

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS, SÉTIF UFAS (ALGERIE)

MEMOIRE

Présenté à la faculté des sciences de l'ingénieur

Département d'Electrotechnique

Pour l'Obtention du Diplôme de

MAGISTER

Options: Réseaux Electriques

Par M^{elle} Fatiha LATRI

Thème

Modélisation de l'Arc Electrique dans les Disjoncteurs SF6

Soutenu le : / /2005 devant la commission d'examen

M ^R K. ZEHAR	Professeur à l'université de Sétif	Président
M ^R M. MOSTEFAI	M.C. à l'université de Sétif	Examineur
M ^R N. KHENFER	M.C. à l'université de Sétif	Examineur
M ^R S. BELKHIAT	M.C. à l'université de Sétif	Rapporteur

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

- *Mes très chers parents.*
- *Mes frères et sœurs, neveux et nièces.*
- *Mon amie intime Souad Djarmouni.*
- *Mes amies Amel, Warda, B. Nadjjet, H. Nadjjet, Samia et Nabila.*
- *Mon enseignant M^r Kharmouche Ahmed*

Remerciements

Avant tout, je remercie Dieu de m'avoir aider et faciliter les choses et le prophète Mohamed qui nous a appris la valeur de la science.

Je remercie :

- *Monsieur le président de jury, le professeur Khaled Zehar et messieurs les membres de jury, les docteurs Mohamed Mostefai et Nabil Khenfer pour l'honneur qu'ils m'ont fait en participant au jury de soutenance.*
- *Tous mes enseignants de l'année D.E.A.*
- *Mon encadreur, Dr Saâd Belkhiat, que je respecte beaucoup, pour sa disponibilité, son suivi du travail et son aide précieuse.*
- *Les chercheurs Pieter Schavemaker , Lionel Orama et Bienvenido Rodriguez d'avoir répondu aimablement à mes questions.*
- *Dr Abdelkrim Keraghel et Mr Lahcène Bencheikh pour leur aide en mathématiques.*
- *M^{elle} Hadded Warda, M^{elle} Guenifi Naima et Mr Lounis Said.*

Table des matières

INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 PHENOMENES D'INTERRUPTION EN COURANT ALTERNATIF	
1.1 Introduction.....	3
1.2 Interruption d'un courant continu.....	4
1.3 Interruption d'un courant alternatif.....	6
1.3.1 Interrupteur idéal.....	8
1.3.1.1 Difficultés de conception d'un interrupteur idéal.....	9
1.3.2 La coupure grâce à l'arc électrique.....	11
1.3.2.1 Avantages de la coupure avec l'arc électrique.....	11
1.3.2.2 Processus de la coupure avec l'arc électrique.....	11
1.3.2.3 Conclusion.....	14
1.3.3 Pointe d'extinction.....	15
1.3.4 La TTR dans les normes.....	15
1.4 Conclusion.....	16
CHAPITRE 2 L'ARC ET LE COURANT POST-ARC DANS LES DISJONCTEURS	
SF6 HAUTE TENSION	
2.1 Introduction.....	17
2.2 L'hexafluorure de soufre (SF6).....	18
2.2.1 La molécule du SF6.....	18
2.2.2 Propriétés chimiques.....	18
2.2.3 Propriétés physiques.....	18
2.2.3.1 Propriétés diélectriques.....	18
2.2.3.2 Propriétés thermiques.....	19
2.3 L'arc électrique dans le SF6.....	21
2.4 Le courant post-arc dans les disjoncteurs SF6 HT.....	24
2.4.1 Le développement du système de mesure.....	25
2.5 Informations déduites du courant post-arc.....	25
2.5.1 Disjoncteur en bon état.....	25

Table des matières

2.5.2	Dégradation de la chambre de coupure.....	25
2.5.2.1	La première série de tests de KEMA.....	26
2.5.2.2	La deuxième série de tests de KEMA.....	27
2.5.3	Courant post-arc et la probabilité de l'échec de la coupure.....	28
2.5.4	Relation entre la conductance au zéro du courant et le courant post-arc....	29
2.5.5	Relation entre le courant post-arc et la TTR	30
2.5.5.1	Influence du courant post-arc sur la TTR.....	30
2.5.5.2	Vérification de la présence d'un courant post-arc par la TTR.....	31
2.5.6	Le courant post-arc n'est pas très reproductible.....	32
2.6	Conclusion.....	33

CHAPITRE 3 MODELISATION DES DISJONCTEURS SF6 HAUTE TENSION

3.1	Introduction.....	35
3.2	Représentation des modèles d'arc à boîte noire.....	35
3.3	Les modèles de base.....	36
3.3.1	Le modèle de Mayr.....	36
3.3.2	Le modèle de Cassie.....	38
3.3.3	Comparaison des deux modèles.....	39
3.4	Les modèles d'arc améliorés.....	39
3.4.1	Le modèle de Mayr modifié.....	40
3.4.2	Le modèle de Habedank.....	40
3.4.3	Le modèle de Schwarz.....	41
3.4.4	Le modèle d'Avdonin.....	42
3.4.5	Le modèle de KEMA.....	43
3.4.6	Le modèle de Schavemaker.....	45
3.5	Conclusion.....	46

CHAPITRE 4 SIMULATIONS NUMERIQUES

4.1	Introduction.....	47
-----	-------------------	----

PARTIE A

4.2	Technique de simulation dans l'AMB.....	48
4.2.1	Implémentation des modèles d'arc dans le Simulink de MATLAB.....	48

Table des matières

4.2.2	Reproduction du processus d'interruption par l'AMB.....	50
4.2.2.1	La séparation des contacts commence à $t=0$	51
4.2.2.2	La séparation des contacts commence à $t=8.24$ ms.....	53
PARTIE B		
4.3	Comparaison des modèles d'arc.....	55
4.3.1	les modèles d'arc à comparer.....	55
4.3.2	Conditions nécessaires à la comparaison des modèles d'arc.....	56
4.3.3	Extraction des paramètres des modèles d'arc.....	56
4.3.3.1	Description de la logique des programmes.....	56
4.3.3.2	Importation des données du Simulink vers l'environnement MATLAB.....	57
4.3.3.3	Courbes mesurées données par les programmes.....	57
4.3.3.4	Identification des paramètres.....	59
	1/ Le modèle de Cassie.....	60
	2/ Le modèle de Mayr.....	61
	3/ Le modèle de Mayr modifié.....	62
	4/ Le modèle de Schavemaker.....	63
4.4	Simulations numériques.....	64
4.4.1	Le modèle de Cassie.....	64
4.4.2	Le modèle de Mayr.....	68
4.4.3	Le modèle de Mayr-modifié.....	72
4.4.4	Le modèle de Schavemaker.....	76
4.4.5	Tableau récapitulatif.....	80
4.5	Conclusion.....	81

Conclusion

Bibliographie

Introduction

Le disjoncteur SF6 haute tension est l'un des composants les plus complexes du système de puissance, car en plus de son rôle normal d'isolation, de conduction et d'interruption des courants de charge, il protège le réseau contre les courants de court-circuit. Ces courants de très fortes intensités, produisent des arcs de très hautes températures allant de 15 000 à 20 000 °K. Donc le disjoncteur doit être bien conçu sinon les dégâts seront graves.

Les disjoncteurs SF6 haute tension sont conçus et optimisés dans des laboratoires haute puissance à travers des séries de tests, mais vu la grande puissance impliquée, la taille physique des équipements et la technologie spéciale, les tests sont très coûteux et consomment beaucoup de temps. Pour surmonter ces sophistications expérimentales, techniques et économiques, des modèles d'arc efficaces doivent être développés.

Les modèles d'arc des disjoncteurs SF6 haute tension peuvent être classés dans trois catégories; les modèles thermiques et diélectriques, les modèles empiriques et les modèles à boîte noire. Ces derniers sont utilisés pour étudier l'interaction entre l'arc dans le disjoncteur et le circuit à interrompre, donc le modèle d'arc simule le comportement non linéaire de l'arc et à cause de ce comportement fortement non linéaire et des constantes de temps très petites impliquées, un traitement numérique du problème arc-circuit est nécessaire.

Ce travail a pour but l'étude de la modélisation de l'arc électrique dans les disjoncteurs SF6 haute tension par les modèles à boîte noire. Il est composé de quatre chapitres :

Le premier chapitre rappelle les phénomènes d'interruption en courant alternatif et leur complexité.

Le second chapitre expose les propriétés exceptionnelles du gaz SF6, l'amorçage et l'extinction de l'arc électrique dans ce gaz. Il expose aussi un état de l'art des travaux scientifiques menés dans le domaine du courant post-arc. Ce courant mal connu auparavant est devenu une caractéristique du disjoncteur SF6 haute tension.

Introduction

Le troisième chapitre résume l'origine physique des modèles d'arc à boîte noire. Comme il expose les modèles à boîte noire de base et les modèles à boîte noire améliorés les plus utilisés et rencontrés dans la littérature.

Le quatrième chapitre est consacré aux simulations numériques du problème de la coupure par disjoncteur SF6 HT. Les modèles de Cassie, de Mayr, de Mayr modifié et de Schavemaker implémentés dans l'AMB sont comparés et discutés. Pour l'extraction des paramètres des modèles à comparer, quatre programmes basés sur la méthode des moindres carrés et la fonction d'optimisation *fmins* de MATLAB sont développés. Les paramètres trouvés sont introduits dans le logiciel AMB pour lancer le processus d'interruption par chacun des modèles cités ci-dessus. Les résultats des simulations sont discutés et comparés.

Finalement une conclusion générale achève ce travail.

Phénomènes d'interruption en courant alternatif

1.1 Introduction

Depuis les centrales de production, l'énergie électrique est acheminée jusqu'aux points de consommation par un réseau électrique. Il est indispensable de pouvoir couper le courant en tout point du réseau pour des raisons d'exploitation, de maintenance ou pour protéger le réseau lorsqu'il y a un défaut. Il faut également pouvoir le rétablir dans diverses situations normales ou de défaut. Pour cela on emploie des appareils de coupure dont le choix dépend de la nature des courants à couper et du domaine d'application.

En haute tension les appareils de coupure sont le sectionneur, le sectionneur de mise à la terre, l'interrupteur, le contacteur et le disjoncteur. Ces appareils sont formés de contacts et à la coupure d'un circuit naît généralement un arc électrique entre ces contacts, seuls les sectionneurs échappent à cette contrainte, puisqu'ils sont prévus pour ouvrir ou fermer des circuits qui ne sont parcourus par aucun courant [1, 2].

Parmi tout l'appareillage électrique d'interruption haute tension, le disjoncteur SF6 occupe la première place. Les phénomènes d'interruption sont très compliqués et ne peuvent pas être expliqués à l'aide d'une logique relativement simple, par conséquent la maîtrise de l'arc électrique dans ce disjoncteur est soumise, pour une grande part, à l'imagination des chercheurs.

Ce chapitre rappellera les phénomènes d'interruption, particulièrement en courant alternatif et montrera le rôle fondamental joué par l'arc électrique pour dominer l'interruption des courants électriques.

1.2 Interruption d'un courant continu

Bien que l'utilisation du courant continu soit peu répandue en haute tension, l'étude des phénomènes liés à son interruption facilite la compréhension des problèmes de la coupure en courant alternatif.

Examinons le cas le plus simple d'un circuit inductif (R, L) alimenté en courant continu (Fig. 1-1) et expliquons le cas simplifié relatif à un fonctionnement sur court-circuit (l'impédance du circuit à couper est nulle) [2, 3].

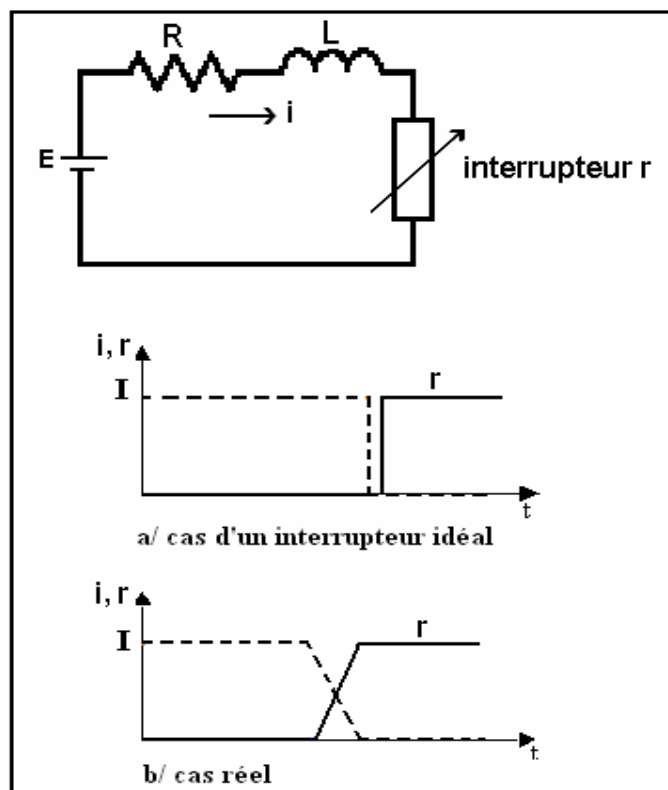


Fig. 1-1 — Interruption d'un courant continu [3]

Loi d'Ohm

$$E - Ri - L \frac{di}{dt} - ri = 0 \quad (1-1)$$

L'énergie de coupure

$$W = \int_0^T ri^2 dt \quad (1-2)$$

$t=0$ l'instant d'ouverture des contacts

$t=T$ temps de coupure

Pour réaliser l'interruption du courant dans ce circuit, il faut et il suffit que la résistance r de l'interrupteur, supposée initialement nulle, augmente et devient infinie, l'appareil devient isolant. C'est le cas d'un interrupteur « idéal » (Fig. 1-1 a), la coupure est quasi instantanée et l'énergie de coupure $ri^2 T$ dissipée entre les contacts est nulle.

