

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة سطيف 1 - فرحات عباس

UNIVERSITE SETIF1-FERHAT ABBAS

FACULTE DE TECHNOLOGIE

THESE

Présentée au Département d'Electrotechnique

Pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux Electriques

Par

M^{me} LATRI FATIHA

THEME

Modélisation de l'arc électrique dans les disjoncteurs SF₆ à haute tension

Soutenue le : 02/07/2025 devant un Jury composé de :

M. BAYADI Abdelhafid	Professeur à l'Université Sétif 1- Ferhat ABBAS	Président
M. GHERBI Ahmed	Professeur à l'Université Sétif 1- Ferhat ABBAS	Directeur de thèse
M. HALIS Abderrahmane	MCA à l'Université Sétif 1- Ferhat ABBAS	Examinateur
M. ZORIG Assam	MCA à l'Université Mohamed Boudiaf, Msila	Examinateur
M. BELHAOUCHET Khaled	MCA à l'Université Mohamed Boudiaf, Msila	Examinateur
M. BEDOUI Samir	MCA à l'Université Larbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi	Examinateur

Je dédie ce travail
A ma très chère mère

تصريح

"أصرح أنا السيدة العطري فتيحة أنني كتبت هذه رسالة الدكتوراه دون أي مساعدة من الآخرين وبدون استخدام وثائق ومساعدة غير تلك المذكورة، وأني ذكرت جميع المصادر المستخدمة وأني قد استشهدت بها بشكل صحيح وفقا لقواعد الاقتباس الأكاديمي المعمول بها."

Declaration of authorship

"I hereby declare that I have written this thesis without any help from others and without the use of documents and aids other than those stated; that I have mentioned all used sources and that I have cited them correctly according to established academic citation rules."

Déclaration d'auteur

"Je, soussignée M^{me} LATRI Fatiha, déclare par la présente que j'ai rédigé cette thèse sans l'aide d'autres personnes et sans l'aide de documents et d'aides autres que ceux mentionnés, que j'ai mentionné toutes les sources utilisées et que je les ai correctement citées."

Liste des publications

Les algorithmes et modèles décrits dans cette thèse ont été développés et décrits aussi dans les articles et publications suivantes :

Publications dans des Revues avec Comité de Lecture International

1. **F. Latri**, and A. Gherbi, “A new Mayr-type arc model for the arc-circuit interaction study,” International Journal on Electrical Engineering and Informatics (IJEEI), Vol. 16, N° 4, December 2024, pp.519-530.

Communications dans des Congrès Internationaux avec Comité de Lecture

1. **F. Latri**, A. Gherbi and M. N. Alam, “Estimation of the Schavemaker arc model parameters for high-voltage circuit breakers,” Proceedings of the Electrical Engineering International Conference EEIC’23, Bejaia, Algeria, December 2023, pp. 226-231.
2. **F. Latri**, “Updating and Improvement of the A.M.B. program,” Proceedings of the Electrical Engineering International Conference EEIC’19 Bejaia, Algeria, December 04, 05, 2019, pp.87-92.

Remerciements

Avant et après toute chose, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers ALLAH, qui m'a apporté son aide, m'a accordé la santé et m'a donné la patience pour mener à bien ce travail.

Les travaux de recherche présentés dans cette thèse ont été effectués dans le laboratoire de la Qualité d'Energie dans les Réseaux Electriques (QUERE) de L'UNIVERSITE SETIF1 FERHAT ABBAS(Algérie), dans le Laboratoire d'Automatique de Sétif (LAS), à l'Université SETIF 1-FERHAT ABBAS(Algérie) et dans le Laboratoire de Génie Electrique de BEJAIA (LGEB), de l'université de BEJAIA (Algérie).

Je souhaite exprimer mes remerciements sincères à Monsieur AHMED GHERBI, Professeur au département d'électrotechnique de l'Université Sétif 1- FERHAT ABBAS, pour le suivie de ce travail, pour ses commentaires objectifs et pour le temps précieux qu'il a mis pour corriger la thèse.

Je suis également très honorée que Monsieur ABDELHAFID BAYADI, Professeur à l'Université Sétif 1- Ferhat ABBAS, ait accepté d'être président du jury de ma soutenance.

Je remercie également tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail.

Je remercie vivement le professeur RENE PETER PAUL SMEETS, spécialiste de l'innovation et de la technologie des laboratoires KEMA du groupe CESI, pour l'autorisation d'utiliser les courbes de courant et de la tension d'arc mesurés au laboratoire haute puissance de KEMA au PAYS BAS, qui correspondent aux disjoncteurs 245kV, 145kV et 123kV et publiées dans la référence [39] de cette thèse.

Sétif, le 05/04 /2025

M^{me} FATIHA LATRI

Chapitre 01	1
Introduction Générale	1
1.1. Contexte Général.....	1
1.2. Problématique	2
1.2.1. Choix du modèle d'arc.....	2
1.2.2. Détermination précise des paramètres des modèles d'arc	2
1.2.3. Outil de simulation des transitoires dans un disjoncteur HT.....	3
1.3. Objectifs de la thèse.....	3
1.4. Structure de la thèse	3
Chapitre 02	5
LES DISJONCTEURS SF₆ HAUTE TENSION	5
2.1. Introduction.....	5
2.2. Disjoncteurs HT.....	5
2.2.1. Types de disjoncteurs HT.....	5
2.2.2. Principe général de fonctionnement des disjoncteurs HT	6
2.2.3. Classification des disjoncteurs HT en fonction de l'utilisation	8
2.3. Disjoncteurs SF ₆ HT.....	8
2.3.1. Propriétés du gaz SF ₆	8
2.3.2. Classification des disjoncteurs SF ₆ HT selon l'installation.....	11
2.3.3. Températures de service.....	13
2.3.4. Description des disjoncteurs « Live-Tank ».....	14
2.3.5. Principe d'extinction de l'arc.....	14
2.3.6. Système de contacts.....	15
2.3.7. Avantages des disjoncteurs SF ₆ HT.....	16
2.3.8. Inconvénients des disjoncteurs SF ₆ HT et futures alternatives	17
2.4. Conclusion.....	17
Chapitre 03	18
CARACTERISTIQUES ASSIGNEES LIEES AUX COURANTS DE COURT-CIRCUIT	18
3.1. Introduction.....	18
3.2. Types de courants de court-circuit.....	18
3.3. Etablissement d'un courant de court-circuit	19
3.3.1. Fonctionnement normal	19
3.3.2. Régime de court-circuit.....	20
3.3.3. Caractéristiques du courant de court-circuit établi	23
3.3.4. Courant de court-circuit symétrique.....	27
3.4. Coupure d'un courant de court-circuit	27

3.4.1. Processus de coupure d'un courant de court-circuit.....	27
3.4.2. Pointe d'extinction.....	28
3.4.3. Tension transitoire de rétablissement.....	29
3.4.4. Conditions de réussite de la coupure.....	29
3.5. Fermeture sur court-circuit.....	30
3.6. Caractéristiques assignées liées aux courants de court-circuit.....	30
3.6.1. Tension assignée.....	30
3.6.2. Courant assigné en service continu.....	30
3.6.3. Fréquence assignée.....	31
3.6.4. Pouvoir de coupure assigné en court-circuit.....	31
3.6.5. Pouvoir de fermeture assigné en court-circuit.....	32
3.6.6. Durée de coupure assignée.....	32
3.7. Conclusion.....	33

Chapitre 04 34

ESSAIS D'ETABLISSEMENT ET DE COUPURE DES COURANT DE COURT-CIRCUIT.....34

4.1. Introduction.....	34
4.2. Défaut aux bornes triphasé.....	34
4.2.1. Courant de défaut aux bornes triphasé à la terre.....	35
4.2.2. Facteur du premier pôle.....	35
4.2.3. Représentations normalisées des ondes de la TTR.....	36
4.3. Vérification de la capacité d'établissement et de coupure des défauts aux bornes.....	39
4.3.1. Essais de coupure des défauts aux bornes triphasés normalisés.....	39
4.3.2. Essais normalisés de fermeture sur défaut aux bornes triphasé.....	40
4.4. Défaut proche en ligne.....	41
4.4.1. Forme de la TTR côté ligne.....	41
4.4.2. Calcul des paramètres de la TTR côté ligne.....	43
4.5. Essai normalisé du défaut proche en ligne.....	45
4.5.1. Cas d'un défaut proche en ligne L90.....	45
4.5.2. Cas d'un défaut proche en ligne L75.....	46
4.5.3. Longueur critique de la ligne.....	46
4.6. Essais type des disjoncteurs HT.....	47
4.7. Essais d'établissement et de coupure des courants de court-circuit.....	47
4.7.1. Essais dans le réseau électrique.....	47
4.7.2. Essais dans un laboratoire haute puissance.....	48
4.8. Types d'essais dans un laboratoire à haute puissance.....	50
4.8.1. Essais directs.....	50
4.8.2. Essais synthétiques.....	50
4.8.3. Essai de coupure d'un courant de court-circuit dans un circuit d'essai direct.....	50
4.8.4. Essai de fermeture sur court-circuit dans un circuit d'essai direct.....	52
4.8.5. Lignes électriques artificielles utilisées dans un circuit d'essai.....	52
4.9. Conclusion.....	54

Chapitre 05 55

UN NOUVEAU MODELE D'ARC TYPE-MAYR POUR L'ETUDE DE L'INTERACTION ARC-CIRCUIT55

5.1. Introduction.....	55
------------------------	----

5.2. Modèles d'arc à boîte noire.....	56
5.2.1. Modèles d'arc de base	56
5.2.2. Modèles d'arc type-MAYR.....	57
5.2.3. Modèles d'arc en série	59
5.3. Modèle d'arc proposé	62
5.4. Simulation numérique avec le modèle d'arc proposé.....	63
5.5. Comparaison du modèle d'arc proposé avec les modèles d'arc existants	64
5.6. Conclusion.....	72

Chapitre 06 73

ESTIMATION DES PARAMETRES DES MODELES D'ARC A BOITE NOIRE 73

6.1. Introduction.....	73
6.2. Généralités sur l'optimisation	73
6.2.1. Méthode déterministe/stochastique.....	74
6.2.2. Optimisation globale/locale.....	74
6.3. Estimation des paramètres du modèle d'arc de SCHAVEMAKER avec U_{arc}	74
6.3.1. Procédure d'estimation des paramètres	74
6.3.2. Méthodes d'optimisation utilisées.....	75
6.3.3. Résultats d'estimation des paramètres.....	82
6.1. Simulation numérique	83
6.2. Conclusion.....	88

Chapitre 07 89

SIMULATION DES TRANSITOIRES DANS LES DISJONCTEURS HAUTE TENSION 89

7.1. Introduction.....	89
7.2. Simulation des transitoires dans les disjoncteurs HT	89
7.3. AMB (Arc Model Blockset)	90
7.3.1. Actualisation de l'outil AMB.....	91
7.4. Le nouvel AMB	92
7.4.1. Librairie et circuit d'essai du nouvel AMB	92
7.4.2. Incorporation des modèles d'arc dans MATLAB/ Simulink/PSB.....	94
7.5. Comparaison de l'ancien et du nouvel AMB	96
7.5.1. Dimensionnement du circuit d'essai de l'ancien AMB	97
7.5.2. Dimensionnement du circuit d'essai du nouvel AMB.....	98
7.5.3. Résultats de simulation et comparaison du nouvel et de l'ancien AMB	99
7.6. Conclusion.....	102

Chapitre 08 103

CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES..... 103

8.1. Introduction.....	103
8.2. Contexte	103
8.3. Contributions.....	104

Liste des figures

Figure 2.1. Schéma fonctionnel simplifié d'un disjoncteur HT	7
Figure 2.2. Transformateur de courant.....	7
Figure 2.3. Principe de fonctionnement d'un disjoncteur HT	8
Figure 2.4. Disjoncteur SF ₆ unipolaire 420 kV à deux chambres de coupure.	9
Figure 2.5. Atome de Soufre et molécule du gaz SF ₆	9
Figure 2.6. Rigidité diélectrique du gaz SF ₆ et des milieux connus [13]	10
Figure 3.1. Schéma équivalent d'une phase d'un réseau en fonctionnement normal.....	19
Figure 3.2. Schéma simplifié d'un réseau à l'occurrence d'un court-circuit.....	20
Figure 3.3. Ondes de la tension d'alimentation $e(t)$, du courant de service $i_s(t)$ et du courant de court-circuit total $i_t(t)$	22
Figure 3.4. Courant de court-circuit établi $i(t)$, sa composante alternative $i_1(t)$ et sa composante aperiodique continue $i_2(t)$	23
Figure 3.5. Courant dynamique obtenu au zéro de la tension	26
Figure 3.6. Courant de court-circuit symétrique obtenu à la crête de la tension.....	27
Figure 3.7. Tension d'arc (u), pointe d'extinction, courant d'arc (i) et courant post-arc [25]	28
Figure 3.8. Principe de coupure d'un courant de court-circuit.	29
Figure 3.9. Composante aperiodique du pouvoir de coupure [10].....	32
Figure 3.10. Durée de coupure [10].....	33
Figure 4.1. Circuit avec un défaut aux bornes triphasé à la terre.....	35
Figure 4.2. Représentation de la TTR, a) Représentation par deux paramètres,.....	38
Figure 4.3. Défaut proche en ligne [2].	42
Figure 4.4. TTR dans le cas d'un défaut proche en ligne [2].....	43
Figure 4.5. Paramètres de la TTR côté ligne [27].....	44
Figure 4.6. Diagramme unifilaire d'une station d'essai alimentée par le réseau électrique [2].....	49
Figure 4.7. Diagramme unifilaire d'une station d'essai HP utilisant des générateurs [2].	49
Figure 4.8. Circuit d'essai direct d'une phase [2]	51
Figure 4.9. Courbes de courant et tension d'une phase durant une interruption du courant de court-circuit [2].	51
Figure 4.10. Courbes de courant et tension d'une phase d'un essai de fermeture sur court-circuit [2].....	52
Figure 4.11. Circuit de la ligne artificielle de KEMA [27].....	53
Figure 4.12. TTR durant la coupure d'un défaut proche en ligne L90 par un disjoncteur SF ₆ 145kV/31,5kA/60Hz [2].	53
Figure 5.1. Caractéristique statique d'un arc de forte puissance [44].	57
Figure 5.2. Modèle d'arc de KEMA.....	61
Figure 5.3. Tensions d'arc mesurée et simulée en utilisant le modèle de SCHAVEMAKER de l'équation (5-6) [37]. ..	63

Figure 5.4. Circuit d'essai pour la simulation d'un défaut proche en ligne L90.....	64
Figure 5.5. Courbes du courant et de la tension d'arc mesurés (CB245) [39].	65
Figure 5.6. Tension et courant d'arc simulés à l'aide du modèle d'arc proposé (CB245).....	65
Figure 5.7. Courbes du courant et de la tension d'arc mesurés (CB145) [39]	66
Figure 5.8. Courbes du courant et de la tension d'arc mesurés (CB123) [39]	66
Figure 5.9. Courants d'arc simulés en utilisant les modèles d'arc existants.	67
Figure 5.10. Tension d'arc simulée en utilisant les modèles d'arc de MAYR modifié , de HABEDANK et le modèle d'arc proposé (CB245).....	68
Figure 5.11. Tension d'arc simulée en utilisant les modèles d'arc de SCHWARZ, de TP KEMA et le modèle d'arc proposé (CB245).	69
Figure 5.12. Comparaison entre le modèle d'arc proposé et le modèle de KEMA (CB145).....	69
Figure 5.13. Comparaison entre le modèle d'arc proposé et le modèle de KEMA (CB 245).....	70
Figure 5.14. Comparaison entre le modèle d'arc proposé et le modèle de KEMA (CB 123).	70
Figure 5.15. Courant post-arc simulé en utilisant le modèle d'arc proposé et le modèle de KEMA (CB245).....	71
Figure 5.16. Courant post-arc simulé en utilisant le modèle d'arc proposé et le modèle d'arc de KEMA (CB145). 71	
Figure 5.17. Courant post-arc simulé en utilisant le modèle d'arc proposé et le modèle d'arc de KEMA (CB123). 72	
Figure 6.1. Organigramme de la méthode du recuit simulé [59].....	81
Figure 6.2. Schéma général des programmes d'optimisation utilisant <i>fminsearch</i> , <i>lsqnonlin</i> , <i>fminunc</i> , <i>simulannealbnd</i> , <i>GA</i> et <i>patternsearch</i>	83
Figure 6.3. Organigramme de la technique PSO.....	84
Figure 6.4. Tensions d'arc simulées en utilisant <i>PSO</i> , <i>GA</i> , <i>SA</i> et <i>fminunc</i> (CB245).	86
Figure 6.5. Tensions d'arc simulées en utilisant <i>PSO</i> , <i>GA</i> , <i>SA</i> , <i>PS</i> et <i>fminunc</i> (CB145).	86
Figure 6.6. Tensions d'arc simulées en utilisant <i>PSO</i> , <i>GA</i> , <i>SA</i> , <i>PS</i> , <i>fminunc</i> , <i>fminsearch</i> et <i>lsqnonlin</i> (CB123).	87
Figure 7.1. Librairie des modèles d'arc dans l'ancien AMB [64].....	90
Figure 7.2. Circuit d'essai pour la coupure d'un courant de défaut proche en ligne dans l'ancien AMB [64].	91
Figure 7.3. Ligne artificielle RLC dans l'ancien AMB [64].	91
Figure 7.4. Incorporation des modèles d'arc dans l'ancien AMB à l'aide du block DEE de Simulink/PSB [65]	92
Figure 7.5. Librairie des modèles d'arc et des lignes artificielles du nouvel AMB.	93
Figure 7.6. Ligne artificielle RLC $k=1,33$ [27].....	93
Figure 7.7. Ligne artificielle KEMA $k=1,6$ [27].....	93
Figure 7.8. Ligne artificielle KEMA $k=1,7$ [27].....	93
Figure 7.9. Ligne artificielle KEMA $k=1,8$ [27].....	94
Figure 7.10. Circuit d'essai du nouvel AMB pour la coupure d'un courant de défaut proche en ligne	94
Figure 7.11. Equations du modèle de MAYR modifié dans MATLAB/Simulink/PSB	95
Figure 7.12. Modèle d'arc de MAYR modifié dans le nouvel AMB	96
Figure 7.13. TTR simulée dans l'ancien et le nouvel AMB.	99
Figure 7.14. TTR simulée dans le nouvel AMB.	100

Figure 7.15. Courant de la ligne simulé dans l'ancien et le nouvel AMB.....	100
Figure 7.16. Valeurs du courant maximal de la ligne simulé dans l'ancien et le nouvel AMB.....	101
Figure 7.17. Tensions d'arc mesurée et simulée dans l'ancien et le nouvel AMB.....	101

Liste des tableaux

Tableau 3.1. Valeur efficace de la composante symétrique du courant de court-circuit (<i>CEI 60909</i>) [23].	24
Tableau 3.2. Valeurs du facteur de tension c (<i>CEI 60909</i>) [23].	25
Tableau 3.3. Séries de Renard adoptées par <i>CEI</i> [16].	30
Tableau 4.1. Valeurs normales de la TTR présumée pour la tension assignée 245kV (T100, T60, T30 représentation à quatre paramètres et T10 représentation à deux paramètres) [10].	40
Tableau 5.1. Paramètres des modèles d'arc existants (CB245).	67
Tableau 5.2. Paramètres du modèle d'arc proposé et du modèle de KEMA (CB145).	67
Tableau 5.3. Paramètres du modèle d'arc proposé et du modèle de KEMA (CB123).	67
Tableau 6.1. Résultats de l'estimation des paramètres du modèle de SCHAVEMAKER (CB245).	83
Tableau 6.2. Résultats de l'estimation des paramètres du modèle de SCHAVEMAKER (CB145).	85
Tableau 6.3. Résultats de l'estimation des paramètres du modèle de SCHAVEMAKER (CB123).	85
Tableau 6.4. <i>RMSE</i> Correspondant à l'utilisation de PSO, GA, SA et <i>fminunc</i> .	87

Liste des Acronymes et Symboles

Acronymes

AG	Algorithme Génétique
AMB	Arc model blockset
ANSI	American National Standards Institute
CB	Circuit breaker
CEI	Commission Electrotechnique internationale
DEE	Differential Equation Editor
EMTP	Electromagnetic Transient Program
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
HT	Haute Tension
HP	Haute Puissance
PSB	Power System Blockset
PSO	Particle Swarm Optimisation
SF ₆	Sulfur Hexafluoride
SA	Simulated Annealing
TC	Transformateur de Courant
TTR	Tension transitoire de rétablissement.
TTRI	Tension transitoire de rétablissement initiale
V _{ATR}	Vitesse d'accroissement de la tension de rétablissement.
V _{ATRL}	Vitesse d'accroissement de la tension de rétablissement côté ligne
ZC	Zéro du Courant

Symboles

c	facteur de la tension équivalente au point du défaut
C	capacité de la ligne artificielle RLC
C_L	capacité de la portion de la ligne entre la borne du disjoncteur et le point du défaut.
C_s	capacité du circuit en amont du point de court-circuit
e	tension sinusoïdale de la source d'alimentation
E	valeur efficace de la tension de la source d'alimentation
f	fréquence du système
φ	angle de déphasage entre la tension et le courant au régime permanent
ψ	angle de déphasage entre la tension et le courant de court-circuit
i	courant d'arc
i_1	composante alternative symétrique du courant de court-circuit
I_1	valeur efficace du courant de court-circuit symétrique
i_2	composante continue apériodique du courant de court-circuit
I_{DYN}	courant dynamique
I_L	courant de défaut proche en ligne
I_n	courant assigné en service continu
i_s	courant de service
I_{sc}	valeur normale de la valeur efficace de la composante périodique du pouvoir de coupure assigné en court-circuit
i_t	courant de court-circuit total
k	facteur de crête de la TTR du défaut proche en ligne
k_{af}	facteur d'amplitude

k_{pp}	facteur du premier pôle
L_L	inductance de la portion de la ligne entre la borne du disjoncteur et le point de défaut proche en ligne.
L_s	inductance côté source ou inductance équivalente en amont du point de court-circuit
M	rapport entre le courant de défaut proche en ligne et le pouvoir de coupure assigné en court-circuit I_{sc} .
p	pression de remplissage
ω	pulsation
R_s	résistance équivalente en amont du point de court-circuit.
θ	angle électrique qui caractérise le décalage entre l'instant $t=0$ et l'origine de la tension d'alimentation.
u	tension d'arc
u_1	première tension de référence
u_a	Tension aux bornes de l'impédance en aval du disjoncteur
u_c	valeur crête de la TTR (cas du défaut aux bornes).
u_L	chute de tension instantanée de la portion de la ligne comprise entre la borne avale du disjoncteur et le point de court-circuit.
\hat{U}_L	valeur crête de chute de tension instantanée de la portion de la ligne comprise entre la borne avale du disjoncteur et le point de court-circuit.
U_L^*	valeur crête de la TTR côté ligne du défaut proche en ligne.
U_n	tension composée nominale du réseau triphasé dans lequel le court-circuit a eu lieu.
U_r	tension assignée du disjoncteur
t_1	instant correspondant à la tension u_1
t_2	instant correspondant à la valeur crête de la TTR à quatre paramètres.
t_3	instant correspondant à la valeur crête de la TTR à deux paramètres.
τ	constante de temps de désionisation.
τ_1	constante de temps du circuit R, L
t_c	instant de la coupure
t_{op}	Durée minimale d'ouverture du premier pôle
t_r	temps du relais
t_s	instant de séparation des contacts
V_1	tension rétablie à fréquence du système aux bornes du premier pôle qui coupe, avant l'interruption du courant dans les deux autres pôles.
W	énergie de coupure
X_d, X_i, X_0	composantes symétriques directe, inverse et homopolaire
X_s	réactance inductive équivalente en amont du point de court-circuit
Z	impédance en amont du disjoncteur.
Z_a	impédance en aval du disjoncteur.
Z_L	impédance caractéristique de la ligne
Z_s	impédance en amont du point de court-circuit.
Z_T	impédance de mise à la terre

1.1. Contexte Général

Les défauts de court-circuit sont des incidents fréquents dans les réseaux de transport et de distribution, qui non éliminés peuvent endommager ces réseaux. Les disjoncteurs à haute-tension (HT) sont principalement conçus pour interrompre les courants de défaut et isoler rapidement et efficacement les parties défectueuses. En haute-tension, la technique de coupure dans le gaz SF₆ est actuellement dominante dans le monde grâce aux propriétés excellentes, diélectriques et extinctrices de l'arc électrique du gaz SF₆.

Dans certaines situations particulières, notamment dans le cas du défaut proche en ligne et du défaut aux bornes, il est essentiel de vérifier l'aptitude du disjoncteur à interrompre le courant, à travers des essais type au laboratoire haute-puissance. Toutefois, ces essais sont coûteux et chronophages, ce qui limite leur répétition. Pour pallier ces contraintes, les modèles d'arc à boîte noire permettent d'étendre les informations obtenues lors des essais expérimentaux [1].

Les modèles d'arc à boîte noire [5] sont représentés par une équation différentielle du premier ordre, qui établit un lien entre la conductance non linéaire de l'arc et les valeurs du courant et de la tension d'arc mesurées pendant les essais. Les modèles à boîte noire de base sont :

- **Le modèle de CASSIE** : adapté à l'intervalle où l'intensité du courant d'arc est élevée, il décrit un arc relativement stable avec une dissipation d'énergie importante.
- **Le modèle de MAYR** : plus pertinent à l'approche du passage du courant par zéro, où les variations de la conductance de l'arc sont particulièrement rapides.

La combinaison de ces deux modèles permet d'obtenir une représentation plus réaliste du comportement de l'arc électrique tout au long du processus d'interruption du courant, permettant ainsi la simulation et l'analyse des performances des disjoncteurs HT.

Bien que fondés sur des considérations physiques, les modèles d'arc à boîte noire sont des modèles mathématiques. Ils ne peuvent pas être utilisés pour concevoir les chambres de coupure, mais ils sont convenables pour simuler l'interaction arc-circuit [2].

Initialement, les modèles d'arc à boîte noire étaient conçus pour représenter le comportement de l'arc électrique à l'intérieur du disjoncteur HT, mais actuellement, ils sont aussi utilisés pour le représenter dans les disjoncteurs moyenne-tension [3] et dans les disjoncteurs à courant continu [4].

1.2. Problématique

Pour une étude correcte de l'interaction arc-circuit, il est essentiel

- d'avoir un modèle d'arc approprié qui montre une bonne correspondance avec le courant et la tension d'arc mesurés durant l'essai,
- de déterminer ses paramètres inconnus avec précision, car des paramètres imprécis peuvent compromettre la capacité prédictive du modèle,
- d'avoir un logiciel de simulation avec un bon circuit d'essai, capable de simuler les transitoires ayant lieu dans le disjoncteur HT lors du processus de la coupure.

1.2.1. Choix du modèle d'arc

Plusieurs combinaisons des modèles de CASSIE et de MAYR ont été proposées pour modéliser le comportement de l'arc électrique sur tout l'intervalle dynamique de l'arc, les plus utilisées sont les modèles de SCHWARZ [33], de MAYR modifié [25, 34], de HABEDANK [35], de KEMA [36], de SCHAVEMAKER [37] et de TP KEMA [38]. Ces modèles n'ont pas tous la même performance et aucun d'eux ne reproduit parfaitement les courbes du courant et de la tension d'arc mesurés.

1.2.2. Détermination précise des paramètres des modèles d'arc

Les paramètres d'un modèle d'arc changent selon le disjoncteur utilisé et les conditions de l'essai. Pour déterminer ces paramètres, plusieurs méthodes d'optimisation locale et globale ont été utilisées, afin de minimiser l'écart entre les courbes mesurées et simulées de la tension et du courant d'arc. Pour les disjoncteurs à courant alternatif, les algorithmes MATLAB suivant ont été utilisés:

- La fonction d'optimisation des moindres carrés non linéaire (*lsqnonlin*) a été utilisée par ORAMA et al. pour estimer les paramètres du modèle d'arc de SCHWARZ [33].
- L'algorithme de NELDER-MEAD via la fonction *fminsearch* a été utilisé par LATRI et al. pour estimer les paramètres du modèle d'arc de SCHAVEMAKER [48].
- l'algorithme génétique (GA) a été utilisé par RASHTCHI et al. pour estimer les paramètres du modèle d'arc de KEMA [49].
- l'algorithme génétique (GA) et l'algorithme du recuit simulé (SA) ont été utilisés par CHMIELEWSKI et al. pour estimer les paramètres du modèle d'arc de HABEDANK [50].

La question qui se pose est: quelle est la méthode qui donne les paramètres les plus précis possible des modèles d'arc à boîte noire ?

1.2.3. Outil de simulation des transitoires dans un disjoncteur HT

Il faut un logiciel de simulation capable de simuler les transitoires ayant lieu dans le disjoncteur au cours de la coupure. MATLAB avec des solveurs à pas variables est convenable pour cette tâche [63]. L'outil AMB (Arc Model Blockset) est une extension de MATLAB/Simulink Power System Blockset. Il a été développé par P.H. SCHAVEMAKER en 2001, pour étudier l'interaction arc-circuit durant la coupure d'un courant de défaut proche en ligne [64, 65]. AMB est formé d'un circuit d'essai et d'une librairie qui contient sept modèles d'arc. Actuellement AMB ne fonctionne que sous MATLAB 6 ou les versions antérieures, comme il présente quelques inconvénients.

1.3. Objectifs de la thèse

Cette thèse a trois objectifs :

Le premier objectif est de proposer un modèle d'arc à la fois simple et précis et le comparer aux modèles d'arc existants afin de montrer ses avantages.

Le deuxième objectif est de déterminer la méthode la plus convenable pour estimer les paramètres des modèles d'arc à boîte noire. Dans ce but, les algorithmes d'optimisation mentionnés précédemment, ainsi que l'algorithme de HOOKE-JEEVES (appelé Pattern Search (PS)) de MATLAB, l'algorithme de quasi-Newton via la fonction d'optimisation *fminunc* de MATLAB et l'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO), seront utilisés pour minimiser l'écart entre les courbes de la tension et du courant d'arc mesurées et celles simulées en utilisant le modèle d'arc de SCHAVEMAKER comme exemple des modèles d'arc à boîte noire. Les résultats obtenus avec les différentes méthodes seront comparés afin de sélectionner la méthode qui fournit les paramètres les plus précis.

Le troisième objectif est de faire une simulation précise des transitoires ayant lieu pendant le processus de coupure d'un courant de défaut proche en ligne. A cet effet, on va actualiser et améliorer l'extension AMB, en modifiant le circuit d'essai et en ajoutant d'autres modèles d'arc et d'autres lignes artificielles à sa librairie.

1.4. Structure de la thèse

Cette thèse est organisée en huit chapitres :

Dans le premier chapitre, on a présenté le contexte général du travail, la problématique et les objectifs de la recherche.

Le deuxième, le troisième et le quatrième chapitre constituent la partie théorique de la thèse. Dans le deuxième chapitre on s'intéresse aux disjoncteurs HT, d'une manière générale, en abordant leur principe de fonctionnement et leur rôle essentiel dans la protection des réseaux électriques, puis on se concentre sur les disjoncteurs SF₆ HT, en détaillant leurs structures, leurs modes de coupure, ainsi que les avantages qu'ils offrent en termes de fiabilité, de performances d'extinction d'arc et de réduction de maintenance. Dans le troisième chapitre, on s'intéresse aux caractéristiques assignées des disjoncteurs HT, qui sont en lien avec les courants de court-circuit. On détaille les paramètres essentiels qui déterminent le pouvoir de coupure et de fermeture de ces disjoncteurs. Dans le quatrième chapitre on présente un aperçu sur les essais type réalisés sur les disjoncteurs HT dans les laboratoires à haute puissance. On met l'accent en particulier sur les essais de coupure et de fermeture dans le cas d'un défaut aux bornes et dans le cas de coupure du courant de défaut proche en ligne, qui permettent d'évaluer les performances des disjoncteurs face aux conditions de court-circuit les plus sévères.

Le cinquième, le sixième et le septième chapitre apportent des solutions aux problèmes soulevés dans la problématique. Dans le cinquième chapitre, on propose un nouveau modèle d'arc pour modéliser le comportement de l'arc électrique dans le disjoncteur SF₆ HT. D'abord on valide ce nouveau modèle par des mesures enregistrées durant les essais de coupure des courants de défauts proche en ligne effectués dans le laboratoire haute puissance de KEMA aux PAYS-BAS et ensuite on le compare avec plusieurs modèles d'arc existants, en termes de simplicité et de précision. Dans le sixième chapitre, on s'intéresse à l'estimation des paramètres des modèles d'arc à boîte noire, on donne un aperçu sur les méthodes d'optimisation utilisées et on compare les résultats de simulation obtenus en utilisant les paramètres déterminés par ces méthodes. Et finalement dans le septième chapitre, on introduit une nouvelle version de l'outil AMB, qui est une extension MATLAB/Simulink/Power System blockset, obtenue en se basant sur l'ancienne extension AMB. On détaille les améliorations apportées, tant en termes de conception et de précision des simulations que de facilité d'utilisation. On souligne aussi son intérêt pour la modélisation et l'analyse des disjoncteurs HT et on met en avant ses avantages par rapport à l'ancienne version.

Enfin, dans le dernier chapitre, on expose les conclusions générales de ce travail, en mettant en évidence les principales contributions apportées et on propose également des recommandations et des pistes pour de futures investigations, visant à approfondir la recherche sur la modélisation des disjoncteurs HT.

Chapitre 02

LES DISJONCTEURS SF_6 HAUTE TENSION

2.1. Introduction

Les disjoncteurs HT sont classés en fonction du milieu dans lequel s'effectue la coupure. Aujourd'hui, la technologie de coupure dans le gaz SF_6 est la plus répandue à l'échelle mondiale en raison de ses excellentes propriétés diélectriques et extinctrice de l'arc électrique. Grâce à ces caractéristiques, les disjoncteurs SF_6 sont plus compacts, nécessitent moins de maintenance et offrent une interruption du courant plus fiable et plus efficace.

Ce chapitre débute par une présentation générale des disjoncteurs HT, en abordant leurs principes de fonctionnement et leur rôle dans la protection des réseaux électriques. Il se focalise ensuite sur le disjoncteur HT à gaz SF_6 , en détaillant sa description, ses types et ses avantages techniques.

2.2. Disjoncteurs HT

Parmi l'appareillage électrique HT, le disjoncteur est l'appareil de protection le plus important et le plus complexe dans le système de puissance. Sa fonction principale est d'interrompre les courants de court-circuit et d'isoler les parties défectueuses. Il doit aussi interrompre les autres courants tels que les courants capacitifs, les petits courants inductifs et les courants de charge.

Dans la position fermé, il doit être un bon conducteur et dans la position ouvert, il doit être un bon isolant entre les parties du réseau, comme il doit changer de la position fermé à la position ouvert pendant une très courte durée (typiquement moins de 0,1s) [2].

2.2.1. Types de disjoncteurs HT

La coupure d'un courant électrique par un disjoncteur HT s'effectue en séparant les contacts dans un milieu isolant. Durant cette séparation, un arc électrique se forme, permettant au courant de

continuer à circuler temporairement dans le réseau électrique. Selon le milieu de coupure utilisé pour éteindre l'arc, on distingue trois types de disjoncteurs HT :

- Disjoncteurs à l'huile ;
- Disjoncteurs à air comprimé ;
- Disjoncteurs à gaz SF₆ ;

Les disjoncteurs à l'huile étaient les premiers utilisés en HT, mais sont actuellement en voie de disparition car ils peuvent causer des incendies et leur coût de maintenance est élevé. Il en est de même pour les disjoncteurs à air comprimé, à cause de leur encombrement et leur bruit [7]. Actuellement, la production de ces deux types de disjoncteurs est arrêtée [8].

La technique de coupure dans le vide est dominante en moyenne tension (jusqu'à 52 kV), mais des disjoncteurs à vide HT ont été installés pour un niveau de tension limité à 72/84 kV (à quelques exceptions près). La technique de coupure dans le gaz SF₆ est à présent dominante en HT [8].

2.2.2. Principe général de fonctionnement des disjoncteurs HT

Un disjoncteur HT est formé par trois pôles qui correspondent aux trois phases. Chaque pôle possède au moins une chambre (ou élément) de coupure qui contient le contact fixe et le contact mobile et dans laquelle le courant électrique est établi ou interrompu (Fig. 2.1).

Le mécanisme de commande est l'élément central du disjoncteur HT, il fournit l'énergie nécessaire pour déplacer le contact mobile pour une opération d'ouverture ou de fermeture ou pour effectuer les cycles de manœuvres et cela dans un temps très court.

A un disjoncteur est associé un système de protection qui détecte le défaut et qui donne des ordres au disjoncteur pour l'éliminer automatiquement ou pour remettre en service un circuit lorsque le défaut présente un caractère fugitif ou a été éliminé par un autre disjoncteur.

Chaque phase de la ligne à protéger comprend un transformateur de courant (TC) dont le primaire est monté en série avec le conducteur de la ligne, tandis que le secondaire alimente la bobine du relais (Fig. 2.2 et Fig. 2.3). A partir d'un courant primaire I_1 d'intensité importante, un courant secondaire I_2 proportionnel à I_1 et en phase avec lui mais d'intensité plus réduite est obtenu. Le rôle du relais est de repérer des conditions anormales sur le réseau et de commander l'ouverture du disjoncteur [9].

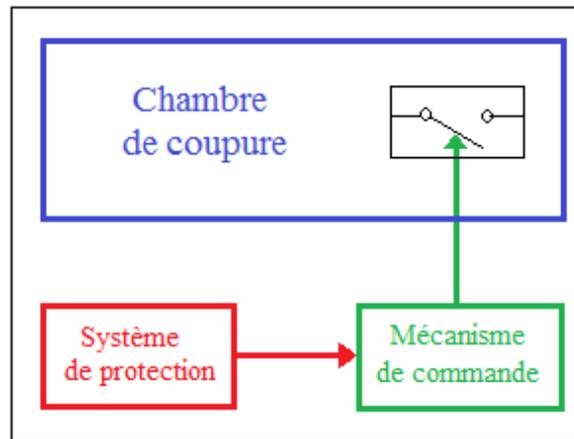


Figure 2.1. Schéma fonctionnel simplifié d'un disjoncteur HT



Figure 2.2. Transformateur de courant

Le disjoncteur HT fonctionne selon le principe général décrit par [Fig. 2.3](#). A l'état normal, il est en position de fermeture et lorsqu'un défaut se produit, le courant dans la ligne dépasse une valeur déterminée, le courant au secondaire du transformateur de courant, qui circule dans la bobine du relais, incite la fermeture des contacts C_1 et C_2 causant ainsi la fermeture du circuit d'alimentation de la bobine de déclenchement. Un signal de déclenchement est livré au mécanisme de commande qui déplace le contact mobile et un arc est initié entre les contacts d'arc. La chambre de coupure est conçue de sorte qu'au premier ou au deuxième passage du courant par zéro, le courant de court-circuit est interrompu.

2.2.3. Classification des disjoncteurs HT en fonction de l'utilisation

Selon l'utilisation, on distingue trois principaux types de disjoncteurs HT, les disjoncteurs de lignes, les disjoncteurs de générateurs et les disjoncteurs de réactances [10].

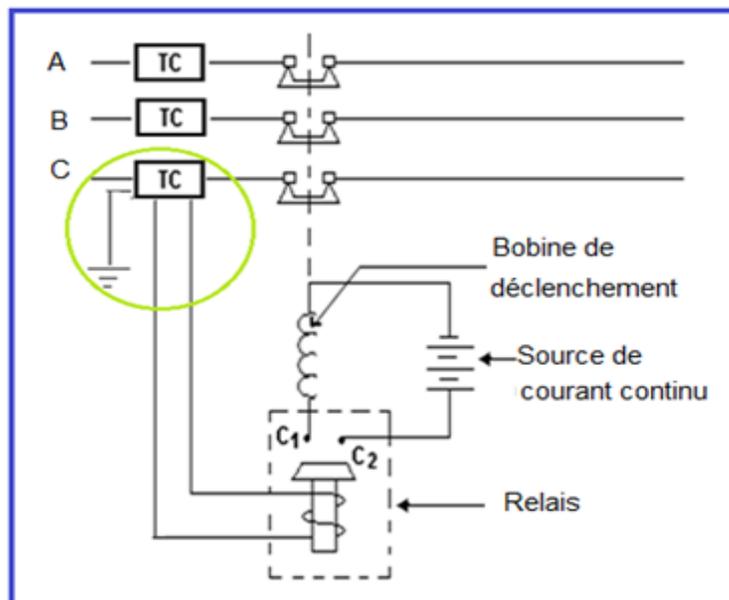


Figure 2.3. Principe de fonctionnement d'un disjoncteur HT

Dans ce travail, on s'intéresse aux disjoncteurs SF₆ de lignes qui sont destinés à manœuvrer les lignes des réseaux HT.

2.3. Disjoncteurs SF₆ HT

Les disjoncteurs SF₆ utilisent le gaz d'hexafluorure de soufre (SF₆) sous pression pour éteindre l'arc électrique (Fig. 2.4), leur utilisation a commencé dans les années soixante-dix et depuis ce temps, ils ont beaucoup évolué; le pouvoir de coupure a augmenté de 25 kA à 80kA et le nombre de chambres de coupure a diminué au point de n'utiliser qu'une chambre de coupure jusqu'à 420 kV et même à 520 kV [11]. Actuellement, la technique de coupure dans le gaz SF₆ couvre la majorité de la gamme haute tension et pour la gamme ultra haute tension, elle est la seule utilisée.

2.3.1. Propriétés du gaz SF₆

Le gaz SF₆ est utilisé dans les appareils de connexion HT, particulièrement dans les interrupteurs, les disjoncteurs et les postes sous enveloppes métalliques, grâce à sa qualité d'isolant électrique et à son pouvoir d'extinction de l'arc. La molécule du SF₆ est composée d'un atome de soufre placé au centre, auquel sont attachés six atomes de fluor, l'ensemble forme un octaèdre (Fig.2.5). La

molécule du SF₆ est parfaitement symétrique et très stable [12]. Le SF₆ est un bon isolant grâce au fluor qui est très électronégatif. Au-delà de 2100°K, le gaz SF₆ se dissocie en atomes neutres de soufre et de fluor. Lorsque la température dépasse 3000°K, les atomes de soufre s'ionisent en ions positifs et libèrent des électrons, ces derniers sont capturés par les atomes de fluor, formant ainsi des ions de fluor lourds et de faible mobilité, ce qui freine les avalanches d'élections.



Figure 2.4. Disjoncteur SF₆ unipolaire 420 kV à deux chambres de coupure.

