

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

MODÉLISATION ET SIMULATIONS NUMÉRIQUES-QUANTIQUES SUPPORTANT
LA CONCEPTION D'ISOLATION GAZEUSE ENVIRONNEMENTALEMENT NEUTRE
DANS LES DISJONCTEURS DE MOYENNE TENSION

THÈSE PRÉSENTÉE
COMME EXIGENCE PARTIELLE DU
DOCTORAT EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR
ARIANNE ORNELLA LEMO NGOUNOU

MARS 2025

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
DOCTORAT EN GÉNIE ÉLECTRIQUE (PH.D.)

Direction de recherche :

Prof. Adam W. Skorek	Directeur de recherche
----------------------	------------------------

Jury d'évaluation

Prof. Nassim Noura, Ph.D., UQTR	Président
---------------------------------	-----------

Prof. Ahmed Lakhssassi, Ph.D., UQO	Évaluateur
------------------------------------	------------

Dr Guy Olivier, professeur retraité de l'ÉPM	Évaluateur externe
--	--------------------

Prof. Adam Skorek, Ph.D., UQTR	Directeur de recherche
--------------------------------	------------------------

Thèse soutenue le 28 février 2025

DÉDICACE

À Dieu le père tout puissant.

REMERCIEMENTS

Je remercie Dieu tout puissant, car il a été à l'origine et au contrôle de tout.

Je remercie Prof. Adam W. Skorek d'avoir accepté de diriger cette thèse, une immense gratitude et une reconnaissance infinie pour son enseignement, sa disponibilité, son orientation, sa patience, ses conseils et recommandations, ses efforts fournis pour le bon déroulement de ces travaux de recherches, et son encadrement dans la recherche du financement et du stage effectué durant ces études.

Mes remerciements vont à l'endroit de l'Université du Québec à Trois-Rivières, pour l'admission à ce programme, et le soutien qui m'a été accordé durant mes études à travers la bourse Universalis Causa. Merci également aux professeurs et au personnel de l'université pour l'enseignement et le suivi dont j'ai bénéficié durant mon parcours.

Je remercie infiniment Christian Cossette, Rouzbeh Rezvani, Karl Igor-Pierre, et l'équipe CO7 Technologies inc, pour l'opportunité qui m'a été offerte d'effectuer un stage dans un environnement industriel de qualité, merci pour l'accueil, l'encadrement, la subvention et la convivialité qui ont meublé ce parcours. Merci également à l'organisme MITACS pour la subvention qui m'a été accordée pour ces travaux.

Je remercie ma famille, mes amis et connaissances pour le soutien physique, morale, et les encouragements, merci d'avoir été toujours là pour moi. Je remercie également Mactar Thiam pour l'excellente collaboration sur ce projet de recherche.

RÉSUMÉ

Les dangers personnels et environnementaux découlant de l'utilisation de certains gaz pour la fabrication des équipements électroniques sont mis en évidence dans de nombreux articles, nous poussant ainsi à nous tourner vers des mesures intégrant la protection de l'environnement et de la santé humaine.

Pour le cas des disjoncteurs à moyenne tension, le SF₆ est largement utilisé comme gaz isolant parce qu'il est non toxique, chimiquement inerte et thermiquement stable à des températures allant jusqu'à 500 °C. Cependant, il est connu comme un gaz qui se décompose dans les décharges électriques pour former des composés gazeux toxiques et corrosifs. Notre objectif est de trouver des voies et moyens pour éliminer ou réduire la formation de ces gaz à effet de serre fluorés, en remplaçant l'utilisation du SF₆ par un autre gaz ou mélange de gaz adéquat.

Dans cette étude, il est question d'élaborer et proposer une méthode générale permettant aux concepteurs d'équipements électriques de tester et d'adopter un gaz respectant les configurations industrielles selon les différents modèles de disjoncteurs moyenne tension à travers l'utilisation des gaz moins offensifs.

Une étude bibliographique a été menée pour cerner les méthodes actuelles de conception des disjoncteurs à base de SF₆, en nous servant des banques de données, IEEEExplore, des données industrielles disponibles, et de l'outil Endnote pour la gestion bibliographique.

Nous exploitons l'avantage de l'informatique quantique à travers l'utilisation de l'outil Qiskit d'IBM Quantum, et de l'algorithme d'optimisation QAOA pour construire un algorithme capable de maximiser le calcul de la rigidité diélectrique d'un mélange gazeux. Son avantage est qu'il rend possible l'exploration d'un espace de solution exponentiellement grand, inatteignable à travers des méthodes de calculs classiques.

Les travaux débutent par le choix du modèle de disjoncteur chez CO7, le VOX7. La recherche et le choix des outils de conception et simulation font partie intégrante de cette thèse, ainsi que l'utilisation de l'infrastructure de calcul quantique (IBM Quantum). La méthode proposée, une fois expérimentée sur une infrastructure de simulation quantique sous condition industrielle, est présentée de façon à être utilisée dans les travaux de recherche et de développement pour poursuivre l'optimisation.

Ma contribution et l'originalité de la thèse résident dans les études approfondies menant vers une méthode originale, innovante et optimisée dans le domaine de modélisation et simulation numérique en génie électrique.

Mots clés

SF₆, isolation gazeuse, informatique quantique, simulation, QAOA, optimisation combinatoire, innovation, disjoncteur, rigidité diélectrique, gaz neutre.

SF₆, gas insulation, quantum computing, simulation, QAOA, combinatorial optimization, innovation, circuit breaker, dielectric strength, neutral gas.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iii
REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	v
Mots clés	vi
TABLE DES MATIÈRES	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	14
LISTE DES FIGURES.....	15
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	18
Chapitre 1 - INTRODUCTION	19
1.1 Problématique.....	20
1.2 Objectifs	21
1.3 Méthodologie.....	23
Chapitre 2 - RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE APPROFONDIE.....	27
2.1 Détermination du domaine de recherche.....	27
2.2 Les banques de données	28

2.3	Le moteur de recherche	28
2.4	Les outils de gestion de recherche bibliographique	29
2.5	L'évolution des recherches sur les différentes alternatives pertinentes.....	30
2.5.1	Le mélange CO ₂ /O ₂ /C ₄ -FN pour un disjoncteur haute tension de type dead tank 145 kV, 63 kA	32
2.5.2	Le mélange HFO-1336mzz(E)/CO ₂ dans les appareillages de commutation moyenne tension	32
2.5.3	Le mélange gazeux C ₄ F ₇ N/CO ₂	33
2.5.4	Le gaz C ₅ F ₁₀ O et ses mélanges	33
2.5.5	L'étude de la rigidité diélectrique des mélanges SF ₆ /N ₂	33
2.5.6	Le mélange de gaz N ₂ /CO ₂ /O ₂	34
2.6	Le développement industriel	35
2.6.1	Les Normes	35
2.6.2	Quelques alternatives industrielles pertinentes proposées par les constructeurs.....	35
Chapitre 3 - REVUE ET CHOIX DES OUTILS INFORMATIQUES		37
3.1	Description	37

3.2	Revue des logiciels informatiques.....	38
3.2.1	ALTAIR.....	38
3.2.2	COMSOL Multiphysics.....	39
3.2.3	Ansys Multiphysic.....	45
3.2.4	MATLAB.....	47
3.2.5	Qiskit.....	47
3.3	Les infrastructures de calculs à haute performance.....	52
3.3.1	Alliance de recherche numérique du Canada.....	52
3.3.2	CMC Microsystems.....	56
3.3.3	Les avantages et défis.....	57
3.4	L'informatique quantique.....	59
3.4.1	Principes fondamentaux de l'informatique quantique.....	60
3.4.2	Les algorithmes quantiques.....	62
3.4.3	Domaines d'application.....	64
3.4.4	Les plateformes d'accès aux systèmes quantiques.....	66
3.5	Le choix des outils de simulation.....	72
3.6	Importance des essais numériques.....	73

Chapitre 4 - MÉTHODES D'ANALYSE APPLIQUÉES AUX

DISJONCTEURS	74
4.1 Description des systèmes physiques.....	74
4.1.1 Présentation des disjoncteurs extérieurs de types « Dead tank » VOX.....	74
4.1.2 Présentation des disjoncteurs extérieurs VSB.....	76
4.1.3 Les différents types d'essais	78
4.2 Résultats expérimentaux.....	80
4.2.1 Résultats expérimentaux du mélange gazeux N ₂ et CO ₂	80
4.2.2 Résultats expérimentaux du gaz N ₂ pur	83
4.2.3 Résultats expérimentaux du gaz SF ₆	86
4.2.4 Analyse des résultats	87
4.3 Modélisation mathématique	89
4.3.1 Les modèles utilisés pour estimer les propriétés des mélanges gazeux	89
4.3.2 Tension disruptive dans les gaz	92
4.3.3 Cas pratique : Calcul des pertes de gaz en fonction du temps	93
4.4 Modélisation géométrique	102

4.4.1	Cas d'importation du modèle dans le logiciel multiphysique.....	103
4.4.2	Cas de conception du dessin CAO	104
4.5	Modélisation et simulation numérique	105
4.5.1	Modélisation d'un mélange gazeux et estimation des propriétés du mélange	106
4.6	L'approche quantique	109
4.6.1	Avantages de l'approche quantique	109
4.6.2	Cas du calcul des propriétés de mélanges.....	110
4.7	Choix de l'algorithme quantique approprié.....	112
4.7.1	L'Algorithme QAOA.....	113
4.8	Définition des Critères de sélection des gaz.....	116
Chapitre 5 - IMPLÉMENTATION DE LA MÉTHODE D'OPTIMISATION		118
5.1	Estimation de la rigidité diélectrique d'une alternative au SF6	118
5.1.1	La méthode expérimentale	119
5.1.2	La méthode théorique	119
5.2	La méthode de calcul classique retenue comme base	122

5.2.1	Le processus de régression appliqué à la formule d'ionisation réduit par la pression.....	122
5.2.2	La forme non convexe de l'équation pour un intervalle donné.....	124
5.2.3	Problème de minimums locaux dans l'optimisation.....	125
5.2.4	Méthodes alternatives de recherche de la solution optimale	128
5.2.5	Correspondance spécifique avec le calcul des paramètres A, B et m.....	132
5.2.6	Rôle de l'algorithme QAOA dans le processus de régression.....	133
5.3	Représentation du problème A, B, m classique sous forme quantique avec QAOA	134
5.3.1	Transformation QUBO	134
5.3.2	Équation résultante pour implémentation	136
5.4	Implémentation et programmation quantique	142
5.4.1	Calcul classique	142
5.4.2	Optimisation quantique : implémentation de l'équation QUBO sur de véritables ordinateurs quantiques.....	144
5.4.3	Les défis de la méthode proposée	158

5.5 Vers le jumeau numérique du disjoncteur moyenne tension.....	159
Chapitre 6 - CONCLUSION, DISCUSSIONS ET PERSPECTIVES	161
6.1 Conclusion.....	161
6.2 Discussions	162
6.2.1 Analyse des solutions aux défis rencontrés	163
6.2.2 Impact potentiel du jumeau numérique du disjoncteur VOX	164
6.3 Perspectives et travaux futurs	165
Références	168
Annexes.....	181

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1.1 : PRP pour les gaz à effet de serre [11]</i>	19
<i>Tableau 2.1 : Les principaux articles pertinents pour la réalisation de cette étude</i>	31
<i>Tableau 3.1 : Supercalculateur Graham [95]</i>	54
<i>Tableau 3.2 : Supercalculateur Cédar [94]</i>	54
<i>Tableau 4.1 : Tenue aux chocs de foudre du gaz N_2 à 2,17 bar abs [112]</i>	83
<i>Tableau 4.2 : Tenue aux chocs de foudre du gaz N_2 à 2,5 bar abs [112]</i>	84
<i>Tableau 4.3 : Tenue à fréquence industrielle du gaz N_2 à 2 bar abs [112]</i>	84
<i>Tableau 4.4 : Tenue à fréquence industrielle du gaz N_2 à 2,17 bar abs[112]</i>	84
<i>Tableau 4.5 : Tenue à fréquence industrielle du gaz N_2 à 3.5 bar abs[130]</i>	85
<i>Tableau 4.6 : Test de tenue aux chocs de foudre du gaz SF_6 [112]</i>	86
<i>Tableau 4.7 : Tenue à la fréquence industrielle du gaz SF_6 [112]</i>	87

LISTE DES FIGURES

Figure 3.1 : Accès au serveur Graham de l'Alliance (capture par Arianne Lemo).....	42
Figure 3.2 : Connexion avec un compte autorisé (capture par Arianne Lemo sur la plateforme IBM Quantum)	42
Figure 3.3 : Multiples facteurs physiques influençant la conception d'un transformateur d'instrumentation. [102] Source : Brianne Christopher https://www.comsol.fr/story/optimizing-instrument-transformers-and-sensors-with-multiphysics-simulation-80531 © 2024 by COMSOL.	44
Figure 3.4 : Le flux magnétique et la densité de courant du transformateur à noyau divisé [102] Source : Brianne Christopher https://www.comsol.fr/story/optimizing-instrument-transformers-and-sensors-with-multiphysics-simulation-80531 © 2024 by COMSOL	45
Figure 3.5 : Simulation de conception de moteurs de géométries 3D complexes [90] Source : Marius Rosu (https://www.ansys.com/blog/how-to-simulate-complex-electric-motors consulté le 2021/10/04) © 2024 Copyright ANSYS, Inc.....	46
Figure 3.6 : l'outil MATLAB [71]	47
Figure 3.7 : Les bibliothèques offertes par Qiskit [52] Source : IBM Quantum https://www.ibm.com/quantum/qiskit	48
Figure 3.8 : Exemple de partitionnement de nœuds à petite échelle [53] Source : IBM Quantum Learning https://learning.quantum.ibm.com/tutorial/quantum-approximate-optimization-algorithm	51
Figure 3.9 : Exemple de partitionnement de nœuds à grande échelle [53] Source : IBM Quantum Learning https://learning.quantum.ibm.com/tutorial/quantum-approximate-optimization-algorithm	52

Figure 3.10 : Les avantages de l'utilisation des HPC dans les industries [41]	58
Figure 3.11 : Les défis de l'utilisation des HPC dans les industries [41]	59
Figure 3.12 : La capacité des processeurs quantique d'IBM [56] capture prise par Arianne Lemo sur IBM quantum Plateform https://quantum.ibm.com/services/resources	67
Figure 3.13 : Exemple de code Qiskit dans IBM Quantum	68
Figure 3.14 : Résultat du code Qiskit compilé dans IBM Quantum	69
Figure 3.15 : Un espace de travail Azure Quantum	70
Figure 3.16 : Mon espace de travail Azure Quantum pour l'algorithme SANS SF₆	71
Figure 4.1 : Disjoncteur CO7 VOX de type Dead Tank 38 kV	75
Figure 4.2 : Disjoncteur CO7 VSB 38 kV	77
Figure 4.3 : Installation expérimentale pour les essais de chocs de foudre sur l'isolation des mélanges N₂ et CO₂	81
Figure 4.4 : Claquages observés lors des tests, pour les impulsions positives et négatives [130] (Document interne, © 2023 CO7 Technologies)	82
Figure 4.5 : Comparaison des résultats de tenue à fréquence industrielle - N₂ et SF₆ [112] (par Mactar Thiam)	88
Figure 4.6 : Coupe d'une traversée vue de l'intérieur [130] (Document interne, ©2023 CO7 Technologies)	96
Figure 4.7 : Dimension de la coupe d'une traversée vue de l'intérieur [130] (Document interne, © 2023 CO7 Technologies)	96
Figure 4.8 : Dimensions précises de la coupe d'une traversée vue de l'intérieur [130] (Document interne, © 2023 CO7 Technologies)	97

Figure 4.9 : Dimensions du cylindre de la traversée [130] (Document interne, © 2023 CO7 Technologies)	99
Figure 4.10 : Schéma 3D du réservoir du disjoncteur importé dans COMSOL (Source : figure construite par l'équipe CO7).....	104
Figure 4.11 : Schéma 3D du réservoir du disjoncteur conçu dans COMSOL	105
Figure 5.1 : Affichage des paramètres γ et β (capture prise par Arianne Lemo)	148
Figure 5.2 : Création d'un compte IBM Cloud (capture prise par Arianne Lemo)	149
Figure 5.3 : Détails de l'instance Qiskit Runtime-6r (capture prise par Arianne Lemo)	149
Figure 5.4 : Processeurs quantiques IBM utilisés pour exécuter notre programme (capture prise par Arianne Lemo)	152
Figure 5.5 : Première exécution réussie (capture prise par Arianne Lemo)	153
Figure 5.6 : Affichage des paramètres du circuit optimisé (capture par Arianne Lemo)	155
Figure 5.7 : Le programme en cours d'exécution a été interrompu (capture prise par Arianne Lemo)	156
Figure 5.8 : Le coût d'utilisation de l'instance (capture prise par Arianne Lemo)	157

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ADMM	Alternating Direction Method of Multipliers
API	Application Programming Interface
BIL	Basic Insulation Level
CEI	Commission Électrotechnique Internationale
CIP	Calcul Informatique de Pointe
CVMFS	CERN Virtual Machine File System
FNL	Licence de Réseau Flottant
GES	Gaz à Effet de Serre
GIEC	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
GIS	Gas Insulated Switchgear
GWP	Potentiel de Réchauffement global
HPC	High Performance Computing
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IRN	Infrastructure de Recherche Numérique
PRP	Potentiel de Réchauffement Planétaire
QAOA	Quantum Approximate Optimization Algorithm
QPU	Quantum Processing Units
QUBO	Quadratic Unconstrained Binary Optimization
SDK	Software Development Kit

Chapitre 1 - INTRODUCTION

L'hexafluorure de soufre ou SF₆ est un gaz aux propriétés remarquables, ce qui justifie son utilisation considérable dans l'industrie électrique. Mais, selon le « *Guide de quantification des émissions de gaz à effet de serre* », du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques [72], il s'agit d'un gaz à effet de serre (GES) 23 000 fois plus nocif que le CO₂. De plus, sa très longue durée de vie dans l'atmosphère lui permet d'être listé par le protocole de Kyoto, durant la convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques en 1997, parmi les six GES pour lesquels l'utilisation doit être restreinte, il s'agit des gaz suivants : CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC et SF₆. Le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) a publié dans son quatrième rapport, les données actualisées du Potentiel de Réchauffement Planétaire (PRP), résumées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1.1 : PRP pour les gaz à effet de serre [11]

<i>Gaz à effet de serre</i>	<i>Formule</i>	<i>Deuxième rapport d'évaluation</i>	<i>Quatrième rapport d'évaluation</i>
Gaz carbonique	CO ₂	1	1
Méthane	CH ₄	21	25
Oxyde de diazote	N ₂ O	310	298
Hexafluorure de soufre	SF ₆	23 900	22 800
Trifluorure d'azote	NF ₃	-	17 200
Hydrofluorocarbures (HFC)		Peut varier de 140 à presque 12 000	Peut varier de 50 à presque 15 000
Perfluorocarbures (PFC)		Peut varier de 7 000 à près de 9 000	Peut varier de 7 000 à près de 18 000

Source : MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (MELCC). Guide de quantification des émissions de gaz à effet de serre, 2019, 107 p. 16

1.1 Problématique

Le SF₆ est un gaz réputé depuis environ 70 ans dans l'industrie électrique, plus précisément dans les appareillages électriques de haute et de moyenne tension pour son potentiel extraordinaire dans le rôle d'extincteur d'arc électrique et son intervention remarquable dans la conception d'une isolation gazeuse. Grâce à ses propriétés exceptionnelles, il occupe une position majeure, pour la stabilité du transport et de la distribution de l'énergie électrique dans le monde.

Par ailleurs, étant classée parmi les gaz à effet de serre les plus dangereux pour notre environnement comme le montrent les données comparatives présentées dans le tableau ci-dessus, l'utilisation du SF₆ en quantité industrielle soulève de nombreuses interrogations, et de multiples conférences ont eu lieu dans le but de réguler son emploi.

Mais les interrogations demeurent les suivantes : pourquoi malgré les innombrables ressources mises à la disposition des chercheurs dans le monde entier, une solution fiable, efficace, mais surtout universelle, tarde-t-elle à être trouvée ? Quel est l'état de l'avancée des recherches, et vers quelle solution prometteuse devons-nous approfondir nos efforts pour un résultat significatif ? Pour répondre à ces questions, nous avons pour but de faire étude pratique sur différents gaz et matériaux, en faisant une combinaison de différentes propriétés de gaz, requises dans les applications diélectriques, afin de trouver une solution convenable pour un impact environnemental positif.

Cependant, après plusieurs décennies de recherche, il est apparu qu'une telle combinaison de propriétés serait presque impossible à réaliser. Chaque nouveau composé étudié a jusqu'ici montré une certaine défaillance dans l'une des propriétés essentielles de performance, de sécurité ou d'environnement. Il s'agit d'un véritable défi.

Notre étude se focalise sur le secteur de la moyenne tension notamment, les disjoncteurs (MT) où les alternatives sont plus avancées et devraient gagner du terrain plus efficacement.

1.2 Objectifs

Aujourd'hui, un gaz diélectrique doit également avoir des propriétés environnementales acceptables, en particulier un potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone qui tend à être nul et un potentiel de réchauffement global bien inférieur à celui du SF₆ présentement utilisé [79]. Ainsi, l'objectif de cette thèse est de faire l'étude et proposer une solution non seulement écologique, à la fois efficace et à faible impact climatique, mais aussi, avec rigidité diélectrique très élevée, similaire aux performances du SF₆ que possible.

Dans cette étude, les propriétés isolantes du SF₆ et de ses alternatives sont analysées et comparées, l'analyse se concentre sur les mélanges de gaz purs pour garantir le critère écologique de la solution.

L'originalité de cette thèse réside dans la proposition d'une méthode numérique originale et innovante, tirant parti du calcul quantique et de sa capacité à explorer un espace de solution infiniment grand et inaccessible aux méthodes de calculs classiques, pour trouver la solution optimale environnementalement neutre dans la recherche d'une isolation adéquate des appareils électriques moyenne tension. Mes contributions visées se résument aux études approfondies menant vers la méthode optimisée de calcul à l'aide de la conception assistée par ordinateur des appareils électriques et de l'informatique quantique.

En collaboration avec CO7 TECHNOLOGIES, nous nous sommes inspirés de la méthode de conception et du fonctionnement du disjoncteur VOX7 pour adapter et concevoir un algorithme d'optimisation capable d'estimer la force diélectrique des mélanges gazeux, pouvant servir à développer une nouvelle solution distinctive.

Tout d'abord, sa réalisation requiert la construction de modèles numériques des différentes composantes, en l'occurrence celle du disjoncteur VOX7, dont la conception permettra l'exploration des différentes alternatives de gaz trouvées. De plus ce modèle devra respecter une multitude de paramètres tels que les températures et tensions appliquées ainsi que les différentes normes en vigueur (IEEE, CEI, CSA). Ensuite, l'accès aux ordinateurs quantiques réels via lesquels seront soumis les différents calculs est également requis.

À la fin, les conclusions tirées entraîneraient une avancée significative sur la question du remplacement de l'utilisation du gaz SF₆ par un gaz ou mélange de gaz neutre et moins offensif.

1.3 Méthodologie

La recherche bibliographique approfondie commencera nos travaux, pour ensuite faire le choix de l'outil approprié qui nous permettra d'effectuer une analyse numérique appliquée aux disjoncteurs, à travers la création d'un algorithme capable d'estimer les propriétés des mélanges de gaz. Les résultats de compilation avec ajustement de paramètres de notre modèle, nous mèneront à la phase d'optimisation et nous feront ressortir les différentes recommandations qui en découlent. La méthode utilisée débutera par étude du fonctionnement des disjoncteurs moyenne tension en entreprise, afin de découvrir et toucher du doigt les défis de l'utilisation du gaz SF₆ comme gaz isolant et de trouver le moyen de le remplacer par une solution fiable environnementalement.

Premièrement, nous allons définir le domaine de recherche, c'est-à-dire exposer la problématique de recherche traitée dans cette thèse, dans le but de mieux cerner l'objectif et le contenu, et définir les mots clés. Ensuite, nous ferons un étalage des banques de données utilisées pour étayer notre étude, puis des moteurs de recherches à notre disposition pour accéder à ces données. Nous aurons également besoin de faire le choix d'un outil qui nous aidera dans la gestion des références et de nos différentes sources d'informations. Ensuite, nous parlerons des articles que nous avons consultés et

sur lesquels nous nous sommes appuyés durant notre étude. Nous ferons également le tour sur la question du développement industriel actuel.

En bref, les objectifs spécifiques nécessaires à l'atteinte de l'objectif principal de cette thèse passent par les points suivants :

Faire une étude et une exploitation des informations pertinentes et des ressources documentaires disponibles en entreprise, concernant les disjoncteurs moyenne tension fabriqués chez CO7. L'étude est portée sur trois classes de tension, soit : 15 kV, 27 kV et 38 kV.

- Faire une étude des méthodes générales utilisées par les constructeurs pour la conception des disjoncteurs moyenne tension en nous servant des bases de données disponibles pour une comparaison. Il s'agit ici d'une étude de l'existant.
- Faire une étude des normes et techniques utilisées par CO7 pour la conception des disjoncteurs moyenne tension en nous servant de la documentation et des archives de l'entreprise. Ensuite, faire le choix du modèle de disjoncteur à utiliser pour la suite, conjointement avec l'équipe.

Ensuite, faire une proposition d'une méthode pertinente et fiable, qui permettra à CO7 d'obtenir une solution en adéquation avec leur besoin, qui est d'adopter une nouvelle isolation gazeuse avec un gaz autre que le SF₆ pour la fabrication des disjoncteurs moyenne tension selon les trois classes de tension.

- L'élaboration de la solution débute par une conception, du modèle 3D numérique du disjoncteur VOX7 à partir des dessins fournis par CO7, ce modèle est soumis et validé à travers des bancs d'essai. Il s'agit ici de vérifier la géométrie pour générer les éléments finis, associer les propriétés de matériaux, attribuer les valeurs pour chaque paramètre, permittivité électrique, conductivité électrique, intensité, conditions aux limites (le potentiel dans différents points du disjoncteur), tout en faisant varier ces valeurs en fonction des tensions appliquées, au point d'obtenir le résultat idéal. La finalité de cette partie est d'obtenir le modèle numérique en élément fini fonctionnant parfaitement avec le gaz SF₆. Cette partie est réalisée avec la contribution de Mactar Thiam, qui travaille en parallèle sur ce projet.
- Ensuite, la conception de l'algorithme « SANS SF₆ » à l'aide de la programmation quantique, permettant de calculer la rigidité diélectrique d'un mélange gazeux afin de déterminer sa capacité maximale. La méthode ici proposée s'appuie sur la loi de Paschen pour effectuer le calcul de la tension de claquage des mélanges de gaz, en passant par la résolution de l'équation de Boltzmann pour trouver les valeurs du coefficient d'ionisation réduit par la pression qui nous permet de trouver avec précision les valeurs des coefficients du mélange gazeux obtenu, intervenant dans l'estimation de la rigidité diélectrique. L'algorithme QAOA est utilisé ici pour son efficacité dans la résolution des problèmes combinatoires.

- Effectuer les calculs sur de véritables ordinateurs quantiques pour garantir la précision des résultats attendus. Puis, les paramètres appliqués, la température, la pression, les valeurs de champs électriques, sont choisis conformément aux valeurs exercées en production.
- Le choix des gaz intervenants dans les mélanges : les gaz purs connus pour avoir moins d'interactions chimiques ou moléculaires avec d'autres gaz.

Ensuite, faire la proposition d'une simulation de la méthode proposée dans les conditions minimales requises afin de représenter numériquement les résultats obtenus tout en respectant les conditions et normes appliquées chez CO7.

- La phase de simulation proposée pour la continuité des travaux : l'algorithme « SANS SF₆ » soumis peut être utilisé pour estimer la rigidité diélectrique d'un gaz ou mélange de gaz. Une fois le mélange adéquat obtenu, le soumettre à la simulation multiphysique via un logiciel de simulation tel que COMSOL pour la validation numérique, avant le passage à la phase des tests expérimentaux.
- La méthode, une fois validée par les résultats de simulation dans les conditions industrielles, va être présentée de façon à être utilisée dans les travaux de recherche et de développement.

Chapitre 2 - RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE APPROFONDIE

2.1 Détermination du domaine de recherche

Cette partie expose la problématique de recherche traitée dans cette thèse dans le but de mieux cerner l'objectif et le contenu. Ainsi nous offrons un cadre de réflexion synthétique sur les appareils électriques moyenne tension et leur fonctionnalité diélectrique mettant en exergue l'isolation gazeuse. Cette étude s'inscrit dans le cadre de la recherche d'une alternative à l'utilisation du gaz hexafluorure de soufre (SF_6) dans les appareils électriques moyenne tension et plus précisément les disjoncteurs à isolation gazeuse. Ce gaz possède d'excellentes propriétés diélectriques, mais son potentiel de réchauffement global (PRG) est 23000 fois plus élevé que celui du dioxyde de carbone (CO_2). Malheureusement, les gaz dits neutres tels que l'azote (N_2) présentent une tenue diélectrique beaucoup plus faible que celle du SF_6 . Le but est donc de faire des essais diélectriques réalisés à travers la modélisation et la simulation de l'isolation gazeuse sous des conditions expérimentales se rapprochant au maximum du fonctionnement adopté en industrie, en utilisant des outils de modélisation de dernière génération, pour trouver un gaz ou une combinaison de gaz adéquat pour le remplacement total ou partiel du SF_6 .

2.2 Les banques de données

Pour la collecte d'informations, les banques de données utilisées pour étayer cette étude sont :

- La bibliothèque numérique IEEE Xplore : pour la découverte et l'accès aux articles de revues, aux actes de conférence, aux normes techniques et aux documents connexes sur l'informatique, l'électrotechnique et l'électronique, et les domaines connexes.
- La bibliothèque de l'Université du Québec à Trois-Rivières : qui dispose de beaucoup de documents et données que nous pouvons consulter à partir de l'outil de recherche Sofia.
- Les Médias sociaux: il s'agit ici d'effectuer des recherches sur les sites internet des compagnies industrielles spécialisées dans l'appareillage électrique, qui communiquent également beaucoup d'informations sur leur page LinkedIn, Twitter, Facebook, YouTube et différents réseaux sociaux où nous pouvons trouver des professionnels qui partagent leurs découvertes sur les avancées du domaine tel que IEEE Collabratec.

2.3 Le moteur de recherche

Comme moteur de recherche, nous avons :

- Google : le plus grand moteur de recherche des pages web.

- Google Scholar : un service de Google permettant la recherche d'articles et de publications scientifiques.
- Sofia : l'outil de recherche permettant de consulter le nouveau catalogue unifié de bibliothèques universitaires
- Les moteurs de recherche internes particuliers à certaines banques de données privées telles que IEEE Xplore.

2.4 Les outils de gestion de recherche bibliographique

Pour gérer les références et nos différentes sources d'informations, nous avons une multitude de choix d'outils de gestion de recherche bibliographique disponibles tels que : Mendeley, une base de données regroupant les publications scientifiques des chercheurs des quatre coins de la planète, Endnote, Zotero, un logiciel gratuit multiplateforme, Refworks, logiciel de gestion bibliographique en ligne

Mais nous avons choisi d'utiliser pour cette étude l'outil Endnote, car il demeure l'outil le plus complet, celui qui bénéficie du plus vaste support et les modifications sont assez simples à faire. L'exportation est directe à partir de plusieurs bases de données ou alors importation manuelle à partir d'un fichier. De plus c'est accessible de manière gratuite via notre institution d'enseignement et aussi, c'est un outil bien adapté aux besoins de IEEE Xplore, la banque de données essentielle utilisée dans cette étude.

2.5 L'évolution des recherches sur les différentes alternatives pertinentes

L'objectif de cette thèse portant principalement sur l'isolation gazeuse, cette partie traite un ensemble d'articles proposant leurs propres méthodes d'évaluation des gaz alternatifs au SF₆ pour les applications d'appareils de moyenne tension tels que les disjoncteurs. La recherche est axée sur les propriétés diélectriques des gaz remplaçants potentiels. Le SF₆ a apporté de nombreux avantages comme la compacité, l'efficacité, la fiabilité parmi tant d'autres ; cependant, malgré ces propriétés très intéressantes, il représente, en fin de vie, un agent accélérant pour le réchauffement climatique, et pour cette raison, des candidats alternatifs font l'objet de nombreuses recherches. Dans cet optique, nous avons parcouru un ensemble d'articles proposant une méthode d'évaluation et de validation des candidats potentiels pour le remplacer, et donnant un aperçu des principales propriétés des candidats les plus prometteurs.

En effet, la protection de l'environnement est au centre des préoccupations des politiques, des clients et des fournisseurs d'équipements de moyenne tension. Les industries et fabricants d'équipements électriques sont fortement interpellés par ce projet et ont publié de nombreux articles. De même, des chercheurs scientifiques ont été nombreux à se pencher sur le sujet. Nous vous présentons les articles les plus pertinents selon l'orientation de nos recherches, qui forment une base sur laquelle nous nous sommes appuyés pour débiter et mener à bien nos travaux.

Ils ont été regroupés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2.1 : Les principaux articles pertinents pour la réalisation de cette étude

Titres et Auteurs	Description
<p>“Versatile Paschen's model for the dielectric strength estimation of binary and ternary gas mixtures” C. Park, & al. (2019) [80]</p>	<p>Dans cet article, les auteurs proposent une version améliorée de la formule du coefficient d’ionisation réduit par la pression, en ajoutant un paramètre m à l’exposant de l’équation pour affiner le calcul des paramètres A et B servant à estimer la rigidité diélectrique des mélanges gazeux. Les tests se sont concentrés sur l’étude des mélanges de He, N_2 et H_2 à différentes proportions. C’est la principale inspiration de la méthode proposée dans cette étude.</p>
<p>“Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models” Hagelaar, G & al. (2005) [39]</p>	<p>Le solveur Bolsig+ fourni dans cet article a permis d’avoir une base de données importante sur les coefficients de transport, et la fonction de distribution d’énergie des électrons pour différents gaz et mélanges gazeux. Les valeurs obtenues grâce à l’exécution de l’équation de Boltzmann étaient nécessaires pour effectuer nos calculs.</p>
<p>“A review on Quantum Approximate Optimization Algorithm and its variants” Blekos, K. & al. [5]</p>	<p>Cet article nous a fourni une analyse éclairée des informations pertinentes concernant l’algorithme QAOA, sa configuration, ses différentes variantes, ses forces et ses faiblesses, les cas d’utilisation pour la résolution des problèmes réels.</p>
<p>“Solve utility-scale quantum optimization problems” IBM Quantum Learning [53]</p>	<p>Cet article nous a fourni un modèle de configuration en résolvant un problème NP-difficile, le problème Max-Cut.</p>

Les informations contenues dans ces publications ont inspiré et guidé nos recherches, nous conduisant à la méthode d’optimisation proposée dans cette thèse.

Pour avoir un aperçu de l'état actuel des progrès, nous avons recensé les toutes récentes alternatives gazeuses au SF₆, découvertes ou perfectionnées ces dernières années (2023 et 2024) et les avons regroupés de manière suivante :

2.5.1 Le mélange CO₂/O₂/C₄-FN pour un disjoncteur haute tension de type dead tank 145 kV, 63 kA

Les tests de claquages, les tests diélectriques, le BIL, les ondes hachées, la résistance au courant alternatif à pression atmosphérique, les tests d'endurance mécanique, les tests de commutation capacitive ont été effectués sur le disjoncteur rempli d'un mélange de dioxyde de carbone (CO₂), d'oxygène (O₂) et de fluoronitrile (C₄-FN). Les auteurs V. F. Hermosillo et al. (2023) ont démontré que les performances de ce mélange gazeux dans le disjoncteur testé étaient similaires au fonctionnement avec le SF₆ dans les mêmes conditions appliquées. [43].

2.5.2 Le mélange HFO-1336mzz(E)/CO₂ dans les appareillages de commutation moyenne tension

De multiples articles [122], [121], [109], [34], [123], [118], publiés en 2023 et menant une étude sur les propriétés d'isolation des mélanges de HFO-1336mzz(E) avec des gaz neutres tels que le N₂ ou le CO₂ et également d'autres gaz fluorés ont été trouvés durant nos recherches, rendant ce composé particulièrement célèbre cette année. Il est

considéré comme un gaz isolant potentiellement écologique, avec un faible potentiel de réchauffement climatique et une rigidité diélectrique élevée.

2.5.3 *Le mélange gazeux C_4F_7N/CO_2*

Selon Wang, Y et al. (2024), [119], [120], le mélange C_4F_7N/CO_2 est une alternative prometteuse, avec une rigidité diélectrique élevée, et une décomposition à un rythme modéré. Les tests ont été effectués en mettant une emphase sur les caractéristiques de claquage dans des environnements à haute pression, le CO_2 a été choisi pour diminuer la capacité de liquéfaction dans un mode de fonctionnement à haute tension. Les conclusions dénotent un bon rapport de mélange pour 5% de C_4F_7N et 95% CO_2 [76].

2.5.4 *Le gaz $C_5F_{10}O$ et ses mélanges*

Les articles [113], [64], [14], [65] (2024) font état des études sur les mélanges binaires $C_5F_{10}O/CO_2$, $C_5F_{10}O/Air$, $C_5F_{10}O/N_2$ et les mélanges ternaires tels que $C_5F_{10}O/CO_2/O_2$, les propriétés isolantes de ces mélanges, la toxicité, la décomposition au contact des matériaux tel que le cuivre, le chemin de décomposition et le mécanisme de réaction sont analysés [114].

2.5.5 *L'étude de la rigidité diélectrique des mélanges SF_6/N_2*

Les caractéristiques d'isolation des mélanges composés de 20 % SF_6 - 80 % N_2 , 28 % SF_6 - 72 % N_2 , 40 % SF_6 - 60 % N_2 ont été analysées à des niveaux de températures et de pressions différentes grâce à la résolution de l'équation de Boltzmann pour obtenir la

fonction de distribution d'énergie des électrons. La particularité de cette étude est qu'elle permet de fournir les données théoriques fondamentales de l'analyse du claquage post-arc dans le mélange binaire SF_6/N_2 à de différentes proportions [126].

2.5.6 *Le mélange de gaz $\text{N}_2/\text{CO}_2/\text{O}_2$*

Cet article étudie le cas d'un mélange ternaire de gaz neutres, selon L. Bellofatto et P. Sigismondi (2023), le meilleur rapport de mélange est 30% de O_2 , 60 % de CO_2 et 10 % de N_2 ce qui souligne l'importance du CO_2 et de l' O_2 dans le mélange. Les conclusions stipulent qu'une analyse plus détaillée doit être effectuée pour comprendre si l'azote apporte une réelle valeur ajoutée au mélange ou non. De plus, ces résultats doivent être comparés aux performances d'un seul gaz, juste pour vérifier qu'un mélange est meilleur qu'un seul gaz (CO_2 ou N_2 purs, O_2 est exclu pour risque d'incendie) [4].

De toutes les observations faites lorsque nous accordons une attention particulière aux alternatives qui intéressent les chercheurs dans l'actualité scientifique, les aspects inquiétants qu'il faudrait prendre en compte concernent essentiellement la toxicité de certains produits de décomposition, le contenu des matériaux ayant des implications importantes sur l'impact de l'équipement, les problèmes de sécurité et de récupération de gaz en fin de vie. Toutes ces inquiétudes nous amènent à nous diriger vers la recherche d'une solution verte fiable, dépourvue de gaz fluorés, capable de garantir une rigidité diélectrique suffisante.

2.6 Le développement industriel

2.6.1 *Les Normes*

Les normes importantes à respecter minutieusement dans un environnement de recherche d'une alternative à l'isolation gazeuse dans les disjoncteurs moyenne tension sont les normes relatives à l'équipement, aux conditions de test de fonctionnement avant la mise en production. Ces normes sont recommandées pour assurer la fiabilité et garantir la sécurité et le bon fonctionnement du système (disjoncteur, isolation gazeuse). Il s'agit principalement des normes du code canadien de l'électricité ou CSA C22.1, de l'Institute of Electrical and Electronics Engineers Standards Association (IEEE SA) par exemple IEEE Std C37.09 et de la Commission électrotechnique internationale (CEI), par exemple CEI62271-100 ou CEI 60298. Elles sont requises pour évaluer la conformité des tests tels que : les tests diélectriques, les tests de tenue en tension de fréquence industrielle, les tests de tenue aux chocs de foudre, les mesures des décharges partielles, les tests de courant de courte durée, les tests d'arc interne.

2.6.2 *Quelques alternatives industrielles pertinentes proposées par les constructeurs*

- **General Electric: Green Gas for Grid g³**

Les appareils isolés au gaz chez GE sont remplis de g³, leur solution gazeuse sans SF6 fonctionnant dans leurs équipements haute tension, une alternative adoptée depuis

2014. Ils ont annoncé en 2019 sur leur site que l'utilisation du gaz g^3 leur permettait de réduire le potentiel de réchauffement global (PRG) de plus de 99 % tout en conservant leurs performances techniques, un énorme avantage pour l'environnement. [35]

- **Schneider Electric : AirSeT**

Schneider Electric propose le gaz AirSeT pour le remplacement du gaz SF_6 dans leur disjoncteur moyenne tension. Il s'agit d'un mélange de gaz à base d'air. [22]

- **ABB : AirPlus**

Après des années de recherche d'une alternative au SF_6 dans les appareillages à isolation gazeuse (GIS) ABB offre un nouveau mélange gazeux, AirPlus avec des propriétés d'isolation et de coupure d'arc similaires au SF_6 . Sa composition varie selon le niveau de tension du GIS : le mélange fluorocétone, dioxyde de carbone et oxygène pour les appareils haute tension, et fluorocétone, azote et oxygène pour les appareils moyenne tension. [88]

- **Siemens : Leur premier disjoncteur g^3 420 kV sans SF_6**

Siemens a développé un gaz alternatif appelé Clean Air pour remplacer le SF_6 dans les équipements moyenne et haute tension. Clean Air est un mélange gazeux à base 20% d'azote N_2 et 80% d'oxygène O_2 , et offre plusieurs avantages par rapport au SF_6 [87].

Chapitre 3 - REVUE ET CHOIX DES OUTILS INFORMATIQUES

Ce chapitre représente le point central de départ de notre projet de recherche, car il fait l'étalage des outils techniques et des technologies de pointe de dernière génération, nous permettant de rechercher efficacement une solution isolante gazeuse, pour le remplacement du SF₆ dans les disjoncteurs moyenne tension. Nous étudions ici plusieurs logiciels de simulations, les plateformes de calcul numérique à haute performance, l'informatique quantique et tout outil numérique innovant adéquat pour effectuer nos simulations. La précision des résultats obtenus dépend du choix des outils utilisés.

3.1 Description

Les simulations numériques reposent sur la représentation de modèles théoriques utilisant généralement la technique des éléments finis. Elles sont une adaptation numérique de la modélisation mathématique, et permettent d'étudier le fonctionnement et les propriétés d'un système modélisé afin de prédire son évolution. [18].

Ces simulations numériques occupent une place importante dans le processus de modélisation des entités réelles dans divers domaines tels que l'énergie, la chimie, la santé, la finance, la psychologie. Elles offrent la possibilité d'observer le fonctionnement d'un système difficilement calculable mathématiquement, et des avantages en termes de temps, de coût et de sécurité. Dans le cadre de cette recherche, la simulation numérique

nous permettra d'étudier le comportement du disjoncteur moyenne tension VOX, plus précisément, le fonctionnement de l'isolation gazeuse.

En résumé, les simulations numériques permettent de :

- Représenter une entité physique réelle sous forme d'un objet virtuel,
- Effectuer différentes catégories d'analyses avec en entrée des paramètres réels de l'entité physique, et après les calculs, l'émission en sortie des résultats qui se rapprochent de la réalité si le modèle numérique a été bien construit,
- Gagner en temps, en ressources, et en sécurité.

3.2 Revue des logiciels informatiques

Il s'agit des différents logiciels de simulations numérique disponibles, capables simuler un disjoncteur, ainsi que les phénomènes relatifs à l'écoulement des fluides. Une analyse est effectuée sur plusieurs outils de simulation pour sélectionner le logiciel adéquat.

3.2.1 *ALTAIR*

Altair est un logiciel multiphysique de modélisation et simulation offrant une large gamme de logiciels avancés capable de modéliser divers phénomènes physiques tels que l'interaction fluide-structure, des corps flexibles, l'aéroacoustique et la simulation thermomécanique. Ce logiciel est disponible pour le calcul à haute performance, et

permet de résoudre des problèmes d'ingénierie concrets de manière rapide et efficace [101].

Altair SimLab est un environnement de simulation multidisciplinaire basé sur les processus et permettant d'analyser avec précision la performance d'assemblages complexes. Il permet de configurer plusieurs phénomènes tels que la dynamique structurelle, thermique, électromagnétique des fluides. Ainsi la conception des modèles d'éléments finis et l'interprétation des résultats sont plus faciles et rapides. [101].

Les principaux avantages incluent la fourniture d'une interface simplifiée et conviviale, qui facilite l'accès aux ressources de calcul à haute performance pour soumettre et surveiller des calculs. L'importation facile de données et des temps d'exécution réduits qui ne nécessitent pas une intervention manuelle. Des outils complets pour l'analyse par éléments finis.

3.2.2 *COMSOL Multiphysics*

COMSOL Multiphysics est une plateforme de simulation qui permet de minimiser une entité physique réelle, sous forme numérique et est utilisé dans des domaines comme l'ingénierie ou pour des applications spécialisées.

Les avantages de ce logiciel :

- Il offre la possibilité de modéliser différents phénomènes et de personnaliser les descriptions physiques du système en permettant à l'utilisateur de définir

les équations et expressions associées au calcul à effectuer à travers l'interface graphique.

- Il offre également une multitude de conditions de fonctionnement et d'effets physiques possibles.

3.2.2.1 Exécution COMSOL Multiphysics en parallèle

COMSOL prend en charge deux modes de fonctionnement parallèle mutuels : les opérations parallèles à mémoire partagée et les opérations parallèles à mémoire distribuée nécessitant une licence de réseau flottant (FNL), ainsi que la prise en charge des clusters [103].

Les modes de fonctionnement pour les calculs avec COMSOL Multiphysics sont les suivants : à distance depuis l'interface graphique, à partir de la ligne de commande pour les appels par lots de cluster, dans une instance d'interface graphique distribuée, en mode client-serveur, à travers le Cloud Computing [104].

Dans le cadre de cette recherche, nous avons choisi d'explorer le mode de fonctionnement cloud Computing.

3.2.2.2 Exécuter COMSOL Multiphysics à travers le *cloud computing*

Parmi les partenaires fournisseurs de cloud proposés par COMSOL, nous faisons le choix du partenaire l'Alliance de recherche numérique du Canada, car c'est un organisme qui travaille en collaboration avec des établissements d'enseignement

postsecondaire et des partenaires régionaux afin de coordonner et de faciliter l'accès à la plateforme nationale de calcul informatique de pointe pour les travaux de recherche.

- Accès à COMSOL Multiphysics via l'Alliance de recherche numérique du Canada

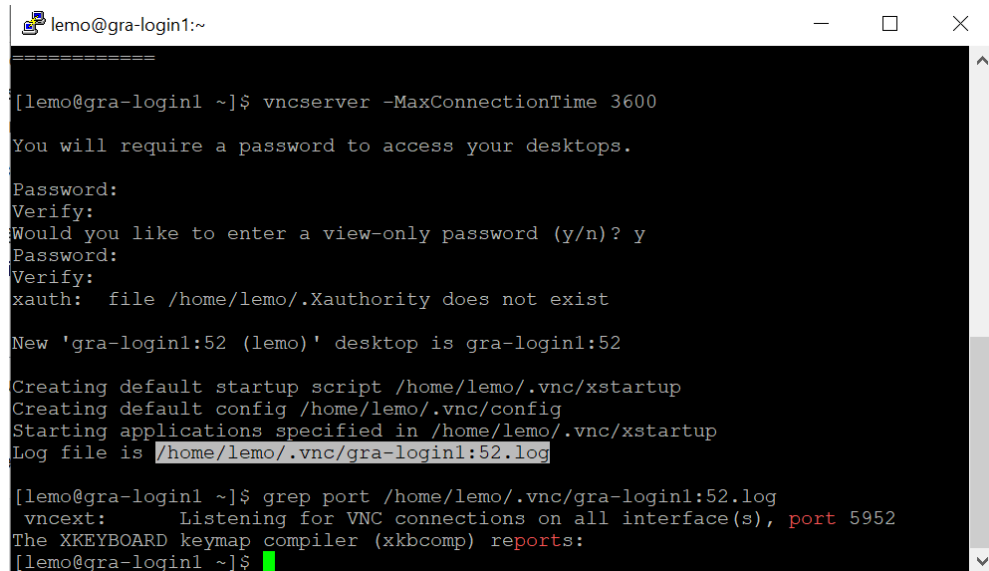
Après analyse de chacune des listes de logiciels proposées par chaque partenaire d'Alliance, nous constatons que seuls les partenaires Calcul Québec et SHARCNET nous offrent la possibilité d'utiliser COMSOL au travers des infrastructures de l'Alliance de recherche numérique du Canada.

a) Configuration à effectuer dans le cas du partenaire SHARCNET

Il est à noter qu'il est absolument nécessaire d'écrire au support technique de l'Alliance : support@calculquebec.ca, pour qu'ils effectuent des configurations :

- Demander à l'administrateur du serveur de Licence de l'UQTR dans notre cas de donner l'accès aux serveurs de l'Alliance.
- Leur communiquer les informations à propos du serveur de licence : ports, IP, pour qu'ils permettent à leurs serveurs d'accéder à notre serveur de licence.
- Ils nous font parvenir également le lien pour la procédure d'utilisation de COMSOL via les infrastructures de l'Alliance / SHARCNET

L'accès au serveur se fait comme suit :



```

lemon@gra-login1:~$ vncserver -MaxConnectionTime 3600

You will require a password to access your desktops.

Password:
Verify:
Would you like to enter a view-only password (y/n)? y
Password:
Verify:
xauth: file /home/lemon/.Xauthority does not exist

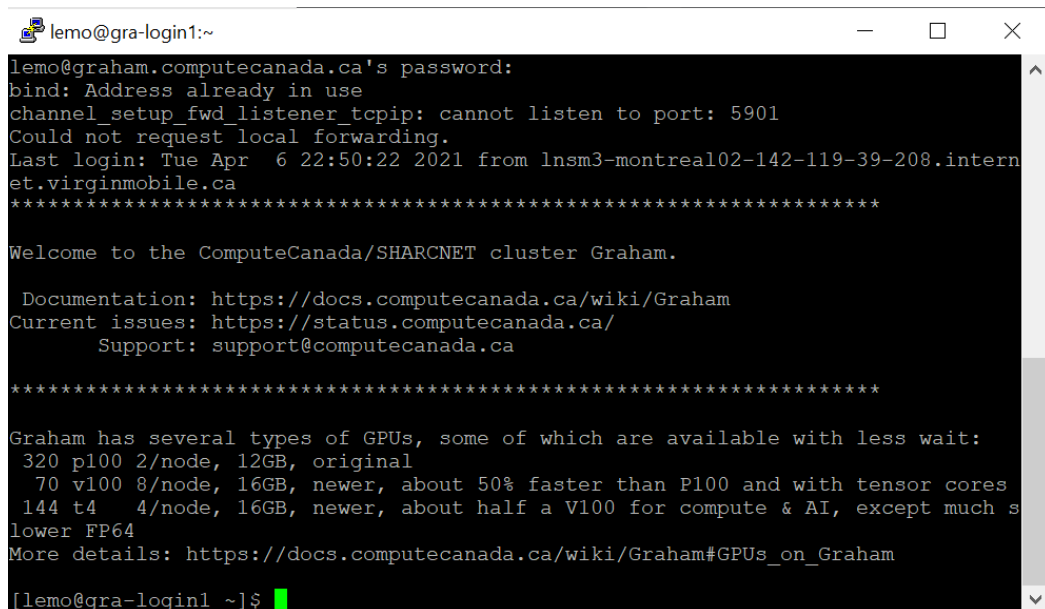
New 'gra-login1:52 (lemon)' desktop is gra-login1:52

Creating default startup script /home/lemon/.vnc/xstartup
Creating default config /home/lemon/.vnc/config
Starting applications specified in /home/lemon/.vnc/xstartup
Log file is /home/lemon/.vnc/gra-login1:52.log

lemon@gra-login1 ~]$ grep port /home/lemon/.vnc/gra-login1:52.log
vncext: Listening for VNC connections on all interface(s), port 5952
The XKEYBOARD keymap compiler (xkbcomp) reports:
lemon@gra-login1 ~]$

```

Figure 3.1 : Accès au serveur Graham de l'Alliance (capture par Arianne Lemo)



```

lemon@gra-login1:~$ ssh lemon@graham.computeCanada.ca
lemon@graham.computeCanada.ca's password:
bind: Address already in use
channel_setup_fwd_listener_tcpip: cannot listen to port: 5901
Could not request local forwarding.
Last login: Tue Apr  6 22:50:22 2021 from lns3-montreal02-142-119-39-208.intern
et.virginmobile.ca
*****

Welcome to the ComputeCanada/SHARCNET cluster Graham.

Documentation: https://docs.computeCanada.ca/wiki/Graham
Current issues: https://status.computeCanada.ca/
Support: support@computeCanada.ca

*****

Graham has several types of GPUs, some of which are available with less wait:
 320 p100 2/node, 12GB, original
  70 v100 8/node, 16GB, newer, about 50% faster than P100 and with tensor cores
 144 t4   4/node, 16GB, newer, about half a V100 for compute & AI, except much s
lower FP64
More details: https://docs.computeCanada.ca/wiki/Graham#GPUs_on_Graham

lemon@gra-login1 ~]$

```

Figure 3.2 : Connexion avec un compte autorisé (capture par Arianne Lemo sur la plateforme IBM Quantum)

b) Configuration à effectuer dans le cas du partenaire Calcul Québec

Les répertoires de logiciels et de données offerts par Calcul Québec via CVMFS (CERN Virtual Machine File System). CVMFS étant préconfiguré pour nous, nous pouvons utiliser ses répertoires directement.

CVMFS est une plateforme qui fournit l'accès à une gamme de logiciels distribués en accès sans modification. La procédure pour installer et configurer CVMFS sur notre propre ordinateur ou grappe est décrite sur la page de Calcul Québec ; nous aurons ainsi accès aux mêmes répertoires et environnements logiciels que ceux des systèmes de Calcul Québec. Pour installer CVMFS sur un ordinateur personnel, les conditions requises sont : un système d'exploitation compatible, le logiciel FUSE et environ 50 Go d'espace de stockage local [89].

3.2.2.3 Présentation du Module AC/DC de COMSOL Multiphysics

Les différents modules offerts par COMSOL Multiphysics sont : module AC/DC, module RF, module d'optique à ondes, module d'optique de rayon, module MEMS, module Plasma, modules semi-conducteurs. Le module qui nous sera utile pour nos travaux est le module AC/DC [102].

Le logiciel COMSOL propose également des outils permettant d'explorer les phénomènes tels que la mécanique de l'acoustique et des structures, le transfert

thermique [102]. L'UQTR possède la version 6.1 du logiciel COMSOL et les mises à jour peuvent être appliquées directement lorsqu'elles sont disponibles.

3.2.2.4 Exemple de simulation effectuée avec COMSOL

Un exemple de simulation pratique est effectué par ABB avec le logiciel COMSOL : la simulation des champs électriques à la fois causés par les vides dans le moulage époxy et pendant le niveau d'impulsion de base (BIL), pour évaluer l'efficacité des couches d'isolation et les matériaux diélectriques protégeant le dispositif [13]. Ci-dessous l'illustration :

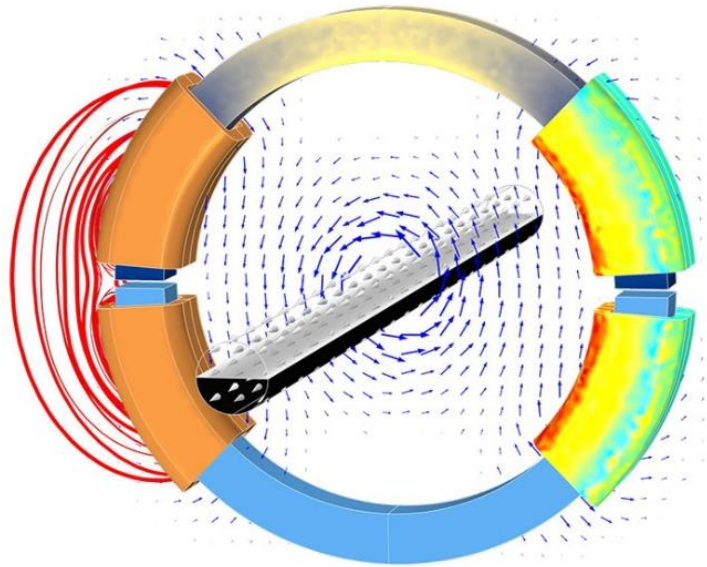


Figure 3.3 : Multiples facteurs physiques influençant la conception d'un transformateur d'instrumentation. [102] Source : Brianne Christopher <https://www.comsol.fr/story/optimizing-instrument-transformers-and-sensors-with-multiphysics-simulation-80531> © 2024 by COMSOL.

