Non	Non			Non					

ANNEXE B : Exemple fiche de risque poteaux (Hydro-Québec Distribution, 2021)

RISQUE	SOURCES DU RISQUE	ALÉAS CLIMATIQUES	MESURES D'ADAPTATION/D'ATTÉNUATION DU RISQUE POSSIBLE
INSTRUCTIONS :	Inscrire la ou les sources de risques	Inscrire les principaux aléas climatiques en lien avec les sources de risques	À partir des sources de risques et des aléas climatiques identifiés, décrire les différentes mesures d'adaptation possibles.
Remplacements plus fréquents des poteaux de bois	S1.	Allongement de la période favorisant la pourriture des poteaux de bois, principale cause de leur remplacement plus fréquent. Ce mécanisme de dégradation pourrait apparaître dans certaines régions pour lesquels cette période n'est pas suffisamment longue pour qu'il se développe.	S1.M1 Poteau en composite S1.M2 Enfouissement des lignes S1.M3 Enfouissement allégé des lignes S1.M4 Utiliser des poteaux en CCA S1.M5 Remplacer les poteaux en penta préventivement S1.M6 Inspection et retraitement plus fréquents des poteaux S1.M7 Installer un cap protecteur à la tête
			A) Température optimale propice aux champignons entre 10 et 35 oC & Humidité ≥ 25 %
			S2.M1 Poteau en composite S2.M2 Enfouissement des lignes S2.M3 Enfouissement allégé des lignes S2.M4 Utiliser ou traiter les poteaux avec le répulsif AZCA S2.M5 Lors de l'inspection, utiliser un produit qui détruit le nid de fourmis et retarde le remplacement du poteau S2.M6 Inspection/patrouilles plus fréquentes
	S2.	Accroissement du territoire et de la population de pic-bois et de fourmis, deux autres causes prépondérantes de remplacement prématué des poteaux de bois.	À préciser, inclus les températures extrêmes en hiver
			S3.M1 Poteau en composite S3.M2 Enfouissement des lignes S3.M3 Enfouissement allégé des lignes S3.M4 Revoir la classe des poteaux
			Orages, dépressions, verglas, neige humide & vents forts

ANNEXE B : Exemple fiche de risque poteaux (Hydro-Québec Distribution, 2021) (suite)

1) En cours pour Pic-bois et fourmis charpendiére											
	SOURCES DU RISQUE		ACTIONS EN COURS OU À METTRE EN PLACE		LIEN AVEC STRATÉGIES D'ADAPTATION	OPPORTUNITÉ VIA DES ACTIVITÉS INTERNES	ÉCHÉANCIER	ESTIMATION DES COÛTS	INDICATEUR DE SUIVI	GROUPE	Responsable
Instructions	Inscrire la ou les sources de risques en lien avec les aléas climatiques		Il peut s'agir : 1. D'une mesure d'adaptation déjà documentée dans l'autre onglet (onglet Stratégies d'adap. potentielles, colonne F); 2. Évaluation de certaines mesures d'adaptation (onglet Stratégies d'adap. potentielles, colonne F); 3. Évaluation des coûts; 4. Démarrage projet de recherche (onglet Stratégies d'adap. potentielles, colonne G); 5. Autres actions	Si applicable : énumérer les stratégies d'adaptation auxquelles cette action réfère (ex: S1.M1, S2.M4)	Indiquez dans le cadre de quels projets ou activités en cours cette mesure pourrait potentiellement s'inscrire (programme de maintenance, réfection planifiée, etc)	1. Activité déjà en cours : la date du démarrage, l'état d'avancement et potentielle date de fin 2. Activité nouvelle : date de démarrage prévue 3. Activité en continu : depuis quand	Si applicable et pour chaque action proposée.	Si applicable	Unité d'affaire responsable de cette action	Responsable potentiel de l'action	
Remplacements plus fréquents des poteaux de bois	S1. Allongement de la période favorisant la pourriture des poteaux de bois, principale cause de leur remplacement plus fréquent. Ce mécanisme de dégradation pourrait apparaître dans certaines régions pour lesquels cette période n'est pas suffisamment longue pour qu'il se développe.	S1.A1	Élaborer la carte de risque globale (avec UQAM)	S1.M1, S2.M1 & S3.M1	À venir	1) En cours pour Pic-bois et fourmis charpendiére 2) Nouvelle pour les autres risques	À venir	N/A	DEER	Dan Mastrocola	
		S1.A2	Évaluer la faisabilité et les coûts de l'enfoncissement des lignes aériennes	S1.M2, S2.M2 & S3.M2	À venir	1) En cours (projet pilote)	À venir	N/A	DEER	Dan Mastrocola	
		S1.A3	Obtenir les informations et analyses sur les produits de remplacement au CCA	S1.M3	À venir	3) En continu	À venir	N/A	DEER	Dan Mastrocola	
		S1.A4									
		S1.A5									
		S1.A6									
		S1.A7									
	S2. Accroissement du territoire et de la population de pic-bois et de fourmis, deux autres causes prépondérantes de remplacement prématuré des poteaux de bois.	S2.A1	Élaborer la carte de risque globale (avec UQAM)	S1.M1, S2.M1 & S3.M1	À venir	1) En cours pour Pic-bois et fourmis charpendiére 2) Nouvelle pour les autres risques	À venir	N/A	DEER	Dan Mastrocola	
		S2.A2	Évaluer la faisabilité et les coûts de l'enfoncissement des lignes aériennes	S1.M2, S2.M2 & S3.M2	À venir	1) En cours (projet pilote)	À venir	N/A	DEER	Dan Mastrocola	
		S2.A3	Évaluer l'efficacité et la durabilité du répulsif AZCA sur les poteaux actuels	S2.M3	À venir	3) En continu	À venir	N/A	DEER	Dan Mastrocola	
		S2.A4									
		S2.A5									
		S2.A6									
		S2.A7									
S3. Occurrence d'aléas climatiques extrêmes atteignant ou dépassant leurs critères de conception actuels	Occurrence d'aléas climatiques extrêmes atteignant ou dépassant leurs critères de conception actuels	S3.A1	Élaborer la carte de risque globale (avec UQAM)	S1.M1, S2.M1 & S3.M1	À venir	1) En cours pour Pic-bois et fourmis charpendiére 2) Nouvelle pour les autres risques	À venir	N/A	DEER	Dan Mastrocola	
		S3.A2	Évaluer la faisabilité et les coûts de l'enfoncissement des lignes aériennes	S1.M2, S2.M2 & S3.M2	À venir	1) En cours (projet pilote)	À venir	N/A	DEER	Dan Mastrocola	
		S3.A3	Évaluer la faisabilité et les coûts de l'enfoncissement des lignes aériennes	S1.M2, S2.M2 & S3.M2	À venir	1) En cours (projet pilote)	À venir	N/A	DEER	Dan Mastrocola	
		S3.A4	Révision des standards (classe des poteaux)	S3.M3	À venir	1) En cours	À venir	N/A	DEER	Dan Mastrocola	
		S3.A5	Modélisation des lignes sur les capacités requises en fonction du risque	S3.M3	À venir	1) En cours	À venir	N/A	DEER	Dan Mastrocola	

ANNEXE C : Grille d'évaluation de risques (Hydro-Québec Distribution, 2021)

Fiche de risque – Adaptation aux changements climatiques

Date de mise à jour :