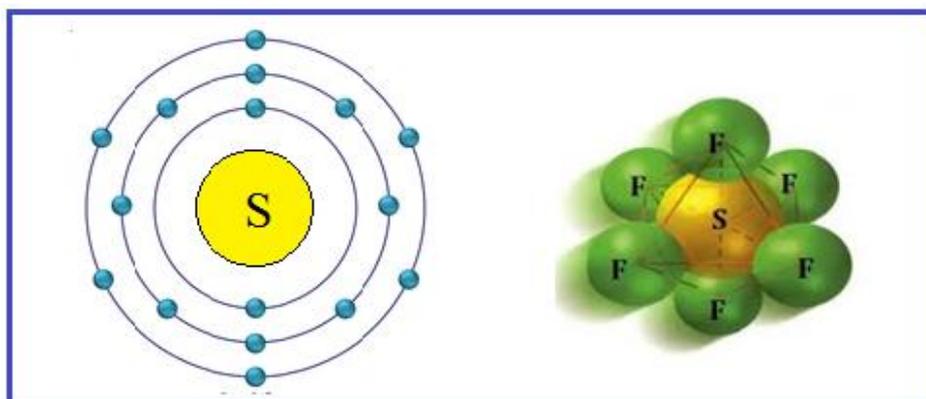


Figure 2.5. Atome de Soufre et molécule du gaz SF₆

2.3.1.1. Propriétés chimiques

Le gaz SF₆ pur est ininflammable, incolore, inodore et non toxique. Comme sa molécule a toutes ses liaisons chimiques saturées, il est très stable et cela se traduit par une grande énergie de dissociation (1096 kJ/mol) [12, 13].

Le gaz SF₆ est l'un des gaz les plus lourds connus. Sous une pression de 1 atmosphère, sa masse spécifique à 20 °C est égale à 6,139 kg/m³, autrement dit, il est environ cinq fois plus dense que l'air [13, 14, 15].

2.3.1.2. Propriétés diélectriques

La rigidité diélectrique est la tension maximale nécessaire pour provoquer la rupture diélectrique d'un milieu isolant. A la pression de 1 bar, la rigidité diélectrique du gaz SF₆ est 2,5 fois celle de l'air, mais comme le gaz SF₆ est utilisé sous une pression de 5 à 6 bars, sa rigidité diélectrique peut être environ dix fois celle de l'air (Fig. 2.6) [12, 13].

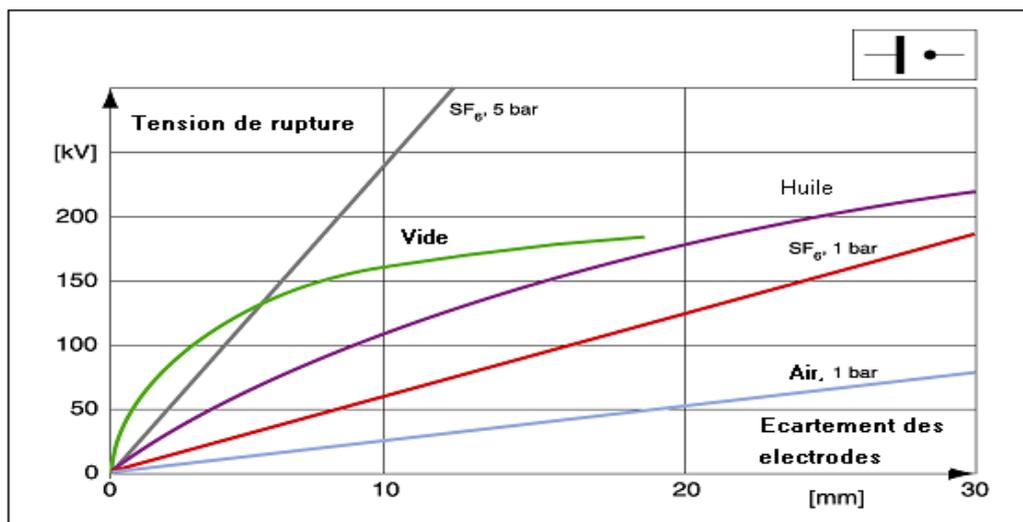


Figure 2.6. Rigidité diélectrique du gaz SF₆ et des milieux connus [13]

2.3.1.3. Constante de temps de désionisation

La constante de temps de désionisation, ou constante de temps de l'arc, notée τ , est le temps nécessaire pour que la valeur de la résistance d'arc double, en supposant que sa vitesse de variation est constante. Elle est exprimée en microsecondes et reflète la capacité du milieu isolant à se régénérer rapidement après ionisation. Le gaz SF₆ se distingue par une constante de temps de désionisation particulièrement faible, comparée à celle de l'air, de l'hélium, de l'argon et de l'hydrogène (Fig. 2.7) [12, 13].

2.3.1.4. Relation pression-température

Le SF₆ est un gaz parfait et sa liquéfaction fait diminuer ses qualités, elle dépend de la pression et de la température. Pour une pression de 1 bar, le gaz SF₆ se liquéfie à - 60°C et pour des pressions plus grandes, il devient liquide à des températures plus élevées. Par exemple pour une pression de remplissage de 7,56 bar à 20°C, la liquéfaction a lieu à la température - 25°C (Fig. 2.8) [15].

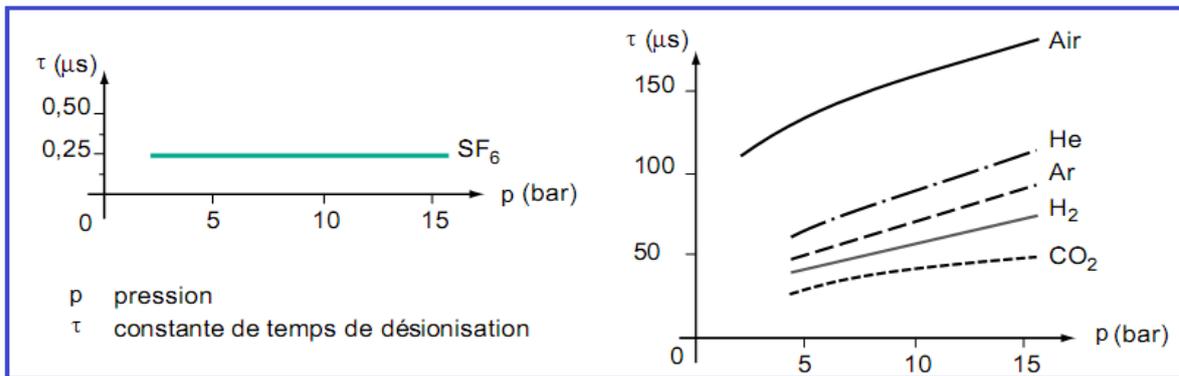


Figure 2.7. Constante de temps d'arc en fonction de la pression de quelques gaz [13]

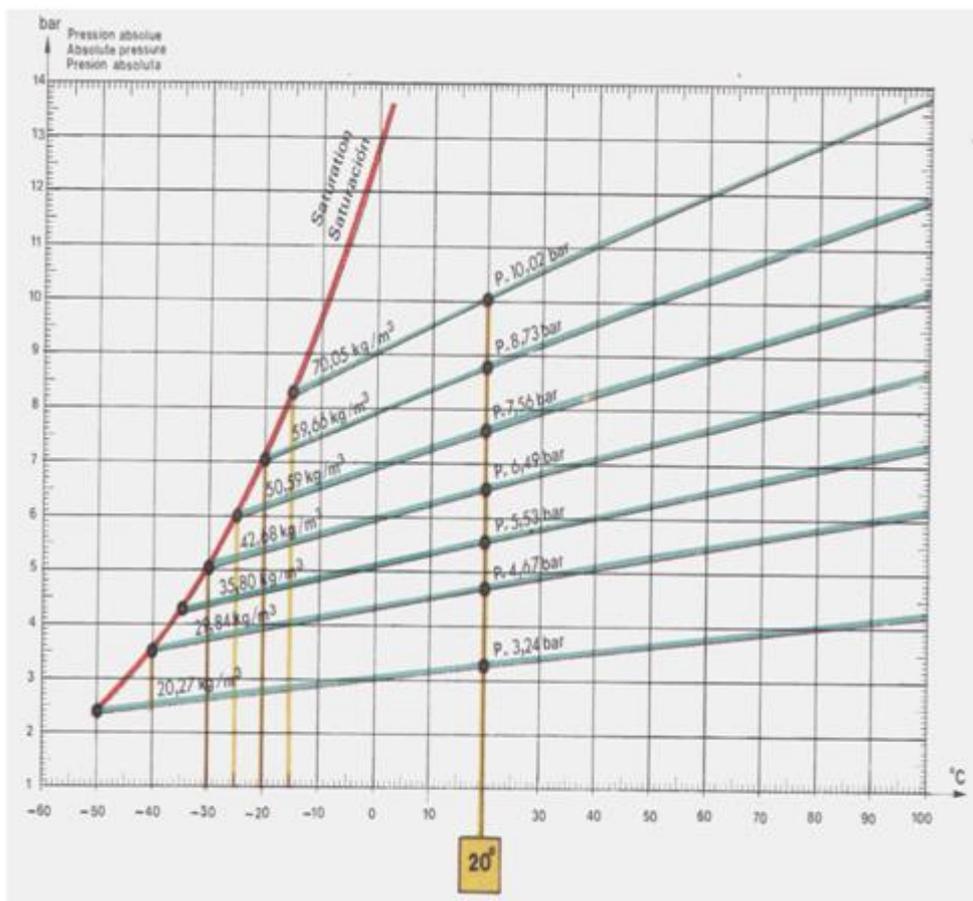


Figure 2.8. Variation de la pression du gaz SF₆ en fonction de la température [16]

2.3.2. Classification des disjoncteurs SF₆ HT selon l'installation

Selon l'installation, il existe trois types de disjoncteurs SF₆ HT:

1. Disjoncteur SF₆ AIS (*Air Insulated Switchgear*)
2. Disjoncteur SF₆ GIS (*Gaz Insulated Switchgear*)
3. Disjoncteur hybride « *Dead-Tank* »

2.3.2.1. Disjoncteur SF₆ AIS (Air Insulated Switchgear)

Le modèle dit « *Live-Tank* » ayant l'élément de coupure haut et au potentiel de la ligne est installé à l'extérieur et a pour isolation extérieure l'air. Il doit fonctionner dans des conditions climatiques difficiles. Ce modèle permet une conception modulaire car les chambres de coupure peuvent être connectées en série pour des tensions élevées et des résistances de pré-insertion ou des condensateurs peuvent être ajoutés si nécessaire (Fig. 2.9).

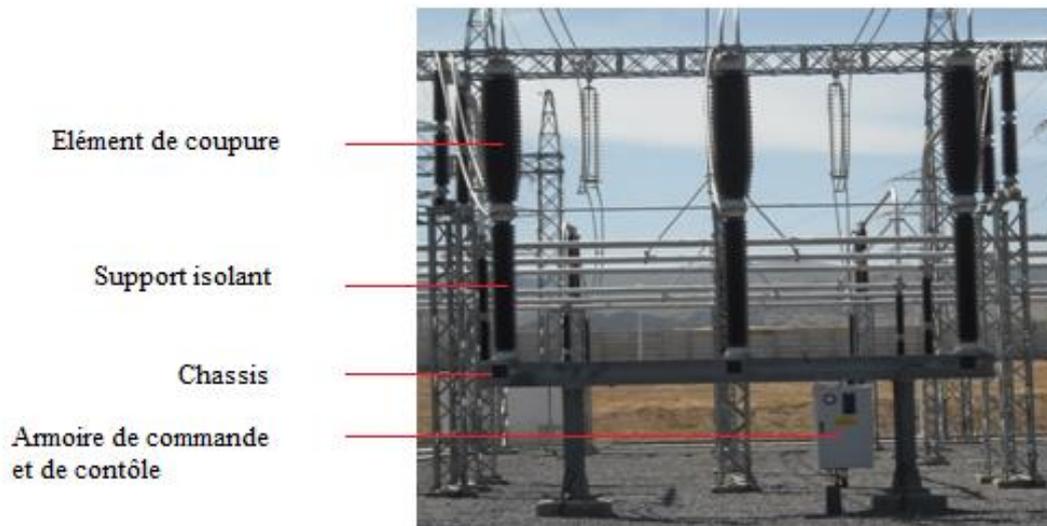


Figure 2.9. Disjoncteur SF₆ tripolaire « Live-tank » 220 kV

2.3.2.2. Disjoncteur SF₆ GIS (Gaz Insulated Switchgear)

Le disjoncteur SF₆ GIS est installé dans un poste à isolation gazeuse à encombrement réduit, à l'abri des conditions climatiques et de la pollution (Fig.2.10), il est placé dans une cellule isolée au gaz SF₆ dans laquelle sont placés les équipements essentiels au fonctionnement du poste tels que le jeu de barres, le sectionneur de jeu de barres, le sectionneur de terre et le transformateur de courant [9].

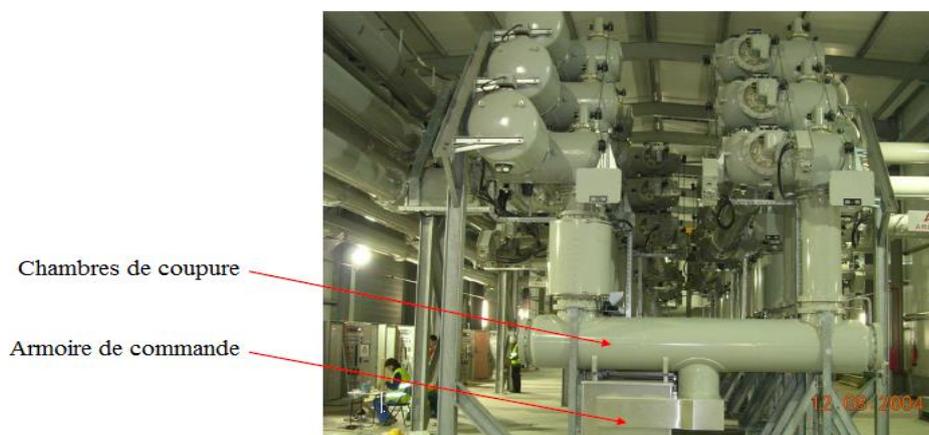


Figure 2.10. Disjoncteur SF₆ GIS 420 kV [16].

2.3.2.3. Disjoncteur hybride « Dead-Tank »

La chambre de coupure du disjoncteur hybride « *Dead-Tank* » est horizontale, basse et placée dans une enceinte métallique mise à la terre (Fig. 2.11). Les transformateurs de courant sont connectés directement aux bornes du disjoncteur. Le raccordement au réseau de ce disjoncteur se fait à l'aide de traversées isolantes. Le fait d'avoir un centre de gravité bas, permet à ce disjoncteur de mieux résister aux séismes.

Bien que de conceptions différentes, les modèles « *Live-tank* » et « *Dead-tank* » ont le même principe de fonctionnement.

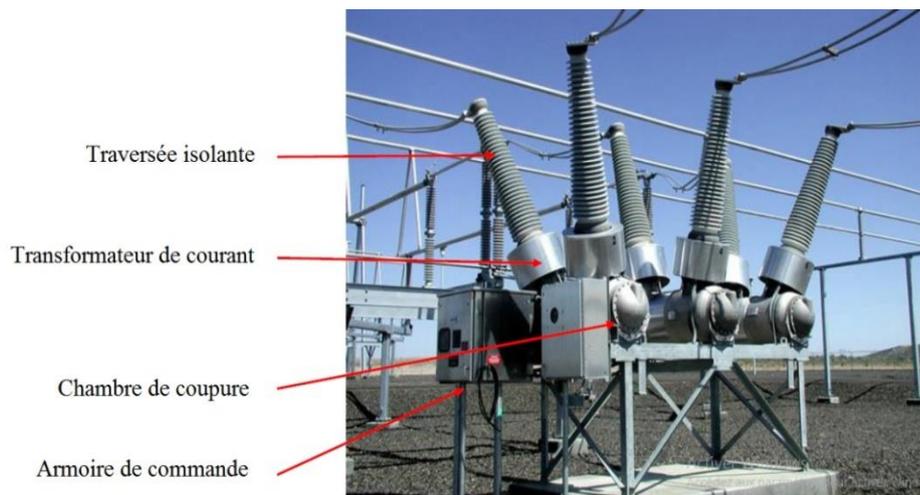


Figure 2.11. Disjoncteur SF₆ « Dead-Tank » 245 kV/63kA [16].

2.3.3. Températures de service

Les disjoncteurs SF₆ HT doivent fonctionner convenablement dans les températures normales de service [10].

- La température ambiante maximale est limitée à 40°C et la température moyenne, mesurée pendant 24 heures, ne doit pas dépasser 35°C. Pour des températures ambiantes dépassant 40°C, il faut veiller à ce que la température des composants durant le fonctionnement ne dépasse pas les limites admissibles.
- La température ambiante minimale est -25°C selon *CEI 62271-1* et -30°C, conformément à la norme *IEEE C37.100.1*. [16], car le fonctionnement à de très basses températures limite la pression de remplissage et peut entraîner la liquéfaction du gaz SF₆ (Fig. 2.8). D'autres valeurs de température ambiante minimale peuvent être spécifiées pour les pays froids tels que CANADA (- 40°C, - 50°C) et même - 60°C en RUSSIE.

Pour les basses températures, il est difficile d'obtenir les performances requises avec le gaz SF₆ pur et dans ce cas, on le mélange avec un autre gaz à une pression acceptable, tel que (SF₆- CF₄) ou (SF₆-N₂). Pour les disjoncteurs « *Dead tank* », on utilise des éléments chauffants comme les ceintures [16].

2.3.4. Description des disjoncteurs « Live-Tank »

Les disjoncteurs « *Live-Tank* » peuvent être à fonctionnement tripolaire ou unipolaire :

- **Le disjoncteur à fonctionnement tripolaire** (Fig.2.9) est constitué de trois pôles montés sur un châssis métallique commun qui est mis à la terre. Les trois pôles ont une enceinte à gaz commune. Un manomètre affiche la pression du gaz SF₆. Chaque pôle est formé par l'élément de coupure placé sur un support isolant pour l'isoler par rapport à la terre. L'armoire de commande et de contrôle est fixée au châssis, elle est commune aux trois pôles.
- **Pour le disjoncteur à fonctionnement unipolaire** (Fig. 2.4), chaque pôle est placé sur un châssis, il est actionné par son propre mécanisme de commande et il possède une enceinte à gaz distincte munie d'un contrôleur de densité et d'un manomètre pour afficher la pression. Le coffret d'appareillage contenant les dispositifs de commande et de la surveillance du disjoncteur est placé sur le pôle du milieu.

2.3.5. Principe d'extinction de l'arc

Selon le mode de refroidissement de l'arc, deux types de disjoncteurs SF₆ sont très répandus en HT; les disjoncteurs simple pression et les disjoncteurs auto-compression. Dans le premier type, l'énergie mécanique fournie par le mécanisme de commande est utilisée pour compresser le gaz et pour le deuxième type, l'énergie thermique libérée par l'arc électrique est utilisée pour augmenter la pression du gaz, afin d'interrompre le courant de court-circuit. Cela a permis de minimiser l'énergie apportée par le mécanisme de commande et a rendu possible l'utilisation du mécanisme de commande à ressorts [17].

La technologie auto-compression est utilisée pour des tensions 72,5 kV à 245 kV. Fig. 2.12 représente la vue en coupe d'un élément de coupure [18] dans les différentes positions de fonctionnement. Le système de contacts est enfermé dans un fût en céramique étanche.

- **En fonctionnement normal** (position a), les contacts du disjoncteur sont fermés.
- **Pendant la coupure d'un courant de fonctionnement** ; le contact principal (4) s'ouvre d'abord (position b), le courant commute sur le contact d'arc (5) qui est encore fermé, ensuite le contact d'arc s'ouvre donnant naissance à l'arc électrique (position c). Le déplacement du

cyindre de contact (6) vers le bas dans le socle (7) comprime le gaz SF₆. Ce gaz sous pression s'écoule dans le sens opposé dans le cylindre de contact et s'échappe entre les contacts d'arc provoquant ainsi l'extinction de l'arc.

- **Pendant la coupure d'un courant de court-circuit**, le gaz d'extinction qui se trouve autour de l'arc est chauffé par l'énergie développée dans l'arc, puis poussé sous haute pression dans le cylindre de contact, ce qui fait augmenter la pression dans le cylindre de contact. Lorsque le courant s'approche de zéro, le gaz s'échappe une autre fois du cylindre de contact, traverse la buse et provoque l'extinction de l'arc électrique.
- **Après l'élimination du défaut**, le disjoncteur est verrouillé dans la position d'ouverture (position d) et il ne sera fermé que manuellement.

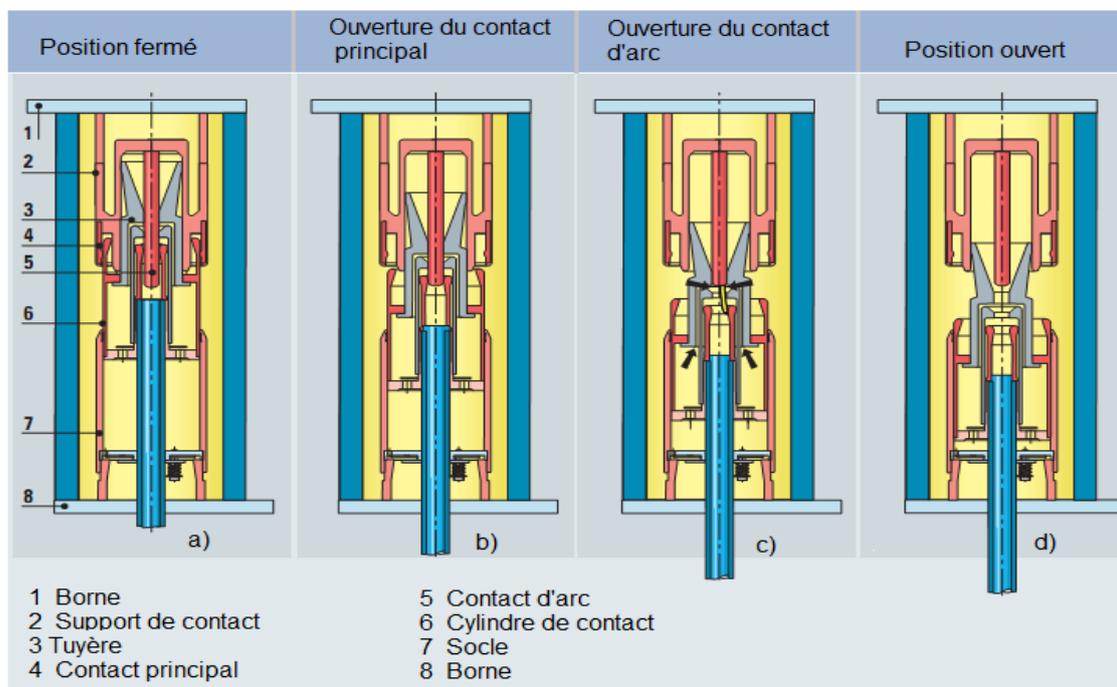


Figure 2.12. Principe d'extinction de l'arc dans un disjoncteur SF₆ HT par auto-compression [18].

2.3.6. Système de contacts

La conception des contacts et le choix des matériaux dépendent de l'énergie de l'arc, de sa durée et des réactions chimiques qui peuvent se produire sous l'effet de l'arc. Dans un disjoncteur, deux types de contacts sont utilisés :

- **Les contacts d'arc**, qui subissent l'effet de l'arc et sont les derniers à se séparer pendant une manœuvre d'ouverture et les premiers à se toucher pendant une manœuvre de fermeture. Ils sont réalisés à base de tungstène, en utilisant la technique de métallurgie des poudres [12, 19].
- **Les contacts principaux** sont ceux qui permettent le passage du courant permanent et sont à l'abri des arcs, ils doivent avoir une très haute conductivité et doivent éviter l'échauffement

excessif pendant le passage du courant permanent. Le contact mobile est en cuivre plaqué argent tandis que le contact fixe est constitué de doigts multiples parallèles en cuivre plaqué argent, prenant appui sur des pièces cylindriques (Fig. 2.13). Cela réduit la résistance globale et garantit une bonne stabilité de cette dernière en fonction du temps. Le cuivre et l'argent ont une grande conductivité mais une faible résistance à l'arc tandis que le tungstène et ses alliages ont moins de conductivité mais une bonne résistance à l'arc.

Tous ces contacts utilisent une action d'essuyage lorsque le contact mobile est inséré dans le contact fixe, pour éviter le dépôt de sous-produits sur les contacts [12, 19].

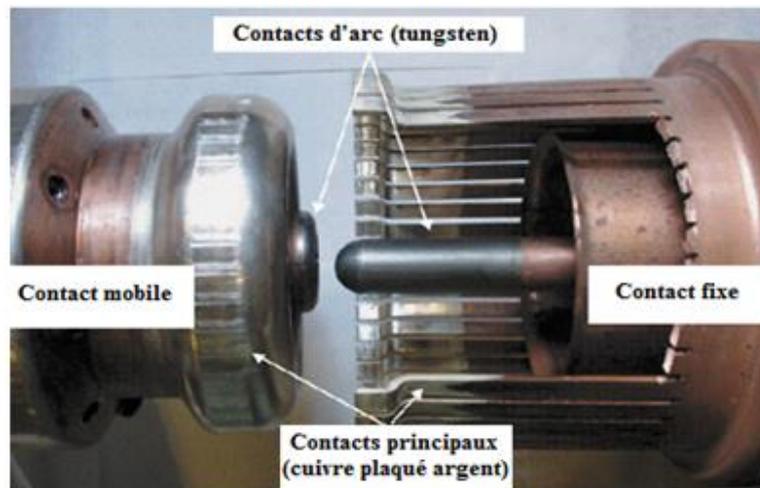


Figure 2.13. Système de contacts dans un disjoncteur SF₆ HT

2.3.7. Avantages des disjoncteurs SF₆ HT

Les disjoncteurs SF₆ HT ont les avantages suivants [15] :

- Un grand pouvoir de coupure grâce à la grande rigidité électrique du gaz SF₆.
- Une courte durée de coupure (2 à 2,5 cycles à la fréquence industrielle).
- Une grande durée de vie des matériaux de contacts, grâce à la faible constante de temps de l'arc du gaz SF₆
- Un entretien moins fréquent, du fait que lorsque le gaz SF₆ se décompose, il ne fait pas de dépôt de carbone.
- Un nombre réduit de chambres de coupure.
- Une grande durée de vie, supérieure à 25 ans.
- Une bonne sécurité de fonctionnement.
- Moins bruyants et autonomes (sans compresseur de gaz).

2.3.8. Inconvénients des disjoncteurs SF₆ HT et futures alternatives

Le SF₆ est l'un des gaz à effet de serre les plus néfastes, étant donné que son pouvoir de réchauffement global est à peu près 23 500 fois celui du CO₂. Autrement dit, 1kg de SF₆ rejeté est similaire à 23900 kg de CO₂ rejetés [16]. Une étanchéité absolue est nécessaire pour retenir le gaz SF₆.

Des disjoncteurs HT sans SF₆ constituent des alternatives respectueuses de l'environnement. Le vide et des gaz tels que le CO₂ sont étudiés comme alternatives au SF₆. Le vide étant le plus couramment utilisé ; Cependant, l'adoption de ces solutions à grande échelle reste confrontée à des défis, notamment un manque de standardisation, des coûts initiaux plus élevés et une disponibilité limitée [21, 22].

2.4. Conclusion

En haute tension et en l'ultra-haute tension, la coupure des courants électriques dans le gaz SF₆ s'est imposée comme la technologie dominante. Cette prééminence s'explique par les propriétés exceptionnelles du gaz SF₆, notamment sa grande rigidité diélectrique et son efficacité dans l'extinction des arcs électriques. Grâce à ces caractéristiques, les disjoncteurs utilisant le SF₆ offrent plusieurs avantages significatifs :

- **Fiabilité accrue** : une meilleure tenue aux surtensions et une excellente capacité d'extinction de l'arc garantissent une grande sécurité de fonctionnement.
- **Compacité** : les équipements sont plus petits et plus légers que leurs équivalents à air ou à huile, ce qui facilite leur intégration dans les postes électriques.
- **Réduction des besoins en maintenance** : la stabilité chimique du gaz SF₆ et sa faible dégradation prolongent la durée de vie des équipements et limitent les interventions de maintenance.

Cependant, malgré ses nombreux atouts, le SF₆ présente un inconvénient majeur : c'est un gaz à effet de serre qui a un potentiel de réchauffement global très élevé. Pour limiter son impact environnemental, il est impératif d'assurer une étanchéité absolue des équipements afin d'éviter toute fuite dans l'atmosphère. Des efforts sont également en cours pour trouver des alternatives qui respectent l'environnement ou des technologies permettant de réduire l'utilisation du SF₆ dans les disjoncteurs HT.

Chapitre 03

CARACTERISTIQUES ASSIGNEES LIEES AUX COURANTS DE COURT-CIRCUIT

3.1. Introduction

Les défauts de court-circuit sont des événements fréquents dans le système de puissance, ils créent des arcs électriques de très hautes températures. Si ces défauts ne sont pas éliminés, ils peuvent causer des dommages importants. Lors de l'établissement ou la coupure d'un courant de court-circuit, divers phénomènes transitoires se manifestent.

Ce chapitre se focalise sur l'étude de l'établissement et la coupure des courants de court-circuit, ainsi que sur les caractéristiques assignées du disjoncteur HT en relation avec les courants de court-circuit.

3.2. Types de courants de court-circuit

Un court-circuit a lieu lorsque deux ou plusieurs conducteurs de potentiels différents sont liés accidentellement. Les courts-circuits créent un déséquilibre du régime permanent par l'établissement de courants de fortes intensités et des chutes de tension aux points du défaut. Ils peuvent être permanents, auto-extincteurs ou fugitifs et sont caractérisés par leurs localisations (loin des alternateurs, aux bornes du disjoncteur, proche en ligne, ...etc.) [23].

Il existe cinq types de court-circuit : le court-circuit phase-terre, biphasé à la terre, biphasé isolé, triphasé à la terre et triphasé isolé. Les courts-circuits phase-terre sont les plus fréquents et représentent environ 80 % des cas. Les courts-circuits biphasés, sont moins courants et constituent environ 15 % des incidents et les courts-circuits triphasés qui bien que rares (5 % des cas) sont généralement les plus sévères [10, 23]. Les courts-circuits triphasés sont symétriques.

Les conséquences des défauts de court-circuit sont multiples, on peut citer les incendies, les sur-échauffements des conducteurs, les surtensions lors de l'ouverture d'une ligne électrique HT, les coupures d'alimentation provoquées par le fonctionnement des protections et les efforts

électrodynamiques sur les conducteurs qui peuvent déformer les jeux de barres et arracher les câbles.

3.3. Etablissement d'un courant de court-circuit

3.3.1. Fonctionnement normal

Dans les conditions de fonctionnement normal, un réseau triphasé est équilibré, il peut être étudié par le schéma équivalent d'une phase (Fig. 3.1). Ce schéma est composé d'une source de tension sinusoïdale, d'un disjoncteur, d'une impédance \bar{Z} en amont du disjoncteur et d'une impédance \bar{Z}_a en aval du disjoncteur.

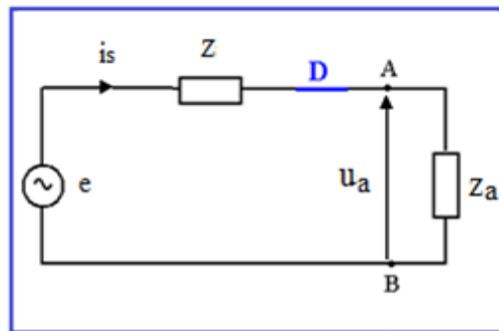


Figure 3.1. Schéma équivalent d'une phase d'un réseau en fonctionnement normal

La tension d'alimentation sinusoïdale est :

$$e = \hat{E} \sin(\omega t + \theta) = E\sqrt{2} \sin(\omega t + \theta) \quad (3-1)$$

Soit en valeur complexe :

$$\bar{E} = E e^{j\theta} \quad (3-2)$$

Avec

e Tension d'alimentation

θ Angle électrique qui caractérise le décalage entre l'instant $t=0$ et l'origine de la tension d'alimentation.

ω Pulsation $\omega = 2\pi f$

f Fréquence du système (50 ou 60 Hz)

Le disjoncteur étant fermé, l'intensité du courant de service i_s circule dans le circuit [23]. Pour une chute de tension négligeable à travers l'impédance Z , $e \cong u_a$, on a:

$$\bar{I}_s = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_a} \quad (3-3)$$

$$\bar{Z}_a = Z_a e^{j\varphi} \quad (3-4)$$

φ est l'angle de déphasage entre la tension e et le courant i_s

$$\bar{I}_s = \frac{E e^{j\theta}}{Z_a e^{j\varphi}} \quad (3-5)$$

$$\bar{I}_s = \frac{E}{Z_a} e^{j(\theta-\varphi)} = I_s e^{j(\theta-\varphi)} \quad (3-6)$$

Soit en valeurs instantanées :

$$i_s = \hat{I}_s \sin(\omega t + \theta - \varphi) \quad (3-7)$$

3.3.2. Régime de court-circuit

On suppose qu'à un instant t , un court-circuit d'impédance négligeable a eu lieu entre les points C et D, il crée une grande intensité de court-circuit (i_t), qui circule dans le circuit et qui est limitée par l'impédance Z_s (Fig. 3.2). Le courant de court-circuit s'établit selon un régime transitoire.

L'impédance Z_s représente toutes les impédances situées en amont du point de court-circuit et l'impédance Z' représente toutes les impédances situées en aval du point de court-circuit.

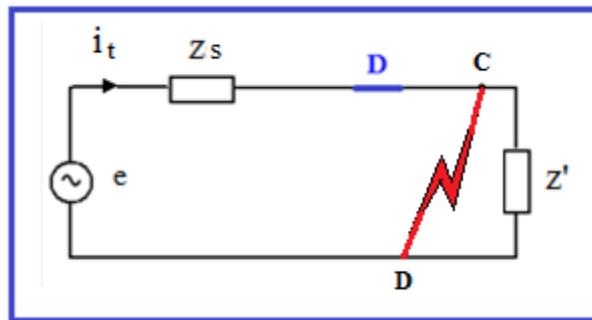


Figure 3.2. Schéma simplifié d'un réseau à l'occurrence d'un court-circuit.

Pour déterminer l'expression du courant de court-circuit, on choisit l'origine du temps $t = 0$, comme instant d'occurrence du défaut :

$$e = \hat{E} \sin(\omega t + \theta) = L_s \frac{di_t}{dt} + R_s i_t \quad (3-8)$$

C'est une équation différentielle du premier ordre de la forme :

$$f(t) = a \frac{dx}{dt} + bx \quad (3-9)$$

La solution de cette équation différentielle est de la forme :

$$x = x_1 + (x_0 - x_{10}) e^{-\frac{b}{a}t} \quad (3-10)$$

Avec

x_1 : le terme forcé, celui du régime permanent qui subsiste après le régime transitoire.

x_0 : valeur de x à l'instant $t = 0$ de la perturbation.

x_{10} : valeur du terme forcé à l'instant $t = 0$

En appliquant la relation (3-10) au cas du court-circuit, on obtient l'expression du courant de court-circuit :

$$i_t = i_1 + (i_0 - i_{10})e^{-\frac{R_s}{L_s}t} \quad (3-11)$$

Avec

i_t le courant de court-circuit total.

i_0 la valeur du courant de court-circuit à l'instant de la perturbation $t = 0$.

i_1 la composante alternative sinusoïdale, elle correspond au régime permanent.

i_{10} la valeur de la composante alternative sinusoïdale à $t = 0$

3.3.2.1. Composante alternative sinusoïdale

En valeurs complexes, la composante alternative sinusoïdale est :

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_s} \quad (3-12)$$

$$\bar{Z}_s = R_s + jX_s = R_s + jL_s\omega = Z_s e^{j\psi} \quad (3-13)$$

$$\bar{I}_1 = \frac{E e^{j\theta}}{Z_s e^{j\psi}} \quad (3-14)$$

$$\bar{I}_1 = \frac{E}{Z_s} e^{j(\theta-\psi)} = I_1 e^{j(\theta-\psi)} \quad (3-15)$$

Avec

R_s : Résistance équivalente en amont du point de court-circuit

L_s : Inductance équivalente en amont du point de court-circuit.

En valeurs instantanées :

$$i_1 = \hat{I}_1 \sin(\omega t + \theta - \psi) \quad (3-16)$$

Avec

I_1 : Valeur efficace de i_1

\hat{I}_1 : Valeur maximale ou valeur crête de i_1

Fig. 3.3 représente la tension $e(t)$, le courant de service $i_s(t)$ et le courant de court-circuit $i_t(t)$.

La composante alternative à $t = 0$ est :

$$i_{10} = \hat{I}_1 \sin(\theta - \psi) \quad (3-17)$$

3.3.2.2. Valeur initiale du courant de court-circuit

- A t_0^- le courant de service i_s circule dans le circuit, il dépend du récepteur.
- A t_0^+ le court-circuit existe, mais l'intensité du courant court-circuit n'a pas encore augmenté, donc $i_0 \cong i_s$

i_0 et i_s sont négligeables devant i_{10} , il en résulte que :

$$i_0 \cong 0 \quad (3-18)$$

D'après l'équation (3-11), l'expression du courant de court-circuit est :

$$i_t = \hat{I}_1 \sin(\omega t + \theta - \psi) - \hat{I}_1 e^{\frac{-t}{\tau_1}} \sin(\theta - \psi) \quad (3-19)$$

$$i_t = i_1 + i_2 \quad (3-20)$$

Où :

ψ Déphasage entre la composante périodique $i_1(t)$ du courant de court-circuit et la tension $e(t)$. Le facteur de puissance en régime de court-circuit est $\cos \psi$.

τ_1 Constante du temps du circuit

$$\tau_1 = \frac{L_s}{R_s} \quad (3-21)$$

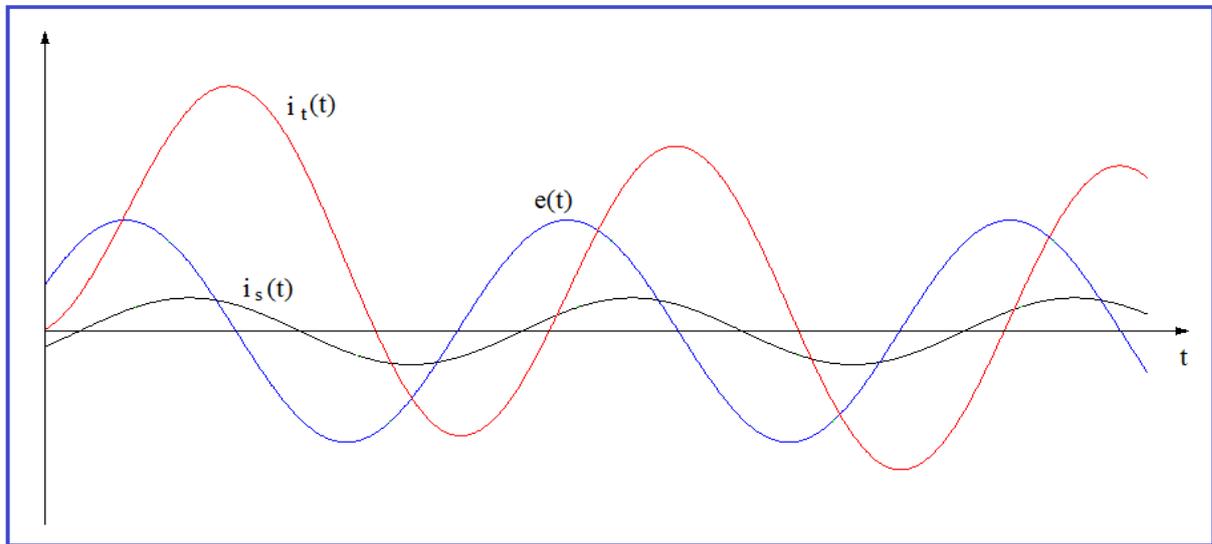


Figure 3.3. Ondes de la tension d'alimentation $e(t)$, du courant de service $i_s(t)$ et du courant de court-circuit total $i_t(t)$

Le courant de court-circuit a deux composantes (Fig. 3.4) :

- L'une $i_1(t)$ alternative et symétrique de pulsation ω , et correspond au régime permanent (c'est-à-dire au régime qui subsisterait si le système de protection n'intervenait pas). Elle est engendrée par la source alternative qui alimente le courant de court-circuit :

$$i_1 = \hat{I}_1 \sin(\omega t + \theta - \psi) \quad (3-22)$$

- L'autre $i_2(t)$ continue, apériodique et exponentiellement décroissante, elle est engendrée par l'énergie électromagnétique emmagasinée dans l'inductance au moment du court-circuit :

$$i_2 = -\hat{I}_1 e^{\frac{-t}{\tau_1}} \sin(\theta - \psi) \quad (3-23)$$

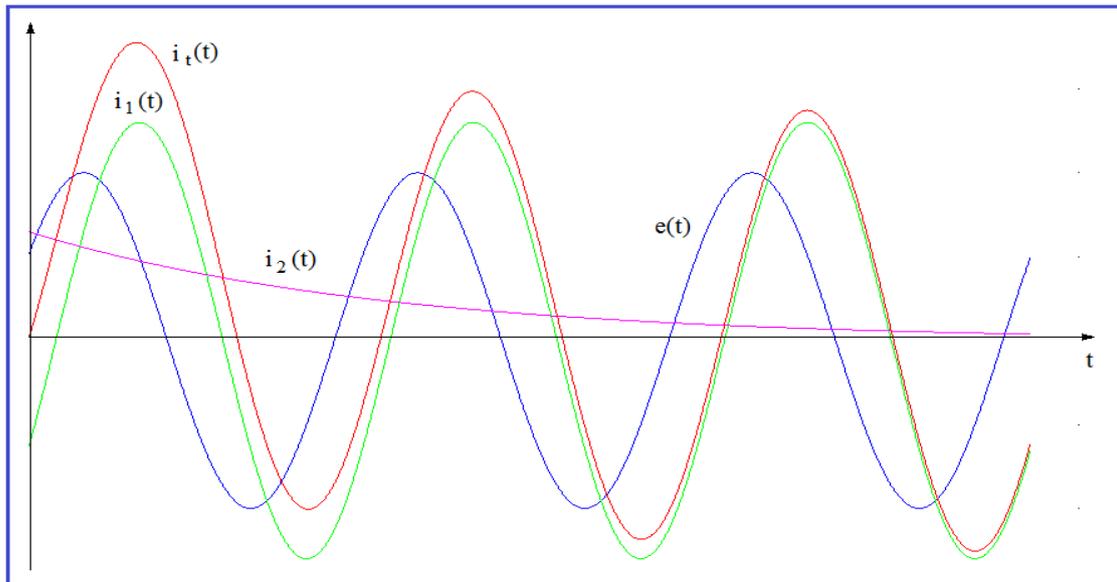


Figure 3.4. Courant de court-circuit établi $i_t(t)$, sa composante alternative $i_1(t)$ et sa composante apériodique continue $i_2(t)$

La composante continue $i_2(t)$ correspond au régime transitoire et tend vers zéro quand t tend vers l'infini. La constante de temps du circuit τ_1 caractérise la vitesse de variation du courant transitoire; plus τ_1 est faible, plus l'amortissement de la composante continue est grand. Théoriquement la durée du courant transitoire $i_2(t)$ est infinie, mais en pratique, elle est considérée quatre à cinq fois τ_1 .