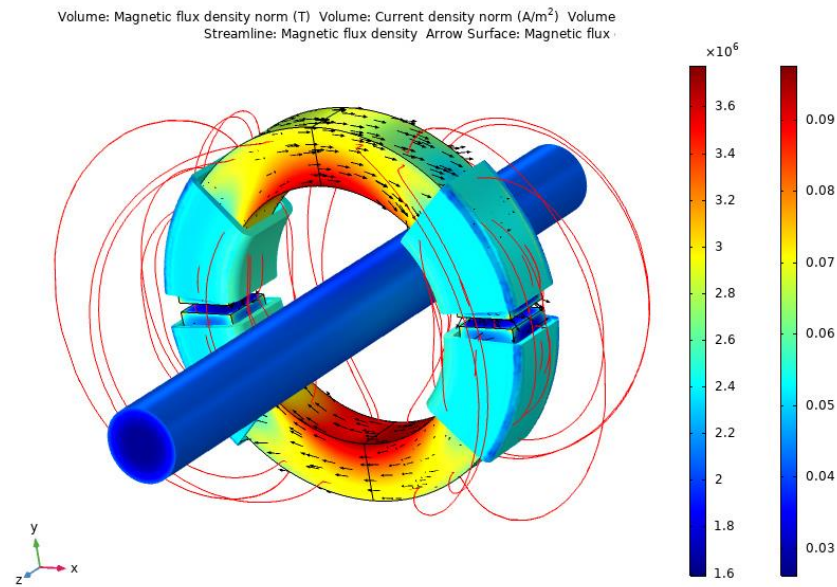


Figure 3.4 : Le flux magnétique et la densité de courant du transformateur à noyau divisé [102] Source : Brianne Christopher
<https://www.comsol.fr/story/optimizing-instrument-transformers-and-sensors-with-multiphysics-simulation-80531> © 2024 by COMSOL

3.2.3 Ansys Multiphysic

Ansys Multiphysic est un logiciel similaire à COMSOL, car ils ont un même mode de fonctionnement et offrent la possibilité de simuler le même type système physique. De plus, le mode d'accès aux infrastructures de calcul haute performance est également identique. Cependant, après observation, nous constatons qu'Ansys fournit une bibliothèque plus vaste, et des outils plus orientés vers les applications du secteur de l'aéronautique, l'automobile ou la pétrochimie [92]. Ci-dessous un exemple d'utilisation pratique d'Ansys.

3.2.3.1 Exemple de simulation effectuée avec Ansys

Ansys Maxwell est un module d'Ansys désigné comme étant un solveur de champ électromagnétique permettant de simuler les machines électriques, les transformateurs, la charge sans fil, les loquets à aimant permanent, les actionneurs et autres dispositifs mécaniques électriques. Il est capable de simuler les champs magnétiques et électriques statiques, fréquentiels et variables en fonction du temps [90].

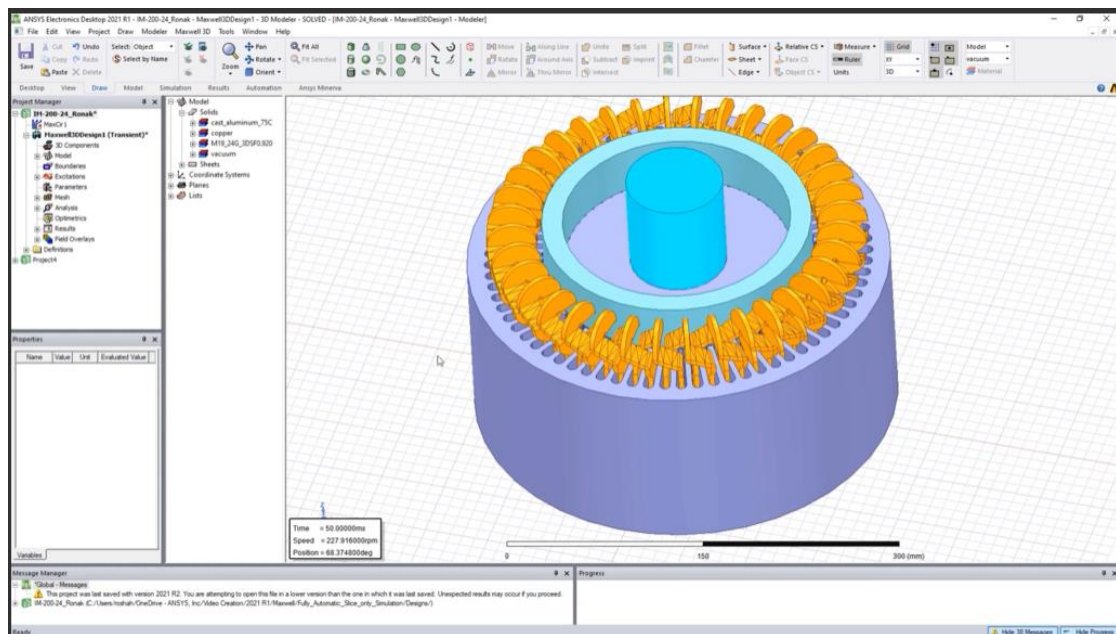


Figure 3.5 : Simulation de conception de moteurs de géométries 3D complexes
 [90] Source : Marius Rosu (<https://www.ansys.com/blog/how-to-simulate-complex-electric-motors> consulté le 2021/10/04) © 2024 Copyright ANSYS, Inc

Dans la figure 3.5, Ansys Maxwell nous montre comment simuler une géométrie de machine électrique complexe en 3D.

3.2.4 MATLAB

Nous avons la possibilité d'utiliser l'outil MATLAB, pour la construction d'un algorithme, car il offre une interface utilisateur pour les calculs mathématiques et pour l'automatisation des processus. L'avantage est qu'il propose une amélioration significative par rapport aux méthodes classiques habituelles [71].

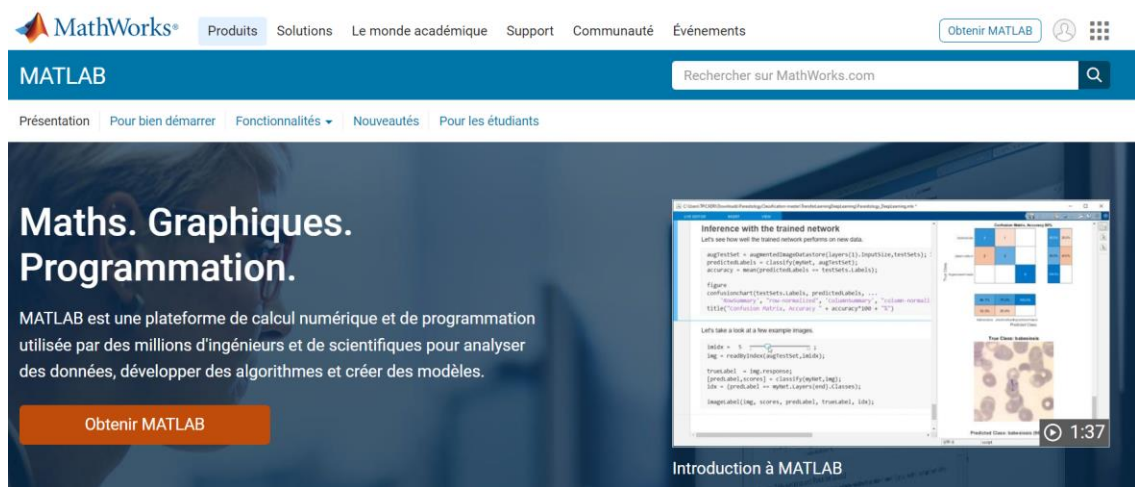


Figure 3.6 : l'outil MATLAB [71]

Source : MathWorks, <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> © 1994-2024 The MathWorks, Inc.

3.2.5 Qiskit

Qiskit est un outil de développement quantique constitué de plusieurs logiciels pour la programmation et les simulations de divers phénomènes à l'aide de l'informatique quantique. Il diffère des logiciels précédents par sa particularité à s'intéresser uniquement au domaine quantique, plus précisément à la programmation quantique. Parmi ces outils logiciels figure le kit de développement logiciel (SDK) Qiskit et son

environnement d'exécution Qiskit Runtime, grâce auquel nous pouvons exécuter des programmes sur des ordinateurs quantiques IBM.

3.2.5.1 Le kit de programmation Qiskit

Le principal SDK que nous propose IBM Quantum est le SDK Qiskit, un outil de développement open source permettant de travailler sur des ordinateurs et simulateurs quantiques, fournissant une large gamme de bibliothèques quantiques utiles selon les catégories du problème à résoudre.

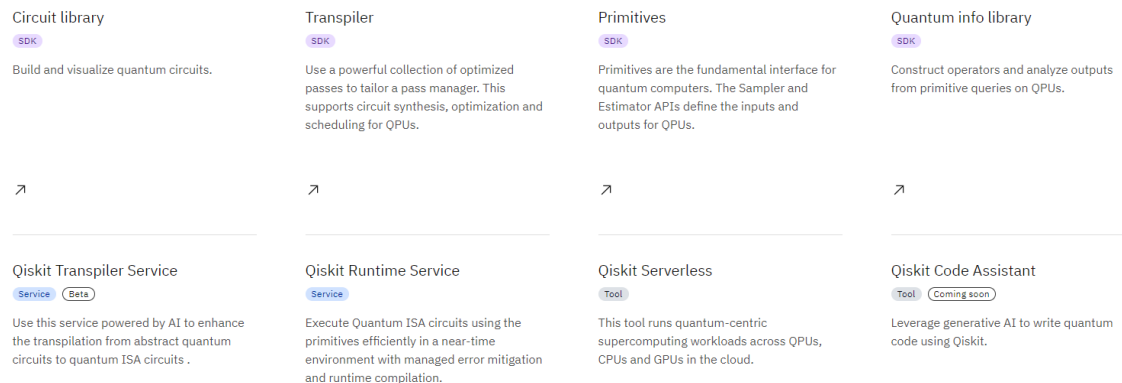


Figure 3.7 : Les bibliothèques offertes par Qiskit [52] Source : IBM Quantum
<https://www.ibm.com/quantum/qiskit>

3.2.5.2 Présentation des différents modules offerts par Qiskit

En effet, le SDK Qiskit offre des bibliothèques permettant de créer une correspondance entre les problèmes rencontrés et les circuits quantiques, et de préparer leur exécution. Ces bibliothèques offrent également une assistance dans l'exécution,

l'optimisation et l'harmonisation des charges de travail quantiques. À sa version Qiskit 1.1, les bibliothèques offertes sont affichées dans la figure 3.7 [52] :

- Circuit library : pour construire et visualiser les circuits quantiques,
- Transpiler : pour la synthèse, l'optimisation et la planification des circuits destinés aux QPU (Quantum Processing Units),
- Primitives : Pour fournir des interfaces de programmation d'applications (API) permettant de définir les entrées et les sorties des QPU,
- Quantum info library : Pour construire les opérateurs et analyser les sorties des requêtes primitives sur les QPU.

Les services offerts sont :

- Qiskit Transpiler service : pour améliorer l'adaptation des circuits quantiques abstraits vers les circuits quantiques ISA
- Qiskit Runtime Service : pour l'exécution des circuits quantiques ISA efficacement à l'aide des primitives avec des atténuations d'erreurs [52].

La plateforme d'IBM Quantum nous offre également des extensions de l'outil Qiskit pour résoudre des problèmes bien plus précis correspondant à des domaines différents tels que la chimie quantique, et exécuter les simulations quantiques des processus physiques réels fondamentaux. Nous pouvons citer :

- Qiskit Aer : fournit des outils permettant de tester et compiler les circuits quantiques dans des environnements quantiques simulés [47].
- Qiskit Nature : pour simuler les problèmes de mécanique quantique en sciences naturelles, dans le domaine de la chimie, des molécules et des matériaux [83].
- Qiskit Algorithm : fournit une collection d'algorithmes prêts à l'emploi et regroupés par fonction logique pour des applications diverses telles qu'effectuer des recherches et explorer la résolution de certains problèmes spécifiques grâce aux ordinateurs quantiques [48].
- Qiskit Optimization : pour le traitement des problèmes d'optimisation quantique tels que les programmes quadratiques à contraintes quadratiques, avec des variables binaires, entières et continues, ainsi que des contraintes d'égalité et d'inégalité [50].
- Qiskit Finance : pour développer des applications financières à l'aide des programmes quantiques [49].

Pour la suite de nos travaux, le principal module sur lequel nous nous concentrons est le module Qiskit Algorithm, il fournit un algorithme pouvant nous aider à estimer la rigidité diélectrique d'un mélange gazeux, l'algorithme QAOA. Nous pouvons également combiner plusieurs autres modules pour plus d'efficacité selon les fonctionnalités que nous avons besoin d'explorer

3.2.5.3 Exemple de simulation effectuée avec Qiskit

Implémentation de l'algorithme d'optimisation approximative quantique QAOA, une méthode itérative hybride quantique-classique, dans le contexte des modèles Qiskit. Cette partie présente d'abord la résolution du problème Maximum-Cut (ou Max-Cut) [53], pour un petit graphe figure 3.8, puis passe à l'exécution à grande échelle figure 3.9. Toutes les exécutions matérielles se font sur les ordinateurs quantiques accessibles.

Le problème Max-Cut est un problème d'optimisation difficile à résoudre, plus précisément, il s'agit d'un problème, dit NP-difficile. Cet exemple considère un graphe de nœuds connectés par des sommets et vise à le partitionner en deux graphes distincts de sorte qu'ils soient tous deux aussi grands que possible. En d'autres termes, l'objectif de ce problème est de partitionner les nœuds d'un graphe en deux ensembles de sorte que le nombre d'arêtes traversées par cette courbe soit maximisé.

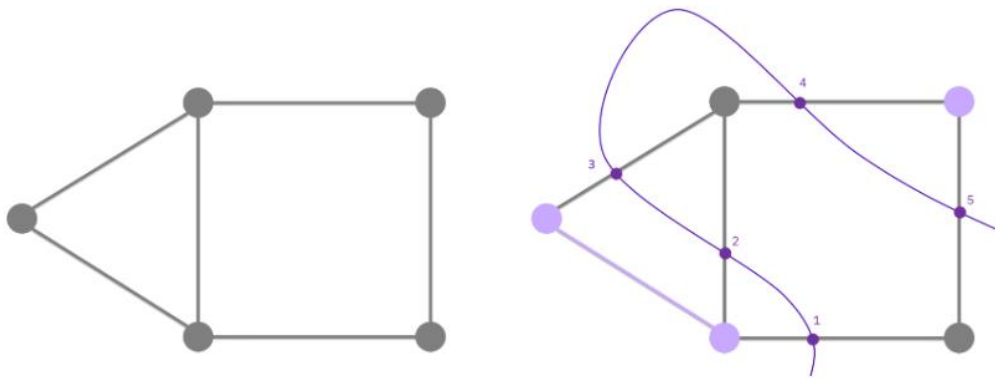


Figure 3.8 : Exemple de partitionnement de nœuds à petite échelle [53]

Source : IBM Quantum Learning

<https://learning.quantum.ibm.com/tutorial/quantum-approximate-optimization-algorithm>

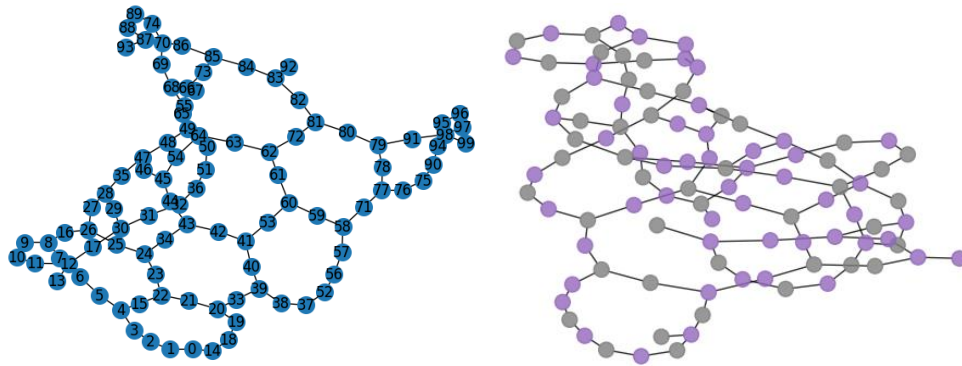


Figure 3.9 : Exemple de partitionnement de nœuds à grande échelle [53]

Source : IBM Quantum Learning

<https://learning.quantum.ibm.com/tutorial/quantum-approximate-optimization-algorithm>

3.3 Les infrastructures de calculs à haute performance

Cette partie regroupe l'ensemble des plateformes de calcul à haute performance ou de calcul avancé, nous permettant d'exécuter nos simulations sur des processeurs de dernière génération ultra performants, afin d'optimiser et d'accélérer les calculs et ainsi d'obtenir des résultats en temps record.

3.3.1 Alliance de recherche numérique du Canada

L'Alliance de recherche numérique du Canada, précédemment nommé Calcul Canada, est une plateforme qui permet de promouvoir l'innovation scientifique en offrant aux chercheurs l'accès à des infrastructures de calcul informatique de pointe (CIP), des installations de stockage et des solutions logicielles. En collaboration avec cinq partenaires régionaux, Calcul Québec, Compute Ontario, ACENET, Groupe de

l'IRN de la C.-B. et IRN des Prairies, elle fournit les services et l'infrastructure de recherche numérique (IRN) indispensables aux chercheurs canadiens et à leurs collaborateurs dans les domaines universitaires et industriels [97].

3.3.1.1 Rôle de l'Alliance de recherche numérique du Canada :

- Contribution à l'obtention de brevets, l'accélération du progrès, la création d'entreprises et l'élaboration de nouvelles normes, politiques et règles;
- Promotion de l'investissement en sciences et en innovation au Canada;
- Stimulation de la compétitivité et du développement au Canada.

Les infrastructures de calcul, les processeurs et les systèmes sont hébergés dans différents sites : L'Université McGill héberge les systèmes Béluga et Narval, l'Université de Victoria héberge le système Arbutus, l'Université Simon-Fraser héberge le système Cedar, l'Université de Waterloo héberge le système Graham, et enfin l'Université de Toronto hébergeant le système de Niagara [100].

3.3.1.2 La puissance des supercalculateurs de l'Alliance

Le plus puissant Supercalculateur HPC chez l'Alliance est Graham tableau 3.1, disposant de 903 nœuds avec 32 cœurs chacun, et certains nœuds disposent d'une mémoire allant jusqu'à 2,6 To (2000G) et d'autres d'une capacité de stockage allant jusqu'à 11 To, plusieurs nœuds disposent des accélérateurs GPU NVIDIA de haute

performance, comme les modèles P100 Pascal, V100 Volta et A100 Ampere. Il est suivi du supercalculateur C  dar présenté au tableau 3.2.

Tableau 3.1 : Supercalculateur Graham [95]

nœuds	cœurs	mémoire disponible	CPU	stockage	GPU
903	32	125G ou 128000M	2 x Intel E5-2683 v4 Broadwell @ 2.1GHz	SSD SATA 960Go	-
24	32	502G ou 514500M	2 x Intel E5-2683 v4 Broadwell @ 2.1GHz	SSD SATA 960Go	-
56	32	250G ou 256500M	2 x Intel E5-2683 v4 Broadwell @ 2.1GHz	SSD SATA 960Go	-
3	64	3022G ou 3095000M	4 x Intel E7-4850 v4 Broadwell @ 2.1GHz	SSD SATA 960Go	-
160	32	124G ou 127518M	2 x Intel E5-2683 v4 Broadwell @ 2.1GHz	SSD NVMe 1.6T	2 x NVIDIA P100 Pascal (mémoire HBM2 12Go)
7	28	187G ou 191840M	2 x Intel Xeon Gold 5120 Skylake @ 2.2GHz	SSD NVMe 4.0T NVMe	8 x NVIDIA V100 Volta (mémoire HBM2 16Go) Remarque : Un nœud n'a que 6 GPU.
2	40	377G ou 386048M	2 x Intel Xeon Gold 6248 Cascade Lake @ 2.5GHz	SSD NVMe 5.0To	8 x NVIDIA V100 Volta (mémoire HBM2 32Go), NVLINK
6	16	187G ou 191840M	2 x Intel Xeon Silver 4110 Skylake @ 2.1GHz	SSD SATA 11.0To	4 x NVIDIA T4 Turing (mémoire GDDR6 16Go)
30	44	187G ou 191840M	2 x Intel Xeon Gold 6238 Cascade Lake @ 2.1GHz	SSD NVMe 5.8To	4 x NVIDIA T4 Turing (mémoire GDDR6 16Go)
136	44	187G ou 191840M	2 x Intel Xeon Gold 6238 Cascade Lake @ 2.1GHz	SSD SATA 879Go	-
136	44	187G ou 191840M	2 x Intel Xeon Gold 6238 Cascade Lake @ 2.1GHz	879GB SATA SSD	-
1	128	2000G ou 2048000M	2 x AMD EPYC 7742	3.5To SATA SSD	8 x NVIDIA A100 Ampere
2	32	256G ou 262144M	2 x Intel Xeon Gold 6326 Cascade Lake @ 2.90GHz	SSD SATA 3.5To	4 x NVIDIA A100 Ampere
11	64	128G ou 131072M	1 x AMD EPYC 7713	SATA SSD 1.8To	4 x NVIDIA RTX A5000 Ampere

Source : l'Alliance de recherche numérique du Canada
<https://docs.alliancecan.ca/wiki/Graham/fr>    Digital Research Alliance of
 Canada 2021 – 2024

Tableau 3.2 : Supercalculateur C  dar [94]

nœuds	cœurs	mémoire disponible	CPU	stockage	GPU
256	32	125G ou 128000M	2 x Intel E5-2683 v4 Broadwell @ 2.1GHz	2 x SSD 480G	-
256	32	250G ou 257000M	2 x Intel E5-2683 v4 Broadwell @ 2.1GHz	2 x SSD 480G	-
40	32	502G ou 515000M	2 x Intel E5-2683 v4 Broadwell @ 2.1GHz	2 x SSD 480G	-
16	32	1510G ou 1547000M	2 x Intel E5-2683 v4 Broadwell @ 2.1GHz	2 x SSD 480G	-
6	32	4000G ou 409600M	2 x AMD EPYC 7302 @ 3.0GHz	2 x SSD 480G	-
2	40	6000G ou 614400M	4 x Intel Gold 5215 Cascade Lake @ 2.5GHz	2 x SSD 480G	-
96	24	125G ou 128000M	2 x Intel E5-2650 v4 Broadwell @ 2.2GHz	1 x SSD 800G	4 x NVIDIA P100 Pascal (mémoire HBM2 12G)
32	24	250G ou 257000M	2 x Intel E5-2650 v4 Broadwell @ 2.2GHz	1 x SSD 800G	4 x NVIDIA P100 Pascal (mémoire HBM2 16G)
192	32	187G ou 192000M	2 x Intel Silver 4216 Cascade Lake @ 2.1GHz	1 x SSD 480G	4 x NVIDIA V100 Volta (mémoire HBM2 32G)
608	48	187G ou 192000M	2 x Intel Platinum 8160F Skylake @ 2.1GHz	2 x SSD 480G	-
768	48	187G ou 192000M	2 x Intel Platinum 8260 Cascade Lake @ 2.4GHz	2 x SSD 480G	-

Source : l'Alliance de recherche numérique du Canada
<https://docs.alliancecan.ca/wiki/Cedar/fr>    Digital Research Alliance of
 Canada 2021 – 2024

3.3.1.3 Utilisation des bases de données de l'Alliance

Les ressources de calcul sont allouées pour une utilisation aléatoire sans priorité à toute personne possédant un compte l'Alliance de recherche numérique du Canada actif. Tous les professeurs d'universités canadiennes ont la possibilité d'avoir un compte sur la plateforme de l'Alliance pour pouvoir parrainer les étudiants qui souhaitent avoir accès aux ressources. Pour un accès exclusif, la procédure est différente.

➤ Accès aux ressources

Chacun des partenaires de l'Alliance prend en charge une liste de logiciels pour les utilisations distinctes selon le type de travail à effectuer.

➤ Description de l'accès aux ressources de l'Alliance : Cas du logiciel COMSOL Via SHARCNET :

○ Créer un Compte sur la plateforme

La création du compte est parrainée par un professeur pour les étudiants, ou alors par des personnes-ressources pour les autres groupes d'utilisateurs.

○ Accéder au processus d'installation du logiciel

- Cliquer sur le lien d'accès à la liste des logiciels proposés par Sharcnet : <https://www.sharcnet.ca/my/software> et choisir le logiciel qui convient. Il est à noter qu'il est absolument nécessaire d'écrire au support technique de l'Alliance : support@calculquebec.ca pour qu'ils effectuent des configurations :

- Demander à l'administrateur du serveur de Licence (de l'UQTR dans le cas d'espèce) de donner l'accès aux serveurs de l'Alliance.
- Leur communiquer les informations à propos du serveur de licence : ports, IP, pour qu'ils permettent à leurs serveurs d'accéder à votre serveur de licence.
- Cliquer sur le lien pour la procédure d'utilisation de COMSOL via les infrastructures de l'Alliance / SHARCNET et suivre les indications.

3.3.2 *CMC Microsystems*

Dans le même concept que l'Alliance de recherche numérique du Canada, CMC Microsystems est un organisme à but non lucratif aidant les chercheurs, étudiants ou en industries, à accéder aux infrastructures de calcul HPC. Il offre une interface pour faciliter l'accès aux logiciels, et crée le lien entre ces logiciels et les supercalculateurs.

➤ **Rôle de CMC Microsystems**

L'objectif de CMC est pratiquement le même que celui de l'Alliance, promouvoir la recherche, accélérer le progrès et les découvertes, offrir un environnement concurrentiel aux chercheurs canadiens pour augmenter leur compétitivité.

La différence principale de CMC réside en la mise à la disposition des utilisateurs, une liste de logiciels accessibles à distance. Avec l'Alliance, il fallait installer le logiciel sur un ordinateur personnel ou professionnel avant de solliciter une ressource HPC, sur

la plateforme de CMC, il suffit de sélectionner le logiciel sollicité et y accéder à distance pour effectuer des calculs, il n'est pas nécessaire de faire l'installation.

➤ **Accès aux ressources**

L'accès aux ressources requiert la création de compte avec un statut 100 % terminé, d'un abonnement et d'une licence appropriée.

➤ **Ressources disponibles chez CMC :**

CMC offre un calculateur disposant de 8 nœuds qui génère une puissance de 8,6 TFLOPS 8, ce qui signifie que le système est capable de traiter 8,6 trillions d'opérations en virgule flottante par seconde. Ci-après la configuration des nœuds [105] :

- Chaque nœud utilise un double processeur Double UCT 14 cœurs 2,4 à 3,3 GHz
- 4 nœuds sont équipés de 384 GO RAM
- 4 nœuds sont équipés de 768 GO RAM
- Le système utilise une interconnexion de nœud à débit amélioré à 100 Go EDR,
- Un réseau de stockage puissant de l'ordre de 10 Go Ethernet

CMC offre également l'accès à une longue liste de logiciels parmi lesquels [106] : COMSOL, Ansys, SolidWorks, et Altium.

3.3.3 *Les avantages et défis*

Hebert, J. et al. (2024) [41] ont fait une étude sur le progrès, les défis et les opportunités qu'offrent les infrastructures de Calcul Haute Performance à travers une

enquête auprès de certains établissements et industries ayant utilisé les infrastructures HPC dans leur travail. Nous avons pu extraire des analyses des auteurs les aspects suivants concernant les industries, particulièrement :

Les opportunités qu’offrent l’utilisation des HPC au sein des industries contactées résumées dans la figure 3.10, réside en : l’optimisation des processus commerciaux vient en tête avec 22,20% de vote, ensuite l’amélioration de la qualité des produits et services, et la bonification des résultats commerciaux qui ont tous les deux 20,60%, ensuite l’augmentation de la compétitivité envers la concurrence avec 15,90% et enfin l’avancement des recherches et des expériences avec 11,10%. D’autres avantages divers ont été mentionnés à hauteur de 6,30%, et certaines réponses ont mentionné qu’il n’y avait aucun bénéfice remarquable.

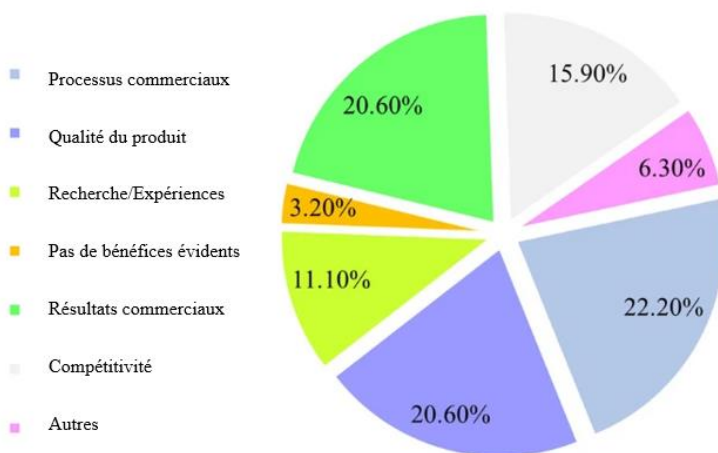


Figure 3.10 : Les avantages de l'utilisation des HPC dans les industries [41]

Source : Hebert, J., & al. (2024). *High-performance computing in undergraduate education at primarily undergraduate institutions in Wisconsin: Progress, challenges, and opportunities*. *Education and Information Technologies*, 1-25

cependant, les industries n'utilisant pas d'infrastructures HPC ont également été questionnées sur la raison ou les obstacles à l'utilisation de cette infrastructure, et les réponses qui en découlent résumées dans la figure 3.11, résident en grande partie au manque d'intérêt (35%), ensuite au manque d'expertise (22,50%), ensuite au manque de ressources internes et externes à 17,50% chacun, enfin pour d'autres raisons diverses.

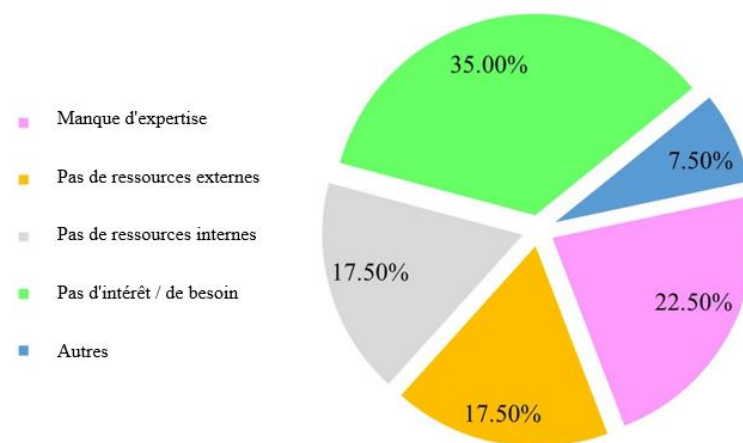


Figure 3.11 : Les défis de l'utilisation des HPC dans les industries [41]

Source : Hebert, J., & al. (2024). *High-performance computing in undergraduate education at primarily undergraduate institutions in Wisconsin: Progress, challenges, and opportunities. Education and Information Technologies, 1-25*

3.4 L'informatique quantique

Les ordinateurs quantiques ont connu ces dernières années une évolution significative, permettant de plus en plus de réaliser des opérations complexes, impossibles à exécuter sur ordinateurs classiques. Nous sommes rendus à une ère où l'un des défis principaux de la découverte informatique est d'obtenir un « avantage

quantique » dans les domaines encore inexplorés via cette technologie, en exploitant la puissance des calculateurs quantiques dans la résolution des problèmes computationnels à une dimension surpassant la simulation classique par force brute [57][54].

En effet, l'utilité quantique ou l'avantage quantique sont des termes connus dans le jargon quantique qui désignent la capacité d'un ordinateur quantique à réaliser une tâche spécifique de manière plus efficace et plus rapide qu'un ordinateur classique, ou alors impossible à résoudre par ce dernier [54]. Plus simplement, c'est lorsqu'un ordinateur quantique dépasse un ordinateur classique dans l'exécution d'une tâche.

3.4.1 Principes fondamentaux de l'informatique quantique

Contrairement aux méthodes classiques qui utilisent des bits représentés par 0 ou 1, l'informatique quantique utilise des bits quantiques nommés couramment « qubits », représentés simultanément par 0 et 1. La différence entre les bits et les qubits est qu'un qubit n'a pas uniquement deux états, il peut se retrouver dans une multitude d'états autre que 0 ou 1, ou dans une combinaison d'état sous la forme représentée sous la forme $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, où α et β sont des nombres complexes. L'état d'un qubit est un vecteur dans un espace vectoriel complexe à deux dimensions. La notation $|0\rangle$ se lit « ket 0 » [77].

Les principes fondamentaux de l'informatique quantique sont : la superposition, l'intrication et la téléportation quantique.

3.4.1.1 La superposition

La superposition quantique signifie qu'un qubit peut être représenté par une combinaison linéaire de plusieurs états, par exemple, il peut être en même temps 0 et 1, contrairement à la physique classique qui stipule qu'une particule se retrouve dans un état précis à un instant t [12].

C'est cette particularité qui permet à un programme quantique d'explorer simultanément plusieurs solutions possibles pour un problème donné.

3.4.1.2 L'intrication

L'intrication quantique, encore appelée « entanglement » en anglais, est un phénomène de la physique quantique qui stipule que dans un groupe, les particules interagissent de telle sorte que l'état quantique de l'une d'elles ne peut être décrit indépendamment de l'état des autres même si elles sont distantes. Ce qui signifie que lorsque les qubits sont intriqués, leurs états deviennent corrélés, en application cette caractéristique permet de lier les informations entre elles dans un espace à grande échelle [2].

Cette particularité uniquement liée à l'informatique quantique augmente la puissance de calcul et la complexité des interactions entre les qubits.

3.4.1.3 La téléportation

La téléportation quantique consiste à transmettre d'un point de départ à un point d'arrivée, une information qu'elle est connue ou pas (l'état d'un qubit), sans transporter le système physique porteur du message (le qubit). Il s'agit d'une transmission sans transport de matière. Ce phénomène est possible grâce à l'intrication quantique, une propriété qui donne également accès au transfert plus abondant des informations qu'à travers des méthodes classiques [2].

3.4.2 Les algorithmes quantiques

Quelques algorithmes quantiques efficaces :

3.4.2.1 L'algorithme de Shor

L'algorithme de Shor [40] est un algorithme quantique capable de décomposer théoriquement de très grands nombres en facteurs premiers beaucoup plus rapidement que n'importe quel algorithme classique. Cette caractéristique apporte une utilité quantique dans les domaines comme la cryptographie.

3.4.2.2 L'algorithme de Grover

L'algorithme de Grover est un algorithme quantique permettant de rechercher une valeur dans une base de données non structurée [37].

3.4.2.3 L'algorithme Harrow-Hassidim-Lloyd

L'algorithme Harrow-Hassidim-Lloyd (HHL) est un algorithme quantique qui offre la possibilité de résoudre des systèmes d'équations linéaires quantiques apportant un avantage quantique dans l'exécution de différentes tâches telles que les systèmes de recommandation, la régression linéaire, les machines à vecteurs de support [19].

3.4.2.4 L'algorithme ADMM Optimizer

L'algorithme ADMM (Alternating Direction Method of Multipliers) est un algorithme d'optimisation convexe très puissant, adapté à la résolution de problèmes de grande ampleur, il décompose un problème de minimisation sans contrainte en plusieurs sous-problèmes contraints. L'algorithme combine les avantages des méthodes de décomposition duale et des multiplicateurs de Lagrange, et offre ainsi une approche efficace pour résoudre des problèmes complexes [7].

3.4.2.5 L'algorithme QAOA

L'algorithme QAOA (quantum approximate optimization algorithm), traduit par Algorithme d'Optimisation Approximative Quantique est un algorithme hybride quantique-classique introduit par Edward Farhi, Jeffrey Goldstone, et Sam Gutmann en 2014, conçu pour résoudre les problèmes d'optimisation combinatoire [30].

3.4.3 Domaines d'application

Plusieurs domaines profitent ou pourraient profiter de l'avantage quantique, pour apporter des avancées considérables et non négligeables à la recherche continue d'amélioration et de perfectionnement. Certains d'entre eux observent des progrès impressionnants, et d'autres affichent des perspectives encourageantes.

À la question posée à ChatGPT, à savoir : « *Quelles sont les dernières solutions découvertes grâce à l'informatique quantique dans les domaines tels que la chimie et la science des matériaux, la santé et la recherche médicale, l'intelligence artificielle, la sécurité informatique, l'énergie ?* », une réponse a été générée et les captures sont données en Annexe 2.1. Ci-dessous un résumé instructif basé sur les réponses de ChatGPT et classé selon les domaines d'application. Des vérifications ont été également effectuées sur des sources en ligne pour se rassurer de l'exactitude des informations.

3.4.3.1 La chimie et la science des matériaux

- La simulation de molécules complexes : les ordinateurs quantiques permettent de simuler les propriétés de molécules complexes impossibles à simuler avec des ordinateurs classiques, afin de comprendre leurs réactions chimiques, bénéfiques pour la recherche des médicaments et matériaux.
Exemple : IBM.
- Catalyseurs et batteries : l'exploration de nouveaux catalyseurs grâce aux simulations quantiques.

3.4.3.2 La santé et la recherche médicale

- La découverte de nouveaux médicaments : la modélisation des interactions médicament-cible grâce à l'informatique quantique. Exemple : Quantum Pharmaceuticals [82].
- L'amélioration des traitements médicaux : la personnalisation des traitements médicaux en fonction de l'analyse génétique et des simulations personnalisées du comportement des médicaments dans le corps humain.

3.4.3.3 L'intelligence artificielle

- L'optimisation des algorithmes d'apprentissage automatique : Le machine Learning quantique amélioré grâce à l'optimisation des hyperparamètres.
- La réduction de dimension : traitement plus efficace d'un ensemble de données de très grandes dimensions grâce aux méthodes quantiques.

3.4.3.4 La sécurité informatique

- La cryptographie et la distribution des clés quantiques pour garantir des communications plus sûres et sécurisées.
- Développement de nouvelles méthodes de cryptographie pouvant contrer les attaques potentielles provenant des ordinateurs quantiques.

3.4.3.5 L'énergie

- Gestion des réseaux énergétiques : Le domaine énergétique pourrait exploiter l'informatique quantique pour équilibrer la production et la consommation de l'énergie, intégrer les énergies renouvelables et minimiser les pertes.
- Le nucléaire : le développement de réacteurs de fusion avec une fiabilité pour la commercialisation.

3.4.4 Les plateformes d'accès aux systèmes quantiques

Il s'agit des plateformes fournissant un accès aux infrastructures de calcul quantique.

Nous pouvons citer entre autres :

3.4.4.1 IBM Quantum

IBM se déclare comme étant le leader mondial de l'informatique quantique.

Les solutions proposées par IBM Quantum :

- Des outils et des logiciels : pour la création visuelle des circuits quantiques dans IBM Quantum et des éléments appelés « Composer », pour exécuter ces circuits quantiques sur de vrais systèmes quantiques.
- Des systèmes et simulateurs : les services IBM Quantum nous offrent à travers leur service Cloud des systèmes quantiques, des simulateurs, des environnements d'exécution et outils de programmation quantique optimisés.

- La figure 3.12 ci-dessous présente la liste des processeurs quantiques disponibles chez IBM, nous notons que les processeurs les plus puissants de cette liste sont « ibm_strasbourg » et « ibm_bruxelles » avec tous les deux un score de 37K CLOPS (Circuit Layer Operations Per Second), ce paramètre représente la mesure de la vitesse avec laquelle le processeur quantique exécute des opérations quantiques dans les couches. De plus leur capacité à effectuer des calculs quantiques complexes est de l'ordre de 127 qubits [56].












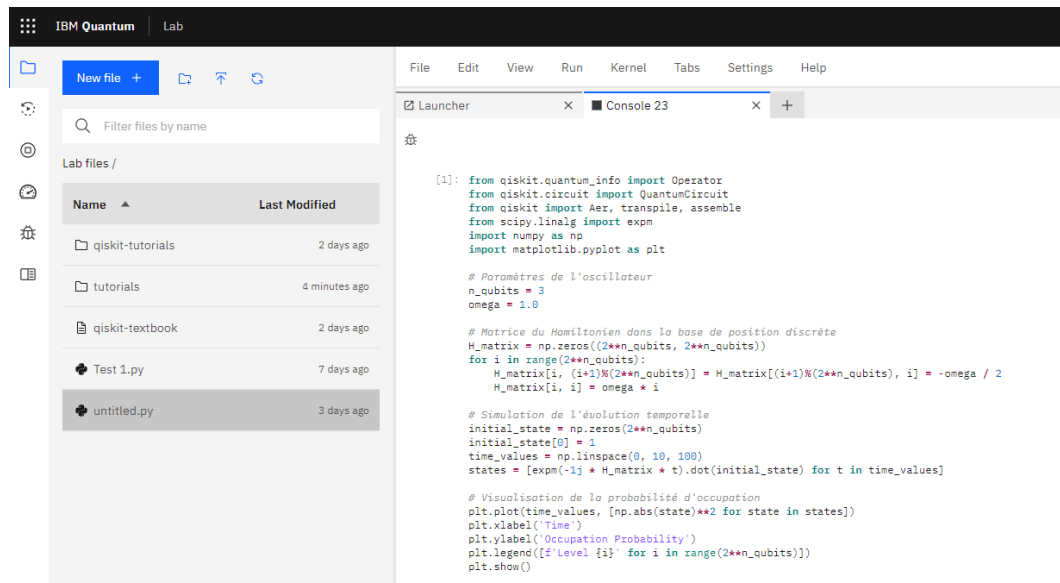
ibm_fez QPU status: ● Online Processor type: Heron r2  <table> <tr> <th>Qubits</th> <th>2Q Error (best/layered)</th> <th>CLOPS</th> </tr> <tr> <td>156</td> <td>1.46e- / 4.47e- 3 3</td> <td>28K</td> </tr> </table>	Qubits	2Q Error (best/layered)	CLOPS	156	1.46e- / 4.47e- 3 3	28K	ibm_torino QPU status: ● Online Processor type: Heron r1  <table> <tr> <th>Qubits</th> <th>2Q Error (best/layered)</th> <th>CLOPS</th> </tr> <tr> <td>133</td> <td>1.40e- / 7.06e- 3 3</td> <td>30K</td> </tr> </table>	Qubits	2Q Error (best/layered)	CLOPS	133	1.40e- / 7.06e- 3 3	30K	ibm_kyiv QPU status: ● Online Processor type: Eagle r3  <table> <tr> <th>Qubits</th> <th>2Q Error (best/layered)</th> <th>CLOPS</th> </tr> <tr> <td>127</td> <td>4.02e- / 1.36e- 3 2</td> <td>30K</td> </tr> </table>	Qubits	2Q Error (best/layered)	CLOPS	127	4.02e- / 1.36e- 3 2	30K
Qubits	2Q Error (best/layered)	CLOPS																		
156	1.46e- / 4.47e- 3 3	28K																		
Qubits	2Q Error (best/layered)	CLOPS																		
133	1.40e- / 7.06e- 3 3	30K																		
Qubits	2Q Error (best/layered)	CLOPS																		
127	4.02e- / 1.36e- 3 2	30K																		
ibm_sherbrooke QPU status: ● Online Processor type: Eagle r3  <table> <tr> <th>Qubits</th> <th>2Q Error (best/layered)</th> <th>CLOPS</th> </tr> <tr> <td>127</td> <td>2.38e- / 1.54e- 3 2</td> <td>30K</td> </tr> </table>	Qubits	2Q Error (best/layered)	CLOPS	127	2.38e- / 1.54e- 3 2	30K	ibm_brisbane QPU status: ● Online Processor type: Eagle r3  <table> <tr> <th>Qubits</th> <th>2Q Error (best/layered)</th> <th>CLOPS</th> </tr> <tr> <td>127</td> <td>2.87e- / 1.81e- 3 2</td> <td>30K</td> </tr> </table>	Qubits	2Q Error (best/layered)	CLOPS	127	2.87e- / 1.81e- 3 2	30K	ibm_renselaer QPU status: ● Online Processor type: Eagle r3  <table> <tr> <th>Qubits</th> <th>2Q Error (best/layered)</th> <th>CLOPS</th> </tr> <tr> <td>127</td> <td>3.99e- / 2.14e- 3 2</td> <td>32K</td> </tr> </table>	Qubits	2Q Error (best/layered)	CLOPS	127	3.99e- / 2.14e- 3 2	32K
Qubits	2Q Error (best/layered)	CLOPS																		
127	2.38e- / 1.54e- 3 2	30K																		
Qubits	2Q Error (best/layered)	CLOPS																		
127	2.87e- / 1.81e- 3 2	30K																		
Qubits	2Q Error (best/layered)	CLOPS																		
127	3.99e- / 2.14e- 3 2	32K																		
ibm_kawasaki QPU status: ● Online Processor type: Eagle r3  <table> <tr> <th>Qubits</th> <th>2Q Error (best/layered)</th> <th>CLOPS</th> </tr> <tr> <td>127</td> <td>3.24e- / 2.25e- 3 2</td> <td>29K</td> </tr> </table>	Qubits	2Q Error (best/layered)	CLOPS	127	3.24e- / 2.25e- 3 2	29K	ibm_brussels QPU status: ● Online Processor type: Eagle r3  <table> <tr> <th>Qubits</th> <th>2Q Error (best/layered)</th> <th>CLOPS</th> </tr> <tr> <td>127</td> <td>2.56e- / 2.30e- 3 2</td> <td>37K</td> </tr> </table>	Qubits	2Q Error (best/layered)	CLOPS	127	2.56e- / 2.30e- 3 2	37K	ibm_quebec QPU status: ● Online Processor type: Eagle r3  <table> <tr> <th>Qubits</th> <th>2Q Error (best/layered)</th> <th>CLOPS</th> </tr> <tr> <td>127</td> <td>3.13e- / 2.57e- 3 2</td> <td>32K</td> </tr> </table>	Qubits	2Q Error (best/layered)	CLOPS	127	3.13e- / 2.57e- 3 2	32K
Qubits	2Q Error (best/layered)	CLOPS																		
127	3.24e- / 2.25e- 3 2	29K																		
Qubits	2Q Error (best/layered)	CLOPS																		
127	2.56e- / 2.30e- 3 2	37K																		
Qubits	2Q Error (best/layered)	CLOPS																		
127	3.13e- / 2.57e- 3 2	32K																		
ibm_nazca QPU status: ● Online - Queue paused maintenance Processor type: Eagle r3  <table> <tr> <th>Qubits</th> <th>2Q Error (best/layered)</th> <th>CLOPS</th> </tr> <tr> <td>127</td> <td>4.51e- / 3.17e- 3 2</td> <td>29K</td> </tr> </table>	Qubits	2Q Error (best/layered)	CLOPS	127	4.51e- / 3.17e- 3 2	29K	ibm_strasbourg QPU status: ● Online Processor type: Eagle r3  <table> <tr> <th>Qubits</th> <th>2Q Error (best/layered)</th> <th>CLOPS</th> </tr> <tr> <td>127</td> <td>3.05e- / 3.55e- 3 2</td> <td>37K</td> </tr> </table>	Qubits	2Q Error (best/layered)	CLOPS	127	3.05e- / 3.55e- 3 2	37K							
Qubits	2Q Error (best/layered)	CLOPS																		
127	4.51e- / 3.17e- 3 2	29K																		
Qubits	2Q Error (best/layered)	CLOPS																		
127	3.05e- / 3.55e- 3 2	37K																		

Figure 3.12 : La capacité des processeurs quantique d'IBM [56] capture prise par Arianne Lemo sur IBM quantum Platform
<https://quantum.ibm.com/services/resources>

La mesure du taux d'erreur est également un paramètre important à observer lorsqu'on veut exécuter un circuit quantique sur un processeur, car il permet d'évaluer l'efficacité et la précision des opérations entre qubits. Un trop grand risque d'erreurs peut fausser les résultats de calcul.

a. Environnement IBM Quantum : il est possible d'étudier les principes fondamentaux de la mécanique quantique, des circuits quantiques, des qubits et des portes utilisées pour effectuer des opérations sur chaque qubit.

Après avoir créé un compte sur la plateforme IBM Quantum, nous avons exécuté un exemple de Code : un Hamiltonien simple pour un oscillateur harmonique discret et simuler son évolution temporelle en utilisant le solveur de matrices exponentielles.



```

[1]: from qiskit.quantum_info import Operator
from qiskit.circuit import QuantumCircuit
from qiskit import Aer, transpile, assemble
from scipy.linalg import expm
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Paramètres de l'oscillateur
n_qubits = 3
omega = 1.0

# Matrice du Hamiltonien dans la base de position discrète
H_matrix = np.zeros((2**n_qubits, 2**n_qubits))
for i in range(2**n_qubits):
    H_matrix[i, (i+1)%(2**n_qubits)] = H_matrix[(i+1)%(2**n_qubits), i] = -omega / 2
    H_matrix[i, i] = omega * i

# Simulation de l'évolution temporelle
initial_state = np.zeros(2**n_qubits)
initial_state[0] = 1
time_values = np.linspace(0, 10, 100)
states = [expm(-1j * H_matrix * t).dot(initial_state) for t in time_values]

# Visualisation de la probabilité d'occupation
plt.plot(time_values, [np.abs(state)**2 for state in states])
plt.xlabel('Time')
plt.ylabel('Occupation Probability')
plt.legend(['Level {}'.format(i) for i in range(2**n_qubits)])
plt.show()

```

Figure 3.13 : Exemple de code Qiskit dans IBM Quantum
(capture par Arianne Lemo sur la plateforme IBM Quantum)

Et comme résultat : le code nous a permis de tracer l'évolution temporelle de la probabilité d'occupation, figure 3.14, pour chaque niveau d'énergie dans l'oscillateur discret. Le graphique montre comment l'état se déplace dans le potentiel parabolique au fil du temps.

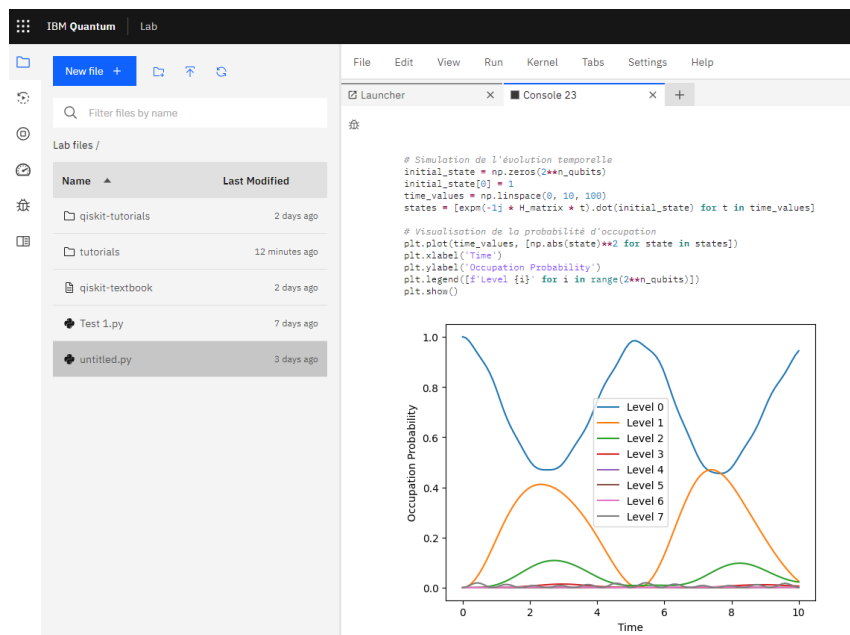


Figure 3.14 : Résultat du code Qiskit compilé dans IBM Quantum
(capture par Arianne Lemo sur la plateforme IBM Quantum)

3.4.4.2 Azure Quantum

- **Microsoft AZURE**

Nous avons également la possibilité d'utiliser l'environnement Azure Quantum, le service d'informatique quantique cloud Azure fourni par Microsoft pour effectuer des simulations quantiques.

En effet, Azure quantum est une plateforme qui offre l'interface utilisateur pour la création des programmes et circuits quantiques, et permet de faire le choix entre plusieurs fournisseurs qui hébergent des ordinateurs quantiques, pour l'exécution du circuit sur de véritables ordinateurs en production. Ces fournisseurs sont : IONQ, PASQAL, Quantinuum, et Rigetti.

Les outils de programmation offerts par Azure Quantum sont [73] :

- Q# : est un langage de programmation quantique open source permettant d'expérimenter des algorithmes quantiques,
- Python + Q# : Pour écrire le programme Python et appeler les opérations Q#,
- Python + Qiskit : Il est également possible d'exécuter un circuit quantique Qiskit sur IonQ, Quantinuum ou Rigetti à la place d'IBM, à travers Azure Quantum.
- Python + Cirq : Il est aussi possible d'exécuter des circuits quantiques Cirq en ciblant les processeurs quantiques IonQ ou Quantinuum à la place de Google.

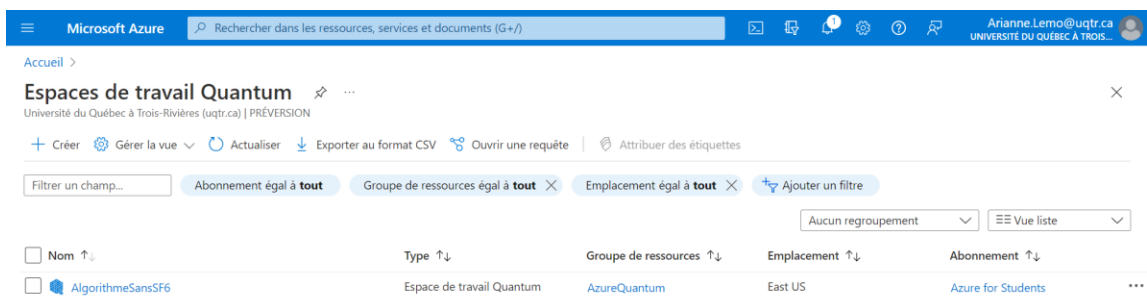


Figure 3.15 : Un espace de travail Azure Quantum

Source (Capture prise par Arianne Lemo) : <https://portal.azure.com/#home>.

Pour des essais nous avons créé un espace de travail Quantum dans lequel nous avons testé la construction de notre algorithme sans SF₆.

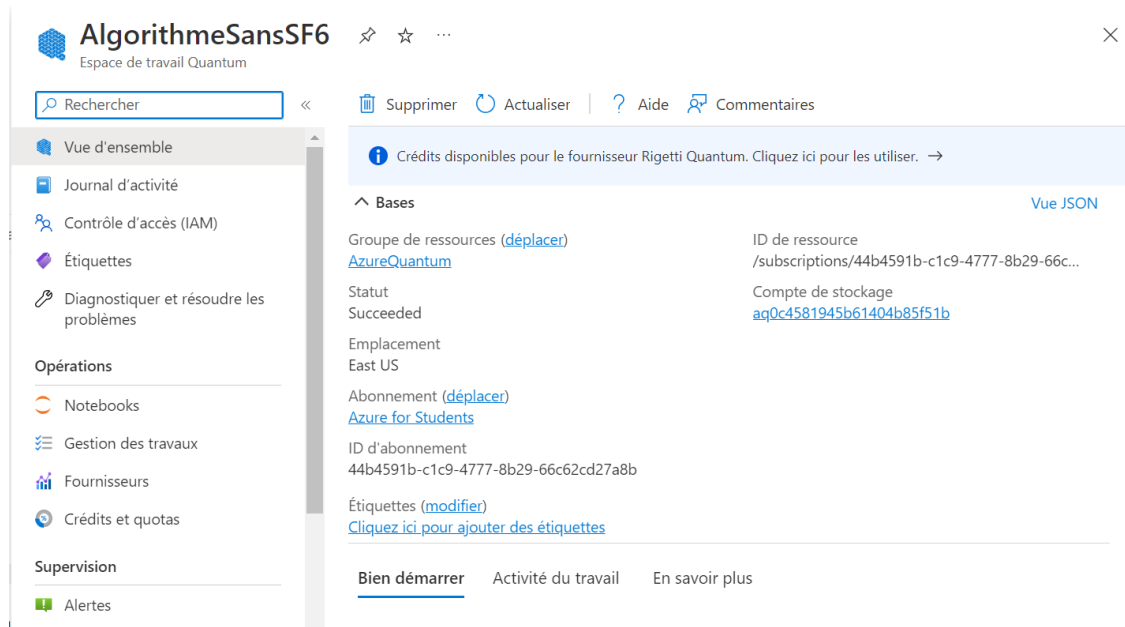


Figure 3.16 : Mon espace de travail Azure Quantum pour l'algorithme SANS SF₆

Source (Capture prise par Arianne Lemo) : <https://portal.azure.com/#home>.

3.4.4.3 Google Quantum AI

Google Quantum AI est également l'une des plateformes que nous avons étudiées pour évaluer ses performances afin de faire le choix de l'environnement à utiliser pour nos travaux.

Il offre une interface permettant de créer et programmer des algorithmes quantiques grâce à son langage de programmation Cirq. Il est similaire à Azure Quantum avec un même mode de fonctionnement.

3.5 Le choix des outils de simulation

Pour faire un choix approprié, nous avons étudié dans ce chapitre un ensemble d'outils de simulations, et au regard des informations recueillies durant cette étude, nous avons sélectionné ceux pouvant répondre à nos attentes, grâce aux moyens qu'ils mettent à notre disposition, leur accessibilité, et leur conformité aux normes (exemple : la norme ISO 9001 permettant de certifier qu'un logiciel respecte les exigences réglementaires).