Grille d'évaluation des risques d'entreprise

Probabilité <i>(Utilisez l'échelle qui correspond à votre risque)</i>	Fréquence d'occurrence	Titre de l'événement indésirable				
		1-TRÈS FAIBLE	2-MOYEN	3-ÉLEVÉ	4-TRÈS ÉLEVÉ	5-CATASTROPHIQUE
5- PRESQUE CERTAIN: > 90 % ≥ 100%	5-TRÈS ÉLEVÉE : Susceptible de se produire à répétition. Supérieure à 2 fois par année					
4- TRÈS PROBABLE: > 60 % ≥ 90%	4-ÉLEVÉE : Susceptible de se produire à plusieurs reprises. 1 ou 2 fois par année					
3- PROBABLE: > 30 % ≥ 60%	3-MOYENNE : Susceptible de se produire à quelques reprises. Tous les 1 à 10 ans					
2- PEU PROBABLE: > 1 % ≥ 30%	2-FAIBLE : Peu susceptible de se produire. Tous les 10 à 100 ans					
1- IMPROBABLE: 0% ≥ 1%	1-TRÈS FAIBLE : Peu envisageable. Plus rarement que tous les 100 ans					
Zones d'impact		Sévérité de l'impact				
Client (fiabilité)		1-FAIBLE	2-MOYEN	3-ÉLEVÉ	4-TRÈS ÉLEVÉ	5-CATASTROPHIQUE
Défaillance/événement entraînant une interruption de service		<ul style="list-style-type: none"> 4k à 40k CHI sur les réseaux desservant des clients résidentiels ou commerciaux (P4 à P7) 	<ul style="list-style-type: none"> 40k à 400k CHI sur les réseaux desservant des clients résidentiels ou commerciaux (P4 à P7) 	<ul style="list-style-type: none"> 400k à 4M de CHI sur les réseaux desservant des clients résidentiels ou commerciaux (P4 à P7) Moins de 30 minutes pour des clients desservant des services d'urgences P1 Clients stratégiques P2 ou critiques P3 	<ul style="list-style-type: none"> 4M à 40M de CHI sur les réseaux desservant des clients résidentiels ou commerciaux (P2 à P7) Moins 120 minutes pour des clients desservant des services d'urgences P1 	<ul style="list-style-type: none"> Plus de 40M de CHI
Santé et sécurité Employés et public		Premier soin, signes et symptômes	Assistance médicale	Assignation temporaire, perte de temps et atteinte permanente	Un décès	Décès multiples
Environnement		<ul style="list-style-type: none"> Réversible rapidement dans le cadre des pratiques normales de l'entreprise Au niveau d'un site 	<ul style="list-style-type: none"> Réversible court terme Au niveau local 	<ul style="list-style-type: none"> Réversible moyen terme Perturbations permanentes Au niveau local 	<ul style="list-style-type: none"> Réversible long terme Dégénération majeure Au niveau régional 	<ul style="list-style-type: none"> Irréversible Perte de l'usage de ressources Au niveau régional
Réputation de l'entreprise		<ul style="list-style-type: none"> Impact faible sur la réputation de l'entreprise. Couverture médiatique anecdotique. Ne peut être capté dans nos sondages, mais peut nécessiter des actions ciblées pour corriger la situation 	<ul style="list-style-type: none"> Impact régional sur la réputation de l'entreprise / faible impact à l'échelle nationale. Couverture médiatique régionale/ ou peu importante au plan national. Ne peut être capté dans nos sondages, mais peut nécessiter des actions ciblées pour corriger la situation 	<ul style="list-style-type: none"> Impact important sur la réputation de l'entreprise, qui génère un certain bruit dans nos sondages et dans les médias. Nécessité de prendre des actions (communiqués, répliques, actions proactives auprès des médias et des parties prenantes, etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> Impact très important sur la réputation de l'entreprise, qui crée un écart marqué avec nos objectifs dans nos sondages. Couverture très négative et persistante dans les médias. Nécessité de prendre des actions fortes (revenir sur des décisions de l'organisation, organiser des conférences de presse, rencontres publiques, etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> Impact catastrophique sur la réputation de l'entreprise, qui crée un écart très marqué avec nos objectifs dans nos sondages. Couverture extrêmement négative et persistante dans les médias. Impact majeur sur la capacité de gestion de l'entreprise. Nécessité de prendre des actions très fortes (excuses publiques, changement de cap important sur des décisions de l'organisation, nouvelle équipe de direction)
Financier (M\$ CA)		≤ 5	5 ≤ 50	50 ≤ 250	250 ≤ 1000	> 1000

ANNEXE D : Matrice de revue de littérature des 28 articles

ARTICLE	A Method for Evaluating The Rescue Priority Level of Power Line Post-disaster Based on AHP(Yu et al., 2017)	A Study of Sabah Electricity Sdn.Bhd. (SESB) Best Route Transmission Line Using AHP(Samad et al., 2016)
PROBLÉMATIQUE	De diverses catastrophes naturelles constituent une grande menace pour le fonctionnement sûr et stable du réseau électrique, tout en posant des exigences plus élevées pour les réparations et maintenances de la ligne électrique après dommage	Certes planifier la meilleure route pour les lignes de transmission est primordial cependant les nombreuses solutions d'usage quotidien données par le système d'information géographique concernant l'alimentation, la planification et la conception des lignes de transmission, nécessitent une optimisation de manière à adopter la solution la plus adéquate.
OBJECTIF	Proposer une méthode d'évaluation du niveau de priorité de sauvetage de la ligne électrique après une catastrophe, en se basant sur processus de hiérarchie analytique (AHP)	Cartographier la meilleure route de la ligne de transmission SESB, d'analyser les critères à prendre en considération pour le processus existant de sa conception et d'en établir la meilleure.
MÉTHODOLOGIE	Étude de cas et simulations	Étude de cas
HYPOTHÈSES	Lorsqu'une catastrophe se produit sur plusieurs lignes électriques et que le taux de pylônes endommagés dépasse la valeur critique, les autres priorités de sauvetage ne doivent pas dépasser la limite de la ligne électrique, la priorité est alors déterminée en fonction de la limite nominale dépassée pour chaque ligne électrique.	Si les valeurs du rapport de cohérence pour la matrice de comparaison de l'AHP sont inférieures à 0,10, alors le traitement des données pour établir la meilleure route de la ligne de transmission dans l'ArcMap peut être introduit sinon la comparaison par paire doit être revue
CRITÈRES ET SOUS-CRITÈRES	Séquencement des cibles, types de niveau de catastrophe, niveau de catastrophe, terrain, rang de circulation, grade météorologique, la proportion de pylônes endommagés, dommages aux fils, la charge nominale de la ligne, classe de tension	La route (Accessibilité), l'élévation (éviter les dangers environnementaux tels que les glissements de terrain et les inondations), le sol (Éviter de traverser les terres agricoles et les antiquités.), la densité d'habitation (éviter de traverser la zone résidentielle et les installations publiques), l'utilisation du sol, et la frontière (le respect de la vie privée autorisée et légale), technique environnementale (Résistance dans des conditions climatiques difficiles) et socio-économique (Coût d'entretien minimal).
ALTERNATIFS	Ligne 1, Ligne 2, Ligne 3, Ligne 4	Route 1, Route 2, Route 3, Route 4
RÉSULTAT ET CONCLUSION	Cette méthode a fourni l'aide à la décision pour la réparation de la ligne électrique après une catastrophe naturelle, a grandement amélioré l'efficacité de réparation après panne, a minimisé les pertes économiques et a démontré sa grande importance pour le fonctionnement sûr des réseaux électriques.	En utilisant une analyse multicritère de prise de décision appelée Processus de Hiérarchie Analytique (AHP), la meilleure route de la ligne de transmission a été établie en déterminant la fonction de coût entre les tours de puissance de la ligne de transmission.

ARTICLE	Disaster community resilience assessment method: a consensus-based Delphi and AHP approach(Alshehri et al., 2015)
PROBLÉMATIQUE	Au cours des deux dernières décennies, le taux de catastrophes naturelles a augmenté en Arabie saoudite, exposant la population à leurs impacts (Alshehri S, 2013), un cadre de résilience communautaire aux catastrophes est donc requis.
OBJECTIF	Utiliser le système de pondération de l'évaluation de la résilience le plus adapté qui traduit le mieux la mesure de la résilience communautaire dans le contexte de l'Arabie saoudite et déterminer des résultats mesurables de la résilience des communautés par le biais des dimensions et critères du cadre proposé pour la résilience des communautés face aux catastrophes (CRDSA)
MÉTHODOLOGIE	Étude de cas
HYPOTHÈSE	Si les valeurs du rapport de cohérence pour la matrice de comparaison de l'AHP sont inférieures à 0,10, alors le traitement des données pour établir la résilience le plus adaptée peut être introduit sinon la comparaison par paire doit être revue
CRITÈRES ET SOUS-CRITÈRES	Social (sensibilisation aux risques et formation, perception des risques, confiance dans l'administration), économique (fonds disponibles pour la réparation après la catastrophe, couverture d'assurance), physique et environnemental (leçons tirées des catastrophes précédentes, fiabilité des installations, accessibilité aux infrastructures critiques, ressources mobiles pour la réparation et travailleurs qualifiés, suivie de l'environnement bâti actuel et des services existants), la gouvernance (l'application de normes et de règlements pour les bâtiments et les infrastructures, partage de l'information et transparence, l'intégration aux politiques de développement et à la planification, cadre de collaboration et de coordination international), la santé (disponibilité d'agents de santé formés, hygiène), l'information et la communication (système d'alerte précoce, sources d'information fiable, capacité à cascader l'information de l'international vers le régional et le local, service à la clientèle)
ALTERNATIFS	Les différents types de résilience proposée dans le CRDSA
RÉSULTAT ET CONCLUSION	Les auteurs ont identifié et sont en train d'offrir la composante de validation pour le cadre de résilience communautaire qui en résulte dans tout le pays.