A $t = 0$, l'instant initial d'occurrence du défaut, le courant de court-circuit est nul, la valeur de la composante apériodique est égale et opposée à la valeur de la composante symétrique :

$$i_1(0) = \hat{I}_1 \sin(\theta - \psi) \quad (3-24)$$

$$i_2(0) = -\hat{I}_1 \sin(\theta - \psi) \quad (3-25)$$

3.3.3. Caractéristiques du courant de court-circuit établi

Le courant de court-circuit établi est caractérisé par :

- la valeur efficace de la composante alternative,
- le taux initial d'accroissement du courant de court-circuit,
- la valeur crête de la première demi-alternance, appelée courant dynamique.

3.3.3.1. Valeur efficace de la composante périodique

La valeur efficace de la composante alternative du courant de court-circuit (I_1), ou courant de court-circuit symétrique initial (Tableau 3.1) est obtenue en utilisant la méthode des composantes

symétriques [23], en considérant que dans le domaine de la haute tension les résistances des composants du réseau sont négligeables devant les réactances.

Un facteur c de la tension au point de défaut est introduit dans les calculs (Tableau 3.2) pour tenir en compte :

- des variations de la tension dans l'espace (d'un endroit à l'autre) et dans le temps (les heures de pointe, les jours ouvrables, été, hiver, ...etc.),
- des changements possibles des prises des transformateurs,
- du comportement subtransitoire des alternateurs et des moteurs.

3.3.3.2. Taux initial d'accroissement du courant de court-circuit

Ce paramètre est calculé à partir de l'équation de base (3-8) en remplaçant par $t = 0$ et $i_t = 0$

$$\left. \frac{di_t}{dt} \right|_{(t \rightarrow 0)} = \frac{\hat{E} \sin \theta}{L_s} \quad (3-26)$$

Tableau 3.1. Valeur efficace de la composante symétrique du courant de court-circuit (CEI 60909) [23].

Type de court-circuit	Valeurs du courant de court-circuit
Monophasé à la terre ($Z_T=0$)	$I_1 = \frac{cU_n \sqrt{3}}{X_d + X_i + X_0}$
Biphasé isolé ($Z_T=\infty$)	$I_1 = \frac{cU_n}{X_d + X_i}$
Biphasé à la terre ($Z_T=0$)	$I_1 = \frac{cU_n \sqrt{3} X_i}{X_d X_i + X_i X_0 + X_d X_0}$
Triphasé (Z_T quelconque)	$I_1 = \frac{cU_n}{\sqrt{3} X_d}$

Avec :

I_1 : Courant de court-circuit en module.

U_n : Tension composée du réseau triphasé dans lequel le court-circuit a eu lieu.

X_d, X_i, X_0 : Réactances symétriques directe, inverse et homopolaire

Z_T : Impédance de mise à la terre.

Le taux initial d'accroissement du courant de court-circuit est maximal pour $\sin \theta = 1$, donc pour $\theta = \pi/2$

$$\left. \frac{di_t}{dt} \right|_{max} = \frac{\hat{E}}{L_s} \quad (3-27)$$

Tableau 3.2. Valeurs du facteur de tension c (CEI 60909) [23].

Tension nominale U_n	c pour le calcul d'Icc maximal	c pour le calcul d'Icc minimal
1 à 230kV	1.1	1

Il en résulte que si le court-circuit apparaît au moment de la crête de la tension, la pente du courant de court-circuit est à sa valeur maximale.

3.3.3.3. Courant dynamique

Le courant dynamique, appelé aussi pic maximal instantané, est la valeur maximale de la première demi-alternance du courant de court-circuit. Il est obtenu de l'équation (3-19) en posant simultanément [24]:

$\frac{di_t}{dt} = 0$ (le courant de court-circuit est à sa valeur maximale).

et $\frac{di_t}{d\theta} = 0$ (pour déterminer la valeur de θ pour laquelle le courant de court-circuit est maximal).

$$\frac{di_t}{dt} = \hat{I}_1 \omega \cos(\omega t + \theta - \psi) - \hat{I}_1 \left(-\frac{1}{\tau_1}\right) e^{-\frac{t}{\tau_1}} \sin(\theta - \psi) = 0 \quad (3-28)$$

$$\frac{di_t}{d\theta} = \hat{I}_1 \cos(\omega t + \theta - \psi) - \hat{I}_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} \cos(\theta - \psi) = 0 \quad (3-29)$$

Ce qui donne :

$$\omega \cos(\omega t + \theta - \psi) = \left(-\frac{1}{\tau_1}\right) e^{-\frac{t}{\tau_1}} \sin(\theta - \psi) \quad (3-30)$$

$$\cos(\omega t + \theta - \psi) = e^{-\frac{t}{\tau_1}} \cos(\theta - \psi) \quad (3-31)$$

Le rapport de l'équation (3-30) sur l'équation (3-31) permet d'obtenir:

$$\omega = \left(-\frac{1}{\tau_1}\right) \operatorname{tg}(\theta - \psi) \quad (3-32)$$

Des relations (3-13) et (3-21) on tire:

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{L_s \omega}{R_s} = \omega \tau_1$$

D'où

$$\omega = \frac{\operatorname{tg}\psi}{\tau_1} \quad (3-33)$$

Les équations (3-32) et (3-33) sont égales, d'où :

$$tg\psi = -tg(\theta - \psi) \quad (3-34)$$

L'équation (3-34) est juste pour $\theta = 0$ signifiant que le courant dynamique est obtenu au zéro de l'onde de la tension (Fig. 3.5).

De l'équation (3-26), le taux initial d'accroissement du courant de court-circuit est nul.

$$\left. \frac{di_t}{dt} \right|_{(t \rightarrow 0, \theta \rightarrow 0)} = 0$$

En introduisant $\theta = 0$ dans l'équation (3-19), on trouve l'expression du courant de court-circuit asymétrique total, qui permet de trouver la valeur du courant dynamique :

$$i_t = \hat{I}_1 \sin(\omega t - \psi) + \hat{I}_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} \sin(\psi) \quad (3-35)$$

- Pour $\theta = 0$, l'instant d'occurrence du pic maximal est $t = \frac{T}{2} = \frac{1}{2f}$ on obtient $= \pi$, avec T la période de l'onde de la tension.
- Pour un circuit fortement inductif ($\psi = \frac{\pi}{2}$ et $R_s = 0$), on obtient $\frac{1}{\tau_1} = 0$

En remplaçant dans l'équation (3-35) ωt par π et $\frac{1}{\tau_1}$ par 0, on obtient le courant dynamique :

$$I_{DYN} = 2\hat{I}_1 = 2\sqrt{2}I_1 = 2,83I_1 \quad (3-36)$$

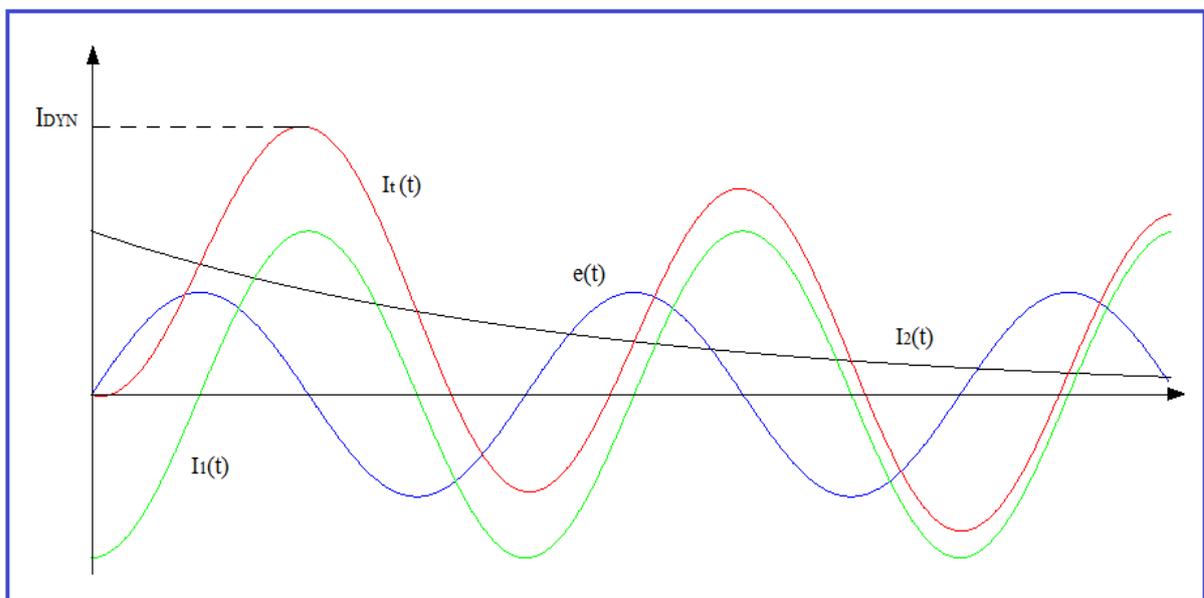


Figure 3.5. Courant dynamique obtenu au zéro de la tension

Il en résulte que pour les circuits fortement inductifs, le courant dynamique peut atteindre le double de la valeur crête du courant symétrique, par conséquent les deux contraintes mécanique et

thermique peuvent être très sévères [24]. Malgré que dans le domaine de la haute tension, les circuits sont inductifs, mais le rapport $\frac{I_{DYN}}{I_1}$ dépasse rarement 1.8

3.3.4. Courant de court-circuit symétrique

Pour $\theta - \psi = 0$, autrement dit $\theta = \psi = \frac{\pi}{2}$ (circuit inductif), l'expression du courant de court-circuit dans l'équation (3-19) devient :

$$i_t = \hat{I}_1 \sin(\omega t)$$

A $t = 0$, le courant de court-circuit apparaît à la valeur zéro du courant de la composante permanente, la composante transitoire est absente. Le courant de court-circuit est complètement symétrique à partir de l'origine (Fig. 3.6).

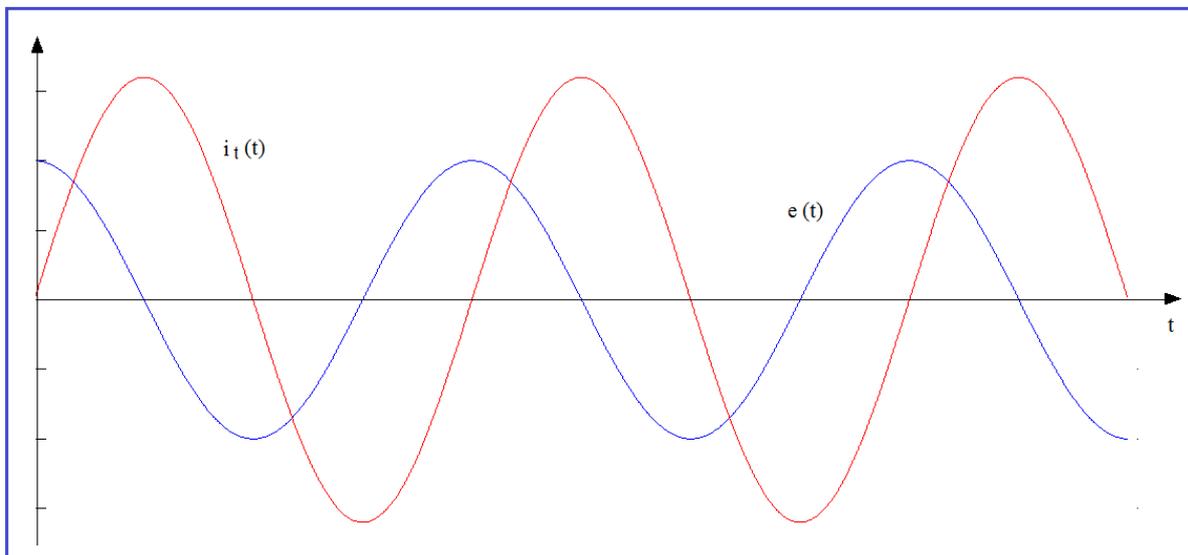


Figure 3.6. Courant de court-circuit symétrique obtenu à la crête de la tension

3.4. Coupure d'un courant de court-circuit

3.4.1. Processus de coupure d'un courant de court-circuit

L'arc électrique joue un rôle fondamental dans la coupure des courants alternatifs. Il est capable de changer d'un état conducteur à un état non conducteur durant une période très courte. D'un autre côté, en courant alternatif, le courant électrique passe par zéro à chaque alternance, à l'occurrence d'un défaut, les contacts s'ouvrent lorsque le courant s'approche de la valeur zéro et l'arc apparaît. A cet instant la puissance fournie à l'arc par le réseau est minimale, on peut donc mettre à profit cet intervalle de temps pendant lequel le courant est de faible intensité pour éteindre l'arc.

Le courant continu à passer dans le circuit à travers le canal d'arc entre les contacts, c'est le courant d'arc. Une chute de tension, appelée tension d'arc est produite, elle est due à la résistance du canal d'arc. Au zéro du courant (ZC), on éteint l'arc avec du gaz SF₆ (Fig. 3.7).

Durant les premières microsecondes qui suivent l'interruption du courant de court-circuit, un courant de faible intensité, appelé courant post-arc, continue à circuler à travers les contacts du disjoncteur, pendant la formation de la tension transitoire rétablissement (TTR) (Fig. 3.8). Ce faible courant est dû au déplacement des électrons libres présents dans le gaz encore chaud après l'extinction de l'arc [2].

Le courant post-arc ensemble avec la TTR donnent un apport d'énergie dans le canal de gaz, encore chaud, si cet apport d'énergie est tel que les molécules du gaz se dissocient en électrons libres et en ions positifs, l'état plasma est de nouveau créé et l'interruption du courant échoue, c'est un amorçage thermique.

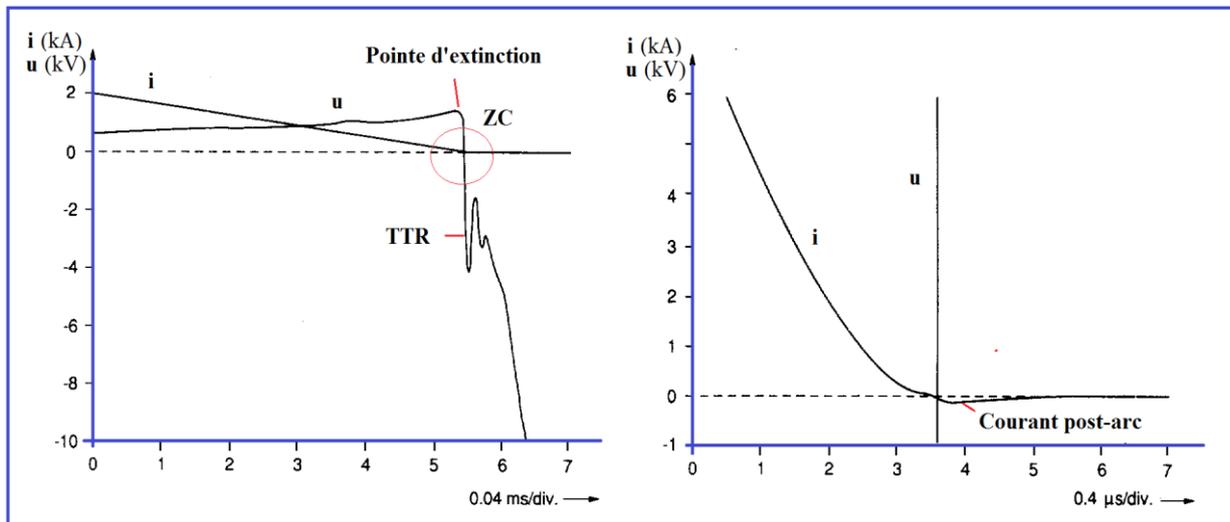


Figure 3.7. Tension d'arc (u), pointe d'extinction, courant d'arc (i) et courant post-arc [25]

Si l'interruption du courant réussie, le canal de gaz chaud disparaît et le courant post-arc disparaît aussi, mais un échec diélectrique peut se produire lorsque la rigidité diélectrique du gaz SF₆, qui est entre les contacts, n'est pas suffisante pour résister à la TTR.

3.4.2. Pointe d'extinction

La tension d'arc reste presque constante tant que le courant d'arc est élevé. Cependant, lorsque le courant se rapproche de zéro, la tension d'arc commence à augmenter progressivement jusqu'à atteindre un pic appelé pointe d'extinction (Fig. 3.7). Ce phénomène est caractérisé par une surtension qui apparaît juste avant que le courant ne s'annule. Une fois la pointe d'extinction atteinte, la tension d'arc chute brusquement à zéro.

La pointe d'extinction [12] est un paramètre essentiel dans l'étude du processus d'extinction de l'arc. Sa valeur ne peut pas être déterminée analytiquement, car elle dépend de plusieurs facteurs tels que la dynamique du plasma d'arc, les caractéristiques du disjoncteur et les conditions du réseau électrique.

3.4.3. Tension transitoire de rétablissement

La tension transitoire de rétablissement (TTR) [2] est une surtension qui apparaît aux bornes du disjoncteur, immédiatement après l'interruption du courant, puis rejoint la tension de rétablissement du réseau $e(t)$ (Fig. 3.8). La durée de la TTR est quelques millisecondes mais son amplitude et son taux de variation jouent un rôle important dans la réussite ou l'échec de la coupure.

3.4.4. Conditions de réussite de la coupure

La coupure réussie lorsque :

- La vitesse de désionisation du milieu de coupure est grande.
- L'espace inter contacts a une tenue diélectrique suffisante, de façon à supporter la TTR et la tension de rétablissement à la fréquence du réseau.

L'énergie W dissipée par effet joule dans le disjoncteur durant le processus de coupure dépend de la tension d'arc u et du courant d'arc i [13] :

$$W = \int_{t_s}^{t_0} u i dt \quad (3-37)$$

Où t_s est l'instant de séparation des contacts et t_0 est l'instant de coupure.

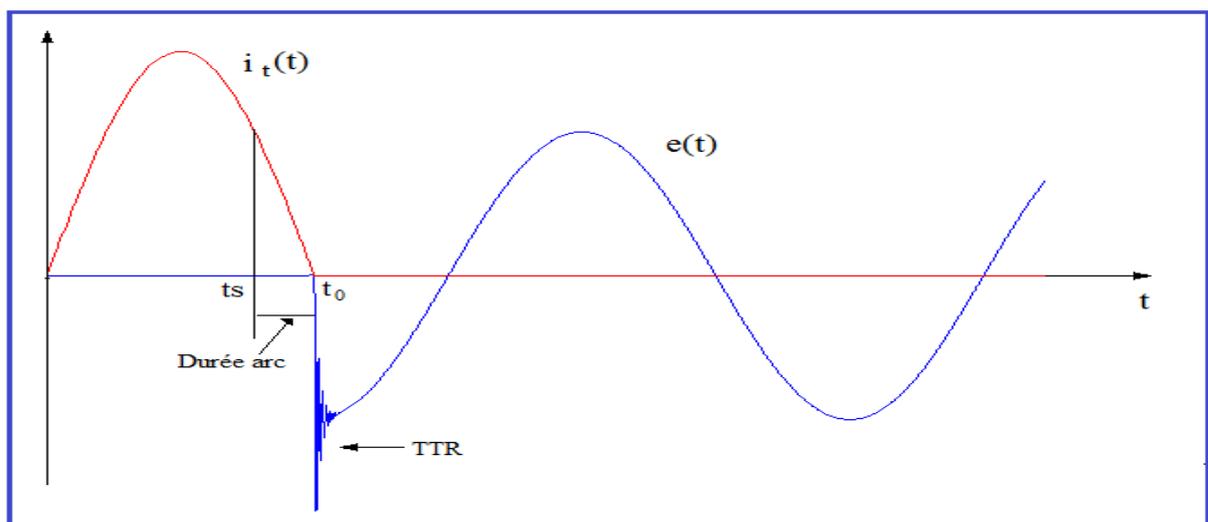


Figure 3.8. Principe de coupure d'un courant de court-circuit.

3.5. Fermeture sur court-circuit

Lorsque le disjoncteur est fermé sur un court-circuit existant, les conditions ne sont pas semblables aux conditions de coupure. Le courant initial peut atteindre la valeur maximale du courant instantané total et le disjoncteur doit supporter ce courant. Le problème de la fermeture sur court-circuit produit des efforts électrodynamiques plus sévères que ceux produits pendant la coupure.

3.6. Caractéristiques assignées liées aux courants de court-circuit

3.6.1. Tension assignée

La tension assignée d'un disjoncteur (U_r) est la valeur maximale de la tension du réseau dans lequel ce disjoncteur peut être installé. Les valeurs de la tension assignée ont été harmonisées entre les normes CEI et ANSI/IEEE [16]. En haute tension, ces valeurs sont: 72,5 – 123 – 145 – 170 – 245 – 362 – 550 et 800 kV

3.6.2. Courant assigné en service continu

Le courant assigné en service continu (I_n) est le courant maximal que le disjoncteur peut supporter indéfiniment dans les conditions normales de service. En règle générale, le choix d'un appareil doit être tel que son courant assigné soit supérieur aux courants susceptibles de traverser l'appareil, mais une certaine surcharge est possible lorsque la température ambiante est inférieure à la valeur maximale définie pour les conditions normales de service (40 °C) (ANSI C 37.010) [10].

Les valeurs assignées définies dans CEI sont choisies des séries de Renard (Tableau 3.3). Ces valeurs sont: 630 – 800 – 1250 – 1600 – 2000 – 2500 – 3150 – 4000 – 5000 et 6300 A

Tableau 3.3. Séries de Renard adoptées par CEI [16].

n	$n/10$	$A = 10^{n/10}$	1000A	$I_n (A)$	10A	$I_{sc} (kA)$
1	0,1	1,259	1259	1250	12,59	12,5
2	0,2	1,585	1585	1600	15,85	16
3	0,3	1,995	1995	2000	19,95	20
4	0,4	2,512	2512	2500	25,12	25
5	0,5	3,162	3162	3150	31,62	31,5
6	0,6	3,981	3981	4000	39,81	40
7	0,7	5,012	5012	5000	50,12	50
8	0,8	6,310	6310	6300	63,10	63
9	0,9	7,943	7943	8000	79,43	80
10	1	10, 000	10000	10000	100	100

3.6.3. Fréquence assignée

C'est la fréquence nominale du système. Les fréquences standards sont 50 ou 60 Hz [10].

3.6.4. Pouvoir de coupure assigné en court-circuit

C'est la valeur la plus élevée du courant de court-circuit que le disjoncteur doit être capable d'interrompre dans les conditions d'emploi et de fonctionnement fixées par la norme *CEI 60056*.

Le pouvoir de coupure assigné en court-circuit est caractérisé par:

- **La valeur normale de la valeur efficace de la composante périodique** du pouvoir de coupure assigné en court-circuit *I_{sc}* (appelée généralement pouvoir de coupure assigné en court-circuit) est choisie des séries de Renard ([Tableau 3.3](#)) [16]. Les valeurs d' *I_{sc}* sont: 12,5 – 16 – 20 – 25 – 31,5 – 40 – 50 – 63 – 80 et 100 kA
- **Le pourcentage de la composante apériodique sur la valeur crête de la composante périodique** est basé sur l'intervalle de temps ($t_{op} + t_r$) et sur la constante de temps τ_1 . Il peut être déduit de [Fig. 3.9](#) [10]:

$$\frac{i_2}{\hat{I}_1} (\%) = 100e^{-\frac{(t_{op}+t_r)}{\tau_1}} \quad (3-38)$$

Où

$(t_{op} + t_r)$ la durée entre la détection du défaut et l'instant de séparation des contacts du premier pôle du disjoncteur ([Fig. 3.10](#)).

t_{op} la durée d'ouverture minimale du premier pôle en millisecondes,

t_r le temps de relais, c'est la durée nécessaire pour que l'ordre soit transmis au disjoncteur après la détection du défaut :

- a. Pour un disjoncteur à déclenchement autonome, $t_r = 0$
- b. Pour un disjoncteur qui se déclenche avec une énergie auxiliaire, $t_r = T/2$ (valeur normalisée), avec T la période à la fréquence assignée.

La constante de temps normalisée est $\tau_1 = 45 \text{ ms}$. Toutefois, cette valeur peut ne pas être convenable pour certains réseaux, les constantes de temps suivantes peuvent être utilisées pour des applications particulières. Suivant la tension assignée U_r du disjoncteur :

- $\tau_1 = 120 \text{ ms}$ pour $U_r \leq 72,5 \text{ kV}$

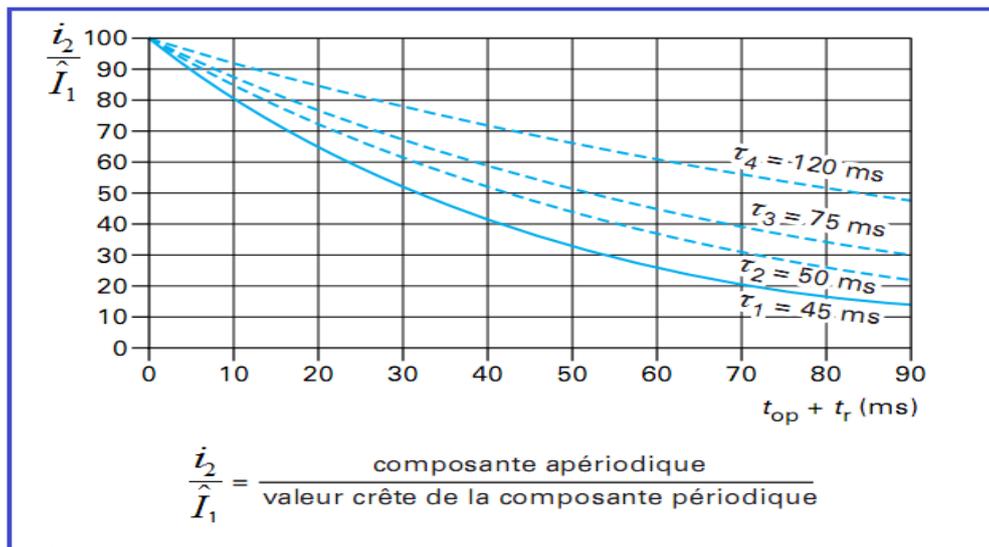


Figure 3.9. Composante apériodique du pouvoir de coupure [10].

- $\tau_1 = 60 \text{ ms}$ pour $72,5 \text{ kV} \leq U_r \leq 420 \text{ kV}$
- $\tau_1 = 75 \text{ ms}$ pour $U_r > 420 \text{ kV}$

Si le courant de court-circuit total est symétrique, le pouvoir de coupure est égal à la valeur normale de la valeur efficace de la composante périodique (I_{sc}).

3.6.5. Pouvoir de fermeture assigné en court-circuit

Le pouvoir de fermeture assigné [10] dépend de la fréquence assignée f et de la valeur normalisée de la constante de temps de τ :

- $2,5I_{sc}$ pour $f = 50 \text{ Hz}$ et $\tau_1 = 45 \text{ ms}$
- $2,6I_{sc}$ pour $f = 60 \text{ Hz}$ et $\tau_1 = 45 \text{ ms}$

3.6.6. Durée de coupure assignée

Le diagramme de temps de coupure d'un courant de court-circuit (Fig. 3.10) commence par l'instant d'apparition du défaut, il comprend [10, 16]:

- La durée d'ouverture : c'est le temps que prend le disjoncteur pour ouvrir suffisamment les contacts tel qu'un arc est initié entre ses contacts principaux.
- La durée de coupure : est l'intervalle de temps compris entre l'instant de mise sous tension du déclencheur d'ouverture et l'instant d'extinction finale de l'arc dans tous les pôles du disjoncteur. Elle est exprimée en millisecondes ou en cycle ($f = 50 \text{ Hz}$, un cycle est 20 ms)

Pour maintenir la stabilité des réseaux HT, l'exploitant fixe une durée maximale de coupure à ne pas dépasser (2 ou 2,5 cycles selon les cas). Une durée de coupure de 3 cycles est généralement

suffisante, sauf dans les réseaux à très haute tension où une durée de coupure de 2 cycles est souvent exigée [10].

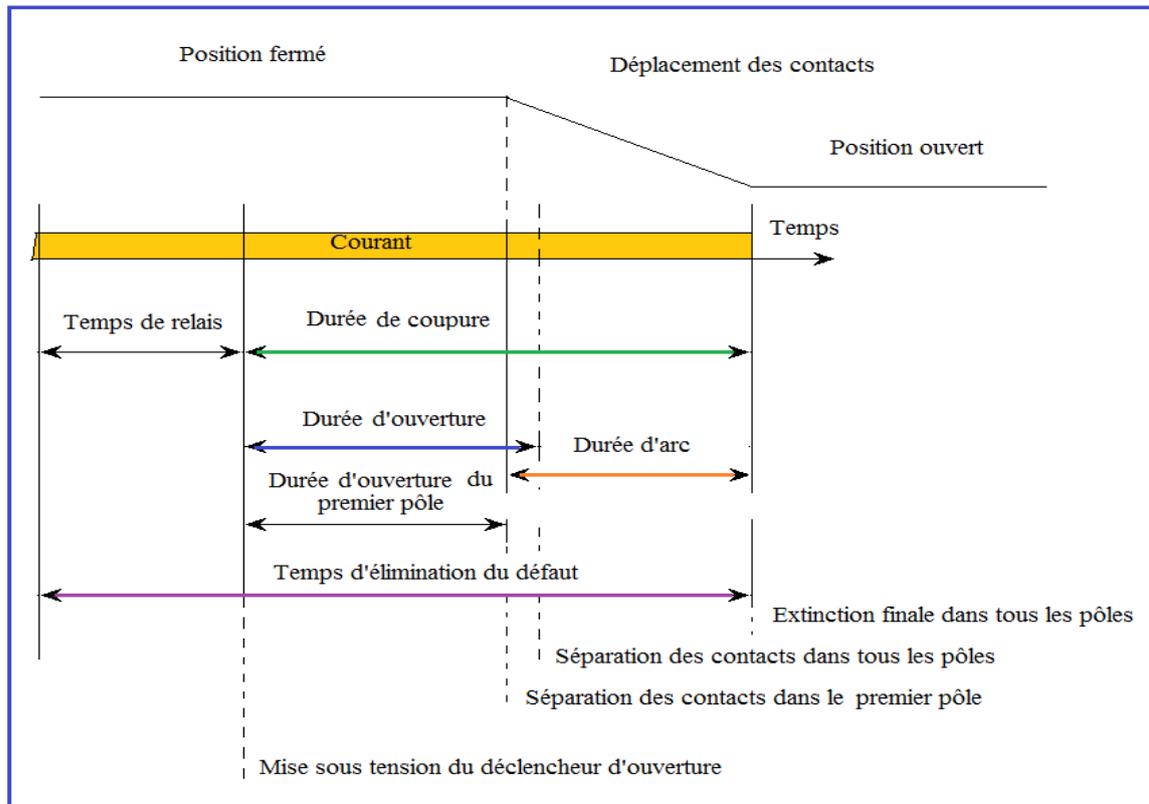


Figure 3.10. Durée de coupure [10]

3.7. Conclusion

Le courant de court-circuit établi est caractérisé par ses composantes ; alternative sinusoïdale et continue aperiodique, exponentiellement décroissante, ainsi que par la valeur du courant dynamique. Les pouvoirs de coupure et de fermeture sont déterminés en fonction de ces caractéristiques.

La coupure d'un courant alternatif se fait grâce à l'arc électrique qui est capable de changer d'un état conducteur à un état non conducteur durant une courte période. Les efforts électrodynamiques qui se manifestent lors d'une fermeture sur court-circuit sont plus sévères que ceux ayant lieu lors d'une interruption du courant de court-circuit.

L'instant de coupure dépend de l'onde du courant. On coupe avec le minimum d'énergie, si les contacts s'ouvrent lorsque le courant est proche de la valeur zéro.

Chapitre 04

ESSAIS D'ETABLISSEMENT ET DE COUPURE DES COURANT DE COURT-CIRCUIT

4.1. Introduction

Pour assurer le développement des disjoncteurs HT et vérifier leur bon fonctionnement, il est indispensable de réaliser des essais. Ces essais permettent d'évaluer les performances des disjoncteurs en conditions réelles. Ils sont effectués dans des laboratoires haute puissance (HP) spécialisés, où différentes configurations de circuits d'essais sont mises en place pour simuler les contraintes électriques auxquelles les disjoncteurs seront soumis en exploitation.

Il existe principalement deux catégories d'essais :

- Les essais effectués par le constructeur et sont deux types : les essais de routine pour confirmer le bon fonctionnement de chaque disjoncteur et les essais de développement pour améliorer un prototype de disjoncteurs.
- Les essais type, effectués dans un laboratoire HP sur un échantillon de disjoncteurs pour confirmer que leurs caractéristiques et leurs pouvoirs de coupure sont conformes aux normes internationales. Ces essais comportent les essais mécaniques et environnementaux, les essais de coupure des petits courants inductifs et des courants capacitifs et les essais d'établissement et de coupure des courants de court-circuit.

Ce chapitre est consacré aux essais d'établissement et de coupure des courants de court-circuit, englobant à la fois les essais de défaut aux bornes et ceux de défaut proche en ligne. Il détaille également les types de laboratoires HP dans lesquels ces essais sont réalisés, ainsi que les différentes configurations de circuits d'essais utilisées pour évaluer les performances des disjoncteurs HT.

4.2. Défaut aux bornes triphasé

Les défauts aux bornes sont des courts-circuits ayant lieu près de la borne avale du disjoncteur.

4.2.1. Courant de défaut aux bornes triphasé à la terre

Fig. 4.1 représente le cas d'un court-circuit aux bornes triphasé à la terre. Le courant de court-circuit est limité par Z_s , l'impédance équivalente en amont du disjoncteur.

$$\bar{Z}_s = R_s + jX_s \approx jX_s \quad (4-1)$$

En utilisant la méthode des composantes symétriques [26], les conditions du défaut aux bornes triphasé à la terre sont :

$$V_1 = 0; \quad V_2 = 0; \quad V_3 = 0$$

Avec V_1, V_2 et V_3 les tensions entre les phases 1, 2 et 3 et la terre.

Le courant de défaut aux bornes triphasé est :

$$I_1 = \frac{U_n}{\sqrt{3}X_d} = \frac{U_n}{\sqrt{3}X_s} \quad (4-2)$$

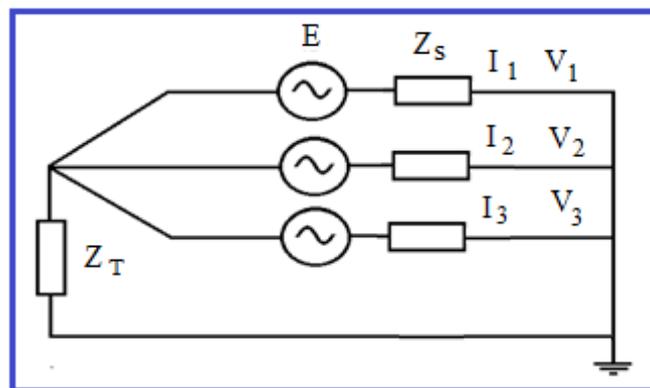


Figure 4.1 Circuit avec un défaut aux bornes triphasé à la terre

4.2.2. Facteur du premier pôle

Après avoir éliminé un défaut aux bornes triphasé à la terre, le système électrique passe d'un état d'équilibre, dans lequel le courant de court-circuit triphasé circule, à un autre état d'équilibre dans lequel seule la tension de rétablissement à la fréquence du système est présente aux bornes du disjoncteur. Cela passe par une période transitoire ; au zéro du courant, le courant d'arc s'annule et la TTR oscille à partir de zéro à la crête de la tension de rétablissement à la fréquence du réseau.

Les contraintes les plus sévères lors de la coupure d'un défaut aux bornes sont obtenues dans le cas d'un défaut triphasé, car d'un côté, le courant à couper est souvent le plus élevé et de l'autre côté, la tension rétablie est plus élevée sur le premier pôle qui coupe. La TTR se réfère au premier pôle qui coupe, c'est-à-dire à la tension aux bornes d'un pôle ouvert alors que les deux autres sont fermés. Le facteur du premier pôle est [26] :

$$k_{pp} = \frac{V_1}{U_r/\sqrt{3}} \quad (4-3)$$

Avec

V_1 : Tension rétablie à fréquence du système aux bornes du premier pôle qui coupe, avant l'interruption du courant dans les deux autres pôles.

U_r : Tension assignée du disjoncteur

Pour trouver le facteur du premier pôle qui coupe, on utilise la méthode des composantes symétriques. Avec un défaut triphasé à la terre, les conditions sont [2]:

$$I_1 = 0; V_2 = 0; V_3 = 0$$

Avec I_1 le courant de la phase 1.

$$k_{pp} = 3 \frac{3R_n + j(X_0 + 3X_n)}{jX_d + 2(3R_n + j(X_0 + 3X_n))}$$

Sachant que l'impédance qui relie le neutre à la terre est :

$$\bar{Z}_T = R_n + jX_n \quad (4-4)$$

k_{pp} dépend de la façon dont le neutre du réseau est mis à la terre [2, 26]:

- $k_{pp} = 1,5$ dans le cas du neutre isolé (Z_T est infinie), la tension maximale au premier pôle qui coupe est 1,5 fois la tension maximale d'une phase du réseau.
- Pour les systèmes mis à la terre ($Z_T = 0$):

$$k_{pp} = \frac{3X_0}{X_d + 2X_0} \quad (4-5)$$

- Pour $X_d > X_0$ $k_{pp} < 1$
- Pour $X_d = X_0$ $k_{pp} = 1$
- Pour $X_0 = 3,25X_d$ $k_{pp} = 1,3$

Les valeurs normales de la TTR spécifiée sont établies dans les deux cas suivants (Tableau 4-1) :

- $k_{pp} = 1,5$ pour les disjoncteurs devant être installés dans un réseau à neutre non effectivement à la terre.
- $k_{pp} = 1,3$ pour les disjoncteurs devant être installés dans un réseau effectivement mis à la terre (le cas habituel des disjoncteurs de tension assignée $U_r \geq 245 \text{ kV}$)

4.2.3. Représentations normalisées des ondes de la TTR

L'évolution des technologies de mesure, en particulier l'introduction de l'oscillographe cathodique, puis plus tard de l'oscilloscope cathodique, a aidé à comprendre les phénomènes transitoires en

haute tension. Ces appareils ont permis d'observer et d'analyser avec précision les variations rapides de la tension, après l'interruption du courant dans un disjoncteur HT.

Grâce à ces évolutions, l'existence d'une oscillation haute fréquence qui se manifeste immédiatement après l'extinction de l'arc électrique a été mise en évidence. Ce phénomène, désormais bien connu sous le nom de Tension Transitoire de Rétablissement (TTR), joue un rôle crucial dans l'étude des performances des disjoncteurs HT, car il influe sur leur capacité à interrompre efficacement les courants de défaut.

De nombreuses études ont été effectuées dans quelques pays (notamment en FRANCE et en ITALIE) pour déterminer la TTR aux bornes des disjoncteurs lors de la coupure des courants de courts-circuits dans les réseaux, afin de constituer une base de données pour normaliser la TTR dans les essais de type sur les disjoncteurs. La forme d'onde à quatre paramètres a été proposée par HOCHRAINER en 1957 et les possibilités de créer la forme d'onde dans un laboratoire HP ont été étudiées [2].

Les défauts triphasés à la terre sont plus fréquents que les défauts triphasés isolés et sont pris en compte pour la normalisation des essais de type [2, 10]. Les TTR normalisées s'appliquent à l'interruption des défauts triphasés à la terre, sous le courant de court-circuit symétrique assigné (I_{sc}) et à la tension assignée du disjoncteur. Ces TTR sont définies par des enveloppes à deux paramètres et à quatre paramètres, établies à partir d'analyses théoriques et de mesures expérimentales des tensions rétablies dans les réseaux HT [2].

L'aptitude d'un disjoncteur à supporter la TTR est considérée comme suffisante si l'enveloppe normalisée à deux ou à quatre paramètres, tracée avec les valeurs de référence, est supérieure à celle du système dans lequel le disjoncteur est installé.

4.2.3.1. Représentation par deux paramètres

Cette méthode de représentation est couramment utilisée pour les disjoncteurs HT dont la tension assignée ne dépasse pas 100 kV, ou dans le cas où la tension assignée dépasse 100 kV, mais le courant de court-circuit est inférieur au pouvoir de coupure assigné en court-circuit I_{sc} . Dans ce cas, la TTR prend généralement la forme d'une oscillation presque sinusoïdale caractérisée par une seule fréquence dominante et un faible pourcentage d' I_{sc} . Cette forme d'onde est représentée par une enveloppe formée par deux segments de droite, définis par deux paramètres (u_c et t_3) (Fig. 4.2 a)) [10].

$$u_c = \frac{U_r}{\sqrt{3}} \sqrt{2} k_{pp} k_{af} \quad (4-6)$$

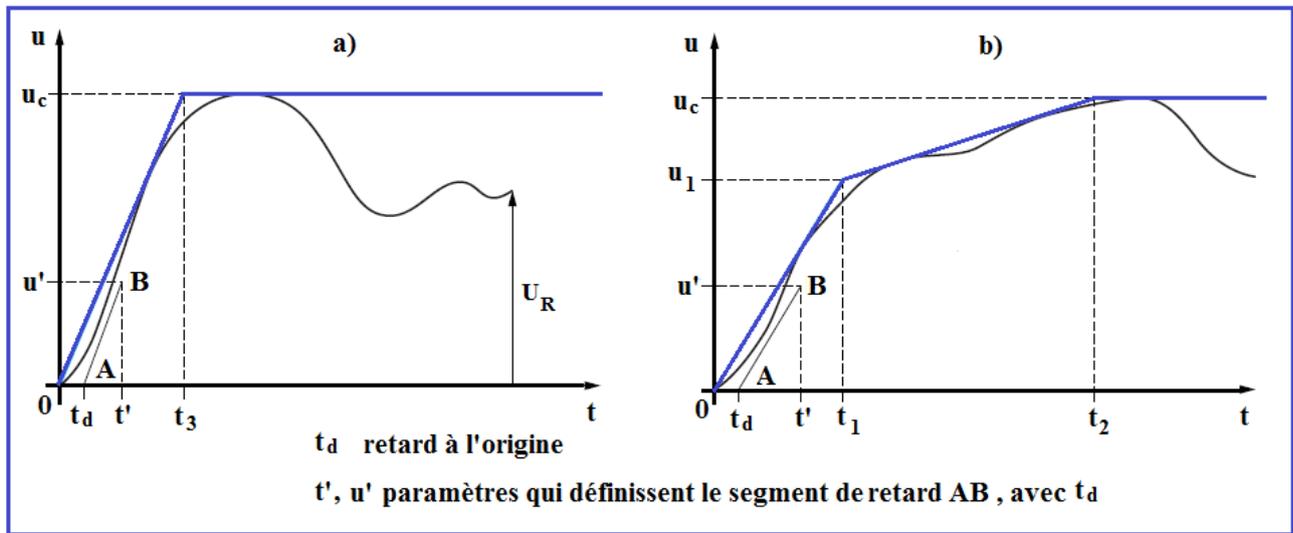


Figure 4.2. Représentation de la TTR, a) Représentation par deux paramètres, b) Représentation par quatre paramètres [10].

$$t_3 = \frac{u_c}{V_{ATR}} \quad (4-7)$$

$$k_{af} = \frac{u_c}{U_R} \quad (4-8)$$

Avec

u_c : Valeur crête de la TTR

t_3 : Instant correspondant à la valeur crête.