En réalité, au moment de la coupure, la résistance r du disjoncteur ci-dessus, va passer d'une valeur presque nulle à une valeur très élevée, ce qui conduit au graphe de la figure 1-1 b.

En multipliant l'équation (1-1) par le courant i , elle devient:

$$Ei - Ri^2 - Li \frac{di}{dt} - ri^2 = 0 \quad (1-3)$$

De l'équation (1-3) on peut tirer:

$$ri^2 dt = (E - Ri)idt - Lidi$$

D'où l'énergie de coupure s'écrit:

$$W = \int_0^T ri^2 dt = \int_0^T (E - Ri)idt - \int_I^0 Lidi \quad (1-4)$$

$i=I$ courant à couper à l'instant d'ouverture des contacts

$i=0$ courant après la coupure

- L'intégrale par rapport au temps $\int_0^T (E - Ri)idt$ dépend du temps de coupure.

- L'intégrale par rapport au courant à couper $-\int_I^0 Lidi$ représente l'énergie

électromagnétique:

$$-\int_I^0 Lidi = \frac{1}{2} LI^2 \quad (1-5)$$

Après intégration, l'équation (1-4) devient:

$$W = ri^2 T = (E - Ri)iT + \frac{1}{2} LI^2 \quad (1-6)$$

L'énergie dépensée sous forme d'effet Joule dans l'interrupteur au cours de la coupure est d'autant plus faible que la variation de la résistance de ce dernier est plus rapide.

Cependant si la variation de la résistance est infiniment rapide, celle du courant l'est également, en conséquence:

- l'énergie électromagnétique $\frac{1}{2}LI^2$ (emmagasinée initialement dans l'inductance propre du circuit) qu'il faut dépenser dans l'interrupteur est considérable, l'interrupteur risque d'être endommagé.
- la f.é.m. induite dans l'inductance propre du circuit, $L\frac{di}{dt}$, devient infiniment grande, cette surtension illimitée est inadmissible.

Dans la pratique on fixe une limite à ne pas dépasser pour la valeur de la surtension $L\frac{di}{dt}$, d'où la variation du courant et par conséquent celle de la résistance de l'interrupteur se trouve imposée. L'énergie dépensée au cours de la coupure est alors supérieure à l'énergie électromagnétique du circuit [2].

1.3 Interruption d'un courant alternatif

Abordons maintenant le cas de l'interruption d'un courant alternatif [1, 2, 3] dont les conséquences pratiques sont plus importantes.

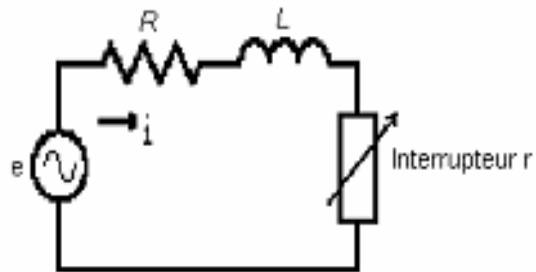


Fig. 1-2 — Circuit alimenté en courant alternatif

$$e = E_m \sin(\omega t) \quad (1-7)$$

$$i = I_m \sin(\omega t - \varphi) \quad (1-8)$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{|Z|} \quad (1-9)$$

$$|Z| = \sqrt{L^2 \omega^2 + R^2} \quad (1-10)$$

ω_0	la pulsation du réseau
e	tension du réseau
i	courant dans le réseau
Z	l'impédance du réseau
φ	déphasage entre le courant et la tension du générateur.

En courant alternatif, il faut mettre le point sur trois choses importantes :

1 Le passage naturel du courant par zéro

La tension du générateur s'inverse à chaque alternance et le courant passe naturellement par zéro. En haute tension en particulier, le circuit est inductif, il l'est encore plus dans le cas d'un court-circuit, la résistance R étant faible devant l'inductance L et le déphasage entre le courant et la tension du générateur est voisin de $\pi/2$, donc cette dernière s'inverse lorsque le courant passe par le voisinage de son maximum positif.

2 L'interrupteur doit être formé d'une résistance

La condition nécessaire et suffisante de la coupure est que l'impédance de l'interrupteur (Fig. 1-2) croisse et devienne infinie. Or en pratique, on ne peut commander par variation d'inductance L ou de capacitance $\frac{1}{C}$ que des interrupteurs de faibles puissances (problème d'encombrement et de coût), donc on doit employer des interrupteurs formés seulement par une résistance.

3 Importance de l'instant de la coupure

La variation de la résistance de l'interrupteur peut commencer à un instant quelconque de l'onde du courant (Fig. 1-3). On remarque que :

- si le démarrage de la variation de la résistance coïncide avec un maximum de l'onde du courant à couper, l'énergie de coupure est maximale (onde du courant i_1).
- si par contre le démarrage de la variation de la résistance se fait lorsque le courant est faible (onde du courant i_2), l'énergie de coupure pourra être réduite.
- si la variation de la résistance se produit à l'instant précis du passage du courant par zéro on aura une coupure sans dépense d'énergie.

Par conséquent, l'instant initial de la variation de la résistance de l'interrupteur est très important en alternatif et il est sans influence en continu, sur l'énergie de coupure.

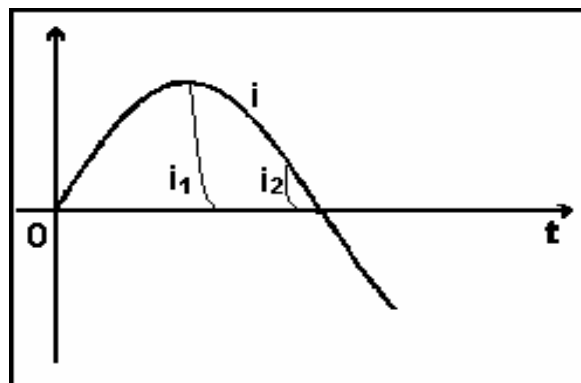


Fig. 1-3 — Importance de l'instant de coupure en courant alternatif [2]

1.3.1 Interrupteur idéal

En courant alternatif examinons la conception d'un interrupteur idéal [1, 2] qui peut interrompre instantanément le courant, c'est à dire, il est capable de passer directement de l'état conducteur à l'état isolant. La résistance d'un tel interrupteur doit donc passer immédiatement de zéro à l'infini (Fig. 1-4) !

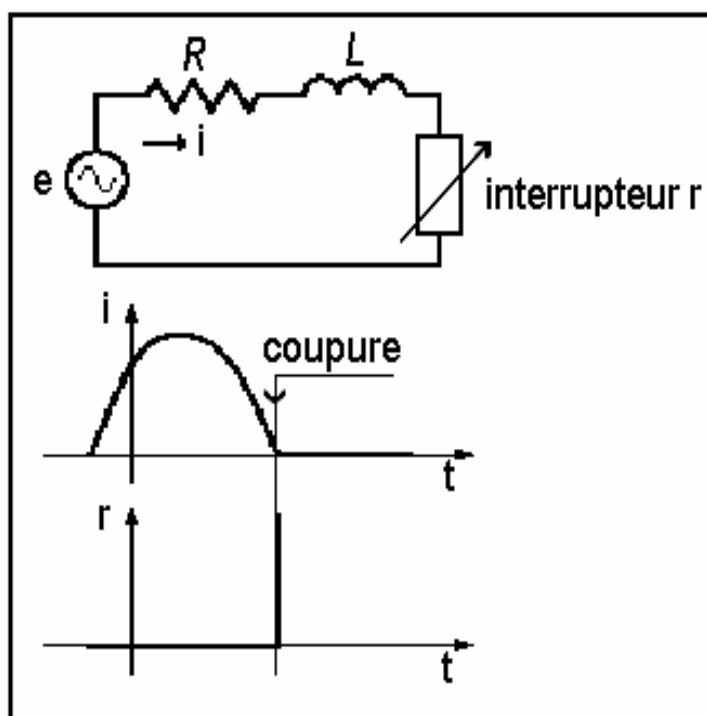


Fig. 1-4 — Coupure réalisée par un interrupteur idéal [1]

Cet appareil devrait être capable:

- d'absorber toute l'énergie électromagnétique accumulée dans le circuit avant la coupure, soit dans le cas d'un court circuit $\frac{1}{2}Li^2$, du fait de la nature selfique des réseaux.
- de supporter la surtension $L\frac{di}{dt}$ qui apparaît à ses bornes et qui aurait une valeur infinie, si le passage isolant-conducteur se faisait durant un temps infiniment petit ($\frac{di}{dt}$ infini), ce qui conduirait inévitablement au claquage diélectrique

Pour cela il faut réaliser une synchronisation parfaite entre le passage naturel du courant par zéro et la transition isolant-conducteur, autrement dit la résistance de l'interrupteur doit être nulle jusqu'à l'instant précis du passage naturel du courant par zéro et deviendra infinie tout de suite après !

1.3.1.1 Difficultés de conception d'un interrupteur idéal

1/ La synchronisation

La synchronisation parfaite constitue la première difficulté, car il est quasiment impossible de séparer les contacts très exactement au zéro naturel du courant du fait de l'incertitude mesure-commande [1, 2].

Supposons par exemple un courant de valeur maximale 10 kA et de fréquence 50 Hz ;

$$i = I_m \sin \omega t$$

$$t = 1 \text{ ms avant le zéro du courant} \quad i = 3000 \text{ A}$$

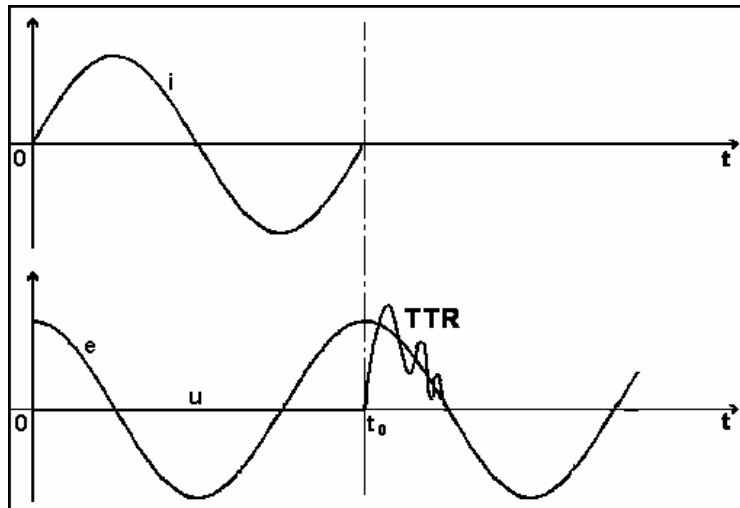
$$t = 0.1 \text{ ms avant le zéro du courant} \quad i = 300 \text{ A}$$

Même 1 μ s avant le zéro du courant, il circule encore dans le circuit $i = 3 \text{ A}$

2/ La tension transitoire de rétablissement (TTR)

Supposons que la synchronisation a été parfaite et transportons-nous après l'instant t_0 du zéro du courant (Fig. 1-5). Le courant est nul, la résistance de l'interrupteur est infinie, la tension aux bornes de l'impédance $(R + j\omega L)$ est nulle (car le courant dans le circuit est nul). La tension aux bornes de l'interrupteur ($u = ri$) qui était nulle avant t_0 ($r=0$), tend après t_0 à rejoindre la f. é. m. e du générateur (loi d'Ohm).

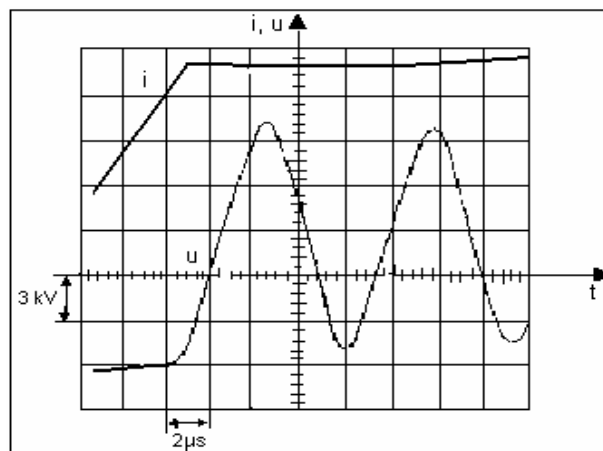
Fig. 1-5 — Tension transitoire de rétablissement (TTR) [2]



En revanche la présence des capacités propres du circuit rend impossible une variation brutale de la tension aux bornes de l'interrupteur. Il apparaît alors un régime transitoire assurant le raccordement entre la tension de l'interrupteur antérieurement nulle et le nouveau régime imposé par la source. Cette tension de raccordement est appelée tension transitoire de rétablissement (TTR).

La vitesse d'accroissement de la TTR peut atteindre des valeurs considérables, de l'ordre de quelques $kV/\mu s$ (Fig. 1-6). Cela signifie que l'interrupteur idéal, encore conducteur à l'instant t_0 doit pouvoir supporter plusieurs kV à ses bornes $1 \mu s$ plus tard ! Pour remplir cette condition ses contacts devront s'écarter l'un de l'autre à des vitesses inaccessibles chiffrées en km/s!

Fig. 1-6 — Exemple de tension transitoire de rétablissement relevée à l'oscilloscope [2]



En conséquence, dans la pratique aucun dispositif mécanique ne se révèle assez bien synchronisé ni suffisamment rapide.

1.3.2 La coupure grâce à l'arc électrique

1.3.2.1 Avantages de la coupure avec l'arc électrique

On a démontré ci-dessus qu'aucun appareil mécanique n'est capable de couper le courant sans l'aide de l'arc électrique.

- L'arc électrique permet, tout en continuant d'assurer le passage du courant dans le circuit, l'éloignement des deux contacts l'un de l'autre à des vitesses raisonnables jusqu'à une distance suffisante telle que, une fois la coupure terminée, l'appareil résiste diélectriquement à la tension appliquée à ses bornes.
- L'arc évite la libération prématurée de l'énergie électromagnétique tant que le courant est encore important.
- L'arc prend naissance dès la séparation des contacts sans qu'il apparaisse de surtension fâcheuse.