ARTICLE	An AHP Multiple Criteria Model Applied to Transmission Expansion of a Brazilian Southeastern Utility(Neto et al., 2010)	Analytical Hierarchy Process for scheduling the Priorities of the Environmental Factors in Transmission Lines Maintenance(Alhamrouni, Khairuddin, Salem, & Ismail, 2015).
PROBLÉMATIQUE	La planification de l'expansion de la transmission se concentre sur l'établissement d'une politique de développement, laquelle doit répondre aux exigences de fiabilité ainsi qu'aux restrictions d'investissement permettant de réduire les coûts et d'offrir des tarifs appropriés aux consommateurs conformément à la législation en vigueur.	Les lignes aériennes de transport d'électricité augmentent en capacité et sont étendues sur de plus longues distances dans des zones montagneuses aux conditions environnementales sévères, ce qui rend les opérations de maintenance des lignes également plus nombreuses et plus complexes.
OBJECTIF	L'application d'une méthodologie à critères multiples dans la gestion de la mise en œuvre des renforcements autorisés ou non (par l'agence de régulation brésilienne) des sous-stations et des lignes de transmission.	L'utilisation d'un modèle mathématique amélioré pour optimiser l'application de la prise de décisions multicritères (MCDM) dans la maintenance des lignes électriques et leur permettant un fonctionnement optimal
MÉTHODOLOGIE	Étude de cas	Étude de cas
HYPOTHÈSE	Si les valeurs du rapport de cohérence pour la matrice de comparaison de l'AHP sont inférieures à 0,10, alors le traitement des données pour la gestion de la mise en œuvre des renforcements le plus adapté peut être introduit sinon la comparaison par paire doit être revue	<ul style="list-style-type: none"> Les hypothèses de jugement : Le taux de gain de chaleur du soleil est 2 fois plus important que le taux de perte de chaleur par convection. La perte de chaleur par convection est 3 fois plus importante que la perte de chaleur par rayonnement. Le taux de gain de chaleur du soleil est 4 fois plus important que le taux de perte de chaleur par rayonnement.
CRITÈRES ET SOUS-CRITÈRES	Techniques, financiers (réglementation, rentabilité, parcelle variable pour cause d'indisponibilité), stratégiques (image de la société, développement technologique), externes à l'entreprise (ressources humaines, ressources matérielles, environnementales) et se rapportant aux risques de mise en œuvre de l'entreprise (conception, exécution, patrimoine, acquisition).	<ul style="list-style-type: none"> Critères tenus en compte par l'auteur : Taux de gain de chaleur du soleil, taux de perte de chaleur par convection, taux de perte de chaleur par rayonnement, absorptivité solaire, viscosité dynamique de l'air, conductivité thermique de l'air à Tfilm, émissivité. Critères non tenus en compte par l'auteur : L'emplacement du câble, les conditions météorologiques et les conditions atmosphériques.
ALTERNATIFS	Un système de transmission comportant plus d'une centaine de RENFORCEMENTS d'une compagnie de transmission du sud-est du Brésil (CTEEP)	Les priorités du processus de maintenance préventive des lignes électriques
RÉSULTAT ET CONCLUSION	Le service public bénéficie du maintien d'une analyse actualisée sur le déploiement des renforcements, sous sa responsabilité, et adopte des mesures préventives concernant les risques dus à l'évolution des scénarios.	Le processus de hiérarchisation analytique (AHP) a été utilisé pour trouver les pondérations des facteurs qui peuvent affecter la ligne et ses performances. Le taux de gain de chaleur du soleil a obtenu la plus haute priorité dans le processus de maintenance.

ARTICLE	Application of Analytic Hierarchy Process in Power Lines Maintenance (Zhiling et al., 2006)	Application of fuzzy Delphi AHP method for the estimation and classification of Ghomrud tunnel from groundwater flow hazard(Aalianvari et al., 2012)
PROBLÉMATIQUE	Le plan d'entretien des lignes a toujours été établi uniquement sur la base d'expériences et d'essais, car ce travail est difficile. Il en résulte de nombreux inconvénients.	L'une des principales difficultés pratiques souvent associées à la construction de tunnels est liée aux eaux souterraines. En effet, la conception, la construction et l'exploitation des tunnels nécessitent des contrôles de l'arrivée d'eau et de la pression de l'eau.
OBJECTIF	Introduire le processus de hiérarchie analytique (AHP) dans le problème de la maintenance des lignes électriques afin d'obtenir une programmation scientifique et objective de son processus	Présenter un nouveau système qui peut être approprié pour classer les sites de tunnels afin d'évaluer le potentiel d'infiltration des eaux souterraines selon les données préliminaires de l'enquête sur le terrain.
MÉTHODOLOGIE	Étude de cas	Étude de cas
HYPOTHÈSE	Si l'estimation comporte des erreurs, il est certain que la matrice de jugement en comporte également. Par conséquent, nous devons procéder à un contrôle de cohérence pour éviter une matrice de jugement antipathique.	Si les valeurs du rapport de cohérence pour la matrice de comparaison de l'AHP sont inférieures à 0,10, alors le traitement des données pour classer les sites de tunnels peut être introduit sinon la comparaison par paire doit être revue
CRITÈRES ET SOUS-CRITÈRES	Fiabilité, efficacité économique, temps d'arrêt, coût d'exploitation, état de l'équipement, état de l'environnement, qualité du circuit, pertes des consommateurs	Paramètres géologiques, paramètres des tunnels, paramètres hydrologiques, discontinuité, formation, rayon du tunnel, déversement au-dessus du tunnel, hauteur d'eau au-dessus du tunnel, pluie annuelle, défaillance, jointure, type de roche, météorologie, type de faille, déplacement, largeur de la zone d'impact, gouge, jeu de joints, fréquence, résistance, matériau de remplissage, ouverture
ALTERNATIFS	Ligne 1,, ligne n	Emplacements 1, ..., emplacements n
RÉSULTAT ET CONCLUSION	L'introduction d'une méthode AHP dans la maintenance des lignes électriques est une recherche bénéfique pour construire un mécanisme d'évaluation scientifique et objectif dans un système complexe.	Classification des emplacements des tunnels du point de vue du risque lié aux eaux souterraines et détermination de la quantité d'eau souterraine qui s'y écoule.

ARTICLE	Choosing the optimal technology to rehabilitate the pipes in water distribution systems using the AHP method(A chilean et al., 2017)	Distance protection relays installation prioritization in distribution networks using analytic hierarchy process and cost-benefit analysis(Išlić et al., 2017)
PROBLÉMATIQUE	En Roumanie, le remplacement des réseaux de distribution d'eau devrait être une priorité, étant donné que leur durée de vie normale a été excédée et que, les pertes d'eau sont bien supérieures aux limites acceptées spécifiées dans la norme roumaine 1343-1:2006 (Asro, 2006).	En raison de l'augmentation des installations de générateurs distribués (DG) de faible capacité et de la pénalisation des interruptions d'approvisionnement dans le réseau de distribution électrique, il est nécessaire d'investir dans le système de protection de la distribution.
OBJECTIF	Sélectionner la technologie optimale pour la réhabilitation des conduites du système d'approvisionnement en eau domestique de Cluj-Napoca, en Roumanie.	Déterminer les lignes qui méritent d'être protégées par une protection à distance et, en fonction de cela, l'ordre d'investissement par le processus hiérarchique analytique (AHP).
MÉTHODOLOGIE	Études de cas	Étude de cas
HYPOTHÈSE	Si la comparaison entre deux critères est inversée, la valeur de l'importance est égale à l'inverse de la valeur de la comparaison directe.	Si les investissements à venir sont planifiés dans des sous-stations avec des lignes issues de l'analyse, cela rendrait l'investissement d'installation de relais numériques moins coûteux, notamment les coûts de conception et de mise en service.
CRITÈRES ET SOUS-CRITÈRES	Diamètre du tuyau, longueur de la canalisation, temps nécessaire à l'installation, rapport de durée de vie entre le tuyau réhabilité et le tuyau non réhabilité, pertes de pression, prix, conditions d'installation	l'accessibilité de la ligne (rapport de distance, boisé, collinéen, rapport de zone souterraine/sous-marine), fiabilité de la ligne (durée d'interruption, fréquence d'interruption), importance de la ligne (topologie, charge, statistiques, production, niveau de tension, longueur de la ligne), potentiel de la ligne (potentiel de consommation, potentiel de production), autres indicateurs (cofinancement, infrastructure de communication, revitalisation), la disponibilité, fiabilité, pertinence, état de préparation, la tendance à l'augmentation
ALTERNATIFS	Tuyau compact, Slipline, Subline, Swagelining, tuyau polymérisé en place (CIPP), GFK Liner, Berstlining, tuyau pilote, microtunnelage, coupe à blanc	Ligne 1,, ligne n
RÉSULTAT ET CONCLUSION	Il est recommandé que la réhabilitation des réseaux de distribution d'eau de Cluj-Napoca soit effectuée en mettant en œuvre l'alternative n° 2, selon la méthode Slipline dans le cas échéant.	Cette analyse montre la valeur économique-technique de l'investissement observé sur plusieurs lignes, mais compte tenu de l'importance considérable de la protection, d'autres moyens d'assurer sa réalisation doivent être envisagés pour obtenir la fonction de protection à distance pour les lignes restantes.