Notre approche nécessite l'utilisation d'un environnement quantique pour une meilleure exploration des différentes solutions possibles, et dans cette optique, nous avons fait les choix suivants :

- Le choix de l'environnement de programmation approprié est porté sur IBM Quantum, grâce aux avantages qu'il propose en termes d'accès aux ressources physiques. De plus, il fournit un ensemble de bibliothèques quantiques pertinentes et nous offre la possibilité d'interagir directement avec les ordinateurs quantiques IBM réels sur lesquels effectuer nos calculs.
- L'outil de programmation choisi est Qiskit, ce choix est directement lié au choix de l'environnement, et, cet outil nous permet de bénéficier amplement de l'avantage qu'offre le calcul quantique. Le logiciel choisi est celui qui répond à nos attentes en termes de performances pour les calculs complexes et de créativité.

- L'outil pour effectuer les simulations 3D post-traitement choisi est COMSOL Multiphysics, cet outil permettra faire les simulations nécessaires pour la validation numérique de la solution isolante gazeuse.

3.6 Importance des essais numériques

Les essais numériques sont d'une importance capitale de nos jours, car ils apportent des informations pertinentes sur la faisabilité de la solution à implémenter, ils décrivent les processus à mettre en marche, et mettent en avant-plan les détails à considérer :

- Lorsque les essais sont concluants, ils assurent le succès de l'implémentation physique de la solution avec une grande probabilité,
- Lorsque les essais échouent, les résultats obtenus permettent de déterminer les critères à ajuster pour corriger les problèmes rencontrés.

Ces aspects démontrent le caractère incontournable des simulations numériques.

Chapitre 4 - MÉTHODES D'ANALYSE APPLIQUÉES AUX DISJONCTEURS

Ce chapitre décrit l'ensemble des méthodes d'analyse appliquées aux disjoncteurs.

4.1 Description des systèmes physiques

Les systèmes de disjoncteurs extérieurs offrent de multiples avantages pour chaque application, de l'optimisation du réseau électrique aux applications de réseau intelligent.

Une nouvelle gamme de disjoncteurs pour réservoirs fermés basée sur une vaste expérience dans les technologies clés de la conception d'interrupteurs à vide, de l'actionneur et de la commande, de la construction soudée étanche à vie, et de la profonde compréhension des problèmes de résistance aux défauts d'arc interne et de leurs solutions. Cela a permis aux nouveaux disjoncteurs VOX de combiner les dernières technologies et les exigences techniques les plus récentes avec une solution rentable, créant ainsi la nouvelle génération de disjoncteurs et de réenclencheurs.

4.1.1 Présentation des disjoncteurs extérieurs de types « Dead tank » VOX

Le VOX est un disjoncteur à vide isolé au gaz SF₆ stocké dans un réservoir à cuve métallique extérieur. Il est conçu pour répondre aux exigences des normes CEI en termes de test des appareils de commutation et de commande sous enveloppe métallique dans des conditions d'arc électrique dû à un défaut interne.

Les disjoncteurs VOX, construits pour des installations extérieures, sont conçus pour des tensions ne dépassant pas 40,5 kV, pour notre cas la tension nominale du réseau de distribution peut aller jusqu'à 38 kV. Ils sont équipés d'un mécanisme à ressort en spirale ayant la capacité de fonctionner en O-C-O, c'est-à-dire ouverture-fermeture-ouverture, sur trois pôles. Il s'agit d'un disjoncteur extérieur de type réservoir fermé, Figure 4.1, monté au sol, avec comme solution d'isolation le gaz SF₆ sous basse pression, logé dans un boîtier en acier inoxydable entièrement soudé, et étanche à vie [23] [131].

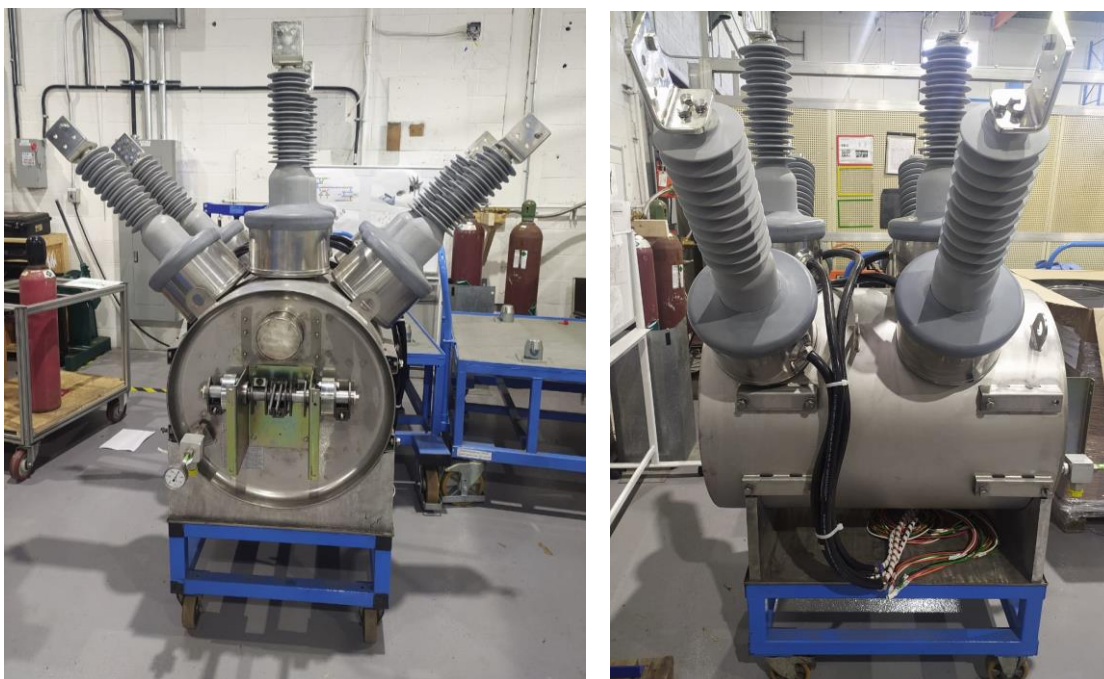


Figure 4.1 : Disjoncteur CO7 VOX de type Dead Tank 38 kV

Source : photo prise par Arianne Lemo dans les locaux de CO7 Technologies inc. à Lachine, Québec, Canada.

Le VOX a été conçu et testé pour répondre aux exigences des normes applicables CEI, BS, AS, ANSI, IEEE, GOST et GB. [131]

Les caractéristiques et avantages du VOX

- L'unité VOX est soumise à un test d'arc interne conformément à la norme CEI 60298 incluant la classe d'accessibilité A. Il présente un système de commutation déphasée pour une production décentralisée, il convient pour la commutation de réenclenchement automatique à grande vitesse et pour la commutation de batteries de condensateurs de classe recommandée C2 [23]
- Le VOX combine les avantages de l'isolation au SF₆ basse pression, offrant les avantages d'un appareillage de commutation GIS, ainsi que la commutation sous vide respectueuse de l'environnement. [131]
- Le boîtier conforme aux normes ANSI/IEEE est « testé contre la pluie » (ANSI/IEEE C37.20.2), l'entretien et la maintenance requis pour cet appareil sont minimaux, il présente un faible encombrement contrairement aux disjoncteurs de distribution électrique de plus 25,8 kV avec une endurance mécanique supérieure à 10 000 opérations au courant nominal. [23]

4.1.2 Présentation des disjoncteurs extérieurs VSB

Les disjoncteurs extérieurs de sous-stations électriques VSB de CO7 Technologies sont isolés à l'air et combinent la technologie éprouvée des disjoncteurs HVX de moyenne tension de Schneider Electric et une conception individuelle particulière de pointe [111].



Figure 4.2 : Disjoncteur CO7 VSB 38 kV

Source : photo prise par Arianne Lemo dans les locaux de CO7 Technologies inc.

Le principe fonctionnel de base est réalisé par un arbre principal entraîné en rotation par un ressort spiral, fournissant l'énergie mécanique nécessaire aux cycles de fermeture et d'ouverture du disjoncteur [26]. Les disjoncteurs VSB sont conçus conformément aux normes IEEE / ANSI pertinentes pour les disjoncteurs intérieurs et extérieurs et sont caractérisés par une construction résistante aux arcs électriques de type 2B sur les modèles de 1200A à 2500A [111].

Les caractéristiques et avantages du VSB [111] :

Ce type de disjoncteur est capable de résister à la corrosion, les armoires sont chauffantes pour éviter la condensation avec chauffages supplémentaires pour -50 °C, la

ventilation est filtrée, et ils sont conçus conformément aux normes CSA testés contre la pluie. De plus, le niveau d'encombrement est réduit pour les disjoncteurs communs.

4.1.3 Les différents types d'essais

Les types d'essais pertinents à effectuer avant d'adopter une nouvelle solution d'isolation pour la mise en production d'un modèle de disjoncteur VOX sont :

- **Test de montée en température :**

Le test d'élévation de température est considéré comme un essai type, pour les équipements moyenne tension ou pour le développement de produits, afin de vérifier la capacité du disjoncteur à atteindre une température maximale requise et principalement de valider la conception. Les procédures de test sont conçues selon les normes IEEE Std C37.09-2018 et IEEE Std C37.04-1999.

- **Tests de courts-circuits**

Ces tests évaluent le courant de court-circuit assigné ainsi que les capacités relatives requises du disjoncteur pour des applications dans des systèmes effectivement mis à la terre ou non mis à la terre. Pour le VOX7 les tests doivent être effectués à la fréquence de 60 Hz. Les facteurs déterminants sont l'amplitude et la forme de la tension de rétablissement transitoire (TRV) en fonction du temps, ainsi que l'amplitude et la durée de la tension de rétablissement à la fréquence. Les tests de court-circuit sont effectués selon la norme IEEE C37.09-2018.

- **Test de tenue aux chocs de foudre**

Ces tests sont effectués selon la norme IEEE Std C37.09-2018, pour évaluer la capacité du disjoncteur à résister aux impulsions de foudre en onde pleine. Dans ces essais, des chocs de foudre positifs et négatifs d'amplitude spécifique, doivent être appliqués aux bornes du disjoncteur selon la norme ANSI C37.06-1997. Les essais sont considérés comme réussis si aucun claquage ne se produit. Si, au cours du premier groupe de 3 essais consécutifs appliqués, un contournement se produit lors d'un essai d'un groupe, un second groupe de 9 essais doit être réalisé. Si le disjoncteur réussit à supporter les 9 essais du deuxième groupe, les contournements du premier groupe sont considérés comme aléatoires et le disjoncteur est considéré comme ayant réussi le test.

- **Test de tenue à fréquence industrielle sous pluie et à sec**

Les tests de tenue à fréquence industrielle sous conditions humides sont effectués selon la norme IEEE C37.09-2018 uniquement sur des disjoncteurs destinés à être installés à l'extérieur. Il ne doit y avoir aucun contournement pendant les tests, et aucun dommage sur l'isolation ne doit être observé après les tests.

- **Test d'arc interne**

Les tests d'arc interne sont effectués selon la norme IEEE C37.20.7 pour évaluer la capacité du disjoncteur à résister aux défauts d'arc interne, requis pour garantir la sécurité et la fiabilité du disjoncteur en conditions réelles.

D'autres tests importants pour valider le bon fonctionnement du disjoncteur sont effectués, nous pouvons citer les tests de commutation de courant capacitif, les tests d'endurance mécanique, les tests de fonctionnement à basse température, les tests de surpression, les tests à pression zéro, les tests de commutation de courant de charge, les tests d'étanchéité.

4.2 Résultats expérimentaux

Dans cette partie, nous présentons quelques résultats des tests expérimentaux effectués par l'équipe d'ingénierie de CO7, dont certains sont effectués en collaboration avec l'équipe d'Energie Conseil Olivier Inc composée de Guy Olivier et Pierre LaRue. Ces tests sont exécutés pour évaluer différentes solutions alternatives, dans le but de remplacer totalement l'utilisation du gaz SF₆ dans les disjoncteurs moyenne tension VOX7 offerts par CO7.

4.2.1 Résultats expérimentaux du mélange gazeux N₂ et CO₂

L'installation se compose du disjoncteur à vide VOX, d'un système de traitement des données constitué d'un oscilloscope numérique Tektronix (TDS 3012C), d'un générateur de chocs de foudre et d'un module de commande central.



Figure 4.3 : Installation expérimentale pour les essais de chocs de foudre sur l'isolation des mélanges N_2 et CO_2 .

(Source : photo prise par Arianne Lemo au sein de CO7 Technologies)

L'essai consistait à effectuer des tests de chocs de foudre de 200 kV sur un disjoncteur à vide VOX. L'objectif des tests était de déterminer la pression minimale d'azote permettant un niveau de résistance interne de 200 kV. Le vide a été au préalable réalisé dans le disjoncteur VOX, ensuite s'en est suivi le remplissage du récipient VOX d'azote sec à une pression manométrique de 0,15 MPa. Et enfin la fermeture du disjoncteur à vide.

Des impulsions de 200 kV ont été appliquées, d'une durée de $1,2/50 \mu s$, ce qui produit 15 impulsions positives et 15 impulsions négatives à chaque phase, les deux

autres phases étant mises à la terre. Pendant le test, aucune correction de température, de pression atmosphérique et d'humidité n'a été appliquée.

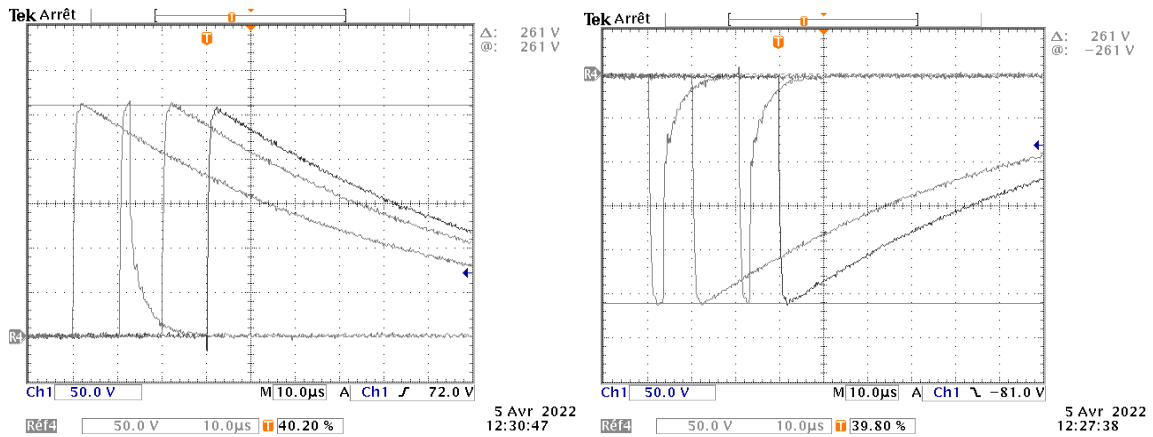


Figure 4.4 : Claquages observés lors des tests, pour les impulsions positives et négatives [130] (Document interne, © 2023 CO7 Technologies)

À la fin de l'essai, les conclusions suivantes ont été tirées :

- Selon les critères standard, le disjoncteur VOX rempli d'azote pur à une pression de 0,15 MPa a résisté avec succès à des impulsions standard de 200 kV.
- Cependant, il a été estimé qu'il n'y avait pas de marge significative et, à titre de suggestion, une pression légèrement supérieure devrait être utilisée, mais pas une pression inférieure.
- En revanche, le mélange N₂ et CO₂ a rencontré des claquages pour les mêmes conditions, amenant à la conclusion que le N₂ a donné de meilleurs résultats que le mélange.

4.2.2 Résultats expérimentaux du gaz N_2 pur

4.2.2.1 Test de tenue aux chocs de foudre :

Tableau 4.1 : Tenue aux chocs de foudre du gaz N_2 à 2,17 bar abs [112]

N ₂ à 2.17 bars abs			Tests aux chocs de foudre				
Etat du disjoncteur	Tension	Terre	Appliquée	Réussie	Polarité	Tension pic (kVp)	Résultats
Fermé	A, a	B, b, C, c, f	15	15	+	170	OK
			15	15	-	170	OK
	B, b	A, a, C, c, f	15	15	+	170	OK
			15	15	-	170	OK
	C, c	A, B, a, b, f	15	15	+	170	OK
			15	15	-	170	OK
Ouvert	A	a, B, b, C, c, f	15	15	+	170	OK
			15	15	-	170	OK
	B	A, a, b, C, c, f	15	15	+	170	OK
			15	15	-	170	OK
	C	A, a, B, b, c, f	15	15	+	170	OK
			15	15	-	170	OK
	a	A, B, b, C, c, f	15	15	+	170	OK
			15	15	-	170	OK
	b	A, a, B, C, c, f	15	15	+	170	OK
			15	15	-	170	OK
	c	A, a, B, b, C, f	15	15	+	170	OK
			15	15	-	170	OK

Tableau 4.2 : Tenue aux chocs de foudre du gaz N_2 à 2,5 bar abs [112]

N ₂ à 2,5 bars abs			Tests aux chocs de foudre				
Etat du disjoncteur	Tension	Terre	Appliquée	Réussie	Polarité	Tension pic (kVp)	Claquages
Fermé	A, a	B, C, b, c, f	15	15	+	200	0
			15	15	-	200	0
	B, b	A, C, a, c, f	15	13	+	200	2(+)
			15	14	-	200	1(-)
	C, c	A, B, a, b, f	15	13	+	200	2(+)
			15	13	-	200	2(-)

4.2.2.2 Test de tenue de tension à fréquence industrielle

Tableau 4.3 : Tenue à fréquence industrielle du gaz N_2 à 2 bar abs [112]

Position disjoncteur	Tension appliquée à	Terre appliquée à	Tension (kV)	Courant (mA)	Résultats
Fermé	A, a	B, b, C, c, F	50	5,6	OK
Fermé	A, a	B, b, C, c, F	60	6,8	OK
Fermé	A, a	B, b, C, c, F	70	7,9	OK
Fermé	A, a	B, b, C, c, F	80	-	Échec

Tableau 4.4 : Tenue à fréquence industrielle du gaz N_2 à 2,17 bar abs [112]

État du disjoncteur	Tension appliquée à	Terre appliquée à	Tension (kV)	Courant (mA)	Résultats
Fermé	A, a	B, b, C, c, F	70	7,9	OK
Fermé	A, a	B, b, C, c, F	80	9,1	OK

Tableau 4.5 : Tenue à fréquence industrielle du gaz N_2 à 3.5 bar abs[130]

Position of circuit breaker	Voltage	Ground	Applied voltage [kV-rms]	Measured current [mA]	Duration [s]	Results
Circuit breaker Open	1	2, 3, 4, 5, 6, f	80	6.3	60	Satisfactory
	2	1, 3, 4, 5, 6, f	80	6.4	60	Satisfactory
	3	1, 2, 4, 5, 6, f	80	6.4	60	Satisfactory
	4	1, 2, 3, 5, 6, f	80	6.7	60	Satisfactory
	5	1, 2, 3, 4, 6, f	80	6.3	60	Satisfactory
	6	1, 2, 3, 4, 5, f	80	6.4	60	Satisfactory
Circuit breaker Closed	1, 2	3, 4, 5, 6, f	80	9.5	60	Satisfactory
	3, 4	1, 2, 5, 6, f	80	9.7	60	Satisfactory
	5, 6	1, 2, 3, 4, f	80	9.5	60	Satisfactory

Les tests ont été effectués sur un système composé d'un disjoncteur VOX de tension nominale 38 kV, d'un générateur de chocs de foudre, d'un oscilloscope, d'un diviseur capacitif de rapport et d'un transformateur régulateur. Pour le test de tenue aux chocs de foudre, les pressions appliquées ont été augmentées au fur et à mesure jusqu'à obtenir une réussite à la pression 2,17 bar abs pour 15 séries d'impulsions de foudre à une tension de 170 kVp (Tableau 4.1). Aucun claquage n'a été enregistré. Cependant, les tests effectués pour une tension de 200 kVp ont enregistré plus de 3 claquages, conduisant à la conclusion portée sur l'augmentation de la pression. À la pression 2,5 bar abs, le nombre de claquages pour chaque polarité était inférieure ou égale à 2, le test a été considéré comme réussi selon la norme CEI 60060-1 2010 à une tension de 200 kVp. Les tests de tenue à fréquences industrielles ont montré un échec pour une

tension de 80 kV sous une pression de 2 bar abs, une réussite sous une pression de 2,17 bar abs, et également une totale réussite sous une pression de 3,5 bar abs.

4.2.3 Résultats expérimentaux du gaz SF₆

4.2.3.1 Test de tenue aux chocs de foudre :

Tableau 4.6 : Test de tenue aux chocs de foudre du gaz SF₆ [112]

SF ₆ à 1,5 bar abs			Tests d'impulsions de foudre				
Etat du disjoncteur	Tension	Terre	Appliquée	Réussie	Polarité	Tension pic (kVp)	Résultats
Fermé	A, a	B, b, C, c, f	3	3	+	200	OK
			3	3	-	200	OK
	B, b	A, a, C, c, f	3	3	+	200	OK
			3	3	-	200	OK
	C, c	A, B, a, b, f	3	3	+	200	OK
			3	3	-	200	OK
Ouvert	A	a, B, b, C, c, f	3	3	+	200	OK
			3	3	-	200	OK
	B	A, a, b, C, c, f	3	3	+	200	OK
			3	3	-	200	OK
	C	A, a, B, b, c, f	3	3	+	200	OK
			3	3	-	200	OK
	a	A, B, b, C, c, f	3	3	+	200	OK
			3	3	-	200	OK
	b	A, a, B, C, c, f	3	3	+	200	OK
			3	3	-	200	OK
	c	A, a, B, b, C, f	3	3	+	200	OK
			3	3	-	200	OK

4.2.3.2 Test de tenue de tension à fréquence industrielle

Tableau 4.7 : Tenue à la fréquence industrielle du gaz SF₆ [112]

État du disjoncteur	Tension appliquée à	Terre appliquée à	Courant (mA)	Résultats
Fermé	A, a	B, b, C, c, F	8,7	OK
	B, b	A, a, C, c, F	9,1	OK
	C, c	A, a, B, b, F	9,0	OK
	A, a, B, b, C, c	-	21,8	OK

Les résultats des tests pour le SF₆ sont présentés à titre de comparaison et montrent une réussite totale.

4.2.4 Analyse des résultats

Les comportements du SF₆ et du N₂ sont comparés dans cette analyse, dans la figure 4.5 ci-dessous, nous pouvons observer que les deux gaz évoluent de manière similaire. Les tests de tenue à fréquence industrielle nous permettent d'évaluer la résistance diélectrique des solutions isolantes gazeuses. Ces résultats montrent que la pression minimale du gaz N₂ permettant de réussir ces tests est de 2.5 bars absolus. Ainsi, nous concluons que la résistance diélectrique du gaz N₂ augmente avec la pression, ce qui pourrait offrir des résultats satisfaisants pour le remplacement du gaz SF₆ dans le disjoncteur VOX. De nombreux tests doivent encore être effectués pour valider cette alternative.

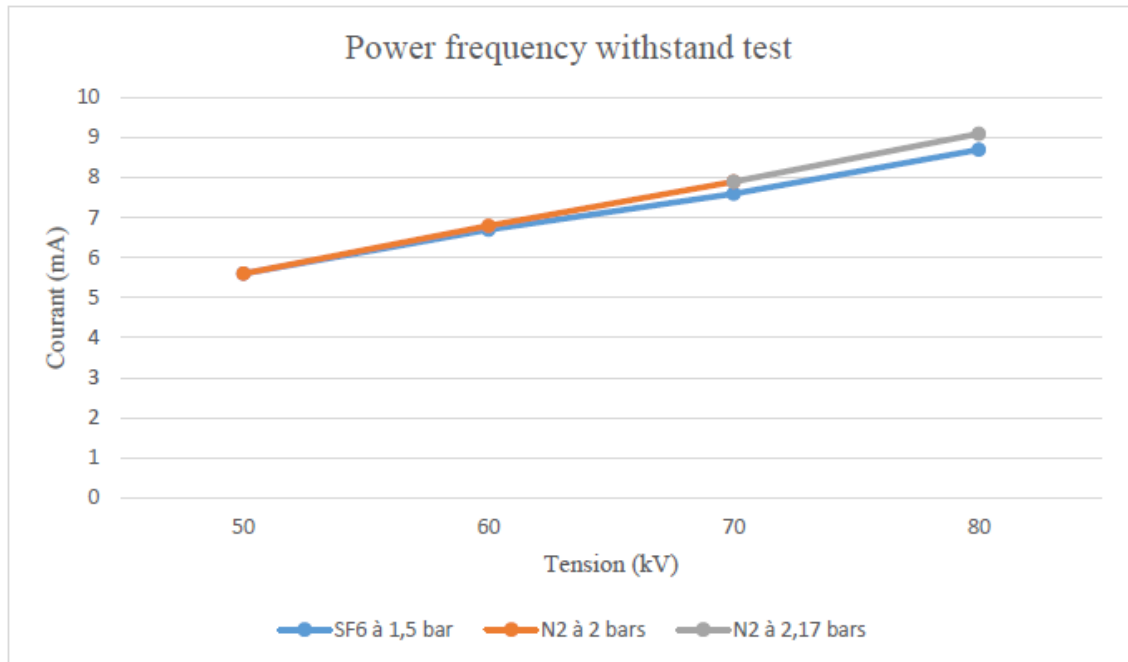


Figure 4.5 : Comparaison des résultats de tenue à fréquence industrielle - N_2 et SF_6 [112] (par Mactar Thiam)

Au regard de ces résultats, nous pouvons dire que le remplacement du gaz SF_6 dans les disjoncteurs moyenne tension VOX chez CO7 est sur la bonne voie. Nous proposons dans cette thèse une solution qui permettra d'évaluer numériquement la rigidité diélectrique d'une solution gazeuse représentant un gaz ou un mélange de gaz. Alors, c'est un volet intéressant, car la méthode proposée pourra fournir un argument technique pertinent, permettant à CO7 de valider la solution adoptée pour le remplacement du gaz SF_6 . Il s'agira de la preuve numérique qui confirmera les résultats expérimentaux effectués sur le disjoncteur rempli de gaz N_2 .

4.3 Modélisation mathématique

La modélisation mathématique nous permet de traduire les procédés et phénomènes physiques impliqués dans le bon fonctionnement d'un disjoncteur moyenne tension isolé au gaz, en équations mathématiques qui seront implémentées dans le logiciel à des fins de simulation. Il s'agit des phénomènes tels que, l'augmentation de la température, le transfert de chaleur, le claquage électrique, la formation de l'arc, l'ionisation du milieu isolant, l'interaction arc/matériaux.

4.3.1 Les modèles utilisés pour estimer les propriétés des mélanges gazeux

- **Le modèle de Townsend-Boyle : Rigidité diélectrique**

$$E_{mix} = E_0 * P_{mix} / (a + b * P_{mix} * d)$$

Où E_{mix} est la rigidité diélectrique du mélange de gaz (V/m), E_0 est la rigidité diélectrique du gaz à la pression atmosphérique (V/m), P_{mix} est la pression du mélange de gaz (Pa), a et b sont des coefficients empiriques déterminés expérimentalement pour chaque gaz, d est la distance entre les électrodes (m)

- **Le modèle de Bruggeman : Constante diélectrique**

$$\sum (f_i * (\varepsilon_i - \varepsilon_{mix}) / (\varepsilon_i + 2 * \varepsilon_{mix})) = 0$$

Où ε_i est la constante diélectrique du gaz i, et f_i est la fraction volumique du gaz i dans le mélange.

- **La loi des mélanges linéaires : Facteur de dissipation**

$$\tan(\delta_{mix}) = \sum (f_i * \tan(\delta_i))$$

Où $\tan(\delta_{mix})$ est le facteur de dissipation du mélange de gaz, f_i est la fraction volumique du gaz i dans le mélange et $\tan(\delta_i)$ est le facteur de dissipation du gaz i

- **Approche basée sur l'additivité : Toxicité et impact environnemental**

$$Impact_{total} = \sum (F_i * Impact_i)$$

Où $Impact_{total}$ représente la toxicité ou l'impact environnemental estimé du mélange gazeux, F_i est la fraction (volumique ou massique) du gaz i dans le mélange, et $Impact_i$ est la toxicité ou l'impact environnemental du gaz i .

- **Le modèle de magnétohydrodynamique (MHD) : Résistance à l'arc électrique**

Les équations de base peuvent alors s'écrire comme suit

- **Équation de conservation de la masse pour chaque espèce de gaz i**

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_i * u) = 0$$

Où ρ_i est la densité du gaz i et u est la vitesse du fluide.

- **Équation de conservation de la quantité de mouvement (équations de Navier-Stokes avec force de Lorentz):**

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + J \times B$$

Où ρ est la densité totale, p est la pression, μ est la viscosité dynamique, J est la densité de courant électrique et B est le champ magnétique.

Où τ est la contrainte due aux forces de viscosité, et F la force de Laplace. I est la matrice unitaire.

- **Équation de conservation de l'énergie**

$$\rho_i C_{(p,i)} \left(\frac{\partial T_i}{\partial t} + u \cdot \nabla T_i \right) = \nabla \cdot (k_i \nabla T_i) + Q_i$$

Où ρ_i est la densité du gaz i , $C_{(p,i)}$ est la capacité thermique à pression constante du gaz i , T_i est la température du gaz i , k_i est la conductivité thermique du gaz i et Q_i est la source de chaleur pour le gaz i .

- **Équations de transport pour les espèces chargées:**

$$\left(\frac{\partial n_i}{\partial t} + \nabla \cdot (n_i u_i) \right) = S_i$$

Où n_i est la densité des espèces chargées i , u_i est la vitesse de l'espèce i et S_i est la source ou le puits des espèces i .

- **Équations de Maxwell pour le champ magnétique:**

$$\nabla \times E = \frac{-\partial B}{\partial t} \quad \nabla \times B = \mu_0 J$$

Où E est le champ électrique, μ_0 est la perméabilité magnétique du vide et J est la densité de courant électrique.

- **Équations de transport pour les propriétés électriques, telles que la conductivité électrique σ :**

$$J = \sigma * E + u \times B$$

Où σ est la conductivité électrique du mélange gazeux

- **Équations d'état :**

$$P = \rho * R * T$$

Où R est la constante spécifique du gaz et T est la température, ρ la densité et P la pression.

4.3.2 Tension disruptive dans les gaz

La rigidité diélectrique est la valeur maximum du champ auquel peut être soumis un milieu isolant sans formation d'une décharge électrique entraînant son claquage, c'est un facteur important pour qualifier un matériau isolant. Le calcul purement théorique de la

rigidité diélectrique est complexe, et se fait généralement par des essais expérimentaux et selon des procédures définies de façon à garantir la précision des résultats.

A l'origine du phénomène de claquage électronique dans les gaz, chaque gaz présente des électrons de conduction pouvant être accélérés pour atteindre l'énergie d'ionisation satisfaisante au phénomène d'avalanche qui est à l'origine de sa dégradation, sous l'augmentation de la tension, elle peut provoquer une conduction à l'intérieur du gaz, et un échauffement important peut conduire au claquage des gaz [6].

La tension de claquage dans un gaz est décrite par la loi de Paschen :

$$V_{breakdown} = \frac{Bpd}{\ln A - \ln \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) + \ln(pd)}$$

Où $V_{breakdown}$ est la tension continue de claquage, A est la constante du gaz individuel utilisé, représentant son efficacité à empêcher la formation d'un arc, B est la constante de proportionnalité du gaz individuel, influençant la tension de claquage, p est la pression du gaz en pascals et d est la distance entre les électrodes en mètres, γ est un paramètre représentant le coefficient d'émission secondaire des électrons (coefficient de Townsend).

4.3.3 Cas pratique : Calcul des pertes de gaz en fonction du temps

Pour clôturer cette partie concernant les calculs mathématiques, nous présentons ici un travail qui nous a été demandé au cours des recherches : calculer le taux de fuite de gaz

dans une traversée. L'observation a été faite sur une durée de plusieurs semaines afin d'obtenir ces résultats.

4.3.3.1 Proportion de perte de gaz en fonction de la pression

Selon la loi sur le gaz idéal, nous avons la formule donnée dans [42] suivante :

$$PV = nRT \quad (4.1)$$

Où P est la pression (Pascal), V est le volume (en Litres), n est la quantité (en moles), T est la température (en Kelvin), et R est la constante des gaz. Cette formule peut être écrite sous la forme :

$$\frac{PV}{nT} = R \quad (4.2)$$

R étant une constante, on peut en conclure que :

$$\frac{P_1 V_1}{n_1 T_1} = \frac{P_2 V_2}{n_2 T_2} \quad (4.3)$$

Selon la loi de Boyle-Mariotte, qui stipule que, à température T et à quantité de matière n constantes, nous avons :

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \text{ ou } \frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1}$$

À température T et à Volume V constants, nous avons :

$$\frac{P_1}{n_1} = \frac{P_2}{n_2} \quad (4.4)$$

$$n_2 = \frac{P_2}{P_1} n_1 \quad (4.5)$$

La formule 4.5 nous permet de conclure que plus la pression de gaz diminue dans un volume constant, plus la quantité de gaz diminue également.

A. Débit de fuite de gaz

Le débit de fuite de gaz est fonction du produit du volume multiplié par la pression du gaz ($V \times P$) divisé par le temps (t). Si le volume de gaz est constant, cela signifie que plus la pression diminue, plus le débit de fuite diminue également.

B. Quantité de gaz perdu (en kilogramme)

On commence par calculer le volume occupé par le gaz dans la traversée.

a. Schéma technique de la traversée

Le volume occupé par le gaz est défini en fonction de chaque section : il faudra calculer le volume de la section A (section principale), soustraire les sections hachurées (silicone et tige du milieu) et ajouter la section qui a été soudée pour augmenter le volume de l'enceinte du réservoir (section B).

Dans ce cas, le volume V_{gaz} occupé par le gaz est :

$$V_{\text{gaz}} = V_A + V_B - V_{\text{hach}}$$

Le volume est donné par la formule (volume du cylindre) :

$$V_A = r_A^2 \times \pi \times h_A$$

Avec $r_A = 0,135/2 = 0,0675$ m et $h_A = 0,1836$ m

$$V_A = 0,0675^2 \times \pi \times 0,1836$$

$$V_A = 2,628 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

- V_{hach} est déterminé à partir du schéma ci-dessous :

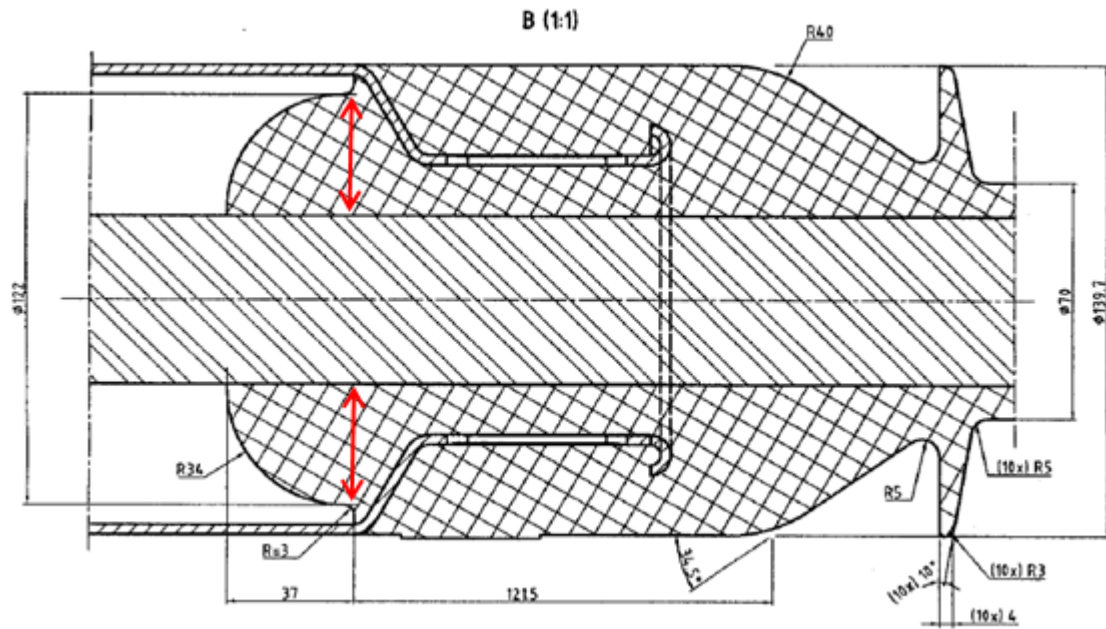


Figure 4.8 : Dimensions précises de la coupe d'une traversée vue de l'intérieur
[130] (Document interne, © 2023 CO7 Technologies)

$$V_{hach} = V_{hach1} + V_{hach2}$$

Ou V_{hach1} est la partie hachurée qui représente le silicone (les parties sphériques), et V_{hach2} est la partie hachurée qui représente la tige du milieu.

- V_{hach1} est déterminé par la formule du volume des sphères.

$$V_{hach1} = \frac{2\pi}{3} r_{hach1}^3$$

$$r_{hach1} = (0,122 - 0,05)/2 = 0,034 \text{ m}$$

$$V_{hach1} = \frac{2\pi}{3} 0,034^3$$

$$V_{hach1} = 8,231 \times 10^{-5} m^3$$

- V_{hach2} est déterminé par la formule des cylindres

$$V_{hach2} = r_{hach2}^2 \times \pi \times h_{hach2}$$

$$V_{hach2} = (0,05/2)^2 \times \pi \times 0,240$$

$$V_{hach2} = 4,712 \times 10^{-4} m^3$$

- Le volume total de la section occupée par le silicone et le cuivre est :

$$V_{hach} = V_{hach1} + V_{hach2}$$

$$V_{hach} = 8,231 \times 10^{-5} m^3 + 4,712 \times 10^{-4} m^3$$

$$V_{hach} = 5,535 \times 10^{-4} m^3$$

- Ci-dessous le schéma de la section secondaire soudée sur la section principale (la section B), V_B est déterminé à partir de la formule suivante :

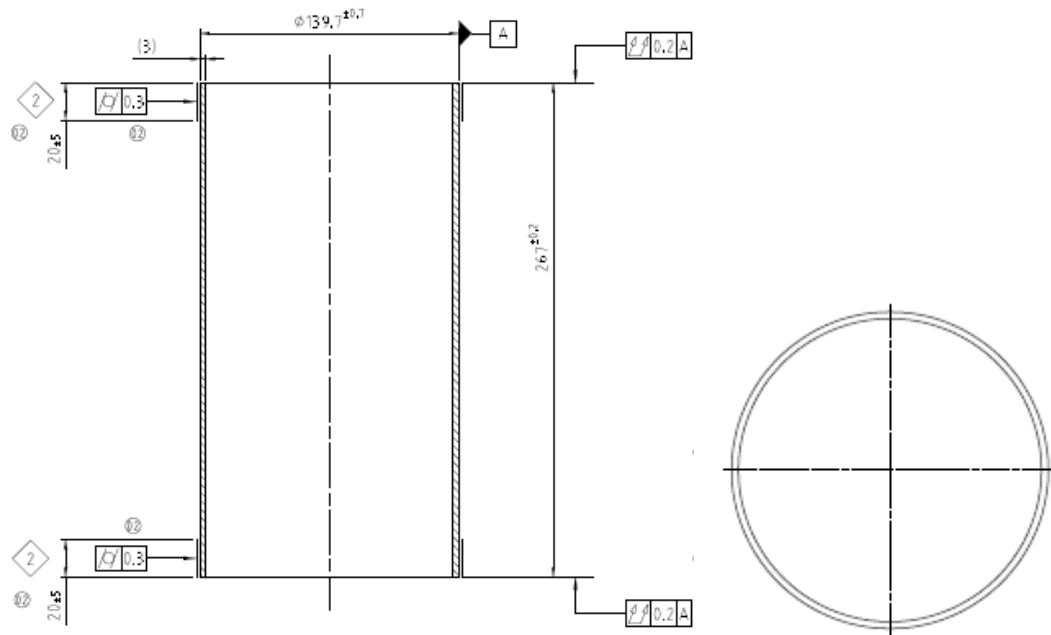


Figure 4.9 : Dimensions du cylindre de la traversée [130] (Document interne, © 2023 CO7 Technologies)

Le volume est donné par la formule (volume du cylindre) :

$$V_B = r_B^2 \times \pi \times h_B$$

Avec $r_B = (0,1397 - (0,003 \times 2)) / 2 = 0,06685\text{m}$ et $h_B = 0,267\text{m}$

$$V_B = 0,06685^2 \times \pi \times 0,267$$

$$V_B = 3,748 \times 10^{-3}\text{m}^3$$

c. Calcul du volume du gaz

Le volume de l'espace occupé par le gaz est déduit de la formule :

$$V_{gaz} = V_A + V_B - V_{hach}$$

$$V_{gaz} = 2,628 \times 10^{-3} + 3,748 \times 10^{-3} - 5,535 \times 10^{-4}$$

$$V_{gaz} = 5.823 \times 10^{-3} m^3$$

C. Quantité de gaz contenu dans la traversée

a. Calcul de la masse de gaz initiale contenue dans la traversée sous une pression de 2,35 bar

A partir de l'équation (1), nous pouvons déterminer la quantité de gaz en mol (n_{gaz}) initialement contenu dans l'enceinte de la traversée en fonction du volume (V_{gaz} en m^3), de la température (T approximée à 25 °C équivalant à 298,15 K) et de la pression (P de départ 2,35 bar équivalant à 235000 Pa), la constante de gaz parfait R est 8,314 $mol^{-1} \cdot K^{-1}$.

$$PV = nRT$$

$$n_{gaz} = \frac{PV_{gaz}}{RT}$$

$$n_{gaz} = \frac{235\,000 \times 5.823 \times 10^{-3}}{8,314 \times 298,15}$$

$$n_{gaz} = 5,52 \times 10^{-1} mol$$

Calcul de la quantité de SF_6 contenu dans la traversée pour la température et pression initiale ci-dessus :

$$n_{gaz} = \frac{m_{SF_6}}{M_{SF_6}}$$

$$m_{SF_6} = n_{gaz} \times M_{SF_6}$$

m_{SF_6} est la masse en kilogramme de gaz SF_6 déduite et M_{SF_6} est la masse molaire du gaz SF_6 ($146,055 \text{ g.mol}^{-1}$)

$$m_{SF_6} = n_{gaz} \times M_{SF_6}$$

$$m_{SF_6} = 5,52 \times 10^{-1} \times 146,055$$

$$m_{SF_6} = 80,622 \text{ g}$$

b. Calcul de la quantité de gaz perdue sur la durée

Selon l'équation (5), nous pouvons déduire la quantité de gaz restant dans la traversée à une pression de 2,29 bars (229000 Pa, la pression mesurée après une durée de 4 mois) pour une température constante et un volume constant :

$$n_2 = \frac{P_2}{P_1} n_1$$

Où P_1 est la pression initiale, au début du test et P_2 est la pression relevée après une durée de 4 mois.

$$n_2 = \frac{229000 \times 80,622}{235000}$$

$$n_2 = 78,563 \text{ g}$$

La quantité de gaz perdu est alors :

$$n_{lost} = n_1 - n_2$$

$$n_{lost} = 80,622 - 78,563$$

$$n_{lost} = 2,058 \text{ g}$$

c. Proportions de perte de gaz

D'après ce qui précède, nous avons 2,058 g de perte de gaz SF₆ pendant les 4 mois de test, nous estimons alors la perte par mois à 0,51g. on peut déduire les proportions de pertes de gaz ainsi :

$$Pertes = \frac{0,51}{80,622} = 0,63\%$$

Nous avons 0,63% de perte par mois.

4.4 Modélisation géométrique

A cette étape de notre étude, nous définissons la géométrie des différents composants de notre projet ; il s'agit de la phase de conception et de schématisation dont le but est de reproduire numériquement l'ensemble d'éléments constituant le modèle numérique de notre entité physique. L'idée est de respecter au maximum les paramètres géométriques du système physique tout en élaborant le maillage approprié. Un maillage adéquat est idéalement requis pour la simulation industrielle, si le maillage généré est de mauvaise qualité, la convergence entre le modèle numérique et le modèle physique sera compromise ou conduira à des résultats physiquement inexacts [68].

L'un des enjeux importants de la modélisation est la simulation multiphysique, c'est-à-dire l'interaction des différents phénomènes physiques, tels que l'électromagnétisme, la thermodynamique, la dynamique des fluides et la mécanique dans un disjoncteur [81].

La complexité et la délicatesse de la conception des disjoncteurs moyenne tension réside dans la numérisation des phénomènes tels que les écoulements des fluides à températures et pressions variées, états stationnaires ou non-stationnaires, les champs magnétiques, électriques, et radiatifs très élevés, les phénomènes de claquage de tension ou les explosions; conséquences essentielles de la formation de l'arc électrique lorsqu'un défaut de courant survient sur le réseau, déclenchant ainsi l'ouverture de contacts [81].

Pour passer l'étape de réduction de notre système physique (disjoncteur VOX 38kV) en un modèle géométrique, deux cas s'offrent à nous :

- Premier cas : nous utilisons le modèle déjà créé par CO7 à partir d'un logiciel de design et trouvons le moyen d'importer ce modèle vers notre logiciel multiphysique COMSOL, afin d'y effectuer l'étude et les simulations.
- Second cas : nous créons à partir d'un logiciel de design, le modèle géométrique du disjoncteur en utilisant des objets géométriques de base.

4.4.1 Cas d'importation du modèle dans le logiciel multiphysique

Il s'agit ici de trouver le format de fichier adéquat pour l'importation du modèle du disjoncteur dans le logiciel COMSOL. Pour ce cas, nous avons les types de fichiers 3MF

(3D), DXF (2D), PLY (3D), VRML (3D) et STL (3D) qui sont disponibles pour l'importation avec COMSOL Multiphysics et ne nécessitent aucun produit complémentaire.

Nous nous concentrons sur le format de fichier STL, car non seulement il est compatible aux modèles 3D, mais aussi il permet la lecture et l'écriture. Ci-dessous l'exemple du réservoir du disjoncteur importé dans COMSOL via le fichier STL.

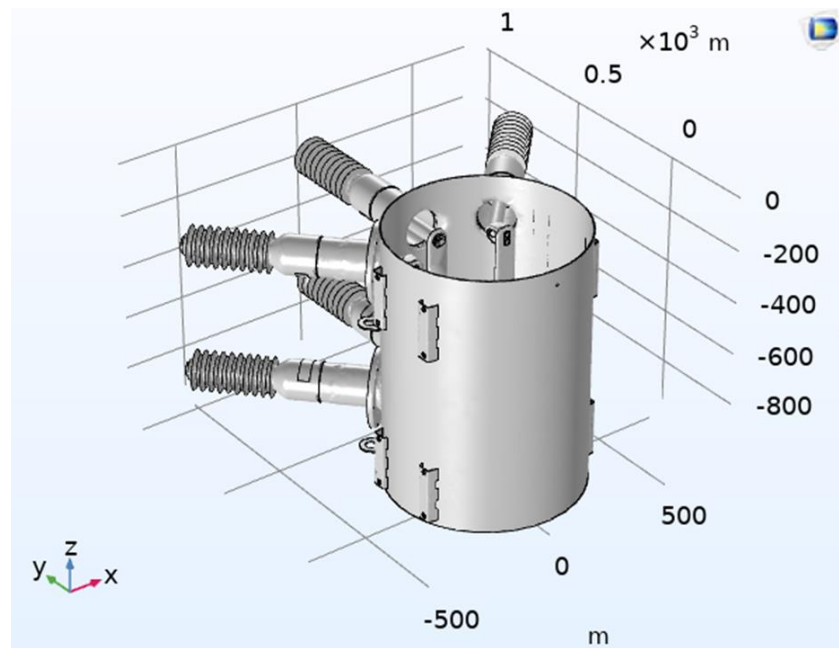


Figure 4.10 : Schéma 3D du réservoir du disjoncteur importé dans COMSOL
(Source : figure construite par l'équipe CO7)

4.4.2 Cas de conception du dessin CAO

Pour dimensionner le produit, les équations du problème doivent être définies selon la démarche suivante : d'abord, considérer une analyse mécanique classique des solides

non déformables, permettant de déterminer la solidité maximale applicable aux parois du disjoncteur. Ensuite, effectuer un calcul classique de résistance des matériaux en vue d'identifier les contraintes et déformations correspondantes aux différents efforts.

De manière généralisée, la modélisation géométrique doit suivre un certain nombre de normes de dessin numérique définies selon les éléments pris en compte : la mécanique, l'électricité, la mécanique des fluides, la thermodynamique.

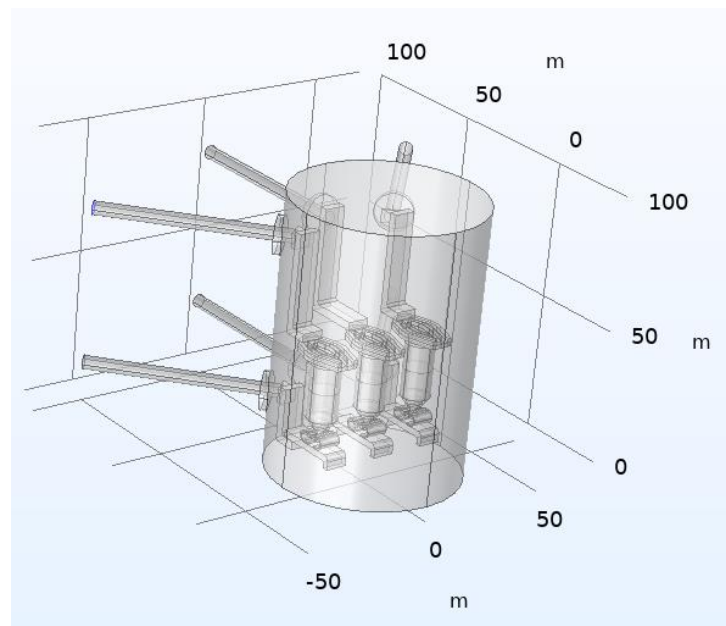


Figure 4.11 : Schéma 3D du réservoir du disjoncteur conçu dans COMSOL

(Source : figure construite par Mactar Thiam)

4.5 Modélisation et simulation numérique

La modélisation et la simulation numérique des phénomènes multi-physiques sont devenues des éléments importants de la conception d'un système physique et sont

indissociables du développement de produits, en offrant la possibilité d'effectuer la conception ou l'exploration de nombreuses hypothèses. En effet, les aspects concernant : la physique, la modélisation géométrique, les méthodes numériques, et le calcul haute-performance sont étroitement liés. Les essais expérimentaux seuls ne suffisent plus, au regard des contraintes de délai et des réalités économiques du marché. Selon Pernaudat, G. (2017), pendant la fabrication des équipements électriques, la contrainte de temps de calcul est une difficulté notable car le processus peut se prolonger sur une longue période, d'où la nécessité d'adopter la méthode évoluée : la modélisation et de la simulation des disjoncteurs haute-tension pour accélérer les opérations [132]. De plus, la simulation renforce la confiance dans la configuration choisie et garantit une solution optimale.

4.5.1 Modélisation d'un mélange gazeux et estimation des propriétés du mélange

Plusieurs interrogations ont été soulevées à la suite de la décision de CO7 technologies d'adopter un gaz ou un mélange de gaz vert comme alternative au SF₆ dans la fabrication de leurs disjoncteurs. Les points retenus sont les suivants :

- Pour le niveau de pression standard appliqué actuellement, c'est-à-dire des pressions allant jusqu'à environ 3 bars absolus maximum, comment prouver scientifiquement qu'un gaz pur est meilleur qu'un autre ?
- Quel est le comportement d'un gaz sélectionné lorsque le niveau de chaleur dans le réservoir est normal et quelle est la capacité thermique du gaz étudié

? Pour le cas du SF₆ par exemple, il a la capacité de transférer l'énergie thermique sur le réservoir.

- Quel est le comportement du gaz lorsque la pression augmente?
- Comment appréhender ou anticiper la réaction du gaz en situation réelle ?

4.5.1.1 Objectif ciblé

L'objectif est de concevoir un algorithme nous permettant de simuler le comportement d'un mélange gazeux, en tenant compte au préalable des conditions de fonctionnement des disjoncteurs VOX, en appliquant les mêmes niveaux de pression et de température, les mêmes plages de tensions applicables. Cet algorithme nous permettra dans un premier temps de vérifier la capacité d'un mélange gazeux avant de le tester en production, des simulations pourrons par la suite être exécutées sur le modèle numérique fonctionnel conçu dans le logiciel COMSOL, afin d'estimer plusieurs autres possibilités d'usage d'un mélange de gaz purs comme alternative au gaz SF₆ dans le disjoncteur à vide moyenne tension de type VOX, en se basant sur les propriétés intrinsèques du dit gaz. Ce travail fourni une base non négligeable pour soulager l'équipe des tests coûteux en temps, en énergie et argent.

Les paramètres qui nous intéressent pour un mélange de gaz sont :

- La permittivité diélectrique : une propriété physique qui décrira la réponse du milieu gazeux donné au champ électrique appliqué.

- La rigidité diélectrique, la tension de claquage, l'une des caractéristiques principales dans un milieu isolant.
- Perméabilité, dépendant de la nature du gaz, du niveau de pression moyen d'écoulement et des caractéristiques chimiques et physiques du mélange gazeux.
- Conductivité thermique, qui croît avec la température.

4.5.1.2 Première hypothèse de création

L'objectif au départ était de créer un algorithme capable d'avoir une intelligence artificielle qui ira chercher dans une base de données fournie, différents types de gaz et leurs propriétés selon un principe de sélection bien défini et effectuer les calculs automatiquement. D'où l'importance d'identifier et de répertorier tous les gaz pertinents pour notre recherche, ensuite de créer une bibliothèque afin de stocker toutes les propriétés prédéfinies intervenant lors des calculs, ces propriétés serviront de paramètres d'entrée de notre programme.

Avant d'appliquer cette hypothèse, il est nécessaire d'étudier l'avantage quantique et les points essentiels qui pourront être optimisés grâce à l'utilisation de l'informatique quantique pour estimer les paramètres des mélanges gazeux.

4.6 L'approche quantique

4.6.1 Avantages de l'approche quantique

Le but de la recherche dans le domaine quantique est de proposer au monde des solutions innovantes là où les systèmes classiques se sont montrés défaillants, ou alors d'élaborer des stratégies permettant d'approfondir l'optimisation des résultats là où ils se sont montrés limités.

Parmi les avantages que nous offrent les systèmes quantiques, nous pouvons citer :

4.6.1.1 L'accélération des calculs

Les algorithmes quantiques ont la capacité de résoudre certains problèmes plus rapidement que leurs homologues classiques. Exemple : l'algorithme de Shor.

4.6.1.2 L'optimisation globale

Contrairement aux algorithmes classiques, qui se bloquent dans des minimums locaux, les algorithmes quantiques sont capables grâce aux propriétés telles que l'intrication et la superposition, de rechercher plusieurs réponses simultanément et de naviguer dans un plus grand espace de solutions de manière plus efficace. Exemple : l'algorithme QAOA.

4.6.1.3 La sécurité

Grâce à l'algorithme de Shor, capable de briser les protocoles de cryptographie tels que RSA, l'approche quantique permet de mettre en évidence les failles dans les systèmes de sécurité et de promouvoir ainsi le développement des alternatives quantiques plus sécuritaires pour la protection des systèmes de communication.

4.6.2 Cas du calcul des propriétés de mélanges

Dans le contexte de l'optimisation du calcul des propriétés d'un mélange gazeux pour remplacer le SF₆ dans les disjoncteurs à moyenne tension, l'utilisation de la programmation quantique pourrait être particulièrement bénéfique pour les propriétés complexes qui nécessitent des calculs intensifs ou qui sont sensibles aux détails microscopiques des interactions moléculaires. À la question posée à ChatGPT : « *Parmi les propriétés de mélanges gazeux suivantes : la rigidité diélectrique, la permittivité, le facteur de dissipation, la toxicité, l'impact environnemental, la résistance à l'arc, stabilité thermique, stabilité chimique, quelles sont celles qui peuvent bénéficier d'un avantage quantique dans la méthode de calcul des propriétés d'un mélange gazeux, sur le calcul classique ?* » la réponse figurant à l'Annexe 2.2 nous mène à la conclusion que sur la liste fournie, les trois propriétés qui pourraient le plus bénéficier de l'approche quantique seraient :

- Stabilité chimique : La stabilité chimique d'un mélange gazeux est directement liée à la structure électronique et aux réactions potentielles entre les molécules du

mélange. Les calculs quantiques, qui peuvent modéliser avec précision les états électroniques et les potentiels de réaction, offrent une approche prometteuse pour évaluer et prédire la stabilité chimique de nouveaux mélanges gazeux.

- Stabilité thermique : La stabilité thermique implique la compréhension de la manière dont un mélange gazeux réagit à des températures élevées, ce qui peut nécessiter une analyse détaillée des voies de décomposition thermique et des barrières énergétiques. L'informatique quantique permet d'effectuer des calculs chimiques quantiques précis sur les énergies de réaction et les états de transition, ce qui pourrait aider à évaluer plus précisément la stabilité thermique des substituts au SF₆.
- La permittivité : elle dépend de la polarisation d'un matériau sous l'effet d'un champ électrique et par conséquent des interactions complexes entre les électrons et les molécules du mélange. Elle peut donc également bénéficier du calcul quantique pour estimer la valeur de la permittivité d'un mélange gazeux.
- Rigidité diélectrique : plus complexe à estimer, elle est généralement liée à la permittivité relative et à d'autres propriétés physiques du gaz.

En effet, nous constatons que ces propriétés impliquent une compréhension plus approfondie des interactions moléculaires et des réactions chimiques potentielles qui peuvent être mieux abordées avec les méthodes quantiques, bénéficiant ainsi de la puissance de calcul des ordinateurs quantiques.