Ces avantages considérables sont dus aux caractéristiques électrothermiques de l'arc qui lui donnent une inégalable aptitude à passer rapidement et au bon moment de l'état conducteur à l'état isolant et lui confèrent un comportement voisin de celui de l'interrupteur idéal [2].

1.3.2.2 Processus de la coupure avec l'arc électrique

En haute tension, les courants de court-circuit sont quelques dizaines de kilo ampères, par conséquent l'arc est très stable (absence du phénomène d'oscillations qui produit des zéros de courant non naturels, il en résulte que le disjoncteur peut interrompre le courant avant le passage naturel par zéro), le disjoncteur interrompe le courant au passage naturel par zéro [1, 4].

Le processus de la coupure avec l'arc électrique se produit en trois phases (Fig. 1-7):

- la phase d'attente du passage du zéro du courant.
- la phase d'extinction de l'arc
- la phase de rétablissement.

a/ La phase d'attente

Avant le zéro du courant, on sépare les deux contacts du disjoncteur, il y a rupture diélectrique du milieu inter contacts et l'arc apparaît. Le dispositif de protection insère très rapidement une chute de tension u entre les deux contacts, cette chute de tension est appelée tension de l'arc, sa valeur dépend de la longueur de l'arc, de l'intensité du courant à couper et des échanges thermiques avec le milieu d'extinction. L'énergie W dissipée dans l'appareil au cours de la coupure dépend de u :

$$W = \int_{t_s}^{t_c} ui \cdot dt$$

t_s instant de séparation des contacts.

t_c instant de la coupure.

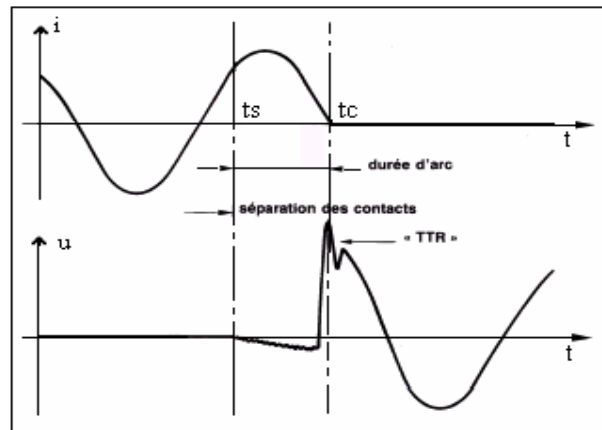


Fig. 1-7 — Oscillogramme typique de la coupure d'un courant de court-circuit [4]

D'après l'équation (1-1), la loi qui régit l'évolution du courant de court-circuit est :

$$e - u = Ri + L \cdot \frac{di}{dt} \quad (1-11)$$

u tension de l'arc aux bornes du disjoncteur

i courant de court-circuit ou courant dans l'arc

En négligeant la résistance R (circuit fortement inductif), l'équation devient :

$$e - u = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (1-12)$$

La tension de l'arc joue le rôle d'une f.c.é.m. s'opposant à la croissance du courant de court-circuit, on obtient en conséquence « un effet limiteur » du courant de court circuit, cet effet est d'autant plus efficace que u est plus élevée.

En revanche en moyenne tension et haute tension, la tension de l'arc reste toujours très inférieure à la tension du réseau et n'a pas ainsi d'effet limiteur sauf artifices particuliers [1].

b/ La phase d'extinction

L'interruption du courant correspond à l'extinction de l'arc. Elle se fait au zéro du courant à condition que le milieu redevienne rapidement isolant. Pour cela, le canal de molécules ionisées doit être cassé. Le processus d'extinction se fait de la manière suivante :

- Au voisinage du zéro de courant, la résistance de l'arc augmente, la vitesse de son augmentation dépend principalement de la constante de temps de désionisation du milieu inter contacts.
- Au passage par zéro du courant, la tension de l'arc s'annule. Cependant l'arc est encore conducteur car le gaz auquel il doit sa conductivité possède forcément une inertie thermique. La résistance de l'arc continue à augmenter, une TTR se crée aux bornes de cette résistance variable, dite post-arc, par conséquent un courant dit courant post-arc (voir chapitre 2) la traverse [1, 2].

c/ La phase post-arc

Vu l'inertie thermique du gaz, au passage par zéro du courant, l'arc est encore conducteur et sa résistance n'est pas infinie, cette résistance continue de croître. La tension transitoire de rétablissement aux bornes de cette résistance variable dite post-arc croissait elle aussi, par conséquent un courant traverse cette résistance et auquel correspond un effet Joule.

Si la puissance électrique ainsi dépensée reste inférieure à la puissance de refroidissement l'arc continu de se refroidir et sa résistance continue à augmenter, la coupure peut réussir. Si ces puissances deviennent égales, l'arc cesse de se refroidir, sa résistance cesse de croître, et comme la tension de rétablissement augmente rapidement, la puissance électrique l'emporte brusquement provoquant un phénomène d'emballement thermique et l'échec de la coupure [1, 2].

Régénération diélectrique

Il ne suffit pas que l'appareil échappe à l'emballement thermique pour que la coupure soit réussie. Il y a une autre course qui se présente entre deux grandeurs qui semblent indépendantes, la TTR qui dépend des caractéristiques du circuit et la limite de régénération diélectrique qui dépend du milieu de coupure.

Au zéro du courant la rigidité diélectrique ne peut pas atteindre instantanément sa valeur, c'est à dire compte tenu de l'état d'ionisation antérieure, l'intervalle inter contacts récupère progressivement ses qualités diélectriques suivant une certaine loi dénommée courbe de régénération diélectrique (Fig. 2-2 du chapitre 2).

Pour que la coupure réussisse, il faut aussi que la vitesse de régénération diélectrique soit plus rapide que celle de la TTR. Si la vitesse d'accroissement de la TTR dépasse celle de la rigidité diélectrique instantanée du gaz en cours de désionisation, il se produit un réamorçage entre les contacts; c'est l'échec diélectrique.

A l'instant où se produit le claquage diélectrique, le milieu redevient conducteur, ce qui génère des phénomènes transitoires post-coupure appelés :

- réallumages, s'ils ont lieu dans le quart de période qui suit le zéro de courant,
- réamorçages, s'ils se produisent après.

Comme l'évolution de la rigidité diélectrique dans l'intervalle inter contacts après le zéro du courant dépend beaucoup de l'énergie dépensée dans l'arc avant le passage du zéro du courant, puis de celle dépensée ensuite dans la résistance post-arc, il est physiquement plus exact de nommer cet défaut échec thermo-diélectrique [2].

1.3.2.3 Conclusion

La coupure réussie lorsque :

- la puissance dissipée dans l'arc par effet joule reste inférieure à la puissance de refroidissement caractéristique de l'appareil.
- la vitesse de désionisation du milieu de coupure est grande.

- l'espace inter contacts a une tenue diélectrique suffisante

Par conséquent, le choix du milieu de coupure est très important dans la conception des disjoncteurs.

1.3.3 Pointe d'extinction

Nous avons vu au paragraphe 1.3.2, qu'une coupure trop rapide entraînait automatiquement une surtension de coupure $L \frac{di}{dt}$, qui risquait d'être dangereuse pour le matériel et le personnel car l'arc ne s'allonge pas suffisamment. Cependant l'inertie de l'arc empêche que sa résistance croisse infiniment vite et la tension d'arc passe par un maximum dénommé pointe d'extinction. C'est une surtension qui apparaît peu avant l'annulation du courant. La valeur de cette surtension ne peut malheureusement pas être établie analytiquement

Le sommet (pic) de la pointe d'extinction correspond physiquement au moment où la variation de la résistance r n'est pas suffisamment rapide pour compenser la réduction du courant i (à l'approche du zéro du courant), de sorte que le produit ri cesse de croître. A partir de la pointe d'extinction le produit ui (ri^2) décroît rapidement et devient très vite négligeable devant P , par conséquent r croît alors sensiblement de façon exponentielle avec une constante de temps voisine de τ , il en résulte que le courant devient pratiquement négligeable deux à trois constantes de temps τ après la pointe d'extinction. Il est ainsi possible d'évaluer la constante de temps τ d'un arc réel à l'approche du zéro du courant à partir d'un relevé oscillographique.

L'instant correspondant à la pointe d'extinction majorée d'une ou deux constantes de temps τ pourra donc valablement être considéré comme marquant la fin des phénomènes énergétiques liés à l'existence temporaire de l'arc.

1.3.4 La TTR dans les normes

On a montré ci-dessus que la vitesse de croissance de la TTR joue un rôle fondamental dans la réussite ou l'échec de la coupure, par conséquent elle est soumise aux normes. Sa valeur ne peut pas être déterminée précisément pour toutes les configurations

du réseau, la norme CEI 60056 définit pour chaque tension nominale une valeur enveloppe qui correspond aux besoins normalement rencontrés.

Le pouvoir de coupure d'un disjoncteur est alors défini à sa tension assignée et avec la TTR assignée correspondante. Un disjoncteur doit donc être capable de couper tout courant inférieur à son pouvoir de coupure pour toute TTR dont la valeur est inférieure à la TTR assignée [1].

1.4 Conclusion

Seul l'arc électrique permet à l'heure actuelle de dominer l'interruption des courants de court-circuit considérables des grands réseaux d'interconnexion aussi bien que ceux des plus modestes installations domestiques, grâce à ses caractéristiques étonnantes électrothermiques, qui lui confèrent un comportement voisin de l'interrupteur idéal. Ce phénomène physique est caractérisé par des températures extrêmement élevées, qui peuvent atteindre et dépasser la température du noyau du soleil (15 000 °K environ), il en découle que sa maîtrise reste en grande partie soumise à l'imagination des chercheurs et la mise au point des appareils de coupure demeure grandement dépendante de l'expérimentation et du savoir-faire.

L'arc et le courant post-arc dans les disjoncteurs SF₆ haute tension

2.1 Introduction

Les appareils de coupure (disjoncteurs, contacteurs) utilisent divers milieux de coupure; l'air, l'huile, le vide et le SF₆. Ces techniques de coupure ont permis de couvrir successivement ou simultanément les besoins croissants de l'électrotechnique [1, 2].

L'hexafluorure de soufre (SF₆) et le vide sont les techniques de coupure modernes. Apparues dans les années soixante et développées dans les années soixante-dix, elles ont supplanté aujourd'hui, les anciennes techniques de coupure dans l'air et dans l'huile grâce à leurs constantes de désionisation très faibles (ce qui élimine le risque de réamorçage) et à leurs propriétés diélectriques remarquables. Le SF₆ et le vide partagent le marché en MT tandis qu'en HT, le SF₆ est au plan mondial la technologie N°1 pour la conception des disjoncteurs. Les anciennes technologies à l'huile ou à l'air comprimé sont en cours de disparition.

Le SF₆ connaît un emploi de plus en plus large dans l'appareillage électrique car il possède des propriétés extinctrices de l'arc remarquables. Ces propriétés physico-chimiques exceptionnelles sont exposées dans ce chapitre. Dans le paragraphe 2.2 sont rappelées les caractéristiques de la molécule du SF₆ et dans le paragraphe 2.3 est rappelé le mécanisme de coupure dans ce gaz. La suite du chapitre est un état de l'art sur le courant post-arc dans les disjoncteurs SF₆ haute tension. Ce courant est étudié et les informations importantes qui peuvent être tirées de son amplitude, en se basant sur les résultats des tests faits dans les laboratoires haute puissance, sont présentées.

2.2 L'hexafluorure de soufre (SF₆)

2.2.1 La molécule du SF₆

La molécule du SF₆ est parfaitement symétrique (Fig. 2-1). Elle comporte en son centre un atome de soufre dont les six électrons de valences constituant les liaisons libres, sont utilisés par six atomes de fluor, pour compléter la couche électronique périphérique. Ces six atomes de fluor sont disposés autour de l'atome de soufre aux six sommets d'un octaèdre régulier [2].

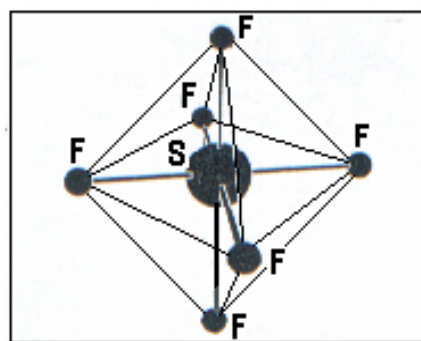


Fig. 2-1 — La molécule de SF₆ [2]

⚡, ⚡, ⚡ Propriétés chimiques

Le SF₆ pur est inodore, incolore, ininflammable, incombustible, sans saveur, non soluble dans l'eau et non toxique. C'est l'un des gaz les plus lourds connus, sa masse spécifique à 20 °C, sous une pression de 1 atmosphère est de 6.139 kg/m³, soit 5 fois celle de l'air. Sa masse moléculaire est de 146.06 [1, 4, 5, 6, 7, 8, 9,10].

Le SF₆ est chimiquement inerte et a une stabilité exceptionnelle car sa molécule a toutes ses liaisons chimiques saturées, cela est concrétisé par une énergie de dissociation élevée de 1096 kJ/mol (égale à l'énergie de formation) [1, 2, 6].

2.2.3 Propriétés physiques

2.2.3.1 Propriétés diélectriques

Les propriétés diélectriques du SF₆ sont excellentes. Sa rigidité diélectrique, qui a pression égale, est supérieure à celle de la plupart des milieux connus. La tension disruptive du SF₆ est 3 fois celle de l'air (Fig. 2-2). Le SF₆ doit cet avantage à la grande dimension de sa molécule, aux multiples mécanismes de collisions inélastiques, qui lui

permettent de ralentir efficacement les quelques électrons libres germes de la décharge, et surtout au caractère très électronégatif de sa molécule, qui a tendance à capturer les électrons libres pour former des ions négatifs lourds et de faible mobilité, ce qui rend difficile le développement d'une avalanche électronique causant la rupture diélectrique [1,2, 5, 6].