V_{ATR} est la vitesse d'accroissement de la tension de rétablissement spécifiée dans les normes (Tableau 4.1) en $kV/\mu s$.

U_R : Valeur de la tension stabilisée du réseau.

k_{af} : Facteur d'amplitude.

Les valeurs normalisées du facteur d'amplitude sont [26]:

- 1,4 dans le cas d'un défaut aux bornes égal à 100 % I_{sc} ;
- 1,5 dans le cas d'un défaut aux bornes égal à 60 % et 30 % I_{sc} ;
- 1,5 ou 1,7 dans le cas d'un défaut aux bornes égal à 10 % I_{sc} .

$$V_{ATR} = \frac{u_c}{t_3} \quad (4-9)$$

4.2.3.2. Représentation par quatre paramètres

Pour les disjoncteurs de tension assignée $U_r \geq 100 \text{ kV}$, la forme d'onde de la TTR est généralement représentée par une enveloppe formée par trois segments de droite et définie par quatre paramètres

$(t_1, u_1, t_2, \text{ et } u_c)$ (Fig. 4.2 b)[10].

$$u_1 = \frac{U_r}{\sqrt{3}} \sqrt{2} k_{pp} \quad (4-10)$$

$$u_c = k_{af} u_1 \quad (4-11)$$

$$t_2 = 3t_1 \quad (4-12)$$

Avec :

u_c : la valeur crête de la TTR et t_2 le temps qui lui correspond.

u_1 : la première tension de référence et t_1 le temps qui lui correspond.

t_1 est déterminé à partir de u_1 et de V_{ATR} spécifiée.

$$t_1 = \frac{u_1}{V_{ATR}} \quad (4-13)$$

Pendant les premières microsecondes de l'apparition de la TTR, la vitesse d'accroissement de la tension de rétablissement est réduite par la capacité du réseau du côté alimentation du disjoncteur. On introduit un temps de retard t_d pour en tenir compte. Les paramètres u' et t' définissent le segment de retard AB (Fig. 4.2) [10].

4.3. Vérification de la capacité d'établissement et de coupure des défauts aux bornes

4.3.1. Essais de coupure des défauts aux bornes triphasés normalisés

Pour confirmer l'aptitude du disjoncteur à interrompre des défauts aux bornes triphasés, la norme *CEI 62271-100* désigne quatre séquences d'essais ($T10$, $T30$, $T60$ et $T100$) avec un courant symétrique égal respectivement à 10%, 30%, 60% et 100% du pouvoir de coupure assigné en court-circuit (I_{sc}) et une tension rétablie définie selon la façon dont le neutre est lié à la terre. Ces séquences d'essais représentent des situations différentes dans le système de puissance.

La norme *CEI 62271-100* spécifie aussi une cinquième séquence d'essais ($T100a$) réalisée avec un courant asymétrique, dont la composante périodique est égale à 100% I_{sc} et la composante aperiodique dépend de la durée minimale t_{op} d'ouverture du disjoncteur. Cette séquence d'essais, comprend trois manœuvres d'ouverture. Les valeurs de la TTR sont généralement moins sévères que dans le cas d'interruption des courants symétriques, car la valeur instantanée de la tension au moment de la coupure est plus petite que la tension maximale du réseau.

Dans [Tableau 4.1](#) sont regroupés les paramètres de la TTR des séquences d'essais pour le disjoncteur 245kV/40kA/50Hz. On remarque que la vitesse d'accroissement de la tension de rétablissement (V_{ATR}) augmente lorsque le courant diminue et les TTR les plus élevées

correspondent aux courants de court-circuit les plus faibles, il n'est pas donc possible de dire qu'une séquence d'essais est plus difficile qu'une autre.

Comme exemple de calcul, on détermine les paramètres de la TTR représentée par quatre paramètres pour T100 :

De l'équation (4-10) :

$$u_1 = \frac{245}{\sqrt{3}} \sqrt{2} \times 1.3 = 260 \text{ kV} \quad (4-14)$$

De l'équation (4-11)

$$u_c = 260 \times 1.4 = 364 \text{ kV} \quad (4-15)$$

De l'équation (4-13) :

$$t_1 = \frac{260}{2} = 130 \text{ } \mu\text{s} \quad (4-16)$$

De l'équation (4-12) :

$$t_2 = 3 \times 130 = 390 \text{ } \mu\text{s} \quad (4-17)$$

Tableau 4.1. Valeurs normales de la TTR présumée pour la tension assignée 245kV (T100, T60, T30 représentation à quatre paramètres et T10 représentation à deux paramètres) [10].

U_r (kV)	Séquences d'essais	k_{pp} (pu)	k_{af} (pu)	u_1 (kV)	t_1 (μs)	u_c (kV)	t_2 ou t_3 (μs)	t_d (μs)	u' (kV)	t' (μs)	V_{ATR} (kV/ μs)
245	T100	1.3	1.4	260	130	364	390	2	130	67	2
	T60	1.3	1.5	260	87	390	392	2	130	45	3
	T30	1.5	1.5	300	60	450	450	5	150	35	5
	T10	1.5	1.53	-	-	459	66	10	153	32	7

4.3.2. Essais normalisés de fermeture sur défaut aux bornes triphasé

D'après la norme *CEI 62271-100*, l'aptitude du disjoncteur à fermer sur court-circuit doit être confirmée par deux fermetures :

- L'une avec le courant dynamique (l'instant d'établissement du courant de court-circuit s'effectue à un zéro de la tension) (Fig. 3.5).
- Et l'autre avec un courant symétrique (l'établissement du courant doit se faire au voisinage d'une valeur crête de la tension), avec la durée de pré-arc maximale (Fig. 3.6).

La durée de pré-arc est la durée pendant laquelle il y a un arc entre les contacts avant que ces

derniers se touchent, lorsque le disjoncteur ferme sous tension.

4.4. Défaut proche en ligne

Un défaut est nommé défaut proche en ligne, quand le court-circuit, généralement un défaut phase-terre, a lieu sur une ligne de transport de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres des bornes du disjoncteur. Ce type de défaut est plus fréquent que le défaut aux bornes sur les réseaux aériens. L'essai de ce court-circuit est inscrit dans les normes et c'est l'un des essais les plus sévères pour les disjoncteurs HT, car il crée après la coupure du courant des phénomènes de réflexion d'ondes qui donnent des TTR très contraignantes du côté disjoncteur, cela provoque dans les premières microsecondes après l'interruption du courant une grande contrainte sur le canal d'arc encore chaud et peut causer un réamorçage thermique. La durée d'arc est prolongée et quand la même chose se passe au prochain zéro du courant le disjoncteur échoue à couper ce courant de court-circuit [2]. La TTR qui se forme est la somme de deux TTR, l'une du côté de la source et l'autre du côté de la ligne :

4.4.1. Forme de la TTR côté ligne

Soit une ligne AC (Fig.4.3) protégée par un disjoncteur et alimentée par la tension d'alimentation :

$$e = \hat{E} \cos(\omega t) \quad (4-18)$$

Soit un défaut phase-terre au point B de la ligne, qui est très proche de la borne aval du disjoncteur. L'intensité du courant de court-circuit est i_L . Comme le circuit est inductif, ce courant est en retard par rapport à la tension de $\frac{\pi}{2}$.

$$i_L = \hat{I}_L \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) = \hat{I}_L \sin(\omega t) \quad (4-19)$$

La chute de tension instantanée à travers la portion de la ligne AB est :

$$u_L = L_L \frac{di_L}{dt} \quad (4-20)$$

De (4-19) on peut déterminer la dérivée du courant de court-circuit :

$$\frac{di_L}{dt} = \omega \hat{I}_L \cos(\omega t) \quad (4-21)$$

D'où

$$u_L = \omega L_L \hat{I}_L \cos(\omega t) \quad (4-22)$$

L'impédance de la ligne court-circuitée réduit le courant de court-circuit I_L par rapport au pouvoir de coupure assigné en court-circuit (I_{sc}).

$$M = \frac{I_L}{I_{sc}} \quad (4-23)$$

$M \times 100\%$ est le pourcentage que représente le défaut proche en ligne par rapport au pouvoir de coupure assigné en court-circuit I_{sc} .

Pour un défaut aux bornes, la tension d'alimentation est [26]:

$$E = X_s I_{sc} \quad (4-24)$$

Pour un défaut proche en ligne, la tension d'alimentation est :

$$E = (X_s + X_L) I_L \quad (4-25)$$

Des équations (4-24) et (4-25), on peut écrire :

$$X_s I_{sc} = (X_s + X_L) I_L = (X_s + X_L) M I_{sc} \quad (4-26)$$

D'où

$$M = \frac{X_s}{X_s + X_L} = \frac{L_s}{L_s + L_L} \quad (4-27)$$

De l'équation (4-27), l'inductance L_L peut s'écrire:

$$L_L = \frac{1 - M}{M} L_s \quad (4-28)$$

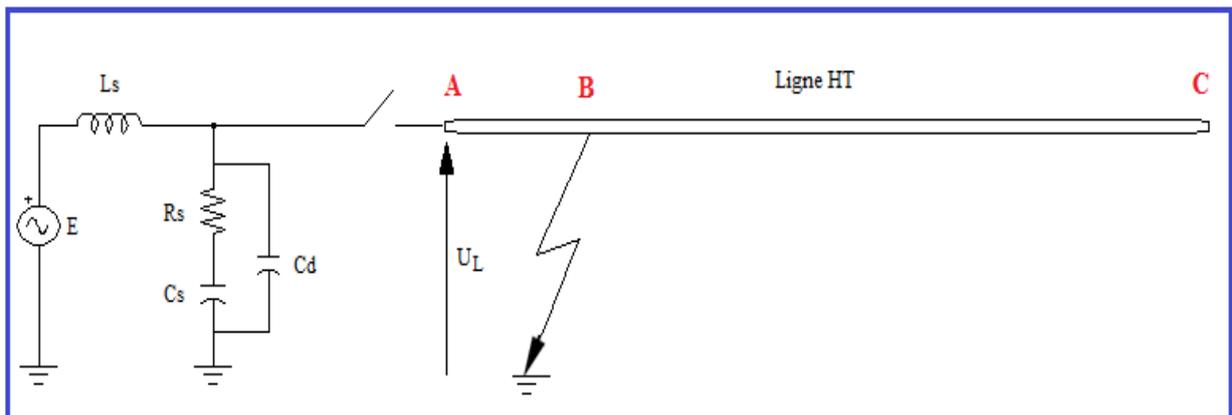


Figure 4.3. Défaut proche en ligne [2].

L'impédance caractéristique de la ligne est :

$$Z_L = \sqrt{\frac{L_L}{C_L}} \quad (4-29)$$

L_L et C_L sont respectivement l'inductance et la capacité de la portion de la ligne AB, entre la borne

du disjoncteur et le point du défaut. Dans les normes $Z_L = 450\Omega$

A l'instant où le courant franchit la valeur zéro, la tension de la ligne au point A est U_L et après l'interruption du courant, cette tension décroît de la valeur U_L à zéro (Fig.4.4). Immédiatement après la coupure du courant de défaut, la portion de la ligne AB est chargée du côté disjoncteur et non chargée du côté du point de court-circuit. La charge de la ligne AB va s'équilibrer d'elle-même et cela cause des ondes voyageuses sur cette partie de la ligne à travers une série d'ondes électromagnétiques voyageuses incidentes et réfléchies entre le point de court-circuit et la borne avale du disjoncteur. Cela produit une TTR en dents de scie amortie, en aval du disjoncteur, du côté de la ligne, avec un taux d'accroissement de 5 à 10 $kV/\mu s$. Ce taux dépend de l'intensité du courant de court-circuit interrompu et de l'impédance caractéristique de la portion de la ligne [2]. La TTR totale est la somme de la TTR en aval du disjoncteur et de la tension en amont du disjoncteur.

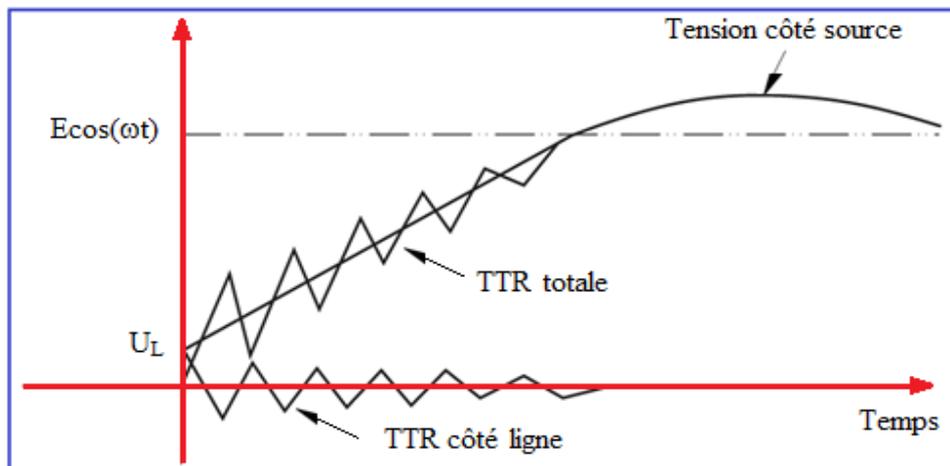


Figure 4.4. TTR dans le cas d'un défaut proche en ligne [2]

4.4.2. Calcul des paramètres de la TTR côté ligne

La TTR côté ligne (Fig.4.5) est caractérisée par:

- sa valeur crête (U_L^*)
- sa pente

Ces paramètres dépendent de la distance AB entre la borne avale du disjoncteur et le point de court-circuit.

4.4.2.1. Valeur crête de la TTR côté ligne

Le disjoncteur interrompt le courant au passage du courant par zéro, la tension d'alimentation et la pente du courant de court-circuit $\frac{di_L}{dt}$ sont maximums.

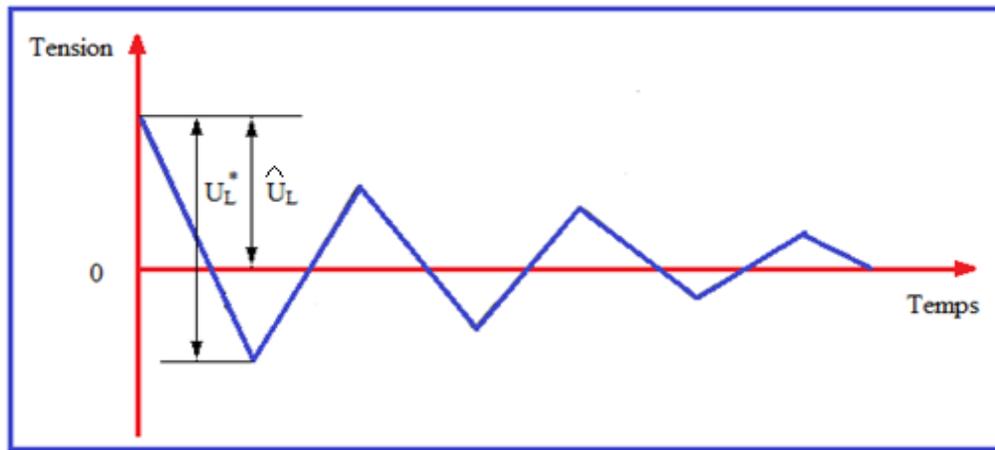


Figure 4.5. Paramètres de la TTR côté ligne [27]

Des équations (4-18) et (4-21) on a :

$$e = \hat{E} \quad (4-30)$$

$$\left. \frac{di_L}{dt} \right|_{max} = \omega \hat{I}_L = \omega \sqrt{2} I_L \quad (4-31)$$

La valeur crête de la chute de tension dans la ligne est obtenue de l'équation (4-22):

$$\hat{U}_L = \omega L_L \hat{I}_L \quad (4-32)$$

On appelle facteur de crête le rapport :

$$k = \frac{U_L^*}{\hat{U}_L} \quad (4-33)$$

La valeur crête de la TTR côté ligne est :

$$U_L^* = k \hat{U}_L = k \omega L_L \sqrt{2} I_L \quad (4-34)$$

En utilisant l'équation (4-28), on obtient :

$$U_L^* = k \frac{1-M}{M} L_s \omega \sqrt{2} I_L = k(1-M) X_s \sqrt{2} \frac{I_L}{M} = k(1-M) X_s \sqrt{2} I_{sc} \quad (4-35)$$

En utilisant l'équation (4-24), on obtient :

$$U_L^* = k(1-M) \sqrt{2} E = k(1-M) \sqrt{\frac{2}{3}} U_r \quad (4-36)$$

Avec :

$$\hat{U}_L = (1 - M) \sqrt{\frac{2}{3}} U_r \quad (4-37)$$

La valeur du facteur de crête de la TTR est normalisée [27]. Pour la norme *CEI 60056*, $k = 1,6$ et pour la norme *ANSI*, $k = 1,8$ pour $U_r \leq 242 \text{ kV}$ et $k = 1,6$ pour $U_r \geq 242 \text{ kV}$

4.4.2.2. Pente de la TTR côté ligne

Pour le défaut proche en ligne, la pente de la TTR ou la vitesse d'accroissement de la tension de rétablissement côté ligne (V_{ATRL}) est proportionnelle à la pente du courant à l'instant de la coupure (en valeur absolue) et à l'intensité du courant de court-circuit [26]:

$$V_{ATRL} = \frac{du_L}{dt} = Z_L \frac{di_L}{dt} = Z_L \omega \hat{I}_L = Z_L \omega M I_{sc} \sqrt{2} \quad (4-38)$$

4.5. Essai normalisé du défaut proche en ligne

L'essai de défaut proche en ligne est exigé pour les disjoncteurs tripolaires destinés à être reliés directement à des lignes aériennes. La tension assignée de ces disjoncteurs est $U_r \geq 52 \text{ kV}$ et leur pouvoir de coupure assigné en court-circuit est $I_{sc} > 12,5 \text{ kA}$. Cet essai est exigé en monophasé, car les défauts monophasés sont les plus fréquents [10].

Les essais de type de coupure de défaut proche en ligne sont indiqués par la norme *CEI 62271-100*. Les séquences d'essais L90 et L75 sont effectuées en monophasé avec un courant égal à $90\% I_{sc}$ et $75\% I_{sc}$ respectivement. Ils sont indispensables pour les disjoncteurs connectés directement à une ligne aérienne.

4.5.1. Cas d'un défaut proche en ligne L90

On suppose qu'on veut couper un courant de défaut proche en ligne L90 [10] en utilisant le disjoncteur 245kV/40kA/50Hz. La réactance de la ligne est déterminée de sorte que le courant de court-circuit I_L est égal à $90\% I_{sc}$

$$100\% M = 90\%$$

De l'équation (4-23) :

$$M = \frac{I_L}{I_{sc}} = \frac{90}{100}$$

$$I_L = \frac{90}{100} I_{sc} = 0,9 \times 40 = 36 \text{ kA}$$

De l'équation (4-37), la valeur crête de la chute de tension dans la ligne au moment de la coupure est:

$$\hat{U}_L = (1 - 0.9) \sqrt{\frac{2}{3}} \times 245 = 20 \text{ kV} \quad (4-39)$$

De l'équation (4-36), la valeur crête de la TTR côté de la ligne est :

$$U_L^* = k\hat{U}_L = 1.6 \times 20 = 32 \text{ kV} \quad (4-40)$$

La pente de la TTR côté ligne est obtenue de l'équation (4-38):

$$V_{ATRL} = \frac{du_L}{dt} = Z_L \left. \frac{di_L}{dt} \right|_{max} = Z_L \omega \hat{I}_L = 450 \times 314 \times 36\sqrt{2} = 7,2 \text{ kV}/\mu\text{s} \quad (4-41)$$

La valeur de la pente de la TTR côté ligne est donc 3,6 fois celle spécifiée pour un défaut aux bornes avec 100 % I_{sc} (Tableau 4.1).

4.5.2. Cas d'un défaut proche en ligne L75

On suppose qu'on veut couper un défaut proche en ligne L75 [10] en utilisant le disjoncteur 245kV/40kA/50Hz. De la même manière que précédemment, on obtient :

$$I_L = \frac{70}{100} I_{sc} = 0,7 \times 40 = 30 \text{ kA} \quad (4-42)$$

$$\hat{U}_L = (1 - 0.75) \sqrt{\frac{2}{3}} \times 245 = 50 \text{ kV} \quad (4-43)$$

$$U_L^* = 1.6 \times 50 = 80 \text{ kV} \quad (4-44)$$

$$V_{ATRL} = \frac{du_L}{dt} = 450 \times 314 \times 30\sqrt{2} = 6 \text{ kV}/\mu\text{s} \quad (4-45)$$

4.5.3. Longueur critique de la ligne

Des deux cas de défauts proche en ligne L90 et L75 ci-dessus, il est clair que :

- Lorsque le défaut a lieu près du disjoncteur (cas du L90) le courant augmente, la variation de la TTR augmente, mais la valeur crête de la TTR côté ligne diminue.
- Lorsque le défaut se produit loin du disjoncteur (cas L75), le courant de court-circuit diminue et la variation de la TTR diminue mais la valeur crête de la TTR côté ligne augmente.

Il y a deux effets qui travaillent en contradiction, donc il existe une longueur critique de la ligne pour laquelle l'essai est très sévère. Le disjoncteur HT est sensible au défaut proche en ligne ayant lieu quelques centaines de mètres à quelques kilomètres des bornes du disjoncteur. Pour les

disjoncteurs SF₆, la longueur critique de la ligne est aux alentours de 93% (autrement dit, le pourcentage critique du défaut proche en ligne est 93%) et pour les disjoncteurs à air comprimé, elle est entre 75% et 85% [2].

La TTR engendrée par la coupure d'un défaut proche en ligne est plus difficile pour un disjoncteur pendant la phase initiale de rétablissement de la tension, alors que la valeur crête de la TTR du défaut aux bornes triphasé est plus difficile pendant la phase dite diélectrique de la coupure, quelques centaines de microsecondes après l'instant de coupure.

4.6. Essais type des disjoncteurs HT

Selon la norme *IEC-60056*, les essais type des disjoncteurs comportent [2, 28]:

- Les essais mécaniques et environnementaux, incluant l'essai de fonctionnement mécanique, l'essai à la température ambiante de l'air, les essais à basse et à haute température, l'essai d'humidité, ...etc.
- Les essais d'établissement et de coupure des courants de court-circuit, incluant les essais de défauts aux bornes ; les essais de défauts proche en ligne et l'essai de coupure en discordance de phase.
- Les essais d'établissement et de coupure des courants capacitifs.
- Les essais de coupure des petits courants inductifs.

4.7. Essais d'établissement et de coupure des courants de court-circuit

Les essais d'établissement et de coupure des défauts aux bornes sont obligatoires pour tous les disjoncteurs HT tandis que les essais de coupure des défauts proche en ligne sont exigés uniquement pour les disjoncteurs reliés directement à une ligne aérienne [2]. Les essais de court-circuit utilisant les disjoncteurs HT nécessitent une puissance de court-circuit élevée qui est en fonction de la tension du courant de court-circuit, ces derniers sont variables dans une large gamme. Les essais de court-circuit peuvent être réalisés dans le réseau électrique ou dans un laboratoire HP.

4.7.1. Essais dans le réseau électrique

Les essais dans le réseau électrique ont l'avantage qu'aucun investissement spécial n'est nécessaire pour l'équipement d'essais et les disjoncteurs font face aux vraies conditions de défaut comme ils le feraient en service. Ce genre d'essais n'est pas pratique, car il est difficile de créer les diverses conditions du réseau telles que celles prescrites par les normes et de plus, le réseau électrique peut ne pas être prêt à alimenter les installations des fabricants.

4.7.2. Essais dans un laboratoire haute puissance

Un laboratoire haute-puissance (appelé ainsi car les valeurs de la tension et du courant sont élevées) est conçu pour tester les dispositifs d'interruption, tels que les fusibles et les disjoncteurs, les dispositifs de commutation, tels que les interrupteurs et les sectionneurs et d'autres appareils pouvant faire face à des surtensions ou rencontrer des courants de court-circuit, tels que les transformateurs, les parafoudres et les jeux de barre du réseau. Les laboratoires HP permettent de faire les essais convenablement sous les conditions simulées du réseau. Ils contiennent le matériel pour simuler les transitoires de commutation électromagnétiques comme ils se produisent dans l'environnement du réseau réel. Outre le matériel, un équipement de mesure adéquat et des techniques de mesure sophistiquées sont essentielles lors de l'exécution des essais.

Selon la différence d'alimentation, on peut distinguer deux types de laboratoire HP; l'un est une station d'essais directement alimenté par le réseau et l'autre est une station d'essais à générateurs, spécialement conçus pour les essais de court-circuit [2].

4.7.2.1. Laboratoire haute-puissance alimenté par le réseau

Ce genre de laboratoire est construit à proximité d'un poste HT et utilise le réseau pour fournir directement la puissance de court-circuit (Fig.4.6). Les investissements financiers sont plutôt faibles, le fonctionnement relativement facile de la station et les coûts de maintenance modestes sont les principaux avantages, mais ces essais ne sont pas pratiques car ils dépendent de la puissance disponible au moment des essais, il est difficile de créer les conditions décrites par les normes, comme ils peuvent causer l'instabilité du réseau.

La plus grande station alimentée par le réseau au monde est exploitée par l'IREQ à VARENNES au CANADA. Electricité de FRANCE (EDF) possède une grande station d'essai « Les Renardières » équipée de générateurs et peut également utiliser le réseau électrique pour l'alimentation.

4.7.2.2. Laboratoire haute-puissance à générateurs

Ce type de laboratoire offre la possibilité d'essais convenables sous les conditions simulées du système. Il est équipé de générateurs spécialement conçus qui fournissent la puissance de court-circuit. Fig. 4.7 représente le diagramme unifilaire d'une station d'essai HP, composée d'un interrupteur de la source SW, d'un transformateur T, d'un disjoncteur principal MB, d'un interrupteur de commutation MS, d'une bobine L limitant le courant, des éléments d'ajustage de la TTR (R_0 , C_0) et du disjoncteur sous l'essai TB.

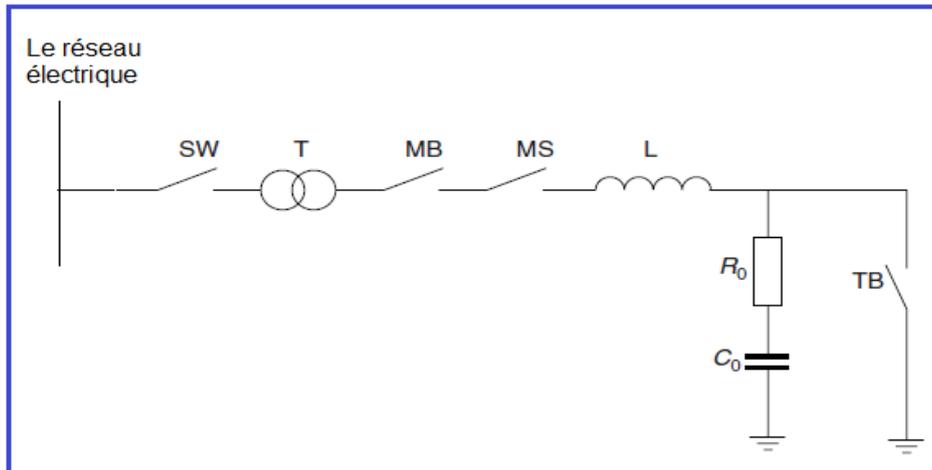


Figure 4.6. Diagramme unifilaire d'une station d'essai alimentée par le réseau électrique [2]

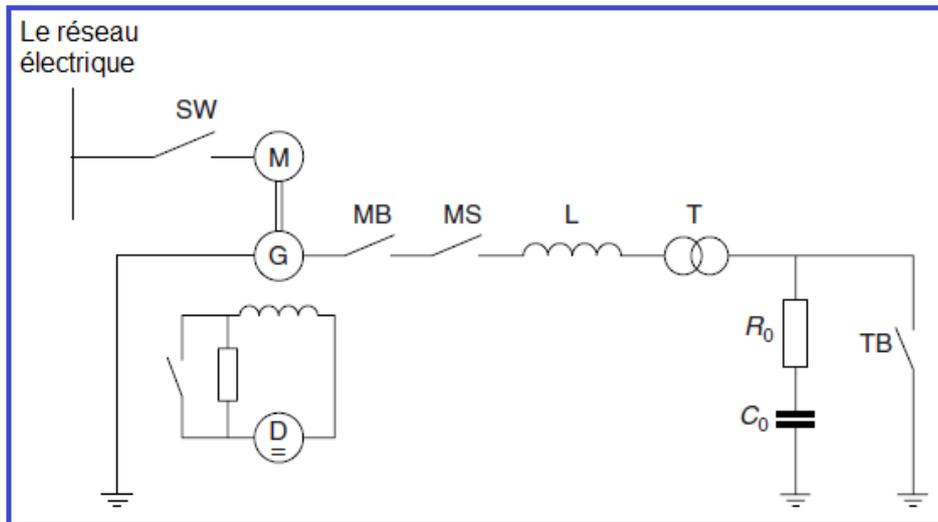


Figure 4.7. Diagramme unifilaire d'une station d'essai HP utilisant des générateurs [2].

Un moteur est utilisé pour faire tourner le générateur à sa vitesse synchrone avant le déroulement de l'essai. Directement derrière le générateur, le disjoncteur principal (MB) est placé afin de couper le courant court-circuit, fourni par le générateur, en cas de défaillance du disjoncteur sous l'essai. L'interrupteur MS assure le passage du courant de court-circuit lorsqu'il est fermé.

Comme la tension aux bornes du générateur est relativement faible (entre 10 et 15 kV), des transformateurs (T) spécialement conçus sont nécessaires pour transformer la tension à un niveau plus élevé. Le plus grand laboratoire HP utilisant des générateurs et aussi le plus grand laboratoire HP d'essais dans le monde est KEMA aux PAYS-BAS. La puissance de court-circuit totale disponible est 8400 MVA. Autres grandes stations d'essais à générateurs sont situées en République Populaire de CHINE, en INDE, en REPUBLIQUE TCHEQUE et en ITALIE [2].

4.8. Types d'essais dans un laboratoire à haute puissance

Le circuit d'essai est conçu de façon à établir le plus possible l'interaction arc-circuit telle qu'elle se produit dans le réseau réel. On distingue deux types d'essais ; les essais directs et les essais synthétiques.

4.8.1. Essais directs

Un essai direct implique un circuit d'essai alimenté par une source d'alimentation unique, ayant une puissance de court-circuit (en MVA) au moins égale à la pleine demande de l'essai, le courant à interrompre et la tension de rétablissement sont fournies par cette même source d'alimentation. Ces essais peuvent être effectués sur les trois phases. La source d'alimentation peut être un générateur spécialement conçu ou le réseau.

4.8.2. Essais synthétiques

L'augmentation du pouvoir de coupure des disjoncteurs a été étroitement liée à l'augmentation de la puissance de court-circuit disponible dans les stations d'essai. Par exemple pour un essai de court-circuit avec un disjoncteur 420kV/63kA/50Hz, la puissance de court-circuit nécessaire est :

$$\sqrt{3} \times 420 \times 63 = 45830 \text{ MVA.}$$

Cette valeur dépasse la puissance de court-circuit dans les essais directs. La méthode d'essai synthétique a été élaborée pour surmonter le problème d'insuffisance de puissance dans les essais directs [2, 28].

Les méthodes d'essais synthétiques sont basées sur le fait que pendant le processus de coupure, le disjoncteur fait face à un courant élevé et à une tension élevée à des périodes différentes. Cela donne la possibilité d'utiliser deux sources d'énergie distinctes : une source qui fournit le courant de court-circuit pendant la période d'arc et une autre source qui fournit la tension transitoire de rétablissement et la tension de rétablissement à la fréquence du réseau.

4.8.3. Essai de coupure d'un courant de court-circuit dans un circuit d'essai direct

On suppose que l'essai se déroule dans la station d'essai HP, utilisant les générateurs de court-circuit (Fig.4.7) et formée par un moteur M, un générateur de court-circuit triphasé G, l'excitatrice D, le transformateur de court-circuit T et la bobine L limitant le courant. TB est le disjoncteur HT sous l'essai, il est dans la position fermé. L'interrupteur principal MB est fermé mais l'interrupteur de commutation MS est ouvert. Quand le générateur tourne à la vitesse synchrone et le rotor est excité à

une tension donnant la tension assignée nécessaire au côté HT du transformateur T, MS se ferme et le courant de court-circuit circule à travers TB.

Fig. 4.8 représente le schéma simplifié du circuit d'essai direct, où u_s est la tension d'alimentation à la fréquence du système (la tension côté HT du transformateur T), L_s est l'inductance côté source, $L_s\omega$ représente la réactance synchrone du générateur et la réactance de fuite du transformateur T, $R_1, C_1, C_d, R_{22}, L_{22}$ et C_{22} sont les éléments d'ajustage de la TTR.

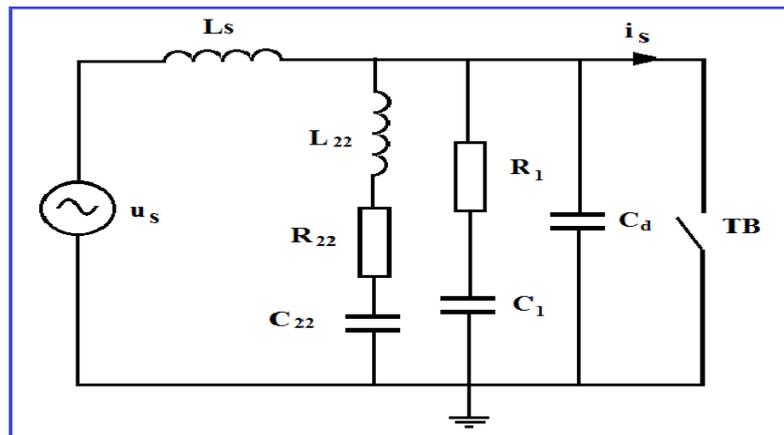


Figure 4.8. Circuit d'essai direct d'une phase [2]

Lorsque le mécanisme de TB reçoit une commande d'ouverture, les contacts du disjoncteur se séparent et TB interrompt le courant au moment désiré. Après une interruption du courant de court-circuit, TB fait face à la tension transitoire de rétablissement, provenant de l'oscillation des éléments d'ajustage de la TTR ; $R_1, C_1, C_d, R_{22}, L_{22}$ et C_{22} , ensemble avec l'inductance L_s . Lorsque la tension transitoire est amortie, le disjoncteur TB sous l'essai fait face à la tension de rétablissement à la fréquence du système. Fig.4.9 montre les courbes de la tension et du courant pour une phase.

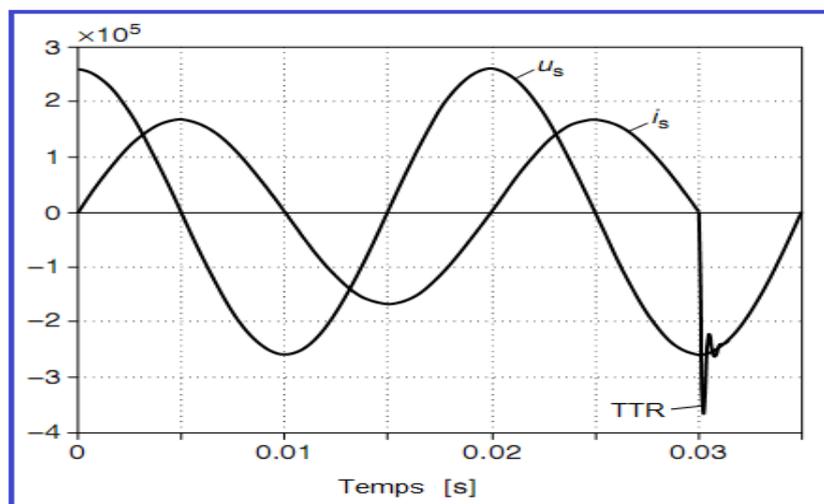


Figure 4.9. Courbes de courant et tension d'une phase durant une interruption du courant de court-circuit [2].

4.8.4. Essai de fermeture sur court-circuit dans un circuit d'essai direct

Dans le cas d'essai de fermeture, le disjoncteur doit fermer sur un court-circuit. Avant l'essai de fermeture, TB est dans la position ouvert et il se ferme après la fermeture de l'interrupteur MS. TB est soumis à la tension u_s et quand les contacts de TB se ferment, le courant de court-circuit s'écoule à travers le circuit d'essai. Fig. 4.10 représente les courbes du courant et de la tension d'une phase, durant un essai de fermeture sur court-circuit. La composante continue du courant est déterminée à l'instant de fermeture du disjoncteur TB sous l'essai.

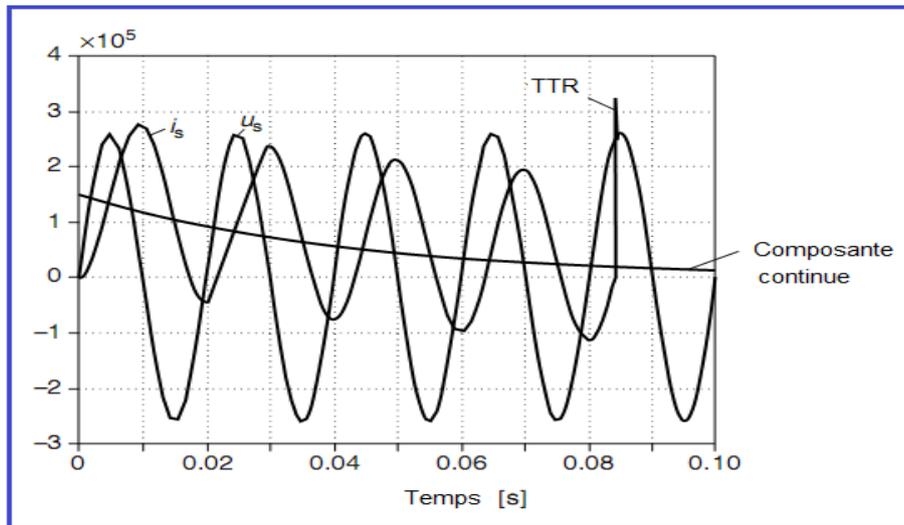


Figure 4.10. Courbes de courant et tension d'une phase d'un essai de fermeture sur court-circuit [2].

Le circuit d'alimentation est principalement inductif et cela implique que si TB se ferme lorsque la tension d'alimentation est à son maximum, la composante continue est nulle et le courant appelé est symétrique, et quand TB se ferme à la tension zéro, le courant est asymétrique. En raison des pertes ohmiques dans le circuit d'essai, la composante continue s'atténue avec une certaine constante de temps. La constante de temps du circuit d'essai peut être réglée en insérant une résistance supplémentaire. On mesure la valeur du courant dynamique [2].

4.8.5. Lignes électriques artificielles utilisées dans un circuit d'essai

Dans un laboratoire HP, il n'est pas très pratique d'utiliser une véritable ligne de transmission aérienne pour les essais de défaut proche en ligne et pour cette raison la forme en dents de scie de l'onde de la TTR côté ligne est reproduite à l'aide d'une ligne artificielle.

Une ligne artificielle est un ensemble d'éléments groupés, pour générer la TTR côté ligne comme spécifiée par les normes CEI et ANSI. Plusieurs types de lignes artificielles ont été conçus en se basant sur des connexions en série d'éléments LC parallèles, du modèle équivalent en pi ou du

modèle équivalent en T. L'inconvénient de ces lignes est qu'en théorie, le nombre de sections doit être infini pour obtenir une forme d'onde de forme triangulaire idéale. Une ligne construite avec un nombre limité de sections a toujours un retard de temps [27].

Actuellement, la ligne artificielle de KEMA (Fig.4.11) [27] est utilisée dans les laboratoires HP du monde entier dans les circuits d'essai directs et synthétiques pour les essais des disjoncteurs HT, dans les conditions de défaut proche en ligne. Fig.4.12 montre la TTR de forme triangulaire générée par la ligne artificielle de KEMA, après l'essai de coupure d'un défaut proche en ligne L90 par un disjoncteur SF₆ 145kV/31,5kA/60Hz. Le courant interrompu est de 28,35 kA et le taux d'accroissement du premier pic de la TTR est 6 kV/μs.

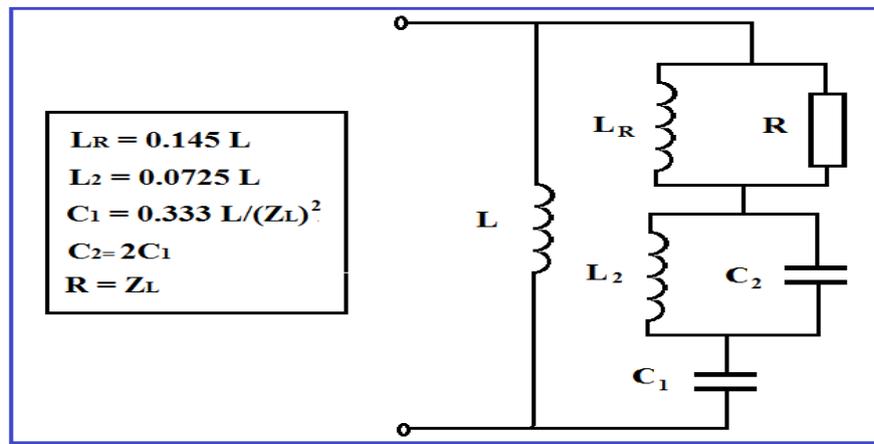


Figure 4.11. Circuit de la ligne artificielle de KEMA [27].