ARTICLE	Effectiveness Evaluation System and Evaluation Method For Anti-birds Damage Technical Transformation Projects of Overhead Lines(Zhang et al., 2019)	An Evaluation Model of Quantitative and Qualitative Fuzzy Multi-Criteria Decision-Making Approach for Hydroelectric Plant Location Selection(Chien et al., 2020)
PROBLÉMATIQUE	Les dommages causés par les oiseaux sont devenus un facteur indispensable qui menace le fonctionnement sûr du réseau électrique en raison d'accidents tels que l'interruption des lignes et des communications.	La réalisation de l'objectif de réduction des émissions mondiales de gaz à effet de serre, pour le Vietnam, tel que sont définis dans l'accord de Paris sur les changements climatiques, dépendra fortement de la feuille de route du développement de centrales hydroélectriques
OBJECTIF	Former le modèle quantitatif de l'effet de l'investissement du projet de transformation de la technologie de production des lignes aériennes à mesure unique	L'application d'un modèle de prise de décisions multicritères (MCDM) pour sélectionner la meilleure option pour l'installation de centrales hydroélectriques fluviales au Vietnam.
MÉTHODOLOGIE	Étude de cas	Étude de cas
HYPOTHÈSE	Si le coût du cycle de vie du plan de traitement anti-oiseaux est réduit et que la perte économique causée par le danger des lignes aériennes est évitée, alors le coût est en partie l'avantage économique du projet.	L'alternative choisie doit avoir la distance géométrique la plus courte par rapport à la solution idéale positive (PIS) et la distance géométrique la plus longue par rapport à la solution idéale négative (NIS).
CRITÈRES ET SOUS-CRITÈRES	Taux de déclenchement de la panne due aux dommages causés par les oiseaux, taux de défaillance des installations de picorage d'oiseaux, taux de dégradation de l'équipement de picorage des oiseaux, indicateurs de performances, indice global, proximité relative des solutions optimales	Faune protégée, qualité de l'eau, population de poissons, qualité du terrain, végétation, débit d'eau, fragilité et érosion du sol, opposition du public au projet, accumulation ou synergie avec d'autres projets, coût du projet, puissance électrique totale du projet, distance entre la centrale et la ligne de réseau, distance de la centrale par rapport à la route, distance de la centrale par rapport au village
ALTERNATIFS	Quatre projets de démonstration typiques de protections contre les oiseaux	Dix emplacements potentiels pour investir dans la construction de centrales hydroélectriques
RÉSULTAT ET CONCLUSION	La validité du système de critères d'évaluation et de la méthode pour mesurer l'effet du projet d'amélioration de la technologie de lutte contre les oiseaux nuisibles est vérifiée par l'analyse d'un exemple qui donne au projet 1 la priorité due au score supérieur de ces critères	Nghe An (LOC05) s'avère être la solution optimale pour sélectionner les portions de rivière où les centrales hydroélectriques sont viables au Vietnam.

ARTICLES	Evaluating Design Alternatives of Constructed Storm-Water Treatment Wetlands (Sahin et al., 2015)	Evaluation and Routing of Power Transmission Lines by Using AHP Method and Genetic Algorithm (Hosseini & Bahmani, 2011)
PROBLÉMATIQUES	Les installations de gestion des eaux pluviales sont des éléments importants de l'infrastructure civile et sont sensibles aux événements météorologiques extrêmes, comme une tendance à l'augmentation des précipitations fortes qui génèrent des pics de ruissellement.	Pour calculer la meilleure route pour la transmission d'énergie d'une source déterminée à une destination quelconque. Les anciennes méthodes avec un ordre fixe comme l'algorithme de Dijkstra deviennent généralement frustrantes et ont une charge de calcul élevée.
OBJECTIFS	Sélectionner les meilleures alternatives de conception de zones humides construites pour le traitement des eaux de pluie et préparer le sud-est du Queensland, en Australie, aux impacts attendus des changements climatiques.	Sélectionner la meilleure route pour construire un réseau de lignes de transmission d'énergie, en trouvant les points nodaux appropriés pour l'installation des tours de transmission et en déterminant une fonction pour calculer les coûts entre ces points.
MÉTHODOLOGIE	Étude de cas	Étude de cas
HYPOTHÈSE	La décision fondée sur un seul critère serait une simplification excessive des caractéristiques du problème considéré et pourrait donc conduire à des décisions inappropriées	<ul style="list-style-type: none"> • Il existe un chemin entre deux nœuds. • Les techniques multicritères existent déjà sous la forme de programmes informatiques autonomes.
CRITÈRES ET SOUS-CRITÈRES	La santé et la sécurité publique, santé des écosystèmes, considérations économiques, considérations sociales, contrôle des inondations et du drainage	Critères techniques : exécutif (le respect de la vie privée autorisée et légale, l'absence d'interférence sonore, les points avec un angle plus bas), maintenance (l'accessibilité, la résistance dans des conditions climatiques difficiles, la sécurité), économique (établir le temps, le coût minimum). Critères environnementaux : absence de danger pour l'environnement, absence de dommages à l'environnement. Critères socio-environnementaux : respect des règles générales (éviter de traverser les zones résidentielles et les établissements publics, éviter de traverser les terres agricoles et les monuments historiques), coordination avec les plans de construction régionaux.
ALTERNATIFS	Marécage superficiel, étang/marais, marais de rétention étendue, systèmes de poches humides	Les points disponibles pour l'installation de tours de transmission d'électricité
RÉSULTAT ET CONCLUSION	Les résultats combinés de cette étude exploratoire montrent que, parmi les trois groupes de parties prenantes, la santé et la sécurité publiques, les inondations et le contrôle du drainage sont respectivement les plus prioritaires.	Les résultats obtenus montrent que l'algorithme proposé est plus précis que l'algorithme comparé. Il en est de même pour le temps écoulé.

ARTICLES	Fuzzy Integrated Analytic Hierarchy Process Approach for Selecting Strategic Big-sized R&D Programs in the Sector of Energy Technology Development (S. K. Lee et al., 2009)	Impact of climate change on network components : Root Cause Analysis of overhead distribution network failures due to heavy Snowfall- a Case Study Gilan, Iran, Feb. 2020 (Salmanpour et al., 2021)
PROBLÉMATIQUES	Le développement des technologies de l'énergie est un élément crucial pour la sécurité énergétique nationale et l'environnement de la Corée,	Les changements climatiques ont infligé à la planète de nombreux dommages, assez catastrophiques, devenant parfois imprévisibles et causant de grands dommages à toutes sortes de structures telles que les lignes aériennes. En l'absence d'actions préventives, l'infrastructure du réseau électrique pourrait devenir extrêmement vulnérable.
OBJECTIFS	Évaluer et sélectionner les programmes stratégiques de R&D à grande échelle dans le secteur du développement des technologies énergétiques	Déterminer les principales causes des points faibles du réseau, développer des solutions efficaces pour les minimiser et présenter un modèle qui augmente la résilience du réseau contre la neige lourde.
MÉTHODOLOGIE	Étude de cas	Étude de cas
HYPOTHÈSE	N/A	N/A
CRITÈRES ET SOUS-CRITÈRES	Environnement énergétique (prix élevés du pétrole, CCNUCC et économie de l'hydrogène), retombées économiques (économies d'énergie et réduction des émissions de CO2), retombées techniques (urgence du développement technologique, niveau technologique/cible et possibilité de commercialisation), commercialisation (taille du marché national/étranger, taille du marché pour l'exportation et effets sur la création d'emplois), mission KIER (lien avec la politique nationale, secteur public et capacité internationale), coût (avantage de l'investissement et taille de l'investissement).	<ul style="list-style-type: none"> • L'efficacité de la solution pour prévenir la réapparition du problème. • Résolution d'une grande partie du problème par la mise en œuvre de la solution • Alignement de la solution avec les objectifs et les stratégies de l'entreprise • Dans quelle mesure la solution est-elle techniquement réalisable et appropriée? • Dans quelle mesure la solution est-elle faisable et appropriée sur le plan financier?
ALTERNATIFS	Les cinq programmes stratégiques de R&D	Les 299 paramètres des solutions
RÉSULTAT ET CONCLUSION	Cette recherche fournit aux responsables de la politique énergétique les données fondamentales nécessaires pour établir le cadre d'un programme de R&D stratégique de grande envergure afin de produire des résultats bien focalisés plutôt que simples.	Les méthodes RCA et AHP ont été utilisées pour développer des solutions optimales afin d'augmenter la résilience du réseau et de modifier en partie les priorités de maintenance préventive (PM) en fonction des résultats présentés.