La molécule du SF6 est électronégative grâce au fluor. Cette aptitude record à capturer des électrons se traduit chimiquement par le fait que le fluor est le plus réactif de tous les éléments, il est capable de se combiner avec les gaz rares les plus lourds xénon et radon, pourtant réputés chimiquement inertes puisqu'ils possèdent des couches électroniques complètes et par conséquent une valence chimique nulle ! [2].

Le caractère électronégatif du fluor résulte de sa configuration électronique; cet élément lui manque un électron pour que sa couche L soit complète, il en résulte un champ électronique d'attraction dont l'intensité dépasse beaucoup celle de tous les éléments présentant la même propriété.

2.2.3.2 Propriétés thermiques

a/ Chaleur spécifique

Par définition la chaleur spécifique d'une substance est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 degré la température de 1 g de cette substance, soit à pression constante, soit à volume constant [11] .

La chaleur spécifique du SF6 est 3.7 fois plus élevée que celle de l'air, ce qui réduit considérablement l'échauffement des appareils électriques utilisant le SF6 [5, 6].

b/ Relation pression-température

Dans les conditions normales de température et de pression, le SF6 se présente à l'état gazeux, il se comporte comme un gaz parfait jusqu'à une température de 1200 °K environ. A la pression atmosphérique, le SF6 se liquéfie à -60 °C, mais à des pressions élevées, il se liquéfie à des températures plus hautes (20 °C à 20 bars), ce qui lui fait perdre de ses qualités. La variation de la pression en fonction de la température est linéaire et relativement faible dans la gamme des températures de service allant de - 25 à + 50 °C (Fig. 2-3).

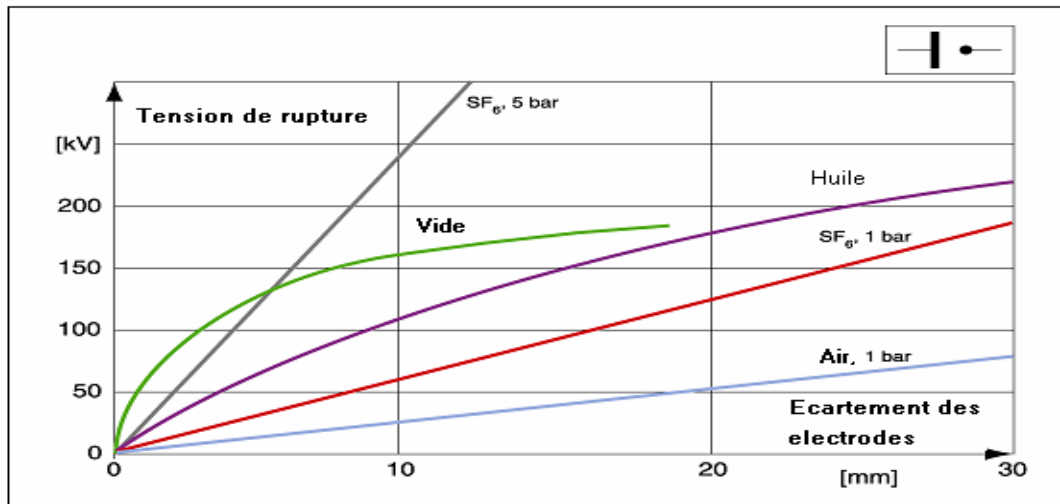


Fig. 2-2 — Rigidité diélectrique du SF6 et des milieux connus [1]

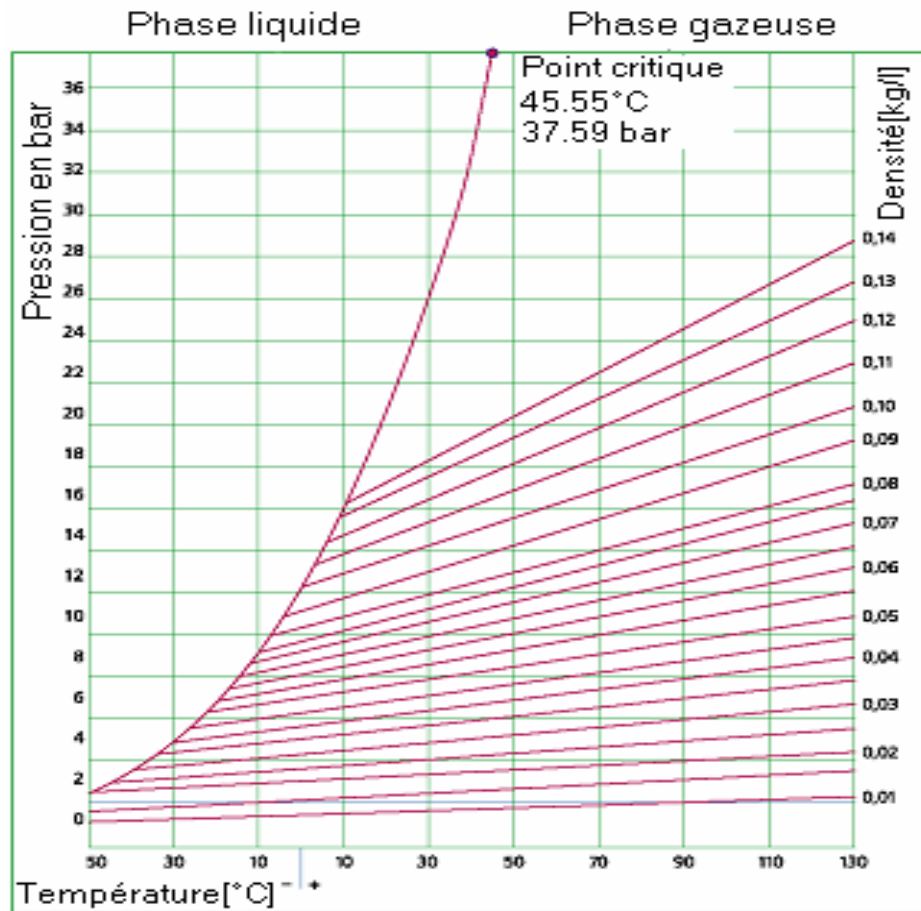


Fig. 2-3 — Variation de la pression en fonction de la température pour le SF6 [5]

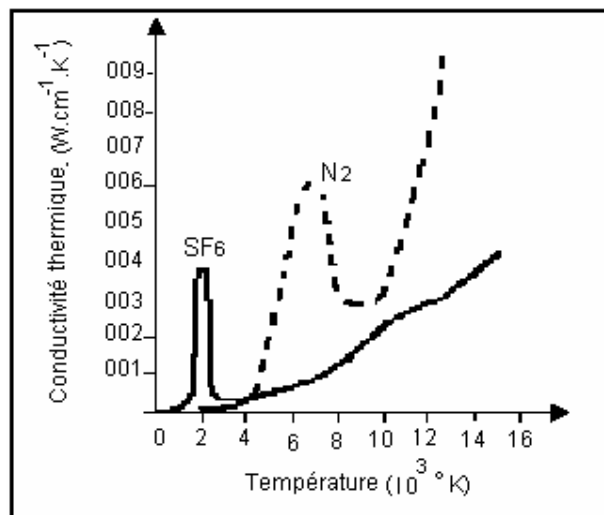
c/ Conductivité thermique

Par définition la conductivité thermique est le paramètre thermodynamique qui détermine le pouvoir des corps de faire passer la chaleur [12].

La conductivité thermique du SF6 est inférieure à celle de l'air, mais son coefficient global de transfert de chaleur, tenant compte en particulier de la convection, est excellent, il est voisin de celui des gaz comme l'hydrogène ou l'hélium et plus élevé que celui de l'air.

La courbe de conductivité thermique du SF6 (Fig. 2-4) souligne l'une des qualités remarquables de ce gaz concernant l'extinction de l'arc par refroidissement thermique; le pic de conductivité thermique correspond à la température de dissociation de la molécule du SF6 (proche de 2000 °K) alors que pour l'azote et la plupart des gaz moléculaires stables connus, ce pic est très supérieur à la température d'ionisation [1, 2, 5, 6].

Fig. 2-4 — Conductivité thermique du SF6 et de l'azote [1, 5]



2.3 L'arc électrique dans le SF6

L'étude thermique de l'arc électrique dans la plupart des gaz, permet de le décrire comme étant formé d'un plasma de gaz dissocié de forme cylindrique, constitué d'un noyau de température très élevée qui dépend du courant à couper, entouré d'une gaine de gaz plus froid. Le noyau et la gaine sont séparés par une sorte de palier thermique, de température égale à la température de dissociation.

Lorsque l'intensité du courant augmente, la température du noyau augmente mais celle du palier reste inchangée (Fig. 2-5). La raison de l'existence du palier est qu'il se produit un changement d'état du gaz à cette température. En effet après avoir été neutre, les molécules du gaz se dissocient en atomes, cette dissociation exige une certaine dépense d'énergie dite énergie de dissociation.

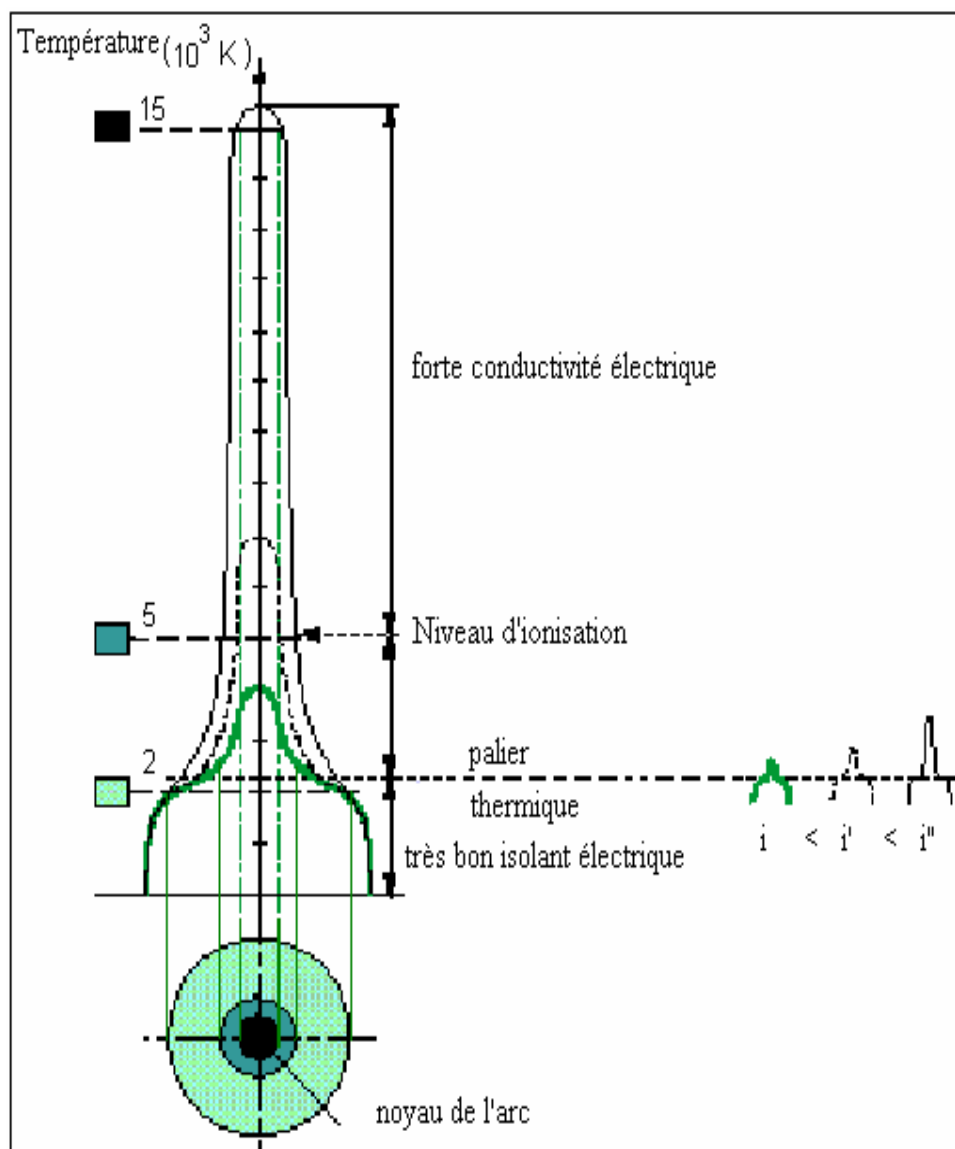


Fig. 2-5 — Courbe de répartition de la température d'un arc contenu dans un tube cylindrique rempli de SF₆ [1]

Dans le cas du SF6, seul le noyau est électriquement conducteur, c'est à dire c'est lui qui transporte la totalité du courant, car la température du palier (voisine de 2000 °K) est inférieure à la température minimale d'ionisation (au delà de 3000 °K) et la gaine extérieure reste isolante. Par contre dans le cas de l'azote et la plupart des gaz moléculaires stables connus, la température du palier de dissociation est très supérieure à la température d'ionisation (Fig. 2-4).

Le SF6 a une température de dissociation de 2100 °K pour laquelle il est pratiquement isolant et à laquelle il peut "soutirer" des calories à l'arc jusqu'au plus près de son axe !

Sous l'effet d'une température croissante, le SF6 se dissocie progressivement en atomes neutres de soufre S et de fluor F au-delà de 2100 °K. Pour des températures supérieures à 3000 °K, les atomes de soufre s'ionisent en S^+ , les électrons libérés sont capturés par les atomes de fluor et par les composés fluorés pour former des ions négatifs. Le nombre des électrons libres e^- qui sont les véritables responsables de la conduction, ne croît vraiment qu'au-delà de 4000 °K. La figure 2-6 donne les courbes de décomposition du SF6 (n : le nombre des électrons libres) .