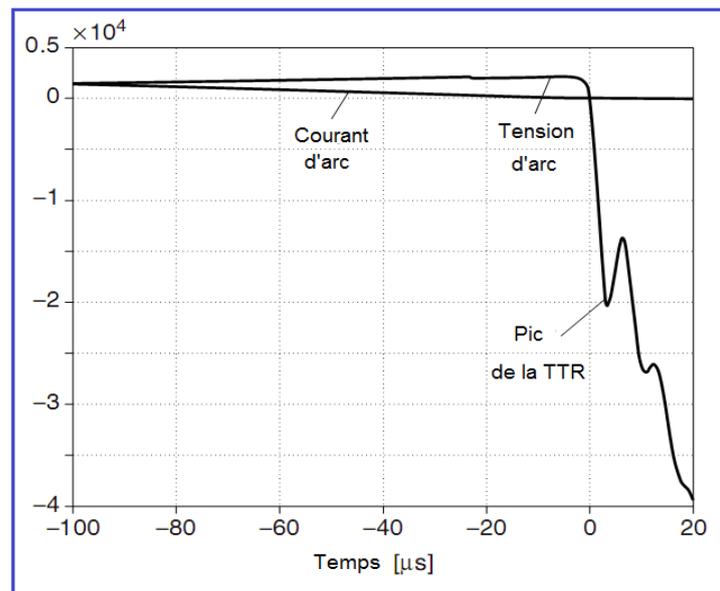


Figure 4.12. TTR durant la coupure d'un défaut proche en ligne L90 par un disjoncteur SF₆ 145kV/31,5kA/60Hz [2].

4.9. Conclusion

Les essais d'établissement et de coupure du défaut aux bornes et les essais de coupure du défaut proche en ligne sont réglementés par les normes. Les essais d'établissement et de coupure du défaut aux bornes sont obligatoires pour tous les disjoncteurs HT, tandis que les essais de coupure du défaut proche en ligne est requis uniquement pour les disjoncteurs reliés directement à une ligne aérienne.

Pour le défaut aux bornes, les TTR normalisées s'appliquent à l'interruption des courants de court-circuit triphasés à la terre. Elles sont définies par des enveloppes à deux paramètres et à quatre paramètres. Afin de démontrer la capacité du disjoncteur à interrompre ces défauts, les normes spécifient des séquences d'essais qui représentent les différentes situations dans le système de puissance. L'aptitude du disjoncteur à fermer sur court-circuit doit être aussi vérifiée.

Le défaut proche en ligne, qui est le plus souvent un défaut phase-terre, constitue l'un des essais les plus difficiles pour les disjoncteurs HT. En effet, ce type de défaut génère, après l'interruption du courant, des phénomènes complexes de réflexion et de propagation d'ondes dans la ligne de transmission.

L'instant de fermeture dépend de l'onde de la tension. Si les contacts se ferment à la crête de la tension, le courant est symétrique et la valeur de la composante continue est nulle. Par contre si les contacts se ferment au zéro de l'onde de la tension, le courant est asymétrique, la valeur de la composante continue n'est pas nulle, par conséquent les deux contraintes mécanique et thermique peuvent être très sévères.

Chapitre 05

UN NOUVEAU MODELE D'ARC TYPE-MAYR POUR L'ETUDE DE L'INTERACTION ARC-CIRCUIT

5.1. Introduction

Dans certains cas spéciaux, tels que le cas du défaut proche en ligne, l'aptitude du disjoncteur à interrompre le courant doit être confirmée à travers des essais dans un laboratoire HP qui sont très coûteux à cause de la taille de l'équipement et de la grande puissance nécessaire. Les modèles d'arc à boîte noire sont obtenus en se basant sur ces essais [1, 29]. Ils sont exprimés par une relation qui lie la conductance de l'arc et des paramètres mesurables tels que le courant et la tension d'arc [2].

Les premiers modèles d'arc à boîte noire sont les modèles de CASSIE et de MAYR [30, 31,32]. Ces modèles ne simulent pas correctement la conductance non linéaire de l'arc, par conséquent plusieurs modèles d'arc améliorés ont apparu. Les plus connus sont les modèles de SCHWARZ [33], de MAYR modifié [25, 34], de HABEDANK [35], de KEMA [36], de SCHAVEMAKER [37] et de TP KEMA [38]. Initialement, ces modèles étaient proposés pour représenter le comportement de l'arc électrique dans les disjoncteurs HT, mais actuellement, ils sont aussi utilisés pour le représenter dans les disjoncteurs moyenne-tension [3] et dans les disjoncteurs à courant continu [4].

Les modèles d'arc à boîte noire sont convenables pour étudier l'interaction de l'arc avec le réseau et ont plusieurs autres applications comme le calcul de la probabilité de l'échec de la coupure, le calcul de la qualité de l'interruption et le calcul de la longueur critique de la ligne [39,40, 41]. L'introduction du « *Digital Testing* » des disjoncteurs HT, en utilisant les modèles d'arc offre de nouvelles possibilités comme le développement de nouvelles normes [42]. Toutes ces applications nécessitent un modèle d'arc dont la prédiction correspond étroitement aux mesures enregistrées durant les essais.

Dans ce chapitre, un nouveau modèle d'arc type-MAYR est présenté pour modéliser la conductance non linéaire de l'arc dans un disjoncteur HT, puis il est comparé avec les modèles d'arc cités ci-dessus pour montrer sa performance.

5.2. Modèles d'arc à boîte noire

La modélisation de l'arc électrique est l'un des principaux axes de recherche pour les disjoncteurs HT. Les modèles d'arc peuvent être classés dans deux catégories principales : les modèles physiques et les modèles à boîte noire. Les modèles physiques sont basés sur la mécanique des fluides et obéissent aux lois de la thermodynamique en combinaison avec les équations de MAXWELL. Ils sont utilisés pour la conception d'un nouveau prototype de disjoncteur [2].

Les modèles d'arc à boîte noire sont utilisés pour étudier l'interaction entre l'arc dans le disjoncteur et le réseau que ce disjoncteur protège. Bien que basés sur des considérations physiques, ils sont des modèles mathématiques, car le comportement de l'arc est plus important que les processus physiques. Ils sont exprimés par une résistance ou une conductance variable avec le temps, qui est en fonction du courant et de la tension d'arc et de plusieurs paramètres [2, 43].

5.2.1. Modèles d'arc de base

Un grand pas dans la compréhension de l'interaction arc-circuit a été fait par A.M. CASSIE et O. MAYR qui ont proposé leurs modèles d'arc à boîte noire respectivement en 1939 et 1943.

5.2.1.1. Modèle de CASSIE

CASSIE supposa que le plasma d'arc est un cylindre de rayon variable et de température constante et les pertes d'énergie sont dues à la convection et sont proportionnelles à la section de l'arc [44]. Le modèle de CASSIE est décrit par l'équation suivante :

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{u^2}{U_0^2} - 1 \right) \quad (5-1)$$

Où

u : Tension d'arc, en volts

g : Conductance d'arc, en siemens.

τ : Constante de temps d'arc, en secondes

U_0 : Tension statique d'arc, en volts.

Les paramètres du modèle de CASSIE à déterminer sont τ et U_0 .

Pour les grandes valeurs du courant d'arc, la tension d'arc reste presque constante et égale à U_0 (Fig. 5.1), elle a une forme hyperbolique aux faibles courants d'arc. Ce modèle s'applique aux régions d'arc où le courant est de forte intensité.

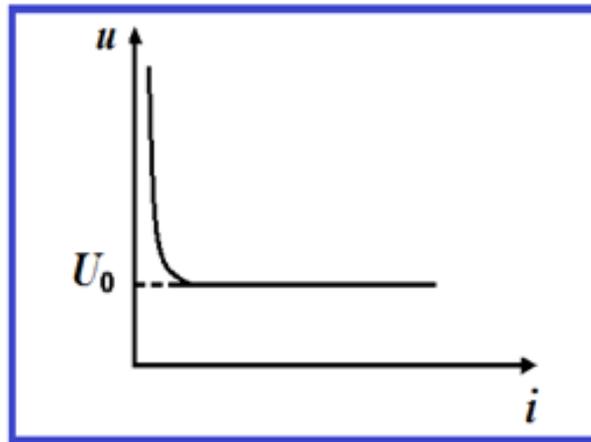


Figure 5.1. Caractéristique statique d'un arc de forte puissance [44].

5.2.1.2. Modèle de MAYR

MAYR supposa que l'arc est comparable à un cylindre de rayon constant et de température variable et l'évacuation d'énergie est due à la conduction thermique. Ce modèle est fondé sur quelques hypothèses [44]. Il est décrit par l'équation suivante :

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{ui}{P_0} - 1 \right) \quad (5-2)$$

Où i est le courant d'arc en ampères et P_0 la puissance de refroidissement constante, en watts.

Le modèle de MAYR est convenable pour modéliser l'arc au voisinage du zéro du courant. τ et P_0 sont ses paramètres indépendants à déterminer.

Un grand nombre de modifications des modèles de CASSIE et de MAYR ont été formulées. Les modèles d'arc améliorés sont des modèles mathématiques, validés à travers des mesures enregistrées durant les essais. Le but est de donner une description la plus correcte possible du comportement non linéaire de la conductance de l'arc électrique. On distingue les modèles d'arc type-MAYR et les modèles d'arc en série.

5.2.2. Modèles d'arc type-MAYR

Les modèles d'arc type-MAYR sont décrits par une équation de la forme :

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{ui}{P} - 1 \right) \quad (5-3)$$

Où, la constante de temps d'arc τ et la puissance de refroidissement P peuvent être constantes ou dépendantes d'autres paramètres.

Les modèles d'arc type-MAYR sont une combinaison du modèle de CASSIE décrit par (5-1) et du modèle de MAYR décrit par (5- 2). Dans un modèle d'arc type-MAYR, l'équation (5-3) se réduit au modèle de CASSIE dans le domaine où l'intensité du courant d'arc est élevée, et se réduit au modèle de MAYR dans le domaine où l'intensité du courant d'arc est faible [37]. Les modèles d'arc type MAYR les plus connus sont les modèles de SCHWARZ, de MAYR modifié et de SCHAVEMAKER.

5.2.2.1. Modèle de SCHWARZ

Pour le modèle de SCHWARZ, la constante de temps τ et la puissance de refroidissement P dépendent de la conductance d'arc [33] :

$$\tau = \tau_0 g^\alpha; \quad P = P_0 g^\beta$$

L'équation du modèle est:

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau_0 g^\alpha} \left(\frac{ui}{P_0 g^\beta} - 1 \right) \quad (5-4)$$

Où :

τ_0 : Constante de temps d'arc, en secondes.

P_0 : Puissance de refroidissement constante, en watts.

α : Paramètre qui agit sur la constante de temps d'arc, qui est en fonction de g

β : le paramètre qui agit sur la puissance de refroidissement, qui est en fonction de g .

Les paramètres indépendants de ce modèle d'arc sont τ_0 , P_0 , α et β .

5.2.2.2. Modèle de MAYR modifié

Ce modèle a le paramètre τ constant et la puissance de refroidissement P est en fonction du courant d'arc [25, 34] :

$$P = P_0 + C_i |i|$$

L'équation de ce modèle est:

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{ui}{p(P_0 + C_i |i|)} - 1 \right) \quad (5-5)$$

Avec

p : Pression de remplissage du disjoncteur, en bar.

P_0 : Puissance de refroidissement constante, en W/bar.

C_i : Pourcentage constant de la caractéristique $u - i$ de l'état statique (Fig. 5.1), en V/bar.

Les paramètres indépendants de ce modèle d'arc sont τ , P_0 et C_i .

5.2.2.3. Modèle de SCHAVEMAKER

Dans le modèle d'arc de SCHAVEMAKER, le paramètre τ est constant mais la puissance de refroidissement P est en fonction de la puissance électrique de l'arc (ui) [37] :

$$P = P_0 + P_1 ui$$

L'équation du modèle d'arc est :

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{ui}{(P_0 + P_1 ui)} - 1 \right) \quad (5-6)$$

Avec

P_0 Puissance de refroidissement constante, liée à la conception du disjoncteur, en watts.

P_1 Constante de la puissance de refroidissement qui régule l'influence de la puissance électrique d'entrée sur la puissance de refroidissement P .

Les paramètres indépendants de ce modèle sont τ , P_0 et P_1

Dans l'intervalle où le courant d'arc est de faible intensité, le modèle d'arc décrit par l'équation (5-6) reproduit bien le courant et la tension d'arc mesurés, mais dans l'intervalle où le courant d'arc est de forte intensité, les tensions d'arc simulées sont plus faibles que les tensions d'arc mesurées. Pour améliorer la forme de la tension d'arc simulée, le modèle ci-dessus a été modifié comme suit :

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{ui}{\max(U_{arc}|i|, P_0 + P_1 ui)} - 1 \right) \quad (5-7)$$

U_{arc} Tension d'arc constante dans l'intervalle où le courant d'arc est de forte intensité (Fig. 5.1).

Le modèle d'arc de SCHAVEMAKER corrigé a quatre paramètres; τ , P_0 et P_1 et U_{arc} . le paramètre U_{arc} est choisi de la courbe de la tension d'arc mesurée, il permet d'avoir une tension d'arc constante dans le domaine des courants d'arc d'intensités élevées.

5.2.3. Modèles d'arc en série

Pour ces modèles, l'arc est divisé en plusieurs parties en série et chaque partie est décrite par un sous-modèle type-MAYR. Les modèles en série les plus utilisés sont le modèle de HABEDANK, de KEMA et de TP KEMA.

5.2.3.1. Modèle de HABEDANK

Ce modèle est formé par deux sous-modèles en série, l'un est décrit par l'équation de CASSIE et l'autre est décrit par l'équation de MAYR [35] :

$$\frac{1}{g_c} \frac{dg_c}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \left(\frac{u_c^2}{U_0^2} - 1 \right) \quad (5-8)$$

$$\frac{1}{g_m} \frac{dg_m}{dt} = \frac{1}{\tau_m} \left(\frac{u_m i}{P_0} - 1 \right) \quad (5-9)$$

La tension d'arc est la somme des tensions d'arc des deux sous-modèles :

$$u = u_1 + u_2 \quad (5-10)$$

La conductance d'arc est telle que :

$$\frac{1}{g} = \frac{1}{g_m} + \frac{1}{g_c} \quad (5-11)$$

Le courant d'arc est commun aux deux sous modèles :

$$i = gu = u_1 g_c = u_2 g_m \quad (5-12)$$

Avec

g : Conductance totale de l'arc

u : Tension totale de l'arc

U_0 : Tension constante de la caractéristique u-i de l'état statique (Fig.5.1).

g_c : Conductance de l'arc décrite par l'équation de CASSIE

τ_c : Constante de temps dans l'équation de CASSIE

P_0 : Puissance de refroidissement constante dans l'équation de MAYR

g_m : Conductance de l'arc décrite par l'équation de MAYR

τ_m : Constante de temps dans l'équation de MAYR

Ce modèle a quatre paramètres indépendants à déterminer τ_c , τ_m , U_0 et P_0

5.2.3.2. Modèle d'arc de KEMA

Le modèle de KEMA [36] est formé par trois sous-modèles connectés en série, chacun est décrit par une équation différentielle du premier ordre (Fig. 5.2). Les processus lents de l'arc sont décrits par

un modèle hybride CASSIE-MAYR, les processus intermédiaires sont représentés par un modèle presque MAYR, alors que les processus rapides sont représentés par un modèle de MAYR pur.

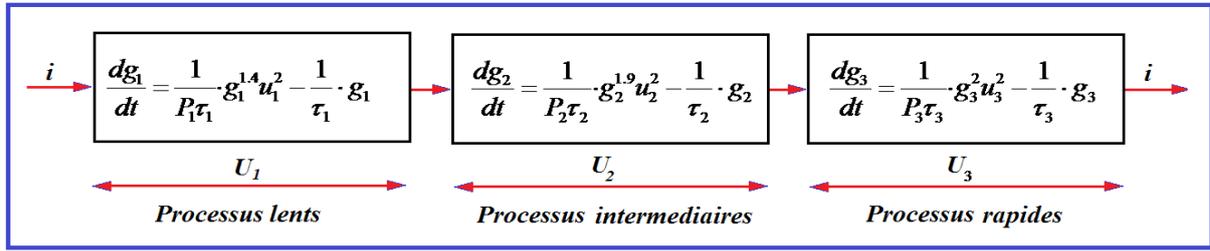


Figure 5.2. Modèle d'arc de KEMA

$$\frac{dg_1}{dt} = \frac{1}{P_1 \tau_1} \left(u_1^{1.4} g_1^{1.4} - \frac{1}{\tau_1} \cdot g_1 \right) \quad (5-13)$$

$$\frac{dg_2}{dt} = \frac{1}{P_2 \tau_2} \left(u_2^{1.9} g_2^{1.9} - g_2 \right) \quad (5-14)$$

$$\frac{dg_3}{dt} = \frac{1}{P_3 \tau_3} \left(u_3^2 g_3^2 - g_3 \right) \quad (5-15)$$

La tension d'arc est la somme des tensions des trois sous modèles :

$$u = u_1 + u_2 + u_3 \quad (5-16)$$

La conductance totale g de l'arc est telle que:

$$\frac{1}{g} = \frac{1}{g_1} + \frac{1}{g_2} + \frac{1}{g_3} \quad (5-17)$$

Le courant d'arc est commun aux trois sous-modèles :

$$i = gu = u_1 g_1 = u_2 g_2 = u_3 g_3 \quad (5-18)$$

Où g_j, P_j, τ_j et u_j sont respectivement la conductance, la puissance de refroidissement, la constante de temps et la tension de la $j^{\text{ième}}$ portion d'arc.

Pour un disjoncteur donné, les paramètres sont liés par les relations suivantes:

$$\tau_2 = \frac{\tau_1}{k_1}; \quad \tau_3 = \frac{\tau_2}{k_2}; \quad P_3 = \frac{P_2}{k_3} \quad (5-19)$$

Les paramètres k_1 , k_2 et k_3 sont constants et propres à chaque disjoncteur.

Les paramètres indépendants du modèle KEMA sont τ_1 , P_1 et P_2 .

5.2.3.3. Modèle d'arc de TP KEMA

Le modèle de TP KEMA est une forme simplifiée du modèle de KEMA. Il est constitué de trois sous-modèles en série [38].

$$\frac{dg_1}{dt} = \frac{u_1^2 g_1^{1.4}}{10^6 TP} - \frac{g_1}{25T} \quad (5-20)$$

$$\frac{dg_2}{dt} = \frac{u_2^2 g_2^{1.9}}{10^3 TP} - \frac{g_2}{5T} \quad (5-21)$$

$$\frac{dg_3}{dt} = \frac{u_3^2 g_3^2}{TP} - \frac{g_3}{T} \quad (5-22)$$

Ce modèle a deux paramètres à déterminer ; la constante de temps T et la puissance de refroidissement constante P .

5.3. Modèle d'arc proposé

Le modèle d'arc proposé est basé sur le modèle d'arc de SCHAVEMAKER décrit par l'équation (5-6), qui a l'avantage de bien reproduire la courbe de la tension d'arc mesurée dans le domaine où le courant d'arc est de faible intensité, mais dans le domaine où le courant d'arc est de forte intensité, la tension d'arc simulée est inférieure à celle mesurée (Fig.5.3). Cela est dû au fait que ce modèle d'arc ne respecte pas le concept des modèles d'arc type-MAYR décrit ci-dessus ; car quand l'intensité du courant d'arc est élevée, l'équation (5-6) est réduite à l'équation (5-23).

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{1}{P_1} - 1 \right) \quad (5-23)$$

Cette équation n'est pas conforme au modèle d'arc de CASSIE décrit par (5-1). Pour éliminer cet inconvénient le modèle d'arc suivant est proposé [45]:

$$\frac{d \ln(g)}{dt} = \frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{ui}{P_0 + C_u |u|^a} - 1 \right) \quad (5-24)$$

Où :

τ Constante de temps de l'arc, en secondes.

P_0 Puissance de refroidissement constante, en watts.

C_u Paramètre proportionnel à la tension d'arc.

a Paramètre légèrement inférieur à 1 qui permet d'ajuster la tension d'arc tout en maintenant sa forme dans le domaine où le courant d'arc est faible.

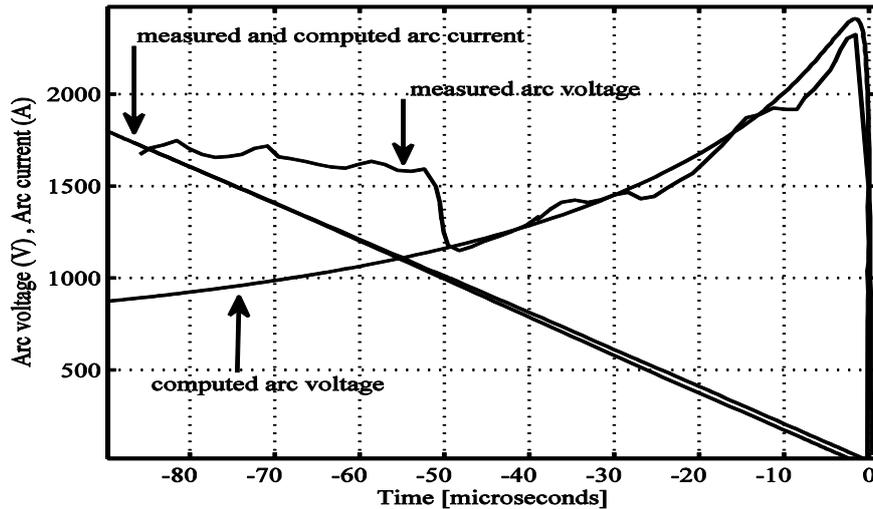


Figure 5.3. Tensions d'arc mesurée et simulée en utilisant le modèle de SCHAVEMAKER de l'équation (5-6) [37].

Les paramètres τ et P_0 dans l'équation (5-24) agissent tous les deux sur la valeur de la pointe d'extinction, par conséquent, il est possible de fixer le paramètre τ . Dans le cas du SF₆ $\tau = 0,25 \mu s$, il en résulte que le modèle d'arc proposé a seulement trois paramètres à déterminer P_0 , C_u et a .

Le modèle d'arc proposé est un modèle type-MAYR, car dans l'intervalle où l'intensité du courant d'arc est faible, l'équation (5-24) se réduit au modèle de MAYR décrit par l'équation (5-2) et dans l'intervalle où l'intensité du courant d'arc est forte, elle se réduit à l'équation :

$$\frac{d \ln(g)}{dt} = \frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{u}{C_u |u|^a} - 1 \right) \quad (5-25)$$

Cette équation est conforme au modèle de CASSIE décrit par l'équation (5-1).

5.4. Simulation numérique avec le modèle d'arc proposé

Le modèle d'arc proposé a été utilisé pour simuler l'interaction arc-circuit d'une interruption réussie obtenue durant l'essai de coupure d'un courant de défaut proche en ligne L90, effectué par un disjoncteur 245kV/50kA/50Hz (CB245), dans le laboratoire HP de KEMA aux PAYS BAS [39]. Pour faire cette simulation, le modèle d'arc proposé a d'abord été conçu dans MATLAB/Simulink power system blockset et ensuite inséré dans le circuit d'essai utilisé pour la simulation de la coupure du courant de défaut proche en ligne (Fig. 5.4). Le circuit est dimensionné en fonction du disjoncteur utilisé, il est formé d'un générateur de tension maximale $V_{smax} = 200,041 kV$ et de fréquence $f = 50 Hz$, d'une inductance $L_s = 9,009 mH$, des éléments d'ajustage de la TTR ($R_s = 100 \Omega$, $C_s = 60 nF$, $C_d = 1 nF$ et de la ligne artificielle ($L = 1,00 mH$, $R = 450 \Omega$, $C =$

3,95 nF).

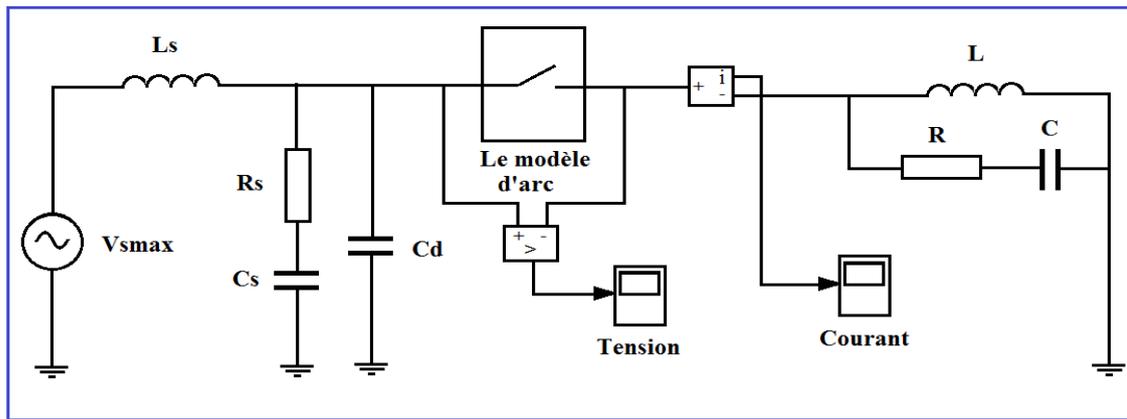


Figure 5.4. Circuit d'essai pour la simulation d'un défaut proche en ligne L90.

Les paramètres du modèle d'arc proposés nécessaires à la simulation ont été déterminés à partir des courbes du courant et de la tension d'arc enregistrées durant l'essai (Fig. 5.5). La technique de l'algorithme génétique de MATLAB [4, 46] a été utilisée pour minimiser l'erreur entre les courbes mesurées et les courbes simulées en utilisant l'équation (4-24). Ces paramètres sont :

$$P_0 = 15664; C_u = 1.194; a = 0.975$$

Les résultats de simulation sont présentés sur Fig. 5.6. De cette figure il est clair que le modèle d'arc proposé a bien reproduit les courbes de la tension et du courant d'arc mesurés. Cependant, il est essentiel de comparer le modèle d'arc proposé aux modèles existants afin d'en identifier les avantages. En quoi se distingue-t-il des autres ? Offre-t-il une meilleure précision ou une formulation plus simple ? Une analyse approfondie permettra de mettre en évidence ses atouts et son potentiel d'amélioration des simulations.

5.5. Comparaison du modèle d'arc proposé avec les modèles d'arc existants

Le modèle d'arc proposé a été comparé aux modèles existants de MAYR modifié, de HABEDANK, de SCHWARZ, de KEMA et de TP KEMA décrits ci-dessus, dans trois cas de mesures autour du courant zéro effectués dans le laboratoire HP de KEMA aux PAYS BAS [39]; dans le cas de mesures décrit dans la section §5.4 et dans les cas de mesures de deux autres interruptions réussies obtenues durant les essais de coupure du courant de défaut proche en ligne L90, effectués respectivement par le disjoncteur 145kV/31,5kA/60Hz (CB145) (Fig. 5.7) et par le disjoncteur 123kV/31,5kA/60Hz (CB123) (Fig. 5.8).

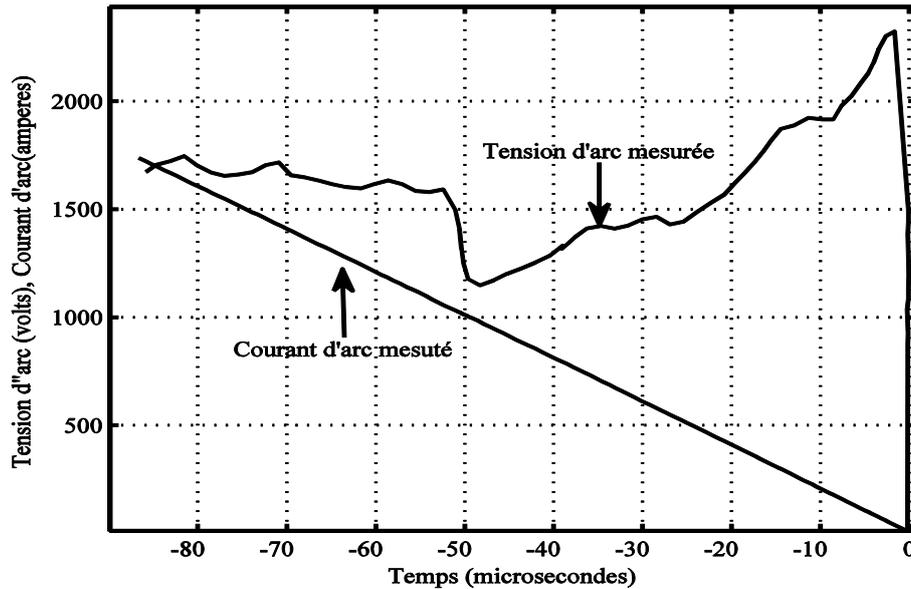


Figure 5.5. Courbes du courant et de la tension d'arc mesurés (CB245) [39].

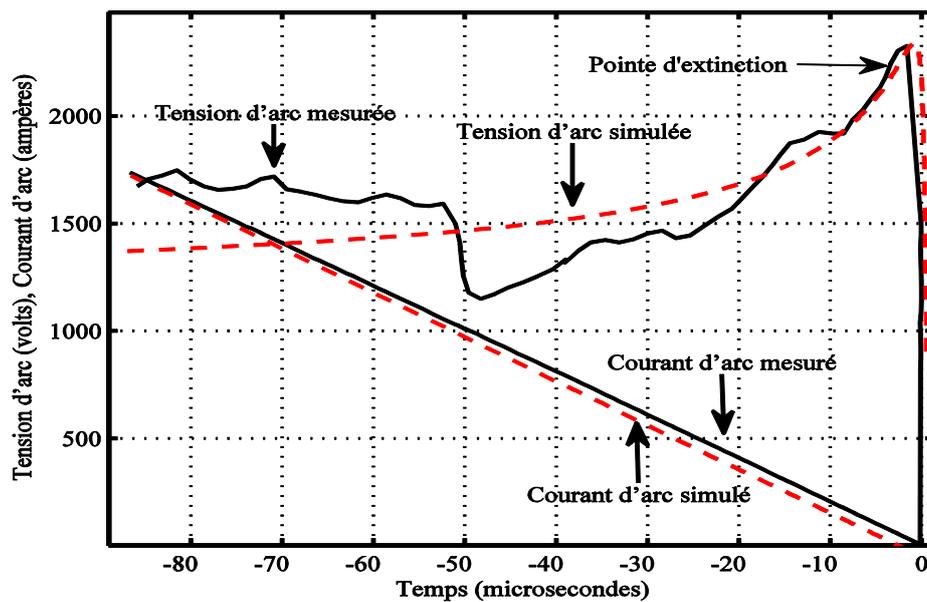


Figure 5.6. Tension et courant d'arc simulés à l'aide du modèle d'arc proposé (CB245).

Pour faire la simulation numérique, les modèles d'arc en question ont été conçus dans MATLAB/Simulink power system blockset et ensuite insérés à tour de rôle dans le circuit d'essai de Fig. 5.4. Les paramètres des modèles d'arc nécessaires à la simulation ont été déterminés à partir des courbes du courant et de la tension d'arc mesurés (Fig. 5.5, 5.7 et 5.8) enregistrés durant les essais.

Dans chaque cas de mesures autour du courant zéro et pour chaque modèle d'arc utilisé, un programme MATLAB a été rédigé et dans lequel l'algorithme génétique de MATLAB [4, 46] a été utilisé pour minimiser l'erreur entre les courbes de la tension et du courant d'arc mesurés et ceux simulés en utilisant le modèle d'arc. Les paramètres des modèles d'arc relatif au CB245 sont présentés dans [Tableau 5.1](#), tandis que les paramètres du modèle d'arc proposé et du modèle d'arc de KEMA, relatifs au CB145 et au CB123 sont présentés respectivement dans [Tableaux 5.2](#) et [5.3](#).

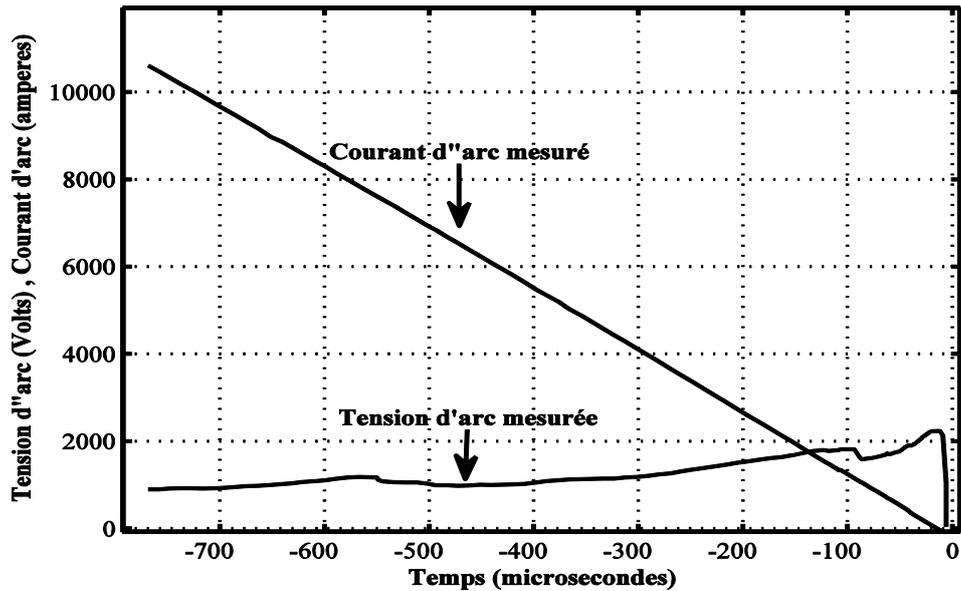


Figure 5.7. Courbes du courant et de la tension d'arc mesurés (CB145) [39]

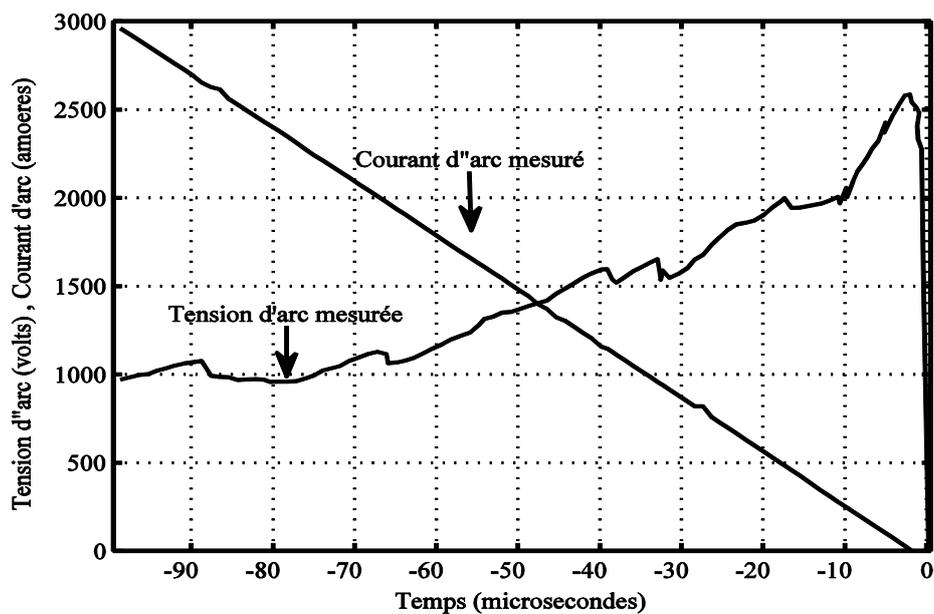


Figure 5.8. Courbes du courant et de la tension d'arc mesurés (CB123) [39]

Les résultats de simulation sont montrés sur Fig. 5.9 à 5.17. Le modèle d'arc proposé, décrit par l'équation (4-24) ainsi que les modèles d'arc existants ont reproduit avec précision le courant d'arc mesuré (Fig. 5.6 et 5.9). De plus, ces modèles ont correctement prédit l'issue de l'essai, aboutissant à une interruption réussie du courant. Dans ce qui suit, on va démontrer que l'avantage du modèle d'arc proposé par rapport aux modèles existants réside dans sa formulation simple et dans la bonne reproduction de la courbe de la tension d'arc mesurée.

Tableau 5.1. Paramètres des modèles d'arc existants (CB245).

Modèle d'arc	Paramètres			
TP KEMA	$T = 0,2\mu s$		$P = 1,81 W$	
KEMA	$\tau_1 = 1,82 \mu s$	$P_1 = 1,795 \times 10^6 W$	$P_2 = 6 \times 10^4 W$	
MAYR modifié	$\tau_1 = 0,24 \mu s$	$P_0 = 5122 W/bar$	$C_i = 230 V/bar$	p=6 bar
HABEDANK	$\tau_c = 0,27 \mu s$	$U_c = 1400 V$	$P_0 = 32 000 W$	$\tau_m = 0,25 \mu s$
SCHWARZ	$\tau_0 = 2,2 \mu s$	$P_0 = 1,57 \times 10^6 W$	$\alpha = 0,2$	$\beta = 0,4$

Tableau 5.2. Paramètres du modèle d'arc proposé et du modèle de KEMA (CB145).

Modèle d'arc	Paramètres		
KEMA	$\tau_1 = 2,5 \mu s$	$P_1 = 2,2 \times 10^6 W$	$P_2 = 4,9 \times 10^4 W$
Modèle proposé	$P_0 = 10100 W$	$C_u = 1,0135$	$a = 0,998$

Tableau 5.3. Paramètres du modèle d'arc proposé et du modèle de KEMA (CB123).

Modèle d'arc	Paramètres		
KEMA	$\tau_1 = 2,76 \mu s$	$P_1 = 2,3 \times 10^6 W$	$P_2 = 5,5 \times 10^4 W$
Modèle proposé	$P_0 = 12900 W$	$C_u = 1,002$	$a = 0,999$

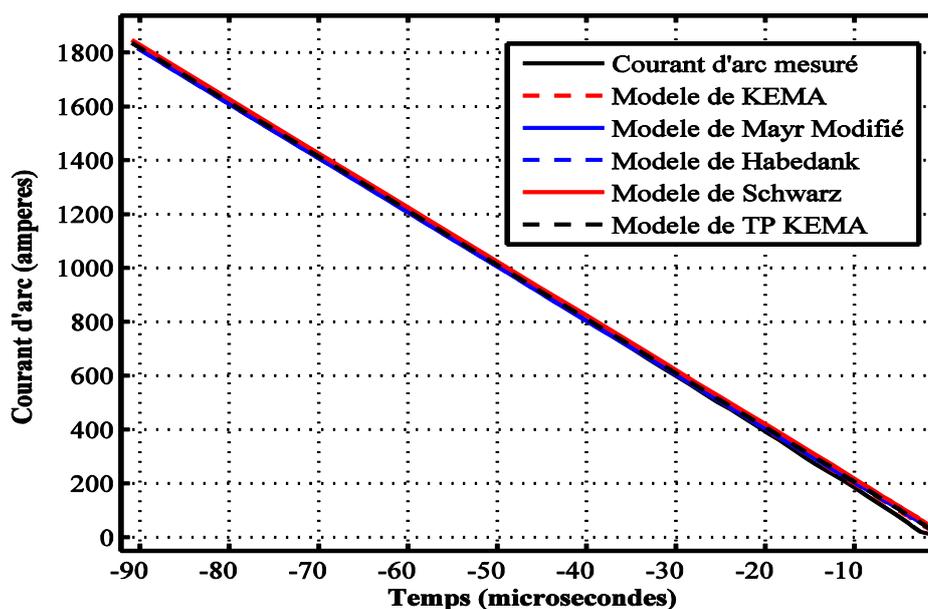


Figure 5.9. Courants d'arc simulés en utilisant les modèles d'arc existants.

Le modèle d'arc proposé, décrit par une seule équation et trois paramètres, est plus simple que les autres modèles d'arc. Il a moins de paramètres que les modèles de MAYR modifié et de SCHWARZ. Il est moins complexe que le modèle de HABEDANK décrit par deux équations et quatre paramètres, comme il est aussi plus simple que les modèles de KEMA et de TP KEMA décrits par trois équations. Le modèle de KEMA a en plus des paramètres d'arc (T_1 , P_1 et P_2), trois autres paramètres (k_1 , k_2 et k_3) qui dépendent de la conception du disjoncteur.

Le modèle d'arc proposé est plus précis que les modèles d'arc de MAYR modifié, de HABEDANK, de SCHWARZ et de TP KEMA, car les modèles d'arc de MAYR modifié et de HABEDANK n'ont pas bien reproduit la forme de la courbe de la tension d'arc mesurée dans le domaine des courants faibles (Fig. 5.10) alors que les modèles d'arc de SCHWARZ et de TP KEMA ont donné des pointes d'extinction très élevées (Fig. 5.11).

Les résultats donnés par le modèle de KEMA dépendent du disjoncteur utilisé dans l'essai. Pour le CB145, le nouveau modèle d'arc ainsi que le modèle d'arc de KEMA ont bien reproduit la courbe de la tension d'arc mesurée (Fig. 5.12), mais dans les cas du CB245 et du CB123, le nouveau modèle d'arc est plus précis que le modèle de KEMA (Fig. 5.13 et 5.14).

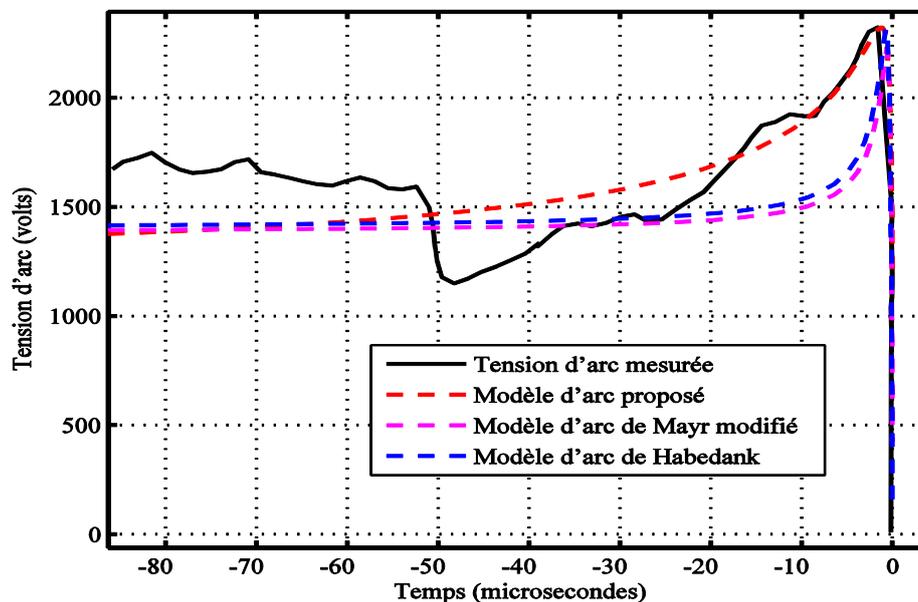


Figure 5.10. Tension d'arc simulée en utilisant les modèles d'arc de MAYR modifié, de HABEDANK et le modèle d'arc proposé (CB245).