ARTICLE	Improving Predictive Maintenance for HVDC Transmission Systems through Analytic Hierarchy Process(Ciupăgeanu & Costinas, 2017)	A combined goal programming – AHP approach supported with TOPSIS for maintenance strategy selection in hydroelectric power plants (Özcan et al., 2017)
PROBLÉMATIQUE	Les systèmes électriques modernes ont besoin de nouvelles solutions de maintenance pour améliorer leur fiabilité et accroître leur stabilité, mais aussi pour réduire les coûts d'exploitation qu'ils impliquent.	La maintenance est un processus crucial qui doit être géré pour améliorer la production d'énergie durable d'un système dans les centrales électriques.
OBJECTIFS	Présenter une méthode hiérarchique basée à la fois sur l'évaluation de l'importance relative des critères sélectionnés par rapport à l'objectif principal établi et sur les sous-systèmes considérés pour chaque critère et l'appliquer à un système de transmission HVDC, afin d'améliorer l'organisation de leur stratégie de maintenance.	Déterminer les combinaisons de stratégies de maintenance les plus appropriées pour les équipements électriques les plus critiques dans une grande centrale hydroélectrique en Turquie et utiliser une méthodologie combinée AHP-TOPSIS pour la sélection des équipements les plus critiques.
MÉTHODOLOGIE	Étude de cas	Étude de cas
HYPOTHÈSE	N/A	N/A
CRITÈRES ET SOUS-CRITÈRES	Temps depuis la mise en service, expérience d'exploitation, taux de défaillance des équipements du sous-système, temps d'indisponibilité, sécurité, environnement	<ul style="list-style-type: none"> • Critères du modèle AHP-TOPSIS : Sauvegarde de l'entrepôt, conditions préalables de maintenance, période de défaillance, conséquences possibles, disponibilité des équipements de mesure, propriété statique, dynamique ou électrique de l'équipement, temps de dépannage, détectabilité de la défaillance, Exigence de travail supplémentaire • Critères du modèle AHP-GP : Occurrence, gravité, détectabilité
ALTERNATIFS	Équipement AC et auxiliaire, Relais Thyristor, Équipement DC, Ligne de transmission, Contrôle et protection	<ul style="list-style-type: none"> • Alternatifs du modèle AHP-TOPSIS : Rotor de générateur, stator de générateur, transformateur d'excitation, transformateur de puissance principal, disjoncteur de poste de commutation de 380 kV, sectionneur de barre omnibus de poste de commutation de 380 kV, transformateur de courant de poste de commutation de 380 kV, transformateur de tension de poste de commutation de 380 kV, ressort et balais de carbone • Alternatifs du modèle AHP-GP : Maintenance préventive, maintenance corrective, maintenance prédictive, maintenance de révision
RÉSULTAT ET CONCLUSION	La méthode AHP appliquée aux problèmes liés à la maintenance a permis d'obtenir une hiérarchie des sous-systèmes HVDC par rapport à la politique d'intervention, réduisant ainsi le temps d'indisponibilité du système.	Une amélioration d'environ 77 % des temps d'arrêt résultant de la mise en œuvre de la stratégie de maintenance inappropriée sur les équipements critiques sélectionnés par rapport à la période où le modèle n'est pas utilisé.

ARTICLE	Integrating sustainability into strategic decision-making: A fuzzy AHP method for the selection of relevant sustainability issues (Calabrese et al., 2019)		
PROBLÉMATIQUE	Lorsque les entreprises n'intègrent pas la durabilité dans leurs processus, leurs stratégies et leurs visions à long terme, leurs activités commerciales risquent de générer des impacts négatifs sur l'environnement et la société. En revanche, si une entreprise investit dans la durabilité sans approche stratégique, en simple réaction aux demandes des institutions ou des parties prenantes, elle risque de se lancer dans des activités sans rapport avec son activité et ses stratégies de base (Porter & Kramer, 2006)		
OBJECTIF	Appliquer la méthode floue du processus de hiérarchisation analytique (AHP) pour sélectionner les questions de durabilité les plus pertinentes afin de créer une valeur partagée à la fois pour les entreprises et la société, et qui devrait être au centre de la planification et de la gestion stratégiques, et d'intégrer le cadre ISO 26000 à la méthode pour permettre un traitement holistique de tous les domaines de la durabilité.		
MÉTHODOLOGIE	Étude de cas		
HYPOTHÈSE	La durabilité des entreprises ne peut réussir que si elle est intégrée dans la vision et la stratégie de l'entreprise		
CRITÈRES ET SOUS-CRITÈRES	Chaîne de valeur :		Contexte concurrentiel :
	Activités de soutien :	Activités principales :	<ul style="list-style-type: none"> - Contexte de la rivalité entre entreprises - Conditions de la demande locale - Industries connexes et de soutien - Conditions des facteurs (intrants)
ALTERNATIFS	Prévention de la pollution, utilisation durable des ressources, atténuation des changements climatiques et adaptation au changement climatique, protection de l'environnement, biodiversité et restauration des habitats naturels		
RÉSULTAT ET CONCLUSION	L'application de la méthode à une entreprise de taille moyenne spécialisée dans la conception et la fabrication de valves et de systèmes hydrauliques démontre son efficacité dans le cas d'une PME qui a l'intention d'entreprendre l'intégration de la durabilité dans ses processus stratégiques et opérationnels. Selon le PDG de cette entreprise, la mise en œuvre de cette approche a contribué à renforcer la sensibilisation au développement durable dans les pratiques commerciales.		

ARTICLE	Multi-criteria Analysis of the Expansion Plan of the Transmission System of Paraguay (González et al., 2019)	Multi-criteria decision making for reconductoring overhead lines (Inès & Ammar, 2020)
PROBLÉMATIQUE	Le plan principal de l'ANDE 2016-2025 expose une série de travaux de génération, de transmission et de distribution requis par le système national interconnecté (NIS) pour répondre aux exigences de la demande, étendre le système et promouvoir le développement économique du pays, toutefois ceci ne détermine pas quels travaux sont les plus essentielles pour ce dernier.	La reconduction des lignes aériennes du réseau tunisien de 225kV peut être faite en utilisant différentes technologies de conducteurs HTLS disponibles. Mais pour augmenter la capacité de transport du courant électrique dans ces lignes, les sociétés de transport d'électricité doivent trouver la solution la plus adaptée à leur projet en tenant compte de plusieurs critères de même importance.
OBJECTIF	Identifier les travaux de lignes de transmission qui sont les plus prioritaires pour le système dans le but de réduire ou d'ajuster les coûts liés à l'exploitation du système et de trouver l'utilisation correcte des ressources disponibles.	Comparer sept technologies de conducteurs HTLS avec différents scénarios de pondération en vue d'étudier la sensibilité des résultats de la classification et de trouver le meilleur compromis.
MÉTHODOLOGIE	Étude de cas	Étude de cas
HYPOTHÈSE	N/A	<ul style="list-style-type: none"> On considère la flèche maximale du conducteur ACSR à 75 °C comme la flèche maximale tolérable, cela limitera la capacité de température des conducteurs et par conséquent leur ampérage.
CRITÈRES ET SOUS-CRITÈRES	<ul style="list-style-type: none"> Critère économique (C1) : Coût d'exploitation total du système interconnecté (COP), coût d'investissement total de l'ouvrage (CIT) Critère technique (C2) : Les pertes totales d'électricité dans le système interconnecté, Critère de Faisabilité de réalisation (C3) : Niveau de financement de l'entreprise (NF), extension de la ligne de transmission (ELT) 	<ul style="list-style-type: none"> Électrique : ampérage, pertes de câble, chute de tension Affaissement Coût Environnement : santé humaine, potentiel de réchauffement climatique, qualité des écosystèmes, ressources.
ALTERNATIFS	Les lignes de transmission en 220 kV et 500 Kv	Les sept technologies de conducteurs HTLS (ACSS, STACIR, XTACIR, GTACSR, GZTACSR, ACCC, ACCR)
RÉSULTAT ET CONCLUSION	<p>Les résultats obtenus sont les suivants pour l'année 2019 : la solution la plus conforme à l'objectif est la "LT 220 kV VHA-PBOPCA" ; pour l'année 2020, la ligne "LT 220 kV MGA-K30" ; pour l'année 2021, la "LT 220 kV COV-CO2-CYO" ; pour l'année 2022, la ligne "LT 220 kV CYO-SES" ; pour l'année 2023, la ligne "LT 220 kV LAM-PSA" et enfin, pour les années 2024 et 2025, la ligne "LT 220 kV GUA-LAV-SLO".</p> <p>Ce qui a permis d'obtenir une série d'ouvrages de transmission prioritaires, en vue de réaliser l'objectif principal du projet</p>	Les résultats obtenus montrent que le conducteur ACCC est le meilleur par rapport aux six autres conducteurs HTLS dans ce cas d'étude.