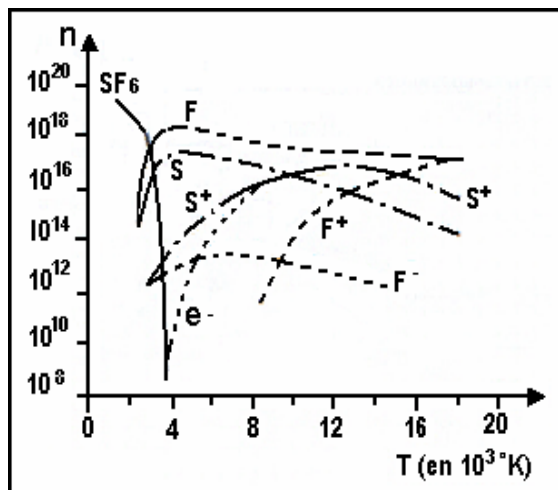


Fig. 2-6 — Courbes de décomposition du SF6 [2]

Inversement, lorsque le courant diminue, la température du noyau diminue et devient inférieure à 4000 °K, les atomes de fluor et les molécules fluorées capturent les électrons libres, le rayon du noyau diminue et sa conductivité électrique diminue aussi.

Contrairement à ce que l'on observe pour les gaz précédemment employés (N_2 , O_2 , H_2), la constante de temps de désionisation du SF6 décroît sans cesse lorsque le courant diminue, au point de ne plus représenter qu'une fraction de microseconde au voisinage du zéro du courant (Fig. 2-7) [2].

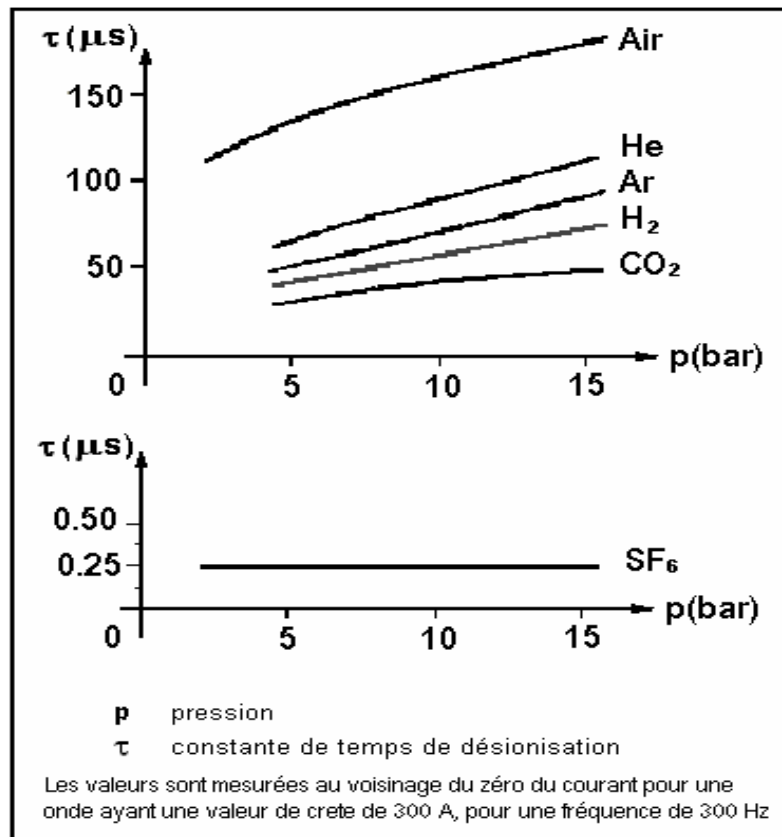


Fig. 2-7 — Constante de temps de désionisation en fonction de la pression pour différents gaz [1, 2, 5]

2.4 Le courant post-arc dans les disjoncteurs SF6 HT

Dès la séparation des contacts du disjoncteur, le courant s'écoule à travers le canal de l'arc formé par le plasma entre les contacts. À cause de la résistance du canal, le courant produit une chute de tension entre les contacts du disjoncteur, c'est la tension de l'arc. Quand le plasma est refroidi et le courant est interrompu, la tension de rétablissement transitoire (TTR) se forme à travers la chambre de coupure, le courant post-arc est un petit courant qui continue à s'écouler dans les premières quelques microsecondes après que

le courant a été interrompu et quand la TTR se forme. Ce courant post-arc est dû au fait qu'après l'extinction de l'arc, le gaz encore chaud ne se refroidit pas instantanément [14, 15, 16].

2.4.1 Le développement du système de mesure

A peine quelques années, la mesure du courant post-arc dans les disjoncteurs SF6 haute tension était difficile. La difficulté de mesure réside dans le fait que le dispositif de mesure doit avoir deux qualités souvent contradictoires; un grand intervalle dynamique et une large bande de fréquences :

Le grand intervalle dynamique : le capteur du courant doit résister à des courants de quelques dizaines de kilo ampères, dans l'intervalle des courants forts et après le zéro du courant, les courants post-arc inférieurs à un ampère doivent être enregistrés avec précision ! [14, 17, 18, 19]

La largeur de la bande de fréquences : la difficulté de mesure augmente à cause de la variation très rapide de la pente du courant, quand ce dernier s'approche de zéro. Dans quelques microsecondes seulement cette pente tombe de quelques dizaines d'ampères par microseconde à zéro ! Ce processus très rapide au voisinage du zéro du courant exige une réponse haute fréquence [14, 15, 17, 18].

Avec le développement récent du système de mesure, la mesure précise du courant post-arc est possible et au bout de quelques années seulement, ce courant est devenu une caractéristique du disjoncteur.

2.5 Informations déduites du courant post-arc

2.5.1 Disjoncteur en bon état

Plusieurs séries de tests aux laboratoires haute puissance ont confirmé que le courant post-arc dans un disjoncteur SF6 haute tension, bien conçu et en bon état, est inférieur à quelques centaines de mA [15, 18, 19, 20].

2.5.2 Dégradation de la chambre de coupure

Chapitre 2 L'arc et le courant post-arc dans les disjoncteurs SF6 HT

La dégradation de la chambre de coupure augmente d'un test à l'autre, à cause des coupures répétées des courants de court-circuit de fortes intensités. Les grandes températures de l'arc engendrent l'augmentation progressive du diamètre de la lance, ce qui engendre à son tour une réduction de la pression de soufflage du gaz SF6 durant le processus d'interruption.

Pour connaître la relation entre l'amplitude du courant post-arc et la dégradation ou l'âge du disjoncteur, plusieurs séries de tests ont été effectuées sur des disjoncteurs SF6 haute tension dans les laboratoires haute puissance.

2.5.2.1 La première série de tests de KEMA

Cette série de tests a été exécutée sur des disjoncteurs SF6 haute tension de différentes technologies (à soufflage, à lance double, auto soufflage) qui étaient initialement en bon état. Le tableau 2-1 donne un aperçu sur le nombre de tests, le nombre de zéros du courant (ZCs) pour chaque disjoncteur, le nombre des interruptions réussies résultant et le nombre d'échecs [20].

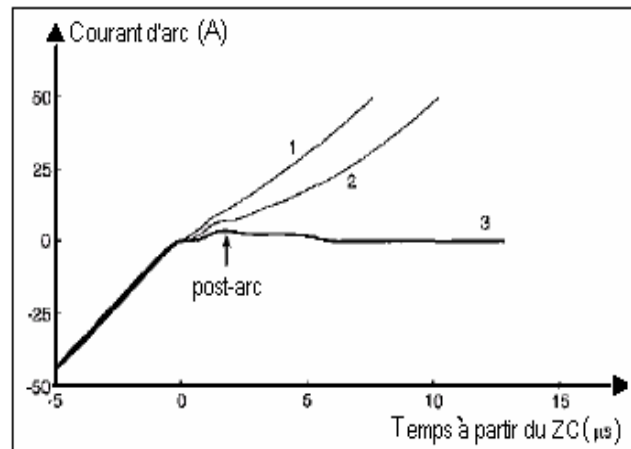
Tableau 2-1— aperçu sur les tests [20].

Classe du disjoncteur	Abréviation	Circuit	Tests	ZCs	Int.	Echec
72.5 kV / 31.5 kA	D 72	Direct	28	64	24	40
123 kV / 31.5 kA	D 123	synthétique	33	33	24	9
145 kV / 31.5 kA	D 145	Direct	27	50	26	24
145 kV / 31.5 kA	D 145	synthétique	27	27	21	6

Comme exemple des résultats des tests, la figure 2-8 donne le courant de l'arc pour le disjoncteur 72.5 kV/31.5 kA (D72) de trois ZCs consécutifs d'un seul test: deux échecs désignés par 1 et 2 (après des temps de coupure de 7.9 et 16.3 ms) et une interruption réussie désignée par 3 (après un temps de coupure de 24.6 ms).

A force de couper des courants de défauts de lignes courtes, les dernières mesures ont enregistré des courants post-arc élevés de plusieurs ampères. Ces grandes valeurs non usuelles montrent que la chambre de coupure du disjoncteur a été beaucoup dégradée et qu'elle est très proche de la fin de sa capacité de coupure.

Fig. 2-8 — Courbes du courant de l'arc de trois ZCs consécutifs durant un seul test exécuté sur D72 [20]. Deux échecs (1 et 2) et une interruption (3)



2.5.2.2 La deuxième série de tests de KEMA

Les tests ont été exécutés sur les trois pôles d'un disjoncteur SF6, 72.5 kV/31.5 kA/ 60Hz dans un circuit test direct [14]. Parmi les mesures des 38 passages par zéro du courant, deux cas seulement indiquaient un courant post-arc significatif. Ces deux cas ont eu lieu pendant la dernière interruption réussie du deuxième pôle et pendant la dernière interruption réussie du troisième pôle du disjoncteur. Après cela les pôles étaient dégradés et seulement les échecs qui se produisaient.

La figure 2-9 (voir l'intervalle de temps 0 à 2.5 μs) et la figure 2-10 (voir l'intervalle de temps 0 à 6 μs) montrent les amplitudes du courant post-arc de ces deux cas. Elles sont grandes, de l'ordre de quelques ampères.

Fig. 2-9 — Courant post-arc mesuré durant la dernière interruption du 2^{ème} pôle [14]

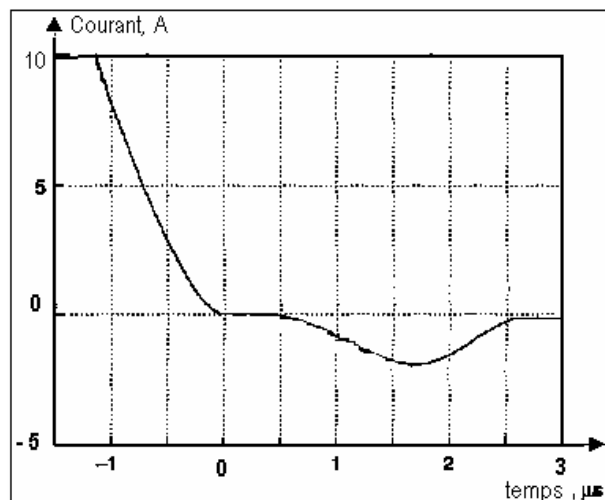
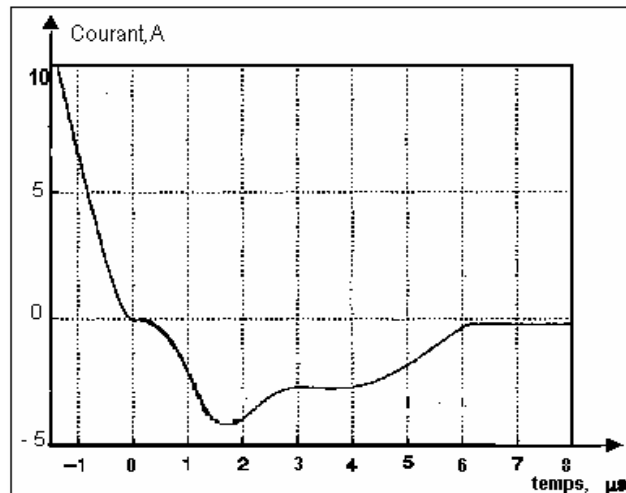


Fig. 2-10 — Courant post-arc mesuré durant la dernière interruption du 3^{ème} pôle [14]



De ces résultats il a été conclu qu'il existe une relation entre l'amplitude du courant post-arc et l'âge ou la dégradation du disjoncteur [14].

2.5.3 Courant post-arc et la probabilité de l'échec de la coupure

Une série de tests a été effectuée au laboratoire haute puissance de Toshiba sur un disjoncteur SF6, 300 kV/ 63 kA. La figure 2-11 montre le courant post-arc de quatre interruptions successives pour un courant de court-circuit de 63 kA. Le temps de coupure était 18 ms. On observe que le courant post-arc croît d'une interruption à l'autre. Il a été conclu qu'un accroissement du courant post-arc reflète un accroissement de la probabilité de l'échec de la coupure des courants de défauts des lignes courtes [18].

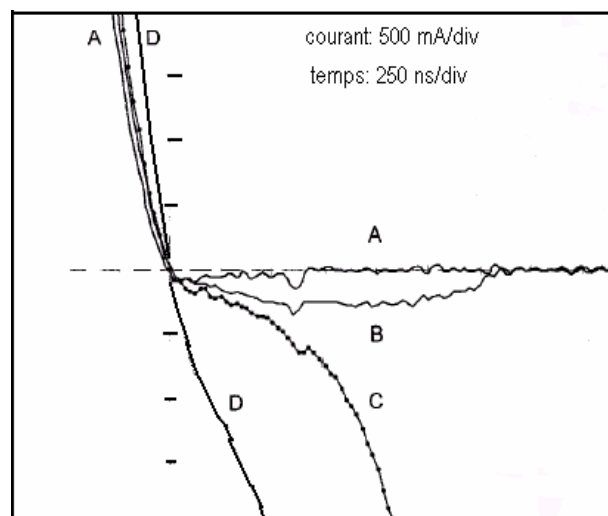


Fig. 2-11 — Courbes du courant de l'arc montrant un accroissement continu du courant post-arc. Le courant de court-circuit est 63 kA, le temps de coupure 18 ms [18].