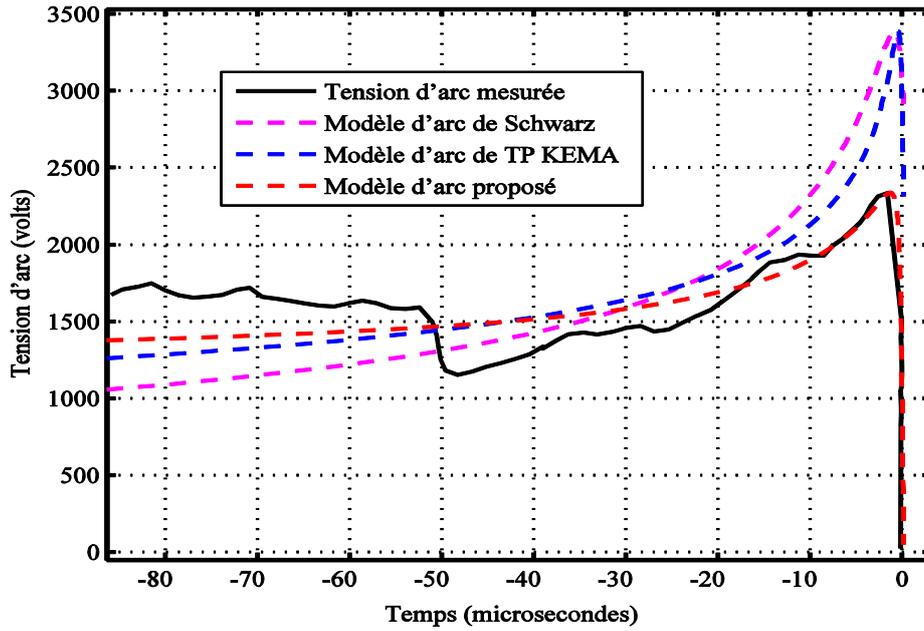


Figure 5.11. Tension d'arc simulée en utilisant les modèles d'arc de SCHWARZ, de TP KEMA et le modèle d'arc proposé (CB245).

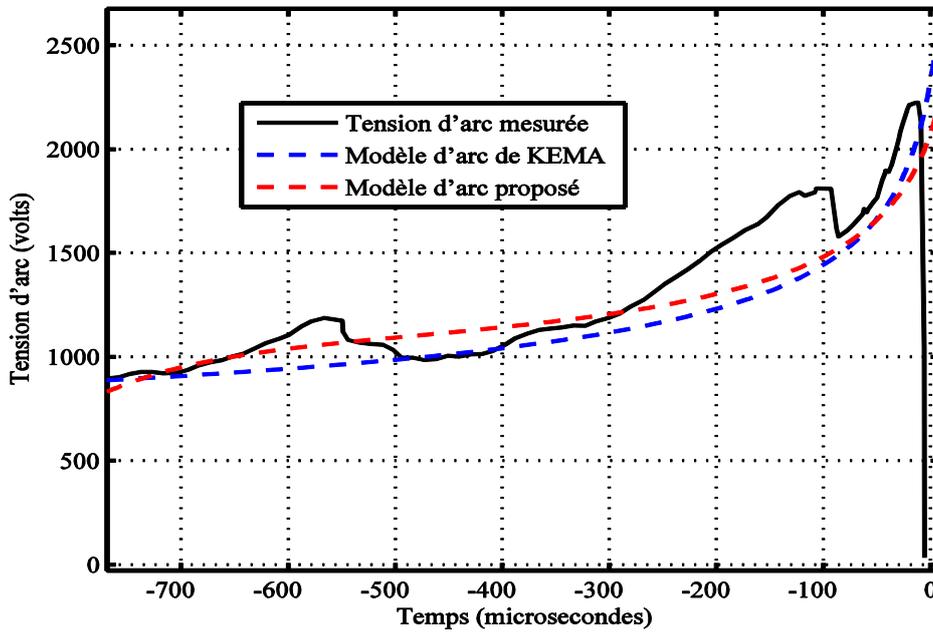


Figure 5.12. Comparaison entre le modèle d'arc proposé et le modèle de KEMA (CB145).

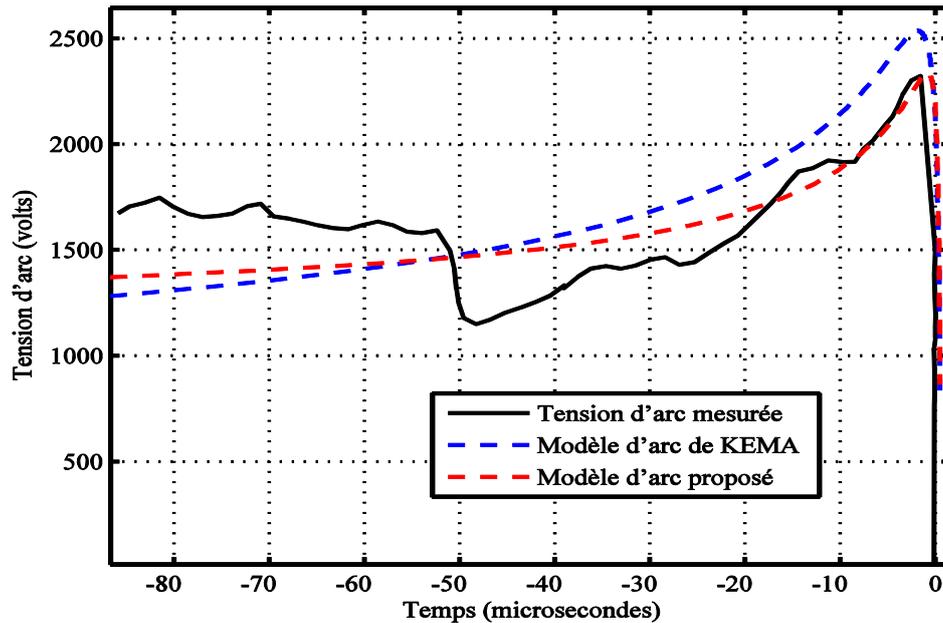


Figure 5.13. Comparaison entre le modèle d'arc proposé et le modèle de KEMA (CB 245).

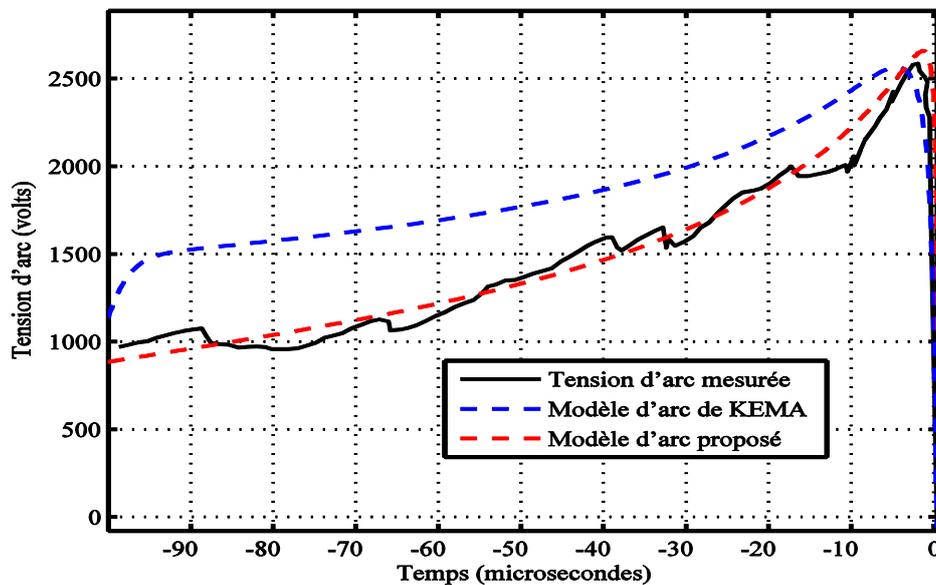


Figure 5.14. Comparaison entre le modèle d'arc proposé et le modèle de KEMA (CB 123).

De plus, les valeurs du courant post-arc données par le modèle d'arc de KEMA sont très grandes (Fig. 5.15, 5.16 et 5.17), alors que les valeurs du courant post-arc dans les essais étaient très faibles pour être enregistrés [39]. Plusieurs séries d'essais dans le laboratoire HP de KEMA ont confirmé que le courant post-arc dans un disjoncteur bien conçu doit être inférieur à quelques centaines de milliampères [47].

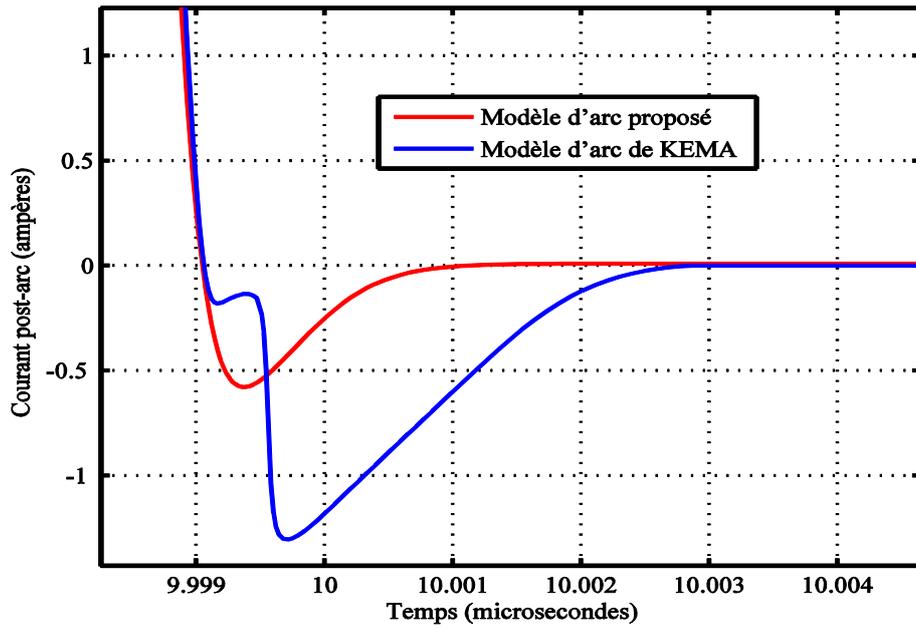


Figure 5.15. Courant post-arc simulé en utilisant le modèle d'arc proposé et le modèle de KEMA (CB245).

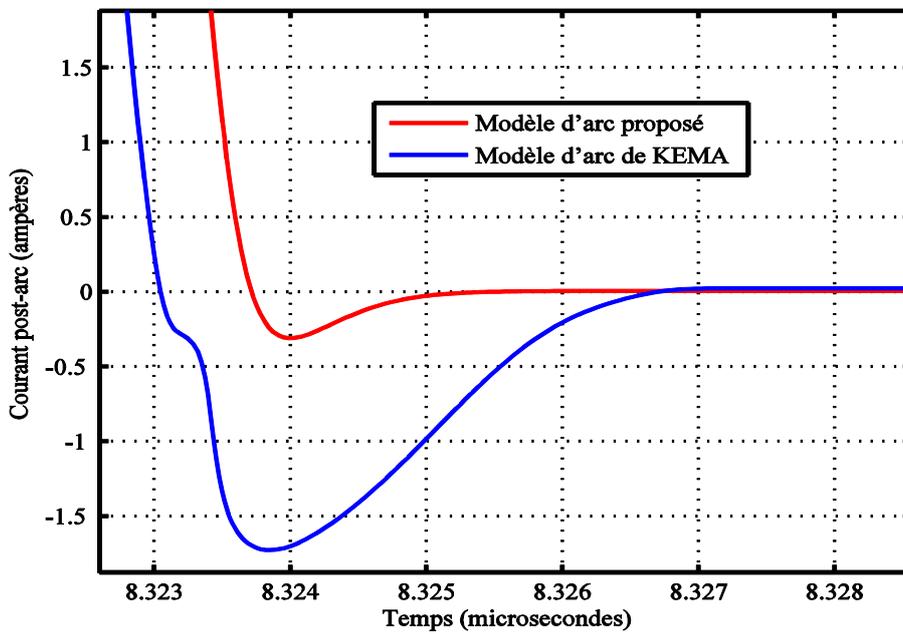


Figure 5.16. Courant post-arc simulé en utilisant le modèle d'arc proposé et le modèle d'arc de KEMA (CB145).

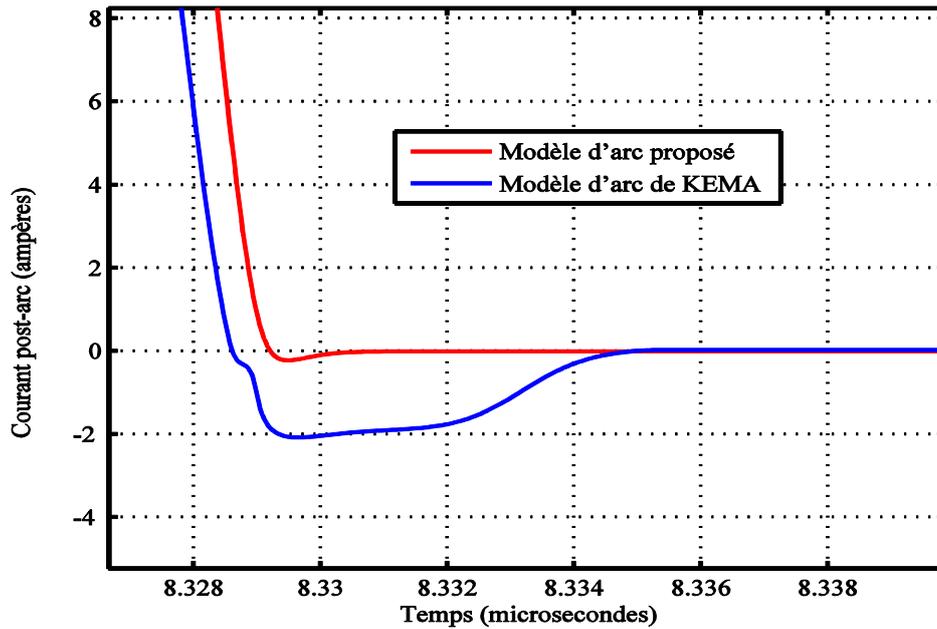


Figure 5.17. Courant post-arc simulé en utilisant le modèle d'arc proposé et le modèle d'arc de KEMA (CB123).

5.6. Conclusion

Dans ce travail, un nouveau modèle d'arc type-MAYR est proposé pour représenter la conductance d'arc non linéaire à l'intérieur du disjoncteur HT, durant le processus de coupure. Ce modèle d'arc reproduit bien les courbes de la tension et du courant d'arc mesurés durant les essais et peut être utilisé pour étudier l'interaction arc-circuit dans la période d'arc et dans la période post-arc. Avec seulement trois paramètres à déterminer, le modèle d'arc en question, est plus simple et plus précis que les modèles d'arc de MAYR modifié, de HABEDANK, de SCHWARZ, de KEMA et de TP KEMA.

Chapitre 06

ESTIMATION DES PARAMETRES DES MODELES D'ARC A BOITE NOIRE

6.1. Introduction

Pour analyser efficacement l'interaction arc-circuit lors du processus de coupure, il est non seulement important de sélectionner un modèle d'arc approprié, mais aussi de déterminer avec précision ses paramètres inconnus. Cette précision repose sur l'exploitation des courbes mesurées de la tension et du courant d'arc, car des paramètres imprécis peuvent compromettre la capacité prédictive du modèle. Afin de minimiser l'écart entre les courbes mesurées et simulées de la tension et du courant d'arc, les algorithmes d'optimisation de MATLAB suivants ont été utilisés: l'optimisation par moindres carrés non linéaires (*lsqnonlin*) [33], l'algorithme de NELDER-MEAD via la fonction *fminsearch*[48], l'algorithme génétique (*GA*) [49, 50] et l'algorithme du recuit simulé (*SA*) [50].

Dans ce chapitre, on va estimer les paramètres des modèles d'arc à boîte noire décrits dans le chapitre 5. Le modèle d'arc de SCHAVEMAKER est pris comme exemple. Les algorithmes d'optimisation mentionnés précédemment, ainsi que l'algorithme de HOOKE-JEEVES (appelé *Pattern Search (PS)* de MATLAB, l'algorithme de quasi-NEWTON via la fonction d'optimisation *fminunc* de MATLAB et l'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO), développé dans le cadre de ce travail, sont utilisés à cet effet. La comparaison des résultats obtenus avec ces différentes méthodes permet de sélectionner celle qui fournit les paramètres les plus précis.

6.2. Généralités sur l'optimisation

L'optimisation vise à déterminer la meilleure solution possible pour un problème donné. Dans sa forme la plus simple, elle consiste à minimiser ou maximiser une fonction objectif issue d'un problème réel spécifique. La fonction objectif permet d'évaluer la qualité d'une solution proposée. C'est pourquoi les méthodes d'optimisation sont employées afin de rechercher la solution optimale de manière efficace et rapide.

6.2.1. Méthode déterministe/stochastique

Les méthodes d'optimisation peuvent être déterministes ou stochastiques. Un algorithme déterministe suppose que les données sont connues avec certitude et le résultat ne contient pas de parties stochastiques, tandis qu'un algorithme stochastique intègre l'incertitude et l'aléatoire.

6.2.2. Optimisation globale/locale

Les algorithmes d'optimisation globale cherchent un minimum global sur l'ensemble de définition. Ils sont trois types :

- Heuristique spécifique à un problème donné.
- Meta heuristique : indépendant du problème et peuvent être appliqué à un large éventail de problèmes.
- A recherche aléatoire.

Dans un algorithme d'optimisation locale, une solution initiale doit être définie et l'algorithme explore le voisinage de cette solution pour trouver une solution meilleure. Un minimum local peut coïncider avec le minimum global si le point de départ est judicieusement choisi.

6.3. Estimation des paramètres du modèle d'arc de SCHAVEMAKER avec U_{arc}

6.3.1. Procédure d'estimation des paramètres

Le modèle d'arc de SCHAVEMAKER (§chapitre 5) est donné par l'équation suivante :

$$y(t, \gamma) = \frac{d \ln(g)}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{ui}{P_0 + P_1 ui} - 1 \right) \quad (6-1)$$

γ est le vecteur des paramètres indépendants de ce modèle; τ, P_0 et P_1

Le modèle d'arc de SCHAVEMAKER modifié en introduisant le paramètre U_{arc} (§chapitre 5) est donné par l'équation suivante :

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{ui}{\max(U_{arc}|i|, P_0 + P_1 ui)} - 1 \right) \quad (6-2)$$

U_{arc} est la tension constante de l'arc dans le domaine des courants forts.

Les paramètres τ, P_0 et P_1 sont déterminés à l'aide d'un programme dans MATLAB, en utilisant l'équation (6-1), alors que le paramètre U_{arc} est déterminé de la courbe de la tension d'arc mesurée.

La procédure suivie pour estimer les paramètres de ce modèle est la suivante :

- Les courbes de la tension et du courant d'arc mesurés, nécessaires à l'évaluation et à la validation du programme d'estimation des paramètres, décrivent le comportement de l'arc pendant le processus de coupure, elles sont obtenues d'un laboratoire HP. Dans ce travail, la tension d'arc $u_m(t)$ et le courant d'arc $i_m(t)$ mesurés (Fig. 5.5, 5.7 et 5.8, §chapitre 5) ont été enregistrés durant trois cas d'interruptions réussies de courants de défauts proche en ligne L90. Ces interruptions ont été réalisées dans le laboratoire de KEMA, en utilisant les disjoncteurs 245kV/50kA/50Hz (CB245), 145kV/31,5kA/60Hz(CB145) et 123kV/31,5kA/60Hz(CB123) [39].
- Pour chaque cas de mesures, la conductance d'arc $g_m(t)$ et la puissance électrique d'arc w sont déterminés point par point à partir de $u_m(t)$ et $i_m(t)$

$$g_m(t) = \frac{i_m(t)}{u_m(t)} \quad (6-3)$$

$$w = u_m(t) \cdot i_m(t) \quad (6-4)$$

- La différentielle de la conductance de l'arc est déterminée à partir de $g_m(t)$ point par point:

$$y_m = \frac{d \ln(g_m(t))}{dt} \quad (6-5)$$

- L'équation (6-1) est réorganisée de la manière suivante :

$$y(t, \gamma) = \frac{d \ln(g)}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{w}{P_0 + P_1 w} - 1 \right) \quad (6-6)$$

- L'expression de la fonction objectif est écrite à l'aide des équations (6-5) et (6-6), en appliquant la méthode des moindres carrés ordinaires :

$$E(\gamma) = \sum_{j=1}^{n-1} (y_{mj} - y_j(t, \gamma))^2 \quad (6-7)$$

Où n est le nombre de points d'observations.

- Une optimisation est effectuée sur les paramètres pour minimiser la fonction objectif décrite par l'équation (6-7).

6.3.2. Méthodes d'optimisation utilisées

Le problème d'optimisation décrit par l'équation (6-7) est un problème continu, non linéaire et sans contraintes. Deux types d'algorithmes de recherche de solution peuvent être utilisés, la recherche locale et la recherche globale [51].

Les algorithmes d'optimisation à recherche locale utilisés dans ce travail sont :

- L'algorithme de Quasi NEWTON BFGS de la fonction d'optimisation de MATLAB *fminunc*.
- L'algorithme de NELDER-MEAD de la fonction d'optimisation de MATLAB *fminsearch*.
- L'algorithme à régions de confiance de la fonction d'optimisation de MATLAB *lsqnonlin*

Les algorithmes d'optimisation à recherche globale utilisés dans ce travail sont :

- La méthode de HOOKES-JEEVES (*pattern search*).
- La méthode de l'algorithme génétique.
- La méthode du recuit simulé.
- La méthode d'optimisation par essaim de particules.

6.3.2.1. Méthode de Quasi NEWTON

La méthode de NEWTON est une méthode déterministe qui utilise les dérivées première et seconde; le gradient et le hessien (pour une fonction à plusieurs variables) afin de trouver le point optimal, elle est appliquée à une fonction deux fois différentiable pour trouver les racines de la dérivée première (solutions de $f'(x) = 0$). L'itération de la méthode de NEWTON s'écrit généralement sous la forme :

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k - \mathbf{H}^{-1} \nabla f(\mathbf{x}_k) \quad (6-8)$$

Où k est le numéro d'itération et H est la matrice hessienne.

$$\mathbf{H} = [\nabla^2 f(\mathbf{x}_k)] \quad (6-9)$$

L'itération s'arrêterait lorsque le critère de convergence est satisfait, ce critère peut être :

$$\frac{df}{dx} = \mathbf{0}; \quad \|\nabla f(\mathbf{x})\| < \varepsilon \quad \text{ou} \quad |f(\mathbf{x}_{k+1}) - f(\mathbf{x}_k)| < \varepsilon \quad (6-10)$$

La fonction objectif doit être deux fois différentiable et la matrice hessienne doit être définie positive. Le calcul est coûteux car il nécessite de calculer la matrice jacobienne, la matrice hessienne et son inverse [52], cela prend du temps lorsqu'il s'agit d'un problème d'optimisation à grande échelle.

Les méthodes de quasi-NEWTON sont utilisées pour résoudre des problèmes d'optimisation non linéaires. Elles sont basées sur la méthode de NEWTON mais peuvent constituer une alternative à cette méthode lorsque la fonction objectif n'est pas deux fois différentiable, ce qui signifie que la matrice hessienne n'est pas disponible ou qu'il est trop coûteux de la calculer ou de calculer son inverse.

L'algorithme BFGS doit son nom à ses quatre auteurs BROYDEN, FLETCHER, GOLDFARB et SHANNO. Il est considéré comme l'algorithme de quasi-NEWTON le plus efficace. Il utilise une matrice B_k de dimension $n \times n$ définie positive et symétrique. Comme les méthodes de type NEWTON, BFGS utilisent l'approximation quadratique de TAYLOR de la fonction objectif dans un voisinage d de x .

$$f(x + d) \simeq q(d) = f(x) + d^T g(x) + \frac{1}{2} d^T H(x) d \quad (6-11)$$

Où $g(x)$ est le vecteur gradient.

La condition nécessaire pour qu'un minimum local de $q(d)$, par rapport à d , donne un système linéaire est:

$$g(x) + H(x)d = 0 \quad (6-12)$$

Ce qui donne, à son tour, la direction d de NEWTON pour la recherche linéaire :

$$d = -H(x)^{-1} g(x) \quad (6-13)$$

La direction exacte de NEWTON (qui est susceptible d'être définie dans les méthodes de type NEWTON) est fiable lorsque :

- La matrice hessienne existe et est définie positive.
- La différence entre la véritable fonction objectif et son approximation quadratique n'est pas grande.

Dans les méthodes de quasi-NEWTON, l'idée est d'utiliser des matrices qui se rapprochent de la matrice hessienne ($B \cong H$) et/ou de son inverse ($D \cong H^{-1}$), au lieu du calcul exact de la matrice hessienne (comme dans les méthodes de type NEWTON). La méthode BFGS utilise la formule de mise à jour suivante [52]:

$$B_{k+1} = B_k + \frac{y_k y_k^T}{y_k^T s_k} - \frac{B_k s_k s_k^T B_k}{s_k^T B_k s_k} \quad (6-14)$$

Avec :

$$s_k = x_{k+1} - x_k \quad (6-15)$$

$$y_k = g_{k+1} - g_k \quad (6-16)$$

$$g_k = \nabla f(x_k) \text{ et } g_{k+1} = \nabla f(x_{k+1})$$

Comme point initial, B_0 peut être fixée à n'importe quelle matrice définie positive symétrique, par exemple et très souvent, la matrice identité.

6.3.2.2. Méthode de NELDER-MEAD

La méthode d'optimisation non linéaire de NELDER-MEAD a été publiée par JOHN NELDER et ROGER MEAD en 1965. C'est une méthode numérique heuristique pour minimiser une fonction continue à plusieurs variables. Elle ne nécessite pas le calcul du gradient de la fonction.

L'algorithme exploite le concept de simplexe . Partant initialement d'un tel simplexe, celui-ci subit des transformations simples au cours des itérations : il se déforme, se déplace et se réduit progressivement jusqu'à ce que ses sommets se rapprochent d'un point où la fonction est localement minimale [53].

6.3.2.3. Méthode de régions de confiance

C'est une méthode d'optimisation destinée à minimiser une fonction objectif f . La stratégie de l'algorithme est de choisir une fonction souvent quadratique \tilde{f}_k qui est une approximation de f_k autour du point x_k .

$$\tilde{f}_k(x_k + h) = f_k + h^T \nabla f_k + \frac{1}{2} h^T B_k h \quad (6-17)$$

Où f_k (scalaire) et ∇f_k (vecteur) sont respectivement les valeurs de la fonction et du gradient au point x_k ; B_k est le hessien $\nabla^2 f_k$ ou une approximation de celui-ci et h est le pas.

On détermine h tel que la fonction quadratique $f_k + h^T \nabla f_k + \frac{1}{2} h^T B_k h$ est minimale. Une fois h est trouvé, le point solution $x_k + h$ est trouvé, l'algorithme procède à trouver la meilleure solution autour du nouveau point solution et ainsi de suite. L'algorithme est itératif et procède par améliorations successives, il effectue un déplacement qui est obtenu en minimisant un modèle simple de la fonction sur une région de confiance (généralement une boule dont le rayon est appelé rayon de confiance du modèle) [54]. h appartient à la région de confiance définie par:

$$\|h\| \leq \Delta_k$$

Où Δ_k est le rayon de la région de confiance, il est donné, le seul inconnu à déterminer à chaque itération est h .

6.3.2.4. Méthode de HOOKE et JEEVES (pattern search)

La méthode de HOOKE et JEEVES est une méthode séquentielle qui consiste à localiser à chaque étape la solution optimale locale de la fonction objectif. Chaque séquence de la méthode est composée de deux mouvements successifs nommés "localisation" et "extension".

Le mouvement de localisation a pour but de déterminer la solution optimale locale à partir d'une solution de base en faisant varier chaque variable de la fonction objectif d'une quantité fixe donnée. Ensuite, le mouvement d'extension vise à accélérer la convergence de la méthode.

La méthode de HOOKES-JEEVES fonctionne en créant un ensemble de directions de recherche de manière itérative. Les directions doivent être telle qu'elles couvrent complètement l'espace de recherche. Cette méthode est directe et ne nécessite pas le calcul de la dérivée [55, 56].

6.3.2.5. Méthodes de l'algorithme génétique

Les méthodes de l'algorithme génétique sont des méthodes de recherche stochastique inspirée de la théorie Darwinienne de l'évolution. Elles utilisent le processus de sélection naturelle sur une population de solutions potentielles ou initiales. Elles comptent quatre opérateurs ; l'opérateur d'initialisation crée la population initiale de solutions appelées individus, chaque solution est associée à une valeur de fitness. L'opérateur de sélection choisit les chromosomes de la population pour l'accouplement. L'opérateur de croisement est utilisé pour combiner les informations génétiques entre deux chromosomes. Enfin l'opérateur de mutation modifie un ou plusieurs gènes d'un chromosome. Le processus se répète sur plusieurs générations [57].

6.3.2.6. Méthode du recuit simulé

La méthode du recuit simulé est une technique d'optimisation méta-heuristique permettant d'approcher l'optimum global d'une fonction, en évitant les minima locaux. Cette approche s'inspire du processus physique du recuit en métallurgie, où un matériau est chauffé à haute température pour atteindre un état désordonné, puis refroidi lentement afin de favoriser une structure stable et de haute qualité.

En optimisation, cette analogie se traduit par l'exploration progressive de l'espace des solutions. Initialement, le système accepte des solutions de moindre qualité pour éviter de rester bloqué dans des optima locaux. À mesure que la "température" diminue, l'algorithme devient plus strict et se focalise davantage sur l'amélioration des solutions, conduisant à un résultat optimal ou quasi-optimal.

L'algorithme du recuit simulé a été créé par METROPOLIS en 1953 puis amélioré par d'autres chercheurs. Il est décrit comme suit :

- Il faut d'abord définir la fonction objective à minimiser (ou maximiser), c'est la fonction énergétique $E(x)$.
- Définir la valeur de la température initiale (élevée) T_{max} et la solution candidate initiale x et calculer son énergie $E(x)$.

- Générer une nouvelle solution x_{new} tirée aléatoirement dans le voisinage de x et calculer son énergie $E(x_{new})$.

L'acceptation de x_{new} dépend de la différence d'énergies :

$$\Delta E = E(x_{new}) - E(x) \quad (6-18)$$

Si $\Delta E \leq 0$; la nouvelle solution x_{new} est acceptée et remplace la solution initiale x . Sinon, elle sera acceptée de manière probabiliste [58]. Le critère de Metropolis pour décider de la probabilité d'acceptation est donné par :

$$p = \exp\left(-\frac{\Delta E}{T}\right) \quad (6-19)$$

p est la probabilité d'acceptation. L'organigramme de cette méthode est montré sur Fig. 6.1.

La température du système change selon une relation bien déterminée de sorte que la température décroît d'une itération à une autre, le cas le plus simple est de diviser la température courante par un facteur inférieur à 1. L'algorithme se termine lorsque la température s'est refroidie jusqu'à un niveau T_{min} ou lorsque l'énergie de la solution actuelle est inférieure à un seuil fixe E_{th} .

6.3.2.7. Optimisation par essaim de particules

L'optimisation par essaim de particules est une technique heuristique et stochastique. Elle est inspirée par KENNELLY et HEBERHART en 1995, du mouvement de vols d'oiseaux groupés et de bancs de poissons qui, tout en recherchant la nourriture, transmettent l'information. Conduits par une bonne information, ils se rendront à l'endroit où se trouve la nourriture [60].

Dans cette méthode les individus sont appelés particules et la population est appelée essaim. Le mouvement d'une particule i est influencé par son inertie, sa meilleure position (solution) personnelle ($pbest$) (trouvée par son instinct) et la meilleure position globale ($gbest$) trouvée par l'essaim. Chaque particule cherche à ajuster sa position en utilisant la vitesse actuelle et la distance obtenue à partir de $pbest$ et $gbest$. Pour une recherche de cible de dimension D et un nombre N de particules, à l'itération k , le vecteur de position de chaque particule est donné par :

$$X_i^k = [X_{i1}^k, X_{i2}^k, \dots, X_{iD}^k]^T \quad (6-20)$$

Le vecteur de vitesse est donné par :

$$V_i^k = [V_{i1}^k, V_{i2}^k, \dots, V_{iD}^k]^T \quad (6-21)$$

Ces vecteurs sont mis à jour à travers la dimension j selon les équations suivantes [61]:

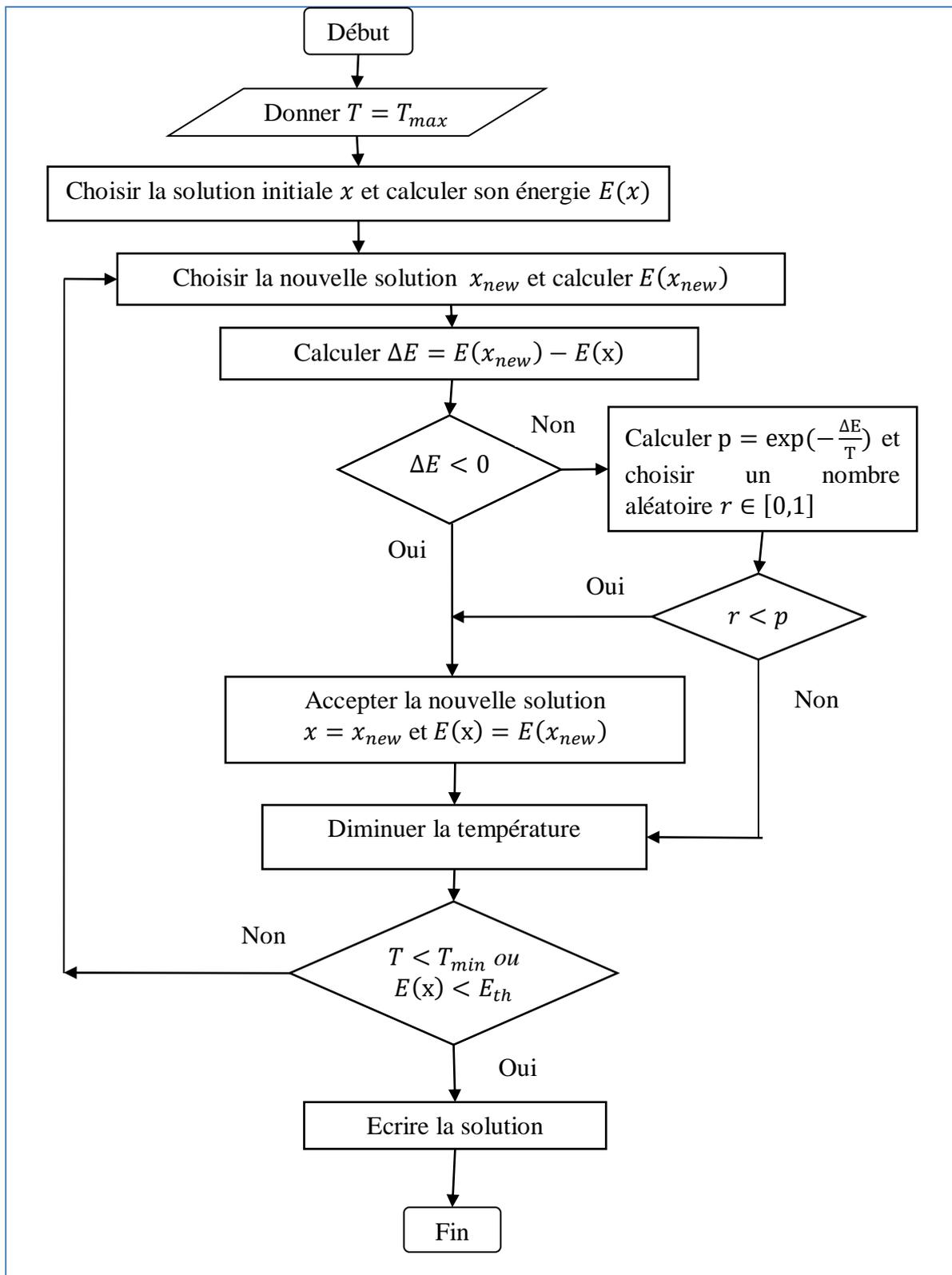


Figure 6.1. Organigramme de la méthode du recuit simulé [59].

$$V_{ij}^{k+1} = \omega V_{ij}^k + c_1 r_1^k (pbest_{ij} - X_{ij}^k) + c_2 r_2^k (gbest_j - X_{ij}^k) \quad (6-22)$$

$$X_{ij}^{k+1} = X_{ij}^k + V_{ij}^{k+1} \quad (6-23)$$

Où:

$$i = 1, 2, \dots, N \text{ et } j = 1, 2, \dots, D$$

c_1 et c_2 sont des constantes positives utilisées pour tirer chaque particule vers $pbest$ et $gbest$;

r_1 et r_2 sont deux nombres générés aléatoirement, il appartient à l'intervalle $[0,1]$;

ω est le poids d'inertie, il maintient l'équilibre entre l'exploration et l'exploitation.

Le poids d'inertie est défini comme suit:

$$\omega = \omega_{max} - \frac{(\omega_{max} - \omega_{min})k}{Maxite} \quad (6-24)$$

Où ω_{min} est le coefficient minimum d'inertie, ω_{max} est le coefficient maximum d'inertie et $Maxite$ est le nombre maximal d'itérations.

6.3.3. Résultats d'estimation des paramètres

Pour extraire les paramètres du modèle d'arc de SCHAVEMAKER en utilisant les méthodes décrites précédemment, six programmes ont été rédigés en utilisant les algorithmes d'optimisation de MATLAB suivants [62]:

- l'algorithme de NELDER MEAD de *fminsearch*,
- l'algorithme à régions de confiance de *lsqnonlin*,
- l'algorithme de Quasi NEWTON de *fminunc*
- l'algorithme du recuit simulé (*simulannealbnd*)
- l'algorithme génétique *GA*
- l'algorithme de HOOKES-JEEVES (*patternsearch*)

Le schéma général de ces programmes est présenté sur [Fig. 6.2](#).

Un autre programme a été rédigé dans MATLAB, dans le cadre de ce travail, en utilisant la technique PSO [62]. L'organigramme de ce programme est présenté sur [Fig.6.3](#), où N est le nombre de particules et D est le nombre de paramètres.

Les meilleurs paramètres et le temps de calcul obtenus par chaque programme d'optimisation sont présentés dans [Tableaux 6.1](#), [6.2](#) et [6.3](#). Le paramètre U_{arc} choisi à partir de la tension d'arc mesurée est 1420 V pour le CB245 ([Fig. 5.5](#)), 1 100 V pour le CB145 ([Fig.5.7](#)) et 950V pour le CB123 ([Fig.5.8](#)).

De ces résultats, le temps d'exécution des programmes montre clairement que les méthodes d'optimisation locale convergent plus vite.

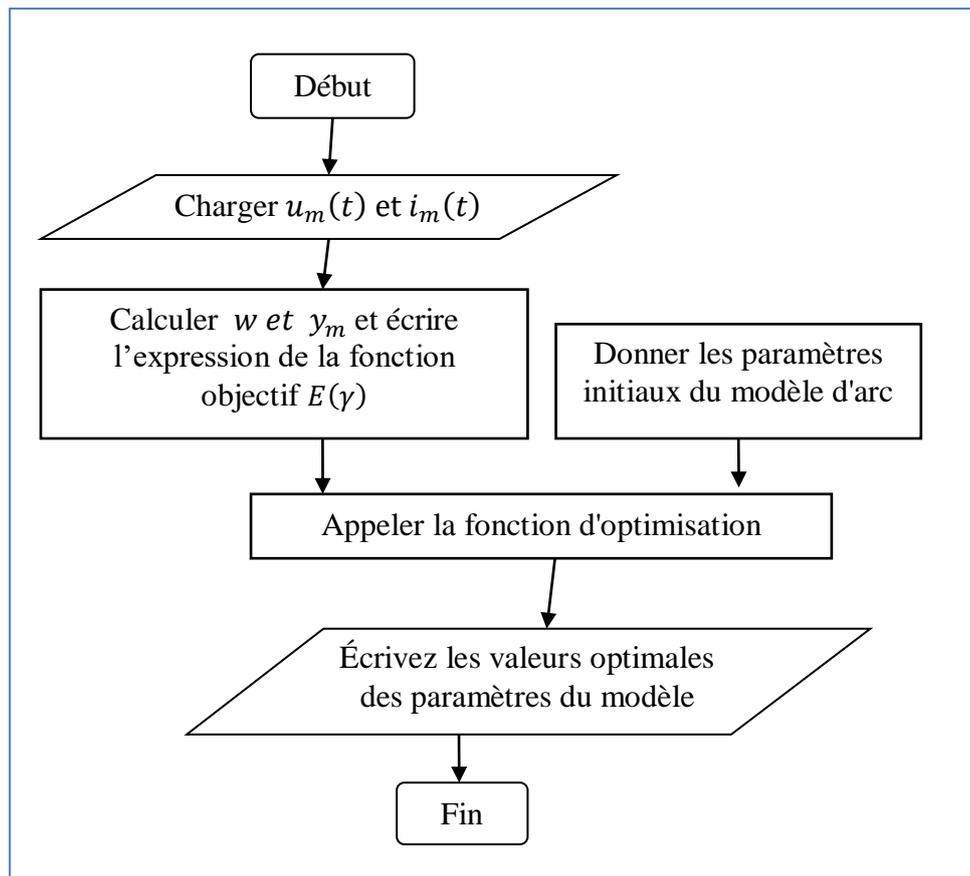


Figure 6.2. Schéma général des programmes d'optimisation utilisant *fminsearch*, *lsqnonlin*, *fminunc*, *simulannealbnd*, *GA* et *patternsearch*.

Tableau 6.1. Résultats de l'estimation des paramètres du modèle de SCHAVEMAKER (CB245).