Les autres propriétés listées telles que la permittivité, le facteur de dissipation, la toxicité, l'impact environnemental, la résistance à l'arc, et leurs valeurs peuvent également être calculées avec des méthodes classiques ou à l'aide de simulations numériques avancées. La décision d'utiliser l'informatique classique ou quantique pour ces propriétés dépendra des ressources disponibles, de la précision requise et de la complexité des calculs.

Cependant, pour ne pas nous engager dans une étude profonde de la chimie et des propriétés moléculaires complexes, nous choisissons de nous concentrer dans ce projet de recherche sur le calcul de la rigidité diélectrique d'un mélange gazeux, la méthode proposée pourrait subir une extension pour s'adapter aux autres propriétés

4.7 Choix de l'algorithme quantique approprié

Pour le problème spécifique de l'identification du meilleur mélange gazeux pour remplacer le SF₆, le type d'algorithmes quantiques qui pourrait être particulièrement approprié est un algorithme d'optimisation combinatoire. En utilisant l'algorithme QAOA, nous pouvons optimiser la rigidité diélectrique d'un mélange de gaz en formulant le problème comme une optimisation quadratique binaire. Cette approche permet d'explorer différentes combinaisons pour trouver celle qui maximise la rigidité diélectrique, tout en respectant les contraintes de mélange:

4.7.1 L'Algorithme QAOA

Nous nous intéressons particulièrement dans ces travaux de recherche à l'algorithme QAOA, un algorithme de type variationnel quantique, pour sa capacité à résoudre les problèmes d'optimisation combinatoire de manière plus efficace, en associant l'utilisation des ressources classiques et quantiques. En effet, QAOA est un algorithme hybride, qui associe l'utilisation des ressources classiques pour résoudre les problèmes de bruits rencontrés par les ordinateurs quantiques actuels, et exploite les avantages des principes fondamentaux de l'informatique quantique [36]. L'évaluation de la fonction coût se fait à l'aide des ressources quantiques et elle est ensuite optimisée à l'aide des ressources classiques [51]. Il utilise un système quantique pour transformer un problème, permettant ainsi d'explorer plusieurs solutions simultanément.

4.7.1.1 Expression mathématique de QAOA

QAOA s'appuie sur les concepts de superposition d'états et les évolutions unitaires pour effectuer une optimisation, de ce fait, l'algorithme repose sur deux opérateurs unitaires pour analyser un état quantique [67]:

- L'opérateur de phase : ajuste la phase de chaque qubit pour refléter la fonction coût que nous voulons minimiser. Il transforme l'objectif du problème à optimiser et correspond à une fonction coût classique. Il s'agit de l'hamiltonien H_C

- L'opérateur de mélange : permet au système d'examiner différentes configurations possibles en mélangeant les états des qubits, pour guider le système quantique dans la recherche vers un espace de solutions optimum. Il est associé à l'hamiltonien H_M .

QAOA représente premièrement un problème donné sous la forme d'une fonction, une somme pondérée des termes liés à chaque qubit z_i du système : $H_C = \sum_i w_i z_i$ où, w_i sont les poids associés à des variables binaires z_i , et z_i sont des variables correspondant à des qubits. Ensuite, la deuxième opération consiste à perturber l'état du système pour l'examiner dans un espace de solutions possibles : $H_M = \sum_i X_i$ Où X_i est la matrice de Pauli-X appliquée au qubit i . Cette matrice inverse l'état du qubit, et favorise l'exploration de différents états de qubits. Dans QAOA un hamiltonien représente une « fonction objectif » ou fonction coût [67].

4.7.1.2 Les évolutions unitaires

L'objectif est de préparer un état quantique initial, puis de l'évoluer en alternant les deux opérateurs unitaires associés aux hamiltoniens H_C et H_M pour explorer l'espace de solutions. L'évolution unitaire exécutée est par des opérateurs exponentiels.

- L'évolution unitaire associée à l'hamiltonien H_C est représentée sous la forme : $U_C(\gamma) = e^{-i\gamma H_C}$ où γ est un paramètre d'ajustement.

- L'évolution unitaire associée à l'hamiltonien H_M est représentée sous la forme : $U_M(\beta) = e^{-i\beta H_M}$ Où β est également un paramètre d'ajustement.

L'algorithme QAOA alterne ces deux opérations pour optimiser l'état de la solution en ajustant les paramètres γ et β .

4.7.1.3 Explication détaillée

Ces deux évolutions unitaires sont appliquées successivement pendant un certain nombre d'itérations p , appelées niveaux de profondeur du QAOA [30] [29].

- On applique $U_C(\gamma)$ pour influencer l'état quantique vers des solutions qui minimisent la fonction coût. Par exemple, pour chaque qubit i , si l'hamiltonien de coût est une somme de termes quadratiques comme $Z_i Z_j$, où Z est l'opérateur de Pauli-Z qui mesure l'état du qubit, l'opérateur de phase fait évoluer la phase des états en fonction du coût associé à chaque configuration binaire [36].
- Ensuite on applique $U_M(\beta)$ pour mélanger les différents états et explorer l'espace de solutions.

À chaque niveau p , les paramètres γ et β sont ajustés pour minimiser l'espérance de la fonction coût.

4.7.1.4 État final

À la fin du processus d'optimisation, les qubits sont mesurés pour obtenir la configuration binaire qui matérialise la solution optimale du problème. La fonction coût à minimiser devient : $\langle H_C \rangle = \langle \psi(\gamma, \beta) | H_C | \psi(\gamma, \beta) \rangle$, où $|\psi(\gamma, \beta)\rangle$ est l'état quantique résultant, mesuré après p itérations. Cette expression renseigne sur la valeur moyenne de l'hamiltonien de coût dans son état final [1].

L'évolution complète de l'état dans QAOA peut être représentée sous la forme de l'équation : $|\psi(\gamma, \beta)\rangle = U_M(\beta_p)U_C(\gamma_p) \cdots U_M(\beta_1)U_C(\gamma_1)|\psi_0\rangle$, où $|\psi_0\rangle$ est l'état initial qui renvoie à une superposition de tous les états de base.

4.8 Définition des Critères de sélection des gaz

- **Propriétés électriques :**

La rigidité diélectrique, la distance d'arc, temps de coupure.

- **Propriétés physiques et chimiques :**

Le point d'ébullition et de condensation, masse molaire, stabilité chimique : le gaz ne doit pas réagir chimiquement avec d'autres composants du disjoncteur.

- **Propriétés environnementales :**

Le gaz devrait avoir un PRG inférieur à celui du SF6 et une bonne biodégradabilité pour garantir qu'il ne sera pas nocif en fin de vie.

- **Conformité réglementaire et compatibilité matérielle :**

Le gaz doit respecter toutes les réglementations environnementales en vigueur et être compatible avec les matériaux présents dans les disjoncteurs, sans causer de corrosion ou d'autres dommages. De plus, il ne doit être ni toxique pour les humains et les animaux, ni inflammable.

Les gaz non fluorés susceptibles de respecter les critères de sélection pour notre étude ont été identifiés et sélectionnés ci-après : CO₂, N₂, Air, He, Ar.

Chapitre 5 - IMPLÉMENTATION DE LA MÉTHODE D'OPTIMISATION

La rigidité diélectrique est un paramètre fondamental qu'il est essentiel de connaître lorsque nous nous engageons dans la quête d'un isolant gazeux alternatif au SF₆. Pour un gaz ou mélange de gaz donné, sa valeur dans les normes garantie la sécurité et l'efficacité des disjoncteurs moyennes tensions, car elle illustre la capacité du gaz à résister aux décharges électriques. Maîtriser ce paramètre pour tout potentiel substitut gazeux, revient à prévenir les courts-circuits et les arcs électriques susceptibles d'entraîner d'énormes défaillances dans le fonctionnement du disjoncteur ou de l'endommager. Sous conditions normales, c'est-à-dire à une température ambiante (20 degrés Celsius) et une pression d'environ 1 bar, la rigidité diélectrique du SF₆ est environ 3 fois supérieure à celle de l'air [45], une alternative gazeuse devrait démontrer une rigidité diélectrique comparablement suffisante pour assurer une isolation efficace tout en gardant un impact environnemental moindre.

5.1 Estimation de la rigidité diélectrique d'une alternative au SF₆

Il existe globalement deux méthodes permettant de prédire la rigidité diélectrique d'un composant gazeux : la méthode théorique et la méthode expérimentale.

5.1.1 La méthode expérimentale

Cette méthode s'appuie sur les essais effectués matériellement sur les disjoncteurs dans une installation environnementale réelle de test. Pour évaluer la rigidité diélectrique d'un gaz, les essais de claquage et/ou les tests de décharges partielles sont pratiqués. Les procédures d'essais de tenue à la fréquence industrielle et d'essais de chocs sont décrites par les normes CEI 60060-1, CEI 62271-1 et CEI 62271-100 et sont souvent effectuées à sec et sous pluie. Le principe consiste à appliquer à tour de rôle quinze ondes de choc de chaque polarité sur les différents points d'injection, tel que défini dans la procédure de test préalablement établie. L'essai est réussi s'il ne se produit pas plus de deux contournements pour quinze chocs consécutifs. Les ingénieurs surveillent le disjoncteur pour détecter les défaillances qui pourraient survenir, comme la formation d'arcs internes, des décharges partielles ou des signes de dégradation de l'isolation.

5.1.2 La méthode théorique

Pour généraliser l'approfondissement, les calculs analytiques et les simulations numériques ont été considérés comme des méthodes théoriques. Parmi les plus pertinentes, on a:

5.1.2.1 Les réseaux de neurones

Des algorithmes d'apprentissage automatique ont été conçus pour analyser la structure moléculaire des molécules de gaz afin d'estimer leur rigidité diélectrique à

travers les réseaux de neurones artificiels (ANN) et la forêt aléatoire (RF) [108]. La forêt aléatoire (RF) est une technique d'apprentissage d'ensemble dérivé des arbres de classification et de régression [8], les réseaux de neurones artificiels sont des programmes informatiques inspirés biologiquement et conçus pour simuler la manière dont le cerveau humain traite l'information [127].

5.1.2.2 Les méthodes hybrides

L'une de ces méthodes exploite un modèle statistique, l'analyse de régression qu'elle associe avec des calculs de chimie quantique pour estimer les propriétés électriques et thermodynamiques de substituts gazeux isolants au SF₆ [124]. Les paramètres tels que les énergies d'affinité électronique, le moment dipolaire électrique, polarisabilité électrique moyenne sont étudiés.

5.1.2.3 Les méthodes de simulation par éléments finis (FEM)

Ces méthodes utilisent les modèles de représentation 2D ou 3D des systèmes physiques à travers des logiciels de simulation, pour modéliser les phénomènes qui se produisent lors du fonctionnement d'un disjoncteur, et peuvent ainsi reproduire ou prédire le comportement des différentes composantes du système lorsqu'ils sont soumis à une analyse. Pendant les tests, le modèle numérique, conçu pour décrire aussi fidèlement que possible le dispositif physique réel, est configuré en tenant compte des tous les conditions aux limites applicables et les approximations doivent être minimales.

Cet exemple [63], présente l'estimation à l'aide de la méthode par éléments finis (FEM) de la rigidité diélectrique du mélange gazeux SF_6/N_2 à différentes proportions, et les résultats de cette méthode permettent d'établir une correspondance entre le rapport du mélange, sa rigidité diélectrique et la pression.

5.1.2.4 Les méthodes ab initio

- La Théorie fonctionnelle de la densité (DFT)

Cette méthode se base sur le calcul des propriétés physiques moléculaires des atomes de gaz qui traduisent la physique des interactions électron-molécule intervenant dans le transport de molécule, à partir des principes de la mécanique quantique, impliquant directement la rigidité diélectrique du mélange de gaz [80]. Ces calculs passent généralement par l'optimisation des molécules de gaz l'aide des méthodes telles que Hartree-Fock (HF) et B3LYP [62]. À travers la DFT, les propriétés permettant d'estimer la rigidité diélectrique du gaz substitutif, telles que l'énergie d'ionisation, la polarisabilité électronique et le niveau d'énergie HOMO-LUMO [16] sont calculés et les résultats sont comparés aux données expérimentales.

5.1.2.5 Les méthodes empiriques

Cette méthode est basée sur l'observation et l'analyse des données expérimentales pour estimer les valeurs de la rigidité diélectrique des mélanges gazeux passant par l'utilisation des formules mathématiques et des processus de régression pour établir une

relation entre les variables d'un système. Dans l'exemple [80], la loi de Paschen est utilisée pour prédire la tension de claquage des mélanges de gaz binaires et ternaires, le principe se résume à la résolution de l'équation de Boltzmann pour obtenir la fonction de distribution de l'énergie des électrons (EEDF) de chacun des mélanges gazeux, conduisant au calcul du coefficient d'ionisation. À partir des données de ce coefficient réduit par la pression, il est possible de déduire les paramètres A et B impliqués dans la formule de Paschen.

Ce dernier exemple est intéressant, car il exige des ajustements raffinés, un paramètre m a été ajouté par l'auteur à l'exposant de la formule du coefficient d'ionisation réduit par la pression, rendant l'exécution du processus de régression beaucoup plus complexe.

5.2 La méthode de calcul classique retenue comme base

5.2.1 *Le processus de régression appliqué à la formule d'ionisation réduit par la pression*

Lorsque nous reprenons l'exemple précédent [80], les auteurs C. Park, et al. ont modifié la formule conventionnelle du coefficient d'ionisation réduit par la pression α/p en ajoutant le rapport $1/m$ dans l'exposant pour améliorer la précision du processus de régression linéaire $\frac{\alpha}{p} = Ae^{-B(\frac{p}{E})}$, où le coefficient d'ionisation α est réduit par la pression p , A et B sont la constante individuelle du gaz et la constante de proportionnalité du gaz.

Après cette modification la formule devient : $\frac{\alpha}{p} = Ae^{-B(\frac{p}{E})^{\frac{1}{m}}}$, et l'exécution du processus de régression ayant conduit à minimiser la fonction d'erreur de la forme Racine de l'Erreur Quadratique Moyenne (REQM), en anglais Root Mean Square Error (RMSE) [10] représentée par :

$$Coût = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{r=1}^n \left(\left(\frac{\alpha}{p} \right)_r^{observé} - \left(\frac{\alpha}{p} \right)_r^{calculé} \right)^2} \quad (5.1)$$

Où n est le nombre de données observées $(\alpha/p)^{observé}$ est la valeur observée pour chacune des données à la position r et $(\alpha/p)^{calculé}$ est la valeur prédite pour chacune des données à la position r.

$$\left(\frac{\alpha}{p} \right)_r^{calculé} = Ae^{-B(\frac{p}{E_r})^{\frac{1}{m}}} \quad (5.2)$$

Ici le processus de régression consiste à trouver les valeurs optimales de A, B, et m qui minimisent la fonction *Coût* :

$$\min_{A,B,m} Coût = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{r=1}^n \left(\left(\frac{\alpha}{p} \right)_r^{observé} - Ae^{-B(\frac{p}{E_r})^{\frac{1}{m}}} \right)^2} \quad (5.3)$$

Elle peut être réécrite sous la forme suivante, en simplifiant les paramètres négligeables dans le processus :

$$\min_{A,B,m} Coût = \sum_{r=1}^n \left(\left(\frac{\alpha}{p} \right)_r^{observé} - Ae^{-B(\frac{p}{E_r})^{\frac{1}{m}}} \right)^2 \quad (5.4)$$

Pour procéder à l'optimisation, premièrement, les valeurs initiales des paramètres A, B et m sont choisies, puis pour chaque ensemble de paramètres A, B et m, on calcule la valeur de la fonction Coût, enfin les valeurs optimales de A, B et m sont retenues.

En poursuivant la logique des auteurs C. Park, et al. [80], ces valeurs sont utilisées dans la formule également améliorée de la loi de Paschen pour le calcul de la tension de

claquage : $V_{breakdown} = \left(\frac{B}{\ln A - \ln \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) + \ln(pd)} \right)^m pd$, où γ est le coefficient d'émission

secondaire des électrons et d est la distance entre les électrodes.

5.2.2 La forme non convexe de l'équation pour un intervalle donné

Une fonction $f(x)$ est dite convexe sur un intervalle $]\alpha, \beta[$ lorsque pour tout x_1 ou x_2 dans cet intervalle, et pour tout λ dans l'intervalle $[0, 1]$, la fonction satisfait l'inégalité suivante, cette formule a été démontrée dans [27]:

$$f(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) \leq \lambda f(x_1) + (1 - \lambda)f(x_2) \quad (5.5)$$

Pour la formule améliorée du coefficient d'ionisation réduit par la pression ci-haut, de forme exponentielle, elle peut être examinée par rapport à la variable p/E dans son exposant, en considérant $x = p/E$. Dans ce cas, elle peut être réécrite comme :

$$f(x) = A \cdot e^{-B \cdot x^{\frac{1}{m}}} \quad (5.6)$$

Nous devons calculer la dérivée première et seconde de la fonction $f(x)$:

Dérivée première :

$$f'(x) = A \cdot \left(-\frac{B}{m} \cdot x^{\left(\frac{1}{m}-1\right)} \right) \cdot e^{-B \cdot x^{\frac{1}{m}}} \quad (5.7)$$

Dérivée seconde :

$$f''(x) = A \cdot e^{-B \cdot x^{\frac{1}{m}}} \cdot \left[\left(\frac{B^2}{m^2} \cdot x^{2\left(\frac{1}{m}-1\right)} \right) - \left(\frac{B}{m} \cdot \left(\frac{1}{m} - 1 \right) \cdot x^{\left(\frac{1}{m}-2\right)} \right) \right] \quad (5.8)$$

Lorsque nous analysons la dérivée seconde de la fonction $f(x)$, la fonction $f'(x)$, et vérifions l'inégalité exprimée dans la formule (5.5), nous constatons qu'elle est complexe et sa valeur dépend des termes $x^{\frac{1}{m}-2}$ et $x^{2\left(\frac{1}{m}-1\right)}$:

- Si $m > 1$, alors le terme $x^{\frac{1}{m}-2}$ peut être très petit ou négatif, donnant une valeur négative à la fonction $f'(x)$
- Si $m < 1$, alors le $x^{\frac{1}{m}-2}$ peut être supérieure et donner une valeur positive à la fonction $f'(x)$ dans certains cas.

Cette analyse permet de conclure que la formule améliorée du coefficient d'ionisation réduit par la pression, est non convexe pour une certaine gamme de valeurs du paramètre m en raison de la complexité de ses termes et de la façon dont la dérivée seconde peut changer de signe.

5.2.3 Problème de minimums locaux dans l'optimisation

Lors du processus de régression, le but étant de trouver les valeurs des paramètres qui minimisent la valeur de la fonction coût, la recherche des solutions optimales n'est

pas simple à réaliser pour tous les types de fonctions. Différentes méthodes d'optimisation peuvent être utilisées pour effectuer ce travail, des algorithmes tels que la descente de Gradient ou alors l'algorithme de Levenberg-Marquardt sont parfois adaptés pour faciliter le calcul. Cependant, si la fonction présente plusieurs minimums locaux, ce qui est le cas des fonctions non convexes [86], la solution trouvée peut se limiter à un minimum local et ne pas explorer les autres solutions.

5.2.3.1 Les minimums locaux

Pour une fonction $f(x)$, si dans un intervalle voisin V_1 de x_0 , $f(x_0) \leq f(x)$, pour tout $x \in V_1$, alors dans ce cas x_0 est considéré comme le minimum local [86]. Cependant, ce minimum ne représente pas automatiquement la valeur la plus basse possible pour la fonction entière. Car il est possible de trouver plus loin, dans un intervalle V_2 , V_3 ou V_4 non voisin à x_0 , un autre minimum correspondant à cet intervalle, plus petit que x_0 . D'où l'existence de plusieurs minimums locaux pour une fonction donnée.

5.2.3.2 Les algorithmes d'optimisation classiques

Pour faciliter l'optimisation de la fonction coût, plusieurs algorithmes sont souvent implémentés dans le processus de recherches des minimums d'une fonction. Parmi les plus utilisés, on peut citer :

- **La Descente de gradient** : le principe de cet algorithme consiste à suivre le gradient de la dérivée première de la fonction étudiée pour trouver le

minimum. Dépendamment du nombre de minimums locaux, la descente de gradient termine son analyse après plusieurs itérations, si ce nombre est très grand, l'algorithme pourrait s'arrêter à l'un des minimums locaux sans atteindre le minimum global. L'équation de mise à jour de la Descente de gradient est représentée sous la forme : $x_{t+1} = x_t - \eta f'(x_t)$, où η est le taux d'apprentissage, et $f'(x_t)$ est le gradient de la fonction au point x_t [6].

Si $f(x)$ est une fonction non convexe, alors l'analyse peut conduire à un minimum local où $f'(x)=0$, alors qu'il ne s'agit pas du point globalement optimal.

Cet algorithme donne un résultat satisfaisant dépendamment de la valeur initiale de x_0 proche du minimum global et un taux d'apprentissage raisonnable. Lorsque le taux d'apprentissage est trop grand et la valeur d'initialisation des paramètres n'est pas choisie conséquemment, l'algorithme retourne un minimum local uniquement.

- **L'algorithme de Levenberg-Marquardt** : Il s'agit ici d'un algorithme hybride, découlant d'une combinaison de la descente de gradient et de la méthode de Gauss-Newton, régulièrement utilisée dans la résolution des problèmes de régression non linéaire. L'équation de mise à jour de l'algorithme de Levenberg-Marquardt est : $x_{t+1} = x_t - [J^T J + \lambda I]^{-1} J^T f(x_t)$
Où J est la matrice Jacobienne des dérivées partielles des fonctions par rapport aux paramètres, J^T est la transposée de la matrice Jacobienne, λ est un facteur de régularisation qui règle la combinaison entre la méthode Gauss-

Newton (lorsque λ est faible) et la descente de gradient (lorsque λ est élevé), et I est la matrice identité [61].

Cet algorithme est également susceptible de se retrouver heurté à des minimums locaux, car la mise à jour des paramètres dépend des approximations linéaires locales de la fonction d'erreur. Si l'algorithme atteint un certain minimum local, il peut converger vers une solution qui ne correspond pas nécessairement au minimum global.

5.2.3.1 Impact des minimums locaux

La grande majorité des algorithmes classiques disponibles dans la littérature rencontre des difficultés à converger vers les paramètres globalement optimaux. Ils se heurtent très souvent à des optimums locaux, entraînant ainsi une efficacité limitée dans la recherche de la meilleure solution possible.

Cette limite est accentuée lorsqu'il s'agit des fonctions complexes et non convexes, d'où la nécessité de recourir aux techniques avancées d'optimisation plus efficaces, capables de contourner le problème de minimum local.

5.2.4 Méthodes alternatives de recherche de la solution optimale

Il existe plusieurs méthodes d'optimisation pouvant élargir la recherche vers une sphère de solutions plus grande, permettant ainsi aux algorithmes de cibler et d'atteindre le minimum global d'une fonction. Ces algorithmes ont pour but principal d'identifier la

meilleure solution possible dans un espace de recherche élargi, en implémentant des techniques pour échapper aux minimums locaux. Ils peuvent être regroupés comme suit :

5.2.4.1 Méthodes d'optimisation globale

Ces méthodes vont au-delà des minimums locaux :

- Les algorithmes génétiques : Ce type d'algorithme fournit plusieurs solutions avec rapidité même lorsque l'espace de recherche est large [3].
- Le Recuit Simulé ou simulated Annealing : appartenant à la famille des métaheuristiques, une famille de méthodes d'optimisation permettant de trouver un optimum global, ou de meilleurs optimums locaux par rapport aux méthodes classiques. Pendant l'optimisation des paramètres, il est possible d'ajouter des perturbations aléatoires pour contraindre l'algorithme à sortir des minimums locaux. Ici, l'ajustement s'effectue grâce à l'ajout contrôlé des perturbations par les tendances de courbure de la fonction, en acceptant temporairement des solutions sous-optimales, lui permettant d'échapper aux minimums locaux [17].

5.2.4.2 Algorithmes de Métacognition

Ces algorithmes tirent leur fondement dans l'apprentissage ou la résolution de problèmes à travers la compréhension, le contrôle, l'évaluation et la préparation de leurs propres processus cognitifs [110]. L'algorithme évalue ses performances sur une activité

d'optimisation, ajuste ses paramètres en fonction des résultats observés, et améliore ainsi son efficacité.

- L'optimisation Bayésienne : cette méthode contrôle la fonction d'erreur afin d'anticiper les points suivants à évaluer, et permet ainsi de mieux explorer l'espace de solutions [31].
- Algorithme de Levenberg-Marquardt Global : il s'agit d'une version modifiée de l'algorithme de Levenberg-Marquardt initial, qui effectue une correction dans la stabilité des erreurs et la limitation des poids [85].

Dans ce cas précis, un algorithme de métacognition peut être utilisé pour ajuster automatiquement la méthode de calcul des paramètres A, B et m, en analysant les résultats intermédiaires et en adaptant son processus de traitement pour éviter les minimums locaux et converger vers une solution optimale.

5.2.4.3 Optimisation multi-démarrage

Le principe de ce type d'optimisation réside dans l'exécution de l'algorithme plusieurs fois avec différentes valeurs initiales de paramètres, à la fin, les résultats des différentes exécutions sont combinés pour maximiser l'obtention du minimum global [129]. Un exemple d'algorithme utilisant cette méthode est l'algorithme de Basin-Hopping, basé sur l'implémentation des contraintes pour améliorer la recherche du minimum global [125].

5.2.4.4 Algorithmes hybrides

Il s'agit d'une catégorie d'algorithmes qui fusionne différentes méthodes d'analyse pour maximiser l'optimisation de la fonction.

- Une idée originale d'hybridation de l'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO) avec l'algorithme génétique [38].
- Combinaison d'optimisation locale et globale : il est également possible de combiner une méthode d'optimisation locale comme le gradient Projété Perturbé avec une méthode d'optimisation globale stochastique comme l'algorithme génétique [28], ou alors avec la méthode du recuit simulé.
- La combinaison des méthodes d'optimisation quantique et classique : Ces algorithmes exploitent les principes de l'informatique quantique pour explorer un espace de solutions plus grand, de manière plus efficace pour obtenir les résultats optimaux.

Chacune de ces différentes méthodes d'optimisation présente des avantages et des inconvénients. Le choix de la méthode appropriée pour améliorer le calcul de la rigidité diélectrique d'un gaz ou mélange gazeux dépend de l'approche innovante que nous souhaitons apporter à ces travaux de recherche, des ressources computationnelles disponibles et de la projection envisagée vers le perfectionnement futur.

5.2.5 Correspondance spécifique avec le calcul des paramètres A , B et m

Les méthodes d'optimisation classiques appliquent généralement le calcul du gradient de la fonction coût, et ajustent les paramètres afin de faire converger la solution vers la valeur la plus faible. Cependant, il s'avère que cela contribue à diriger la solution vers des minimums locaux, pour des fonctions non convexes comme l'équation (5.4). Dans l'optique d'échapper aux minimums locaux de manière similaire au besoin de la méthode proposée par Verdon, G. et al, 2019 [117], QAOA applique les opérateurs U_C et U_M pour explorer simultanément plusieurs solutions en exploitant l'intrication et la superposition quantique.

La recherche des valeurs optimales des paramètres A , B et m , est un problème d'optimisation combinatoire, qui peut être représenté sur la forme d'un hamiltonien quadratique binaire QUBO (Quadratic Unconstrained Binary Optimization) [5], une forme exploitable par l'algorithme QAOA. Les paramètres A , B , m sont discrétisés. Chaque paramètre est représenté par une combinaison de qubits, avec chaque qubit représenté par un système d'états numérique binaire. QAOA ajuste les paramètres γ et β pour explorer l'espace de solutions, à chaque itération, la fonction coût est évaluée et les états des qubits sont mesurés pour trouver la meilleure configuration qui minimise l'erreur. À la fin du processus, les valeurs optimales des paramètres A , B et m sont extraites après avoir identifié la combinaison de qubits qui minimise la fonction coût.

5.2.6 *Rôle de l'algorithme QAOA dans le processus de régression*

L'apport de l'algorithme QAOA dans le processus de régression pour trouver les valeurs optimales des paramètres A, B et m peut être résumé dans les points suivants :

- Résolution du problème de minimums locaux : l'adaptation de l'algorithme QAOA au processus de régression appliqué à la formule du coefficient d'ionisation réduit par la pression permet d'éviter à l'algorithme de converger vers un optimum local, plutôt que de rechercher un optimum global qui garantit une solution qui se rapproche le plus des valeurs adéquates.
- Exploration simultanée de plusieurs combinaisons dans l'espace de solutions : l'algorithme fonctionne de manière plus efficace en accélérant la recherche de la solution optimale grâce à la superposition quantique.

Remarque : Généralement dans ce cas de figure, l'algorithme classique renvoie une réponse de manière beaucoup plus rapide que l'algorithme quantique, produisant une perception erronée de son efficacité élevée. Cependant, sachant que l'algorithme quantique explore un espace de solutions n fois plus grand que son homologue classique, il convient de conclure qu'il est plus rapide, car pour le même espace de solutions exploré, l'algorithme classique prendrait n fois plus de temps pour renvoyer une réponse.

- L'un des avantages de QAOA est qu'il s'adapte à différents types de problèmes complexes qui peuvent être représentés sous forme quadratique binaire.

5.3 Représentation du problème A, B, m classique sous forme quantique avec QAOA

5.3.1 Transformation QUBO

5.3.1.1 Discrétisation des paramètres

En mathématique, tout nombre réel ou entier dans un intervalle donné pouvant être représenté en un nombre binaire de n bits, peut prendre 2^n valeurs discrètes. Pour un paramètre A dans l'intervalle $[A_{min}, A_{max}]$, la discrétisation est donnée par ΔA défini comme : $\Delta A = \frac{A_{max}-A_{min}}{2^n-1}$, ainsi A peut-être exprimé comme une somme pondérée de puissance de 2, où les poids sont représentés par les qubits binaires q_A^i sous la forme :

$$A = A_{min} + \Delta A \sum_{i=1}^{n_A} 2^{i-1} q_A^i \quad (5.9)$$

De même, les paramètres B et m prendront la forme suivante respectivement (5.10) et (5.11) pour B dans l'intervalle $[B_{min}, B_{max}]$ et m dans l'intervalle $[m_{min}, m_{max}]$:

$$B = B_{min} + \Delta B \sum_{j=1}^{n_B} 2^{j-1} q_B^j \quad (5.10)$$

$$m = m_{min} + \Delta m \sum_{k=1}^{n_m} 2^{k-1} q_m^k \quad (5.11)$$

5.3.1.2 Linéarisation de la fonction coût

Pour convertir l'expression de la fonction coût en une équation QUBO, il est nécessaire de la transformer en forme linéaire, c'est-à-dire, en somme quadratique. La partie exponentielle de l'équation peut être linéarisée en utilisant le développement en série de Taylor exprimée par une approximation des trois premiers termes pour un besoin minimal de précision, exprimée en: $e^{-x} \approx 1 - x + \frac{x^2}{2}$. Ainsi, le terme exponentiel de la formule (5.6) devient :

$$e^{-B\left(\frac{p}{E_r}\right)^{\frac{1}{m}}} \approx 1 - B\left(\frac{p}{E_r}\right)^{\frac{1}{m}} + \frac{1}{2}\left(B\left(\frac{p}{E_r}\right)^{\frac{1}{m}}\right)^2 \quad (5.12)$$

En le substituant dans la formule (5.6) on obtient :

$$\min_{A,B,m} \text{Coût} \approx \sum_{r=1}^n \left(\left(\frac{\alpha}{p}\right)_r^{\text{observé}} - A \cdot \left(1 - B\left(\frac{p}{E_r}\right)^{\frac{1}{m}} + \frac{1}{2}\left(B\left(\frac{p}{E_r}\right)^{\frac{1}{m}}\right)^2\right) \right)^2 \quad (5.13)$$

5.3.1.3 Formulation de la fonction coût sous la forme de qubits

Lorsque les paramètres A, B et m de (5.9), (5.10), (5.11) sont remplacés dans l'équation minimisant la fonction coût (5.13) nous obtenons :

$$\min_{A,B,m} Coût \approx \sum_{r=1}^n \left(\left(\frac{\alpha}{p} \right)_r^{observé} - (A_{min} + \Delta A \sum_{i=1}^{n_A} 2^{i-1} q_A^i) \cdot \left(1 - (B_{min} + \Delta B \sum_{j=1}^{n_B} 2^{j-1} q_B^j) \cdot \left(\left(\frac{p}{E_r} \right)^{\frac{1}{(m_{min} + \Delta m \sum_{k=1}^{n_m} 2^{k-1} q_m^k)}} + \frac{1}{2} \left((B_{min} + \Delta B \sum_{j=1}^{n_B} 2^{j-1} q_B^j) \left(\frac{p}{E_r} \right)^{\frac{1}{(m_{min} + \Delta m \sum_{k=1}^{n_m} 2^{k-1} q_m^k)}} \right)^2 \right) \right) \right)^2 \quad (5.14)$$

L'équation est ainsi exprimée sous forme de qubits q_A^i , q_B^j et q_m^k .

Cette équation peut être développée, ensuite affinée et regroupée en une suite de termes constants, linéaires et quadratiques afin d'obtenir une équation finale sous la forme : $\sum_{i,j} Q_{ij} q_i q_j$.

5.3.2 Équation résultante pour implémentation

5.3.2.1 Approximation de la fonction

Pour faciliter l'implémentation préalable de la solution proposée, les termes quadratiques sont simplifiés en négligeant les termes d'ordres supérieurs. Les approximations suivantes sont appliquées :

$$A \cdot \left(1 - B \left(\frac{p}{E_r} \right)^{\frac{1}{m}} + \frac{1}{2} \left(B \left(\frac{p}{E_r} \right)^{\frac{1}{m}} \right)^2 \right) \approx A \cdot \left(1 - B \left(\frac{p}{E_r} \right)^{\frac{1}{m}} \right) \quad (5.15)$$

Ainsi, l'équation (5.13) devient :

$$\min_{A,B,m} Coût \approx \sum_{r=1}^n \left(\left(\frac{\alpha}{p} \right)_r^{observé} - A \cdot \left(1 - B \left(\frac{p}{E_r} \right)^{\frac{1}{m}} \right) \right)^2$$

$$\min_{A,B,m} \text{Coût} \approx \sum_{r=1}^n \left(\left(\frac{\alpha}{p} \right)_r^{\text{observé}} - A + A \cdot B \left(\frac{p}{E_r} \right)^{\frac{1}{m}} \right)^2 \quad (5.16)$$

Puis, l'approximation suivante est appliquée pour linéariser l'exposant $\left(\frac{p}{E_r} \right)^{\frac{1}{m}}$:

$$\left(\frac{p}{E_r} \right)^{\frac{1}{m}} \approx 1 + \frac{1}{m} \ln \left(\frac{p}{E_r} \right) \quad (5.17)$$

En remplaçant l'équation discrète de m (5.11) dans la l'approximation (5.17) on obtient :

$$1 + \frac{1}{m} \ln \left(\frac{p}{E_r} \right) = 1 + \frac{1}{m_{min} + \Delta m \sum_{k=1}^{n_m} 2^{k-1} q_m^k} \ln \left(\frac{p}{E_r} \right) \quad (5.18)$$

La simplification suivante est appliquée :

$$\frac{1}{m_{min} + \Delta m \sum_{k=1}^{n_m} 2^{k-1} q_m^k} \approx \frac{1}{m_{min}} - \frac{\Delta m}{m_{min}^2} \sum_{k=1}^{n_m} 2^{k-1} q_m^k \quad (5.19)$$

Lorsqu'on remplace (5.19) dans (5.18) on obtient :

$$\begin{aligned} 1 + \frac{1}{m} \ln \left(\frac{p}{E_r} \right) &\approx 1 + \left(\frac{1}{m_{min}} - \frac{\Delta m}{m_{min}^2} \sum_{k=1}^{n_m} 2^{k-1} q_m^k \right) \ln \left(\frac{p}{E_r} \right) \\ &\approx 1 + \frac{\ln \left(\frac{p}{E_r} \right)}{m_{min}} - \frac{\Delta m \ln \left(\frac{p}{E_r} \right)}{m_{min}^2} \sum_{k=1}^{n_m} 2^{k-1} q_m^k \\ 1 + \frac{1}{m} \ln \left(\frac{p}{E_r} \right) &\approx 1 + \frac{\ln \left(\frac{p}{E_r} \right)}{m_{min}} - \frac{\Delta m \ln \left(\frac{p}{E_r} \right)}{m_{min}^2} \sum_{k=1}^{n_m} 2^{k-1} q_m^k \end{aligned} \quad (5.20)$$

En remplaçant les approximations (5.9), (5.10) et (5.20) dans la formule (5.16)

l'équation devient :

$$\min_{A,B,m} \text{Coût} \approx \sum_{r=1}^n \left(\left(\frac{\alpha}{p} \right)_r^{\text{observé}} - (A_{\min} + \Delta A \sum_{i=1}^{n_A} 2^{i-1} q_A^i) + (A_{\min} + \Delta A \sum_{i=1}^{n_A} 2^{i-1} q_A^i) \cdot (B_{\min} + \Delta B \sum_{j=1}^{n_B} 2^{j-1} q_B^j) \left(1 + \frac{\ln(\frac{p}{E_r})}{m_{\min}} - \frac{\Delta m \ln(\frac{p}{E_r})}{m_{\min}^2} \sum_{k=1}^{n_m} 2^{k-1} q_m^k \right) \right)^2 \quad (5.21)$$

Tous les produits ont été multipliés pour obtenir des termes constants, linéaires et quadratiques, l'équation (5.21) devient, les détails sont dans l'annexe (A1.1) :

$$\begin{aligned} \min_{A,B,m} \text{Coût} \approx \sum_{r=1}^n \left(\left(\frac{\alpha}{p} \right)_r^{\text{observé}} - A_{\min} - \Delta A \sum_{i=1}^{n_A} 2^{i-1} q_A^i + A_{\min} \cdot B_{\min} + A_{\min} \cdot \Delta B \sum_{j=1}^{n_B} 2^{j-1} q_B^j + B_{\min} \cdot \Delta A \sum_{i=1}^{n_A} 2^{i-1} q_A^i \right) + \\ (\Delta A \sum_{i=1}^{n_A} 2^{i-1} q_A^i) \cdot (\Delta B \sum_{j=1}^{n_B} 2^{j-1} q_B^j) + A_{\min} \cdot B_{\min} \cdot \frac{\ln(\frac{p}{E_r})}{m_{\min}} + A_{\min} \cdot \frac{\ln(\frac{p}{E_r})}{m_{\min}} \cdot \Delta B \sum_{j=1}^{n_B} 2^{j-1} q_B^j + B_{\min} \cdot \frac{\ln(\frac{p}{E_r})}{m_{\min}} \cdot \Delta A \sum_{i=1}^{n_A} 2^{i-1} q_A^i + \\ \frac{\ln(\frac{p}{E_r})}{m_{\min}} \cdot (\Delta A \sum_{i=1}^{n_A} 2^{i-1} q_A^i) \cdot (\Delta B \sum_{j=1}^{n_B} 2^{j-1} q_B^j) - A_{\min} \cdot B_{\min} \cdot \frac{\Delta m \cdot \ln(\frac{p}{E_r})}{m_{\min}^2} \cdot \sum_{k=1}^{n_m} 2^{k-1} q_m^k - A_{\min} \cdot \frac{\Delta m \cdot \ln(\frac{p}{E_r})}{m_{\min}^2} \cdot \Delta B \sum_{j=1}^{n_B} 2^{j-1} q_B^j \cdot \\ \sum_{k=1}^{n_m} 2^{k-1} q_m^k - B_{\min} \cdot \frac{\Delta m \cdot \ln(\frac{p}{E_r})}{m_{\min}^2} \cdot \Delta A \sum_{i=1}^{n_A} 2^{i-1} q_A^i \cdot \sum_{k=1}^{n_m} 2^{k-1} q_m^k - \frac{\Delta m \cdot \ln(\frac{p}{E_r})}{m_{\min}^2} \cdot \Delta A \sum_{i=1}^{n_A} 2^{i-1} q_A^i \cdot \Delta B \sum_{j=1}^{n_B} 2^{j-1} q_B^j \cdot \sum_{k=1}^{n_m} 2^{k-1} q_m^k \right)^2 \end{aligned}$$

Pour meilleure fluidité, chaque terme est regroupé dans une catégorie comme suit :

- Les termes constants :

$$\text{Constant} = \left(\frac{\alpha}{p} \right)_r^{\text{observé}} - A_{\min} + A_{\min} \cdot B_{\min} + A_{\min} \cdot B_{\min} \cdot \frac{\ln(\frac{p}{E_r})}{m_{\min}} \quad (5.22)$$

- Les termes linéaires :

$$\begin{aligned} \text{Linear} = \sum_{i=1}^{n_A} (-\Delta A + B_{\min} \cdot \Delta A + B_{\min} \cdot \frac{\ln(\frac{p}{E_r})}{m_{\min}} \cdot \Delta A) \cdot 2^{i-1} q_A^i + \sum_{j=1}^{n_B} (A_{\min} \cdot \Delta B + \\ A_{\min} \cdot \frac{\ln(\frac{p}{E_r})}{m_{\min}} \cdot \Delta B) \cdot 2^{j-1} q_B^j + \sum_{k=1}^{n_m} (-A_{\min} \cdot B_{\min} \cdot \frac{\Delta m \ln(\frac{p}{E_r})}{m_{\min}^2}) 2^{k-1} q_m^k \quad (5.23) \end{aligned}$$

Dans (5.23), nous pouvons extraire les coefficients rattachés à chacun des qubits de l'équation et les représenter par C_{A_i} , C_{B_j} et C_{m_k} comme coefficients respectifs de q_A^i , q_B^j et q_m^k :

$$C_{A_i} = (-\Delta A + B_{min} \cdot \Delta A + B_{min} \cdot \frac{\ln(\frac{p}{E_r})}{m_{min}} \cdot \Delta A) \cdot 2^{i-1} \quad (5.24)$$

$$C_{B_j} = (A_{min} \cdot \Delta B + A_{min} \cdot \frac{\ln(\frac{p}{E_r})}{m_{min}} \cdot \Delta B) \cdot 2^{j-1} \quad (5.25)$$

$$C_{m_k} = (-A_{min} \cdot B_{min} \cdot \frac{\Delta m \cdot \ln(\frac{p}{E_r})}{m_{min}^2}) \cdot 2^{k-1} \quad (5.26)$$

Le terme linéaire de l'équation devient :

$$Linear = \sum_{i=1}^{n_A} C_{A_i} q_A^i + \sum_{j=1}^{n_B} C_{B_j} q_B^j + \sum_{k=1}^{n_m} C_{m_k} q_m^k \quad (5.27)$$

- Les termes quadratiques :

$$\begin{aligned} Quadratic = & \Delta A \cdot \Delta B \cdot \sum_{i=1}^{n_A} 2^{i-1} q_A^i \cdot \sum_{j=1}^{n_B} 2^{j-1} q_B^j + \frac{\ln(\frac{p}{E_r})}{m_{min}} \cdot \Delta A \cdot \Delta B \cdot \sum_{i=1}^{n_A} 2^{i-1} q_A^i \cdot \\ & \sum_{j=1}^{n_B} 2^{j-1} q_B^j - A_{min} \cdot \frac{\Delta m \ln(\frac{p}{E_r})}{m_{min}^2} \cdot \Delta B \cdot \sum_{j=1}^{n_B} 2^{j-1} q_B^j \cdot \sum_{k=1}^{n_m} 2^{k-1} q_m^k - B_{min} \cdot \frac{\Delta m \ln(\frac{p}{E_r})}{m_{min}^2} \cdot \Delta A \cdot \\ & \sum_{i=1}^{n_A} 2^{i-1} q_A^i \cdot \sum_{k=1}^{n_m} 2^{k-1} q_m^k - \frac{\Delta m \ln(\frac{p}{E_r})}{m_{min}^2} \cdot \Delta A \cdot \Delta B \cdot \sum_{i=1}^{n_A} 2^{i-1} q_A^i \cdot \sum_{j=1}^{n_B} 2^{j-1} q_B^j \cdot \sum_{k=1}^{n_m} 2^{k-1} q_m^k \end{aligned} \quad (5.28)$$

Le même processus précédent est appliqué sur l'équation (5.28), les termes sont regroupés (Annexe A1.2) les coefficients rattachés à chacun des produits de qubits de

l'équation sont représentés par C_{A_i, B_j} , C_{A_i, m_k} , C_{A_i, m_k} , et $C_{A_i, B_j m_k}$ comme coefficients respectifs des produits $q_A^i \cdot q_B^j$, $q_A^i \cdot q_m^k$, $q_B^j \cdot q_m^k$ et $q_A^i \cdot q_B^j \cdot q_m^k$:

$$C_{A_i, B_j} = (\Delta A \cdot \Delta B + \frac{\ln(\frac{p}{E_r})}{m_{min}} \cdot \Delta A \cdot \Delta B) \cdot 2^{i-1} \cdot 2^{j-1} \quad (5.29)$$

$$C_{A_i, m_k} = \left(-B_{min} \cdot \frac{\Delta m \ln(\frac{p}{E_r})}{m_{min}^2} \cdot \Delta A \right) \cdot 2^{i-1} \cdot 2^{k-1} \quad (5.30)$$

$$C_{B_j, m_k} = \left(-A_{min} \cdot \frac{\Delta m \ln(\frac{p}{E_r})}{m_{min}^2} \cdot \Delta B \right) 2^{j-1} 2^{k-1} \quad (5.31)$$

$$C_{A_i, B_j m_k} = \left(-\frac{\Delta m \ln(\frac{p}{E_r})}{m_{min}^2} \cdot \Delta A \cdot \Delta B \right) \cdot 2^{i-1} \cdot 2^{j-1} \cdot 2^{k-1} \quad (5.32)$$

Le terme quadratique de l'équation devient :

$$\begin{aligned} Quadratic = & \sum_{i=1}^{n_A} \sum_{j=0}^{n_B} C_{A_i, B_j} \cdot q_A^i \cdot q_B^j + \sum_{j=1}^{n_B} \sum_{k=0}^{n_m} C_{B_j, m_k} \cdot q_B^j \cdot q_m^k + \\ & \sum_{i=1}^{n_A} \sum_{k=0}^{n_m} C_{A_i, m_k} \cdot q_A^i \cdot q_m^k + \sum_{i=1}^{n_A} \sum_{j=0}^{n_B} \sum_{k=0}^{n_m} C_{A_i, B_j m_k} \cdot q_A^i \cdot q_B^j \cdot q_m^k \end{aligned} \quad (5.33)$$

Nous obtenons une équation sous la forme $E = Constant + Linear + Quadratic$:

$$\begin{aligned} E_{QUBO} = & Constant + \sum_{i=1}^{n_A} C_{A_i} q_A^i + \sum_{j=1}^{n_B} C_{B_j} q_B^j + \sum_{k=1}^{n_m} C_{m_k} q_m^k + \\ & \sum_{i=1}^{n_A} \sum_{j=0}^{n_B} C_{A_i, B_j} \cdot q_A^i \cdot q_B^j + \sum_{j=1}^{n_B} \sum_{k=0}^{n_m} C_{B_j, m_k} \cdot q_B^j \cdot q_m^k + \sum_{i=1}^{n_A} \sum_{k=0}^{n_m} C_{A_i, m_k} \cdot q_A^i \cdot q_m^k + \\ & \sum_{i=1}^{n_A} \sum_{j=0}^{n_B} \sum_{k=0}^{n_m} C_{A_i, B_j m_k} \cdot q_A^i \cdot q_B^j \cdot q_m^k \end{aligned} \quad (5.34)$$

5.3.2.2 Transformation du terme ternaire et équation finale

En effet, l'équation finale E_{QUBO} introduit un produit ternaire représentant l'interaction conjointe de qubits associés aux paramètres A, B et m, mais qui ne peut être résolu avec un solveur QUBO standard jusqu'ici, élevant ce problème d'optimisation binaire sans contre à l'ordre polynomial [5], le solveur QUBO ne traite que les produits binaires de qubits.

Nous allons utiliser une méthode permettant de remplacer le produit ternaire par une variable auxiliaire pour le rendre compatible au solveur QUBO. Cette méthode consiste à introduire la variable auxiliaire nommée $u_{i,j,k}$ qui substituera le produit $q_A^i \cdot q_B^j \cdot q_m^k$ dans l'équation E_{QUBO} en appliquant des pénalités logiques à cette variable pour garantir la représentation correcte du produit ternaire de qubits. Ainsi l'implémentation nécessite l'introduction d'un coefficient de pénalité λ selon le principe du lagrangien augmenté et les conditions de Karush-Kuhn-Tucker qui permettent de résoudre certains problèmes d'optimisation sous contraintes [9]. Dans ce cas, $u_{i,j,k}$ est donné par :

$$u_{i,j,k} = q_A^i \cdot q_B^j \cdot q_m^k \quad (5.35)$$

Avec comme contrainte :

- $u_{i,j,k} = 1$ si et seulement si $q_A^i = 1$, $q_B^j = 1$ et $q_m^k = 1$, sinon $u_{i,j,k} = 0$
- $u_{i,j,k}$ inférieure ou égal à q_A^i , q_B^j et q_m^k

En remplaçant (5.35) dans (5.34) l'équation finale, E_{QUBO} devient :

$$E_{QUBO} = Constant + \sum_{i=1}^{n_A} C_{A_i} q_A^i + \sum_{j=1}^{n_B} C_{B_j} q_B^j + \sum_{k=1}^{n_m} C_{m_k} q_m^k + \sum_{i=1}^{n_A} \sum_{j=0}^{n_B} C_{A_i, B_j} \cdot q_A^i \cdot q_B^j + \sum_{j=1}^{n_B} \sum_{k=0}^{n_m} C_{B_j, m_k} \cdot q_B^j \cdot q_m^k + \sum_{i=1}^{n_A} \sum_{k=0}^{n_m} C_{A_i, m_k} \cdot q_A^i \cdot q_m^k + \sum_{i=1}^{n_A} \sum_{j=0}^{n_B} \sum_{k=0}^{n_m} C_{A_i, B_j, m_k} \cdot u_{i,j,k} \quad (5.36)$$

Cette équation peut être à présent implémentée dans un algorithme QAOA pour obtenir les valeurs optimales de paramètres A, B et m.

5.4 Implémentation et programmation quantique

5.4.1 Calcul classique

Dans cette partie, la valeur de la rigidité diélectrique du mélange gazeux est premièrement estimée grâce au calcul classique, pour effectuer des comparaisons avec les résultats trouvés par l'algorithme quantique

Avant la création de l'algorithme, il est nécessaire de procéder à la résolution de l'équation de Boltzmann pour obtenir les paramètres du mélange gazeux, à travers l'exécution du solver Bolsig+ (Annexe 3.1) qui fournit les solutions à l'état stationnaire de l'équation de Boltzmann pour les électrons dans un champ électrique uniforme [39]. Grâce à ce programme répertoriant une multitude de gaz, nous pouvons obtenir les paramètres nécessaires au calcul de certaines propriétés de mélanges gazeux.

- Le solver a exécuté le mélange de 3 gaz : He à 90%, H₂ à 6% et N₂ à 4% et retourne en sortie un fichier .dat contenant de nombreux paramètres, dont le coefficient d'ionisation et le champ électrique réduits par la densité de particules N.

5.4.1.1 Importation des bibliothèques

- Numpy as np : importation des fonctionnalités pour le calcul scientifique.

5.4.1.2 Extraction et conversion des paramètres

- Le programme débute par l'extraction des valeurs du coefficient d'ionisation réduit par la densité de particules (α/N), une liste est initialisée pour stocker les valeurs de α/N et de N extraites (*alpha_N_values* et *N_values*),
- Calcul du coefficient d'ionisation réduit par la pression α/p , les valeurs *alpha_N_values* sont multipliées par *N_values* et divisées par la pression p ($p=200000$ Pa). Les résultats sont stockés dans *alpha_p_values*,
- Extraction des valeurs du champ électrique E en Td, ces valeurs sont stockées dans *electric_field_td_values*,
- Conversion du champ électrique E de Td à V/m sachant qu'il suffit de multiplier la valeur en Td par $1e-21$ pour obtenir la valeur en V/m, le résultat est stocké dans *electric_field_vm_values*,
- Calcul du rapport de la pression réduit par le champ électrique p/E en divisant p par *electric_field_vm_values*.

5.4.1.3 Définition de la fonction objectif

La fonction `create_ABm_problem()` est définie pour implémenter la fonction objectif décrite dans l'équation (5.4),

5.4.1.4 Calcul des paramètres A, B et m

- Définition des valeurs initiales de A, B, et m
- Exécution de la routine *minimize()* de la bibliothèque *scipy*, pour implémenter le processus de régression afin de déterminer les valeurs des paramètres A, B et m qui minimisent la valeur de la fonction coût.

5.4.1.5 Calcul de la rigidité diélectrique

Après avoir obtenu les valeurs des paramètres A, B et m, ils peuvent être remplacés dans l'équation amélioré de $V_{breakdown}$. La formule utilisée dans la fonction *create_V_breakdown()* est basée sur l'équation de Paschen, qui décrit la tension de claquage d'un gaz en fonction de la pression et de la distance entre les électrodes.

- Création de la fonction *create_V_breakdown()*
- Exécution des calculs fonction des paramètres A, B, m, p, d, et γ ,
- Affichage des résultats.

5.4.2 Optimisation quantique : implémentation de l'équation QUBO sur de véritables ordinateurs quantiques.

Cet algorithme est inspiré du problème Maxcut résolu à l'aide de QAOA [53] :

5.4.2.1 Installation et importation des bibliothèques

Les bibliothèques importées sont :

- Qiskit : avec ses sous-bibliothèques :
 - `qiskit.circuit.library` : importation de `QAOAAnsatz` permettant de générer le circuit quantique,
 - `qiskit.quantum_info` : importation de `Pauli` et `SparsePauliOP` qui permettent de construire les termes quantiques,
 - `qiskit.transpiler.preset_manager` : importation de `generate_preset_pass_manager` pour l'optimisation du circuit afin de l'exécuter sur des processeurs quantiques,
- `Qiskit_ibm_runtime` : importation de `QiskitRuntimeService` pour la connexion à un compte IBM afin d'accéder et interagir avec les ressources quantiques d'IBM à travers un jeton d'API.
- `Qiskit_Optimization` : importation de `QuadraticProgram` pour la création d'un problème sous forme quadratique binaire,
- `Numpy as np` : importation des fonctionnalités pour le calcul scientifique,
- `Scipy` : importation de `minimize` permettant de trouver le minimum global de la fonction coût.
- `Matplotlib.pyplot as plt` : importation des fonctionnalités permettant la visualisation des résultats sous forme graphique.

5.4.2.2 Définition de la fonction Objectif

Cette étape consiste à définir la fonction principale de notre programme, dont le but est d'estimer la rigidité diélectrique du mélange de différents gaz choisis pour évaluer la meilleure combinaison possible qui maximise la rigidité diélectrique du mélange résultant. Cette fonction est essentielle pour évaluer la capacité des mélanges gazeux à isoler les circuits électriques et prévenir les arcs électriques.

La fonction `create_qubo_problem()` est définie pour implémenter la fonction objectif décrite dans l'équation E_{QUBO} , elle commence par la création d'un problème quadratique à l'aide de la fonction `QuadraticProgram()` provenant de la bibliothèque `qiskit_optimization`. Ensuite :

- L'ajout au problème des variables binaires q_A , q_B , q_C pour A , B , m , et de la variable auxiliaire u_{aux} .
- La discrétisation des paramètres A , B , et m , avec le calcul de ΔA , ΔB et Δm ,
- Création de la constante QUBO
- Initialisation et création des coefficients C_{Ai} , C_{Bj} , C_{mk} , $C_{Ai,Bj}$, $C_{Ai,mk}$, $C_{Bj,mk}$ et $C_{Ai,Bj,mk}$ pour les termes binaires et quadratiques,
- Ajout de la constante QUBO à la fonction objectif QUBO,
- Création des différentes boucles pour l'ajout des coefficients linéaires et quadratiques pour i allant de 1 à n_A , j allant de 1 à n_B , et k allant de 1 à n_m ,

- Ajout des termes ternaires à l'aide de la variable auxiliaire u_{aux} et des contraintes permettant de garantir la représentation correcte du produit ternaire.

En sortie, nous obtenons la fonction objectif.

5.4.2.3 Implémentation du problème réel

Dans cette partie de l'algorithme, pour effectuer des calculs réels, les plages de valeurs sont définies selon l'exemple exécuté dans le calcul classique. Les données nécessaires pour l'implémentation sont :

- Les valeurs du coefficient d'ionisation réduit par la pression, les valeurs du champ électrique, et la pression : elles sont extraites du fichier obtenu après la résolution de l'équation de Boltzmann pour le mélange gazeux He à 90%, H₂ à 6% et N₂ à 4%,
- Les valeurs minimales et maximales des paramètres A, B et m sont choisies pour orienter le champ de recherche.
- Les nombres de bits n_A , n_B et n_m sont choisis suffisamment grand pour permettre à l'algorithme d'encoder les solutions avec une bonne précision.

Avec ces valeurs, le problème est représenté de façon réelle sous le nom ABm_problem et peut être soumis à l'optimisation.

5.4.2.4 Transformation sous forme quantique

Cette étape vise à transformer la fonction objectif sous forme compréhensible par un programme quantique.