2.5.4 Relation entre la conductance au zéro du courant et le courant post-arc

La conductance de l'arc à exactement zéro du courant $g(0)$, est en principe l'indicateur le plus lié à la performance du disjoncteur, mais à cause des limitations des mesures, cette conductance est mesurée à un court instant t_0 avant le zéro du courant.

Après plusieurs centaines de tests faits à KEMA [18], le choix optimum de t_0 était -200ns . Ce choix optimum a été appliqué aux tests exécutés au laboratoire de Toshiba[18].

Les figures 2-12 et 2-13 donnent un grand nombre de courbes de la conductance en fonction du temps avant le zéro du courant, pour des courants de défaut de 50 kA, 63 kA et 70 kA. Pour ces valeurs de courants de défaut, $g(-200\text{ ns})$ a été trouvée environ 1.5 mS, c'est la valeur limite.

Pour tous les cas testés, quand $g(-200\text{ ns}) \geq 1.5\text{ mS}$, le test donne un échec et quand $g(-200\text{ ns}) < 1.5\text{ mS}$, le résultat du test est une interruption réussie.

Sur les deux figures, les courbes des conductances relatives aux échecs ne sont pas présentées.

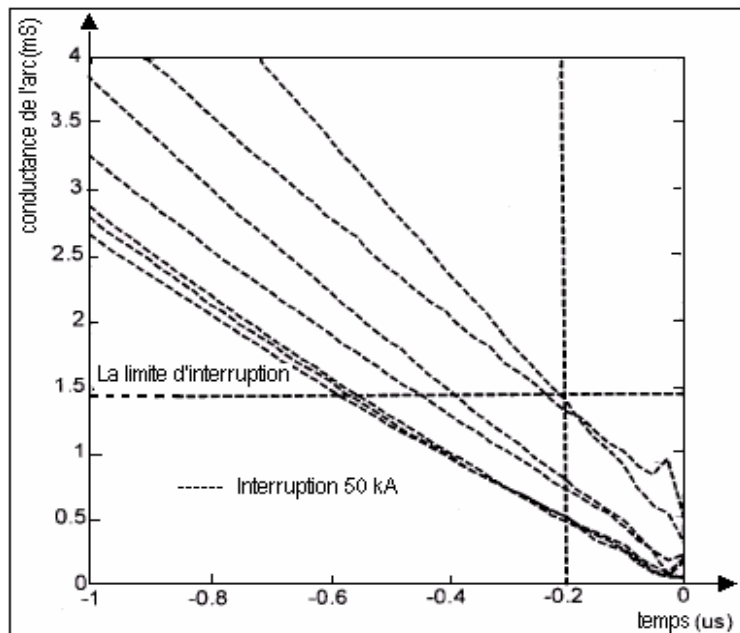
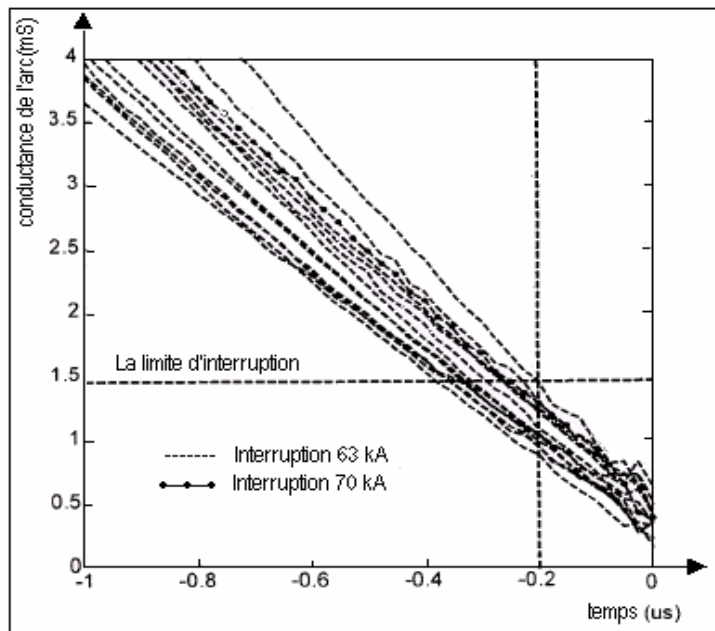


Fig. 2-12 — Conductance de l'arc mesurée avant le zéro du courant durant les tests de 50 kA [18].

Fig. 2-13 — Conductance de l'arc mesurée avant le zéro du courant durant les tests de 63 et 70 kA [18].



Apparemment la valeur $g(-200 \text{ ns}) = 1.5 \text{ mS}$ caractérise ce disjoncteur (SF6 300 kV/63 kA) et le comportement post-zéro peut être analysé à partir de la conductance avant le zéro du courant.

D'un autre côté, une relation qui n'est pas encore confirmée par d'autres travaux, peut être établie entre $g(-200 \text{ ns})$ et le courant post-arc [18] :

$$0.5 < g(-200 \text{ ns}) < 1.1 \text{ mS} \Rightarrow \text{Courant post-arc de } 30\text{--}70 \text{ mA}$$

$$1.1 < g(-200 \text{ ns}) < 1.5 \text{ mS} \Rightarrow \text{Courant post-arc de } 30\text{--}300 \text{ mA}$$

2.5.5 Relation entre le courant post-arc et la TTR

2.5.5.1 Influence du courant post-arc sur la TTR

Le courant post-arc provoque l'amortissement de la TTR. Cet amortissement est négligeable dans les disjoncteurs SF6 en bon état, puisque les courants post-arc dans ces disjoncteurs sont faibles.

La figure 2-14 montre que plus le courant post-arc est grand, plus la TTR est amortie (les TTR désignées par 1 et 2 sont plus amorties que la TTR désignée par 3, voir le paragraphe 2.5.2.1).

2.5.5.2 Vérification de la présence d'un courant post-arc par la TTR

On peut obtenir une information sur la présence du courant post-arc en comparant la TTR calculée non amortie (le courant post-arc supposé nul) et la TTR mesurée amortie. La différence entre les deux TTR au premier pic donne une information sur la présence du courant post-arc.

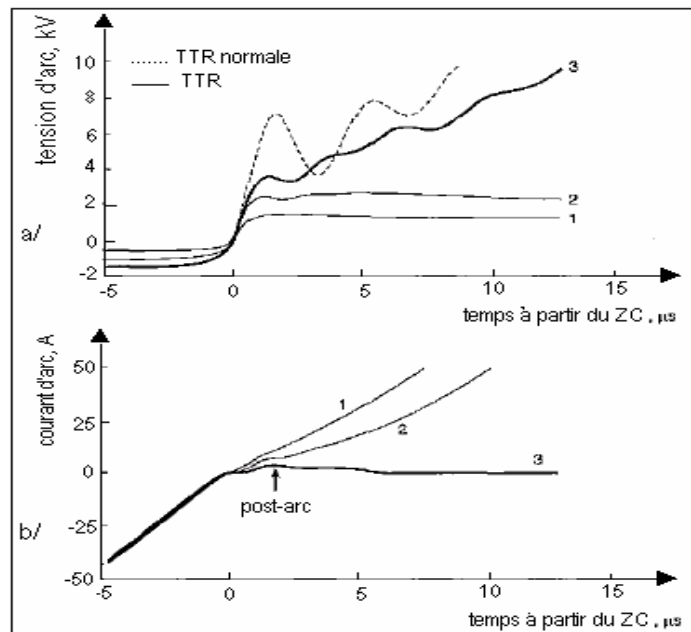


Fig. 2-14 — Le courant post-arc amortit la TTR [20].

Sur les figures 2-15 et 2-16, la différence entre les deux TTR est considérable. Dans ces deux cas, effectivement un courant post-arc a été mesuré dans les tests.

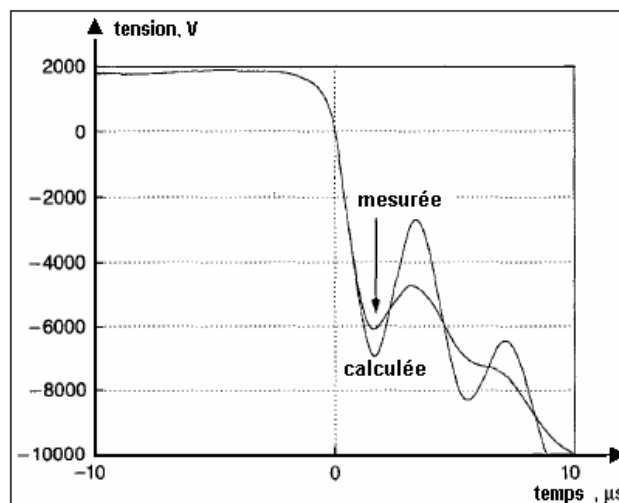


Fig. 2-15 — TTR mesurée et calculée [14]

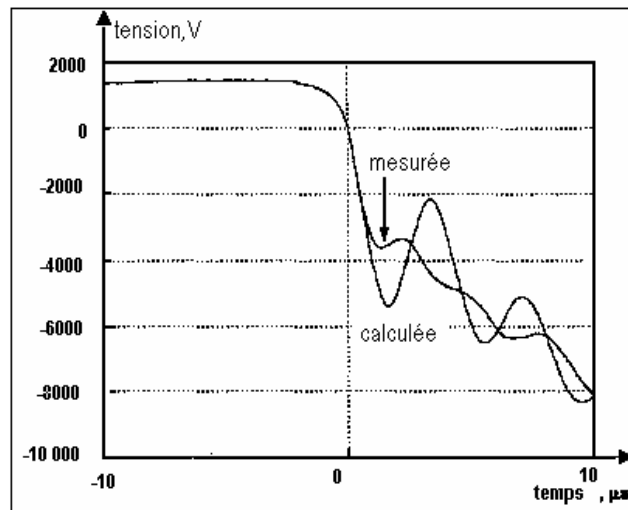


Fig. 2-16 — TTR mesurée et calculée[14]

Sur la figure 2-17 par contre, il n'y a pas de différence entre la TTR mesurée et la TTR calculée et dans ce cas, effectivement aucun courant post-arc n'a été mesuré dans les tests [14].

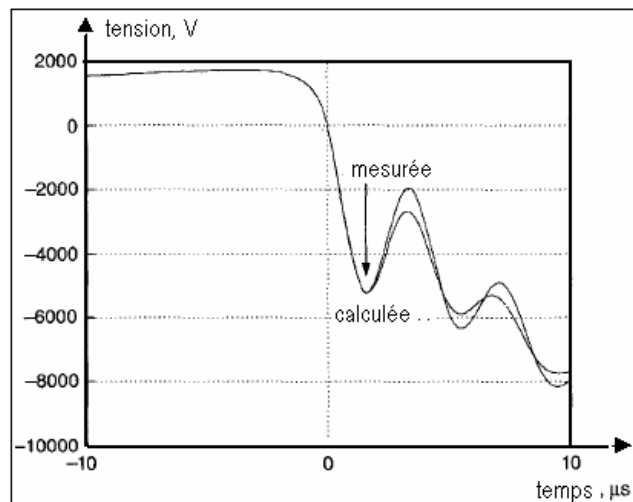


Fig. 2-17 — TTR mesurée et calculée[14]

2.5.6 Le courant post-arc n'est pas très reproductible

Dans le laboratoire les Renardières [15], des séries de tests ont été effectués sur sept chambres de coupure SF6.

La figure 2-18 montre quatre tests successifs (1, 2, 3 et 4) exécutés sur un disjoncteur SF6, 245 kV sous les mêmes conditions (le même circuit test, le même temps

de coupure 10,4 ms et la même vitesse d'ouverture des contacts). Le courant post-arc change d'un test à l'autre et ne reste pas le même, ce qui a permis de conclure que la mesure du courant post-arc n'est pas très reproductible. La détérioration progressive des composants de la chambre de coupure pourrait être l'un des facteurs qui expliquent cette situation [15].

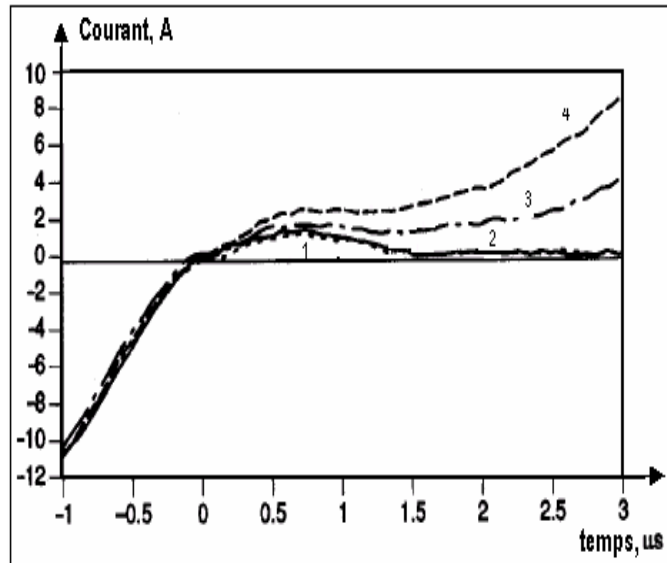


Fig. 2-18 — Courant post-arc de quatre tests successifs sous les mêmes conditions [15]

2.6 Conclusion

A l'heure actuelle, la coupure dans le SF6 couvre la totalité du domaine haute tension de 1 à 1000 kV, elle bénéficie d'une suprématie absolue au-delà de 145 kV. Les appareils à SF6 répondent totalement aux attentes de l'industrie en termes de compacité, de fiabilité, de maintenance réduite, de sécurité des personnes et de durée de service (au moins 30 ans).

Le puissant avantage de nature thermique, associé aux remarquables propriétés diélectriques et à l'avantage de la constante de temps de désionisation du SF6 confèrent à celui-ci un ensemble de qualités qu'on ne trouve réunies dans aucun autre milieu connu. De nombreuses recherches conduisent à penser qu'il est très improbable d'en découvrir d'autres qui lui soient supérieurs ou seulement comparables [2, 6].