ARTICLE	Multi-Criteria Selection for TNB Transmission Line Route Using AHP and GIS (Husain et al., 2012)	An Integrated Framework to Evaluate Resilient-Sustainable Urban Drainage Management Plans Using a Combined-adaptive MCDM Technique (Tahmasebi Birgani & Yazdandoost, 2018)
PROBLÉMATIQUE	De nouvelles lignes de transmission sont nécessaires pour répondre à la demande croissante d'électricité dans le district de Selangor, toutefois leur acheminement requiert une variété de critères pour déterminer la route la plus appropriée.	Il est nécessaire d'intégrer les concepts de durabilité et de résilience dans la gestion du drainage urbain. Cependant, il n'y a pas encore d'étude qui traite de cette question dans ce domaine.
OBJECTIF	Déterminer les critères à prendre en compte pour localiser le cheminement de la ligne de transmission.	Présenter un nouveau cadre intégré pour sélectionner les systèmes de drainage urbain en fonction de leur résilience et de leur durabilité.
MÉTHODOLOGIE	Étude de cas	Étude de cas
HYPOTHÈSE	N/A	
CRITÈRES ET SOUS-CRITÈRES	<p>1) Impact de la longueur, du terrain, des angles, des obstacles et des croisements spéciaux sur le coût et la résistance de la ligne.</p> <p>2) Facilité et coût de l'entretien.</p> <p>3) Gestion de la végétation.</p> <p>4) Impact des services publics aériens et souterrains existants qui sont parallèles à la route ou qui la traversent. Cela comprend l'électricité, les télécommunications, le gaz, le pétrole, l'eau, les égouts, le drainage et l'irrigation.</p> <p>5) Disponibilité, restrictions ou limitations de l'utilisation des droits de passage publics.</p> <p>6) Impact de la ligne sur l'utilisation des terres, l'environnement et les sites ou zones historiques, archéologiques ou biologiquement sensibles.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Technique : facilité de mise en œuvre, facilité de connexion, facilité de renouvellement, facilité d'entretien, durée de vie, multifonctionnalité. - Économique : durée de récupération, coût de construction, coût d'entretien et d'exploitation, coût de possession du terrain, dommages annuels attendus, capacité de résistance. - Social : gradualité, style de vie, bien-être des résidents, beauté du paysage urbain, réponse annuelle attendue, capacité de récupération, point de résistance, point d'alerte. - Environnemental : volume de ruissellement, charges polluantes - Planification : conformité avec les politiques des gestionnaires, conformité avec les objectifs de développement durable, acceptabilité des résidents, perspectives de développement, simplicité de la formation
ALTERNATIFS	Les différentes routes des lignes de transmission	Les différents systèmes de drainage urbain
RÉSULTAT ET CONCLUSION	Sur la base d'une comparaison par paire AHP pour attribuer des poids aux routes alternatives, il en résulte un classement relatif de celles-ci dans lequel le chemin le mieux classé est considéré comme étant privilégié.	Le cadre présenté fournit des informations complètes sur le comportement des plans de drainage urbain contre les inondations urbaines ainsi que sur leur durabilité pour les gestionnaires urbains.

ARTICLE	Principles of the EP-AMIS GIS/Multicriteria methodology for Participatory Electric Power Transmission Line Routing (Bailey, 2006)	Research on AHP-based Multi-factor Medium Voltage Distribution Network Line Risk Quantitative Assessment Method (Nie et al., 2021)
PROBLÉMATIQUE	La satisfaction des parties prenantes à l'égard de l'analyse de sensibilité spatiale pour évaluer quantitativement les options de routage des lignes de transport d'électricité et modéliser leurs changements dynamiques est un facteur important pour faciliter la prise de décision analytique collaborative.	En tant que maillon du réseau électrique le plus proche de l'utilisateur, la ligne du réseau de distribution de 10kV est étroitement liée à la sécurité et à la fiabilité. Si elle n'est pas en mesure de contrôler efficacement les facteurs internes et externes qui la concernent, en ce cas une fois qu'une défaillance se produit, elle impacte la production et la vie des utilisateurs, ce qui a son tour affecte les bénéfices économiques de la compagnie électrique et l'efficacité du respect des obligations sociales.
OBJECTIF	Appliquer la méthode du système d'aide à la décision géospatiale (GeoDSS) et de la Surface d'impédance minimale d'analyse participative améliorée (EP-AMIS) pour le routage des lignes de transport en vue d'encourager la collaboration multipartite et d'utiliser des principes logiques.	Améliorer la gestion des risques et les méthodes de contrôle du réseau de distribution, ainsi que la sécurité et la fiabilité du fonctionnement
MÉTHODOLOGIE	Étude cas	Étude de cas
HYPOTHÈSE	N/A	- Des facteurs tels que la température et les informations sur les vacances doivent être pris en compte lors de l'établissement d'un modèle de prédiction de la charge lourde et de la surcharge des lignes. - L'impact des pannes de courant sur les utilisateurs est pris en compte, et quantifié en fonction de la zone et du nombre d'utilisateurs.
CRITÈRES ET SOUS-CRITÈRES	Socio-économique, facteurs d'ingénierie tels que la géologie et la pente, environnemental, caractéristiques créées par l'homme, santé et de sécurité, visibilité et facteurs réglementaires	Défauts des équipements, panne de courant, conditions météorologiques, impact des coupures de courant sur les usagers, influence sociale, nature de l'utilisateur, gravité des risques
ALTERNATIFS	Les différentes routes des lignes de transmission	Les lignes du réseau de distribution de 10kV
RÉSULTAT ET CONCLUSION	La puissance d'analyse et la flexibilité de la surface d'impédance minimale d'analyse participative améliorée (EP-AMIS) permettent aux décideurs de prendre des décisions plus éclairées, solides et rationnelles en utilisant les contributions de plusieurs parties prenantes. EP-AMIS vise à améliorer la qualité, la légalité et la durabilité du processus d'acheminement du transport d'électricité et à éviter les litiges survenus dans des affaires antérieures.	Sur la base de l'étude approfondie de l'évaluation quantitative du risque de réacheminement du réseau de distribution 10kV, combinée à des facteurs tels que la zone de la ligne et la nature de l'utilisateur, un système d'évaluation quantitative du risque de réacheminement du réseau de distribution 10kV est établi. Ainsi avec l'augmentation des échantillons d'évaluation, des algorithmes d'apprentissage automatique peuvent être envisagés à un stade ultérieur pour la prédiction du risque de réacheminement de la ligne.