- La création de l'Hamiltonien pour QAOA se fait à l'aide de *SparsePauliOP* prenant en entrée le problème est représenté de façon réelle *ABm_problem* et retourne en sortie l'Hamiltonien du problème *qubit_op*,

Le programme se poursuit par la construction d'un circuit QAOA paramétré par deux éléments γ et β , il est configuré de telle sorte que ces éléments essayent plusieurs valeurs de γ_1 à γ_n et β_1 à β_n afin de trouver la meilleure solution possible pour notre problème.

- Le mappage de l'hamiltonien sur un circuit quantique se fait à l'aide de *QAOAAnsatz()* prenant en entrée *qubit_op*, avec pour paramètre *reps=2* indiquant que le circuit est paramétré par deux éléments, et renvoyant en sortie *ansatz_qubit_op*.
- Il est possible à cette étape d'afficher les 2 éléments en exécutant la ligne de commande *ansatz_qubit_op.parameters* :

```
ansatz_qubit_op.parameters
ParameterView([ParameterVectorElement( $\beta[0]$ ), ParameterVectorElement( $\beta[1]$ ), ParameterVectorElement( $\gamma[0]$ ), ParameterVectorElement( $\gamma[1]$ )])
```

Figure 5.1 : Affichage des paramètres γ et β (capture prise par Arianne Lemo)

5.4.2.5 Optimisation

Pour pouvoir exécuter le programme sur des processeurs quantiques réels d'IBM, il est nécessaire d'avoir un compte sur la plateforme IBM Quantum, pour le cas pratique il s'agit d'un compte IBM cloud :

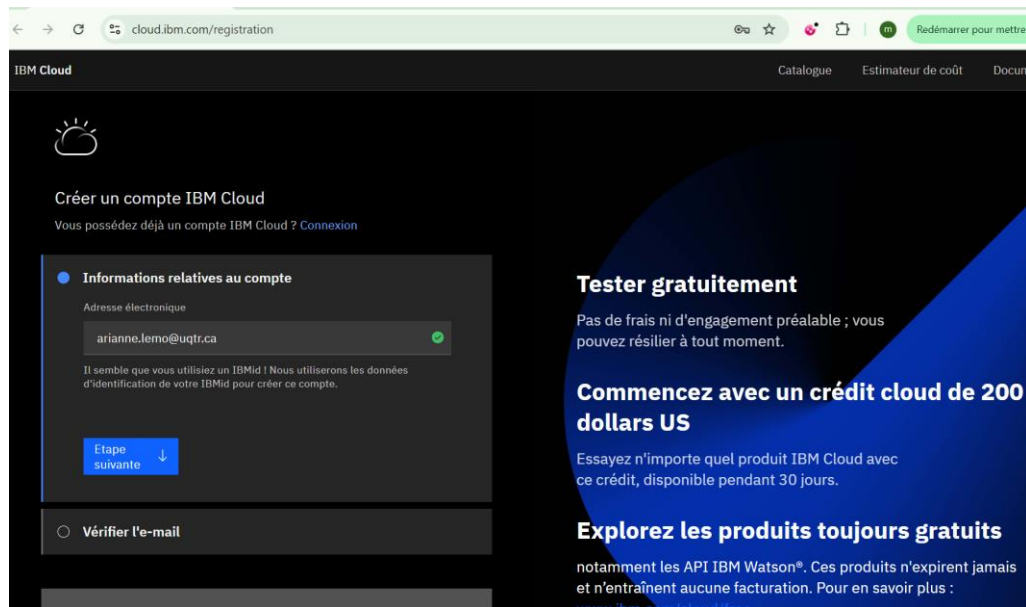


Figure 5.2 : Création d'un compte IBM Cloud (capture prise par Arianne Lemo)

Ce compte donne accès à la création d'une instance nommée ici Qiskit Runtime-6r :

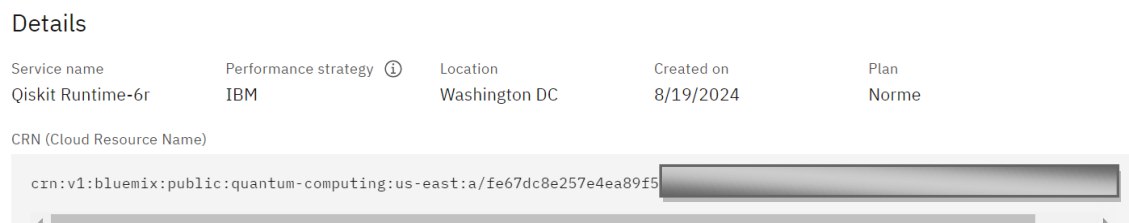


Figure 5.3 : Détails de l'instance Qiskit Runtime-6r (capture prise par Arianne Lemo)

Qui contient un identifiant unique Cloud Resource Name (CRN) utilisé dans le programme pour accéder aux ressources quantiques allouées dans le plan choisi durant la configuration du compte.

- L'accès à l'interface se fait à l'aide de *QiskitRuntimeService()* prenant comme paramètre le canal utilisé: *ibm_cloud*, et le *token* : l'identifiant unique, et renvoyant un objet généralement nommé *service*, utilisé pour soumettre les calculs quantiques.
- Un objet backend est créé pour définir les caractéristiques et les options disponibles, de la ressource quantique qui sera sollicitée : le nombre minimal de qubits dont le programme a besoin pour fonctionner (*min_num_qubits=127*), s'il s'agit d'un simulateur ou d'un calculateur réel (*simulator=False*), s'il est opérationnel (*operational=True*).
- Le circuit est optimisé à l'aide de *generate_preset_pass_manager()*, cette fonction définit le niveau d'optimisation du circuit quantique, prenant comme paramètres : le niveau d'optimisation (*optimization_level*) et la ressource quantique sur laquelle est exécuté le programme (*backend*). L'objet configuré est utilisé pour compiler le circuit *ansatz_qubit_op* et retourne le nouvel objet optimisé : *ansatz_isa*.

Il est nécessaire d'initialiser les éléments γ et β du circuit, leur donnant une valeur initiale aléatoire à l'aide de l'objet *np* de la bibliothèque *numpy*.

- Une fonction coût par défaut basée sur l'échantillonneur *Sampler* est définie pour estimer l'énergie minimale de l'Hamiltonien du problème, elle effectue préalablement le mappage des qubits virtuels du problème *ABm_problem* sur des qubits réels à l'aide de la fonction *apply.layout()*, la préparation et l'exécution des calculs sur un estimateur quantique (*estimator*), prenant comme argument le circuit optimisé *ansatz_isa*, l'Hamiltonien du problème *qubit_op*, et définit l'estimateur, et ensuite elle retourne le résultat attendu, la valeur minimale selon les paramètres fournis. Cette fonction est utilisée par la fonction *minimize()* de la bibliothèque *scipy* comme l'un des paramètres d'entrée lors de l'exécution du programme sur la ressource quantique sollicitée.

Le programme optimisé est prêt pour la soumission à l'exécution quantique.

5.4.2.6 Exécution sur des processeurs quantiques réels

Les ressources quantiques utilisées pour l'exécution de ce programme sont représentées dans la figure suivante :



Compute resources		
The following Quantum compute resources are available to this Qiskit Runtime instance.		
 Eagle	QPU count 3	Max qubits 127
Heron	QPU count 2	Max qubits 156
 Quantum simulators	Simulator count 5	Qubit range 32-5000

Figure 5.4 : Processeurs quantiques IBM utilisés pour exécuter notre programme (capture prise par Arianne Lemo)

Le circuit QAOA paramétré du problème ABm_problem est soumis à une boucle d'optimisation itérative, les paramètres optimaux γ et β sont déterminés après une série d'évaluations effectuées grâce à l'optimiseur classique [53].

Une liste a été définie pour stocker les valeurs obtenues durant l'analyse du circuit, suivi de l'ouverture d'une session et de la configuration des options pour la suppression ou l'atténuation des erreurs. La méthode COBYLA (Constrained Optimization BY Linear Approximations) est sélectionnée pour résoudre les problèmes d'optimisation sous contrainte.

Une fois l'exécution de l'optimisation terminée (5.5), le programme nous retourne un message : **Optimization terminated successfully**, après 18 minutes et 45 secondes et demie de calcul, ce qui stipule que le programme a trouvé une solution satisfaisante.

```

from qiskit_ibm_runtime import Session
from qiskit_ibm_runtime import EstimatorV2 as Estimator
from scipy.optimize import minimize

objective_func_vals = [] # Global variable
with Session(backend=backend) as session:
    ... # Configure estimator : Définition des options simples de suppression/atténuation des erreurs
    estimator = Estimator(mode=session)
    estimator.options.default_shots = 1000
    estimator.options.dynamical_decoupling.enable = True
    estimator.options.dynamical_decoupling.sequence_type = "XY4"
    estimator.options.twirling.enable_gates = True
    estimator.options.twirling.num_randomizations = "auto"

    res = minimize(cost_func_estimator, init_params, args=(ansatz_iss, qubit_op, estimator), method="COBYLA", tol=1e-2)
    print(res)

# Configure Sampler
sampler = Sampler(mode=session)
sampler.options.default_shots = 10_000
sampler.options.dynamical_decoupling.enable = True

[36] ✓ 18m 49.5s Python
...
message: Optimization terminated successfully.
success: True
status: 1
  fun: 4.0118711779438584e+37
  x: [ 4.158e+00  1.573e+00  3.148e+00  1.577e+00]
  nfev: 26
  maxcv: 0.0

```

Figure 5.5 : Première exécution réussie (capture prise par Arianne Lemo)

Interprétation des résultats :

- Success : l'opération a été menée avec succès
- Status : – code représentant une optimisation réussie
- Fun – la valeur de la fonction après optimisation
- x: les valeurs des paramètres optimisés (γ et β)
- nfev : le nombre d'itérations effectuées avant de converger vers la solution optimale
- maxcv : représente les contraintes non respectées durant l'optimisation

Les paramètres optimaux du circuit obtenus à cette étape sont requis pour effectuer une seconde exécution du programme à travers la primitive *Sampler* de Qiskit, permettant d'obtenir le résultat final de l'exécution quantique, fondamental pour extraire les variables binaires relatives aux valeurs optimales des paramètres A , B , et m recherchées.

- La méthode consiste à assigner à l'aide de la fonction *assign_parameters()*, les paramètres optimaux trouvés des éléments du circuit à l'échantillonneur quantique, afin de déterminer la chaîne de bits qui représente la solution avec la probabilité la plus élevée correspondant au paramètre optimal final. Cette fonction prend en entrée les résultats de l'exécution précédente, et assigne au circuit *ansatz_isa* les valeurs exactes optimales des éléments γ et β à la place des valeurs initiales, retourne l'objet optimisé pour l'exécution sur un processeur quantique réel. La figure 5.6 permet de visualiser le circuit quantique optimisé avec les valeurs numériques réelles des paramètres. Une capture permettant de visualiser le circuit quantique sous forme de diagramme est représentée dans l'annexe 3.2, obtenue grâce à la fonction *draw()*.

```

optimized_circuit = ansatz_isa.assign_parameters(res.x)
print(optimized_circuit)

global phase: 3.5814

q_87 -> 0 | Rz(-pi/2) | Rz(11.458) | Rz(-pi) |»
q_94 -> 1 | Rz(-pi/2) | Rz(11.458) | Rz(-pi) |»
q_24 -> 2 | Rz(-pi/2) | Rz(11.458) | Rz(-pi) |»
q_93 -> 3 | Rz(-pi/2) | Rz(11.458) | Rz(-pi) |»
q_67 -> 4 | Rz(-pi/2) | Rz(11.458) | Rz(-pi) |»
q_19 -> 5 | Rz(-pi/2) | Rz(11.458) | Rz(-pi) |»
q_50 -> 6 | Rz(-pi/2) | Rz(11.458) | Rz(-pi) |»
q_74 -> 7 | Rz(-pi/2) | Rz(11.458) | Rz(-pi) |»
q_6 -> 8 | Rz(-pi/2) | Rz(11.458) | Rz(-pi) |»
q_31 -> 9 | Rz(-pi/2) | Rz(11.458) | Rz(-pi) |»
q_63 -> 10 | Rz(-pi/2) | Rz(11.458) | Rz(-pi) |»
q_118 -> 11 | Rz(-pi/2) | Rz(11.458) | Rz(-pi) |»
...
« q_55 -> 125 —————
«
« q_29 -> 126 —————
«

Output is truncated. View as a scrollable element or open in a text editor. Adjust cell output settings...

```

Figure 5.6 : Affichage des paramètres du circuit optimisé (capture par Arianne Lemo)

- Dans la suite du programme, l'algorithme prépare un état quantique afin de le mesurer pour obtenir une seule solution optimale après l'exécution (ayant la probabilité la plus élevée), une suite de valeurs binaires représentant les valeurs optimales des variables binaires q_A^i , q_B^j , et q_m^k définies dans l'équation EQUBO.
- Un *sampler* est initialisé, *Sampler(mode=backend)* pour simuler l'exécution du circuit quantique optimisé *optimized_circuit*, et le nombre d'itérations a été

défini à dix mille, suivi de la configuration des options pour la suppression ou l'atténuation des erreurs, ensuite le circuit quantique est exécuté sur un processeur quantique réel et les résultats de l'optimisation sont récupérés sous forme de chaînes binaires et stockés dans liste.

- *Difficulté rencontrée :*

Ayant utilisé une instance donnant accès aux ressources quantiques payantes, nous avons constaté après plusieurs minutes d'exécution, qu'un montant énorme d'utilisation s'élevant à 2652,09 \$CA s'affichait dans le compte, nous avons immédiatement interrompu l'exécution des calculs et n'avons pas obtenu le résultat final, mais le message d'erreur dans la capture ci-dessous.

```
KeyboardInterrupt                                Traceback (most recent call last)
Cell In[44], line 15
     13 pub= (optimized_circuit, )
     14 job = sampler.run([pub], shots=int(1e4))
--> 15 counts_int = job.result()[0].data.meas.get_int_counts()
     16 counts_bin = job.result()[0].data.meas.get_counts()
     17 shots = sum(counts_int.values())

File c:\Users\lemon\AppData\Local\miniconda3\envs\pyscf_env\lib\site-packages\qiskit_ibm_runtime\runtime_job_v2.py:136, in RuntimeJobV2.result(self, timeout, decoder)
    121 """Return the results of the job.
    122
    123 Args:
    124     (...)
    125     RuntimeInvalidStateError: If the job was cancelled, and attempting to retrieve result.
    126 """
    127 _decoder = decoder or self._final_result_decoder
--> 136 self.wait_for_final_state(timeout=timeout)
    137 if self._status == "ERROR":
    138     error_message = self._reason if self._reason else self._error_message

File c:\Users\lemon\AppData\Local\miniconda3\envs\pyscf_env\lib\site-packages\qiskit_ibm_runtime\runtime_job_v2.py:258, in RuntimeJobV2.wait_for_final_state(self, timeout)
    254         raise RuntimeJobTimeoutError(
    255             f"Timed out waiting for job to complete after {timeout} secs."
    256         )
    ...
--> 1132         return self._sslobj.read(len, buffer)
    1133     else:
    1134         return self._sslobj.read(len)

KeyboardInterrupt:
Output is truncated. View as a scrollable element or open in a text editor. Adjust cell output settings...
```

Figure 5.7 : *Le programme en cours d'exécution a été interrompu (capture prise par Arianne Lemo)*

En effet, l'instance utilisée affichait en temps réel l'évolution des calculs, les "Job ID" et les coûts d'exécution de chaque partie du programme comme présenté explicitement à l'annexe 3.3; de ce fait le montant affiché dans le compte ne reflétait guère le coût réellement pratiqué sur la plateforme. Une contestation de cette facture est en cours de traitement avec le service commercial d'IBM.

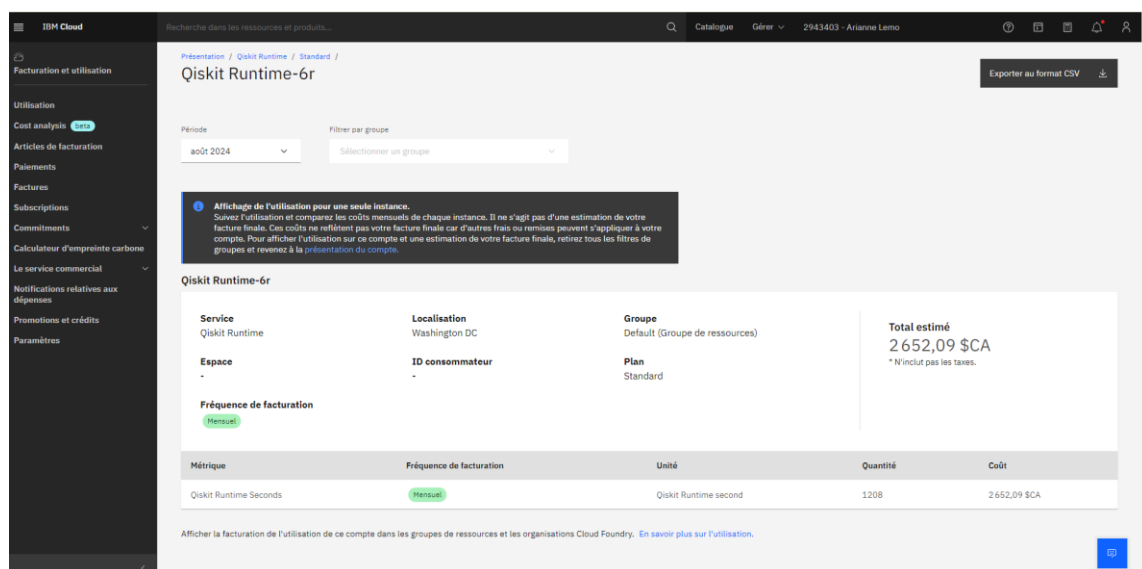


Figure 5.8 : Le coût d'utilisation de l'instance (capture prise par Arianne Lemo)

Néanmoins, les recherches menées jusqu'ici et les résultats précédemment obtenus peuvent nous permettre d'affirmer que cette méthode est prometteuse et fournit une alternative fiable et précise pour le calcul de la rigidité diélectrique d'un mélange gazeux grâce à l'algorithme quantique QAOA.

Le résultat attendu de cette exécution est un vecteur de valeurs binaires permettant d'extraire les valeurs optimales des qubits binaires q_A^i , q_B^j , et q_m^k . Ces valeurs pourront être remplacées dans les équations (5.11), (5.12) et (5.13) pour calculer les valeurs optimales de A, B et m.

5.4.3 *Les défis de la méthode proposée*

Comme toute méthode au stade de conception, la méthode proposée se heurte à des défis que nous pouvons regrouper sous trois catégories : les approximations des termes, la complexité de l'algorithme QAOA, les limitations matérielles comprenant le coût d'utilisation, le temps de calcul et les bruits et imperfections des qubits.

L'informatique quantique, bien qu'étant encore en plein développement, rencontre des contraintes matérielles qu'il faudrait observer et analyser afin de déterminer son utilité pour la résolution d'un problème donné. Il s'agit :

- Du bruit des qubits et des portes quantiques : durant l'exécution des calculs, les résultats peuvent être détériorés par la présence des bruits provenant des qubits. Le nombre de qubits des ordinateurs quantiques disponible pour les calculs est également limité à 127 qubits et 156 qubits.
- L'accès aux ressources : sur la plateforme d'IBM par exemple, l'accès gratuit aux processeurs quantiques est limité à dix minutes d'exécution des calculs

quantiques par mois. Et la file d'attente est assez longue selon la quantité de demandes soumises par les utilisateurs du monde entier.

- Le coût élevé de l'option payante : comme cela a été notre cas, nous avons sollicité l'ouverture d'une session pour l'exécution du programme, et le coût a été un obstacle nous contraignant à stopper l'exécution des calculs.
- Le temps d'exécution est élevé : cela est dû au nombre d'itérations également très élevé pour permettre à l'algorithme de converger vers la solution globalement optimale.
- La complexité de l'algorithme QAOA a bien été définie par Blekos, K. et al. (2024) [5], qui ont fait une analyse comparative des différents modèles d'adaptation QAOA, de ses forces et de ses faiblesses.

5.5 Vers le jumeau numérique du disjoncteur moyenne tension

La finalité de ce projet de recherche est de concevoir le jumeau numérique du disjoncteur moyenne tension VOX à travers la combinaison des techniques de pointe telles que la programmation quantique et l'apprentissage profond, couplées aux simulations numériques.

L'accès aux infrastructures de calcul quantique offre la possibilité d'exploiter le potentiel de cette technologie pour explorer une multitude de solutions possibles. Le but étant de concevoir un outil capable de reproduire fidèlement le processus de fonctionnement d'un disjoncteur moyenne tension, en modélisant les phénomènes

mécaniques, thermiques et diélectriques se produisant lors des opérations diverses. Cet outil serait capable de simuler le comportement en temps réel du disjoncteur, d'analyser le comportement de celui-ci sur une période donnée, et de prédire les évènements ou les pannes à venir. La conformité aux normes est primordiale afin qu'il soit opérationnel.

Cet outil permettrait de :

- Prédire les performances diélectriques des mélanges gazeux,
- Analyser plusieurs mélanges gazeux afin d'identifier la combinaison de gaz avec des proportions adéquates pour une isolation gazeuse efficace,
- Observer la détérioration des surfaces du disjoncteur afin de déterminer la vitesse d'usure des matériaux et de prédire la date de remplacement futur,
- Étudier et prédire les phénomènes pouvant se produire durant le fonctionnement en court-circuit et en régime permanent.

À l'état actuel, ces phénomènes sont décrits et simulés par différentes méthodes. Cependant, le jumeau numérique, aussitôt mis sur pied, permettrait de centraliser l'ensemble des opérations dans un seul modèle réunissant toutes les fonctionnalités du disjoncteur. Ces phénomènes sont complexes à modéliser et nécessitent l'utilisation de méthodes très avancées pour la mise en œuvre, sachant que les bénéfices incluraient la réduction des coûts d'exploitation et l'augmentation du rendement.

Chapitre 6 - CONCLUSION, DISCUSSIONS ET PERSPECTIVES

6.1 Conclusion

En observant l'évolution technologique prendre une ampleur exponentielle à l'ère du numérique, avec l'avènement de l'intelligence artificielle, de l'informatique quantique, des jumeaux numériques et bien d'autres techniques émergentes, nous nous sommes demandé comment ces progrès pouvaient impacter le domaine de l'énergie électrique.

Ainsi, face au problème de remplacement du gaz SF_6 dans les disjoncteurs moyenne tension VOX posé par CO7, un défi est apparu : trouver le moyen d'exploiter les nouvelles technologies et techniques émergentes pour apporter une solution à la recherche d'une alternative au SF_6 dans les appareils de moyenne tension.

C'est dans cette optique que nous nous sommes attelés à étudier dans ce projet de recherche, les différents outils de modélisation et de simulations pouvant nous permettre de concevoir une méthode capable de trouver un gaz ou un mélange de gaz respectueux de l'environnement, et susceptible de remplacer l'utilisation du SF_6 .

La méthode proposée dans cette thèse est une méthode innovante basée sur l'adaptation d'un algorithme quantique existant et permet d'explorer et exploiter les avantages de l'informatique quantique.

6.2 Discussions

L'algorithme adapté pour concevoir la méthode proposée est une variante de l'algorithme QAOA pour l'optimisation continue, car cette approche peut être utilisée pour l'optimisation des problèmes avec ou sans contrainte [117]. Cette variante a un meilleur rendement par rapport à n'importe quel algorithme classique proposé jusqu'ici, car elle permet de trouver en un temps amélioré des solutions approximatives à des problèmes dits NP-difficile [29] [128].

Bien que l'exécution de l'algorithme ait été interrompue, le développement montre qu'un résultat satisfaisant est attendu dans une exécution complète.

Cette étude est bénéfique pour l'avancement de la science car les essais numériques non aboutis, effectués sur de véritables processeurs quantiques ont mis en exergue le besoin de faire une évaluation rigoureuse, avec à la clé, une estimation des couts d'exécution d'un programme avant toute soumission. De plus, la faisabilité des mélanges gazeux optimisés par le calcul quantique a été établie, ainsi que les limites de l'algorithme initial, entraînant des ajustements à implémenter pour une meilleure convergence du modèle.

Il s'agit ici d'une méthode innovante, dans la littérature, nous n'avons pas trouvé de publications ayant trait à l'utilisation de l'algorithme quantique QAOA pour le calcul de la rigidité diélectrique d'un mélange gazeux. Les méthodes trouvées sont pour la plupart des modèles classiques. Cette méthode pourrait alors inspirer les

chercheurs à approfondir les calculs pour une représentation élargie des caractéristiques de mélanges gazeux.

Les forces de cette méthode se situent sur le niveau d'exploration de l'espace de solutions, en effet une méthode de calcul quantique atteint des espaces de solutions inatteignables avec le calcul classique.

Les faiblesses de cette méthode concernent le temps d'exécution relativement élevé, le coût d'accès aux infrastructures quantiques et les erreurs liées aux qubits.

6.2.1 Analyse des solutions aux défis rencontrés

Les défis rencontrés sont recensés avec objectivité dans le but de les surmonter et de conduire à des résultats satisfaisants, ainsi les solutions proposées sont les suivantes :

- L'utilisation des simulateurs quantiques à la place des processeurs quantiques réels est une excellente alternative temporaire, car elle permet de bénéficier de la puissance du calcul haute performance fourni par les supercalculateurs classiques tout en exploitant les propriétés de calcul quantiques, en attendant la stabilisation des processeurs quantiques et l'amélioration de l'accessibilité.
- Des collaborations enrichissantes entre les universités et les industries disposant de ressources matérielles quantiques peuvent être envisagées pour stimuler la recherche dans ce domaine prometteur.

6.2.2 *Impact potentiel du jumeau numérique du disjoncteur VOX*

Ce projet de thèse propose un cadre conceptuel en vue d'élaborer les bases pour la création du jumeau numérique d'un disjoncteur moyenne tension. La méthodologie présente une analyse détaillée et explore la technologie de l'informatique quantique, l'algorithme quantique développé est destiné à être intégré dans le programme visant à concevoir le prototype du disjoncteur. Les techniques implémentées dans ce travail offrent la possibilité de produire un outil dans lequel on pourra définir les critères essentiels au fonctionnement attendu, et le modèle numérique pourra :

- Reproduire le comportement diélectrique, thermique, mécanique, en régime permanent et en court-circuit du disjoncteur VOX,
- Générer différents scénarios en apprenant par la méthode d'apprentissage profond (Deep Learning),
- Faire des simulations de mélanges gazeux en accédant à différentes bases de données pour récupérer les propriétés de gaz de manière autonome, afin d'identifier le mélange adéquat pour le remplacement du SF₆
- Effectuer la maintenance du disjoncteur en temps réel
- Proposer des solutions
- Anticiper les défaillances et prédire les pannes avec la fonctionnalité d'alertes.

Cette thèse est la première étape d'un projet ambitieux et innovant, ayant une portée anticipative et un impact significatif dans le domaine de l'ingénierie électrique :

- Réduction des essais expérimentaux longs et coûteux,
- Aide à la conception de disjoncteurs plus performants et conformes aux normes environnementales,
- Impact sur la recherche environnementale en facilitant l'identification rapide des alternatives efficaces à l'isolation gazeuse au SF₆,
- Potentiel d'utilisation dans d'autres applications, comme les transformateurs et les appareillages isolés.

6.3 Perspectives et travaux futurs

Pour les recherches futures, il est important d'établir un plan de validation de la méthode proposée :

- Validation par des simulations numériques :

Comparer les résultats issus de l'exécution de l'algorithme aux résultats issus des simulations numériques à l'aide des outils de simulation tels que COMSOL Mutiphysics.

- Validation par des essais expérimentaux avec des éclateurs à sphères par exemple :

Les éclateurs à sphères sont des dispositifs simples permettant de mesurer la tension de claquage d'un gaz ou d'un mélange gazeux sous des conditions bien définies (pression, température, distance entre les électrodes).

La validation par des essais expérimentaux consistera à concevoir un plan pour tester quelques mélanges gazeux alternatifs au SF6 avec des éclateurs à sphères, mesurer les tensions de claquages pour différentes pressions et températures, comparer ces résultats expérimentaux aux résultats issus de l'algorithme.

- Validation par comparaison avec des données expérimentales disponibles dans la littérature scientifique pour montrer que l'algorithme est capable de reproduire les performances connues.

De plus, une amélioration de cette méthode pourrait être bénéfique pour approfondir les résultats attendus. Par exemple l'adaptation pour traiter de plus grands ensembles de paramètres.

L'exemple traité dans cette thèse devrait être étendu pour couvrir des mélanges de plus grande ampleur.

La création d'une interface graphique pour faciliter l'accessibilité à l'utilisateur et la visualisation des résultats,

L'extension de la méthode à plusieurs autres propriétés de mélanges gazeux,

De plus, l'informatique quantique est en perpétuel développement et n'est encore qu'à ses débuts, la méthode de traitement des erreurs liées aux qubits et des limitations de la précision numérique fait l'objet de nombreuses recherches et s'améliore au fil du temps pour réduire l'affectation de la précision des résultats, en particulier pour des calculs complexes.

L'étude effectuée dans cette thèse ouvre la voie à une liste de sujets de recherche pour aboutir à la création d'un jumeau numérique de disjoncteur moyenne tension.

Références

1. Asproni, L. (2019). *Quantum machine learning and optimisation: approaching real-world problems with a quantum coprocessor*. Politecnico di Torino.
2. Aubrun, G. Géométrie de l'intrication quantique.
3. Barnier, N., & Brisset, P. (1999). Optimisation par algorithme génétique sous contraintes. *Revue des Sciences et Technologies de l'Information - Série TSI : Technique et Science Informatiques*, 18(1), pp 1-29. <https://enac.hal.science/hal-00934534>
4. Bellofatto, L., & Sigismondi, P. (2023). *SF6 FREE Alternative—Study of Ternary Mix Natural Gas for Eletrical Insulation Purpose*. 2023 PCIC Energy Europe (PCIC Energy). IEEE.
5. Blekos, K., Brand, D., Ceschini, A., Chou, C.-H., Li, R.-H., Pandya, K., & Summer, A. (2024). A review on quantum approximate optimization algorithm and its variants. *Physics Reports*, 1068, 1-66.
6. Bouzy, B. (2005). Descente de gradient.
7. Boyd, S., Parikh, N., Chu, E., Peleato, B., & Eckstein, J. (2011). Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multipliers. *Foundations and Trends® in Machine learning*, 3(1), 1-122.
8. Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine learning*, 45, 5-32.
9. Bussetta, P., Marceau, D., & Ponthot, J.-P. (2009). *Résolution du problème de contact mécanique frottant: méthode du lagrangien augmenté adapté*. 9e Colloque national en calcul des structures.
10. Calasan, M., Aleem, S. H. A., & Zobaa, A. F. (2020). On the root mean square error (RMSE) calculation for parameter estimation of photovoltaic models: A novel exact analytical solution based on Lambert W function. *Energy conversion and management*, 210, 112716.

11. Change, I. P. O. C. (2001). Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. *Genebra, Suíça*.
12. Cluzel, T., Mazel, C., & Hill, D. R. (2020). *Découverte de l'informatique quantique, état de l'art et tests sur machine IBM*. LIMOS.
13. COMSOL. (2019). *COMSOL - Optimizing Instrument Transformers and Sensors with Multiphysics Simulation*. <https://www.comsol.fr/story/optimizing-instrument-transformers-and-sensors-with-multiphysics-simulation-80531>
14. Cui, Z., Lin, X., Xia, Y., & Xu, J. (2024). Interruption characteristic of 3% C5F100/97% CO2 gas mixture in a 40.5 kV circuit breaker. *Physica Scripta*, 99(8), 085513.
15. Dincer, S., Tezcan, S., Duzkaya, H., & Dincer, M. (2018). *Insulation and molecular properties of alternative gases to sf6*. 2018 2nd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT). IEEE.
16. Ding, C., Hu, X., & Gao, Z. (2022). Study on Relative Electrical Strength of SF 6 Substitute Gas Based on Density Functional Theory. *IEEE Access*, 10, 75395-75403.
17. Dreo, J., Petrowski, A., Siarry, P., & Taillard, E. (2003). *Métaheuristiques pour l'optimisation difficile*. EYROLLES. <https://hal.science/hal-00843020>
18. Droui, M., & El Hajjami, A. (2014). Simulations informatiques en enseignement des sciences: apports et limites. *EpiNet: revue électronique de l'EPI*, 164.
19. Duan, B., Yuan, J., Yu, C.-H., Huang, J., & Hsieh, C.-Y. (2020). A survey on HHL algorithm: From theory to application in quantum machine learning. *Physics Letters A*, 384(24), 126595.
20. Eckstein, J., & Bertsekas, D. P. (1992). On the Douglas—Rachford splitting method and the proximal point algorithm for maximal monotone operators. *Mathematical programming*, 55, 293-318.
21. Electric, G. *Dead Tank Circuit Breaker for 245 kV / 63 kA*. https://www.gegridolutions.com/hvmv_equipment/catalog/dt1-245-63.htm
22. Electric, S. *Sustainable growth with AirSeT MV innovation*. Repéré le juillet à <https://www.se.com/ca/en/work/products/product-launch/sf6free-mv-technology/>

23. Electric, S. (2011). *Dead Tank Outdoor Vacuum Circuit Breaker Type VOX* [Operating Instruction].
24. Electric, S. (2011). *Schneider Electric*. <https://www.se.com/ww/en/product-range/97196554-ecostruxure-machine-expert-twin/?N=3346888123>
25. Electric, S. (2021). *A Scalable digital twin software suite for your entire machine lifecycle*. <https://www.se.com/ca/fr/product-range/97196554-ecostruxure-machine-expert-twin/?N=3346888123#overview>
26. Electric., S. (2011). *Disjoncteur à vide extérieur type hvx-o2, Type: hvx-o2 26,4/28,4kv-1200a-12,5ka*, [Manuel d'installation, description de l'appareil].
27. Émery, M., & Zheng, W.-A. (2006). Fonctions convexes et semimartingales dans une variété. Dans *Séminaire de Probabilités XVIII 1982/83: Proceedings* (pp. 501-518). Springer.
28. Es-Sadek, M. Z. (2009). *Contribution à l'optimisation globale: approche déterministe et stochastique et application*. INSA de Rouen; Université Mohammed V-Agdal.
29. Farhi, E., Gamarnik, D., & Gutmann, S. (2020). The quantum approximate optimization algorithm needs to see the whole graph: A typical case. *arXiv preprint arXiv:2004.09002*.
30. Farhi, E., Goldstone, J., & Gutmann, S. (2014). A quantum approximate optimization algorithm. *arXiv preprint arXiv:1411.4028*.
31. Feliot, P. (2017). *A Bayesian approach to constrained multi-objective optimization Une approche Bayésienne pour l'optimisation multi-objectif sous contraintes*. Université Paris Saclay (COMUE). <https://theses.hal.science/tel-01629453>. Cnrs Univ-psud Sup_iss Staro Sup_signaux Centralesupelec Irt-systemx Univ-paris-saclay Univ-psud-saclay Centralesupelec-saclay Gs-engineering Gs-computer-science.
32. Franck, C. (06 September 2021). *Electric performance of new non-SF6 gases and gas mixtures for gas-insulated systems*. Repéré le 2022 à <https://www.cigre.org/article/GB/electric-performance-of-new-non-sf6-gases-and-gas-mixtures-for-gas-insulated-systems>

33. Gabay, D., & Mercier, B. (1976). A dual algorithm for the solution of nonlinear variational problems via finite element approximation. *Computers & mathematics with applications*, 2(1), 17-40.
34. Gao, Z., Luo, Y., Peng, R., Wang, X., Yu, P., & Zhou, W. (2023). Investigation on insulation properties of HFO-1336mzz (E) and N₂/CO₂ mixtures as SF₆ substitutes in gas-insulated electrical applications. *High Voltage*, 8(1), 48-58.
35. GE. (2019). *GE étend sa gamme de produits haute tension sans SF6 pour aider à réduire les émissions mondiales de gaz à effet de serre*. Repéré le novembre à <https://www.ge.com/news/press-releases/ge-etend-sa-gamme-de-produits-haute-tension-sans-sf6>
36. Grange, C., Poss, M., & Bourreau, E. (2022). An introduction to variational quantum algorithms on gate-based quantum computing for combinatorial optimization problems. *arXiv preprint arXiv:2212.11734*.
37. Habibie, M. I., Hamie, J., & Goursaud, C. (2022). *Comparaison des performances des algorithmes classiques et quantiques pour la détection dans un système NOMA*. GRETSI 2022-XXVIIIème Colloque Francophone de Traitement du Signal et des Images.
38. Hachimi, H. (2013). *Hybridations d'algorithmes métaheuristiques en optimisation globale et leurs applications*. INSA de Rouen; École Mohammadia d'ingénieurs (Rabat, Maroc).
39. Hagelaar, G., & Pitchford, L. C. (2005). Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models. *Plasma sources science and technology*, 14(4), 722.
40. Hayward, M. (2008). Quantum computing and shor's algorithm. *Sydney: Macquarie University Mathematics Department*, 1.
41. Hebert, J., Hratish, R., Gomes, R., Kunkel, W., Marshall, D., Ghosh, A., Doss, I., Ma, Y., Stedman, D., & Stinson, B. (2024). High-performance computing in undergraduate education at primarily undergraduate institutions in Wisconsin: Progress, challenges, and opportunities. *Education and Information Technologies*, 1-25.

42. Hering, M., Speck, J., Großmann, S., & Riechert, U. (2017). Influence of gas temperature on the breakdown voltage in gas-insulated systems. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 24(1), 401-408.
43. Hermosillo, V. F., Schirmer, M., Irwin, T., Darles, L., & Gregoire, C. (2023). *Development of an SF 6-free AC HV Dead-Tank Circuit Breaker Rated 145 kV, 63 kA*. 2023 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). IEEE.
44. Herrman, R., Lotshaw, P. C., Ostrowski, J., Humble, T. S., & Siopsis, G. (2022). Multi-angle quantum approximate optimization algorithm. *Scientific Reports*, 12(1), 6781. [https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41598-022-10555-8](https://doi.org/10.1038/s41598-022-10555-8)
45. Hopf, A., Britton, J. A., Rossner, M., & Berger, F. (2017). *Dielectric strength of SF 6 substitutes, alternative insulation gases and PFC-gas-mixtures*. 2017 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC). IEEE.
46. IBM. *Bringing useful quantum computing to the world*. <https://www.ibm.com/quantum-computing/>
47. IBM. *IBM Quantum Documentation - Aer Jobs*. Repéré le 06 aout à https://docs.quantum.ibm.com/api/qiskit/0.37/aer_jobs
48. IBM. *IBM Quantum Documentation - Algorithms*. Repéré le 06 aout à <https://docs.quantum.ibm.com/api/qiskit/0.40/algorithms>
49. IBM. *IBM Quantum Documentation - Qiskit's finance module*. Repéré le 06 aout à https://docs.quantum.ibm.com/api/qiskit/0.19/qiskit_finance
50. IBM. *IBM Quantum Documentation - Qiskit's optimization module*. Repéré le 06 aout à https://docs.quantum.ibm.com/api/qiskit/0.28/qiskit_optimization
51. IBM. *IBM Quantum Learning - Variational Algorithms*. <https://learning.quantum.ibm.com/course/variational-algorithm-design/variational-algorithms>
52. IBM. *Qiskit*. Repéré le 06 aout à <https://www.ibm.com/quantum/qiskit>
53. IBM. *Solve utility-scale quantum optimization problems*. Repéré le 25 aout à <https://learning.quantum.ibm.com/tutorial/quantum-approximate-optimization-algorithm>

54. IBM. (2023). *What is quantum utility?* Repéré le 27 janvier à <https://www.ibm.com/quantum/blog/what-is-quantum-utility>
55. IBM. (2024). *IBM étend Qiskit, le logiciel quantique le plus performant au monde.* Repéré le 24 septembre à <https://fr.newsroom.ibm.com/IBM-etend-Qiskit,-le-logiciel-quantique-le-plus-performant-au-monde#:~:text=Qiskit%20est%20d%C3%A9sormais%20une%20plateforme,la%20recherche%20d'un%20avantage>
56. IBM. (2024). *IBM Quantum Platform - Quantum processing units.* Repéré le 29 septembre à <https://quantum.ibm.com/services/resources>
57. IBM. (2024). *Simulating the universe's most extreme environments with utility-scale quantum computation.* Repéré le 08 août à <https://www.ibm.com/quantum/blog/hadron-dynamics-simulations#mark-spent-years-investigating-the-use-of-quantum-hardware-for-simulations-of-quantum-chromodynamics-qcd>
58. inc., C. T. (2021). *CNRL-EECOL, Proposal # S00198, Customer Document: 38kV dead tank switch, .*
59. Jiazhen, W. (1998). *The environmental influence on the product of arc-over SF₆/gas and human health protection.* Proceedings of 1998 International Symposium on Electrical Insulating Materials. 1998 Asian International Conference on Dielectrics and Electrical Insulation. 30th Symposium on Electrical Insulating Ma. IEEE.
60. John, G., & Owens, P. (2018). *Greenhouse gas emission reductions in power equipment through use of a sustainable alternative to SF₆.* 2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D). IEEE.
61. Kisi, Ö. (2004). Multi-layer perceptrons with Levenberg-Marquardt training algorithm for suspended sediment concentration prediction and estimation/Prévision et estimation de la concentration en matières en suspension avec des perceptrons multi-couches et l'algorithme d'apprentissage de Levenberg-Marquardt. *Hydrological Sciences Journal*, 49(6).
62. Li, H., Zhao, S., & Xiao, D. (2024). Investigation on Insulation strength and molecular structure of gas molecules based on DFT. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*.

63. Li, X., Lu, X., Li, B., Zheng, G., Li, L., Geng, Z., Shan, C., & Lin, X. (2016). *Research on dielectric characteristics of SF₆/N₂ gas mixtures based on FEM-FCT*. 2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). IEEE.
64. Li, Y., Wang, Y., Ding, W., Li, Z., & Zheng, Z. (2024). Breakdown Characteristics of C₅F₁₀O/N₂ Mixtures in a Uniform Field Under AC Voltage. *IEEE Transactions on Plasma Science*.
65. Li, Z., Bi, X., Gao, H., Zhang, L., Zhu, Y., Liu, J., & Li, S. (2024). DC Surface Flashover Performance of Epoxy Composites in C₅F₁₀O/CO₂ Eco-Friendly Gas. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*.
66. Ltd., A. T. (2013). *ABB review 3|13, Simulation*.
67. Lucas, B., Jaffali, H., & Nounouh, I. (2014). Principes fondamentaux de l'information quantique. *Université Technologique de Belfort Montbéliard, Printemps*.
68. Maculet, R., & Daniel, M. (2004). Conception, modélisation géométrique et contraintes en CAO: une synthèse. *Rev. d'Intelligence Artif.*, 18(5-6), 619-645.
69. Martin, B. A. (2023). *Solving Quantum Many-Body Problems on Quantum Computers*. Université Paris-Saclay.
70. Maryline Coquidé, J.-F. L. M. (2006). *Modélisation et stimulation*. (pp. 208). <https://ife.ens-lyon.fr/publications/edition-electronique/aster/RA043.pdf>
71. Mathworks. *Designed for the way you think and the work you do*. <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
72. MELCCFP. (2019). *MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES. Guide de quantification des émissions de gaz à effet de serre*. (pp. 107).
73. Microsoft. (2024). *Présentation d'Azure Quantum*. Repéré le 25 septembre à <https://learn.microsoft.com/fr-fr/azure/quantum/overview-azure-quantum>
74. Microsoft. (2024). *Qu'est-ce qu'Azure Digital Twins ?* <https://learn.microsoft.com/fr-fr/azure/digital-twins/overview>

75. Multiphysics, C. (2021). *Understand, Predict, and Optimize Real-World Designs, Devices, and Processes with Simulation*. https://www.comsol.com/comsol-multiphysics?gclid=Cj0KCQjwm9yJBhDTARIsABKICGZ6aJIOXbs0g-ZEWpbl6zMbklydFSnevJ4veQYy9KF8KdGLbB8S2TAaAohfEALw_wcB
76. Na, J. Y., Hwang, R., Cho, S. J., Song, T. H., & Lee, B. W. (2024). Breakdown Characteristics of a Fluoronitrile Mixture Gas According to Mixing Ratio and Oxygen Content for High-Voltage Power Equipment Application. *IEEE Access*.
77. Nielsen, M. A., & Chuang, I. L. (2010). *Quantum computation and quantum information*. Cambridge university press.
78. Nouvelle, L. U. (21 juin 2021). *Petit à petit, Schneider Electric élimine le SF6, puissant gaz à effet de serre, de ses produits*. Repéré le 21 Octobre 2021 à <https://www.usinenouvelle.com/article/comment-schneider-elimine-le-sf6-plus-puissant-des-gaz-a-effet-de-serre-de-ses-produits.N1106299>
79. Owens, J. G. (2016). *Greenhouse gas emission reductions through use of a sustainable alternative to SF 6*. 2016 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC). IEEE.
80. Park, C., Graber, L., Cheetham, P., Al-Taie, A., Telikapalli, S., & Pamidi, S. (2019). Versatile Paschen's model for the dielectric strength estimation of binary and ternary gas mixtures. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 26(5), 1569-1576.
81. Pernaumat, G. (2017). *Une approche multi-physiques et multi-échelles pour l'amélioration de l'efficacité de la modélisation et de la simulation des disjoncteurs haute-tension*. Ecole Polytechnique, Montreal (Canada).
82. Pharmaceuticals, Q. *Quantum Pharmaceuticals S.A.* Repéré le 25 septembre à <https://quantumpharmaceuticals.com/about/>
83. qiskit-community. *Qiskit Nature overview*. Repéré le 06 aout à <https://qiskit-community.github.io/qiskit-nature/>
84. Rabie, M., Dahl, D. A., Donald, S. M., Reiher, M., & Franck, C. M. (2013). Predictors for gases of high electrical strength. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 20(3), 856-863.

85. Rubio, J. d. J. (2021). Stability Analysis of the Modified Levenberg–Marquardt Algorithm for the Artificial Neural Network Training. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 32(8), 3510-3524. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2020.3015200>
86. Siarry, P. (2014). *Métaheuristiques: Recuits simulé, recherche avec tabous, recherche à voisinages variables, méthodes GRASP, algorithmes évolutionnaires, fournis artificielles, essais particuliers et autres méthodes d'optimisation*. Editions Eyrolles.
87. Siemens. (2022). *Goodbye SF6! Clean Air technology from Berlin*. Repéré le 29 septembre à <https://www.siemens-energy.com/global/en/home/stories/sf6-free-technology-from-berlin.html>
88. Site, A. *ABB - AirPlus™-Une alternative au SF6 pour l'isolement et la coupure dans les appareillages électriques*. https://library.e.abb.com/public/999db4ab2cab46dabbf005db3c43bbd5/68-72%202m540_FR_72dpi.pdf
89. Site, A. *Alliance - Accès à CVMFS*. https://docs.alliancecan.ca/wiki/Accessing_CVMFS/fr
90. Site, A. *Ansys - Ansys Maxwell - Low Frequency EM Field Simulation*. <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-maxwell>
91. Site, A. *Ansys - Build, Validate, Deploy and Scale Hybrid Digital Twin*. <https://www.ansys.com/products/digital-twin/ansys-twin-builder>
92. Site, A. *Ansys - Industries*. <https://www.ansys.com/fr-fr/industries>
93. Site, A. *Ansys - Simulate the Response of Materials to Short Periods of Severe Loading*. <https://www.ansys.com/products/structures/ansys-ls-dyna>
94. Site, A. (2017). *Alliance - Cedar*. <https://docs.alliancecan.ca/wiki/Cedar/fr>
95. Site, A. (2017). *Alliance - Graham*. <https://docs.alliancecan.ca/wiki/Graham/fr>
96. Site, A. (2021). *Ansys - Powering innovation that drives human advancement*. <https://www.Ansys.com/>

97. Site, A. (2021-2024). *Alliance - La Fédération - l'Alliance recherche numérique du Canada*. <https://alliancecan.ca/fr/services/calcul-informatique-de-pointe/la-federation>
98. Site, A. (2023). *Alliance - Calcul informatique de pointe*. <https://alliancecan.ca/fr/services/calcul-informatique-de-pointe>
99. Site, A. (2023). *Alliance - Sites d'hébergement nationaux*. Sites d'hébergement nationaux
100. Site, A. (2024). *Alliance de recherche numérique du Canada*. <https://alliancecan.ca/fr/services/calcul-informatique-de-pointe/la-federation>
101. Site, A. (2024). ALTAIR. <https://altairengineering.fr/multiphysics-applications/#:~:text=Altair%20propose%20un%20portefeuille%20de,a%C3%A9roacoustique%20et%20la%20simulation%20thermom%C3%A9canique>
102. Site, C. *COMSOL - Module AC/DC*. <https://www.comsol.fr/models/comsol-multiphysics/page/4>
103. Site, C. *COMSOL and Multithreading*. <https://www.comsol.fr/support/knowledgebase/1096>
104. Site, C. *Running COMSOL in Parallel on Clusters*. <https://www.comsol.com/support/knowledgebase/1001>
105. Site, C. (2021). *CMC - Bloc de calcul informatique pour CAO*. Repéré le Avril à <https://www.cmc.ca/fr/bloc-de-calcul-informatique-pour-la-cao/>
106. Site, C. (2021). *CMC - L'accès aux outils disponibles*. <https://www.cmc.ca/fr/outils-de-cad/>
107. Stadlbauer, T., Kramer, T., Kontelis, D., Ducimetière, L., Sermeus, L., & Woog, D. (2019). *SF 6 Gas Replacement in Pulsed High Voltage Coaxial Cables*. 2019 IEEE 20th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL). IEEE.
108. Sun, H., Liang, L., Wang, C., Wu, Y., Yang, F., & Rong, M. (2020). Prediction of the electrical strength and boiling temperature of the substitutes for greenhouse gas SF₆ using neural network and random forest. *IEEE Access*, 8, 124204-124216.

109. Tang, N., Nie, J., Liu, J., Sun, D., Li, L., Liu, Z., Zhang, M., Wang, F., Qu, Z., & Hu, Y. (2023). Study on the decomposition mechanism and insulation stability of HFO-1336mzz (E)/air mixtures as a new environment-friendly insulation medium under AC voltage. *AIP Advances*, 13(4).
110. Tanweer, M. R., Suresh, S., & Sundararajan, N. (2014, 28-29 Sept. 2014). *Human meta-cognition inspired collaborative search algorithm for optimization*. 2014 International Conference on Multisensor Fusion and Information Integration for Intelligent Systems (MFI). <https://doi.org/10.1109/MFI.2014.6997631>
111. Technologies, C. (2024). *VSB DISJONCTEUR EXTÉRIEUR*. <https://www.co7tech.com/vaccumstationbreaker>
112. Thiam, M. (2023). *Étude d'un nouveau système d'isolation gazeuse éco-efficace des disjoncteurs moyenne tension à coupure dans le vide*. Université du Québec à Trois-Rivières.
113. Tsusaka, A., Yokoi, T., Matsumura, T., Yukita, K., Nanahara, T., Goto, Y., & Yokomizu, Y. (2024). A Study on Dielectric Breakdown Properties of Hot CO₂/O₂/C₅F₁₀O Gas Mixture: Focus on Concentration Rate of O₂ Gas. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*.
114. Tuo, J., Liu, C., Zhao, T., Sun, Y., Wang, X., & Wang, X. (2023). An MD Simulation Study of Decomposition Characteristics of C₅F₁₀O/CO₂ Gas Mixture Under the Presence of Thermal and Electric Field. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 30(4), 1714-1724.
115. Van Brunt, R. J. (1996). *Present and future environmental" problems" with SF₆ and other fluorinated gases*. IEEE Conference Record-Abstracts. 1996 IEEE International Conference on Plasma Science. IEEE.
116. Vázquez-Acosta, E. N., Reyes-Barranca, M. A., Mendoza-Acevedo, S., & González-Vida, J. (2010). *Simplified modeling and simulation for physical systems circuit design on a multiphysics software exportable to a multi-domain platform*. 2010 7th International Conference on Electrical Engineering Computing Science and Automatic Control. IEEE.
117. Verdon, G., Arrazola, J. M., Brádler, K., & Killoran, N. (2019). A quantum approximate optimization algorithm for continuous problems. *arXiv preprint arXiv:1902.00409*.

118. Wang, F., Hu, D., Zhong, L., Liu, J., Chen, S., Tang, N., & Song, X. (2023). Surface Flashover Characteristics of Epoxy Resin in HFO-1336mzz (E)/CO₂ Gas Mixtures under negative DC Voltage. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*.
119. Wang, W., Yan, X., Liu, B., & Bian, Y. (2024). Investigation of Arc Dynamic Behavior Change Induced by Various Parameter Configurations for C4F7N/CO₂ Gas Mixture. *Energies*, 17(14), 3485.
120. Xiao, S., Wang, Y., Ren, C., Xia, H., Zhao, Y., Qin, J., Zhang, X., Luo, Y., & Li, Y. (2024). Assessment on gas-polyethylene terephthalate solid interface partial discharge properties of C4F7N/CO₂ gas mixture for eco-friendly gas insulating transformer. *High Voltage*, 9(1), 35-45.
121. Zhang, B., Deng, J., Wang, S., Cao, M., Zhou, R., Wang, G., Li, X., & Tang, N. (2023). Thermodynamic, transport, and radiation properties of HFO-1336mzz (E) mixtures as eco-friendly SF₆ alternatives. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 56(43), 435502.
122. Zhang, B., Wang, K., Yao, Y., Li, K., Li, X., & Tang, N. (2023). Insulation Characteristics of HFO-1336mzz (E) and its mixtures as eco-friendly alternatives to SF₆ for medium-voltage switchgears. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 30(2), 536-545.
123. Zhang, B., Wang, S., Li, X., Pang, Y., Tang, N., & Sun, D. (2023). Kinetic and Experimental Investigations on the Unimolecular Thermal Decomposition of an Eco-friendly Insulating Gas HFO-1336mzz (E). *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 62(48), 20644-20657.
124. Zhang, C., Shi, H., Cheng, L., Zhao, K., Xie, X., & Ma, H. (2016). First principles based computational scheme for designing new SF₆ replacements. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 23(5), 2572-2578.
125. Zhao, Y., Chen, X., & Li, J. (2017). TGMin: A global-minimum structure search program based on a constrained basin-hopping algorithm. *Nano Research*, 10, 3407-3420.
126. Zhong, Y., Yang, W., Xu, K., Chen, P., Li, X., & Yao, Y. (2024). *Study of the Dielectric Strength of SF₆-N₂ Mixtures at elevated temperatures*. 2024 7th

- International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE). IEEE.
127. Zupan, J. (1994). Introduction to artificial neural network (ANN) methods: what they are and how to use them. *Acta Chimica Slovenica*, 41(3), 327.
 128. Leeuwen, J. v. (1998). *Algorithms and complexity* (1. MIT Press paperback ed., 2. printing). Elsevier. <https://search.worldcat.org/fr/title/247934368>
 129. Bouquard, J. L., & DI, Y. L. (2016). *Nouvelles matheuristiques: implémentations et expérimentations*.
 130. Document interne CO7
 131. Technologies, C. (2024). *VOX DISJONCTEUR EXTÉRIEUR*. <https://www.co7tech.com/fr/vox>
 132. Pernaumat, G. (2017). *Une approche multi-physiques et multi-échelles pour l'amélioration de l'efficacité de la modélisation et de la simulation des disjoncteurs haute-tension* [Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/2849/>

Annexes

Annexe 1: Développement des équations

Annexe 1.1 :

$$\min_{A,B,m} Coût \approx \sum_{r=1}^n \left(\left(\frac{\alpha}{p} \right)_r^{observé} - (A_{min} + \Delta A \sum_{i=1}^{n_A} 2^{i-1} q_A^i) + (A_{min} + \Delta A \sum_{i=1}^{n_A} 2^{i-1} q_A^i) \cdot (B_{min} + \Delta B \sum_{j=1}^{n_B} 2^{j-1} q_B^j) \left(1 + \frac{\ln(\frac{p}{E_r})}{m_{min}} - \frac{\Delta m \ln(\frac{p}{E_r})}{m_{min}^2} \sum_{k=1}^{n_m} 2^{k-1} q_m^k \right) \right)^2 \quad (5.21),$$

$$\min_{A,B,m} Coût \approx \sum_{r=1}^n \left(\left(\frac{\alpha}{p} \right)_r^{observé} - A_{min} - \Delta A \sum_{i=1}^{n_A} 2^{i-1} q_A^i + \left(A_{min} \cdot B_{min} + A_{min} \cdot \Delta B \sum_{j=1}^{n_B} 2^{j-1} q_B^j + B_{min} \cdot (\Delta A \sum_{i=1}^{n_A} 2^{i-1} q_A^i) + (\Delta A \sum_{i=1}^{n_A} 2^{i-1} q_A^i) \cdot (\Delta B \sum_{j=1}^{n_B} 2^{j-1} q_B^j) \right) \cdot \left(1 + \frac{\ln(\frac{p}{E_r})}{m_{min}} - \frac{\Delta m \cdot \ln(\frac{p}{E_r})}{m_{min}^2} \sum_{k=1}^{n_m} 2^{k-1} q_m^k \right) \right)^2$$

$$\begin{aligned} \min_{A,B,m} Coût \approx \sum_{r=1}^n \left(\left(\frac{\alpha}{p} \right)_r^{observé} - A_{min} - \Delta A \sum_{i=1}^{n_A} 2^{i-1} q_A^i + A_{min} \cdot B_{min} + A_{min} \cdot \Delta B \sum_{j=1}^{n_B} 2^{j-1} q_B^j + B_{min} \cdot \Delta A \sum_{i=1}^{n_A} 2^{i-1} q_A^i \right. \\ + (\Delta A \sum_{i=1}^{n_A} 2^{i-1} q_A^i) \cdot (\Delta B \sum_{j=1}^{n_B} 2^{j-1} q_B^j) + A_{min} \cdot B_{min} \cdot \frac{\ln(\frac{p}{E_r})}{m_{min}} + A_{min} \cdot \frac{\ln(\frac{p}{E_r})}{m_{min}} \cdot \Delta B \sum_{j=1}^{n_B} 2^{j-1} q_B^j + B_{min} \\ \cdot \frac{\ln(\frac{p}{E_r})}{m_{min}} \cdot \Delta A \sum_{i=1}^{n_A} 2^{i-1} q_A^i + \frac{\ln(\frac{p}{E_r})}{m_{min}} \cdot (\Delta A \sum_{i=1}^{n_A} 2^{i-1} q_A^i) \cdot (\Delta B \sum_{j=1}^{n_B} 2^{j-1} q_B^j) - A_{min} \cdot B_{min} \cdot \frac{\Delta m \cdot \ln(\frac{p}{E_r})}{m_{min}^2} \\ \cdot \sum_{k=1}^{n_m} 2^{k-1} q_m^k - A_{min} \cdot \frac{\Delta m \ln(\frac{p}{E_r})}{m_{min}^2} \cdot \Delta B \sum_{j=1}^{n_B} 2^{j-1} q_B^j \cdot \sum_{k=1}^{n_m} 2^{k-1} q_m^k - B_{min} \cdot \frac{\Delta m \ln(\frac{p}{E_r})}{m_{min}^2} \cdot \Delta A \sum_{i=1}^{n_A} 2^{i-1} q_A^i \\ \left. \cdot \sum_{k=1}^{n_m} 2^{k-1} q_m^k - \frac{\Delta m \cdot \ln(\frac{p}{E_r})}{m_{min}^2} \cdot \Delta A \sum_{i=1}^{n_A} 2^{i-1} q_A^i \cdot \Delta B \sum_{j=1}^{n_B} 2^{j-1} q_B^j \cdot \sum_{k=1}^{n_m} 2^{k-1} q_m^k \right)^2 \end{aligned}$$

Annexe 1.2 :

$$\begin{aligned}
Quadratic = & \sum_{i=1}^{n_A} \sum_{j=0}^{n_B} \left(\Delta A \cdot \Delta B + \frac{\ln\left(\frac{p}{E_r}\right)}{m_{min}} \cdot \Delta A \cdot \Delta B \right) \cdot 2^{i-1} \cdot 2^{j-1} \cdot q_A^i \cdot q_B^j \\
& + \sum_{j=1}^{n_B} \sum_{k=0}^{n_m} \left(-A_{min} \cdot \frac{\Delta m \ln\left(\frac{p}{E_r}\right)}{m_{min}^2} \cdot \Delta B \right) \cdot 2^{j-1} \cdot 2^{k-1} \cdot q_B^j \cdot q_m^k \\
& + \sum_{i=1}^{n_A} \sum_{k=0}^{n_m} \left(-B_{min} \cdot \frac{\Delta m \ln\left(\frac{p}{E_r}\right)}{m_{min}^2} \cdot \Delta A \right) 2^{i-1} 2^{k-1} \cdot q_A^i \cdot q_m^k \\
& + \sum_{i=1}^{n_A} \sum_{j=0}^{n_B} \sum_{k=0}^{n_m} \left(-\frac{\Delta m \ln\left(\frac{p}{E_r}\right)}{m_{min}^2} \cdot \Delta A \cdot \Delta B \right) \cdot 2^{i-1} \cdot 2^{j-1} \cdot 2^{k-1} \cdot q_A^i \cdot q_B^j \cdot q_m^k
\end{aligned}$$

Annexe 2 : Captures provenant de ChatGPT

Annexe 2.1

Quelles sont les dernières solutions découvertes grâce à l'informatique quantique dans les domaines tels que la chimie et la science des matériaux, la santé et la recherche médicale, l'intelligence artificielle, la sécurité informatique, l'énergie ?