Grâce au développement récent du système de mesure, les mesures précises du

Chapitre 2 L'arc et le courant post-arc dans les disjoncteurs SF6 HT

courant post-arc ont permis de conclure que :

- le courant post-arc dans un disjoncteur bien conçu et en bon état est inférieur à quelques centaines de mA.
- une grande amplitude du courant post-arc est un indice de la dégradation de la chambre de coupure.
- un accroissement du courant post-arc reflète l'augmentation de la probabilité de l'échec de la coupure.
- le courant post-arc cause l'amortissement de la TTR.
- la présence du courant post-arc peut être vérifiée par la TTR.
- il pourrait exister une relation entre la conductance au zéro du courant et la valeur du courant post-arc.
- le courant post-arc n'est pas très reproductible dans les mesures.

3.1 Introduction

Les modèles d'arc des disjoncteurs SF6 haute tension peuvent être classés dans trois catégories; les modèles thermiques et diélectriques, les modèles empiriques et les modèles à boîte noire. Les deux premières catégories de modèles sont utilisées pour déterminer les dimensions internes du disjoncteur et les paramètres du milieu d'extinction, alors que la troisième catégorie est utilisée pour l'évaluation du pouvoir de coupure, pour l'extrapolation des résultats des tests et pour une meilleure interprétation de ces résultats [16, 21, 22, 23].

Les modèles d'arc à boîte noire sont des descriptions mathématiques des propriétés électriques de l'arc. Ce type de modèles ne simule pas les processus physiques complexes dans le disjoncteur mais décrit le comportement électrique de celui-ci. Ce chapitre met l'accent sur les modèles d'arc à boîte noire les plus utilisés et rencontrés dans la littérature.

3.2 Représentation des modèles d'arc à boîte noire

Les modèles d'arc à boîte noire sont exprimés mathématiquement par une formule de la résistance ou de la conductance variable avec le temps, en fonction du courant et de la tension de l'arc et de plusieurs paramètres.

La majorité de ces modèles sont représentés par une équation différentielle du premier ordre :

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

- g la conductance de l'arc.
- u la tension de l'arc.
- i le courant de l'arc.
- τ la constante de temps de désionisation
- P la puissance de refroidissement ou la puissance évacuée de l'arc.

τ et P sont les paramètres du modèle d'arc à boîte noire.

3.3 Les modèles de base

Historiquement les modèles d'arc à boîte noire avaient une base physique. Les premières descriptions du comportement de l'arc ont été données par le modèle Cassie (1939) et par le modèle de Mayr (1943).

3.3.1 Le modèle de Mayr

Mayr supposa que l'arc est assimilable à un cylindre de rayon constant et de température variable et que l'évacuation d'énergie est due à la conduction thermique. Ce modèle repose sur un nombre limité d'hypothèses [2]:

Première hypothèse:

La conductance g de l'arc est une fonction de l'énergie w de l' arc:

$$g = F(w) \quad (3-2)$$

Cela signifie qu'à une valeur w de l'énergie, il ne correspond qu'une seule valeur de la conductance g. Ce n'est pas tout à fait exact mais il n'y pas une différence fondamentale entre la réalité et cette hypothèse qui est nécessaire au traitement analytique du problème.

En dérivant les deux membres de la relation (3-2) par rapport au temps nous aurons:

$$\frac{dg}{dt} = F'(w) \cdot \frac{dw}{dt} \quad (3-3)$$

La puissance fournie à l'arc par effet Joule est ri^2 . La puissance cédée par l'arc au milieu environnant est P, on l'appelle puissance de refroidissement.

A chaque instant l'une et l'autre peuvent varier, la puissance accumulée dans l'arc est donc $(ri^2 - P)$.

Pendant l'intervalle de temps dt , $(ri^2 - P).dt$ correspond à la variation d'énergie dw dans l'arc, d'où:

$$\frac{dw}{dt} = ri^2 - P \quad (3-4)$$

L'équation (3-3) devient:

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{F'(w)}{F(w)} (ri^2 - P) \quad (3-5)$$

Deuxième hypothèse:

$F(w)$ est supposée une fonction exponentielle:

$$F(w) = g = K \cdot e^{\frac{w}{w_0}} \quad (3-6)$$

w_0 coefficient constant qui représente la quantité d'énergie qu'il faut apporter à l'arc pour que sa conductance soit multipliée par e ($e=2,71828$).

A l'inverse si on retire une énergie w_0 à l'arc, sa conductance sera divisée par e .

K exprime la valeur absolue de la conductance.

La relation (3-6) peut se transformer de la manière suivante :

$$F(w) = K e^{\frac{w}{w_0}} \Leftrightarrow \log F(w) = \log K e^{\frac{w}{w_0}} = \log k + \frac{w}{w_0}$$

La dérivée de la relation obtenue, par rapport à l'énergie w donne :

$$\frac{F'(w)}{F(w)} = \frac{1}{w_0} \quad (3-7)$$

Troisième hypothèse

La puissance de refroidissement est supposée constante et égale à P_0 et compte tenu de la relation (3-7), la relation (3-5) devient:

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{w_0} (ri^2 - P_0) = \frac{P_0}{w_0} \left(\frac{ri^2}{P_0} - 1 \right) \quad (3-8)$$

Soit $\tau = \frac{w_0}{P_0}$, la constante de temps de désionisation, l'équation (3-8) sera:

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{ri^2}{P_0} - 1 \right) = \frac{1}{\tau} \left(\frac{ui}{P_0} - 1 \right) \quad (3-9)$$

C'est l'équation de Mayr, elle exprime le comportement dynamique de l'arc.

D'après la relation (3-9), il devait exister une variation linéaire de $\left(\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} \right)$ en fonction de la puissance ui puisque τ et P_0 sont considérés constantes, mais la réalité expérimentale est différente car τ et P_0 ne restent pas constantes durant la décroissance du courant et l'extinction de l'arc [23]

3.3.2 Le modèle de Cassie

Ce modèle fut apparu en 1939, Cassie supposa que le plasma de l'arc est un cylindre de rayon variable et de température constante et que les pertes d'énergie ne sont dues qu'à la convection et sont proportionnelles à la section de l'arc. Cassie a déduit l'équation suivante:

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{u^2}{U_0^2} - 1 \right) \quad (3-10)$$

U_0 la tension statique de l'arc, elle est indépendante de l'intensité du courant (Fig. 3-1)

La courbe $\left(\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} \right)$ en fonction de u^2 devrait être une droite (τ , U_0 constantes) dont l'intersection avec les axes permettrait de déterminer τ et U_0 .

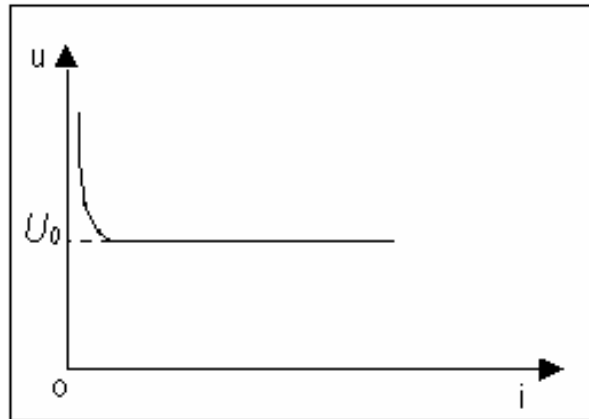


Fig. 3-1 — Caractéristique statique d'un arc de forte puissance [2]

Ce modèle présente des écarts assez importants avec les résultats expérimentaux car les pertes ne sont pas uniquement dues à la convection et que l'hypothèse d'une température constante et loin d'être vérifiée [23].

Pour des valeurs élevées du courant, la tension de l'arc reste sensiblement constante et égale à U_0 , elle prend une forme hyperbolique aux faibles courants, pour cette raison on dit que ce modèle s'applique aux régions de l'arc à fortes intensités.

3.3.3 Comparaison des deux modèles

	Modèle de Mayr	Modèle de Cassie
Conductance de l'arc	Par variation du degré d'ionisation	Par variation du diamètre de l'arc
Pertes de chaleur	Par conduction thermique	Par convection thermique
Expression dynamique	$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{ui}{Po} - 1 \right)$	$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{u^2}{U_0^2} - 1 \right)$
Adaptation	Régions des courants faibles	Régions des courants forts

On peut observer que:

- Chacun des deux modèles est décrit par deux paramètres seulement.
- Les deux modèles donnent une description qualitative du comportement de l'arc et ne peuvent pas être utilisés pour des représentations quantitatives.

Par conséquent un grand nombre de modifications de ces équations a été formulé, plus de paramètres ont été introduits dans les équations de ces modèles, leur donnant ainsi une forme plus générale et rendant les paramètres plus adaptatifs [16]

3.4 Les modèles d'arc améliorés

Suivant les modifications proposées, les modèles de l'arc peuvent être divisés en plusieurs groupes:

- Combinaison des équations de Cassie et de Mayr.
- Description de l'arc par plus de deux constantes.

- Les paramètres de l'arc sont considérés comme des fonctions.
- Division de l'arc en plusieurs parties en série.
- Les modèles stochastiques.

Tout ces modèles gardent l'idée de base de la description du comportement de l'arc en utilisant les paramètres τ et P avec différentes interprétations physiques [16]. Les modèles d'arc améliorés les plus utilisés sont les suivants :

3.4.1 Le modèle de Mayr modifié

C'est une version très répandue de l'équation de Mayr modifiée, la puissance de refroidissement est en fonction du courant de l'arc [16, 21, 25, 26].

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{ui}{P_0 + U_0|i|} - 1 \right) \quad (3-11)$$

La puissance de refroidissement peut être trouvée aussi avec la pression de remplissage p qui dépend du disjoncteur:

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{ui}{p(P_0 + U_0|i|)} - 1 \right) \quad (3-12)$$

- g la conductance de l'arc
- u la tension de l'arc
- i le courant de l'arc.
- τ la constante de temps de l'arc
- p la pression de remplissage du disjoncteur
- P_0 la puissance de refroidissement
- U_0 le pourcentage constant de la caractéristique $u-i$ de l'état statique (Fig. 3-1).

Les paramètres indépendants de ce modèle sont τ , P_0 et U_0

3.4.2 Le modèle de Habedank

L'arc est considéré comme une entité physique formé par deux composants en série, l'un est décrit par l'équation de Mayr et l'autre par l'équation de Cassie (Fig. 3-2) [27, 28].

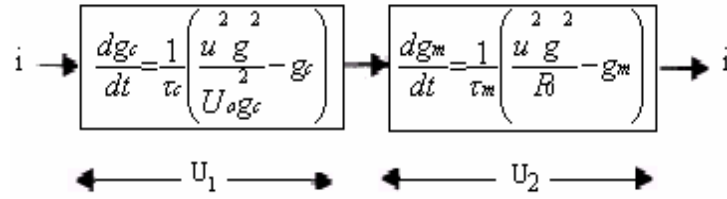


Fig. 3-2 — Le modèle de Habedank

Les équations du modèle sont :

$$\begin{aligned} \frac{dg_c}{dt} &= \frac{1}{\tau_c} \left(\frac{u^2 g^2}{U_0 g_c} - g_c \right) \\ \frac{dg_m}{dt} &= \frac{1}{\tau_m} \left(\frac{u^2 g^2}{P_0} - g_m \right) \end{aligned} \quad (3-13)$$

$$\frac{1}{g} = \frac{1}{g_c} + \frac{1}{g_m}$$

- g la conductance totale de l'arc
- u la tension totale de l'arc
- i le courant de l'arc
- U_0 le pourcentage constant de la caractéristique $u-i$ de l'état statique (Fig. 3-1).
- g_c la conductance de l'arc décrite par l'équation de Cassie
- τ_c la constante de temps de Cassie
- P_0 la puissance de refroidissement de l'état statique de Mayr
- g_m la conductance de l'arc décrite par l'équation de Mayr
- τ_m la constante de temps de Mayr

Chaque équation contient deux paramètres, donc ce modèle a quatre paramètres indépendants à déterminer τ_c , U_0 , τ_m et P_0 .

3.4.3 Le modèle de Schwarz

C'est le modèle le plus utilisé et rencontré dans la littérature scientifique [15, 17, 22, 29]. La constante de temps et la puissance de refroidissement dépendent de la conductance de l'arc:

$$\tau = \tau_0 \cdot g^\alpha$$

$$P = P_0 \cdot g^\beta$$

L'équation de ce modèle est :

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\tau_0 g^\alpha} \left(\frac{ui}{P_0 g^\beta} - 1 \right) \quad (3-14)$$

g la conductance de l'arc

u la tension de l'arc

i le courant de l'arc.

τ la constante de temps de l'arc

P la puissance de refroidissement

α le paramètre qui influe sur τ en fonction de g

β le paramètre qui influe sur P en fonction de g .

α et β sont tous les deux, des paramètres expérimentaux constants.

Pour $\alpha=0$ et $\beta=1$ on aura le modèle de Cassie :

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{ui}{P} - 1 \right) = \frac{1}{\tau_0} \left(\frac{ui}{P_0 \cdot g} - 1 \right) = \frac{1}{\tau_0} \left(\frac{u^2}{R} - 1 \right)$$

Pour $\alpha = \beta = 0$ on aura le modèle de Mayr :

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

Les quatre paramètres indépendants de ce modèle sont τ_0 , α , P_0 et β , ils varient suivant le disjoncteur et les conditions du circuit.

3.4.3 Le modèle d'Avdonin

C'est l'un des modèles de disjoncteurs de l'EMTP (électromagnetic transient program). C'est le modèle de Schwarz mais la constante de temps et la puissance de refroidissement sont en fonction de la résistance de l'arc [22, 24].