ARTICLE	Scenario Planning for Climate Strategies Development by Integrating Group Delphi, AHP and Dynamic Fuzzy Cognitive Maps (Biloslavov & Dolinsek, 2008)
PROBLÉMATIQUE	Le comportement inapproprié de la société industrielle et la surexploitation des ressources naturelles ont entraîné des changements climatiques non naturels évidents, comme le réchauffement de la planète et le trou d'ozone. La détection des domaines organisationnels et des technologies clés qui peuvent avoir un impact positif sur ce problème est un défi constant pour toute partie concernée.
OBJECTIF	Proposer une approche hybride de la planification de scénarios sur le réchauffement climatique en intégrant la méthode Delphi, le processus de hiérarchisation analytique (AHP) et les cartes cognitives dynamiques floues.
MÉTHODOLOGIE	Simulation et Étude de cas
HYPOTHÈSE	<ul style="list-style-type: none"> - Si la conscience humaine est fortement présente dans la société, les normes d'émission de gaz seront plus sévères, - Une organisation de l'ère industrielle peut se transformer en une organisation de l'ère de la connaissance si elle parvient à dépasser la trilogie stratégie-structure-systèmes pour établir un objectif.
CRITÈRES ET SOUS-CRITÈRES	<ul style="list-style-type: none"> - Variété d'écosystèmes : déforestation, érosion des sols. - Investissement en capital : conscience humaine, taxes sur la pollution - Réchauffement climatique : inondations, GES, normes d'émission - Technologie : demande d'énergie, efficacité énergétique
ALTERNATIFS	Les différents plans de scénarios sur le réchauffement climatique
RÉSULTAT ET CONCLUSION	Sur la base de ces données, le rapport conclut que le futur est relativement prometteur, quoique peu encourageant. Le fait que les facteurs identifiés soient tous nuls indique qu'au bout de quelques années environ, il sera possible d'arrêter les processus climatiques négatifs, mais pas de résoudre le problème de manière à améliorer sensiblement la situation actuelle.

ARTICLE	Selecting Projects on the Brazilian R&D Energy Sector: A Fuzzy-Based Approach for Criteria Selection (Souza, Silva, & Soma, 2020)
PROBLÉMATIQUE	De nombreuses entreprises à travers le monde s'appuient sur la recherche et le développement pour mieux saisir les bénéfices et les opportunités durables sur des marchés dynamiques. Cependant, seuls quelques-uns accordent toute leur importance aux critères utilisés, enjeu central dans toute prise de décision multicritère lors d'une R&D.
OBJECTIF	Présenter l'hypothèse selon laquelle les critères utilisés dans la sélection du portefeuille de projets peuvent être définis dans un environnement incertain, en fonction de leur utilité et de leur importance dans une étude de cas pour une organisation de R&D brésilienne représentative du secteur public électrique, entre 2008 et 2018.
MÉTHODOLOGIE	Étude de cas
HYPOTHÈSE	<ul style="list-style-type: none"> - Les critères utilisés dans le PPS R&D peuvent être sélectionnés dans un environnement incertain, en fonction de leur influence et de leur importance. - Il existe une incertitude liée à l'imprécision des données
CRITÈRES ET SOUS-CRITÈRES	<ul style="list-style-type: none"> - Rendements environnementaux : externe, interne - Ressources : ressources matérielles, ressources humaines - Bénéfice : bénéfice financier, potentiel et attrait du marché, bénéfice non financier - Risque : risque commercial et de marché, risque d'envergure, risque technique - Critères de réalisation : revenu financier, critères organisationnels, critères de qualité, critères de temps - Technique : extensibilité, contribution technique et caractère innovant, problèmes et contraintes techniques - Stratégie : compétitivité & partenariat, image de l'entreprise, aptitude stratégique - Impact social & environnemental : impact environnemental, impact sur le développement humain, impact social
ALTERNATIFS	Les différents projets R&D à sélectionner
RÉSULTAT ET CONCLUSION	<ul style="list-style-type: none"> - L'approche proposée s'est avérée applicable en fournissant des réponses exploitables, basées sur l'importance des critères, leur influence et l'imprécision potentielle des données. Toutefois, son utilisation est déconseillée pour les décisions basées sur un faible nombre de critères, compte tenu du fait qu'elle semble leur attribuer plus fréquemment une pondération nulle, que les approches classiques. C'est pourquoi il est recommandé de l'utiliser non seulement pour pondérer les critères, mais aussi pour les choisir. - Les résultats de l'étude de cas reflètent les préoccupations actuelles des Brésiliens sur les critères prioritaires, notamment environnementaux, sociaux et techniques, en particulier face aux catastrophes médiatisées des dernières années.

ARTICLE	Selection of Distributed Generation for Distribution Network: A Study in Multi-criteria Framework (Kayal et al., 2014)	Sustainable Development Contribution Assessment of Renewable Energy Projects using AHP and Compromise Programming Techniques (Samal & Kansal, 2015)
PROBLÉMATIQUE	L'aggravation du déséquilibre entre l'offre et la demande d'énergie, avec des conséquences majeures sur les prix de l'énergie, la menace d'un changement climatique perturbateur et l'érosion de la sécurité énergétique, a donné un élan à l'utilisation des technologies de production décentralisée (PD). Cependant, le choix approprié de la technologie de production décentralisée, son emplacement et sa taille dans le réseau de distribution sont devenus un véritable défi.	Des mécanismes flexibles comme le mécanisme de développement propre (MDP) évaluent la contribution au développement durable des projets énergétiques pour l'octroi d'une aide financière. En l'absence de données fiables, le processus est essentiellement qualitatif et constitue donc un véritable obstacle à la prise de décision.
OBJECTIF	Analyser la portée de six différentes technologies de production décentralisée, à savoir l'énergie solaire photovoltaïque, l'éolienne, la biomasse, la pile à combustible, le moteur diesel et la turbine à gaz pour un réseau de distribution dans le district de South 24 Parganas, au Bengale occidental, en Inde.	Proposer des techniques de prise de décision multicritères pour l'évaluation quantitative du développement durable de quatre projets MDP enregistrés.
MÉTHODOLOGIE	Étude de cas	Étude de cas
HYPOTHÈSE	L'approche de planification de la production décentralisée prend en compte les trois conséquences majeures telles que le type, l'emplacement et la sélection de la taille des produits décentralisés.	N/A
CRITÈRES ET SOUS-CRITÈRES	<ul style="list-style-type: none"> - Technique : taille commerciale, facteur de puissance - Économique : coût d'investissement, coût d'exploitation et de maintenance. - Environnemental : émission de CO₂, émission de SO₂. - Ressources : disponibilité des unités, disponibilité des ressources 	<ul style="list-style-type: none"> - Social : Implication des parties prenantes, équité sociale, création d'emplois et développement des compétences, patrimoine culturel. - Économique : Efficacité microéconomique, économie régionale, infrastructure. - Environnemental : réduction des émissions, biodiversité, ressources en eau et en terre, impact visuel et pollution sonore. - Technologique : transfert de technologie, innovation
ALTERNATIFS	L'énergie solaire photovoltaïque, l'éolienne, la biomasse, la pile à combustible, le moteur diesel et la turbine à gaz	Quatre projets MDP enregistrés
RÉSULTAT ET CONCLUSION	L'efficacité du modèle proposé a été démontrée par simulation sur un réseau de distribution typique de 28 bus. La perte minimale et la configuration de la stabilité de tension maximale du réseau ont été obtenues par WAMOPSO avec le photovoltaïque solaire comme meilleure option de DG pour la région orientale de l'Inde, qui satisfait les critères de contrainte de tension et de puissance.	Les scores de durabilité des quatre projets ne sont pas très différents les uns des autres. Cependant, ceci aidera certainement les décideurs à prioriser les projets. On peut donc interpréter les résultats de la manière suivante : le projet C a la distance normalisée la plus faible par rapport à la distance de l'idéal et donc devrait être prioritaire. En revanche, le projet B ne peut être approuvé que si les conditions financières des trois autres projets sont déjà remplies.