L'informatique quantique, bien qu'encore largement dans une phase de recherche et de développement, commence à montrer des applications prometteuses dans divers domaines. Voici quelques-unes des avancées et applications potentielles les plus récentes :

Chimie et Science des Matériaux

- **Simulation de molécules complexes** : IBM et d'autres ont utilisé des ordinateurs quantiques pour simuler des molécules comme le béryllium hydride (BeH_2) et le lithium hydride (LiH), ce qui était auparavant hors de portée pour les ordinateurs classiques. Ces simulations aident à comprendre mieux les réactions chimiques et pourraient accélérer la découverte de nouveaux matériaux et médicaments.
- **Catalyseurs et batteries** : La simulation quantique aide à explorer de nouveaux catalyseurs pour la production d'hydrogène, une étape clé pour les technologies énergétiques propres. En outre, elle permet d'étudier les propriétés des matériaux pour les batteries de nouvelle génération, optimisant la capacité et la durabilité.

Santé et Recherche Médicale

- **Conception de médicaments** : Des projets comme ceux menés par des entreprises telles que Quantum Pharmaceuticals utilisent l'informatique quantique pour modéliser les interactions médicament-cible à un niveau moléculaire, ce qui pourrait réduire le temps et le coût de développement des nouveaux médicaments.
- **Analyse génomique** : Les algorithmes quantiques pourraient accélérer significativement le séquençage génomique et l'analyse, améliorant les diagnostics et les traitements personnalisés.

Intelligence Artificielle

- **Optimisation des algorithmes d'apprentissage automatique** : L'optimisation des hyperparamètres, qui est souvent très coûteuse en termes de calcul, peut être accélérée par des algorithmes quantiques, potentiellement améliorant l'efficacité des processus d'apprentissage profond.
- **Réduction de dimension** : Des techniques comme l'analyse en composantes principales (PCA) quantique peuvent traiter des ensembles de données de dimensions extrêmement élevées plus efficacement que les méthodes classiques.

Sécurité Informatique

- **Cryptographie quantique** : Des technologies telles que la distribution quantique de clés (QKD) sont déjà déployées pour fournir des communications sécurisées inconditionnellement sûres. Des produits commerciaux sont disponibles et sont utilisés pour sécuriser des infrastructures critiques.
- **Développement de cryptosystèmes résistants aux quantiques** : Face à la menace que les ordinateurs quantiques représentent pour les cryptosystèmes actuels, le développement de nouvelles méthodes de cryptographie résistantes aux attaques quantiques est en cours.

Énergie

- **Gestion des réseaux énergétiques** : L'informatique quantique peut optimiser la distribution et la consommation d'énergie dans les réseaux intelligents, améliorant l'efficacité énergétique globale.
- **Fusion nucléaire** : Les simulations quantiques permettent de modéliser les plasmas de fusion, un aspect crucial pour le développement de réacteurs de fusion commercialement viables.

Conclusion

Bien que beaucoup de ces applications soient encore à un stade précoce, l'accélération de la recherche et le développement en informatique quantique promettent de transformer ces domaines dans les années à venir. Les partenariats entre les entreprises technologiques, les universités et les gouvernements jouent un rôle crucial dans la maturation de ces technologies et leur translation vers des applications pratiques et commerciales.

Annexe 2.2


Parmi les propriétés de mélanges gazeux suivants : la rigidité diélectrique, la permittivité, le facteur de dissipation, la toxicité, l'impact environnemental, la résistance à l'arc, stabilité thermique, stabilité chimique, quelles sont celles qui peuvent bénéficier d'un avantage quantique dans la méthode de calcul des propriétés d'un mélange gazeux, sur le calcul classique ?

Parmi les propriétés suivantes de mélanges gazeux : **rigidité diélectrique, permittivité, facteur de dissipation, toxicité, impact environnemental, résistance à l'arc, stabilité thermique, stabilité chimique**, voici celles qui nécessitent impérativement des calculs quantiques pour obtenir des résultats plus précis et détaillés, là où le calcul classique est moins performant :

1. Rigidité diélectrique

- **Avantage quantique** : La rigidité diélectrique dépend des interactions électroniques et des niveaux d'énergie dans les molécules. Les **simulations de chimie quantique** peuvent modéliser précisément ces interactions à l'échelle atomique, en prenant en compte les effets quantiques qui ne peuvent pas être modélisés avec précision par des méthodes classiques.
- **Pourquoi le calcul quantique ?** : Les systèmes quantiques, tels que ceux utilisés pour simuler la structure électronique et les effets de champ électrique, sont particulièrement efficaces pour comprendre la déformation électronique dans des gaz complexes soumis à des champs électriques élevés.

2. Permittivité

- **Avantage quantique** : La permittivité, liée à la polarisation d'un matériau sous l'effet d'un champ électrique, implique des interactions complexes entre les électrons et les molécules du mélange gazeux. Les **algorithmes quantiques**, qui prennent en compte les interactions à l'échelle des particules, peuvent fournir une modélisation  plus fine des processus de polarisation.
- **Pourquoi le calcul quantique ?** : Les calculs quantiques permettent une analyse précise des

- **Pourquoi le calcul quantique ?** : Les calculs quantiques permettent une analyse précise des changements d'états énergétiques et des comportements des électrons dans les champs électriques, particulièrement dans des systèmes moléculaires complexes.

3. Stabilité chimique

- **Avantage quantique** : La stabilité chimique nécessite la simulation des interactions entre molécules pour prédire la réaction et la dissociation des gaz dans diverses conditions. La **chimie quantique** est essentielle pour modéliser les interactions des électrons entre atomes dans des molécules complexes, ce qui est indispensable pour comprendre la réactivité chimique des gaz.
- **Pourquoi le calcul quantique ?** : La précision dans la simulation des orbitales électroniques et des interactions moléculaires est un avantage unique des calculs quantiques. Les méthodes classiques ne capturent pas suffisamment les effets subtils dans les réactions chimiques.

4. Stabilité thermique

- **Avantage quantique** : La stabilité thermique implique des simulations à l'échelle atomique des vibrations moléculaires et des transferts d'énergie, qui sont des phénomènes intrinsèquement quantiques. Les **simulateurs quantiques** sont plus précis pour calculer les états d'énergie et les transitions entre ces états dans des conditions de température variable.
- **Pourquoi le calcul quantique ?** : Les effets thermiques sur les molécules, notamment les transitions entre états de vibration et d'énergie, sont mieux compris grâce aux calculs quantiques qui tiennent compte de la mécanique quantique des systèmes moléculaires.

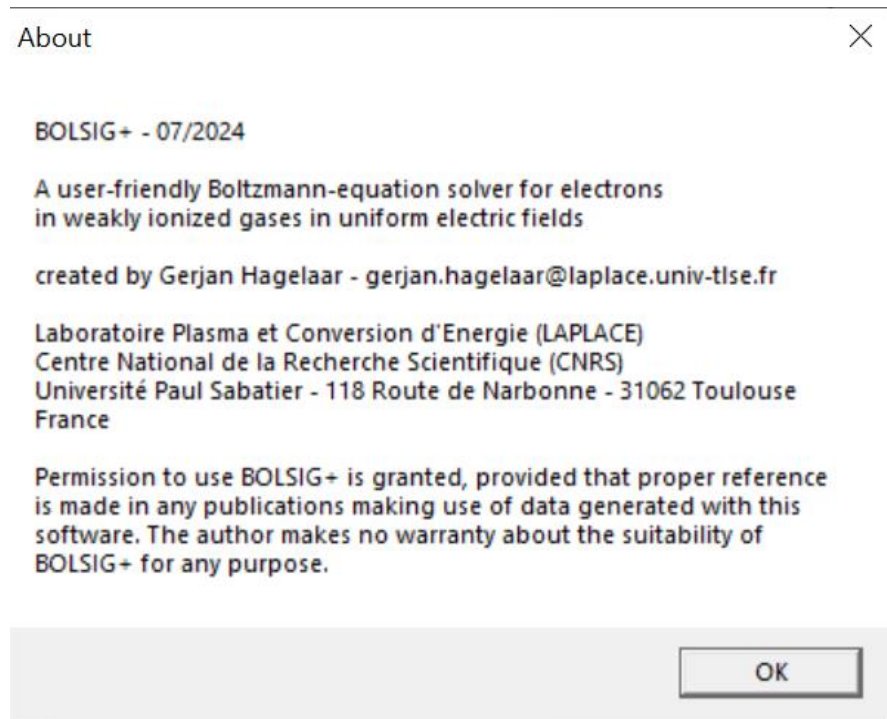
Conclusion :

Les propriétés de **rigidité diélectrique**, **permittivité**, **stabilité chimique**, et **stabilité thermique** sont celles qui bénéficient d'un avantage quantique dans le calcul des propriétés d'un mélange gazeux. Ces propriétés nécessitent des simulations précises à l'échelle atomique ou moléculaire, où les effets quantiques jouent un rôle crucial, ce qui rend le calcul quantique indispensable pour obtenir des résultats précis.

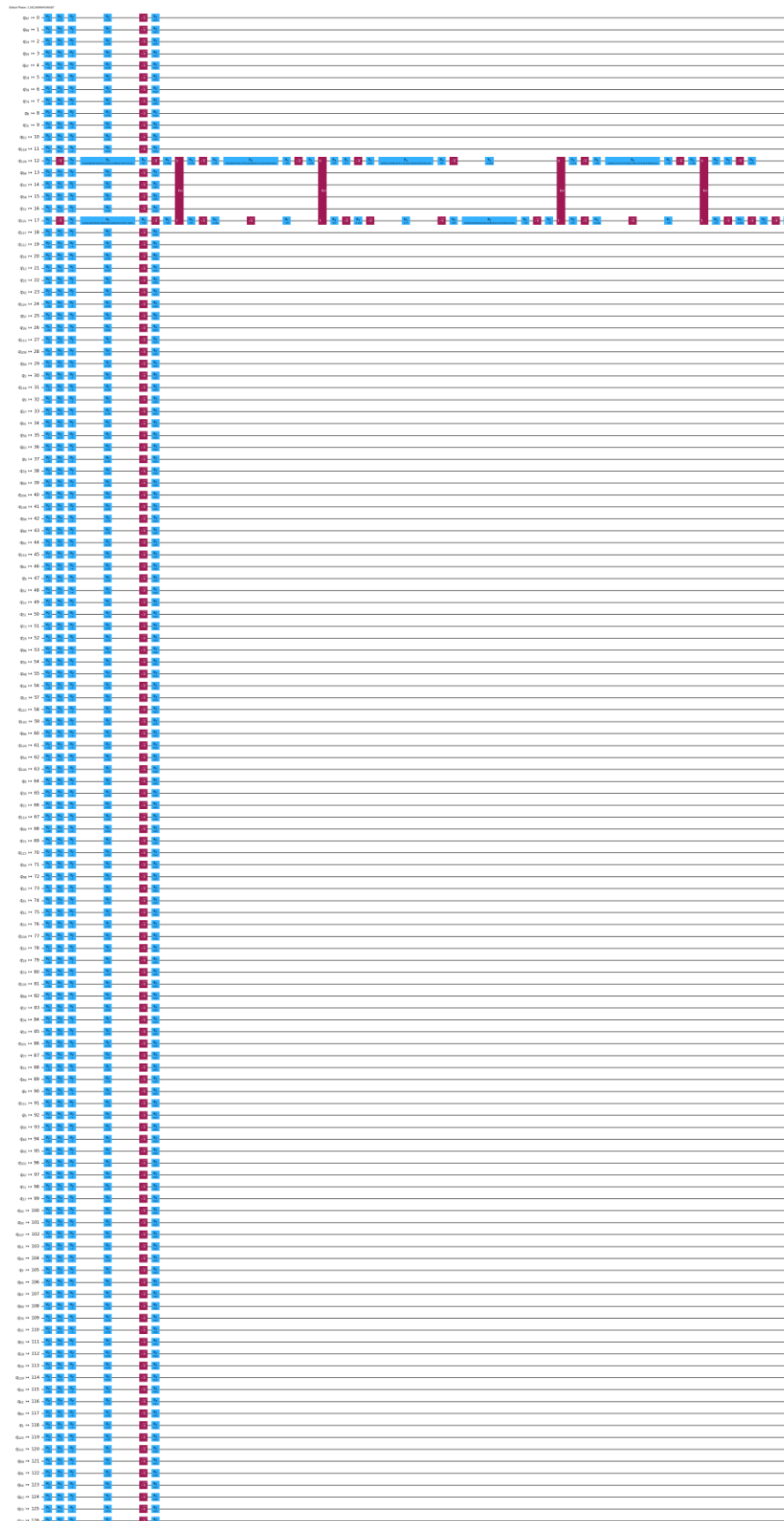


Annexe 3 : Outils de simulations

Annexe 3.1 : Logiciel Bolsig+



Annexe 3.2 : Circuit quantique



Annexe 3.3 : Coût d'utilisation

cloud.ibm.com/services/quantum-computing/cm%3A%3Apublic%3Aquantum-computing%3Aus-east%3A%3A2f6e7dc5e257e4ea29599a73d494db7%3AAb6dea472-5b1a-48bf-ac06-b1dc971490%3A%3A?panelid=jobs

IBM Cloud Search resources and products...

Resource list / Qiskit Runtime-6r ● Actif [Add tags](#) [Details](#) [Actions...](#)

Overview
Getting started
Jobs

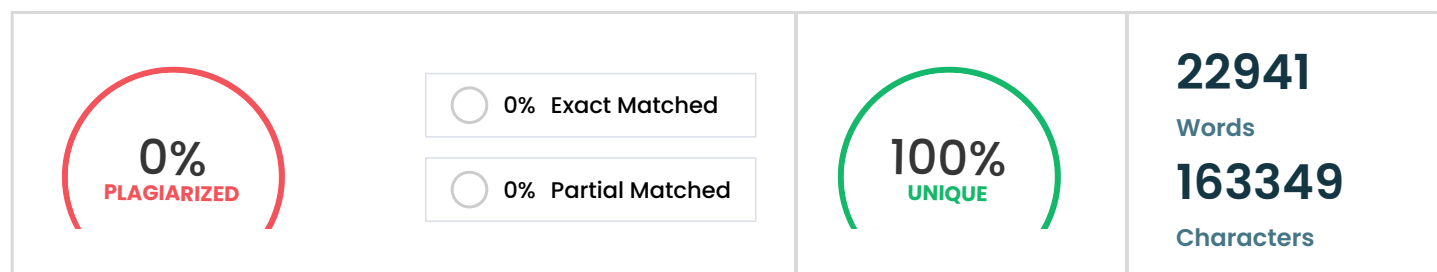
Search jobs by job Id, session Id, program or compute resource

<input type="checkbox"/>	Job Id	Session Id	Status	Created	Program	Compute resource	Usage	Cost (USD)	Tags
<input type="checkbox"/>	cr3tiagq56...		Completed	5 days ago	sampler	ibm_brisbane	7s	10 \$CA	
<input type="checkbox"/>	cr1uh6ph5...	42238aef-af...	Completed	8 days ago	estimator	ibm_brisbane	4s	9 \$CA	
<input type="checkbox"/>	cr1uh36n7bl...	42238aef-af...	Completed	8 days ago	estimator	ibm_brisbane	4s	9 \$CA	
<input type="checkbox"/>	cr1ug0racq9...	42238aef-af...	Completed	8 days ago	estimator	ibm_brisbane	4s	9 \$CA	
<input type="checkbox"/>	cr1uge5acq9...	42238aef-af...	Completed	8 days ago	estimator	ibm_brisbane	4s	9 \$CA	
<input type="checkbox"/>	cr1ug2mn7b...	42238aef-af...	Completed	8 days ago	estimator	ibm_brisbane	4s	9 \$CA	
<input type="checkbox"/>	cr1ufc85fv4...	42238aef-af...	Completed	8 days ago	estimator	ibm_brisbane	4s	9 \$CA	
<input type="checkbox"/>	cr1ufc85fv4...	42238aef-af...	Completed	8 days ago	estimator	ibm_brisbane	3s	7 \$CA	
<input type="checkbox"/>	cr1uftacq9...	42238aef-af...	Completed	8 days ago	estimator	ibm_brisbane	4s	9 \$CA	
<input type="checkbox"/>	cr1uen6n7bl...	42238aef-af...	Completed	8 days ago	estimator	ibm_brisbane	4s	9 \$CA	
<input type="checkbox"/>	cr1uec6n7bl...	42238aef-af...	Completed	8 days ago	estimator	ibm_brisbane	4s	9 \$CA	
<input type="checkbox"/>	cr1ue15acq...	42238aef-af...	Completed	8 days ago	estimator	ibm_brisbane	3s	7 \$CA	
<input type="checkbox"/>	cr1udmun7b...	42238aef-af...	Completed	8 days ago	estimator	ibm_brisbane	4s	9 \$CA	
<input type="checkbox"/>	cr1udbun7bl...	42238aef-af...	Completed	8 days ago	estimator	ibm_brisbane	3s	7 \$CA	
<input type="checkbox"/>	cr1ue6v5fv4...	42238aef-af...	Completed	8 days ago	estimator	ibm_brisbane	4s	9 \$CA	
<input type="checkbox"/>	cr1ud0o5fv4...	42238aef-af...	Completed	8 days ago	estimator	ibm_brisbane	4s	9 \$CA	
<input type="checkbox"/>	cr1ucitacq9...	42238aef-af...	Completed	8 days ago	estimator	ibm_brisbane	4s	9 \$CA	
<input type="checkbox"/>	cr1ucbmgh5...	42238aef-af...	Completed	8 days ago	estimator	ibm_brisbane	3s	7 \$CA	
<input type="checkbox"/>	cr1uc0lacq9...	42238aef-af...	Completed	8 days ago	estimator	ibm_brisbane	4s	9 \$CA	
<input type="checkbox"/>	cr1ubio5fv4...	42238aef-af...	Completed	8 days ago	estimator	ibm_brisbane	4s	9 \$CA	
<input type="checkbox"/>	cr1ubatacq9...	42238aef-af...	Completed	8 days ago	estimator	ibm_brisbane	4s	9 \$CA	
<input type="checkbox"/>	cr1ub0eph5...	42238aef-af...	Completed	8 days ago	estimator	ibm_brisbane	3s	7 \$CA	
<input type="checkbox"/>	cr1ualdacq9...	42238aef-af...	Completed	8 days ago	estimator	ibm_brisbane	4s	9 \$CA	
<input type="checkbox"/>	cr1usa6ph5...	42238aef-af...	Completed	8 days ago	estimator	ibm_brisbane	4s	9 \$CA	
<input type="checkbox"/>	cr1u9vmph5...	42238aef-af...	Completed	8 days ago	estimator	ibm_brisbane	3s	7 \$CA	
<input type="checkbox"/>	cr1u9ktacq9...	42238aef-af...	Completed	8 days ago	estimator	ibm_brisbane	4s	9 \$CA	
<input type="checkbox"/>	cr1u96ph5...	42238aef-af...	Completed	8 days ago	estimator	ibm_brisbane	3s	7 \$CA	
<input type="checkbox"/>	cr1u0ven7bl...	42238aef-af...	Completed	8 days ago	estimator	ibm_brisbane	4s	9 \$CA	

Éléments par page : 100 1-27 sur 27 éléments 1 Page 1 sur 1

Plagiarism Detector Report Page

Originality Report



COMPLETED

100%

Exclude URL

Content

2 Chapitre 1 – INTRODUCTION L’hexafluorure de soufre ou SF6 est un gaz aux propriétés remarquables, ce qui justifie son utilisation considérable dans l’industrie électrique. Mais, selon le [72], il s’agit d’un gaz à effet de serre (GES) 23.000 fois plus nocif que le CO2. De plus, sa très longue durée de vie dans l’atmosphère lui permet d’être listé par le protocole de Kyoto, durant la convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques en 1997, parmi les six GES pour lesquels l’utilisation doit être restreinte, il s’agit des gaz suivants : CO2, CH4, N2O, HFC, PFC et SF6. Le Groupe d’experts intergouvernemental sur l’évolution du climat (GIEC) a présenté les valeurs du potentiel de réchauffement planétaire (PRP) apparaissant dans le tableau ci-dessous. Tableau 1.1 : PRP pour les gaz à effet de serre [11]

Gaz	Formule	Deuxième rapport d’évaluation	Quatrième rapport d’évaluation
Gaz carbonique	CO2	1	1
Méthane	CH4	21	25
Oxyde de diazote	N2O	310	298
Hexafluorure de soufre	SF6	23 900	22 800
Trifluorure d’azote	NF3	17 200	
Hydrofluorocarbures (HFC)		Peut varier de 140 à presque 12 000	
Perfluorocarbures (PFC)		Peut varier de 50 à presque 15 000	
		Peut varier de 7 000 à près de 9 000	
		Peut varier de 7 000 à près de 18 000	

Source : . Guide de quantification des émissions de gaz à effet de serre, 2019, 107 p. 16

1.1 Problématique Le SF6 est un gaz réputé depuis environ 70 ans dans l’industrie électrique, plus précisément dans les appareillages électriques de haute et de moyenne tension pour son potentiel extraordinaire dans le rôle d’extincteur d’arc électrique et son intervention remarquable dans la conception d’une isolation gazeuse. Grâce à ses propriétés exceptionnelles, il occupe une position majeure, pour la stabilité du transport et de la distribution de l’énergie électrique dans le monde. Par ailleurs, étant classée parmi les gaz à effet de serre les plus dangereux pour notre environnement comme le montrent les données

comparatives présentées dans le tableau ci-dessus, l'utilisation du SF6 en quantité industrielle soulève de nombreuses interrogations, et de multiples conférences ont eu lieu dans le but de réguler son emploi. Mais les interrogations demeurent les suivantes : pourquoi malgré les innombrables ressources mises à la disposition des chercheurs dans le monde entier, une solution fiable, efficace, mais surtout universelle, tarde-t-elle à être trouvée ? Quel est l'état de l'avancée des recherches à ce jour, et vers quelle solution prometteuse devons-nous approfondir nos efforts pour un résultat significatif ? Pour répondre à ces questions, nous avons pour but de faire étude pratique sur différents gaz et matériaux, en faisant une combinaison de différentes propriétés de gaz, requises dans les applications diélectriques, afin de trouver une solution convenable pour un impact environnemental positif. Cependant, après plusieurs décennies de recherche, il est apparu qu'une telle combinaison de propriétés serait presque impossible à réaliser. Chaque nouveau composé étudié a jusqu'ici montré une certaine défaillance dans l'une des propriétés essentielles de performance, de sécurité ou d'environnement. Il s'agit d'un véritable défi. Notre étude se focalise sur le secteur de la moyenne tension notamment, les disjoncteurs (MT) où les alternatives sont plus avancées et devraient gagner du terrain plus efficacement.

1.2 Objectifs

Aujourd'hui, un gaz diélectrique doit également avoir des propriétés environnementales acceptables, en particulier un potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone qui tend à être nul et un potentiel de réchauffement global bien inférieur à celui du SF6 présentement utilisé [79]. Ainsi, l'objectif de cette thèse est de faire l'étude et proposer une solution non seulement écologique, à la fois efficace et à faible impact climatique, mais aussi, avec rigidité diélectrique très élevée, similaire aux performances du SF6 que possible. Dans cette étude, les propriétés isolantes du SF6 et de ses alternatives sont analysées et comparées, l'analyse se concentre sur les mélanges de gaz purs pour garantir le critère écologique de la solution. L'originalité de cette thèse réside dans la proposition d'une méthode numérique originale et innovante, tirant parti du calcul quantique et de sa capacité à explorer un espace de solution infiniment grand et inaccessible aux méthodes de calculs classiques, pour trouver la solution optimale environnementalement neutre dans la recherche d'une isolation adéquate des appareils électriques moyenne tension. Mes contributions visées se résument aux études approfondies menant vers la méthode optimisée de calcul à l'aide de la conception assistée par ordinateur des appareils électriques et de l'informatique quantique. En collaboration avec CO7 TECHNOLOGIES, nous nous sommes inspirés de la méthode de conception et du fonctionnement du disjoncteur VOX7 pour adapter et concevoir un algorithme d'optimisation capable d'estimer la force diélectrique des mélanges gazeux, pouvant servir à développer une nouvelle solution distinctive. Tout d'abord, sa réalisation requiert la construction de modèles numériques des différentes composantes, en l'occurrence celle du disjoncteur VOX7, dont la conception permettra l'exploration des différentes alternatives de gaz trouvées. De plus ce modèle devra respecter une multitude de paramètres tels que les températures et tensions appliquées ainsi que les différentes normes en vigueur (IEEE, CEI, CSA). Ensuite, l'accès aux ordinateurs quantiques réels via lesquels seront soumis les différents calculs est également requis. À la fin, les conclusions tirées contribueraient à un avancement significatif sur la question du remplacement de l'utilisation du gaz SF6 par un gaz ou mélange de gaz neutre et moins offensif.

1.3 Méthodologie

La recherche bibliographique approfondie commencera nos travaux, pour ensuite faire le choix de l'outil approprié qui nous permettra d'effectuer une analyse numérique appliquée aux disjoncteurs, à travers la création d'un algorithme capable d'estimer les propriétés des mélanges de gaz. Les résultats de compilation avec ajustement de paramètres de notre

modèle, nous mèneront à la phase d'optimisation et nous feront ressortir les différentes recommandations qui en découlent. La méthode utilisée débutera par étude du fonctionnement des disjoncteurs moyenne tension en entreprise, afin de découvrir et toucher du doigt les défis de l'utilisation du gaz SF6 comme gaz isolant et de trouver le moyen de le remplacer par une solution fiable environnementalement. Premièrement, nous allons définir le domaine de recherche, c'est-à-dire exposer la problématique de recherche traitée dans cette thèse, dans le but de mieux cerner l'objectif et le contenu, et définir les mots clés. Ensuite, nous ferons un étalage des banques de données utilisées pour étayer notre étude, puis des moteurs de recherches à notre disposition pour accéder à ces données. Nous aurons également besoin de faire le choix d'un outil qui nous aidera dans la gestion des références et de nos différentes sources d'informations. Ensuite, nous parlerons des articles que nous avons consultés et sur lesquels nous nous sommes appuyés durant notre étude. Nous ferons également le tour sur la question du développement industriel actuel. En bref, les objectifs spécifiques nécessaires à l'atteinte de l'objectif principal de cette thèse passent par les points suivants : Faire une étude et une exploitation des informations pertinentes et des ressources documentaires disponibles en entreprise, concernant les disjoncteurs moyenne tension fabriqués chez CO7. L'étude est portée sur trois classes de tension, soit : 15 kV, 27 kV et 38 kV. * Faire une étude des méthodes générales utilisées par les constructeurs pour la conception des disjoncteurs moyenne tension en nous servant des bases de données disponibles pour une comparaison. Il s'agit ici d'une étude de l'existant. * Faire une étude des normes et techniques utilisées par CO7 pour la conception des disjoncteurs moyenne tension en nous servant de la documentation et des archives de l'entreprise. * Faire le choix du modèle de disjoncteur à utiliser pour la suite, conjointement avec l'équipe CO7. Ensuite, faire une proposition d'une méthode pertinente et fiable, qui permettra à CO7 d'obtenir une solution en adéquation avec leur besoin, qui est d'adopter une nouvelle isolation gazeuse avec un gaz autre que le SF6 pour la fabrication des disjoncteurs moyenne tension selon les trois classes de tension. * L'élaboration de la solution débute par une conception, du modèle 3D numérique du disjoncteur VOX7 à partir des dessins fournis par CO7, ce modèle est soumis et validé à travers des bancs d'essai. Il s'agit ici de vérifier la géométrie pour générer les éléments finis, associer les propriétés de matériaux, attribuer les valeurs pour chaque paramètre, permittivité électrique, conductivité électrique, intensité, conditions aux limites (le potentiel dans différents points du disjoncteur), tout en faisant varier ces valeurs en fonction des tensions appliquées, au point d'obtenir le résultat idéal. La finalité de cette partie est d'obtenir le modèle numérique en élément fini fonctionnant parfaitement avec le gaz SF6. Cette partie est réalisée avec la contribution de Mactar Thiam, qui travaille en parallèle sur ce projet. * Ensuite, la conception de l'algorithme « SANS SF6 » à l'aide de la programmation quantique, permettant de calculer la rigidité diélectrique d'un mélange gazeux afin de déterminer sa capacité maximale. La méthode ici proposée s'appuie sur la loi de Paschen pour effectuer le calcul de la tension de claquage des mélanges de gaz, en passant par la résolution de l'équation de Boltzmann pour trouver les valeurs du coefficient d'ionisation réduit par la pression qui nous permet de trouver avec précision les valeurs des coefficients du mélange gazeux obtenu, intervenant dans l'estimation de la rigidité diélectrique. L'algorithme QAOA est utilisé ici pour son efficacité dans la résolution des problèmes combinatoires. * Effectuer les calculs sur de véritables ordinateurs quantiques pour garantir la précision des résultats attendus. Et les paramètres appliqués, la température, la pression, les valeurs de champs électriques sont choisis conformément aux valeurs exercées en production. * Le choix des gaz intervenants dans les mélanges : les gaz purs connus pour

avoir moins d'interactions chimiques ou moléculaires avec d'autres gaz. Ensuite, faire la proposition d'une simulation de la méthode proposée dans les conditions minimales requises afin de représenter numériquement les résultats obtenus tout en respectant les conditions et normes appliquées chez CO7. * La phase de simulation proposée pour la continuité des travaux : l'algorithme « SANS SF6 » soumis peut être utilisé pour estimer la rigidité diélectrique d'un gaz ou mélange de gaz. Une fois le mélange adéquat obtenu, le soumettre à la simulation multiphysique via un logiciel de simulation tel que COMSOL pour la validation numérique, avant le passage à la phase des tests expérimentaux. * La méthode, une fois validée par les résultats de simulation dans les conditions industrielles, va être présentée de façon à être utilisée dans les travaux de recherche et de développement.

Chapitre 2 – RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE APPROFONDIE

2.1 Détermination du domaine de recherche

Cette partie expose la problématique de recherche traitée dans cette thèse dans le but de mieux cerner l'objectif et le contenu. Ainsi nous offrons un cadre de réflexion synthétique sur les appareils électriques moyenne tension et leur fonctionnalité diélectrique mettant en exergue l'isolation gazeuse. Cette étude s'inscrit dans le cadre de la recherche d'une alternative à l'utilisation du gaz hexafluorure de soufre (SF6) dans les appareils électriques moyenne tension et plus précisément les disjoncteurs à isolation gazeuse. Ce gaz possède d'excellentes propriétés diélectriques, mais son potentiel de réchauffement global (PRG) est 23000 fois plus élevé que celui du dioxyde de carbone (CO2). Malheureusement, les gaz dits neutres tels que l'azote (N2) présentent une tenue diélectrique beaucoup plus faible que celle du SF6. Le but est donc de faire des essais diélectriques réalisés à travers la modélisation et la simulation de l'isolation gazeuse sous des conditions expérimentales se rapprochant au maximum du fonctionnement adopté en industrie, en utilisant des outils de modélisation de dernière génération, pour trouver un gaz ou une combinaison de gaz adéquat pour le remplacement total ou partiel du SF6.

2.2 Les banques de données

Pour la collecte d'informations, les banques de données utilisées pour étayer cette étude sont :

- * La bibliothèque numérique IEEE Xplore : pour la découverte et l'accès aux articles de revues, aux actes de conférence, aux normes techniques et aux documents connexes sur l'informatique, l'électrotechnique et l'électronique, et les domaines connexes.
- * La bibliothèque de l'Université du Québec à Trois-Rivières : qui dispose de beaucoup de documents et données que nous pouvons consulter à partir de l'outil de recherche Sofia.
- * Les Media\$ sociaux: il s'agit ici d'effectuer des recherches sur les sites internet des compagnies industrielles spécialisées dans l'appareillage électrique, qui communiquent également beaucoup d'informations sur leur page LinkedIn, Twitter, Facebook, YouTube et différents réseaux sociaux où nous pouvons trouver des professionnels qui partagent leurs découvertes sur les avancées du domaine tel que IEEE Collabratec.

2.3 Le moteur de recherche

Comme moteur de recherche, nous avons :

- * Google : le plus grand moteur de recherche des pages web.
- * Google Scholar : un service de Google permettant la recherche d'articles et de publications scientifiques.
- * Sofia : l'outil de recherche permettant de consulter le nouveau catalogue unifié de bibliothèques universitaires
- * Les moteurs de recherche internes particuliers à certaines banques de données privées telles que IEEE Xplore.

2.4 Les outils de gestion de recherche bibliographique

Pour gérer les références et nos différentes sources d'informations, nous avons une multitude de choix d'outils de gestion de recherche bibliographique disponibles tels que : Mendeley, une base de données regroupant les publications scientifiques des chercheurs des quatre coins de la planète, Endnote, Zotero, un logiciel gratuit multiplateforme, Refworks, logiciel de gestion bibliographique en ligne Mais nous avons choisi d'utiliser pour cette étude l'outil Endnote, car il demeure l'outil le plus

complet, celui qui bénéficie du plus vaste support et les modifications sont assez simples à faire. L'exportation est directe à partir de plusieurs bases de données ou alors importation manuelle à partir d'un fichier. De plus c'est accessible de manière gratuite via notre institution d'enseignement et aussi, c'est un outil bien adapté aux besoins de IEEE Xplore, la banque de données essentielle utilisée dans cette étude.

2.5 L'évolution des recherches sur les différentes alternatives pertinentes

L'objectif de cette thèse portant principalement sur l'isolation gazeuse, cette partie traite un ensemble d'articles proposant leurs propres méthodes d'évaluation des gaz alternatifs au SF₆ pour les applications d'appareils de moyenne tension tels que les disjoncteurs. La recherche est axée sur les propriétés diélectriques des gaz remplaçants potentiels. Le SF₆ a apporté de nombreux avantages comme la compacité, l'efficacité, la fiabilité parmi tant d'autres ; cependant, malgré ces propriétés très intéressantes, il représente, en fin de vie, un agent accélérant pour le réchauffement climatique, et pour cette raison, des candidats alternatifs font l'objet de nombreuses recherches. Dans cet optique, nous avons parcouru un ensemble d'articles proposant une méthode d'évaluation et de validation des candidats potentiels pour le remplacer, et donnant un aperçu des principales propriétés des candidats les plus prometteurs. En effet, la protection de l'environnement est au centre des préoccupations des politiques, des clients et des fournisseurs d'équipements de moyenne tension. Les industries et fabricants d'équipements électriques sont fortement interpellés par ce projet et ont publié de nombreux articles. De même, des chercheurs scientifiques ont été nombreux à se pencher sur le sujet. Nous vous présentons les articles les plus pertinents selon l'orientation de nos recherches, qui forment une base sur laquelle nous nous sommes appuyés pour débiter et mener à bien nos travaux. Ils ont été regroupés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2.1 : Les principaux articles pertinents pour la réalisation de cette étude

Titres et Auteurs	Description
C. Park, & al. (2019) [80]	Dans cet article, les auteurs proposent une version améliorée de la formule du coefficient d'ionisation réduit par la pression, en ajoutant un paramètre m à l'exposant de l'équation pour affiner le calcul des paramètres A et B servant à estimer la rigidité diélectrique des mélanges gazeux. Les tests se sont concentrés sur l'étude des mélanges de He, N ₂ et H ₂ à différentes proportions. C'est la principale inspiration de la méthode proposée dans cette étude.
Hagelaar, G & al. (2005) [39]	Le solveur Bolsig+ fourni dans cet article a permis d'avoir une base de données importante sur les coefficients de transport, et la fonction de distribution d'énergie des électrons pour différents gaz et mélanges gazeux. Les valeurs obtenues grâce à l'exécution de l'équation de Boltzmann étaient nécessaires pour effectuer nos calculs.
Blekos, K. & al. [5]	Cet article nous a fourni une analyse éclairée des informations pertinentes concernant l'algorithme QAOA, sa configuration, ses différentes variantes, ses forces et ses faiblesses, les cas d'utilisation pour la résolution des problèmes réels.
IBM Quantum Learning [53]	Cet article nous a fourni un modèle de configuration en résolvant un problème NP-difficile, le problème Max-Cut. Les informations contenues dans ces publications ont inspiré et guidé nos recherches, nous conduisant à la méthode d'optimisation proposée dans cette thèse. Pour avoir un aperçu de l'état actuel des progrès, nous avons recensé les toutes récentes alternatives gazeuses au SF ₆ , découvertes ou perfectionnées ces dernières années (2023 et 2024) et les avons regroupés de manière suivante :

2.5.1 Le mélange CO₂/O₂/C₄-FN pour un disjoncteur haute tension de type dead tank 145 kV, 63 kA

Les tests de claquages, les tests diélectriques, le BIL, les ondes hachées, la résistance au courant alternatif à pression atmosphérique, les tests d'endurance mécanique, les tests de commutation capacitive ont été effectués sur le disjoncteur rempli d'un mélange de dioxyde de carbone (CO₂), d'oxygène (O₂) et de fluoronitrile (C₄-FN). Les auteurs V. F.

Hermosillo et al. (2023) ont démontré que les performances de ce mélange gazeux dans le disjoncteur testé étaient similaires au fonctionnement avec le SF₆ dans les mêmes conditions appliquées. [43].

2.5.2 Le mélange HFO-1336mzz(E)/CO₂ dans les appareillages de commutation moyenne tension

De multiples articles [122], [121], [109], [34], [123], [118], publiés en 2023 et menant une étude sur les propriétés d'isolation des mélanges de HFO-1336mzz(E) avec des gaz neutres tels que le N₂ ou le CO₂ et également d'autres gaz fluorés ont été trouvés durant nos recherches, rendant ce composé particulièrement célèbre cette année. Il est considéré comme un gaz isolant potentiellement écologique, avec un faible potentiel de réchauffement climatique et une rigidité diélectrique élevée.

2.5.3 Le mélange gazeux C₄F₇N/CO₂

Selon Wang, Y et al. (2024), [119], [120], le mélange C₄F₇N/CO₂ est une alternative prometteuse, avec une rigidité diélectrique élevée, et une décomposition à un rythme modéré. Les tests ont été effectués en mettant une emphase sur les caractéristiques de claquage dans des environnements à haute pression, le CO₂ a été choisi pour diminuer la capacité de liquéfaction dans un mode de fonctionnement à haute tension. Les conclusions dénotent un bon rapport de mélange pour 5% de C₄F₇N et 95% CO₂ [76].

2.5.4 Le gaz C₅F₁₀O et ses mélanges

Les articles [113], [64], [14], [65] (2024) font état des études sur les mélanges binaires C₅F₁₀O/CO₂, C₅F₁₀O/Air, C₅F₁₀O/N₂ et les mélanges ternaires tels que C₅F₁₀O/CO₂/O₂, les propriétés isolantes de ces mélanges, la toxicité, la décomposition au contact des matériaux tel que le cuivre, le chemin de décomposition et le mécanisme de réaction sont analysés [114].

2.5.5 L'étude de la rigidité diélectrique des mélanges SF₆/N₂

Les caractéristiques d'isolation des mélanges composés de 20 % SF₆ - 80 % N₂, 28 % SF₆ - 72 % N₂, 40 % SF₆ - 60 % N₂ ont été analysées à des niveaux de températures et de pressions différentes grâce à la résolution de l'équation de Boltzmann pour obtenir la fonction de distribution d'énergie des électrons. La particularité de cette étude est qu'elle permet de fournir les données théoriques fondamentales de l'analyse du claquage post-arc dans le mélange binaire SF₆/N₂ à de différentes proportions [126].

2.5.6 Le mélange de gaz N₂/CO₂/O₂

Cet article étudie le cas d'un mélange ternaire de gaz neutres, selon L. Bellofatto et P. Sigismondi (2023), le meilleur rapport de mélange est 30% de O₂, 60 % de CO₂ et 10 % de N₂ ce qui souligne l'importance du CO₂ et de l'O₂ dans le mélange. Les conclusions stipulent qu'une analyse plus détaillée doit être effectuée pour comprendre si l'azote apporte une réelle valeur ajoutée au mélange ou non. De plus, ces résultats doivent être comparés aux performances d'un seul gaz, juste pour vérifier qu'un mélange est meilleur qu'un seul gaz (CO₂ ou N₂ purs, O₂ est exclu pour risque d'incendie) [4].

De toutes les observations faites lorsque nous accordons une attention particulière aux alternatives qui intéressent les chercheurs dans l'actualité scientifique, les aspects inquiétants qu'il faudrait prendre en compte concernant essentiellement la toxicité de certains produits de décomposition, le contenu des matériaux ayant des implications importantes sur l'impact de l'équipement, les problèmes de sécurité et de récupération de gaz en fin de vie. Toutes ces inquiétudes nous amènent à nous diriger vers la recherche d'une solution verte fiable, dépourvue de gaz fluorés, capable de garantir une rigidité diélectrique suffisante.

2.6 Le développement industriel

2.6.1 Les Normes

Les normes importantes à respecter minutieusement dans un environnement de recherche d'une alternative à l'isolation gazeuse dans les disjoncteurs moyenne tension sont les normes relatives à l'équipement, aux conditions de test de fonctionnement avant la mise en production. Ces normes sont recommandées pour assurer la fiabilité et garantir la sécurité et le bon fonctionnement du système (disjoncteur, isolation gazeuse). Il s'agit principalement des normes du code canadien de l'électricité ou CSA C22.1, de l'Institute of Electrical and Electronics Engineers

Standards Association (IEEE SA) par exemple IEEE Std C37.09 et de la Commission électrotechnique internationale (CEI), par exemple CEI62271-100 ou CEI 60298. Elles sont requises pour évaluer la conformité des tests tels que : les tests diélectriques, les tests de tenue en tension de fréquence industrielle, les tests de tenue aux chocs de foudre, les mesures des décharges partielles, les tests de courant de courte durée, les tests d'arc interne.

2.6.2 Quelques alternatives industrielles pertinentes proposées par les constructeurs

- * General Electric: Green Gas for Grid g3 Les appareils isolés au gaz chez GE sont remplis de g3, leur solution gazeuse sans SF6 fonctionnant dans leurs équipements haute tension, une alternative adoptée depuis 2014. Ils ont annoncé en 2019 sur leur site que l'utilisation du gaz g3 leur permettait de réduire le potentiel de réchauffement global (PRG) de plus de 99 % tout en conservant leurs performances techniques, un énorme avantage pour l'environnement. [35]
- * Schneider Electric : AirSeT Schneider Electric propose le gaz AirSeT pour le remplacement du gaz SF6 dans leur disjoncteur moyenne tension. Il s'agit d'un mélange de gaz à base d'air. [22]
- * ABB : AirPlus Après des années de recherche d'une alternative au SF6 dans les appareillages à isolation gazeuse (GIS) ABB offre un nouveau mélange gazeux, AirPlus avec des propriétés d'isolation et de coupure d'arc similaires au SF6. Sa composition varie selon le niveau de tension du GIS : le mélange fluorocétone, dioxyde de carbone et oxygène pour les appareils haute tension, et fluorocétone, azote et oxygène pour les appareils moyenne tension. [88]
- * Siemens : Leur premier disjoncteur g3 420 kV sans SF6 Siemens a développé un gaz alternatif appelé Clean Air pour remplacer le SF6 dans les équipements moyenne et haute tension. Clean Air est un mélange gazeux à base 20% d'azote N2 et 80% d'oxygène O2, et offre plusieurs avantages par rapport au SF6 [87].

Chapitre 3 – REVUE ET CHOIX DES OUTILS INFORMATIQUES

Ce chapitre représente le point central de départ de notre projet de recherche, car il fait l'étalage des outils techniques et des technologies de pointe de dernière génération, nous permettant de rechercher efficacement une solution isolante gazeuse, pour le remplacement du SF6 dans les disjoncteurs moyenne tension. Nous étudions ici plusieurs logiciels de simulations, les plateformes de calcul numérique à haute performance, l'informatique quantique et tout outil numérique innovant adéquat pour effectuer nos simulations. La précision des résultats obtenus dépend du choix des outils utilisés.

3.1 Description Les simulations numériques

reposent sur la représentation de modèles théoriques utilisant généralement la technique des éléments finis. Elles sont une adaptation numérique de la modélisation mathématique, et permettent d'étudier le fonctionnement et les propriétés d'un système modélisé afin de prédire son évolution. [18]. Ces simulations numériques occupent une place importante dans le processus de modélisation des entités réelles dans divers domaines tels que l'énergie, la chimie, la santé, la finance, la psychologie. Elles offrent la possibilité d'observer le fonctionnement d'un système difficilement calculable mathématiquement, et des avantages en termes de temps, de coût et de sécurité. Dans le cadre de cette recherche, la simulation numérique nous permettra d'étudier le comportement du disjoncteur moyenne tension VOX, plus précisément, le fonctionnement de l'isolation gazeuse. En résumé, les simulations numériques permettent de :

- * Représenter une entité physique réelle sous forme d'un objet virtuel,
- * Effectuer différentes catégories d'analyses avec en entrée des paramètres réels de l'entité physique, et après les calculs, l'émission en sortie des résultats qui se rapprochent de la réalité si le modèle numérique a été bien construit,
- * Gagner en temps, en ressources, et en sécurité.

3.2 Revue des logiciels informatiques

Il s'agit des différents logiciels de simulations numérique disponibles, capables simuler un disjoncteur, ainsi que les phénomènes relatifs à l'écoulement des fluides. Une analyse est effectuée sur plusieurs outils de simulation pour

sélectionner le logiciel adéquat. 3.2.1 ALTAIR Altair est un logiciel multiphysique de modélisation et simulation offrant une large gamme de logiciels avancés capable de modéliser divers phénomènes physiques tels que l'interaction fluide-structure, des corps flexibles, l'aéroacoustique et la simulation thermomécanique. Ce logiciel est disponible pour le calcul à haute performance, et permet de résoudre des problèmes d'ingénierie concrets de manière rapide et efficace [101]. Altair SimLab est un environnement de simulation multidisciplinaire basé sur les processus et permettant d'analyser avec précision la performance d'assemblages complexes. Il permet de configurer plusieurs phénomènes tels que la dynamique structurelle, thermique, électromagnétique des fluides. Ainsi la conception des modèles d'éléments finis et l'interprétation des résultats sont plus faciles et rapides. [101]. Les principaux avantages incluent la fourniture d'une interface simplifiée et conviviale, qui facilite l'accès aux ressources de calcul à haute performance pour soumettre et surveiller des calculs. L'importation facile de données et des temps d'exécution réduits qui ne nécessitent pas une intervention manuelle. Des outils complets pour l'analyse par éléments finis.

3.2.2 COMSOL Multiphysics COMSOL Multiphysics est une plateforme de simulation qui permet de minimiser une entité physique réelle, sous forme numérique et est utilisé dans des domaines comme l'ingénierie ou pour des applications spécialisées. Les avantages de ce logiciel :

- * Il offre la possibilité de modéliser différents phénomènes et de personnaliser les descriptions physiques du système en permettant à l'utilisateur de définir les équations et expressions associées au calcul à effectuer à travers l'interface graphique.
- * Il offre également une multitude de conditions de fonctionnement et d'effets physiques possibles.

3.2.2.1 Exécution COMSOL Multiphysics en parallèle COMSOL prend en charge deux modes de fonctionnement parallèle mutuels : les opérations parallèles à mémoire partagée et les opérations parallèles à mémoire distribuée nécessitant une licence de réseau flottant (FNL), ainsi que la prise en charge des clusters [103]. Les modes de fonctionnement pour les calculs avec COMSOL Multiphysics sont les suivants : à distance depuis l'interface graphique, à partir de la ligne de commande pour les appels par lots de cluster, dans une instance d'interface graphique distribuée, en mode client-serveur, à travers le Cloud Computing [104]. Dans le cadre de cette recherche, nous avons choisi d'explorer le mode de fonctionnement cloud Computing.

3.2.2.2 Exécuter COMSOL Multiphysics à travers le cloud computing Parmi les partenaires fournisseurs de cloud proposés par COMSOL, nous faisons le choix du partenaire l'Alliance de recherche numérique du Canada, car c'est un organisme qui travaille en collaboration avec des établissements d'enseignement postsecondaire et des partenaires régionaux afin de coordonner et de faciliter l'accès à la plateforme nationale de calcul informatique de pointe pour les travaux de recherche.

- * Accès à COMSOL Multiphysics via l'Alliance de recherche numérique du Canada

Après analyse de chacune des listes de logiciels proposées par chaque partenaire d'Alliance, nous constatons que seuls les partenaires Calcul Québec et SHARCNET nous offrent la possibilité d'utiliser COMSOL au travers des infrastructures de l'Alliance de recherche numérique du Canada.

a) Configuration à effectuer dans le cas du partenaire SHARCNET Il est à noter qu'il est absolument nécessaire d'écrire au support technique de l'Alliance : support@calculquebec.ca, pour qu'ils effectuent des configurations :

- * Demander à l'administrateur du serveur de Licence de l'UQTR dans notre cas de donner l'accès aux serveurs de l'Alliance.
- * Leur communiquer les informations à propos du serveur de licence : ports, IP, pour qu'ils permettent à leurs serveurs d'accéder à notre serveur de licence.
- * Ils nous font parvenir également le lien pour la procédure d'utilisation de COMSOL via les infrastructures de l'Alliance / SHARCNET

L'accès au serveur se fait comme suit : Figure 3.1 : Accès au serveur

Graham de l'Alliance Figure 3.2 : Connexion avec un compte autorisé b) Configuration à effectuer dans le cas du partenaire Calcul Québec Les répertoires de logiciels et de données offerts par Calcul Québec via CVMFS (CERN Virtual Machine File System). CVMFS étant préconfiguré pour nous, nous pouvons utiliser ses répertoires directement. CVMFS est une plateforme qui fournit l'accès à une gamme de logiciels distribués en accès sans modification. La procédure pour installer et configurer CVMFS sur notre propre ordinateur ou grappe est décrite sur la page de Calcul Québec ; nous aurons ainsi accès aux mêmes répertoires et environnements logiciels que ceux des systèmes de Calcul Québec. Pour installer CVMFS sur un ordinateur personnel, les conditions requises sont : un système d'exploitation compatible, le logiciel FUSE et environ 50 Go d'espace de stockage local [89].

3.2.2.3 Présentation du Module AC/DC de COMSOL Multiphysics

Les différents modules offerts par COMSOL Multiphysics sont : module AC/DC, module RF, module d'optique à ondes, module d'optique de rayon, module MEMS, module Plasma, modules semi-conducteurs. Le module qui nous sera utile pour nos travaux est le module AC/DC [102]. Les capacités multiphysiques du logiciel COMSOL permettent d'étudier l'impact d'autres effets physiques, tels que le transfert thermique, la mécanique des structures et l'acoustique, sur un modèle électromagnétique [102]. L'UQTR possède la version 6.1 du logiciel COMSOL et les mises à jour peuvent être appliquées directement lorsqu'elles sont disponibles.

3.2.2.4 Exemple de simulation effectuée avec COMSOL

Un exemple de simulation pratique est effectué par ABB avec le logiciel COMSOL : la simulation des champs électriques à la fois causés par les vides dans le moulage époxy et pendant le niveau d'impulsion de base (BIL), pour évaluer l'efficacité des couches d'isolation et les matériaux diélectriques protégeant le dispositif [13]. Ci-dessous l'illustration : Figure 3.3 : Multiples facteurs physiques influençant la conception d'un transformateur d'instrumentation. [102] Source : Brianne Christopher <https://www.comsol.fr/story/optimizing-instrument-transformers-and-sensors-with-multiphysics-simulation-80531> © 2024 by COMSOL.

Figure 3.4 : Le flux magnétique et la densité de courant du transformateur à noyau divisé [102]

Source : Brianne Christopher <https://www.comsol.fr/story/optimizing-instrument-transformers-and-sensors-with-multiphysics-simulation-80531> © 2024 by COMSOL

3.2.3 Ansys Multiphysic

Ansys Multiphysic est un logiciel similaire à COMSOL, car ils ont un même mode de fonctionnement et offrent la possibilité de simuler le même type système physique. De plus, le mode d'accès aux infrastructures de calcul haute performance est également identique. Cependant, après observation, nous constatons qu'Ansys fournit une bibliothèque plus vaste, et des outils plus orientés vers les applications du secteur de l'aéronautique, l'automobile ou la pétrochimie [92]. Ci-dessous un exemple d'utilisation pratique d'Ansys.

3.2.3.1 Exemple de simulation effectuée avec Ansys

Ansys Maxwell est un module d'Ansys désigné comme étant un solveur de champ électromagnétique permettant de simuler les machines électriques, les transformateurs, la charge sans fil, les loquets à aimant permanent, les actionneurs et autres dispositifs mécaniques électriques. Il est capable de simuler les champs magnétiques et électriques statiques, fréquentiels et variables en fonction du temps [90].

Figure 3.5 : Simulation de conception de moteurs de géométries 3D complexes [90]

Source : Marius Rosu (<https://www.ansys.com/blog/how-to-simulate-complex-electric-motors> consulté le 2021/10/04) © 2024 Copyright ANSYS, Inc Dans la figure 3.5, Ansys Maxwell nous montre comment simuler une géométrie de machine électrique complexe en 3D.

3.2.4 MATLAB

Nous avons la possibilité d'utiliser l'outil MATLAB, pour la construction d'un algorithme, car il offre une interface utilisateur pour les calculs mathématiques et pour l'automatisation des processus. l'avantage est qu'il offre une amélioration significative par rapport aux méthodes classiques

habituelles [71]. Figure 3.6 : l'outil MATLAB [71] Source : MathWorks, <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> © 1994-2024 The MathWorks, Inc.