Algorithme de	τ (μs)	P_0 (W)	P_1	Temps d'exécution (s)
<i>fminsearch</i>	0,681	54194	0,9668	0,068
<i>lsqnonlin</i>	0,681	54230	0,9668	0,47
PS	0,629	47373	0,9728	2,57
<i>fminunc</i>	0,286	15917	0,9930	0,32
PSO	0,25	13581	0,995	10,48
GA	0,3	17553	0,99151	2,31
SA	0,297	16719	0,99278	14,95

6.1. Simulation numérique

Pour la simulation numérique, le modèle d'arc de SCHAVEMAKER a d'abord été construit dans MATLAB/Simulink power system blockset, puis inséré dans le circuit d'essai (Fig.5.4, §chapitre 5). Les paramètres représentés dans Tableaux 6.1, 6.2 et 6.3 ont été successivement introduits à travers la boîte de dialogue du modèle d'arc pour simuler l'interaction arc-circuit. Les résultats de simulation sont présentés sur Fig. 6.4, 6.5 et 6.6.

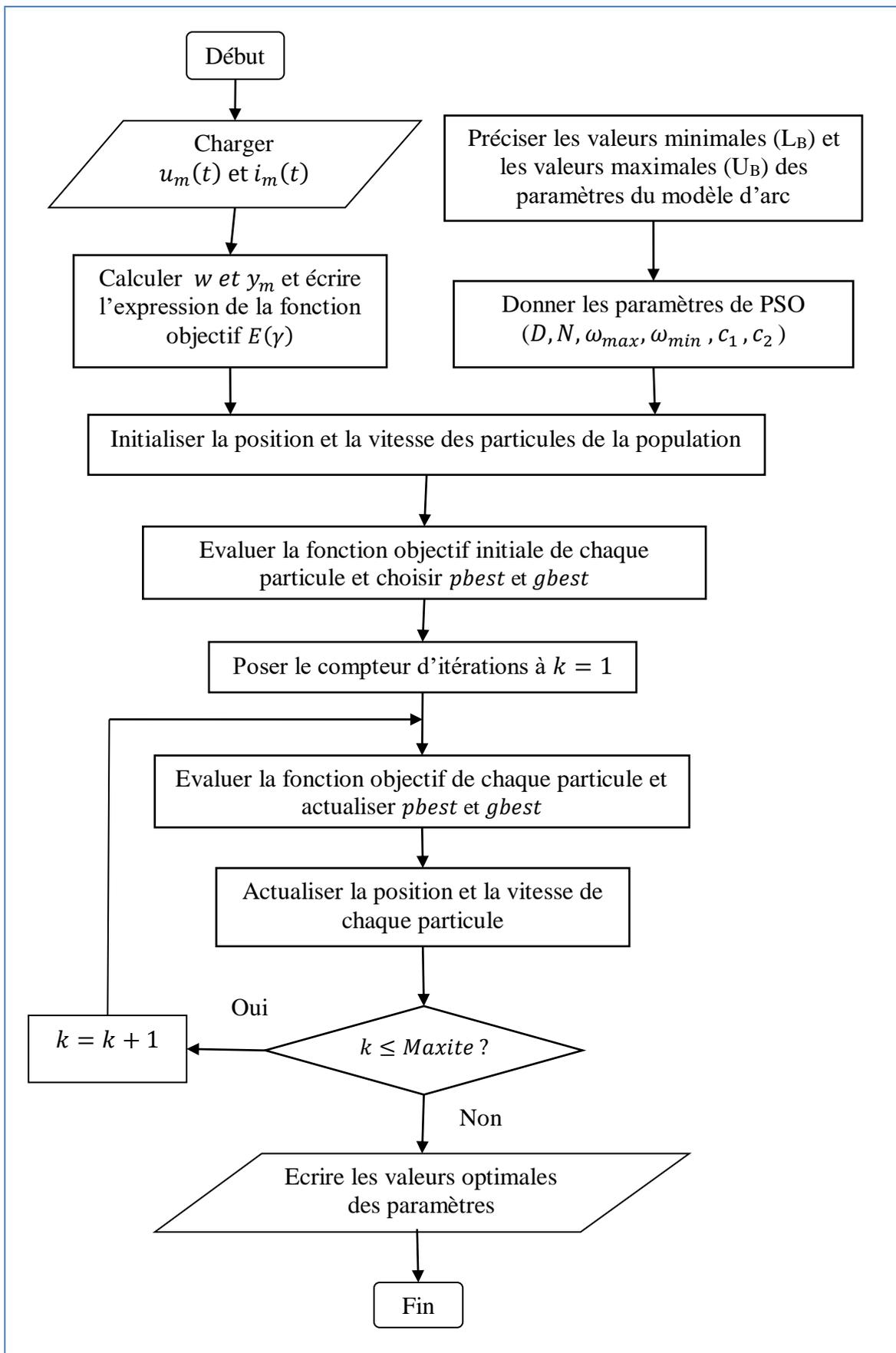


Figure 6.3. Organigramme de la technique PSO.

Tableau 6.2. Résultats de l'estimation des paramètres du modèle de SCHAVEMAKER (CB145).

Algorithme de	τ (μs)	$P_0(W)$	P_1	Temps d'exécution (s)
<i>fminsearch</i>	$9,9 \times 10^{-8}$	0,0061	1	0,078
<i>lsqnonlin</i>	$4,4 \times 10^{-5}$	2,6565	1	0,46
PS	0,18553	11972	0,9972	2,27
<i>fminunc</i>	0,17946	11500	0,9976	0,23
PSO	0,27	12000	0,999	7,04
GA	0,27107	11873	0,9964	2,06
SA	0,27008	11550	0,999	3,35

Tableau 6.3. Résultats de l'estimation des paramètres du modèle de SCHAVEMAKER (CB123).

Algorithme de	τ (μs)	$P_0(W)$	P_1	Temps d'exécution (s)
<i>fminsearch</i>	0,18096	14510	0,99799	0,093
<i>lsqnonlin</i>	0,18087	14498	0,998	1,86
PS	0,1839	14920	0,99772	3,05
<i>fminunc</i>	0,17434	13640	0,99841	0,32
PSO	0,27	14000	0,995	8,35
GA	0,27006	13254	0,995	1,59
SA	0,27	13996	0,995	5,32

Pour le CB245, une interruption réussie est obtenue avec les paramètres optimisés en utilisant PSO, GA, SA et *fminunc*, en d'autres termes ces méthodes ont reproduit le résultat de l'essai. De plus, les tensions d'arc simulées obtenues en utilisant ces méthodes sont très proches de la tension d'arc mesurée (Fig. 6.4). Les méthodes SA et *fminunc* ont donné presque le même résultat, puisque les tensions d'arc simulées en utilisant ces deux méthodes sont presque superposées. Par contre, les paramètres optimisés en utilisant *fminsearch*, *lsqnonlin* et PS ont donné un échec de la coupure, donc elles n'ont même pas reproduit le résultat de l'essai.

Pour le CB145, une interruption réussie est obtenue avec les paramètres optimisés en utilisant PSO, GA, SA, PS et *fminunc*, donc ces méthodes ont reproduit le résultat de l'essai. Les tensions d'arc simulées en utilisant SA et PSO (Fig.6.5) sont très proches de la tension d'arc mesurée. Par contre *fminsearch* et *lsqnonlin* ont donné un échec de la coupure et n'ont même pas reproduit le résultat de l'essai.

Pour le CB123, toutes les méthodes utilisées ont reproduit le résultat de l'essai, mais seules les tensions d'arc simulées en utilisant PSO, GA et SA sont très proches de la tension d'arc mesurée

(Fig.6.6). Les tensions d'arc simulées en utilisant GA et PSO sont superposées, ce qui signifie que les méthodes GA et PSO ont donné presque le même résultat.

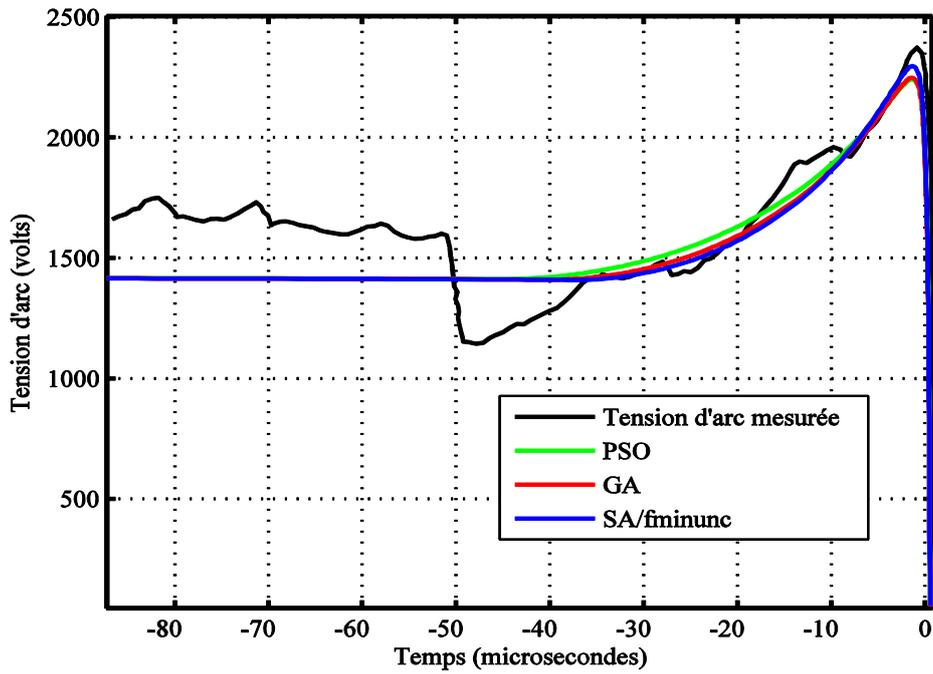


Figure 6.4. Tensions d'arc simulées en utilisant *PSO*, *GA*, *SA* et *fminunc* (CB245).

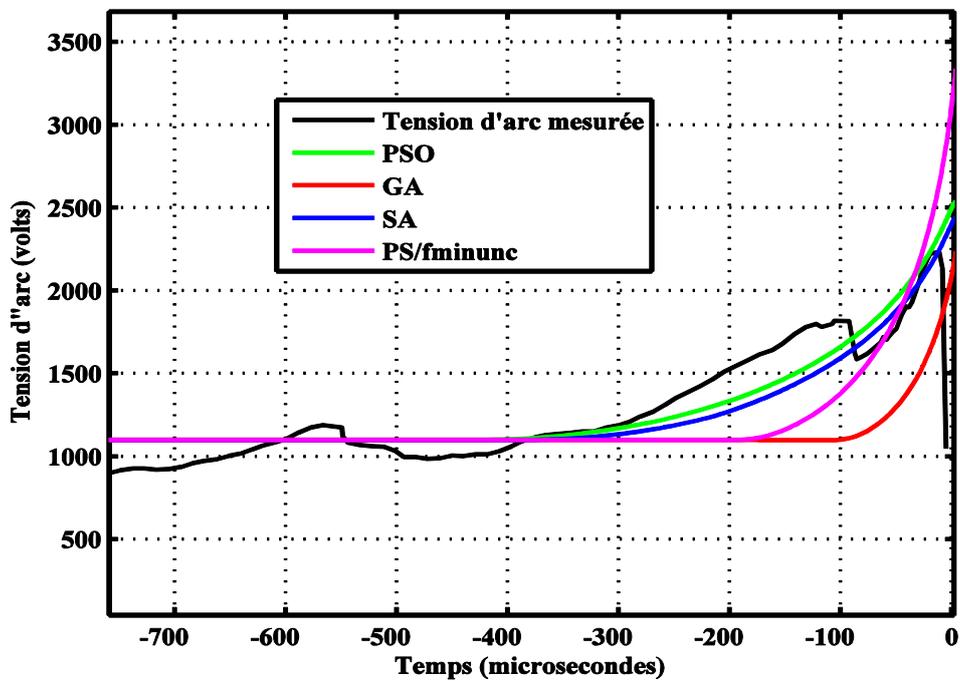


Figure 6.5. Tensions d'arc simulées en utilisant *PSO*, *GA*, *SA*, *PS* et *fminunc* (CB145).

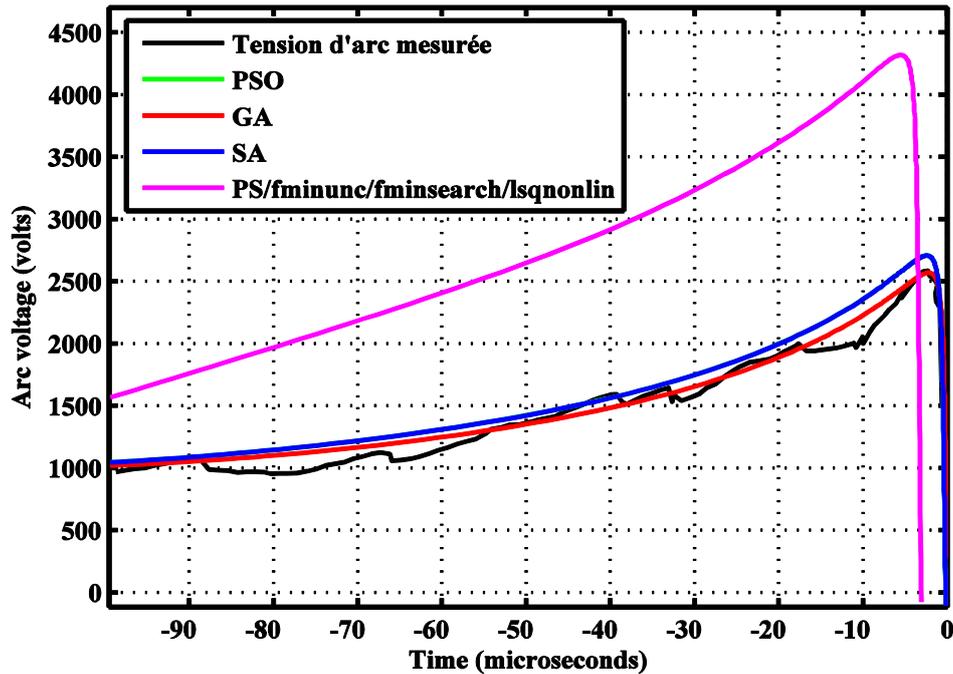


Figure 6.6. Tensions d'arc simulées en utilisant *PSO*, *GA*, *SA*, *PS*, *fminunc*, *fminsearch* et *lsqnonlin* (CB123).

Afin de déterminer la méthode d'optimisation la plus efficace pour chaque classe de disjoncteurs HT, l'équation (6-25) a été utilisée pour calculer l'erreur quadratique moyenne (*Root Mean Square Error (RMSE)*) entre la tension d'arc mesurée $u_m(t)$ et la tension d'arc $u_s(t)$ simulée en utilisant respectivement *PSO*, *GA*, *SA* et *fminunc* [62]. Les résultats groupés dans [Tableau 6.4](#), montrent que pour les trois disjoncteurs utilisés, les méthodes *GA*, *PSO* et *SA* sont les plus efficaces. Pour les CB245 et CB123, la technique *GA* est la plus adaptée, tandis que pour le CB145, la méthode *SA* est la plus appropriée.

$$RMSE = \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n-1} (u_{mj} - u_{sj})^2 \right)^{1/2} \quad (6-25)$$

Tableau 6.4. *RMSE* Correspondant à l'utilisation de *PSO*, *GA*, *SA* et *fminunc*.

<i>RMSE</i>	<i>PSO</i>	<i>GA</i>	<i>SA</i>	<i>fminunc</i>
(CB245)	522,03	518,32	531,23	530,50
(CB145)	848,97	2043,30	589,21	6682,35
(CB123)	1094,10	690,70	1090,80	328281,93

6.2. Conclusion

Dans ce travail, on a estimé les paramètres des modèles d'arc à boîte noire, en prenant le modèle d'arc de SCHAVEMAKER comme exemple. Des méthodes d'optimisation locales et globales sans contraintes ont été utilisées pour estimer les paramètres inconnus du modèle d'arc, à partir des mesures enregistrées lors des essais de défauts proches en ligne L90 effectuées respectivement par les disjoncteurs $245kV/50kA/50Hz$, $145kV/31,5kA/60Hz$ et $123kV/31,5kA/60Hz$.

Les algorithmes d'optimisation locale de MATLAB utilisés, étaient l'algorithme de NELDER-MEAD de *fminsearch*, l'algorithme à région de confiance de *lsqnonlin* et l'algorithme de quasi-NEWTON de *fminunc*. Malgré que ces méthodes convergent plus rapidement, elles n'ont pas donné dans la plupart des cas, des valeurs précises des paramètres du modèle d'arc.

Les méthodes d'optimisation globale utilisées dans ce travail incluent la technique d'optimisation par essaim de particules ainsi que les algorithmes d'optimisation de MATLAB: l'algorithme génétique, l'algorithme de recuit simulé et l'algorithme de HOOKE et JEEVES.

Pour le modèle de SCHAVEMAKER, la technique GA est la plus adaptée pour le CB245 et le CB123, tandis que pour le CB145, la méthode SA est la plus appropriée. Pour un disjoncteur HT donné et un modèle d'arc à boîte noire donné, on peut conclure que la méthode la plus appropriée, peut être déterminé parmi les trois techniques heuristiques *PSO*, *GA* et *SA*.

Chapitre 07

SIMULATION DES TRANSITOIRES DANS LES DISJONCTEURS HAUTE TENSION

7.1. Introduction

Les essais de type de court-circuit utilisant les disjoncteurs HT sont normalisés et réalisés dans un laboratoire HP, afin de confirmer le bon fonctionnement de ces disjoncteurs. Durant les essais, les courbes qui décrivent l'étape transitoire (les courbes du courant d'arc, de la tension d'arc et de la tension transitoire de rétablissement) sont enregistrées. Pour étudier l'état transitoire dans les disjoncteurs HT, les trois logiciels suivants ont été utilisés; *Electromagnetic Transients Program* (EMTP), *Xtrans* et *MATLAB/Simulink/Power Systems Blockset* (PSB) via l'extension *Arc Model Blockset* (AMB).

Actuellement, l'outil AMB fonctionne seulement dans MATLAB 6 et ne peut pas être activé dans les versions récentes de MATLAB à cause d'importantes mises à jour faites dans les bibliothèques de MATLAB/ Simulink/ PSB, comme il présente quelques inconvénients. Dans ce chapitre on va actualiser et améliorer l'outil AMB.

7.2. Simulation des transitoires dans les disjoncteurs HT

Les courants de court-circuit génèrent des courants et des surtensions temporaires que le système doit supporter sans endommager les composants du réseau. Les principaux logiciels qui permettent de simuler les phénomènes transitoires dans les disjoncteurs HT en intégrant les modèles d'arc sont :

- EMTP, basé sur l'application de la règle trapézoïdale à pas fixe pour convertir les équations différentielles des composants du réseau en équations algébriques.
- Xtrans, basé sur la solution des équations différentielles et algébriques.
- PSB (*Power System Blockset*) de MATLAB/Simulink/PSB, qui utilise des solveurs à pas fixe et des solveurs à pas variable pour résoudre les équations différentielles.

La conception et le fonctionnement de ces logiciels ainsi que l'incorporation des modèles d'arc dans ces logiciels sont détaillés dans [2, 39].

Les logiciels EMTP, Xtrans et PSB ont été utilisés dans [63] pour simuler l'état transitoire ayant lieu durant la coupure d'un courant de défaut proche en ligne, en utilisant le modèle de SCHWARZ. Les résultats obtenus avec les trois logiciels ont été comparés. Xtrans et PSB ont donné le même résultat, ils ont des solveurs à pas variables, cela est un avantage car dans le domaine des courants forts, l'interaction arc circuit ne change pas rapidement mais autour de zéro du courant la résistance de l'arc varie rapidement, par conséquent des pas plus petits sont nécessaires pour préserver la précision. EMTP qui utilise un solveur à pas fixe, dont la taille du pas est choisi par l'utilisateur, a donné des résultats légèrement différents. Ce logiciel n'est pas convenable pour l'étude détaillée de l'interaction arc-circuit [63].

7.3. AMB (Arc Model Blockset)

L'outil AMB est une extension de MATLAB/Simulink/PSB, réalisée par P.H. SCHAVEMAKER et al. dans le groupe *Electrical Power Systems* de l'UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DELFT en 2001 [64, 65], pour étudier l'interaction arc-circuit durant le processus de coupure d'un courant de défaut proche en ligne L90 par un disjoncteur HT. AMB est formé par un circuit d'essai et une librairie contenant plusieurs modèles d'arc. La librairie des modèles d'arc (Fig. 7.1) contient les modèles d'arc de CASSIE, de MAYR, de SCHWARZ, de HABEDANK, de MAYR modifié, de KEMA et de SCHAVEMAKER (§ chapitre 5).

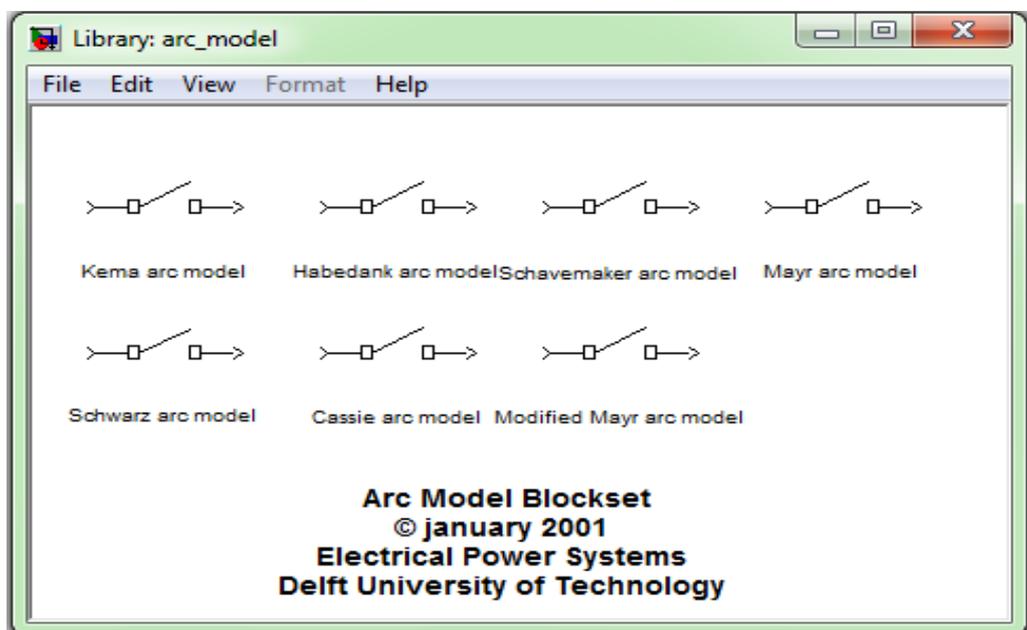


Figure 7.1. Librairie des modèles d'arc dans l'ancien AMB [64].

Le circuit d'essai (Fig. 7.2) est dimensionné pour un disjoncteur $72,5kV/31,5kA/60Hz$, il est formé par une source de tension alternative de f.é.m. E , d'une réactance inductive d'inductance L_s qui représente la réactance équivalente en amont du disjoncteur, du circuit (R_1, L_1, C_1) qui

représente la branche de la TTR aux bornes du disjoncteur et du circuit (R_2, L_2, C_2) en aval du disjoncteur qui représente la ligne artificielle (Fig.7.3).

Dans AMB, chaque modèle d'arc a été incorporé dans MATLAB/Simulink/PSB comme une source de courant contrôlée par la tension [64, 65] et les équations des modèles d'arc ont été incorporées à l'aide du block DEE (*Differential Equation Editor*) (Fig.7.4).

7.3.1. Actualisation de l'outil AMB

L'outil AMB ne fonctionne que dans MATLAB 6 ou dans les versions antérieures, car dans les nouvelles versions de MATLAB, le block DEE (Fig. 7.4) n'existe plus et plusieurs blocks constituant le circuit d'essai ont été modifiés. Dans ce travail, l'outil AMB a été actualisé en créant de nouveau son circuit d'essai et en incorporant de nouveau les modèles d'arc dans les nouvelles versions de MATLAB/Simulink/PSB [66].

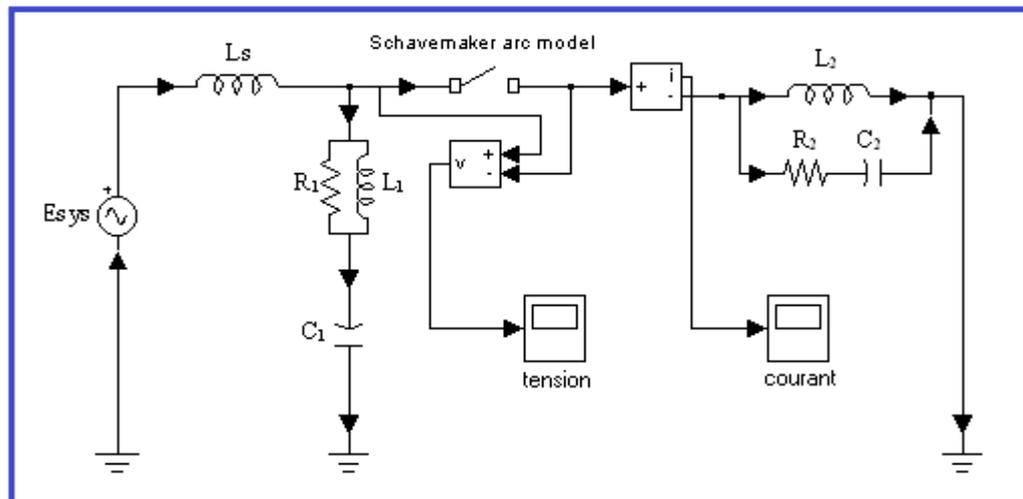


Figure 7.2. Circuit d'essai pour la coupure d'un courant de défaut proche en ligne dans l'ancien AMB [64].

La ligne artificielle RLC

$$Z_L = 450 \Omega$$

$$R_2 = Z_L$$

$$L_2 = 1.6L_L$$

$$C_2 = C_L$$

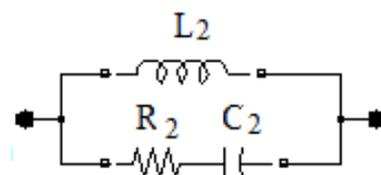


Figure 7.3. Ligne artificielle RLC dans l'ancien AMB [64].



Figure 7.4. Incorporation des modèles d'arc dans l'ancien AMB à l'aide du block DEE de Simulink/PSB [65]

7.4. Le nouvel AMB

Le nouvel AMB est obtenu en améliorant le circuit d'essai de l'ancien AMB et en enrichissant sa librairie.

7.4.1. Librairie et circuit d'essai du nouvel AMB

La librairie des modèles d'arc du nouvel AMB (Fig. 7.5) contient en plus des sept modèles d'arc de l'ancien AMB cités ci-dessus, les modèles de TP KEMA [38] et de LATRI [45] récemment proposés, comme elle contient quatre lignes artificielles (Fig. 7.6 à 7.9) au lieu d'une seule dans l'ancien AMB. D'autres modèles d'arc peuvent être ajoutés facilement.

Dans le circuit d'essai du nouvel AMB (Fig.7.10), la branche utilisée pour contrôler la TTR est différente de celle utilisée dans l'ancien AMB. Elle est formée par la résistance R_s et les capacités C_s et C_d . Elle est adoptée de [27] car elle permet d'avoir une forme plus correcte de la TTR.

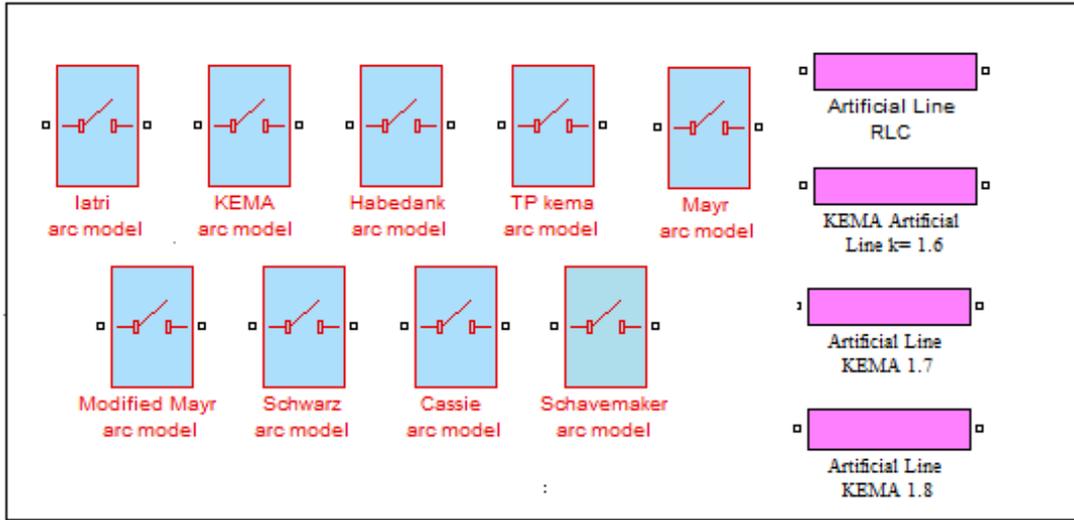


Figure 7.5. Librairie des modèles d’arc et des lignes artificielles du nouvel AMB.

Ligne artificielle RLC k=1.33

$$R = Z_L$$

$$L = L_L$$

$$C = 0,8C_L$$

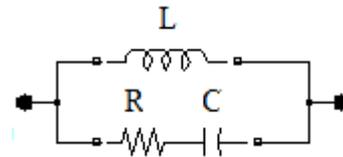


Figure 7.6. Ligne artificielle RLC k=1,33[27].

Ligne artificielle KEMA k=1,6

$$R = Z_L$$

$$L = L_L$$

$$C = 0,4C_L$$

$$L_R = 0,5L_L$$

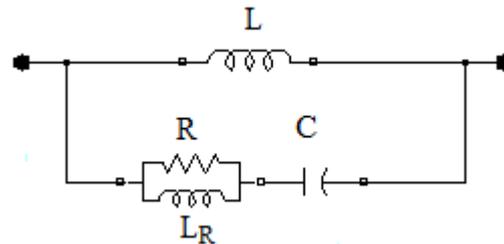


Figure 7.7. Ligne artificielle KEMA k=1,6[27].

Ligne artificielle KEMAk=1.7

$$R_2 = Z_L$$

$$L = L_L$$

$$C_1 = C_2 = C_L/3$$

$$L_2 = 0,25L_L$$

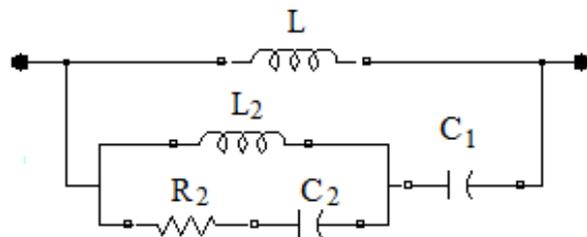


Figure 7.8. Ligne artificielle KEMA k=1,7[27].

Ligne artificielle KEMAK=1.8

$$L_R = 0,145L_L$$

$$L_2 = 0,0725L_L$$

$$C_1 = C_L/3$$

$$C_2 = 2C_1$$

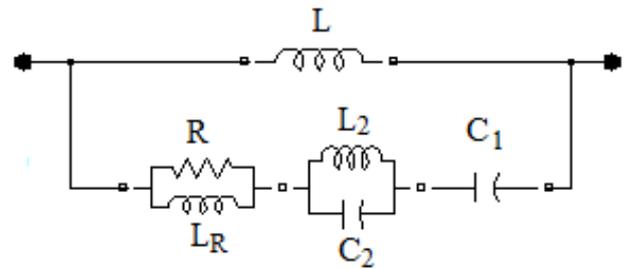


Figure 7.9. Ligne artificielle KEMAK k=1,8 [27].

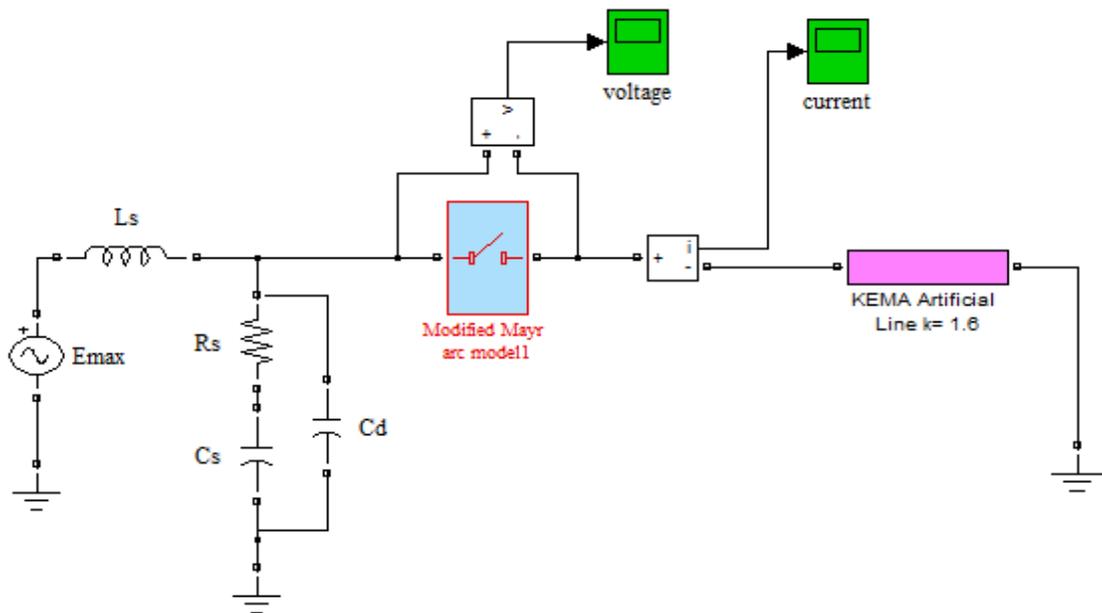


Figure 7.10. Circuit d'essai du nouvel AMB pour la coupure d'un courant de défaut proche en ligne

7.4.2. Incorporation des modèles d'arc dans MATLAB/ Simulink/PSB

Pour le nouvel AMB, la procédure utilisée pour incorporer les modèles d'arc dans MATLAB/ Simulink/PSB est décrite ci-dessous, en utilisant le modèle de MAYR modifié [66]. Cette procédure ressemble à celle utilisée dans l'ancien AMB [64], mais les équations sont transformées de manière plus simple :

- Le modèle de MAYR modifié, décrit au chapitre 5 par l'équation (5-5) est réécrit de la manière suivante:

$$\frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{uig}{p(P_0 + C_i|i|)} - g \right) \quad (7-1)$$

- Afin d'incorporer le modèle de MAYR modifié dans MATLAB/Simulink/PSB, le système d'équations suivant doit être résolu :

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dg}{dt} &= \frac{1}{\tau} \left(\frac{u^2 g^2}{p(P_0 + C_i |gu|)} - g \right) \\ i &= gu \end{aligned} \right. \quad (7-2)$$

Le système d'équations (7-2) peut s'écrire dans MATLAB/Simulink/PSB comme suit (Fig. 7.11):

$$\left\{ \begin{aligned} x_1 &= \frac{dU(3)}{dt} = \frac{U(2)}{\tau} \left(\frac{U(1)^2 U(3)^2}{p(P_0 + C_i |U(3)U(1)|)} - U(3) \right) \\ y_1 &= U(3)U(1) \end{aligned} \right. \quad (7-3)$$

Avec:

- $U(1)$ Première entrée du modèle d'arc, elle représente la tension d'arc u .
- $U(2)$ Deuxième entrée du modèle d'arc, elle représente l'état des contacts du disjoncteur:
 $U(2) = 0$ quand les contacts sont fermés
 $U(2) = 1$ quand les contacts commencent à se séparer
- y_1 Sortie du modèle d'arc, elle représente le courant d'arc i .
- $U(3)$ Variable d'état de l'équation différentielle du modèle d'arc, elle représente la conductance g d'arc.

L'intégrale de x_1 dans l'équation (7-3) donne la conductance d'arc :

$$\int_{t=0}^t \frac{dg(t)}{dt} = g(t) - g(0) \quad (7-4)$$

La conductance d'arc à $t = 0$ est $(0) = x_0$, Avec x_0 la valeur initiale de la variable d'état, elle représente la valeur initiale de la conductance d'arc $g(0)$ au moment de la séparation des contacts.

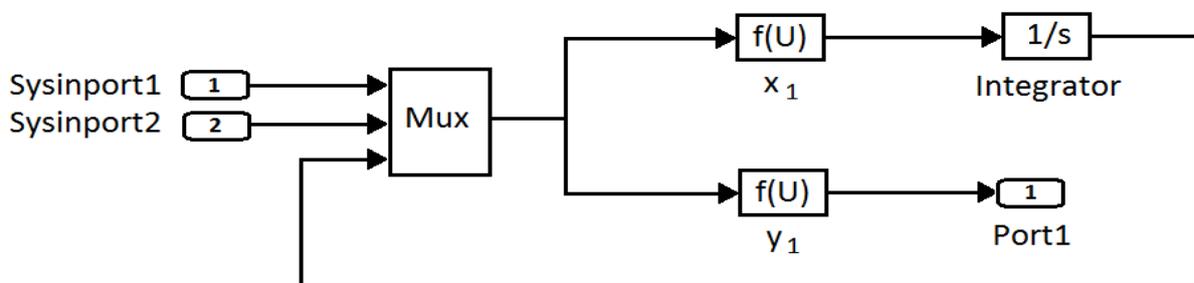


Figure 7.11. Equations du modèle de MAYR modifié dans MATLAB/Simulink/PSB

- Après l'écriture du système d'équation (7-3) dans MATLAB/Simulink/PSB, un sous-système est créé et auquel les blocks de Simulink suivants sont ajoutés :

- a. **Voltage Measurement block** pour mesurer la tension d'arc.
 - b. **Controlled Current Source block** pour convertir le signal d'entrée Simulink en une source de courant équivalente.
 - c. **Hit Crossing block** pour détecter quand le courant franchit la valeur zéro, en ajustant le pas de simulation. Ce moment est très important dans le processus de la coupure.
 - d. **Step block** pour contrôler l'état des contacts du disjoncteur :
 1. si les contacts sont fermés l'équation $\frac{dg(t)}{dt} = 0$ est résolue. Le modèle d'arc se comporte comme une conductance de valeur $g(0)$.
 2. à partir du moment où les contacts se séparent, l'équation du modèle d'arc est résolue.
- Le modèle d'arc obtenu est représenté sur [Fig. 7.12](#).

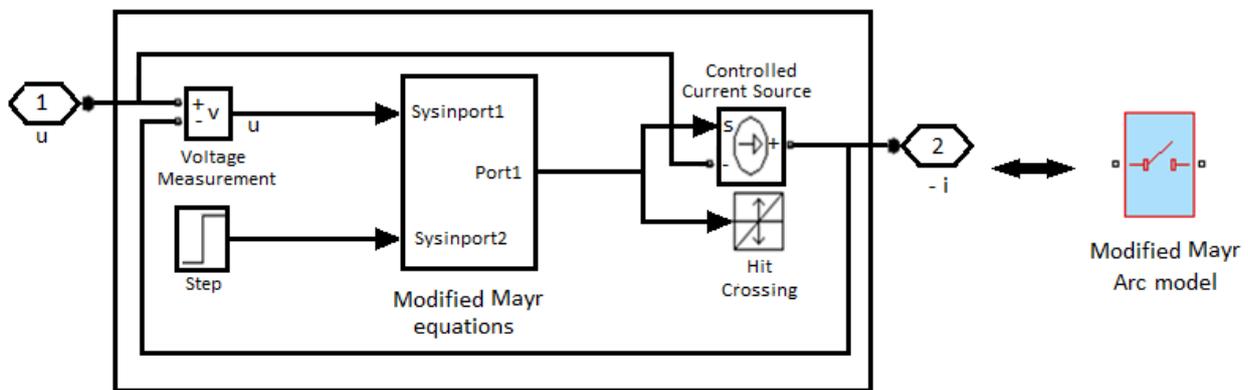


Figure 7.12. Modèle d'arc de MAYR modifié dans le nouvel AMB

La procédure décrite ci-dessus est suivie pour incorporer les autres modèles d'arc dans MATLAB/Simulink/PSB.

7.5. Comparaison de l'ancien et du nouvel AMB

Pour comparer l'ancien et le nouvel AMB, nous avons fait, comme exemple, la simulation de la coupure du courant de défaut proche en ligne L90. Cette simulation est effectuée en utilisant le disjoncteur 245kV/50kA/50Hz et le modèle d'arc de SCHAVEMAKER avec U_{arc} , décrit par l'équation (5-7) (§chapitre 5), afin de représenter la conductance non linéaire de l'arc électrique lors du processus de coupure. Les paramètres de ce modèle d'arc sont les suivants [62] :

$$\tau = 0,3\mu\text{s}; P_0 = 17553 \text{ W}; P_1 = 0,99151 \quad U_{arc} = 1420\text{V}$$

Ces paramètres ont été déterminés à partir des courbes de la tension et du courant d'arc mesurés durant l'essai, en utilisant la méthode de l'algorithme génétique (Tableau 6.1, §chapitre 6).

7.5.1. Dimensionnement du circuit d'essai de l'ancien AMB

Le circuit d'essai est dimensionné selon le disjoncteur utilisé [39].

7.5.1.1. Dimensionnement du circuit d'essai côté source

La f.é.m. maximale du générateur est :

$$E_{max} = \frac{U_r}{\sqrt{3}}\sqrt{2} = \frac{245}{\sqrt{3}}\sqrt{2} = 200,041 \text{ kV} \quad (7-5)$$

De l'équation (4-23) du chapitre 4, la réactance inductive côté source est :

$$X_s = \frac{E}{I_{sc}} = \frac{200,041 \times 10^3 / \sqrt{2}}{50 \times 10^3} = 2,829 \Omega \quad (7-6)$$

$$L_s = \frac{X_s}{2\pi f} = \frac{2,829}{2\pi \times 50} = 9,009 \text{ mH} \quad (7-7)$$

7.5.1.2. Dimensionnement de la branche de la TTR de l'ancien AMB

De l'équation (3-27) du chapitre 3, le taux initial d'accroissement du courant de court-circuit est :

$$\frac{di_t}{dt} = \frac{E_{max}}{L_s} = \frac{200,041 \times 10^3}{9,009 \times 10^{-3}} = 22,204 \times 10^6 \text{ A/s} \quad (7-8)$$

$$R_1 = \frac{0,5 \text{ kV}/\mu\text{s}}{di_t/dt} = \frac{500\text{V}/\mu\text{s}}{22,204 \times 10^6} = 22,518 \Omega \quad (7-9)$$

$$L_1 = 1,5L_s = 1,5 \times 9,009 = 13,513 \text{ mH} \quad (7-10)$$

$$C_1 = \frac{L_s}{2R_1^2} = \frac{9,009 \times 10^{-3}}{2 \times (22,518)^2} = 8,883 \mu\text{F} \quad (7-11)$$

Cette TTR à deux paramètres qui est utilisée dans le circuit d'essai de l'ancien AMB, s'applique au défaut aux bornes [39, 67] et ne s'applique pas au défaut proche en ligne.