ANNEXE E : Priorité des alternatifs par rapport aux sous critères

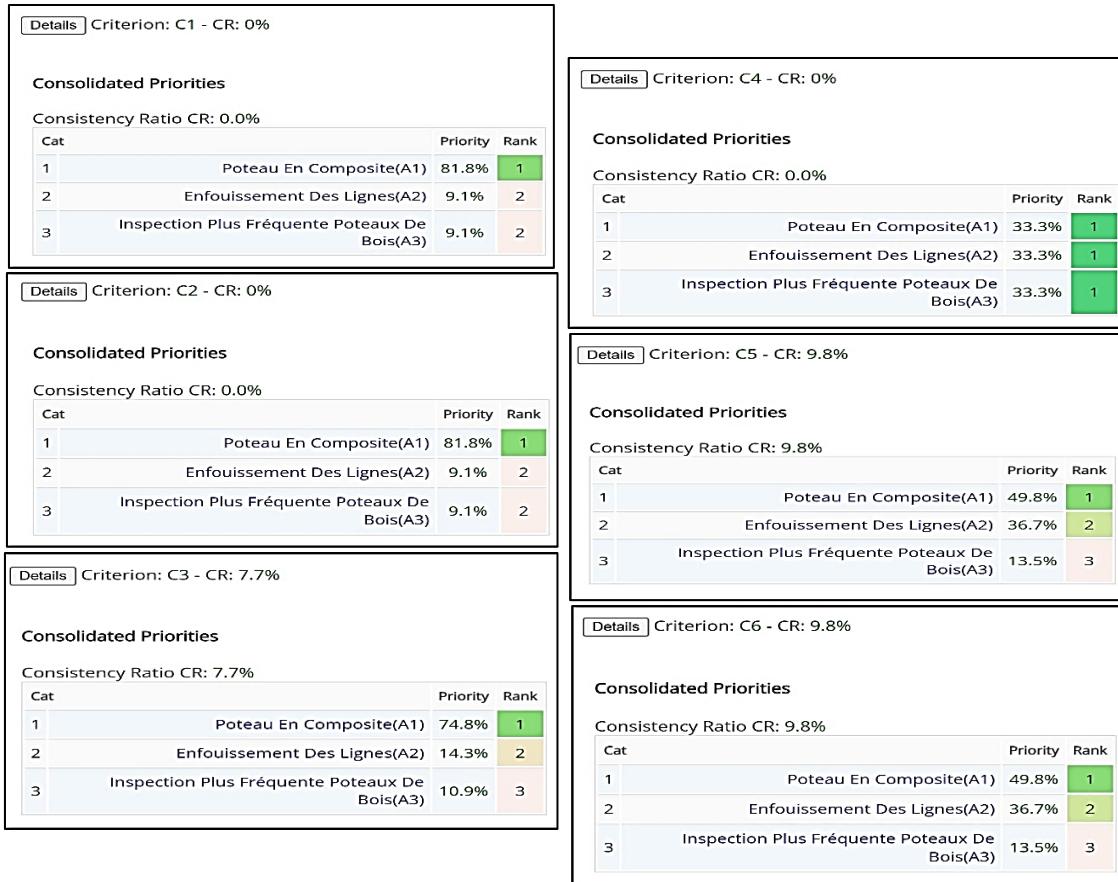


Figure 6-1 : Priorité des alternatifs par rapport aux sous critères C1 à C6

<p>Details Criterion: C7 - CR: 4%</p> <p>Consolidated Priorities</p> <p>Consistency Ratio CR: 4.0%</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Cat</th> <th>Priority</th> <th>Rank</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1 Poteau En Composite(A1)</td> <td>76.9%</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>2 Enfouissement Des Lignes(A2)</td> <td>10.4%</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>3 Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)</td> <td>12.7%</td> <td>2</td> </tr> </tbody> </table>	Cat	Priority	Rank	1 Poteau En Composite(A1)	76.9%	1	2 Enfouissement Des Lignes(A2)	10.4%	3	3 Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)	12.7%	2	<p>Details Criterion: C11 - CR: 0%</p> <p>Consolidated Priorities</p> <p>Consistency Ratio CR: 0.0%</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Cat</th> <th>Priority</th> <th>Rank</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1 Poteau En Composite(A1)</td> <td>33.3%</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>2 Enfouissement Des Lignes(A2)</td> <td>33.3%</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>3 Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)</td> <td>33.3%</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	Cat	Priority	Rank	1 Poteau En Composite(A1)	33.3%	1	2 Enfouissement Des Lignes(A2)	33.3%	1	3 Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)	33.3%	1
Cat	Priority	Rank																							
1 Poteau En Composite(A1)	76.9%	1																							
2 Enfouissement Des Lignes(A2)	10.4%	3																							
3 Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)	12.7%	2																							
Cat	Priority	Rank																							
1 Poteau En Composite(A1)	33.3%	1																							
2 Enfouissement Des Lignes(A2)	33.3%	1																							
3 Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)	33.3%	1																							
<p>Details Criterion: C8 - CR: 0%</p> <p>Consolidated Priorities</p> <p>Consistency Ratio CR: 0.0%</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Cat</th> <th>Priority</th> <th>Rank</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1 Poteau En Composite(A1)</td> <td>47.4%</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>2 Enfouissement Des Lignes(A2)</td> <td>47.4%</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>3 Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)</td> <td>5.3%</td> <td>3</td> </tr> </tbody> </table>	Cat	Priority	Rank	1 Poteau En Composite(A1)	47.4%	1	2 Enfouissement Des Lignes(A2)	47.4%	1	3 Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)	5.3%	3	<p>Details Criterion: C12 - CR: 0%</p> <p>Consolidated Priorities</p> <p>Consistency Ratio CR: 0.0%</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Cat</th> <th>Priority</th> <th>Rank</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1 Poteau En Composite(A1)</td> <td>71.4%</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>2 Enfouissement Des Lignes(A2)</td> <td>14.3%</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>3 Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)</td> <td>14.3%</td> <td>2</td> </tr> </tbody> </table>	Cat	Priority	Rank	1 Poteau En Composite(A1)	71.4%	1	2 Enfouissement Des Lignes(A2)	14.3%	2	3 Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)	14.3%	2
Cat	Priority	Rank																							
1 Poteau En Composite(A1)	47.4%	1																							
2 Enfouissement Des Lignes(A2)	47.4%	1																							
3 Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)	5.3%	3																							
Cat	Priority	Rank																							
1 Poteau En Composite(A1)	71.4%	1																							
2 Enfouissement Des Lignes(A2)	14.3%	2																							
3 Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)	14.3%	2																							
<p>Details Criterion: C9 - CR: 0%</p> <p>Consolidated Priorities</p> <p>Consistency Ratio CR: 0.0%</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Cat</th> <th>Priority</th> <th>Rank</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1 Poteau En Composite(A1)</td> <td>81.8%</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>2 Enfouissement Des Lignes(A2)</td> <td>9.1%</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>3 Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)</td> <td>9.1%</td> <td>2</td> </tr> </tbody> </table>	Cat	Priority	Rank	1 Poteau En Composite(A1)	81.8%	1	2 Enfouissement Des Lignes(A2)	9.1%	2	3 Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)	9.1%	2	<p>Details Criterion: C13 - CR: 0%</p> <p>Consolidated Priorities</p> <p>Consistency Ratio CR: 0.0%</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Cat</th> <th>Priority</th> <th>Rank</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1 Poteau En Composite(A1)</td> <td>71.4%</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>2 Enfouissement Des Lignes(A2)</td> <td>14.3%</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>3 Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)</td> <td>14.3%</td> <td>2</td> </tr> </tbody> </table>	Cat	Priority	Rank	1 Poteau En Composite(A1)	71.4%	1	2 Enfouissement Des Lignes(A2)	14.3%	2	3 Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)	14.3%	2
Cat	Priority	Rank																							
1 Poteau En Composite(A1)	81.8%	1																							
2 Enfouissement Des Lignes(A2)	9.1%	2																							
3 Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)	9.1%	2																							
Cat	Priority	Rank																							
1 Poteau En Composite(A1)	71.4%	1																							
2 Enfouissement Des Lignes(A2)	14.3%	2																							
3 Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)	14.3%	2																							
<p>Details Criterion: C10 - CR: 0%</p> <p>Consolidated Priorities</p> <p>Consistency Ratio CR: 0.0%</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Cat</th> <th>Priority</th> <th>Rank</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1 Poteau En Composite(A1)</td> <td>33.3%</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>2 Enfouissement Des Lignes(A2)</td> <td>33.3%</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>3 Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)</td> <td>33.3%</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	Cat	Priority	Rank	1 Poteau En Composite(A1)	33.3%	1	2 Enfouissement Des Lignes(A2)	33.3%	1	3 Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)	33.3%	1	<p>Details Criterion: C14 - CR: 0%</p> <p>Consolidated Priorities</p> <p>Consistency Ratio CR: 0.0%</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Cat</th> <th>Priority</th> <th>Rank</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1 Poteau En Composite(A1)</td> <td>33.3%</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>2 Enfouissement Des Lignes(A2)</td> <td>33.3%</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>3 Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)</td> <td>33.3%</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	Cat	Priority	Rank	1 Poteau En Composite(A1)	33.3%	1	2 Enfouissement Des Lignes(A2)	33.3%	1	3 Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)	33.3%	1
Cat	Priority	Rank																							
1 Poteau En Composite(A1)	33.3%	1																							
2 Enfouissement Des Lignes(A2)	33.3%	1																							
3 Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)	33.3%	1																							
Cat	Priority	Rank																							
1 Poteau En Composite(A1)	33.3%	1																							
2 Enfouissement Des Lignes(A2)	33.3%	1																							
3 Inspection Plus Fréquente Poteaux De Bois(A3)	33.3%	1																							

Figure 6-2 : Priorité des alternatifs par rapport aux sous critères C7 à C14



Figure 6-3 : Priorité des alternatifs par rapport aux sous critères C15 à C22



Figure 6-4 : Priorité des alternatifs par rapport aux sous critères C23 à C32