3.2.5 Qiskit

Qiskit est un outil de développement quantique constitué de plusieurs logiciels pour la programmation et les simulations de divers phénomènes à l'aide de l'informatique quantique. Il diffère des logiciels précédents par sa particularité à s'intéresser uniquement au domaine quantique, plus précisément à la programmation quantique. Parmi ces outils logiciels figure le kit de développement logiciel (SDK) Qiskit et son environnement d'exécution Qiskit Runtime, grâce auquel nous pouvons exécuter des programmes sur des ordinateurs quantiques IBM.

3.2.5.1 Le kit de programmation Qiskit

Le principal SDK que nous propose IBM Quantum est le SDK Qiskit, un outil de développement open source permettant de travailler sur des ordinateurs et simulateurs quantiques, fournissant une large gamme de bibliothèques quantiques utiles selon les catégories du problème à résoudre. Figure 3.7 : Les bibliothèques offertes par Qiskit [52] Source : IBM Quantum <https://www.ibm.com/quantum/qiskit>

3.2.5.2 Présentation des différents modules offerts par Qiskit

En effet, le SDK Qiskit offre des bibliothèques permettant de créer une correspondance entre les problèmes rencontrés et les circuits quantiques, et de préparer leur exécution. Ces bibliothèques offrent également une assistance dans l'exécution, l'optimisation et l'harmonisation des charges de travail quantiques. À sa version Qiskit 1.1, les bibliothèques offertes sont affichées dans la figure 3.7 [52] :

- * Circuit library : pour construire et visualiser les circuits quantiques,
- * Transpiler : pour la synthèse, l'optimisation et la planification des circuits destinés aux QPU (Quantum Processing Units),
- * Primitives : Pour fournir des interfaces de programmation d'applications (API) permettant de définir les entrées et les sorties des QPU,
- * Quantum info library : Pour construire les opérateurs et analyser les sorties des requêtes primitives sur les QPU.

Les services offerts sont :

- * Qiskit Transpiler service : pour améliorer l'adaptation des circuits quantiques abstraits vers les circuits quantiques ISA
- * Qiskit Runtime Service : pour l'exécution des circuits quantiques ISA efficacement à l'aide des primitives avec des atténuations d'erreurs [52].

La plateforme d'IBM Quantum nous offre également des extensions de l'outil Qiskit pour résoudre des problèmes bien plus précis correspondant à des domaines différents tels que la chimie quantique, et exécuter les simulations quantiques des processus physiques réels fondamentaux. Nous pouvons citer :

- * Qiskit Aer : fournit des outils permettant de tester et compiler les circuits quantiques dans des environnements quantiques simulés [47].
- * Qiskit Nature : pour simuler les problèmes de mécanique quantique en sciences naturelles, dans le domaine de la chimie, des molécules et des matériaux [83].
- * Qiskit Algorithm : fournit une collection d'algorithmes prêts à l'emploi et regroupés par fonction logique pour des applications diverses telles qu'effectuer des recherches et explorer la résolution de certains problèmes spécifiques grâce aux ordinateurs quantiques [48].
- * Qiskit Optimization : pour le traitement des problèmes d'optimisation quantique tels que les programmes quadratiques à contraintes quadratiques, avec des variables binaires, entières et continues, ainsi que des contraintes d'égalité et d'inégalité [50].
- * Qiskit Finance : pour développer des applications financières à l'aide des programmes quantiques [49].

Pour la suite de nos travaux, le principal module sur lequel nous nous concentrons est le module Qiskit Algorithm, il fournit un algorithme pouvant nous aider à estimer la rigidité diélectrique d'un mélange gazeux, l'algorithme QAOA. Nous pouvons également combiner plusieurs autres modules pour plus d'efficacité selon les fonctionnalités que nous avons besoin d'explorer.

3.2.5.3 Exemple de simulation effectuée avec Qiskit

Implémentation de l'algorithme d'optimisation approximative quantique QAOA, une méthode itérative hybride quantique-classique, dans le contexte des modèles Qiskit. Cette partie

présente d'abord la résolution du problème Maximum-Cut (ou Max-Cut) [53], pour un petit graphe figure 3.8, puis passe à l'exécution à grande échelle figure 3.9. Toutes les exécutions matérielles se font sur les ordinateurs quantiques accessibles. Le problème Max-Cut est un problème d'optimisation difficile à résoudre, plus précisément, il s'agit d'un problème, dit NP-difficile. Cet exemple considère un graphe de nœuds connectés par des sommets et vise à le partitionner en deux graphes distincts de sorte qu'ils soient tous deux aussi grands que possible. En d'autres termes, l'objectif de ce problème est de partitionner les nœuds d'un graphe en deux ensembles de sorte que le nombre d'arêtes traversées par cette coupe soit maximisé.

Figure 3.8 : Exemple de partitionnement de nœuds à petite échelle [53] Source : IBM Quantum Learning <https://learning.quantum.ibm.com/tutorial/quantum-approximate-optimization-algorithm>

Figure 3.9 : Exemple de partitionnement de nœuds à grande échelle [53] Source : IBM Quantum Learning <https://learning.quantum.ibm.com/tutorial/quantum-approximate-optimization-algorithm>

3.3 Les infrastructures de calculs à haute performance

Cette partie regroupe l'ensemble des plateformes de calcul à haute performance ou de calcul avancé, nous permettant d'exécuter nos simulations sur des processeurs de dernière génération ultra performants, afin d'optimiser et d'accélérer les calculs et ainsi d'obtenir des résultats en temps record.

3.3.1 Alliance de recherche numérique du Canada

L'Alliance de recherche numérique du Canada, précédemment nommé Calcul Canada, est une plateforme qui permet de promouvoir l'innovation scientifique en offrant aux chercheurs l'accès à des infrastructures de Calcul en abrégé CIP. En collaboration avec cinq partenaires régionaux, Calcul Québec, Compute Ontario, ACENET, Groupe de l'IRN de la C.-B. et IRN des Prairies, elle fournit les services et l'infrastructure de recherche numérique (IRN) indispensables aux chercheurs canadiens et à leurs collaborateurs dans les domaines universitaires et industriels [97].

3.3.1.1 Rôle de l'Alliance de recherche numérique du Canada :

- * Contribution à l'obtention de brevets, l'accélération du progrès, la création d'entreprises et l'élaboration de nouvelles normes, politiques et règles;
- * Promotion de l'investissement en sciences et en innovation au Canada;
- * Stimulation de la compétitivité et du développement au Canada.

Les infrastructures de calcul, les processeurs et les systèmes sont hébergés dans différents sites : L'Université McGill héberge les systèmes Béluga et Narval, l'Université de Victoria héberge le système Arbutus, l'Université Simon-Fraser héberge le système Cedar, l'Université de Waterloo héberge le système Graham, et enfin l'Université de Toronto hébergeant le système de Niagara [100].

3.3.1.2 La puissance des supercalculateurs de l'Alliance

Le plus puissant Supercalculateur HPC chez l'Alliance est Graham tableau 3.1, disposant de 903 nœuds avec 32 cœurs chacun, et certains nœuds disposent d'une mémoire allant jusqu'à 2,6 To (2000G) et d'autres d'une capacité de stockage allant jusqu'à 11 To, plusieurs nœuds disposent des accélérateurs GPU NVIDIA de haute performance, comme les modèles P100 Pascal, V100 Volta et A100 Ampere. Il est suivi du supercalculateur Cédar présenté au tableau 3.2.

Tableau 3.1 : Supercalculateur Graham [95] Source : l'Alliance de recherche numérique du Canada <https://docs.alliancecan.ca/wiki/Graham/fr> © Digital Research Alliance of Canada 2021 – 2024

Tableau 3.2 : Supercalculateur Cédar [94] Source : l'Alliance de recherche numérique du Canada <https://docs.alliancecan.ca/wiki/Cedar/fr> © Digital Research Alliance of Canada 2021 – 2024

3.3.1.3 Utilisation des bases de données de l'Alliance

Les ressources de calcul sont allouées pour une utilisation aléatoire sans priorité à toute personne possédant un compte l'Alliance de recherche numérique du Canada actif. Tous les professeurs d'universités canadiennes ont la possibilité d'avoir un compte sur la plateforme de l'Alliance pour pouvoir parrainer les étudiants qui souhaitent avoir accès aux ressources. Pour un accès exclusif, la

procédure est différente. * Accès aux ressources Chacun des partenaires de l'Alliance prend en charge une liste de logiciels pour les utilisations distinctes selon le type de travail à effectuer. * Description de l'accès aux ressources de l'Alliance : Cas du logiciel COMSOL Via SHARCNET : * Créer un Compte sur la plateforme La création du compte est parrainée par un professeur pour les étudiants, ou alors par des personnes-ressources pour les autres groupes d'utilisateurs. * Accéder au processus d'installation du logiciel * Cliquer sur le lien d'accès à la liste des logiciels proposés par Sharcnet : <https://www.sharcnet.ca/my/software> et choisir le logiciel qui convient. Il est à noter qu'il est absolument nécessaire d'écrire au support technique de l'Alliance : support@calculquebec.ca pour qu'ils effectuent des configurations : * Demander à l'administrateur du serveur de Licence (de l'UQTR dans le cas d'espèce) de donner l'accès aux serveurs de l'Alliance. * Leur communiquer les informations à propos du serveur de licence : ports, IP, pour qu'ils permettent à leurs serveurs d'accéder à votre serveur de licence. * Cliquer sur le lien pour la procédure d'utilisation de COMSOL via les infrastructures de l'Alliance / SHARCNET et suivre les indications.

3.3.2 CMC Microsystems

Dans le même concept que l'Alliance de recherche numérique du Canada, CMC Microsystems est un organisme à but non lucratif aidant les chercheurs, étudiants ou en industries, à accéder aux infrastructures de calcul HPC. Il offre une interface pour faciliter l'accès aux logiciels, et crée le lien entre ces logiciels et les supercalculateurs. * Rôle de CMC Microsystems L'objectif de CMC est pratiquement le même que celui de l'Alliance, promouvoir la recherche, accélérer le progrès et les découvertes, offrir un environnement concurrentiel aux chercheurs canadiens pour augmenter leur compétitivité. La différence principale de CMC réside en la mise à la disposition des utilisateurs, une liste de logiciels accessibles à distance. Avec l'Alliance, il fallait installer le logiciel sur un ordinateur personnel ou professionnel avant de solliciter une ressource HPC, sur la plateforme de CMC, il suffit de sélectionner le logiciel sollicité et y accéder à distance pour effectuer des calculs, il n'est pas nécessaire de faire l'installation. * Accès aux ressources L'accès aux ressources requiert la création de compte avec un statut 100 % terminé, d'un abonnement et d'une licence appropriée. * Ressources disponibles chez CMC : CMC offre un calculateur disposant de 8 nœuds qui génère une puissance de 8,6 TFLOPS 8, ce qui signifie que le système est capable de traiter 8,6 trillions d'opérations en virgule flottante par seconde. Ci-après la configuration des nœuds [105] : * Chaque nœud utilise un double processeur Double UCT 14 cœurs 2,4 à 3,3 GHz * 4 nœuds sont équipés de 384 GO RAM * 4 nœuds sont équipés de 768 GO RAM * Le système utilise une interconnexion de nœud à débit amélioré à 100 Go EDR, * Un réseau de stockage puissant de l'ordre de 10 Go Ethernet CMC offre également l'accès à une longue liste de logiciels parmi lesquels [106] : COMSOL, Ansys, SolidWorks, et Altium.

3.3.3 Les avantages et défis

Hebert, J. et al. (2024) [41] ont fait une étude sur le progrès, les défis et les opportunités qu'offrent les infrastructures de Calcul Haute Performance à travers une enquête auprès de certains établissements et industries ayant utilisé les infrastructures HPC dans leur travail. Nous avons pu extraire des analyses des auteurs les aspects suivants concernant les industries, particulièrement : Les opportunités qu'offrent l'utilisation des HPC au sein des industries contactées résumées dans la figure 3.10, réside en : l'optimisation des processus commerciaux vient en tête avec 22,20% de vote, ensuite l'amélioration de la qualité des produits et services, et la bonification des résultats commerciaux qui ont tous les deux 20,60%, ensuite l'augmentation de la compétitivité envers la concurrence avec 15,90% et enfin l'avancement des recherches et des expériences avec 11,10%. D'autres avantages divers ont été mentionnés à hauteur de 6,30%, et certaines réponses ont mentionné qu'il n'y avait aucun bénéfice remarquable. Figure 3.10 : Les avantages de

l'utilisation des HPC dans les industries [41] Source : Hebert, J., & al. (2024). Cependant, les industries n'utilisant pas d'infrastructures HPC ont également été questionnées sur la raison ou les obstacles à l'utilisation de cette infrastructure, et les réponses qui en découlent résumées dans la figure 3.11, résident en grande partie au manque d'intérêt (35%), ensuite au manque d'expertise (22,50%), ensuite au manque de ressources internes et externes à 17,50% chacun, enfin pour d'autres raisons diverses. Figure 3.11 : Les défis de l'utilisation des HPC dans les industries [41] Source : Hebert, J., & al. (2024).

3.4 L'informatique quantique

Les ordinateurs quantiques ont connu ces dernières années une évolution significative, permettant de plus en plus de réaliser des opérations complexes, impossibles à exécuter sur ordinateurs classiques. Nous sommes rendus à une ère où l'un des défis principaux de la découverte informatique est d'obtenir un « avantage quantique » dans les domaines encore inexplorés via cette technologie, en exploitant la puissance des calculateurs quantiques dans la résolution des problèmes computationnels à une dimension surpassant la simulation classique par force brute [57][54]. En effet, l'utilité quantique ou l'avantage quantique sont des termes connus dans le jargon quantique qui désignent la capacité d'un ordinateur quantique à réaliser une tâche spécifique de manière plus efficace et plus rapide qu'un ordinateur classique, ou alors impossible à résoudre par ce dernier [54]. Plus simplement, c'est lorsqu'un ordinateur quantique dépasse un ordinateur classique dans l'exécution d'une tâche.

3.4.1 Principes fondamentaux de l'informatique quantique

Contrairement aux méthodes classiques qui utilisent des bits représentés par 0 ou 1, l'informatique quantique utilise des bits quantiques nommés couramment « qubits », représentés simultanément par 0 et 1. La différence entre les bits et les qubits est qu'un qubit n'a pas uniquement deux états, il peut se retrouver dans une multitude d'états autre que 0 ou 1, ou dans une combinaison d'état sous la forme représentée sous la forme $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, où α et β sont des nombres complexes. L'état d'un qubit est un vecteur dans un espace vectoriel complexe à deux dimensions. La notation $|0\rangle$ se lit « ket 0 » [77]. Les principes fondamentaux de l'informatique quantique sont : la superposition, l'intrication et la téléportation quantique.

3.4.1.1 La superposition

La superposition quantique signifie qu'un qubit peut être représenté par une combinaison linéaire de plusieurs états, par exemple, il peut être en même temps 0 et 1, contrairement à la physique classique qui stipule qu'une particule se retrouve dans un état précis à un instant t [12]. C'est cette particularité qui permet à un programme quantique d'explorer simultanément plusieurs solutions possibles pour un problème donné.

3.4.1.2 L'intrication

L'intrication quantique, encore appelée « entanglement » en anglais, est un phénomène de la physique quantique qui stipule que dans un groupe, les particules interagissent de telle sorte que l'état quantique de l'une d'elles ne peut être décrit indépendamment de l'état des autres même si elles sont distantes. Ce qui signifie que lorsque les qubits sont intriqués, leurs états deviennent corrélés, en application cette caractéristique permet de lier les informations entre elles dans un espace à grande échelle [2]. Cette particularité uniquement liée à l'informatique quantique augmente la puissance de calcul et la complexité des interactions entre les qubits.

3.4.1.3 La téléportation

La téléportation quantique consiste à transmettre d'un point de départ à un point d'arrivée, une information qu'elle est connue ou pas (l'état d'un qubit), sans transporter le système physique porteur du message (le qubit). Il s'agit d'une transmission sans transport de matière. Ce phénomène est possible grâce à l'intrication quantique, une propriété qui donne également accès au transfert plus abondant des informations qu'à travers des méthodes classiques [2].

3.4.2 Les algorithmes quantiques

Quelques algorithmes quantiques efficaces :

3.4.2.1 L'algorithme de Shor

L'algorithme de Shor [40] est un algorithme quantique capable de décomposer

théoriquement de très grands nombres en facteurs premiers beaucoup plus rapidement que n'importe quel algorithme classique. Cette caractéristique apporte une utilité quantique dans les domaines comme la cryptographie.

3.4.2.2 L'algorithme de Grover

L'algorithme de Grover est un algorithme quantique permettant de rechercher une valeur dans une base de données non structurée [37].

3.4.2.3 L'algorithme Harrow-Hassidim-Lloyd

L'algorithme Harrow-Hassidim-Lloyd (HHL) est un algorithme quantique qui offre la possibilité de résoudre des systèmes d'équations linéaires quantiques apportant un avantage quantique dans l'exécution de différentes tâches telles que les systèmes de recommandation, la régression linéaire, les machines à vecteurs de support [19].

3.4.2.4 L'algorithme ADMM Optimizer

L'algorithme ADMM (Alternating Direction Method of Multipliers) est un algorithme d'optimisation convexe très puissant, adapté à la résolution de problèmes de grande ampleur, il décompose un problème de minimisation sans contrainte en plusieurs sous-problèmes contraints. L'algorithme combine les avantages des méthodes de décomposition duale et des multiplicateurs de Lagrange, et offre ainsi une approche efficace pour résoudre des problèmes complexes [7].

3.4.2.5 L'algorithme QAOA

L'algorithme QAOA (quantum approximate optimization algorithm), traduit par Algorithme d'Optimisation Approximative Quantique est un algorithme hybride quantique-classique introduit par Edward Farhi, Jeffrey Goldstone, et Sam Gutmann en 2014, conçu pour résoudre les problèmes d'optimisation combinatoire [30].

3.4.3 Domaines d'application

Plusieurs domaines profitent ou pourraient profiter de l'avantage quantique, pour apporter des avancées considérables et non négligeables à la recherche continue d'amélioration et de perfectionnement. Certains d'entre eux observent des progrès impressionnants, et d'autres affichent des perspectives encourageantes. À la question posée à ChatGPT, à savoir : « Quelles sont les dernières solutions découvertes grâce à l'informatique quantique dans les domaines tels que la chimie et la science des matériaux, la santé et la recherche médicale, l'intelligence artificielle, la sécurité informatique, l'énergie ? », une réponse a été générée et les captures sont données en Annexe 2.1. Ci-dessous un résumé instructif basé sur les réponses de ChatGPT et classé selon les domaines d'application. Des vérifications ont été également effectuées sur des sources en ligne pour se rassurer de l'exactitude des informations.

3.4.3.1 La chimie et la science des matériaux

- * La simulation de molécules complexes : les ordinateurs quantiques permettent de simuler les propriétés de molécules complexes impossibles à simuler avec des ordinateurs classiques, afin de comprendre leurs réactions chimiques, bénéfiques pour la recherche des médicaments et matériaux. Exemple : IBM.
- * Catalyseurs et batteries : l'exploration de nouveaux catalyseurs grâce aux simulations quantiques.

3.4.3.2 La santé et la recherche médicale

- * La découverte de nouveaux médicaments : la modélisation des interactions médicament-cible grâce à l'informatique quantique. Exemple : Quantum Pharmaceuticals [82].
- * L'amélioration des traitements médicaux : la personnalisation des traitements médicaux en fonction de l'analyse génétique et des simulations personnalisées du comportement des médicaments dans le corps humain.

3.4.3.3 L'intelligence artificielle

- * L'optimisation des algorithmes d'apprentissage automatique : Le machine Learning quantique amélioré grâce à l'optimisation des hyperparamètres.
- * La réduction de dimension : traitement plus efficace d'un ensemble de données de très grandes dimensions grâce aux méthodes quantiques.

3.4.3.4 La sécurité informatique

- * La cryptographie et la distribution des clés quantiques pour garantir des communications plus sûres et sécurisées.
- * Développement de nouvelles méthodes de cryptographie pouvant contrer les attaques potentielles provenant des ordinateurs quantiques.

3.4.3.5 L'énergie

- * Gestion des réseaux énergétiques : Le domaine énergétique pourrait exploiter l'informatique

quantique pour équilibrer la production et la consommation de l'énergie, intégrer les énergies renouvelables et minimiser les pertes. * Le nucléaire : le développement de réacteurs de fusion avec une fiabilité pour la commercialisation.

3.4.4 Les plateformes d'accès aux systèmes quantiques

Il s'agit des plateformes fournissant un accès aux infrastructures de calcul quantique. Nous pouvons citer entre autres :

3.4.4.1 IBM Quantum

IBM se déclare comme étant le leader mondial de l'informatique quantique. Les solutions proposées par IBM Quantum :

- * Des outils et des logiciels : pour la création visuelle des circuits quantiques dans IBM Quantum et des éléments appelés « Composer », pour exécuter ces circuits quantiques sur de vrais systèmes quantiques.
- * Des systèmes et simulateurs : les services IBM Quantum nous offrent à travers leur service Cloud des systèmes quantiques, des simulateurs, des environnements d'exécution et outils de programmation quantique optimisés.
- * La figure 3.12 ci-dessous présente la liste des processeurs quantiques disponibles chez IBM, nous notons que les processeurs les plus puissants de cette liste sont « ibm_strasbourg » et « ibm_bruxelles » avec tous les deux un score de 37K CLOPS (Circuit Layer Operations Per Second), ce paramètre représente la mesure de la vitesse avec laquelle le processeur quantique exécute des opérations quantiques dans les couches. De plus leur capacité à effectuer des calculs quantiques complexes est de l'ordre de 127 qubits [56].

Figure 3.12 : La capacité des processeurs quantique d'IBM [56] Par IBM quantum Plateform <https://quantum.ibm.com/services/resources>

La mesure du taux d'erreur est également un paramètre important à observer lorsqu'on veut exécuter un circuit quantique sur un processeur, car il permet d'évaluer l'efficacité et la précision des opérations entre qubits. Un trop grand risque d'erreurs peut fausser les résultats de calcul.

a. Environnement IBM Quantum

il est possible d'étudier les principes fondamentaux de la mécanique quantique, des circuits quantiques, des qubits et des portes utilisées pour effectuer des opérations sur chaque qubit. Après avoir créé un compte sur la plateforme IBM Quantum, nous avons exécuté un exemple de Code : un Hamiltonien simple pour un oscillateur harmonique discret et simuler son évolution temporelle en utilisant le solveur de matrices exponentielles. Figure 3.13 : Exemple de code Qiskit dans IBM Quantum

Et comme résultat : le code nous a permis de tracer l'évolution temporelle de la probabilité d'occupation, figure 3.14, pour chaque niveau d'énergie dans l'oscillateur discret. Le graphique montre comment l'état se déplace dans le potentiel parabolique au fil du temps. Figure 3.14 : Résultat du code Qiskit compilé dans IBM Quantum

3.4.4.2 Azure Quantum

* Microsoft AZURE Nous avons également la possibilité d'utiliser l'environnement Azure Quantum, le service d'informatique quantique cloud Azure fourni par Microsoft pour effectuer des simulations quantiques. En effet, Azure quantum est une plateforme qui offre l'interface utilisateur pour la création des programmes et circuits quantiques, et permet de faire le choix entre plusieurs fournisseurs qui hébergent des ordinateurs quantiques, pour l'exécution du circuit sur de véritables ordinateurs en production. Ces fournisseurs sont : IONQ, PASQAL, Quantinuum, et Rigetti. Les outils de programmation offerts par Azure Quantum sont [73] :

- * Q# : est un langage de programmation quantique open source permettant d'expérimenter des algorithmes quantiques,
- * Python + Q# : Pour écrire le programme Python et appeler les opérations Q#,
- * Python + Qiskit : Il est également possible d'exécuter un circuit quantique Qiskit sur IonQ, Quantinuum ou Rigetti à la place d'IBM, à travers Azure Quantum.
- * Python + Cirq : Il est aussi possible d'exécuter des circuits quantiques Cirq en ciblant les processeurs quantiques IonQ ou Quantinuum à la place de Google.

Figure 3.15 : Un espace de travail Azure Quantum Source (Capture d'écran) : <https://portal.azure.com/#home>. Pour des essais nous avons créé un espace de travail

Quantum dans lequel nous avons testé la construction de notre algorithme sans SF6. Figure 3.16 : Mon espace de travail Azure Quantum pour l'algorithme SANS SF6 Source (Capture d'écran) : <https://portal.azure.com/#home>.

3.4.4.3 Google Quantum AI

Google Quantum AI est également l'une des plateformes que nous avons étudiées pour évaluer ses performances afin de faire le choix de l'environnement à utiliser pour nos travaux. Il offre une interface permettant de créer et programmer des algorithmes quantiques grâce à son langage de programmation Cirq. Il est similaire à Azure Quantum avec un même mode de fonctionnement.

3.5 Le choix des outils de simulation

Pour faire un choix approprié, nous avons étudié dans ce chapitre un ensemble d'outils de simulations, et au regard des informations recueillies durant cette étude, nous avons sélectionné ceux pouvant répondre à nos attentes, grâce aux moyens qu'ils mettent à notre disposition, leur accessibilité, et leur conformité aux normes (exemple : la norme ISO 9001 permettant de certifier qu'un logiciel respecte les exigences réglementaires). Notre approche nécessite l'utilisation d'un environnement quantique pour une meilleure exploration des différentes solutions possibles, et dans cette optique, nous avons fait les choix suivants :

- * Le choix de l'environnement de programmation approprié est porté sur IBM Quantum, grâce aux avantages qu'il propose en termes d'accès aux ressources physiques. De plus, il fournit un ensemble de bibliothèques quantiques pertinentes et nous offre la possibilité d'interagir directement avec les ordinateurs quantiques IBM réels sur lesquels effectuer nos calculs.
- * L'outil de programmation choisi est Qiskit, ce choix est directement lié au choix de l'environnement, et, cet outil nous permet de bénéficier amplement de l'avantage qu'offre le calcul quantique. Le logiciel choisi est celui qui répond à nos attentes en termes de performances pour les calculs complexes et de créativité.
- * L'outil pour effectuer les simulations 3D post-traitement choisi est COMSOL Multiphysics, cet outil permettra faire les simulations nécessaires pour la validation numérique de la solution isolante gazeuse.

Chapitre 4 – MÉTHODES D'ANALYSE APPLIQUÉES AUX DISJONCTEURS

Ce chapitre décrit l'ensemble des méthodes d'analyse appliquées aux disjoncteurs.

4.1 Description des systèmes physiques

Les systèmes de disjoncteurs extérieurs offrent de multiples avantages pour chaque application, de l'optimisation du réseau électrique aux applications de réseau intelligent. Une nouvelle gamme de disjoncteurs pour réservoirs fermés basée sur une vaste expérience dans les technologies clés de la conception d'interrupteurs à vide, de l'actionneur et de la commande, de la construction soudée étanche à vie, et de la profonde compréhension des problèmes de résistance aux défauts d'arc interne et de leurs solutions. Cela a permis aux nouveaux disjoncteurs VOX de combiner les dernières technologies et les exigences techniques les plus récentes avec une solution rentable, créant ainsi la nouvelle génération de disjoncteurs et de réenclencheurs.

4.1.1 Présentation des disjoncteurs extérieurs de types « Dead tank » VOX

Le VOX est un disjoncteur à vide isolé au gaz SF6 stocké dans un réservoir à cuve métallique extérieur. Il est conçu pour répondre aux exigences des normes CEI en termes de test des appareils de commutation et de commande sous enveloppe métallique dans des conditions d'arc électrique dû à un défaut interne. Les disjoncteurs VOX, construits pour des installations extérieures, sont conçus pour des tensions ne dépassant pas 40,5 kV, pour notre cas la tension nominale du réseau de distribution peut aller jusqu'à 38 kV. Ils sont équipés d'un mécanisme à ressort en spirale ayant la capacité de fonctionner en O-C-O, c'est-à-dire ouverture-fermeture-ouverture, sur trois pôles. Il s'agit d'un disjoncteur extérieur de type réservoir fermé, Figure 4.1, monté au sol, avec comme solution d'isolation le gaz SF6 sous basse pression, logé dans un boîtier en acier inoxydable entièrement soudé, et étanche à vie [23] [131].

Figure 4.1 : Disjoncteur CO7 VOX de type Dead Tank 38 kV Source : photo prise par moi-même dans les

locaux de CO7 Technologies inc. à Lachine, Québec, Canada. Le VOX a été conçu et testé pour répondre aux exigences des normes applicables CEI, BS, AS, ANSI, IEEE, GOST et GB. [131] Les caractéristiques et avantages du VOX * L'unité VOX est soumise à un test d'arc interne conformément à la norme CEI 60298 incluant la classe d'accessibilité A. Il présente un système de commutation déphasée pour une production décentralisée, il convient pour la commutation de réenclenchement automatique à grande vitesse et pour la commutation de batteries de condensateurs de classe recommandée C2 [23] * Le VOX combine les avantages de l'isolation au SF6 basse pression, offrant les avantages d'un appareillage de commutation GIS, ainsi que la commutation sous vide respectueuse de l'environnement. [131] * Le boîtier conforme aux normes ANSI/IEEE est « testé contre la pluie » (ANSI/IEEE C37.20.2), l'entretien et la maintenance requis pour cet appareil sont minimaux, il présente un faible encombrement contrairement aux disjoncteurs de distribution électrique de plus 25,8 kV avec une endurance mécanique supérieure à 10 000 opérations au courant nominal. [23]

4.1.2 Présentation des disjoncteurs extérieurs VSB

Les disjoncteurs extérieurs de sous-stations électriques VSB de CO7 Technologies sont isolés à l'air et combinent la technologie éprouvée des disjoncteurs HVX de moyenne tension de Schneider Electric et une conception individuelle particulière de pointe [111].

Figure 4.2 : Disjoncteur CO7 VSB 38 kV Source : photo prise par moi-même dans les locaux de CO7 Technologies inc. Le principe fonctionnel de base est réalisé par un arbre principal entraîné en rotation par un ressort spiral, fournissant l'énergie mécanique nécessaire aux cycles de fermeture et d'ouverture du disjoncteur [26]. Les disjoncteurs VSB sont conçus conformément aux normes IEEE / ANSI pertinentes pour les disjoncteurs intérieurs et extérieurs et sont caractérisés par une construction résistante aux arcs électriques de type 2B sur les modèles de 1200A à 2500A [111]. Les caractéristiques et avantages du VSB [111] : Ce type de disjoncteur est capable de résister à la corrosion, les armoires sont chauffantes pour éviter la condensation avec chauffages supplémentaires pour -50 °C, la ventilation est filtrée, et ils sont conçus conformément aux normes CSA testés contre la pluie. De plus, le niveau d'encombrement est réduit pour les disjoncteurs communs.

4.1.3 Les différents types d'essais

Les types d'essais pertinents à effectuer avant d'adopter une nouvelle solution d'isolation pour la mise en production d'un modèle de disjoncteur VOX sont :

- * Test de montée en température : Le test d'élévation de température est considéré comme un essai type, pour les équipements moyenne tension ou pour le développement de produits, afin de vérifier la capacité du disjoncteur à atteindre une température maximale requise et principalement de valider la conception. Les procédures de test sont conçues selon les normes IEEE Std C37.09-2018 et IEEE Std C37.04-1999.
- * Tests de courts-circuits Ces tests évaluent le courant de court-circuit assigné ainsi que les capacités relatives requises du disjoncteur pour des applications dans des systèmes effectivement mis à la terre ou non mis à la terre. Pour le VOX7 les tests doivent être effectués à la fréquence de 60 Hz. Les facteurs déterminants sont l'amplitude et la forme de la tension de rétablissement transitoire (TRV) en fonction du temps, ainsi que l'amplitude et la durée de la tension de rétablissement à la fréquence. Les tests de court-circuit sont effectués selon la norme IEEE C37.09-2018.
- * Test Ces tests sont effectués selon la norme IEEE Std C37.09-2018, pour évaluer la capacité du disjoncteur à résister aux impulsions de foudre en onde pleine. Dans ces essais, des chocs de foudre positifs et négatifs d'amplitude spécifique, doivent être appliqués aux bornes du disjoncteur selon la norme ANSI C37.06-1997. Les essais sont considérés comme réussis si aucun claquage ne se produit. Si, au cours du premier groupe de 3 essais consécutifs appliqués, un contournement se produit lors d'un essai d'un groupe, un second groupe de 9 essais doit être réalisé. Si le disjoncteur réussit à supporter

les 9 essais du deuxième groupe, les contournements du premier groupe sont considérés comme aléatoires et le disjoncteur est considéré comme ayant réussi le test. * Test de tenue à fréquence industrielle sous pluie et à sec Les tests de tenue à fréquence industrielle sous conditions humides sont effectués selon la norme IEEE C37.09-2018 uniquement sur des disjoncteurs destinés à être installés à l'extérieur. Il ne doit y avoir aucun contournement pendant les tests, et aucun dommage sur l'isolation ne doit être observé après les tests. * Test d'arc interne Les tests d'arc interne sont effectués selon la norme IEEE C37.20.7 pour évaluer la capacité du disjoncteur à résister aux défauts d'arc interne, requis pour garantir la sécurité et la fiabilité du disjoncteur en conditions réelles. D'autres tests importants pour valider le bon fonctionnement du disjoncteur sont effectués, nous pouvons citer les tests de commutation de courant capacitif, les tests d'endurance mécanique, les tests de fonctionnement à basse température, les tests de surpression, les tests à pression zéro, les tests de commutation de courant de charge, les tests d'étanchéité.

4.2 Résultats expérimentaux

Dans cette partie, nous présentons quelques résultats des tests expérimentaux effectués par l'équipe d'ingénierie de CO7, dont certains sont effectués en collaboration avec l'équipe d'Energie Conseil Olivier Inc composée de Guy Olivier et Pierre LaRue. Ces tests sont exécutés pour évaluer différentes solutions alternatives, dans le but de remplacer totalement l'utilisation du gaz SF6 dans les disjoncteurs moyenne tension VOX7 offerts par CO7.

4.2.1 Résultats expérimentaux du mélange gazeux N2 et CO2

L'installation se compose du disjoncteur à vide VOX, d'un système de traitement des données constitué d'un oscilloscope numérique Tektronix (TDS 3012C), d'un générateur de chocs de foudre et d'un module de commande central. Figure 4.3 : Installation expérimentale pour les essais de chocs de foudre sur l'isolation des mélanges N2 et CO2. (Source : photo prise par moi-même au sein de CO7 Technologies)

L'essai consistait à effectuer des tests de chocs de foudre de 200 kV sur un disjoncteur à vide VOX. L'objectif des tests était de déterminer la pression minimale d'azote permettant un niveau de résistance interne de 200 kV. Le vide a été au préalable réalisé dans le disjoncteur VOX, ensuite s'en est suivi le remplissage du récipient VOX d'azote sec à une pression manométrique de 0,15 MPa. Et enfin la fermeture du disjoncteur à vide. Des impulsions de 200 kV ont été appliquées, d'une durée de 1,2/50 μ s, ce qui produit 15 impulsions positives et 15 impulsions négatives à chaque phase, les deux autres phases étant mises à la terre. Pendant le test, aucune correction de température, de pression atmosphérique et d'humidité n'a été appliquée. Figure 4.4 : Claquages observés lors des tests, pour les impulsions positives et négatives [130] (Document interne, © 2023 CO7 Technologies)

À la fin de l'essai, les conclusions suivantes ont été tirées : - Selon les critères standard, le disjoncteur VOX rempli d'azote pur à une pression de 0,15 MPa a résisté avec succès à des impulsions standard de 200 kV. - Cependant, il a été estimé qu'il n'y avait pas de marge significative et, à titre de suggestion, une pression légèrement supérieure devrait être utilisée, mais pas une pression inférieure. - En revanche, le mélange N2 et CO2 a rencontré des claquages pour les mêmes conditions, amenant à la conclusion que le N2 a donné de meilleurs résultats que le mélange.

4.2.2 Résultats expérimentaux du gaz N2 pur

4.2.2.1 Test de tenue aux chocs de foudre : Tableau 4.1 : Tenue aux chocs de foudre du gaz N2 à 2,17 bar abs [112] Tableau 4.2 : Tenue aux chocs de foudre du gaz N2 à 2,5 bar abs [112]

4.2.2.2 Test de tenue de tension à fréquence industrielle Tableau 4.3 : Tenue à fréquence industrielle du gaz N2 à 2 bar abs [112] Tableau 4.4 : Tenue à fréquence industrielle du gaz N2 à 2,17 bar abs [112] Tableau 4.5 : Tenue à fréquence industrielle du gaz N2 à 3.5 bar abs [130]

Les tests ont été effectués sur un système composé d'un disjoncteur VOX de tension nominale 38 kV, d'un générateur de chocs de foudre, d'un oscilloscope, d'un diviseur capacitif de rapport et d'un

transformateur régulateur. Pour le test de tenue aux chocs de foudre, les pressions appliquées ont été augmentées au fur et à mesure jusqu'à obtenir une réussite à la pression 2,17 bar abs pour 15 séries d'impulsions de foudre à une tension de 170 kVp (Tableau 4.1). Aucun claquage n'a été enregistré. Cependant, les tests effectués pour une tension de 200 kVp ont enregistré plus de 3 claquages, conduisant à la conclusion portée sur l'augmentation de la pression. À la pression 2,5 bar abs, le nombre de claquages pour chaque polarité était inférieure ou égale à 2, le test a été considéré comme réussi selon la norme CEI 60060-1 2010 à une tension de 200 kVp. Les tests de tenue à fréquences industrielles ont montré un échec pour une tension de 80 kV sous une pression de 2 bar abs, une réussite sous une pression de 2,17 bar abs, et également une totale réussite sous une pression de 3,5 bar abs.

4.2.3 Résultats expérimentaux du gaz SF6

4.2.3.1 Test de tenue aux chocs de foudre : Tableau 4.6 : Test de tenue aux chocs de foudre du gaz SF6 [112]

4.2.3.2 Test de tenue de tension à fréquence industrielle Tableau 4.7 : Tenue à la fréquence industrielle du gaz SF6 [112]

Les résultats des tests pour le SF6 sont présentés à titre de comparaison et montrent une réussite totale.

4.2.4 Analyse des résultats

Les comportements du SF6 et du N2 sont comparés dans cette analyse, dans la figure 4.5 ci-dessous, nous pouvons observer que les deux gaz évoluent de manière similaire. Les tests de tenue à fréquence industrielle nous permettent d'évaluer la résistance diélectrique des solutions isolantes gazeuses. Ces résultats montrent que la pression minimale du gaz N2 permettant de réussir ces tests est de 2.5 bars absolus. Ainsi, nous concluons que la résistance diélectrique du gaz N2 augmente avec la pression, ce qui pourrait offrir des résultats satisfaisants pour le remplacement du gaz SF6 dans le disjoncteur VOX. De nombreux tests doivent encore être effectués pour valider cette alternative.

Figure 4.5 : Comparaison des résultats de tenue à fréquence industrielle - N2 et SF6 [112]

Au regard de ces résultats, nous pouvons dire que le remplacement du gaz SF6 dans les disjoncteurs moyenne tension VOX chez CO7 est sur la bonne voie. Nous proposons dans cette thèse une solution qui permettra d'évaluer numériquement la rigidité diélectrique d'une solution gazeuse représentant un gaz ou un mélange de gaz. Alors, c'est un volet intéressant, car la méthode proposée pourra fournir un argument technique pertinent, permettant à CO7 de valider la solution adoptée pour le remplacement du gaz SF6. Il s'agira de la preuve numérique qui confirmera les résultats expérimentaux effectués sur le disjoncteur rempli de gaz N2.

4.3 Modélisation mathématique

La modélisation mathématique nous permet de traduire les procédés et phénomènes physiques impliqués dans le bon fonctionnement d'un disjoncteur moyenne tension isolé au gaz, en équations mathématiques qui seront implémentées dans le logiciel à des fins de simulation. Il s'agit des phénomènes tels que, l'augmentation de la température, le transfert de chaleur, le claquage électrique, la formation de l'arc, l'ionisation du milieu isolant, l'interaction arc/matériaux.

4.3.1 Les modèles utilisés pour estimer les propriétés des mélanges gazeux *

* Le modèle de Townsend-Boyle : Rigidité diélectrique Où E_{mix} est la rigidité diélectrique du mélange de gaz (V/m), E_0 est la rigidité diélectrique du gaz à la pression atmosphérique (V/m), P_{mix} est la pression du mélange de gaz (Pa), a et b sont des coefficients empiriques déterminés expérimentalement pour chaque gaz, d est la distance entre les électrodes (m) *

* Le modèle de Bruggeman : Constante diélectrique Où ϵ_i est la constante diélectrique du gaz i , et f_i est la fraction volumique du gaz i dans le mélange. *

* La loi des mélanges linéaires : Facteur de dissipation Où $\tan(\delta_{mix})$ est le facteur de dissipation du mélange de gaz, f_i est la fraction volumique du gaz i dans le mélange et $\tan(\delta_i)$ est le facteur de dissipation du gaz i *

* Approche basée sur l'additivité : Toxicité et impact environnemental Où représente la toxicité ou l'impact environnemental estimé du mélange gazeux, F_i est la fraction (volumique ou

massique) du gaz i dans le mélange, et est la toxicité ou l'impact environnemental du gaz i . *

Le modèle de magnétohydrodynamique (MHD) : Résistance à l'arc électrique Les équations de base peuvent alors s'écrire comme suit *

* Équation de conservation de la masse pour chaque espèce de gaz i Où ρ_i est la densité du gaz i et u est la vitesse du fluide. *

* Équation de conservation de la quantité de mouvement (équations de Navier–Stokes avec force de Lorentz): Où ρ est la densité totale, p est la pression, μ est la viscosité dynamique, J est la densité de courant électrique et B est le champ magnétique. Où τ est la contrainte due aux forces de viscosité, et F la force de Laplace. I est la matrice unitaire. *

* Équation de conservation de l'énergie Où ρ_i est la densité du gaz i , $C((p,i))$ est la capacité thermique à pression constante du gaz i , T_i est la température du gaz i , k_i est la conductivité thermique du gaz i et Q_i est la source de chaleur pour le gaz i . *

* Équations de transport pour les espèces chargées: Où n_i est la densité des espèces chargées i , u_i est la vitesse de l'espèce i et S_i est la source ou le puits des espèces i . *

* Équations de Maxwell pour le champ magnétique: Où E est le champ électrique, μ_0 est la perméabilité magnétique du vide et J est la densité de courant électrique. *

Équations de transport pour les propriétés électriques, telles que la conductivité électrique σ : Où σ est la conductivité électrique du mélange gazeux *

* Équations d'état : Où R est la constante spécifique du gaz et T est la température, ρ la densité et P la pression.

4.3.2 Tension disruptive dans les gaz

La rigidité diélectrique est la valeur maximum du champ auquel peut être soumis un milieu isolant sans formation d'une décharge électrique entraînant son claquage, c'est un facteur important pour qualifier un matériau isolant. Le calcul purement théorique de la rigidité diélectrique est complexe, et se fait généralement par des essais expérimentaux et selon des procédures définies de façon à garantir la précision des résultats. A l'origine du phénomène de claquage électronique dans les gaz, chaque gaz présente des électrons de conduction pouvant être accélérés pour atteindre l'énergie d'ionisation satisfaisante au phénomène d'avalanche qui est à l'origine de sa dégradation, sous l'augmentation de la tension, elle peut provoquer une conduction à l'intérieur du gaz, et un échauffement important peut conduire au claquage des gaz [6]. La tension de claquage dans un gaz est décrite par la loi de Paschen : Où $V_{breakdown}$ est la tension continue de claquage, A est la constante du gaz individuel utilisé, représentant son efficacité à empêcher la formation d'un arc, B est la constante de proportionnalité du gaz individuel, influençant la tension de claquage, p est la pression du gaz en pascals et d est la distance entre les électrodes en mètres, γ est un paramètre représentant le coefficient d'émission secondaire des électrons (coefficient de Townsend).

4.3.3 Cas pratique : Calcul des pertes de gaz en fonction du temps

Pour clôturer cette partie concernant les calculs mathématiques, nous présentons ici un travail qui nous a été demandé au cours des recherches : calculer le taux de fuite de gaz dans une traversée. L'observation a été faite sur une durée de plusieurs semaines afin d'obtenir ces résultats.

4.3.3.1 Proportion de perte de gaz en fonction de la pression

Selon la loi sur le gaz idéal, nous avons la formule donnée dans [42] suivante : (4.1) Ou P est la pression (Pascal), V est le volume (en Litres), n est la quantité (en moles), T est la température (en Kelvin), et R est la constante des gaz. Cette formule peut être écrite sous la forme : (4.2) R étant une constante, on peut en conclure que : (4.3) Selon la loi de Boyle–Mariotte, qui stipule que, à température T et à quantité de matière n constantes, nous avons : ou À température T et à Volume V constants, nous avons : (4.4) (4.5) La formule 4.5 nous permet de conclure que plus la pression de gaz diminue dans un volume constant, plus la quantité de gaz diminue également. A. Débit de fuite de gaz Le débit de fuite de gaz est fonction du produit du volume multiplié par la pression du gaz ($V \times P$) divisé par le temps (t). Si le volume de gaz est constant,

cela signifie que plus la pression diminue, plus le débit de fuite diminue également. B. Quantité de gaz perdu (en kilogramme) On commence par calculer le volume occupé par le gaz dans la traversée. a. Schéma technique de la traversée Le volume occupé par le gaz est défini en fonction de chaque section : il faudra calculer le volume de la section A (section principale), soustraire les sections hachurées (silicone et tige du milieu) et ajouter la section qui a été soudée pour augmenter le volume de l'enceinte du réservoir (section B). Dans ce cas, le volume V_{gaz} occupé par le gaz est : Figure 4.6 : Coupe d'une traversée vue de l'intérieur [130] (Document interne, ©2023 CO7 Technologies) b. Calcul du volume de chaque section Ci-dessous le schéma de la section principale (la section A), V_A est déterminé à partir du cylindre délimité suivant : Figure 4.7 : Dimension de la coupe d'une traversée vue de l'intérieur [130] (Document interne, © 2023 CO7 Technologies) Le volume est donné par la formule (volume du cylindre) : Avec $r_A = 0,135/2 = 0,0675 \text{ m}$ et $h_A = 0,1836 \text{ m}$ * V_{hach} est déterminé à partir du schéma ci-dessous : Figure 4.8 : Dimensions précises de la coupe d'une traversée vue de l'intérieur [130] (Document interne, © 2023 CO7 Technologies) Ou V_{hach1} est la partie hachurée qui représente le silicone (les parties sphériques), et V_{hach2} est la partie hachurée qui représente la tige du milieu. * V_{hach1} est déterminé par la formule du volume des sphères. * V_{hach2} est déterminé par la formule des cylindres * Le volume total de la section occupée par le silicone et le cuivre est : * Ci-dessous le schéma de la section secondaire soudée sur la section principale (la section B), V_B est déterminé à partir de la formule suivante : Figure 4.9 : Dimensions du cylindre de la traversée [130] (Document interne, © 2023 CO7 Technologies) Le volume est donné par la formule (volume du cylindre) : Avec $r_B = (0,1397 - (0,003 \times 2)) / 2 = 0,06685 \text{ m}$ et $h_B = 0,267 \text{ m}$ c. Calcul du volume du gaz Le volume de l'espace occupé par le gaz est déduit de la formule : C. Quantité de gaz contenu dans la traversée a. Calcul de la masse de gaz initiale contenue dans la traversée sous une pression de 2,35 bar A partir de l'équation (1), nous pouvons déterminer la quantité de gaz en mol (n_{gaz}) initialement contenu dans l'enceinte de la traversée en fonction du volume (V_{gaz} en m^3), de la température (T approximée à 25°C équivalant à $298,15 \text{ K}$) et de la pression (P de départ 2,35 bar équivalant à 235000 Pa), la constante de gaz parfait R est $8,314 \text{ mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ Calcul de la quantité de SF_6 contenu dans la traversée pour la température et pression initiale ci-dessus : est la masse en kilogramme de gaz SF_6 déduite et est la masse molaire du gaz SF_6 ($146,055 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$) b. Calcul de la quantité de gaz perdue sur la durée Selon l'équation (5), nous pouvons déduire la quantité de gaz restant dans la traversée à une pression de 2,29 bars (229000 Pa , la pression mesurée après une durée de 4 mois) pour une température constante et un volume constant : Où P_1 est la pression initiale, au début du test et P_2 est la pression relevée après une durée de 4 mois. La quantité de gaz perdu est alors : c. Proportions de perte de gaz D'après ce qui précède, nous avons 2,058 g de perte de gaz SF_6 pendant les 4 mois de test, nous estimons alors la perte par mois à 0,51g. on peut déduire les proportions de pertes de gaz ainsi : Nous avons 0,63% de perte par mois. 4.4 Modélisation géométrique A cette étape de notre étude, nous définissons la géométrie des différents composants de notre projet ; il s'agit de la phase de conception et de schématisation dont le but est de reproduire numériquement l'ensemble d'éléments constituant le modèle numérique de notre entité physique. L'idée est de respecter au maximum les paramètres géométriques du système physique tout en élaborant le maillage approprié. Un maillage adéquat est idéalement requis pour la simulation industrielle, si le maillage généré est de mauvaise qualité, la convergence entre le modèle numérique et le modèle physique sera compromise ou conduira à des résultats physiquement inexacts [68]. L'un des enjeux importants de la modélisation est la simulation multiphysique, c'est-à-dire

l'interaction des différents phénomènes physiques, tels que l'électromagnétisme, la thermodynamique, la dynamique des fluides et la mécanique dans un disjoncteur [81]. La complexité et la délicatesse de la conception des disjoncteurs moyenne tension réside dans la numérisation des phénomènes tels que les écoulements des fluides à températures et pressions variées, états stationnaires ou non-stationnaires, les champs magnétiques, électriques, et radiatifs très élevés, les phénomènes de claquage de tension ou les explosions; conséquences essentielles de la formation de l'arc électrique lorsqu'un défaut de courant survient sur le réseau, déclenchant ainsi l'ouverture de contacts [81]. Pour passer l'étape de réduction de notre système physique (disjoncteur VOX 38kV) en un modèle géométrique, deux cas s'offrent à nous : * Premier cas : nous utilisons le modèle déjà créé par CO7 à partir d'un logiciel de design et trouvons le moyen d'importer ce modèle vers notre logiciel multiphysique COMSOL, afin d'y effectuer l'étude et les simulations. * Second cas : nous créons à partir d'un logiciel de design, le modèle géométrique du disjoncteur en utilisant des objets géométriques de base.

4.4.1 Cas d'importation du modèle dans le logiciel multiphysique

Il s'agit ici de trouver le format de fichier adéquat pour l'importation du modèle du disjoncteur dans le logiciel COMSOL. Pour ce cas, nous avons les types de fichiers 3MF (3D), DXF (2D), PLY (3D), VRML (3D) et STL (3D) qui sont disponibles pour l'importation avec COMSOL Multiphysics et ne nécessitent aucun produit complémentaire. Nous nous concentrons sur le format de fichier STL, car non seulement il est compatible aux modèles 3D, mais aussi il permet la lecture et l'écriture. Ci-dessous l'exemple du réservoir du disjoncteur importé dans COMSOL via le fichier STL. Figure 4.10 : Schéma 3D du réservoir du disjoncteur importé dans COMSOL (Source : figure construite par l'équipe CO7)

4.4.2 Cas de conception du dessin CAO

Pour dimensionner le produit, les équations du problème doivent être définies selon la démarche suivante : d'abord, considérer une analyse mécanique classique des solides non déformables, permettant de déterminer la solidité maximale applicable aux parois du disjoncteur. Ensuite, effectuer un calcul classique de résistance des matériaux en vue d'identifier les contraintes et déformations correspondantes aux différents efforts. De manière généralisée, la modélisation géométrique doit suivre un certain nombre de normes de dessin numérique définies selon les éléments pris en compte : la mécanique, l'électricité, la mécanique des fluides, la thermodynamique. Figure 4.11 : Schéma 3D du réservoir du disjoncteur conçu dans COMSOL (Source : figure construite par Mactar Thiam)

4.5 Modélisation et simulation numérique

La modélisation et la simulation numérique des phénomènes multi-physiques sont devenues des éléments importants de la conception d'un système physique et sont indissociables du développement de produits, en offrant la possibilité d'effectuer la conception ou l'exploration de nombreuses hypothèses. En effet, les aspects concernant : la physique, la modélisation géométrique, les méthodes numériques, et le calcul haute-performance sont étroitement liés. Les essais expérimentaux seuls ne suffisent plus, au regard des contraintes de délai et des réalités économiques du marché. La contrainte du temps de calcul, qui peut s'échelonner sur plusieurs semaines, est un frein majeur lors du développement des appareillages électriques. Par conséquent, l'efficacité de la modélisation et de la simulation des disjoncteurs haute-tension est nécessaire pour accélérer les opérations. De plus, la simulation renforce la confiance dans la configuration choisie et garantit une solution optimale.

4.5.1 Modélisation d'un mélange gazeux et estimation des propriétés du mélange

Plusieurs interrogations ont été soulevées à la suite de la décision de CO7 technologies d'adopter un gaz ou un mélange de gaz vert comme alternative au SF6 dans la fabrication de leurs disjoncteurs. Les points retenus sont les suivants : * Pour le niveau de pression standard appliqué actuellement, c'est-à-dire des pressions allant jusqu'à environ

3 bars absolus maximum, comment prouver scientifiquement qu'un gaz pur est meilleur qu'un autre ? * Quel est le comportement d'un gaz sélectionné lorsque le niveau de chaleur dans le réservoir est normal et quelle est la capacité thermique du gaz étudié ? Pour le cas du SF6 par exemple, il a la capacité de transférer l'énergie thermique sur le réservoir. * Quel est le comportement du gaz lorsque la pression augmente? * Comment appréhender ou anticiper la réaction du gaz en situation réelle ?

4.5.1.1 Objectif ciblé

L'objectif est de concevoir un algorithme nous permettant de simuler le comportement d'un mélange gazeux, en tenant compte au préalable des conditions de fonctionnement des disjoncteurs VOX, en appliquant les mêmes niveaux de pression et de température, les mêmes plages de tensions applicables. Cet algorithme nous permettra dans un premier temps de vérifier la capacité d'un mélange gazeux avant de le tester en production, des simulations pourrons par la suite être exécutées sur le modèle numérique fonctionnel conçu dans le logiciel COMSOL, afin d'estimer plusieurs autres possibilités d'usage d'un mélange de gaz purs comme alternative au gaz SF6 dans le disjoncteur à vide moyenne tension de type VOX, en se basant sur les propriétés intrinsèques du dit gaz. Ce travail fourni une base non négligeable pour soulager l'équipe des tests coûteux en temps, en énergie et argent. Les paramètres qui nous intéressent pour un mélange de gaz sont :

- * La permittivité diélectrique : une propriété physique qui décrira la réponse du milieu gazeux donné au champ électrique appliqué.
- * La rigidité diélectrique, la tension de claquage, l'une des caractéristiques principales dans un milieu isolant.
- * Perméabilité, dépendant de la nature du gaz, du niveau de pression moyen d'écoulement et des caractéristiques chimiques et physiques du mélange gazeux.
- * Conductivité thermique, qui croît avec la température.

4.5.1.2 Première hypothèse de création

L'objectif au départ était de créer un algorithme capable d'avoir une intelligence artificielle qui ira chercher dans une base de données fournie, différents types de gaz et leurs propriétés selon un principe de sélection bien défini et effectuer les calculs automatiquement. D'où l'importance d'identifier et de répertorier tous les gaz pertinents pour notre recherche, ensuite de créer une bibliothèque afin de stocker toutes les propriétés prédéfinies intervenant lors des calculs, ces propriétés serviront de paramètres d'entrée de notre programme. Avant d'appliquer cette hypothèse, il est nécessaire d'étudier l'avantage quantique et les points essentiels qui pourront être optimisés grâce à l'utilisation de l'informatique quantique pour estimer les paramètres des mélanges gazeux.

4.6 L'approche quantique

4.6.1 Avantages de l'approche quantique

Le but de la recherche dans le domaine quantique est de proposer au monde des solutions innovantes là où les systèmes classiques se sont montrés défaillants, ou alors d'élaborer des stratégies permettant d'approfondir l'optimisation des résultats là où ils se sont montrés limités. Parmi les avantages que nous offrent les systèmes quantiques, nous pouvons citer :

4.6.1.1 L'accélération des calculs

Les algorithmes quantiques ont la capacité de résoudre certains problèmes plus rapidement que leurs homologues classiques. Exemple : l'algorithme de Shor.

4.6.1.2 L'optimisation globale

Contrairement aux algorithmes classiques, qui se bloquent dans des minimums locaux, les algorithmes quantiques sont capables grâce aux propriétés telles que l'intrication et la superposition, de rechercher plusieurs réponses simultanément et de naviguer dans un plus grand espace de solutions de manière plus efficace. Exemple : l'algorithme QAOA.

4.6.1.3 La sécurité

Grâce à l'algorithme de Shor, capable de briser les protocoles de cryptographie tels que RSA, l'approche quantique permet de mettre en évidence les failles dans les systèmes de sécurité et de promouvoir ainsi le développement des alternatives quantiques plus sécuritaires pour la protection des systèmes de communication.