7.5.1.3. Dimensionnement la ligne artificielle de l'ancien AMB

De l'équation (4-28) du chapitre 4, l'inductance de la portion de la ligne court-circuitée est :

$$L_L = L_s \left(\frac{1}{M} - 1 \right) = 9,009 \times \left(\frac{1}{0,9} - 1 \right) = 1,001 \text{ mH} \quad (7-12)$$

La valeur normalisée de l'impédance caractéristique de la ligne est $Z_L = 450\Omega$

De l'équation (4-29) du chapitre 4, la capacité de la portion de la ligne court-circuitée est :

$$C_L = \frac{L_L}{Z_L^2} = \frac{1,001 \times 10^{-3}}{450^2} = 4,943 \text{ nF} \quad (7-13)$$

Les paramètres de la ligne artificielle de l'ancien AMB sont :

$$R_2 = Z_L = 450 \Omega \quad (7-14)$$

$$L_2 = 1,6L_L = 1,6 \times 1,001 = 1,602 \text{ mH} \quad (7-15)$$

$$C_2 = C_L = 4,943 \text{ nF} \quad (7-16)$$

7.5.2. Dimensionnement du circuit d'essai du nouvel AMB

7.5.2.1. Dimensionnement du circuit d'essai côté source

Le dimensionnement du circuit d'essai côté source est le même que l'ancien AMB.

7.5.2.2. Dimensionnement de la ligne artificielle

Comme la valeur normalisée du facteur de crête de la TTR est $k = 1,6$ on a choisie la ligne artificielle de KEMA $k = 1,6$ (Fig. 7.7), elle a comme paramètres :

$$L_2 = L_L = 1,001 \text{ mH} \quad (7-17)$$

$$C = 0,4C_L = 1,977 \text{ nF} \quad (7-18)$$

$$R_2 = Z_L = 450 \Omega \quad (7-19)$$

$$L_R = 0,5L_L = 0,5 \text{ mH} \quad (7-20)$$

7.5.2.3. Dimensionnement de la branche de la TTR

Dans le cas du disjoncteur 245kV/50kA/50Hz, la valeur normalisée du facteur de crête de la TTR est $k = 1,6$ pour CEI 60056 et pour la norme ANSI (§chapitre 4). Afin d'obtenir cette valeur, on effectue la simulation et on obtient la TTR simulée par le nouvel AMB (Fig.7.13). En faisant un agrandissement juste après le zéro du courant, on obtient les paramètres de la TTR, à savoir la valeur crête de la chute de tension à travers la ligne \hat{U}_L et la valeur crête de la TTR côté ligne U_L^* simulées (Fig.7.14). On ajuste les paramètres de la branche de la TTR (R_s, L_s et C_s) tels que $k = 1,6$.

7.5.3. Résultats de simulation et comparaison du nouvel et de l'ancien AMB

Les résultats de simulation sont représentés sur Fig. 7.13 à 7.17. L'ancien et le nouvel AMB ont reproduit le résultat de l'essai, une interruption réussie est obtenue, puisque le courant est nul après le zéro du courant (Fig.7.15) et la TTR est amortie et rejoint la tension du réseau (Fig.7.13). Cependant, le nouvel AMB présente les avantages suivants par rapport à l'ancien :

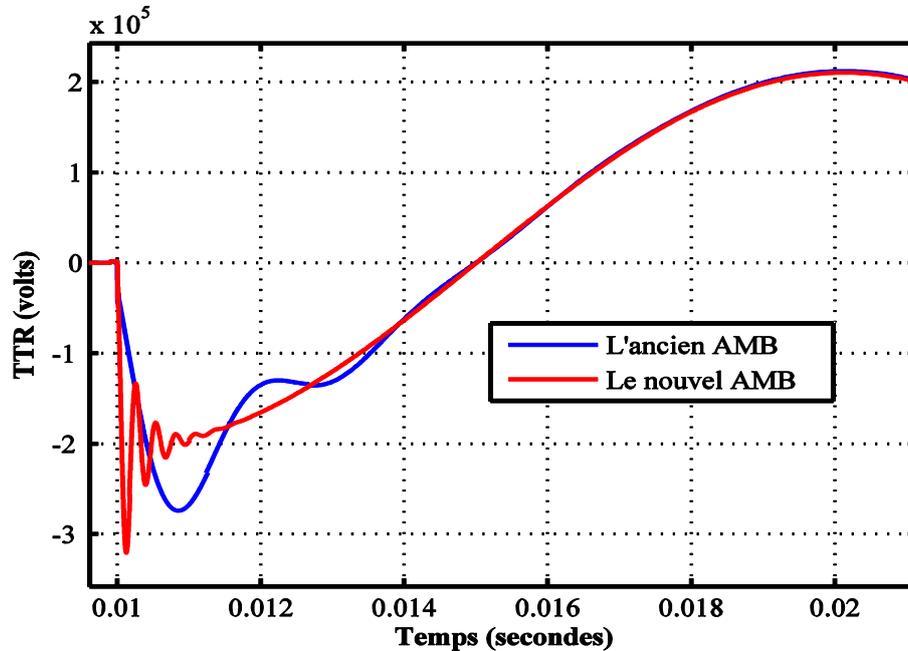


Figure 7.13. TTR simulée dans l'ancien et le nouvel AMB.

- le nouvel AMB donne la forme correcte de la TTR, qui est en dents de scie (Fig. 7.13) alors que l'ancien AMB ne donne pas la forme correcte.
- La valeur crête de la chute de tension à travers la ligne \hat{U}_L et la valeur crête de la TTR côté ligne U_L^* simulées par le nouvel AMB (Fig. 7.14) sont $\hat{U}_L = 20 \text{ kV}$ et $U_L^* = 32 \text{ kV}$. Ces mêmes paramètres calculés avec les équations (4-37) et (4-36) sont :

$$\hat{U}_L = (1 - 0.9) \sqrt{\frac{2}{3}} \times 245 = 20 \text{ kV}$$

$$U_L^* = k\hat{U}_L = 1.6 \times 20 = 32 \text{ kV}$$

L'ancien AMB (Fig. 7.13) donne : $U_L^* = 27,24 \text{ kV}$

Ces résultats montrent que le nouvel AMB donne des paramètres de la TTR égaux à ceux calculés. L'ancien AMB (Fig. 7.13) donne par contre une valeur crête de la TTR côté ligne U_L^* loin de celle calculée et ne fournit pas \hat{U}_L car il ne reproduit pas fidèlement la forme de la TTR.

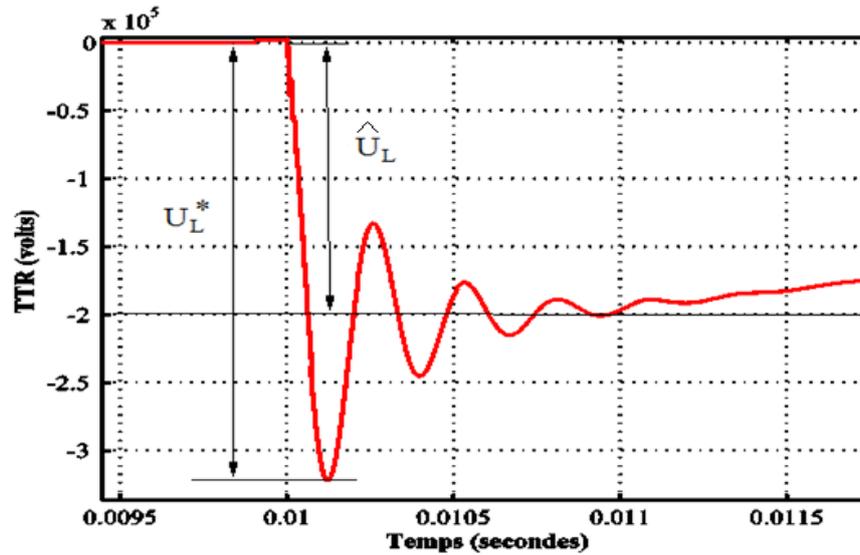


Figure 7.14. TTR simulée dans le nouvel AMB.

- Le courant maximal simulé par le nouvel AMB (7.16) est $\hat{I}_L = 63,63 \text{ kA}$ et le courant simulé par l'ancien AMB est $\hat{I}_L = 60,11 \text{ kA}$ (Fig.7.16). En appliquant la relation (4-23) du chapitre 4, la valeur calculée du courant de la ligne est:

$$\hat{I}_L = \sqrt{2} I_{sc} \times 0,9 = \sqrt{2} \times 50 \times 0,9 = 63,639 \text{ kA}$$

Il est clair que le courant de la ligne simulé par le nouvel AMB est le plus proche de celui calculé.

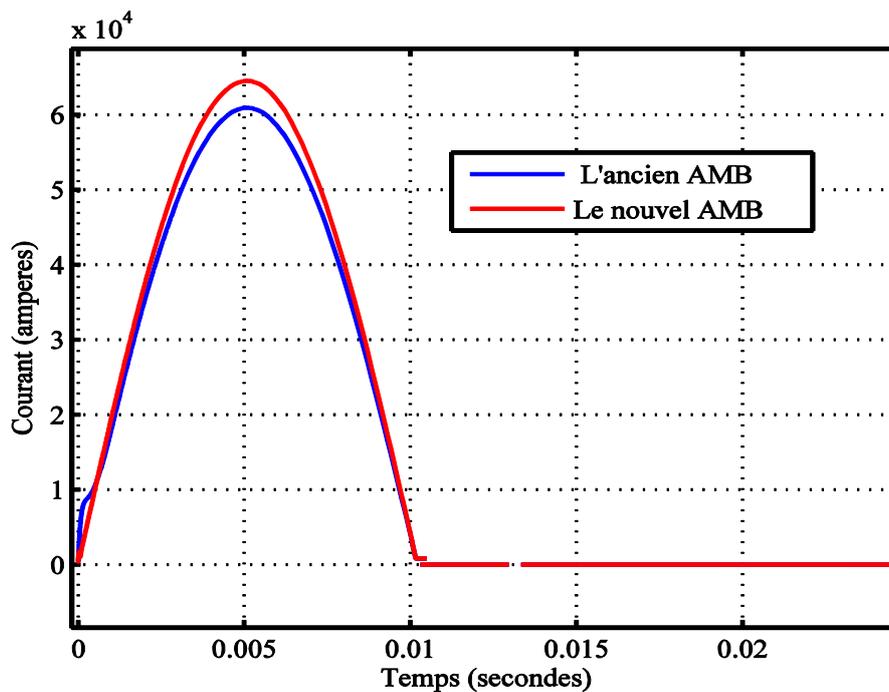


Figure 7.15. Courant de la ligne simulé dans l'ancien et le nouvel AMB

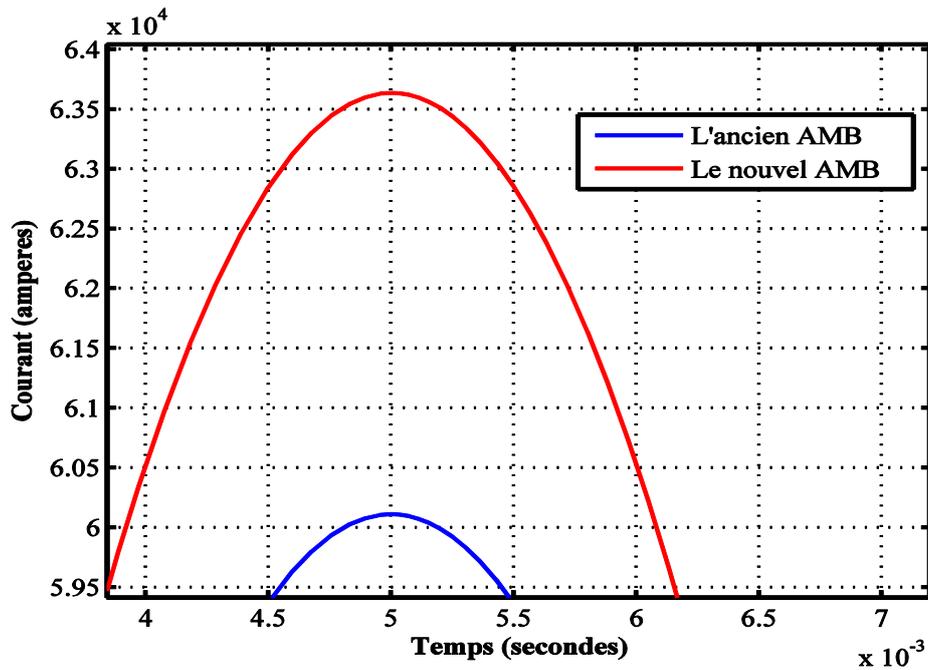


Figure 7.16. Valeurs du courant maximal de la ligne simulé dans l'ancien et le nouvel AMB.

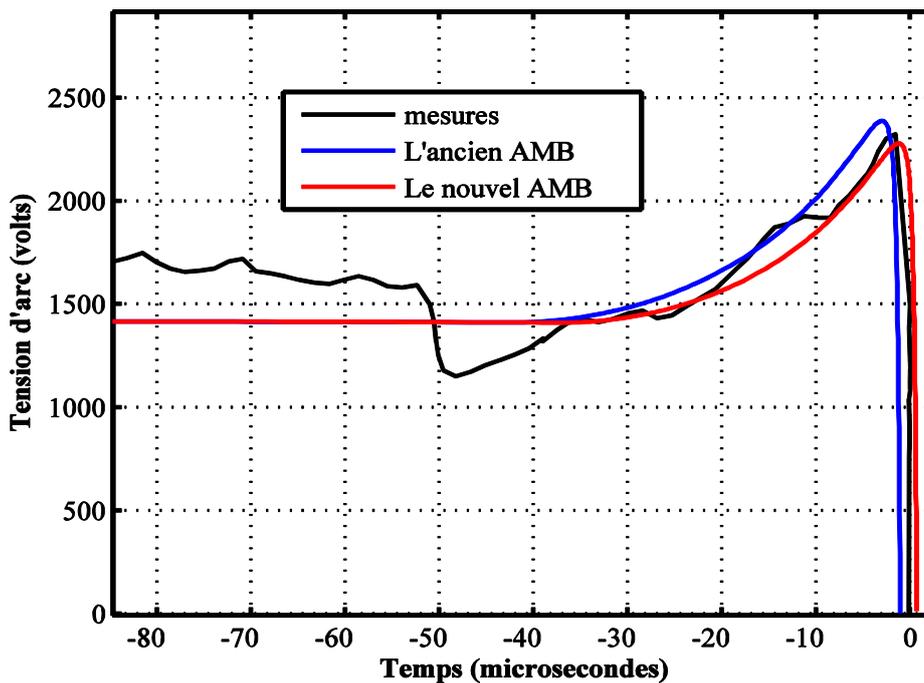


Figure 7.17. Tensions d'arc mesurée et simulée dans l'ancien et le nouvel AMB.

- [Figure 7.17](#) met en évidence une meilleure concordance entre la tension simulée par le nouvel AMB et la tension mesurée expérimentalement. Contrairement à l'ancien AMB, qui présente des écarts significatifs, donc le nouvel AMB reproduit plus fidèlement l'évolution réelle de la tension d'arc.

Tous ces avantages confirment l'amélioration de l'extension AMB et son aptitude à mieux représenter les phénomènes transitoires ayant lieu durant le processus de la coupure.

7.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait la mise à jour de l'outil AMB (arc model blockset), cette extension de MATLAB/Simulink/PSB, qui ne fonctionnait que dans MATLAB 6 et les versions antérieures. En améliorant le circuit d'essai et en enrichissant la librairie d'AMB, on a développé une nouvelle version offrant de nombreux avantages par rapport à l'ancienne ; une compatibilité avec les versions récentes de MATLAB, une procédure simplifiée pour l'intégration des modèles d'arc dans MATLAB/ Simulink/PSB, réduisant ainsi le temps de simulation, une simulation plus précise du courant, de la tension et de la TTR et une librairie plus riche contenant plus de modèles d'arc et quatre lignes artificielles.

Chapitre 08

CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

8.1. Introduction

Grâce aux propriétés excellentes, diélectriques et extinctrices de l'arc électrique du gaz SF₆, les disjoncteurs SF₆ HT sont plus fiables, plus compacts et nécessitent moins de maintenance. Cependant ils sont sensibles au défaut aux bornes et au défaut proche en ligne, des essais type doivent être effectués dans un laboratoire haute puissance pour vérifier leur aptitude d'établir et de couper un courant de défaut aux bornes et de couper un courant de défaut proche en ligne pour les disjoncteurs connectés directement à une ligne aérienne. Comme ces essais sont très coûteux, les modèles d'arc à boîte noire peuvent être utilisés pour étendre les informations obtenues durant les essais.

Les modèles d'arc à boîte noire sont utilisés pour étudier l'interaction arc-circuit et ont plusieurs applications comme le calcul de la probabilité de l'échec de la coupure, le calcul de la qualité de l'interruption et le calcul de la longueur critique de la ligne. Les modèles d'arc à boîte noire les plus connus sont les modèles de HABEDANK, de SCHWARZ, de KEMA, de TP KEMA, de MAYR modifié et de SCHAVEMAKER.

8.2. Contexte

Pour une étude correcte de l'interaction arc-circuit, il faut utiliser un modèle d'arc qui montre une bonne correspondance avec le courant et la tension d'arc mesurés durant l'essai. La performance des modèles d'arc existants varie d'un modèle à l'autre et aucun d'eux ne reproduit parfaitement les mesures autour du zéro du courant telles que celles obtenues durant les essais.

Une modélisation précise de la conductance non linéaire de l'arc ne repose pas uniquement sur le choix d'un bon modèle, mais également sur une détermination rigoureuse de ses paramètres. Dans ce but, plusieurs méthodes d'optimisation locales et globales ont été utilisées ; l'algorithme de NELDER-MEAD via la fonction *fminsearch*, la fonction d'optimisation par moindres carrés non linéaires (*lsqnonlin*), l'algorithme génétique (GA) et l'algorithme du recuit simulé (SA). La

comparaison de ces méthodes et d'autres est nécessaire pour choisir celle qui donne les paramètres les plus précis.

D'un autre côté, pour simuler convenablement les transitoires ayant lieu dans le disjoncteur à haute tension lors du processus de coupure, il faut un logiciel de simulation et un bon circuit d'essai. MATLAB avec des solveurs à pas variables est convenable pour cette tâche, mais il faut aussi un bon circuit d'essai qui donne des courbes et des valeurs correctes du courant et de la tension. L'outil AMB (Arc Model Blockset), extension de MATLAB/Simulink Power System Blockset a été conçu pour la simulation de la coupure d'un défaut proche en ligne. Actuellement AMB ne fonctionne que dans MATLAB 6 ou dans les versions antérieures, comme il ne donne pas des courbes très précises de la tension et du courant. Cette extension doit être actualisée et améliorée pour bien simuler et analyser l'interaction arc-circuit.

8.3. Contributions

La principale contribution de ce travail est le nouveau modèle d'arc proposé pour l'étude de l'interaction arc-circuit. C'est une nouvelle combinaison des modèles de base de Cassie et de Mayr qui permet une description du comportement de l'arc électrique dans le disjoncteur HT, plus proche de celle observée durant les essais. Ce modèle a été validé par des mesures autour du zéro du courant, enregistrés durant des essais de coupure du défaut proche en ligne et pour montrer son efficacité, il a été comparé aux modèles d'arc existants de HABEDANK, de SCHWARZ, de KEMA, de TP KEMA et de MAYR modifié.

En termes de précision, les résultats de simulation montrent clairement que ce modèle reproduit bien la tension et le courant dans la période d'arc et dans la période post-arc. En particulier, il reproduit la courbe de la tension d'arc mesurée mieux que les modèles cités ci-dessus. Les modèles de HABEDANK et de MAYR modifié ne reproduisent pas bien cette courbe dans l'intervalle où le courant d'arc est faible, alors que les modèles de Schwarz et de TP KEMA donnent des pics d'extinction très élevés. Quant au modèle de KEMA, il donne des valeurs exagérées du courant post-arc.

En termes de simplicité, le modèle proposé, défini par une seule équation différentielle et trois paramètres est plus simple que tous les modèles précédemment mentionnés. Cela facilite son implémentation et permet une estimation plus rapide de ses paramètres.

La deuxième contribution est la détermination précise des paramètres du modèle d'arc de SCHAVEMAKER, pris comme exemple des modèles d'arc à boîte noire. A cet effet sept méthodes d'optimisation non linéaire sans contraintes locales et globales ont été comparées ; six algorithmes

sont implémentés dans MATLAB (l'algorithme de NELDER-MEAD via la fonction *fminsearch*, l'algorithme à région de confiance via la fonction d'optimisation des moindres carrés non linéaires (*lsqnonlin*), l'algorithme génétique (*GA*), l'algorithme du recuit simulé (*SA*), l'algorithme de HOOKE-JEEVES (appelé *Pattern Search (PS)*), l'algorithme de quasi-NEWTON via la fonction d'optimisation *fminunc*) et l'algorithme d'optimisation par essaim de particules (PSO), réalisée dans le cadre de ce travail.

Les algorithmes d'optimisation locale de *fminsearch*, de *lsqnonlin* et de *fminunc* ont convergé plus rapidement mais elles n'ont pas donné, dans la plupart des cas, des valeurs précises des paramètres. Les algorithmes d'optimisation globale utilisés, à savoir, la technique d'optimisation par essaim de particules, l'algorithme génétique et l'algorithme du recuit simulé ont donné de bonnes valeurs des paramètres. Bien que la méthode de HOOKE-JEEVES est une méthode d'optimisation globale, elle n'a pas donné de bons résultats.

Pour le modèle de SCHAVEMAKER, la méthode de l'algorithme génétique est la plus appropriée pour les disjoncteurs 245kV et 123kV, alors que la méthode du recuit simulé est la plus appropriée pour le disjoncteur 145kV. Pour un disjoncteur donné et un modèle d'arc à boîte noire donné, la méthode la plus appropriée, peut être déterminée en comparant les méthodes du recuit simulé, de l'algorithme génétique et d'optimisation par essaim de particules.

La troisième contribution concerne la simulation des transitoires dans les disjoncteurs à haute tension. MATLAB/*Simulink Power System Blockset* peut être utilisé avec succès car il a des solveurs à pas variables. Dans ce travail, l'extension AMB (*Arc Model Blockset*) a été actualisée et améliorée. La nouvelle version d'AMB présente beaucoup d'avantages par rapport à l'ancienne; elle fonctionne dans les versions récentes de MATLAB, donne un temps de simulation plus court, une forme correcte de la TTR et des valeurs simulées plus précises, comme elle comprend plus de modèles d'arc et quatre lignes artificielles.

8.4. Perspectives

En perspective, il est essentiel d'identifier la méthode d'optimisation la plus adaptée aux autres modèles d'arc. De plus, il convient de proposer des modèles d'arc encore plus précis que celui développé dans ce travail. Par ailleurs, on suggère de développer le « *Digital Testing* » qui représente une opportunité prometteuse, offrant de nouvelles possibilités concernant les essais de disjoncteurs HT.

Références Bibliographiques

- [1] P.H. Schavemaker, L. van der Sluis, R.P.P. Smeets and V. Kertész, “Digital testing of high-voltage circuit breakers”, *IEEE Computer Applications in Power*, Vol. 13, No. 2, April 2000, pp. 52-56.
- [2] L. Van der Sluis, *Transients in power systems*, John Wiley & Sons Ltd, 2001.
- [3] F. Bizzarri, G. Grusso, M. Bonaconsa, and A. Brambilla, “A reliable and efficient black-box model of SF6 medium voltage circuit breakers,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 119, July 2020, pp. 1-8.
- [4] F.P. Pessoa, J. S. Acosta, and M.C. Tavares, “Parameter estimation of DC black-box arc models using genetic algorithms,” *Electric Power System Research*, Vol. 198, September 2021, pp. 1-8.
- [5] A. Khakpour, S. Franke, D. Uhrlandt, S. Gorchakov, and R.P. Methling, “Electrical Arc Model Based on Physical Parameters and Power Calculation,” *IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE*, Vol. 43, No. 8, August 2015, pp. 2721-2729.
- [6] P. H Schavemaker and L. van der Sluis, “ The Arc Model Blockset ”, *Proceedings of the Second IASTED International Conference POWER AND ENERGY SYSTEMS (EuroPES)*, Crete, Greece, June 25-28, 2002, pp. 644-648.
- [7] A. Iturregi, E. Torres, I. Zamora, and O. Abarrategui, “ High voltage circuit breakers:SF6 vs. vacuum”, *International conference on renewable energies and power quality*, Valencia, Spain, April 15.17, 2009, pp. 633-638.
- [8] A. Sepehri, Brief History of the Past and Present of High voltage Vacuum Circuit Breakers, November 2022,<https://switchgearcontent.com>
- [9] Théodore Wildi, Gilbert Sybille, *Électrotechnique* , (4^e éd.). 2005 ;Ed. De Boeck.
- [10] D. Dufournet, *Appareillage électrique d'interruption HT (Partie 1)*, Technique de l'ingénieur 4 690, Mai, 2001.
- [11] B. Jucker, and G. Rivetti, ABB Review Special Report High-voltage products, pp. 2-52, March. 2013, <https://new.abb.com>
- [12] Y. Pelenc, *Appareillage électrique d'interruption à haute tension*, Technique de l'ingénieur D 4700, septembre, 1988.
- [13] S. Theoleyre, *Les techniques de coupure en MT*, CT 193, Groupe Schneider. Édition septembre 1998.
- [14] J. Pasteau,*Introduction à l'appareillage très haute tension*, CT 127, Schneider Electric, pp. 1-27, édition juin 1984
- [15] D. Koch, *Propriétés et utilisations du SF6 dans les appareils MT et HT*, CT 188, édition février 2003.
- [16] D. Dufournet, *AC High voltage circuit breakers*, IEEE Switchgear Committee Portland, Maine USA, October, 2017.
- [17] R. D. Garzon, *High-Voltage Circuit Breakers, design and applications*, second edition, Marcel Dekker, Inc., New York, 2002.
- [18] High-Voltage Switchgear for Substations, Siemens Power Engineering Guide · Transmission and Distribution · 4th Edition
- [19] E. Nasrallah, F. Brikci, and S. Perron, *Make/Break Contacts In power circuit breakers*, 2006.<https://electricenergyonline.com/energy/magazine>
- [20] J. Mulindi, *SF6 circuit breaker: Features, operation & applications*, Mai 2023. <https://www.electricalandcontrol.com>

- [21] A. Sepehri, *FAQ about SF6 Alternative Gas in High Voltage Circuit Breakers for Electrical Engineers*, Mai, 2023. <https://www.linkedin.com>
- [22] A. Sepehri, *Development SF6 Alternative Gases in Switchgears*, November 2019. <https://switchgearcontent.com>
- [23] B. Metz-Noblat, F. Dumas, and C. Poulain, *Calcul des courants de court-circuit*, CT 158, édition Septembre 2005
- [24] V. Zajik, *Appareils de commutation dans les postes haute tension*, Cours, Université de Québec, Canada, 1984.
- [25] L. Van der Sluis, W.R. Rutgers, "The Comparison of Test Circuits with Arc Models", *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 10, No. 1, Janvier 1995, pp. 280-285.
- [26] D. Dufournet, *Appareillage électrique d'interruption HT. Annexes*, Technique de l'ingénieur D4696, Août 2001.
- [27] W. A. van der Linden, and L. van der Sluis, "A new artificial line for testing high-voltage circuit breakers," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-102, No. 4, April, 1983, pp. 797-803.
- [28] R. Smeets, *High-Power Testing of Circuit Breakers*, IEEE tutorial on design and applications of High-Voltage Circuit Breakers, July 2008.
- [29] J. L. Guardado, G. Maximov, S. E. Melgoza, J. L. Naredo and P. Moreno, "An Improved Arc Model Before Current Zero Based on the Combined Mayr and Cassie Arc Models", *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 20, No. 1, January, 2005, pp. 138-142.
- [30] A. M. Cassie, *Théorie Nouvelle des Arcs de Rupture et de la Rigidité des Circuits*, CIGRE, Report 102, 1939.
- [31] O. Mayr, "Beitrag zur Theorie des Statischen und des Dynamischen Lichtbogens," *Archiv für Elektrotechnik*, Vol. Band 37, No. Heft 12, 1943, pp.588–608.
- [32] O. Mayr, "Über die Theorie des Lichtbogens und seiner Löschung," in *Elektrotechnische Zeitschrift*, Vol. Jahrgang 64, Dezember 16, 1943, pp.645–652.
- [33] L.R. Orama and B. Rodriguez, "Numerical Arc Model Parameter Extraction for SF6 Circuit Breaker Simulations", *International conference on Power Systems Transients, IPST, New Orleans, USA, 2003*, pp.1–5.
- [34] L. Van der Sluis, W.R. Rutgers, C.G.A. Koreman, "A physical arc model for the simulation of current zero behavior of high-voltage circuit breakers", *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 7, No. 2, April, 1992, pp. 1016-1022.
- [35] U. Habedank and A.G Siemens, "Application of a New Arc Model for the Evaluation Short-circuit breaking Tests", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 8, N° 4, October, 1993, pp. 1921-1925.
- [36] R. Smeets, V.Kertesz, S. Nishiwaki, K. Suzuki, "Performance Evaluation of High Voltage Circuit Breakers By Means of Current Zero Analysis", *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, Yakohama, Japan, 6.10 October, 2002, pp. 424-429.
- [37] P.H. Schavemaker, and L. Van der Sluis, "An improved Mayr-type arc model based on current-zero measurement", *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 15 No. 2, April 2000, pp.580-584.
- [38] T. Ohtaka, V. Kertesz, and R.P.P. Smeets, "Novel black -box arc model validated by high-voltage circuit breaker testing", *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 33 No 4, October, 2017, pp. 1835-1844.
- [39] P.H. Schavemaker, "Digital testing of high-voltage SF6 circuit breakers," Ph.D. dissertation, Delft University of Technology, Netherland, November, 2002
- [40] P. H. Schavemaker, and L. van der Sluis, "Quantification of the interrupting performance of high-

- voltage circuit breakers,” *IEE Proc.-Sci. Meas. Technol.*, Vol. 149, No. 4, July, 2002, pp.153-157.
- [41] P. H. Schavemaker, A.J.P. De Lange, and L. van der Sluis, “Circuit breakers arc model computations for critical line length determination,” *Proceedings of the International Conference on Power System Technology*, Perth, Australia, December 2000, pp. 915-920.
- [42] P.H. Schavemaker, and L.Van der Sluis, “A Statistical Arc Model for Digital Testing of Circuit Breakerst”, *Proceedings of the Second IASTED International Conference POWER AND ENERGY SYSTEMS (EuroPES)*, Crete, Greece June 25.28, 2002, pp. 655-660.
- [43] F. Latri, “Modélisation de l’arc électrique dans les disjoncteurs SF6 haute tension, ” Mémoire de magister.Université Ferhat Abbas, Sétif1, UFAS1, Algérie, 2005
- [44] Y. Pelenc, *Appareillage électrique d’interruption à haute tension*, Technique de l’ingénieur, D 4700, D4701, D 4702, D 4703
- [45] F. Latri, and A. Gherbi, “A new Mayr-type arc model for the arc-circuit interaction study,” *International Journal on Electrical Engineering and Informatics (IJEEI)*, Vol. 16, N° 4, December2024, pp.519-530.
- [46] G. Zhang, Y. Liu, L. Qi, Y. Xu, and M. Kurrat, “Parameter estimation of black box arc model based on heuristic optimization algorithms,” *IEEE HOLM Conference on Electrical Contacts*, USA, 4.18 October, 2018, pp. 66-70.
- [47] R.P.P. Smeets and V. Kertesz, “Evaluation of high-voltage circuit breaker performance with a validated arc model”, *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 147, N° 2, March 2000, pp.121-125.
- [48] F. Latri, S. Belkhiat, A. Bayadi “Tests des disjoncteurs SF6 haute tension par les modèles à boîte noire”, *Proceeding du premier congrès international sur le génie électrique*, 10-12 Octobre 2004, Sétif, Algérie.
- [49] V. Rashtchi, A. Lotfi, and A. Mousavi, “Identification of KEMA arc model parameters in high voltage circuit breaker by using of Genetic Algorithm,” 2nd *IEEE International Conference on Power and Energy*, Johor Baharu, Malaysia, 2008, pp. 1515-1517.
- [50] T.Chmielewski, T. Kuczek1, and P.Oramus1, “Optimization of electric arc model parameters based on simplex annealing and genetic algorithms”, *MATEC Web of Conferences 252, 05001*, 2019, pp. 1-6.
- [51] D. Boudjehem and N. Mansouri, “A two phase local global search algorithm using new global search strategy,” *Journal of Information and Optimization Sciences*, June 2013, pp. 425-436.
- [52] Yu-Hong Dai, “Convergence properties of the BFGS algorithm,” *SIAM J. OPTIM.*, Vol. 13, No. 3, 2002, pp. 693-701
- [53] K. I. M. Mckinnon, “Convergence of the Nelder–Mead simplex method to a non stationary point”, *SIAM J. OPTIM.*,Vol. 9, No. 1, 1998, pp. 148–158,
- [54] R. Byrd. R.B. Schnabel and G.A. Shultz, “A trust region algorithm for nonlinearly constrained optimization,” *SIAM Journal on Numerical Analysis*, Vol. 24, No. 5, October,1987, pp.1152-1170,
- [55] G.S Kirgat, and A.N Surde, “Review of Hooke and Jeeves Direct Search Solution Method Analysis Applicable To Mechanical Design Engineering,” *International journal of innovations in engineering research and technology [IJERT]*, Vol. 1, No 2, December 2014, pp. 1–14.
- [56] M. Raghava, B. Rambabu, V. Dattatreya, “Hooke and Jeeves Pattern Search Method and Global Optimal Solution,” *CVR Journal of Science and Technology*, Vol. 17, December 2019, pp. 67–72.
- [57] Z. S. Abo-Hammour, O. M.K. Alsmadi, A. M. Al-Smadi, M. I. Zaqout and M. S. Saraireh, “ARMA model order and parameter estimation using genetic algorithms,” *Mathematical and Computer Modeling of Dynamical Systems*, Vol. 18, No. 2, April 2012, pp. 201–221.
- [58] T. Binder, C. Heitzinger and S. Selberher, “A Study on global and local optimization techniques for TCAD analysis tasks,” *IEEE transactions on computer-aided design of integrated circuits and systems*, Vol. 23, No. 6, June 2004, pp.814-822.

-
- [59] Baeldung, Simulated Annealing Explained, 5 June 2024, <https://www.baeldung.com/cs/simulated-annealing>
- [60] J. Kennedy, and R. Eberhart, "Particle Swarm Optimization," *Proceedings of the IEEE International Joint Conference on Neural Networks, IEEE Press*, Vol. 8, No. 3, 1995, pp. 1943–1948.
- [61] Q. Bai, "Analysis of Particle Swarm Optimization algorithm," *Computer and Information Science*, Vol. 3, No. 1, February 2010, pp. 180-184.
- [62] F. Latri, A. Gherbi and M. N. Alam, "Estimation of the Schavemaker arc model parameters for high-voltage circuit breakers," *Proceedings of the Electrical Engineering International Conference EEIC'23*, Bejaia, Algeria, December 2023, pp. 226-231.
- [63] P. H. Schavemaker, A.J.P. Lange, and L. van der Sluis, "Comparison between three tools for electrical transients computation," *Proceeding of the IPST (International conference on Power Systems Transients)*, Budapest, Hungary, June 20-24, 1999, pp.13-18.
- [64] P. H Schavemaker, *Arc Model Blockset for use with MATLAB Simulink and Power System Blockset*, Delft University of Technology, User's Guide, Version 2, 2001.
- [65] P. H Schavemaker, and L. van der Sluis, "The Arc Model Blockset," *Proceedings of the Second IASTED International Conference POWER AND ENERGY SYSTEMS (EuroPES)*, Crete, Greece, June 25-28, 2002, pp. 644-648.
- [66] F. Latri, "Updating and Improvement of the A.M.B. program," *Proceedings of the Electrical Engineering International Conference EEIC'19* Bejaia, Algeria, December 04-05, 2019, pp.87-92.
- [67] A.K. Bystruev, N.M. Chernyshev, V.C. Gontchar, P.A. Ilyin, V.V. Kaplan, and I.P. Sheheglov, "Some aspects of reproducing the standards tests conditions in laboratories," CIGRE, Report 13-77(SC)33, 1977.

ملخص:

في هذا العمل، تم اقتراح نموذج جديد لوصف سلوك القوس الكهربائي داخل فاصل الدارة ذي الجهد العالي أثناء قطع تيار القصر. يتميز هذا النموذج بالبساطة مقارنةً بنماذج ماير المعدل، هابيدنك، شوارز، كيما، وTP كيما، كما أنه يوفر دقة أعلى في استنساخ منحنى التيار وجهد القوس الكهربائي.

لتحقيق تمثيل دقيق للناقلية غير الخطية للقوس الكهربائي، لا يكفي استخدام نموذج جيد فحسب، بل يجب تحديد عوامله بأقصى دقة ممكنة. لهذا الغرض، تم تطبيق عدة خوارزميات تحسين، منها محلية وإجمالية، لاستخراج عوامل نماذج القوس الكهربائي آخذين نموذج شفايكر كمثال. وأظهرت نتائج المحاكاة أن خوارزميات الجينات (GA)، أسراب الطيور (PSO)، ومحاكاة التخمير (SA) هي الأكثر كفاءة. بالنسبة لنموذج شفايكر، فإن خوارزمية الجينات هي الأنسب لفاصل الدارة ذات الجهود 245 kV و123 kV، بينما تعتبر خوارزمية محاكاة التخمير الأكثر فاعلية لفاصل الدارة 145 kV.

تم تحديث وتحسين AMB (مجموعة نماذج القوس الكهربائي)، وهي أداة مدمجة في MATLAB/SIMULINK لدراسة التفاعل بين القوس الكهربائي والدائرة أثناء قطع تيار القصر القريب من الخط. يتكون AMB من دارة تجربة ومكتبة تضم عدة نماذج للقوس الكهربائي. حاليًا، AMB لا يعمل إلا على MATLAB 6 والإصدارات السابقة، لذا تم تحديثه عبر تحسين دارة التجربة، بإضافة أربعة خطوط اصطناعية، ونموذجين جديدين. بالمقارنة مع النسخة القديمة، يوفر AMB الجديد زمن محاكاة أقل، دقة أكبر لنتائج التيار والجهد، وشكلاً أكثر واقعية لجهد الاستعادة العابر.

كلمات مفتاحية: نموذج القوس الكهربائي، فاصل الدارة ذو الجهد العالي، جهد الاستعادة العابر، خوارزميات التحسين، تيار القصر القريب من الخط.

Résumé :

Ce travail propose un nouveau modèle d'arc électrique destiné à représenter le comportement de l'arc dans un disjoncteur haute tension. Comparé aux modèles existants, tels que ceux de MAYR modifié, HABEDANK, SCHWARZ, KEMA et TP KEMA, ce modèle se distingue par sa simplicité et sa meilleure fidélité dans la reproduction des courbes de tension et de courant d'arc mesurées.

Une modélisation précise de la conductance non linéaire de l'arc ne repose pas uniquement sur le choix d'un bon modèle, mais également sur une détermination rigoureuse de ses paramètres. À cette fin, plusieurs méthodes d'optimisation, locales et globales, ont été évaluées pour l'estimation des paramètres des modèles d'arc à boîte noire, en prenant le modèle de SCHAVEMAKER comme exemple. Les résultats de simulation montrent que les méthodes heuristiques, notamment l'algorithme génétique, le recuit simulé et l'optimisation par essai de particules, offrent les performances les plus satisfaisantes. Pour le modèle de SCHAVEMAKER en particulier, l'algorithme génétique s'avère le plus adapté pour les disjoncteurs 245 kV et 123 kV, tandis que le recuit simulé convient mieux au disjoncteur 145 kV.

L'outil AMB (Arc Model Blockset), extension de MATLAB/Simulink Power System Blockset, est utilisé pour l'étude de l'interaction arc-circuit lors de la coupure d'un courant de défaut proche en ligne. Limité aux anciennes versions de MATLAB, AMB a été actualisé et amélioré. Le nouvel AMB offre un temps de simulation réduit, des résultats plus précis, et une représentation plus fidèle de la tension transitoire de rétablissement. Comme il comprend plus de modèles d'arc et quatre lignes artificielles.

Mots Clés : Modèle de l'arc électrique, Disjoncteur haute-tension, Estimation des paramètres, Défaut proche en ligne, Tension transitoire de rétablissement.

Abstract :

This work presents a new arc model to describe the behavior of the electric arc in high-voltage circuit breakers during the interruption process. Compared to existing models such as HABEDANK, SCHWARZ, KEMA, TP KEMA, and the modified MAYR arc models, the proposed model is simpler and provides a more accurate representation of measured arc voltage and current waveforms.

Accurate modeling of nonlinear arc conductance requires both a reliable arc model and precise parameter estimation. To achieve this, several local and global optimization methods were applied to determine the parameters of the SCHAVEMAKER arc model (taken as example of the black box arc models), some of which have been previously used in literature. Simulation results show that heuristic optimization methods —genetic algorithm, simulated annealing, and particle swarm optimization— are the most effective. For the SCHAVEMAKER arc model specially, the genetic algorithm is best suited for 245kV and 123kV circuit breakers, while simulated annealing is more appropriate for 145kV circuit breakers.

AMB (Arc Model Blockset), an extension of MATLAB/Simulink Power Systems Blockset, was updated and improved. AMB is used to analyze the arc-circuit interaction during short-line fault interruption. Previously, AMB was only compatible with MATLAB 6 and earlier versions. AMB was first updated and then improved by modifying the test-circuit and adding four artificial lines and two newly incorporated arc models. These improvements result in faster simulation times, more precise current and voltage simulations, and a more accurate transient recovery voltage (TRV) representation. This work provides a more efficient and reliable tool for studying arc behavior in high-voltage circuit breakers.

Key Words: Arc model, High-voltage circuit breaker, Parameter estimation, Short-line fault, Transient recovery voltage.