4.6.2 Cas du calcul des propriétés de mélanges

Dans le contexte de l'optimisation du calcul des propriétés d'un

mélange gazeux pour remplacer le SF6 dans les disjoncteurs à moyenne tension, l'utilisation de la programmation quantique pourrait être particulièrement bénéfique pour les propriétés complexes qui nécessitent des calculs intensifs ou qui sont sensibles aux détails microscopiques des interactions moléculaires. À la question posée à ChatGPT : « Parmi les propriétés de mélanges gazeux suivantes : la rigidité diélectrique, la permittivité, le facteur de dissipation, la toxicité, l'impact environnemental, la résistance à l'arc, stabilité thermique, stabilité chimique, quelles sont celles qui peuvent bénéficier d'un avantage quantique dans la méthode de calcul des propriétés d'un mélange gazeux, sur le calcul classique ? » la réponse figurant à l'Annexe 2.2 nous mène à la conclusion que sur la liste fournie, les trois propriétés qui pourraient le plus bénéficier de l'approche quantique seraient : *

- Stabilité chimique** : La stabilité chimique d'un mélange gazeux est directement liée à la structure électronique et aux réactions potentielles entre les molécules du mélange. Les calculs quantiques, qui peuvent modéliser avec précision les états électroniques et les potentiels de réaction, offrent une approche prometteuse pour évaluer et prédire la stabilité chimique de nouveaux mélanges gazeux.
- Stabilité thermique** : La stabilité thermique implique la compréhension de la manière dont un mélange gazeux réagit à des températures élevées, ce qui peut nécessiter une analyse détaillée des voies de décomposition thermique et des barrières énergétiques. L'informatique quantique permet d'effectuer des calculs chimiques quantiques précis sur les énergies de réaction et les états de transition, ce qui pourrait aider à évaluer plus précisément la stabilité thermique des substituts au SF6.
- La permittivité** : elle dépend de la polarisation d'un matériau sous l'effet d'un champ électrique et par conséquent des interactions complexes entre les électrons et les molécules du mélange. Elle peut donc également bénéficier du calcul quantique pour estimer la valeur de la permittivité d'un mélange gazeux.

* **Rigidité diélectrique** : plus complexe à estimer, elle est généralement liée à la permittivité relative et à d'autres propriétés physiques du gaz. En effet, nous constatons que ces propriétés impliquent une compréhension plus approfondie des interactions moléculaires et des réactions chimiques potentielles qui peuvent être mieux abordées avec les méthodes quantiques, bénéficiant ainsi de la puissance de calcul des ordinateurs quantiques. Les autres propriétés listées telles que la permittivité, le facteur de dissipation, la toxicité, l'impact environnemental, la résistance à l'arc, et leurs valeurs peuvent également être calculées avec des méthodes classiques ou à l'aide de simulations numériques avancées. La décision d'utiliser l'informatique classique ou quantique pour ces propriétés dépendra des ressources disponibles, de la précision requise et de la complexité des calculs. Cependant, pour ne pas nous engager dans une étude profonde de la chimie et des propriétés moléculaires complexes, nous choisissons de nous concentrer dans ce projet de recherche sur le calcul de la rigidité diélectrique d'un mélange gazeux, la méthode proposée pourrait subir une extension pour s'adapter aux autres propriétés.

4.7 Choix de l'algorithme quantique approprié

Pour le problème spécifique de l'identification du meilleur mélange gazeux pour remplacer le SF6, le type d'algorithmes quantiques qui pourrait être particulièrement approprié est un algorithme d'optimisation combinatoire. En utilisant l'algorithme QAOA, nous pouvons optimiser la rigidité diélectrique d'un mélange de gaz en formulant le problème comme une optimisation quadratique binaire. Cette approche permet d'explorer différentes combinaisons pour trouver celle qui maximise la rigidité diélectrique, tout en respectant les contraintes de mélange.

4.7.1 L'Algorithme QAOA

Nous nous intéressons particulièrement dans ces travaux de recherche à l'algorithme QAOA, un algorithme de type variationnel quantique, pour sa capacité à résoudre les problèmes d'optimisation combinatoire de manière plus efficace, en associant l'utilisation

des ressources classiques et quantiques. En effet, QAOA est un algorithme hybride, qui associe l'utilisation des ressources classiques pour résoudre les problèmes de bruits rencontrés par les ordinateurs quantiques actuels, et exploite les avantages des principes fondamentaux de l'informatique quantique [36]. L'évaluation de la fonction coût se fait à l'aide des ressources quantiques et elle est ensuite optimisée à l'aide des ressources classiques [51]. Il utilise un système quantique pour transformer un problème, permettant ainsi d'explorer plusieurs solutions simultanément.

4.7.1.1 Expression mathématique de QAOA

QAOA s'appuie sur les concepts de superposition d'états et les évolutions unitaires pour effectuer une optimisation, de ce fait, l'algorithme repose sur deux opérateurs unitaires pour analyser un état quantique [67]:

- * L'opérateur de phase : ajuste la phase de chaque qubit pour refléter la fonction coût que nous voulons minimiser. Il transforme l'objectif du problème à optimiser et correspond à une fonction coût classique. Il s'agit de l'hamiltonien H_C
- * L'opérateur de mélange : permet au système d'examiner différentes configurations possibles en mélangeant les états des qubits, pour guider le système quantique dans la recherche vers un espace de solutions optimum. Il est associé à l'hamiltonien H_M .

QAOA représente premièrement un problème donné sous la forme d'une fonction, une somme pondérée des termes liés à chaque qubit z_i du système : où, w_i sont les poids associés à des variables binaires z_i , et z_i sont des variables correspondant à des qubits. Ensuite, la deuxième opération consiste à perturber l'état du système pour l'examiner dans un espace de solutions possibles : Où X_i est la matrice de Pauli-X appliquée au qubit i . Cette matrice inverse l'état du qubit, et favorise l'exploration de différents états de qubits. Dans QAOA un hamiltonien représente une « fonction objectif » ou fonction coût [67].

4.7.1.2 Les évolutions unitaires

L'objectif est de préparer un état quantique initial, puis de l'évoluer en alternant les deux opérateurs unitaires associés aux hamiltoniens H_C et H_M pour explorer l'espace de solutions. L'évolution unitaire exécutée est par des opérateurs exponentiels.

- * L'évolution unitaire associée à l'hamiltonien H_C est représentée sous la forme : où γ est un paramètre d'ajustement.
- * L'évolution unitaire associée à l'hamiltonien H_M est représentée sous la forme : Où β est également un paramètre d'ajustement.

L'algorithme QAOA alterne ces deux opérations pour optimiser l'état de la solution en ajustant les paramètres γ et β .

4.7.1.3 Explication détaillée

Ces deux évolutions unitaires sont appliquées successivement pendant un certain nombre d'itérations p , appelées niveaux de profondeur du QAOA [30] [29].

- * On applique $U_C(\gamma)$ pour influencer l'état quantique vers des solutions qui minimisent la fonction coût. Par exemple, pour chaque qubit i , si l'hamiltonien de coût est une somme de termes quadratiques comme $z_i z_j$, où Z est l'opérateur de Pauli-Z qui mesure l'état du qubit, l'opérateur de phase fait évoluer la phase des états en fonction du coût associé à chaque configuration binaire [36].
- * Ensuite on applique $U_M(\beta)$ pour mélanger les différents états et explorer l'espace de solutions. À chaque niveau p , les paramètres γ et β sont ajustés pour minimiser l'espérance de la fonction coût.

4.7.1.4 État final

À la fin du processus d'optimisation, les qubits sont mesurés pour obtenir la configuration binaire qui matérialise la solution optimale du problème. La fonction coût à minimiser devient : , où $|\psi(\gamma, \beta)\rangle$ est l'état quantique résultant, mesuré après p itérations. Cette expression renseigne sur la valeur moyenne de l'hamiltonien de coût dans son état final [1]. L'évolution complète de l'état dans QAOA peut être représentée sous la forme de l'équation : , où $|\psi_0\rangle$ est l'état initial qui renvoie à une superposition de tous les états de base.

4.8 Définition des Critères de sélection des gaz

- * Propriétés électriques : La rigidité diélectrique, la distance d'arc, temps de coupure.
- * Propriétés physiques et chimiques : Le point d'ébullition et de condensation, masse molaire, stabilité chimique : le gaz ne doit pas réagir chimiquement avec d'autres composants du disjoncteur.

Propriétés environnementales : Le gaz devrait avoir un PRG inférieur à celui du SF6 et une bonne biodégradabilité pour garantir qu'il ne sera pas nocif en fin de vie. * Conformité réglementaire et compatibilité matérielle : Le gaz doit respecter toutes les réglementations environnementales en vigueur et être compatible avec les matériaux présents dans les disjoncteurs, sans causer de corrosion ou d'autres dommages. De plus, il ne doit être ni toxique pour les humains et les animaux, ni inflammable. Les gaz non fluorés susceptibles de respecter les critères de sélection pour notre étude ont été identifiés et sélectionnés ci-après : CO2, N2, Air, He, Ar.

Chapitre 5 – IMPLÉMENTATION DE LA MÉTHODE D'OPTIMISATION

La rigidité diélectrique est un paramètre fondamental qu'il est essentiel de connaître lorsque nous nous engageons dans la quête d'un isolant gazeux alternatif au SF6. Pour un gaz ou mélange de gaz donné, sa valeur dans les normes garantit la sécurité et l'efficacité des disjoncteurs moyennes tensions, car elle illustre la capacité du gaz à résister aux décharges électriques. Maîtriser ce paramètre pour tout potentiel substitut gazeux, revient à prévenir les courts-circuits et les arcs électriques susceptibles d'entraîner d'énormes défaillances dans le fonctionnement du disjoncteur ou de l'endommager. Sous conditions normales, c'est-à-dire à une température ambiante (20 degrés Celsius) et une pression d'environ 1 bar, la rigidité diélectrique du SF6 est environ 3 fois supérieure à celle de l'air [45], une alternative gazeuse devrait démontrer une rigidité diélectrique comparablement suffisante pour assurer une isolation efficace tout en gardant un impact environnemental moindre.

5.1 Estimation de la rigidité diélectrique d'une alternative au SF6

Il existe globalement deux méthodes permettant de prédire la rigidité diélectrique d'un composant gazeux : la méthode théorique et la méthode expérimentale.

5.1.1 La méthode expérimentale

Cette méthode s'appuie sur les essais effectués matériellement sur les disjoncteurs dans une installation environnementale réelle de test. Pour évaluer la rigidité diélectrique d'un gaz, les essais de claquage et/ou les tests de décharges partielles sont pratiqués. Les procédures d'essais de tenue à la fréquence industrielle et d'essais de chocs sont décrites par les normes CEI 60060-1, CEI 62271-1 et CEI 62271-100 et sont souvent effectuées à sec et sous pluie. Le principe consiste à appliquer à tour de rôle quinze ondes de choc de chaque polarité sur les différents points d'injection, tel que défini dans la procédure de test préalablement établie. L'essai est réussi s'il ne se produit pas plus de deux contournements pour quinze chocs consécutifs. Les ingénieurs surveillent le disjoncteur pour détecter les défaillances qui pourraient survenir, comme la formation d'arcs internes, des décharges partielles ou des signes de dégradation de l'isolation.

5.1.2 La méthode théorique

Pour généraliser l'approfondissement, les calculs analytiques et les simulations numériques ont été considérés comme des méthodes théoriques. Parmi les plus pertinentes, on a :

5.1.2.1 Les réseaux de neurones

Des algorithmes d'apprentissage automatique ont été conçus pour analyser la structure moléculaire des molécules de gaz afin d'estimer leur rigidité diélectrique à travers les réseaux de neurones artificiels (ANN) et la forêt aléatoire (RF) [108]. La forêt aléatoire (RF) est une technique d'apprentissage d'ensemble dérivé des arbres de classification et de régression [8], les réseaux de neurones artificiels sont des programmes informatiques inspirés biologiquement et conçus pour simuler la manière dont le cerveau humain traite l'information [127].

5.1.2.2 Les méthodes hybrides

L'une de ces méthodes exploite un modèle statistique, l'analyse de régression qu'elle associe avec des calculs de chimie quantique pour estimer les propriétés électriques et thermodynamiques de substituts gazeux isolants au SF6 [124]. Les paramètres tels que les énergies d'affinité électronique, le moment dipolaire électrique, polarisabilité électrique moyenne sont étudiés.

5.1.2.3 Les méthodes de simulation par éléments finis (FEM)

Ces méthodes utilisent les modèles de représentation 2D

ou 3D des systèmes physiques à travers des logiciels de simulation, pour modéliser les phénomènes qui se produisent lors du fonctionnement d'un disjoncteur, et peuvent ainsi reproduire ou prédire le comportement des différentes composantes du système lorsqu'ils sont soumis à une analyse. Pendant les tests, le modèle numérique, conçu pour décrire aussi fidèlement que possible le dispositif physique réel, est configuré en tenant compte de tous les conditions aux limites applicables et les approximations doivent être minimales. Cet exemple [63], présente l'estimation à l'aide de la méthode par éléments finis (FEM) de la rigidité diélectrique du mélange gazeux SF₆/N₂ à différentes proportions, et les résultats de cette méthode permettent d'établir une correspondance entre le rapport du mélange, sa la rigidité diélectrique et la pression.

5.1.2.4 Les méthodes ab initio * La Théorie (DFT) Cette méthode se base sur le calcul des propriétés physiques moléculaires des atomes de gaz qui traduisent la physique des interactions électron-molécule intervenant dans le transport de molécule, à partir des principes de la mécanique quantique, impliquant directement la rigidité diélectrique du mélange de gaz [80]. Ces calculs passent généralement par l'optimisation des molécules de gaz l'aide des méthodes telles que Hartree-Fock (HF) et B3LYP [62]. À travers la DFT, les propriétés permettant d'estimer la rigidité diélectrique du gaz substitutif, telles que l'énergie d'ionisation, la polarisabilité électronique et le niveau d'énergie HOMO-LUMO [16] sont calculés et les résultats sont comparés aux données expérimentales.

5.1.2.5 Les méthodes empiriques Cette méthode est basée sur l'observation et l'analyse des données expérimentales pour estimer les valeurs de la rigidité diélectrique des mélanges gazeux passant par l'utilisation des formules mathématiques et des processus de régression pour établir une relation entre les variables d'un système. Dans l'exemple [80], la loi de Paschen est utilisée pour prédire la tension de claquage des mélanges de gaz binaires et ternaires, le principe se résume à la résolution de l'équation de Boltzmann pour obtenir la fonction de distribution de l'énergie des électrons (EEDF) de chacun des mélanges gazeux, conduisant au calcul du coefficient d'ionisation. À partir des données de ce coefficient réduit par la pression, il est possible de déduire les paramètres A et B impliqués dans la formule de Paschen. Ce dernier exemple est intéressant, car il exige des ajustements raffinés, un paramètre m a été ajouté par l'auteur à l'exposant de la formule du coefficient d'ionisation réduit par la pression, rendant l'exécution du processus de régression beaucoup plus complexe.

5.2 La méthode de calcul classique

5.2.1 Le processus de régression appliqué à la formule d'ionisation réduit par la pression

Lorsque nous reprenons l'exemple précédent [80], les auteurs C. Park, et al. ont modifié la formule conventionnelle du coefficient d'ionisation réduit par la pression α/p en ajoutant le rapport $1/m$ dans l'exposant pour améliorer la précision du processus de régression linéaire, où le coefficient d'ionisation α est réduit par la pression p , A et B sont la constante individuelle du gaz et la constante de proportionnalité du gaz. Après cette modification la formule devient : , et l'exécution du processus de régression ayant conduit à minimiser la fonction d'erreur de la forme Racine de l'Erreur Quadratique Moyenne (REQM), en anglais Root Mean Square Error (RMSE) [10] représentée par :

(5.1) Où n est le nombre de données observées (α/p)observé est la valeur observée pour chacune des données à la position r et (α/p)calculé est la valeur prédite pour chacune des données à la position r.

(5.2) Ici le processus de régression consiste à trouver les valeurs optimales de A, B, et m qui minimisent la fonction Coût :

(5.3) Elle peut être réécrite sous la forme suivante, en simplifiant les paramètres négligeables dans le processus :

(5.4) Pour procéder à l'optimisation, premièrement, les valeurs initiales des paramètres A, B et m sont choisies, puis pour chaque ensemble de paramètres A, B et m, on calcule la valeur de la fonction Coût, enfin les valeurs optimales de A,

B et m sont retenues. En poursuivant la logique des auteurs C. Park, et al. [80], ces valeurs sont utilisées dans la formule également améliorée de la loi de Paschen pour le calcul de la tension de claquage : , où γ est le coefficient d'émission secondaire des électrons et d est la distance entre les électrodes.

5.2.2 La forme non convexe de l'équation pour un intervalle donné

Une fonction $f(x)$ est dite convexe sur un intervalle $]\alpha, \beta[$ lorsque pour tout x_1 ou x_2 dans cet intervalle, et pour tout λ dans l'intervalle $[0, 1]$, la fonction satisfait l'inégalité suivante, cette formule a été démontrée dans [27]:

(5.5) Pour la formule améliorée du coefficient d'ionisation réduit par la pression ci-haut, de forme exponentielle, elle peut être examinée par rapport à la variable p/E dans son exposant, en considérant $x = p/E$. Dans ce cas, elle peut être réécrite comme :

(5.6) Nous devons calculer la dérivée première et seconde de la fonction $f(x)$:

Dérivée première : (5.7) Dérivée seconde : (5.8)

Lorsque nous analysons la dérivée seconde de la fonction $f(x)$, la fonction $f''(x)$, et vérifions l'inégalité exprimée dans la formule (5.5), nous constatons qu'elle est complexe et sa valeur dépend des termes et :

- * Si $m > 1$, alors le terme peut être très petit ou négatif, donnant une valeur négative à la fonction $f''(x)$
- * Si $m < 1$, alors le peut être supérieure et donner une valeur positive à la fonction $f''(x)$ dans certains cas.

Cette analyse permet de conclure que la formule améliorée du coefficient d'ionisation réduit par la pression, est non convexe pour une certaine gamme de valeurs du paramètre m en raison de la complexité de ses termes et de la façon dont la dérivée seconde peut changer de signe.

5.2.3 Problème de minimums locaux dans l'optimisation

Lors du processus de régression, le but étant de trouver les valeurs des paramètres qui minimisent la valeur de la fonction coût, la recherche des solutions optimales n'est pas simple à réaliser pour tous les types de fonctions. Différentes méthodes d'optimisation peuvent être utilisées pour effectuer ce travail, des algorithmes tels que la descente de Gradient ou alors l'algorithme de Levenberg-Marquardt sont parfois adaptés pour faciliter le calcul. Cependant, si la fonction présente plusieurs minimums locaux, ce qui est le cas des fonctions non convexes [86], la solution trouvée peut se limiter à un minimum local et ne pas explorer les autres solutions.

5.2.3.1 Les minimums locaux

Pour une fonction $f(x)$, si dans un intervalle voisin V_1 de x_0 , $f(x_0) \leq f(x)$, pour tout $x \in V_1$, alors dans ce cas x_0 est considéré comme le minimum local [86]. Cependant, ce minimum ne représente pas automatiquement la valeur la plus basse possible pour la fonction entière. Car il est possible de trouver plus loin, dans un intervalle V_2 , V_3 ou V_2 non voisin à x_0 , un autre minimum correspondant à cet intervalle, plus petit que x_0 . D'où l'existence de plusieurs minimums locaux pour une fonction donnée.

5.2.3.2 Les algorithmes d'optimisation classiques

Pour faciliter l'optimisation de la fonction coût, plusieurs algorithmes sont souvent implémentés dans le processus de recherches des minimums d'une fonction. Parmi les plus utilisés, on peut citer :

- * La Descente de gradient : le principe de cet algorithme consiste à suivre le gradient de la dérivée première de la fonction étudiée pour trouver le minimum. Dépendamment du nombre de minimums locaux, la descente de gradient termine son analyse après plusieurs itérations, si ce nombre est très grand, l'algorithme pourrait s'arrêter à l'un des minimums locaux sans atteindre le minimum global. L'équation de mise à jour de la Descente de gradient est représentée sous la forme : , où η est le taux d'apprentissage, et $f'(x_t)$ est le gradient de la fonction au point x_t [6]. Si $f(x)$ est une fonction non convexe, alors l'analyse peut conduire à un minimum local où $f'(x)=0$, alors qu'il ne s'agit pas du point globalement optimal. Cet algorithme donne un résultat satisfaisant dépendamment de la valeur initiale de x_0 proche du minimum global et un taux d'apprentissage raisonnable. Lorsque le taux d'apprentissage est trop grand et la valeur d'initialisation des paramètres n'est pas choisie conséquemment, l'algorithme retourne un minimum local uniquement.
- * L'algorithme de Levenberg-Marquardt :

Il s'agit ici d'un algorithme hybride, découlant d'une combinaison de la descente de gradient et de la méthode de Gauss-Newton, régulièrement utilisée dans la résolution des problèmes de régression non linéaire. L'équation de mise à jour de l'algorithme de Levenberg-Marquardt est : Où J est la matrice Jacobienne des dérivées partielles des fonctions par rapport aux paramètres, J^T est la transposée de la matrice Jacobienne, λ est un facteur de régularisation qui règle la combinaison entre la méthode Gauss-Newton (lorsque λ est faible) et la descente de gradient (lorsque λ est élevé), et I est la matrice identité [61]. Cet algorithme est également susceptible de se retrouver heurté à des minimums locaux, car la mise à jour des paramètres dépend des approximations linéaires locales de la fonction d'erreur. Si l'algorithme atteint un certain minimum local, il peut converger vers une solution qui ne correspond pas nécessairement au minimum global.

5.2.3.1 Impact des minimums locaux

La grande majorité des algorithmes classiques disponibles dans la littérature rencontre des difficultés à converger vers les paramètres globalement optimaux. Ils se heurtent très souvent à des optimums locaux, démontrant ainsi une incapacité à fournir le meilleur résultat de calcul possible. Cette limite est accentuée lorsqu'il s'agit des fonctions complexes et non convexes, d'où la nécessité de recourir aux techniques avancées d'optimisation plus efficaces, capables de contourner le problème de minimum local.

5.2.4 Méthodes alternatives de recherche de la solution optimale

Il existe plusieurs méthodes d'optimisation pouvant élargir la recherche vers une sphère de solutions plus grande, permettant ainsi aux algorithmes de cibler et d'atteindre le minimum global d'une fonction. Ces algorithmes ont pour but principal d'identifier la meilleure solution possible dans un espace de recherche élargi, en implémentant des techniques pour échapper aux minimums locaux. Ils peuvent être regroupés comme suit :

5.2.4.1 Méthodes d'optimisation globale

Ces méthodes vont au-delà des minimums locaux :

- * Les algorithmes génétiques : Ce type d'algorithme fournit plusieurs solutions avec rapidité même lorsque l'espace de recherche est large [3].
- * Le Recuit Simulé ou simulated Annealing : appartenant à la famille des métaheuristiques, une famille de méthodes d'optimisation permettant de trouver un optimum global, ou de meilleurs optimums locaux par rapport aux méthodes classiques. Pendant l'optimisation des paramètres, il est possible d'ajouter des perturbations aléatoires pour contraindre l'algorithme à sortir des minimums locaux. Ici, l'ajustement s'effectue grâce à l'ajout contrôlé des perturbations par les tendances de courbure de la fonction, en acceptant temporairement des solutions sous-optimales, lui permettant d'échapper aux minimums locaux [17].

5.2.4.2 Algorithmes de Métacognition

Ces algorithmes tirent leur fondement dans l'apprentissage ou la résolution de problèmes à travers la compréhension, le contrôle, l'évaluation et la préparation de leurs propres processus cognitifs [110]. L'algorithme évalue ses performances sur une activité d'optimisation, ajuste ses paramètres en fonction des résultats observés, et améliore ainsi son efficacité.

- * L'optimisation Bayésienne : cette méthode contrôle la fonction d'erreur afin d'anticiper les points suivants à évaluer, et permet ainsi de mieux explorer l'espace de solutions [31].
- * Algorithme de Levenberg-Marquardt Global : il s'agit d'une version modifiée de l'algorithme de Levenberg-Marquardt initial, qui effectue une correction dans la stabilité des erreurs et la limitation des poids [85]. Dans ce cas précis, un algorithme de métacognition peut être utilisé pour ajuster automatiquement la méthode de calcul des paramètres A , B et m , en analysant les résultats intermédiaires et en adaptant son processus de traitement pour éviter les minimums locaux et converger vers une solution optimale.

5.2.4.3 Optimisation multi-démarrage

Le principe de ce type d'optimisation réside dans l'exécution de l'algorithme plusieurs fois avec différentes valeurs initiales de paramètres, à la fin, les résultats des différentes exécutions sont combinés pour maximiser l'obtention du minimum global [129].

Un exemple d'algorithme utilisant cette méthode est l'algorithme de Basin-Hopping, basé sur l'implémentation des contraintes pour améliorer la recherche du minimum global [125].

5.2.4.4 Algorithmes hybrides

Il s'agit d'une catégorie d'algorithmes qui fusionne différentes méthodes d'analyse pour maximiser l'optimisation de la fonction.

- * Une idée originale d'hybridation de l'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO) avec l'algorithme génétique [38].
- * Combinaison d'optimisation locale et globale : il est également possible de combiner une méthode d'optimisation locale comme le gradient Projété Perturbé avec une méthode d'optimisation globale stochastique comme l'algorithme génétique [28], ou alors avec la méthode du recuit simulé.
- * La combinaison des méthodes d'optimisation quantique et classique : Ces algorithmes exploitent les principes de l'informatique quantique pour explorer un espace de solutions plus grand, de manière plus efficace pour obtenir les résultats optimaux. Chacune de ces différentes méthodes d'optimisation présente des avantages et des inconvénients. Le choix de la méthode appropriée pour améliorer le calcul de la rigidité diélectrique d'un gaz ou mélange gazeux dépend de l'approche innovante que nous souhaitons apporter à ces travaux de recherche, des ressources computationnelles disponibles et de la projection envisagée vers le perfectionnement futur.

5.2.1 Correspondance spécifique avec le calcul des paramètres A, B et m

Les méthodes d'optimisation classiques appliquent généralement le calcul du gradient de la fonction coût, et ajustent les paramètres afin de faire converger la solution vers la valeur la plus faible. Cependant, il s'avère que cela contribue à diriger la solution vers des minimums locaux, pour des fonctions non convexes comme l'équation (5.4). Dans l'optique d'échapper aux minimums locaux de manière similaire au besoin de la méthode proposée par Verdon, G. et al, 2019 [117], QAOA applique les opérateurs UC et UM pour explorer simultanément plusieurs solutions en exploitant l'intrication et la superposition quantique. La recherche des valeurs optimales des paramètres A, B et m, est un problème d'optimisation combinatoire, qui peut être représenté sur la forme d'un hamiltonien quadratique binaire QUBO (Quadratic Unconstrained Binary Optimization) [5], une forme exploitable par l'algorithme QAOA. Les paramètres A, B, m sont discrétisés. Chaque paramètre est représenté par une combinaison de qubits, avec chaque qubit représenté par un système d'états numérique binaire. QAOA ajuste les paramètres γ et β pour explorer l'espace de solutions, à chaque itération, la fonction coût est évaluée et les états des qubits sont mesurés pour trouver la meilleure configuration qui minimise l'erreur. À la fin du processus, les valeurs optimales des paramètres A, B et m sont extraites après avoir identifié la combinaison de qubits qui minimise la fonction coût.

5.2.2 Rôle de l'algorithme QAOA dans le processus de régression

L'apport de l'algorithme QAOA dans le processus de régression pour trouver les valeurs optimales des paramètres A, B et m peut être résumé dans les points suivants :

- * Résolution du problème de minimums locaux : l'adaptation de l'algorithme QAOA au processus de régression appliqué à la formule du coefficient d'ionisation réduit par la pression permet d'éviter à l'algorithme de converger vers un optimum local, plutôt que de rechercher un optimum global qui garantit une solution qui se rapproche le plus des valeurs adéquates.
- * Exploration simultanée de plusieurs combinaisons dans l'espace de solutions : l'algorithme fonctionne de manière plus efficace en accélérant la recherche de la solution optimale grâce à la superposition quantique. Remarque : Généralement dans ce cas de figure, l'algorithme classique renvoie une réponse de manière beaucoup plus rapide que l'algorithme quantique, produisant une perception erronée de son efficacité élevée. Cependant, sachant que l'algorithme quantique explore un espace de solutions n fois plus grand que son homologue classique, il convient de conclure qu'il est plus rapide, car pour le même espace de

solutions exploré, l'algorithme classique prendrait n fois plus de temps pour renvoyer une réponse. * L'un des avantages de QAOA est qu'il s'adapte à différents types de problèmes complexes qui peuvent être représentés sous forme quadratique binaire.

5.3 Représentation du problème A, B, m classique sous forme quantique avec QAOA

5.3.1 Transformation QUBO

5.3.1.1 Discrétisation des paramètres

En mathématique, tout nombre réel ou entier dans un intervalle donné pouvant être représenté en un nombre binaire de n bits, peut prendre 2^n valeurs discrètes. Pour un paramètre A dans l'intervalle $[A_{min}, A_{max}]$, la discrétisation est donnée par ΔA défini comme : , ainsi A peut-être exprimé comme une somme pondérée de puissance de 2, où les poids sont représentés par les qubits binaires q_i^A sous la forme : (5.9)

De même, les paramètres B et m prendront la forme suivante respectivement (5.10) et (5.11) pour B dans l'intervalle $[B_{min}, B_{max}]$ et m dans l'intervalle $[m_{min}, m_{max}]$: (5.10) (5.11)

5.3.1.2 Linéarisation de la fonction coût

Pour convertir l'expression de la fonction coût en une équation QUBO, il est nécessaire de la transformer en forme linéaire, c'est-à-dire, en somme quadratique. La partie exponentielle de l'équation peut être linéarisée en utilisant le développement en série de Taylor exprimée par une approximation des trois premiers termes pour un besoin minimal de précision, exprimée en : . Ainsi, le terme exponentiel de la formule (5.6) devient : (5.12) En le substituant dans la formule (5.6) on obtient : (5.13)

5.3.1.3 Formulation de la fonction coût sous la forme de qubits

Lorsque les paramètres A , B et m de (5.9), (5.10), (5.11) sont remplacés dans l'équation minimisant la fonction coût (5.13) nous obtenons : (5.14) L'équation est ainsi exprimée sous forme de qubits q_i^A , q_j^B et q_{km} . Cette équation peut être développée, ensuite affinée et regroupée en une suite de termes constants, linéaires et quadratiques afin d'obtenir une équation finale sous la forme : .

5.3.2 Équation résultante pour implémentation

5.3.2.1 Approximation de la fonction

Pour faciliter l'implémentation préalable de la solution proposée, les termes quadratiques sont simplifiés en négligeant les termes d'ordres supérieurs. Les approximations suivantes sont appliquées : (5.15) Ainsi, l'équation (5.13) devient : (5.16) Puis, l'approximation suivante est appliquée pour linéariser l'exposant : (5.17) En remplaçant l'équation discrète de m (5.11) dans la l'approximation (5.17) on obtient : (5.18) La simplification suivante est appliquée : (5.19) Lorsqu'on remplace (5.19) dans (5.18) on obtient : (5.20) En remplaçant les approximations (5.9), (5.10) et (5.20) dans la formule (5.16) l'équation devient : (5.21) Tous les produits ont été multipliés pour obtenir des termes constants, linéaires et quadratiques, l'équation (5.21) devient, les détails sont dans l'annexe (A1.1) : Pour meilleure fluidité, chaque terme est regroupé dans une catégorie comme suit : *

- * Les termes constants : (5.22)
- * Les termes linéaires : (5.23) Dans (5.23), nous pouvons extraire les coefficients rattachés à chacun des qubits de l'équation et les représenter par , et comme coefficients respectifs de , et : (5.24) (5.25) (5.26) Le terme linéaire de l'équation devient : (5.27)
- * Les termes quadratiques : (5.28) Le même processus précédent est appliqué sur l'équation (5.28), les termes sont regroupés (Annexe A1.2) les coefficients rattachés à chacun des produits de qubits de l'équation sont représentés par , , , et comme coefficients respectifs des produits , , et : (5.29) (5.30) (5.31) (5.32) Le terme quadratique de l'équation devient : (5.33) Nous obtenons une équation sous la forme : (5.34)

5.3.2.2 Transformation du terme ternaire et équation finale

En effet, l'équation finale EQUBO introduit un produit ternaire représentant l'interaction conjointe de qubits associés aux paramètres A , B et m , mais qui ne peut être résolu avec un solveur QUBO standard jusqu'ici, élevant ce problème d'optimisation binaire sans contre à l'ordre polynomial [5], le solveur QUBO ne traite que les produits binaires de qubits. Nous allons utiliser une méthode permettant de remplacer le produit ternaire par une variable auxiliaire pour le rendre compatible au solveur QUBO. Cette méthode consiste à

introduire la variable auxiliaire nommée qui substituera le produit dans l'équation EQUBO en appliquant des pénalités logiques à cette variable pour garantir la représentation correcte du produit ternaire de qubits. Ainsi l'implémentation nécessite l'introduction d'un coefficient de pénalité λ selon le principe du lagrangien augmenté et les conditions de Karush-Kuhn-Tucker qui permettent de résoudre certains problèmes d'optimisation sous contraintes [9]. Dans ce cas, est donné par : (5.35) Avec comme contrainte : * si et seulement si , et , sinon * inférieure ou égal à , et En remplaçant (5.35) dans (5.34) l'équation finale, EQUBO devient : (5.36) Cette équation peut être à présent implémentée dans un algorithme QAOA pour obtenir les valeurs optimales de paramètres A, B et m.

5.4 Implémentation et programmation quantique

5.4.1 Calcul classique

Dans cette partie, la valeur de la rigidité diélectrique du mélange gazeux est premièrement estimée grâce au calcul classique, pour effectuer des comparaisons avec les résultats trouvés par l'algorithme quantique Avant la création de l'algorithme, il est nécessaire de procéder à la résolution de l'équation de Boltzmann pour obtenir les paramètres du mélange gazeux, à travers l'exécution du solver Bolsig+ (Annexe 3.1) qui fournit les solutions à l'état stationnaire de l'équation de Boltzmann pour les électrons dans un champ électrique uniforme [39]. Grâce à ce programme répertoriant une multitude de gaz, nous pouvons obtenir les paramètres nécessaires au calcul de certaines propriétés de mélanges gazeux. * Le solver a exécuté le mélange de 3 gaz : He à 90%, H2 à 6% et N2 à 4% et retourne en sortie un fichier .dat contenant de nombreux paramètres, dont le coefficient d'ionisation et le champ électrique réduits par la densité de particules N.

5.4.1.1 Importation des bibliothèques

* Numpy as np : importation des fonctionnalités pour le calcul scientifique.

5.4.1.2 Extraction et conversion des paramètres

* Le programme débute par l'extraction des valeurs du coefficient d'ionisation réduit par la densité de particules (α/N), une liste est initialisée pour stocker les valeurs de α/N et de N extraites (α_N_values et N_values), * Calcul du coefficient d'ionisation réduit par la pression α/p , les valeurs α_N_values sont multipliées par N_values et divisées par la pression p ($p=200000$ Pa). Les résultats sont stockés dans α_p_values , * Extraction des valeurs du champ électrique E en Td, ces valeurs sont stockées dans $electric_field_td_values$, * Conversion du champ électrique E de Td à V/m sachant qu'il suffit de multiplier la valeur en Td par $1e-21$ pour obtenir la valeur en V/m, le résultat est stocké dans $electric_field_vm_values$, * Calcul du rapport de la pression réduit par le champ électrique p/E en divisant p par $electric_field_vm_values$.

5.4.1.3 Définition de la fonction objectif

La fonction `create_ABm_problem()` est définie pour implémenter la fonction objectif décrite dans l'équation (5.4),

5.4.1.4 Calcul des paramètres A, B et m

* Définition des valeurs initiales de A, B, et m * Exécution de la routine `minimize()` de la bibliothèque scipy, pour implémenter le processus de régression afin de déterminer les valeurs des paramètres A, B et m qui minimisent la valeur de la fonction coût.

5.4.1.5 Calcul de la rigidité diélectrique

Après avoir obtenu les valeurs des paramètres A, B et m, ils peuvent être remplacés dans l'équation amélioré de . La formule utilisée dans la fonction `create_V_breakdown()` est basée sur l'équation de Paschen, qui décrit la tension de claquage d'un gaz en fonction de la pression et de la distance entre les électrodes. * Création de la fonction `create_V_breakdown()` * Exécution des calculs fonction des paramètres A, B, m, p, d, et γ , * Affichage des résultats.

5.4.2 Optimisation quantique : implémentation de l'équation QUBO sur de véritables ordinateurs quantiques.

Cet algorithme est inspiré du problème Maxcut résolu à l'aide de QAOA [53] :

5.4.2.1 Installation et importation des bibliothèques

Les bibliothèques importées sont : * Qiskit : avec ses sous-bibliothèques : * `qiskit.circuit.library` : importation de QAOAAnsatz permettant de générer le circuit quantique, * `qiskit.quantum_info` :

importation de Pauli et SparsePauliOP qui permettent de construire les termes quantiques, * `qiskit.transpiler.preset_manager` : importation de `generate_preset_pass_manager` pour l'optimisation du circuit afin de l'exécuter sur des processeurs quantiques, * `Qiskit_ibm_runtime` : importation de `QiskitRuntimeService` pour la connexion à un compte IBM afin d'accéder et interagir avec les ressources quantiques d'IBM à travers un jeton d'API. * `Qiskit_Optimization` : importation de `QuadraticProgram` pour la création d'un problème sous forme quadratique binaire, * `Numpy as np` : importation des fonctionnalités pour le calcul scientifique, * `Scipy` : importation de `minimize` permettant de trouver le minimum global de la fonction coût. * `Matplotlib.pyplot as plt` : importation des fonctionnalités permettant la visualisation des résultats sous forme graphique.

5.4.2.2 Définition de la fonction Objectif

Cette étape consiste à définir la fonction principale de notre programme, dont le but est d'estimer la rigidité diélectrique du mélange de différents gaz choisis pour évaluer la meilleure combinaison possible qui maximise la rigidité diélectrique du mélange résultant. Cette fonction est essentielle pour évaluer la capacité des mélanges gazeux à isoler les circuits électriques et prévenir les arcs électriques. La fonction `create_qubo_problem()` est définie pour implémenter la fonction objectif décrite dans l'équation EQUBO, elle commence par la création d'un problème quadratique à l'aide de la fonction `QuadraticProgram()` provenant de la bibliothèque `qiskit_optimization`. Ensuite :

- * L'ajout au problème des variables binaires q_A , q_B q_C pour A , B , m , et de la variable auxiliaire u_{aux} .
- * La discrétisation des paramètres A , B , et m , avec le calcul de ΔA , ΔB et Δm ,
- * Création de la constante QUBO
- * Initialisation et création des coefficients CA_i , CB_j , Cm_k , CA_iB_j , $CA_i m_k$, $CB_j m_k$ et $CA_iB_j m_k$ pour les termes binaires et quadratiques,
- * Ajout de la constante QUBO à la fonction objectif QUBO,
- * Création des différentes boucles pour l'ajout des coefficients linéaires et quadratiques pour i allant de 1 à n_A , j allant de 1 à n_B , et k allant de 1 à n_m ,
- * Ajout des termes ternaires à l'aide de la variable auxiliaire u_{aux} et des contraintes permettant de garantir la représentation correcte du produit ternaire. En sortie, nous obtenons la fonction objectif.

5.4.2.3 Implémentation du problème réel

Dans cette partie de l'algorithme, pour effectuer des calculs réels, les plages de valeurs sont définies selon l'exemple exécuté dans le calcul classique. Les données nécessaires pour l'implémentation sont :

- * Les valeurs du coefficient d'ionisation réduit par la pression, les valeurs du champ électrique, et la pression : elles sont extraites du fichier obtenu après la résolution de l'équation de Boltzmann pour le mélange gazeux He à 90%, H₂ à 6% et N₂ à 4%,
- * Les valeurs minimales et maximales des paramètres A , B et m sont choisies pour orienter le champ de recherche.
- * Les nombres de bits n_A , n_B et n_m sont choisis suffisamment grand pour permettre à l'algorithme d'encoder les solutions avec une bonne précision. Avec ces valeurs, le problème est représenté de façon réelle sous le nom `ABm_problem` et peut être soumis à l'optimisation.

5.4.2.4 Transformation sous forme quantique

Cette étape vise à transformer la fonction objectif sous forme compréhensible par un programme quantique.

- * La création de l'Hamiltonien pour QAOA se fait à l'aide de `SparsePauliOP` prenant en entrée le problème est représenté de façon réelle `ABm_problem` et retourne en sortie l'Hamiltonien du problème `qubit_op`. Le programme se poursuit par la construction d'un circuit QAOA paramétré par deux éléments γ et β , il est configuré de telle sorte que ces éléments essayent plusieurs valeurs de γ_1 à γ_n et β_1 à β_n afin de trouver la meilleure solution possible pour notre problème.
- * Le mappage de l'hamiltonien sur un circuit quantique se fait à l'aide de `QAOAAnsatz()` prenant en entrée `qubit_op`, avec pour paramètre `reps=2` indiquant que le circuit est paramétré par deux éléments, et renvoyant en sortie `ansatz_qubit_op`.
- * Il est possible à cette étape d'afficher les 2 éléments en exécutant la ligne de commande `ansatz_qubit_op.parameters` :

Affichage des paramètres γ et β

5.4.2.5 Optimisation

Pour pouvoir exécuter le programme sur des processeurs quantiques réels d'IBM, il est nécessaire d'avoir un compte sur la plateforme IBM Quantum, pour le cas pratique il s'agit d'un compte IBM cloud : Figure 5.2 : Création d'un compte IBM Cloud Ce compte donne accès à la création d'une instance nommée ici Qiskit Runtime-6r : Figure 5.3 : Détails de l'instance Qiskit Runtime-6r Qui contient un identifiant unique Cloud Resource Name (CRN) utilisé dans le programme pour accéder aux ressources quantiques allouées dans le plan choisi durant la configuration du compte. * L'accès à l'interface se fait à l'aide de `QiskitRuntimeService()` prenant comme paramètre le canal utilisé: `ibm_cloud`, et le token : l'identifiant unique, et renvoyant un objet généralement nommé `service`, utilisé pour soumettre les calculs quantiques. * Un objet backend est créé pour définir les caractéristiques et les options disponibles, de la ressource quantique qui sera sollicitée : le nombre minimal de qubits dont le programme a besoin pour fonctionner (`min_num_qubits=127`), s'il s'agit d'un simulateur ou d'un calculateur réel (`simulator=False`), s'il est opérationnel (`operational=True`). * Le circuit est optimisé à l'aide de `generate_preset_pass_manager()`, cette fonction définit le niveau d'optimisation du circuit quantique, prenant comme paramètres : le niveau d'optimisation (`optimization_level`) et la ressource quantique sur laquelle est exécuté le programme (`backend`). L'objet configuré est utilisé pour compiler le circuit `ansatz_qubit_op` et retourne le nouvel objet optimisé : `ansatz_isa`. Il est nécessaire d'initialiser les éléments γ et β du circuit, leur donnant une valeur initiale aléatoire à l'aide de l'objet `np` de la bibliothèque `numpy`. * Une fonction coût par défaut basée sur l'échantillonneur `Sampler` est définie pour estimer l'énergie minimale de l'Hamiltonien du problème, elle effectue préalablement le mappage des qubits virtuels du problème `ABm_problem` sur des qubits réels à l'aide de la fonction `apply.layout()`, la préparation et l'exécution des calculs sur un estimateur quantique (`estimator`), prenant comme argument le circuit optimisé `ansatz_isa`, l'Hamiltonien du problème `qubit_op`, et définit l'estimateur, et ensuite elle retourne le résultat attendu, la valeur minimale selon les paramètres fournis. Cette fonction est utilisée par la fonction `minimize()` de la bibliothèque `scipy` comme l'un des paramètres d'entrée lors de l'exécution du programme sur la ressource quantique sollicitée. Le programme optimisé est prêt pour la soumission à l'exécution quantique.

5.4.2.6 Exécution sur des processeurs quantiques réels

Les ressources quantiques utilisées pour l'exécution de ce programme sont représentées dans la figure suivante : Figure 5.4 : Processeurs quantiques IBM utilisés pour exécuter notre programme Le circuit QAOA paramétré du problème `ABm_problem` est soumis à une boucle d'optimisation itérative, les paramètres optimaux γ et β sont déterminés après une série d'évaluations effectuées grâce à l'optimiseur classique [53]. Une liste a été définie pour stocker les valeurs obtenues durant l'analyse du circuit, suivi de l'ouverture d'une session et de la configuration des options pour la suppression ou l'atténuation des erreurs. La méthode COBYLA (Constrained Optimization BY Linear Approximations) est sélectionnée pour résoudre les problèmes d'optimisation sous contrainte. Une fois l'exécution de l'optimisation terminée (5.5), le programme nous retourne un message : `Optimization terminated successfully`, après 18 minutes et 45 secondes et demie de calcul, ce qui stipule que le programme a trouvé une solution satisfaisante. Figure 5.5 : Première exécution réussie

Interprétation des résultats : * `Success` : l'opération a été menée avec succès * `Status` : – code représentant une optimisation réussie * `Fun` – la valeur de la fonction après optimisation * `x`: les valeurs des paramètres optimisés (γ et β) * `nfev` : le nombre d'itérations effectuées avant de converger vers la solution optimale * `mazcv` : représente les contraintes non respectées durant l'optimisation Les paramètres optimaux du circuit obtenus

à cette étape sont requis pour effectuer une seconde exécution du programme à travers la primitive Sampler de Qiskit, permettant d'obtenir le résultat final de l'exécution quantique, fondamental pour extraire les variables binaires relatives aux valeurs optimales des paramètres A, B, et m recherchées. * La méthode consiste à assigner à l'aide de la fonction assign_parameters(), les paramètres optimaux trouvés des éléments du circuit à l'échantillonneur quantique, afin de déterminer la chaîne de bits qui représente la solution avec la probabilité la plus élevée correspondant au paramètre optimal final. Cette fonction prend en entrée les résultats de l'exécution précédente, et assigne au circuit ansatz_isa les valeurs exactes optimales des éléments γ et β à la place des valeurs initiales, retourne l'objet optimisé pour l'exécution sur un processeur quantique réel. La figure 5.6 permet de visualiser le circuit quantique optimisé avec les valeurs numériques réelles des paramètres. Une capture permettant de visualiser le circuit quantique sous forme de diagramme est représentée dans l'annexe 3.2, obtenue grâce à la fonction draw().

Figure 5.6 : Affichage des paramètres du circuit optimisé

* Dans la suite du programme, l'algorithme prépare un état quantique afin de le mesurer pour obtenir une seule solution optimale après l'exécution (ayant la probabilité la plus élevée), une suite de valeurs binaires représentant les valeurs optimales des variables binaires γ , β , et θ définies dans l'équation EQUBO. * Un sampler est initialisé, Sampler(mode=backend) pour simuler l'exécution du circuit quantique optimisé optimized_circuit, et le nombre d'itérations a été défini à dix mille, suivi de la configuration des options pour la suppression ou l'atténuation des erreurs, ensuite le circuit quantique est exécuté sur un processeur quantique réel et les résultats de l'optimisation sont récupérés sous forme de chaînes binaires et stockés dans liste.

* Difficulté rencontrée : Ayant utilisé une instance donnant accès aux ressources quantiques payantes, nous avons constaté après plusieurs minutes d'exécution, qu'un montant énorme d'utilisation s'élevant à 2652,09 \$CA s'affichait dans le compte, nous avons immédiatement interrompu l'exécution des calculs et n'avons pas obtenu le résultat final, mais le message d'erreur dans la capture ci-dessous.

Figure 5.7 : Le programme en cours d'exécution a été interrompu

En effet, l'instance utilisée affichait en temps réel l'évolution des calculs, les "Job ID" et les coûts d'exécution de chaque partie du programme comme présenté explicitement à l'annexe 3.3; de ce fait le montant affiché dans le compte ne reflétait guère le coût réellement pratiqué sur la plateforme. Une contestation de cette facture est en cours de traitement avec le service commercial d'IBM.

Figure 5.8 : Le coût d'utilisation de l'instance

Néanmoins, les recherches menées jusqu'ici et les résultats précédemment obtenus peuvent nous permettre d'affirmer que cette méthode est prometteuse et fournit une alternative fiable et précise pour le calcul de la rigidité diélectrique d'un mélange gazeux grâce à l'algorithme quantique QAOA. Le résultat attendu de cette exécution est un vecteur de valeurs binaires permettant d'extraire les valeurs optimales des qubits binaires γ , β , et θ . Ces valeurs pourront être remplacées dans les équations (5.11), (5.12) et (5.13) pour calculer les valeurs optimales de A, B et m.

5.4.3 Les défis de la méthode proposée

Comme toute méthode au stade de conception, la méthode proposée se heurte à des défis que nous pouvons regrouper sous trois catégories : les approximations des termes, la complexité de l'algorithme QAOA, les limitations matérielles comprenant le coût d'utilisation, le temps de calcul et les bruits et imperfections des qubits. L'informatique quantique, bien qu'étant encore en plein développement, rencontre des contraintes matérielles qu'il faudrait observer et analyser afin de déterminer son utilité pour la résolution d'un problème donné. Il s'agit :

- * Du bruit des qubits et des portes quantiques : durant l'exécution des calculs, les résultats peuvent être détériorés par la présence des bruits provenant des qubits. Le nombre

de qubits des ordinateurs quantiques disponible pour les calculs est également limité à 127 qubits et 156 qubits. * L'accès aux ressources : sur la plateforme d'IBM par exemple, l'accès gratuit aux processeurs quantiques est limité à dix minutes d'exécution des calculs quantiques par mois. Et la file d'attente est assez longue selon la quantité de demandes soumises par les utilisateurs du monde entier. * Le coût élevé de l'option payante : comme cela a été notre cas, nous avons sollicité l'ouverture d'une session pour l'exécution du programme, et le coût a été un obstacle nous contraignant à stopper l'exécution des calculs. * Le temps d'exécution est élevé : cela est dû au nombre d'itérations également très élevé pour permettre à l'algorithme de converger vers la solution globalement optimale. * La complexité de l'algorithme QAOA a bien été définie par Blekos, K. et al. (2024) [5], qui ont fait une analyse comparative des différents modèles d'adaptation QAOA, de ses forces et de ses faiblesses.

Chapitre 6 - CONCLUSION, DISCUSSIONS ET PERSPECTIVES

6.1 Conclusion

En observant l'évolution technologique prendre une ampleur exponentielle à l'ère du numérique, avec l'avènement de l'intelligence artificielle, de l'informatique quantique, des jumeaux numériques et bien d'autres techniques émergentes, nous nous sommes demandé comment ces progrès pouvaient impacter le domaine de l'énergie électrique. Ainsi, face au problème de remplacement du gaz SF6 dans les disjoncteurs moyenne tension VOX posé par CO7, un défi est apparu : trouver le moyen d'exploiter les nouvelles technologies et techniques émergentes pour apporter une solution à la recherche d'une alternative au SF6 dans les appareils de moyenne tension. C'est dans cette optique que nous nous sommes attelés à étudier dans ce projet de recherche, les différents outils de modélisation et de simulations pouvant nous permettre de concevoir une méthode capable de trouver un gaz ou un mélange de gaz respectueux de l'environnement, et susceptible de remplacer l'utilisation du SF6. La méthode proposée dans cette thèse est une méthode innovante basée sur l'adaptation d'un algorithme quantique existant et permet d'explorer et exploiter les avantages de l'informatique quantique.

6.2 Discussions

L'algorithme adapté pour concevoir la méthode proposée est une variante de l'algorithme QAOA pour l'optimisation continue, car cette approche peut être utilisée pour l'optimisation des problèmes avec ou sans contrainte [117]. Cette variante a un meilleur rendement par rapport à n'importe quel algorithme classique proposé jusqu'ici, car elle permet de trouver en un temps amélioré des solutions approximatives à des problèmes dits NP-difficile [29] [128]. Bien que l'exécution de l'algorithme ait été interrompue, le développement montre qu'un résultat satisfaisant est attendu dans une exécution complète. Cette étude est bénéfique pour l'avancement de la science car les essais numériques non aboutis, effectués sur de véritables processeurs quantiques ont mis en exergue le besoin de faire une évaluation rigoureuse, avec à la clé, une estimation des coûts d'exécution d'un programme avant toute soumission. De plus, la faisabilité des mélanges gazeux optimisés par le calcul quantique a été établie, ainsi que les limites de l'algorithme initial, entraînant des ajustements à implémenter pour une meilleure convergence du modèle. Il s'agit ici d'une méthode innovante, dans la littérature, nous n'avons pas trouvé de publications ayant trait à l'utilisation de l'algorithme quantique QAOA pour le calcul de la rigidité diélectrique d'un mélange gazeux. Les méthodes trouvées sont pour la plupart des modèles classiques. Cette méthode pourrait alors inspirer les chercheurs à approfondir les calculs pour une représentation élargie des caractéristiques de mélanges gazeux. Les forces de cette méthode se situent sur le niveau d'exploration de l'espace de solutions, en effet une méthode de calcul quantique atteint des espaces de solutions inatteignables avec le calcul classique. Les faiblesses de cette méthode concernent le temps d'exécution relativement élevé, le coût d'accès aux infrastructures quantiques et les erreurs

liées aux qubits.

6.2.1 Analyse des solutions aux défis rencontrés

Les défis rencontrés sont recensés avec objectivité dans le but de les surmonter et de conduire à des résultats satisfaisants, ainsi les solutions proposées sont les suivantes :

- * L'utilisation des simulateurs quantiques à la place des processeurs quantiques réels est une excellente alternative temporaire, car elle permet de bénéficier de la puissance du calcul haute performance fourni par les supercalculateurs classiques tout en exploitant les propriétés de calcul quantiques, en attendant la stabilisation des processeurs quantiques et l'amélioration de l'accessibilité.
- * Des collaborations enrichissantes entre les universités et les industries disposant de ressources matérielles quantiques peuvent être envisagées pour stimuler la recherche dans ce domaine prometteur.

6.2.2 Impact potentiel du jumeau numérique du disjoncteur VOX

Ce projet de thèse propose un cadre conceptuel en vue d'élaborer les bases pour la création du jumeau numérique d'un disjoncteur moyenne tension. La méthodologie présente une analyse détaillée et explore la technologie de l'informatique quantique, l'algorithme quantique développé est destiné à être intégré dans le programme visant à concevoir le prototype du disjoncteur. Les techniques implémentées dans ce travail offrent la possibilité de produire un outil dans lequel on pourra définir les critères essentiels au fonctionnement attendu, et le modèle numérique pourra :

- * Reproduire le comportement diélectrique, thermique, mécanique, en régime permanent et en court-circuit du disjoncteur VOX,
- * Générer différents scénarios en apprenant par la méthode d'apprentissage profond (Deep Learning),
- * Faire des simulations de mélanges gazeux en accédant à différentes bases de données pour récupérer les propriétés de gaz de manière autonome, afin d'identifier le mélange adéquat pour le remplacement du SF₆
- * Effectuer la maintenance du disjoncteur en temps réel
- * Proposer des solutions
- * Anticiper les défaillances et prédire les pannes avec la fonctionnalité d'alertes.

Cette thèse est la première étape d'un projet ambitieux et innovant, ayant une portée anticipative et un impact significatif dans le domaine de l'ingénierie électrique :

- * Réduction des essais expérimentaux longs et coûteux,
- * Aide à la conception de disjoncteurs plus performants et conformes aux normes environnementales,
- * Impact sur la recherche environnementale en facilitant l'identification rapide des alternatives efficaces à l'isolation gazeuse au SF₆,
- * Potentiel d'utilisation dans d'autres applications, comme les transformateurs et les appareillages isolés.

6.3 Perspectives et travaux futurs

Pour les recherches futures, il est important d'établir un plan de validation de la méthode proposée :

- * Validation par des simulations numériques : Comparer les résultats issus de l'exécution de l'algorithme aux résultats issus des simulations numériques à l'aide des outils de simulation tels que COMSOL Multiphysics.
- * Validation par des essais expérimentaux avec des éclateurs à sphères par exemple : Les éclateurs à sphères sont des dispositifs simples permettant de mesurer la tension de claquage d'un gaz ou d'un mélange gazeux sous des conditions bien définies (pression, température, distance entre les électrodes). La validation par des essais expérimentaux consistera à concevoir un plan pour tester quelques mélanges gazeux alternatifs au SF₆ avec des éclateurs à sphères, mesurer les tensions de claquages pour différentes pressions et températures, comparer ces résultats expérimentaux aux résultats issus de l'algorithme.
- * Validation par comparaison avec des données expérimentales disponibles dans la littérature scientifique pour montrer que l'algorithme est capable de reproduire les performances connues. De plus, une amélioration de cette méthode pourrait être bénéfique pour approfondir les résultats attendus. Par exemple l'adaptation pour traiter de plus grands ensembles de paramètres. L'exemple traité dans cette thèse devrait être étendu pour couvrir des mélanges de plus grande ampleur. La création d'une interface graphique pour faciliter l'accessibilité à l'utilisateur et la visualisation des résultats, L'extension

de la méthode à plusieurs autres propriétés de mélanges gazeux, De plus, l'informatique quantique est en perpétuel développement et n'est encore qu'à ses débuts, la méthode de traitement des erreurs liées aux qubits et des limitations de la précision numérique fait l'objet de nombreuses recherches et s'améliore au fil du temps pour réduire l'affectation de la précision des résultats, en particulier pour des calculs complexes.

Primary Sources

1	https://www.canada.ca/fr/environnement-changement... Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a présenté les valeurs du PRP sur 100 ans dans son cinquième rapport d'évaluation. Ces valeurs sont cohérentes avec la décision 18/CMA.1 .	<div><div></div>0.07%</div>
2	https://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327... À voir sur BANQ numérique : Guide de quantification des émissions de gaz à effet de serre	<div><div></div>0.07%</div>

Report was generated on March, 17 2025