Ce modèle a pour équation :

$$\tau = \frac{\tau_0}{r^\alpha}$$

$$P = \frac{P_0}{r^\beta}$$

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{dr}{dt} = \frac{1}{(\tau_0 / r^\alpha)} \left(1 - \frac{ui}{(P_0 / r^\beta)} \right) \quad (3-15)$$

r la résistance de l'arc

Les quatre paramètres indépendants de ce modèle sont τ_0 , α , P_0 et β , ils varient suivant le disjoncteur et les conditions du circuit.

3.4. Le modèle de KEMA

C'est un modèle très récent constitué de trois sous-modèles en série. Les processus lents de l'arc sont représentés par un modèle hybride Cassie-Mayr, les processus intermédiaires suivent un modèle presque du type Mayr tandis que les processus rapides sont décrits par un modèle de Mayr pur [18, 20].

Chaque sous-modèle est décrit par une équation différentielle du premier ordre :

$$\frac{dg_j}{dt} = \frac{1}{P_j \tau_j} \cdot g_j^{\lambda_j} u_j^2 - \frac{1}{\tau_j} g_j \quad j=1, 3 \quad (3-16)$$

g_j la conductance partielle de la $j^{\text{ème}}$ portion de l'arc.

P_j la puissance de refroidissement de la $j^{\text{ème}}$ portion de l'arc.

τ_j la constante de temps de la $j^{\text{ème}}$ portion de l'arc.

u_j la tension partielle de la $j^{\text{ème}}$ portion de l'arc.

i le courant de l'arc

λ_j la commande Cassie-Mayr, de la $j^{\text{ème}}$ portion de l'arc.

Choix des sous-modèles

En se basant sur les résultats des mesures d'un grand nombre de tests (Fig. 3-3) [2]:

- le premier sous-modèle a été choisi de type Cassie-Mayr ($\lambda_1 = 1.4$)
- le deuxième sous-modèle a été choisi presque du type Mayr ($\lambda_2 = 1.9$)
- le troisième sous-modèle a été choisi du type Mayr pur ($\lambda_3 = 2$)

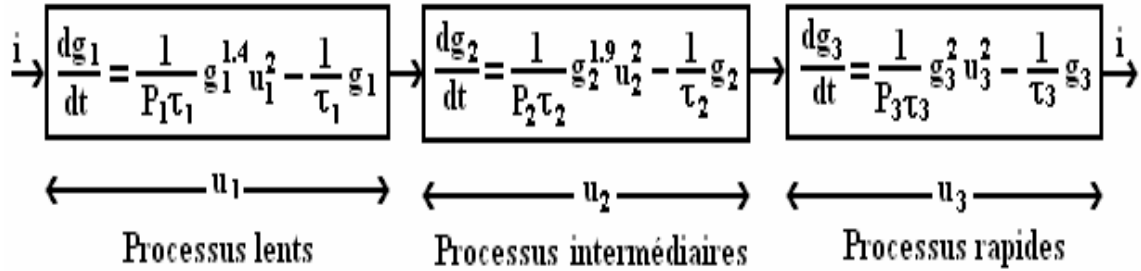


Fig. 3-3 — Le modèle de KEMA

La conductance totale g de l'arc est :

$$\frac{1}{g} = \sum_{j=1}^3 \frac{1}{g_j} = \frac{1}{g_1} + \frac{1}{g_2} + \frac{1}{g_3} \quad (3-17)$$

La tension u de l'arc est :

$$u = \sum_{j=1}^3 u_j = u_1 + u_2 + u_3 \quad (3-18)$$

Le courant i est commun aux trois portions de l'arc :

$$i = gu = \frac{g_1 g_2 g_3}{g_2 g_3 + g_1 g_3 + g_1 g_2} \cdot u$$

Les paramètres du modèle

Pour un disjoncteur donné, il existe une relation fixe entre quelques paramètres :

$$\tau_2 = \frac{\tau_1}{k_1} \quad \tau_3 = \frac{\tau_2}{k_2} \quad P_3 = \frac{P_2}{k_3} \quad (3-19)$$

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

Les paramètres $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ sont constants dans tous les tests.

D'où les paramètres indépendants du modèle sont τ_1, P_1 et P_2

3.4.6 Le modèle de Schavemaker

C'est le modèle le plus récent, avec le paramètre τ constant et la puissance de refroidissement en fonction de la puissance électrique d'entrée [22, 24, 30]:

$$P = P_0 + P_1 ui$$

P_0 la constante de la puissance de refroidissement liée à la conception du disjoncteur

P_1 la constante qui régularise l'influence de la puissance électrique d'entrée sur la puissance de refroidissement.

L'équation du modèle est alors:

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{ui}{P_0 + P_1 ui} - 1 \right) \quad (3-20)$$

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

Correction facultative du modèle dans le domaine des courants forts

Après avoir déterminé les paramètres du modèle décrit par l'équation (3-20), les courants et les tensions sont calculés en utilisant l'équation (3-20), puis ils sont comparés avec les tensions et les courants mesurés (Fig. 3-4).

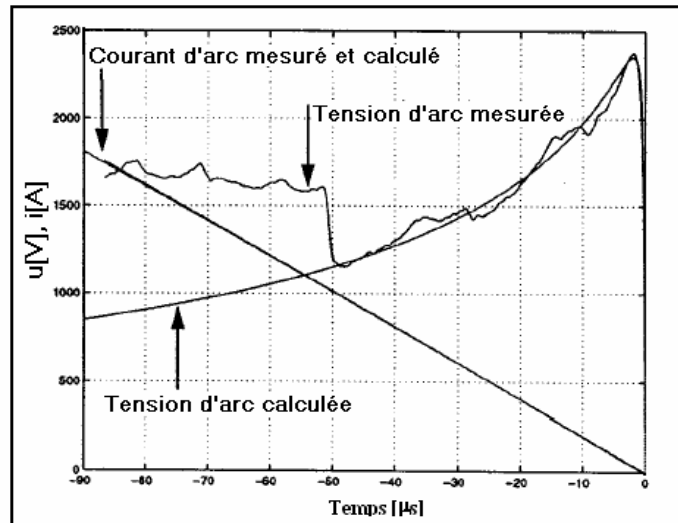


Fig. 3-4 — Les courbes des courants et des tensions de l'arc calculés et mesurés[24].

Le nouveau modèle d'arc reproduit bien les courants et les tensions mesurés, sauf dans le domaine des courants forts où les tensions d'arc calculées sont plus faibles que

celles mesurées, cela a été amélioré de la manière suivante:

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{ui}{\max(U_0 |i|, P_0 + P_1 ui)} - 1 \right) \quad (3-21)$$

U_0 la tension constante de l'arc dans le domaine des courants forts (Fig. 3-1).

a/ Domaine des courants forts

L'équation (3-21) sera réduite à:

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{u}{U_0} - 1 \right) \quad (3-22)$$

Cette équation montre une claire conformité avec le modèle d'arc de Cassie qui a prouvé sa validité dans le domaine des courants forts.

b/ Domaine des courants faibles

- Avant le zéro du courant:

Les équations (3-20) et (3-21) seront réduites à:

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{ui}{P_0} - 1 \right)$$

C'est exactement le modèle de Mayr qui a prouvé sa validité dans la région du zéro du courant.

- Après le zéro du courant :

Le modèle de Mayr est retrouvé car on considère après l'extinction de l'arc que la constante P_1 est nulle.

3.5 Conclusion

Tous les modèles d'arc à boîte noire ont pour origine les deux modèles de base de Cassie et de Mayr. Les modèles d'arc à boîte noire améliorés cités dans ce chapitre ont prouvé relativement leur efficacité dans le domaine des courants faibles et dans le domaines des courants forts, cependant le modèle le plus récent de Schavemaker est une véritable innovation, il est apprécié par tous les chercheurs dans le domaine de la modélisation des disjoncteurs SF6 haute tension.

4.1 Introduction

Les modèles d'arc à boîte noire étaient à l'origine développés pour une meilleure compréhension du processus d'interruption du courant dans les disjoncteurs SF6 haute tension et pour être capable de concevoir les chambres de coupure, mais les phénomènes physiques qui interviennent lors de l'interruption du courant sont tellement complexes qu'il n'est pas encore possible d'utiliser ces modèles pour la conception des disjoncteurs. Cependant ils sont très utilisés dans l'étude de l'interaction arc-circuit. Dans ce contexte, le modèle d'arc simule le comportement fortement non linéaire de l'arc dans le disjoncteur.

Ce chapitre est un traitement numérique du problème de la coupure par disjoncteur SF6 haute tension, il est présenté en deux parties. Dans la première partie est expliquée l'implantation des modèles d'arc à boîte noire dans le nouveau logiciel AMB (Arc Model Blockset) [31, 32]. La deuxième partie est consacrée à la comparaison des modèles d'arc implémentés dans l'AMB suivants: le modèle de Cassie, le modèle de Mayr, le modèle de Mayr modifié et le modèle de Schavemaker. Dans ce but quatre programmes basés sur la méthode des moindres carrés et la fonction d'optimisation *fmins* de MATLAB ont été développés pour extraire les paramètres des modèles. Les oscillogrammes de tension et de courant nécessaires à l'extraction des paramètres ont été obtenus par des simulations à l'AMB en utilisant le modèle de Schavemaker. Les paramètres trouvés sont ensuite introduits dans l'AMB pour lancer le processus d'interruption par chacun des modèles cités ci-dessus. Les résultats des simulations sont discutés et comparés.

PARTIE A

4.2 Technique de simulation dans l'AMB

Le nouveau logiciel AMB (Arc Model Blockset) est une librairie qui contient plusieurs modèles d'arc à boîte noire, qui peuvent être utilisés en combinaison avec MATLAB power system blockset. C'est un outil flexible pour l'étude de l'interaction arc-circuit. L'arc électrique est simulé comme étant un modèle à boîte noire.

4.2.1 Implémentation des modèles d'arc dans le Simulink de MATLAB

Dans le Simulink de MATLAB, les modèles d'arc ont été modélisés comme une source de tension et une source de courant contrôlée. Comme exemple, la figure 4-1 donne l'implémentation du modèle de Mayr; les différents blocks de cette figure sont expliqués ci-dessous :

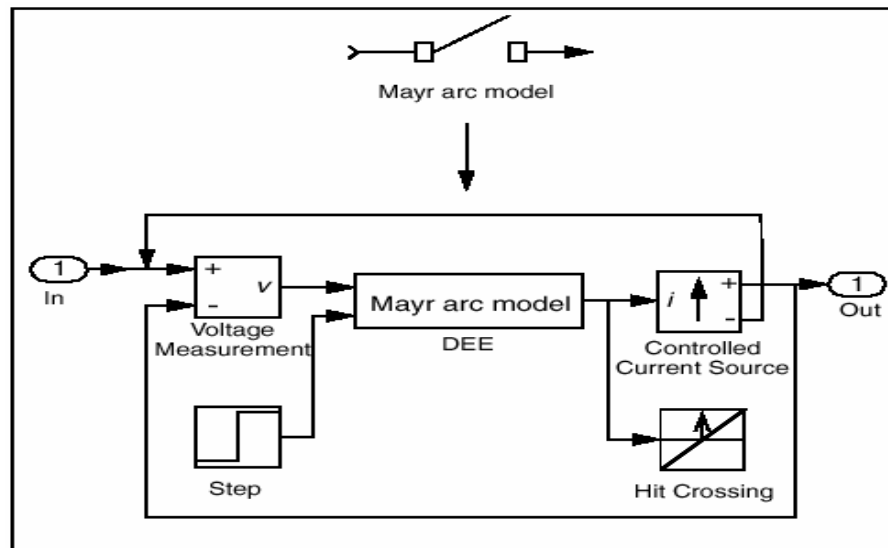


Fig. 4-1— Implémentation du modèle de Mayr [32]

A/ Le block DEE: Editeur d'équations différentielles

Les équations du modèle de Mayr ont été incorporées à l'aide du block DEE (Differential Equation Editor) de Simulink. Le système d'équations suivant est résolu :

$$\frac{dx(1)}{dt} = \frac{u(2)}{\tau} \left(\frac{e^{x(1)} u(1)^2}{P} - 1 \right)$$

$$y = e^{x(1)} u(1)$$

$$\frac{d \ln g}{dt} = \frac{u(2)}{\tau} \left(\frac{g u^2}{P} - 1 \right) \quad (4-1)$$

$$i = g u$$

x(1) la variable d'état de l'équation différentielle, c'est l'algorithme népérien de la conductance de l'arc $\ln g$.

x0 la valeur initiale de la variable d'état, c'est la valeur initiale de la conductance de l'arc $g(0)$.

u(1) la première entrée du block DEE, c'est la tension u de l'arc.

u(2) la deuxième entrée du block DEE, elle représente l'état des contacts du disjoncteur :
 $u(2) = 0$ quand les contacts sont fermés.

$u(2) = 1$ quand les contacts sont ouverts.

y la sortie du block DEE, c'est le courant i de l'arc.

g la conductance de l'arc.

u la tension de l'arc.

i le courant de l'arc.

τ la constante de temps de l'arc.

P la puissance de refroidissement.

B/ Le block Hit Crossing

Le block 'Hit crossing' de Simulink détecte quand l'entrée du block Hit crossing (dans ce cas le courant) franchi la valeur zéro, par conséquent en ajustant la taille du pas, le block assure que la simulation trouve le point du passage par zéro. Cela est important du moment où le passage par zéro du courant est un moment critique dans le processus d'interruption.

C/ Le block Step

Le block 'Step' de Simulink est utilisé pour contrôler la séparation des contacts du disjoncteur. Le pas est fixé entre 0 et 1 à l'instant spécifié de la séparation des contacts.

- Quand les contacts sont fermés, l'équation différentielle suivante est résolue:

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = 0$$

le modèle d'arc se comporte comme une conductance avec la valeur $g(0)$.

- A partir de l'instant de séparation des contacts, l'équation de Mayr est résolue :

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{gu^2}{Po} - 1 \right)$$

La valeur initiale $g(0)$ de la conductance de l'arc et l'instant de séparation des contacts doivent être spécifiés dans la boîte de dialogue du modèle d'arc ainsi que les paramètres du modèle (Fig. 4-2).

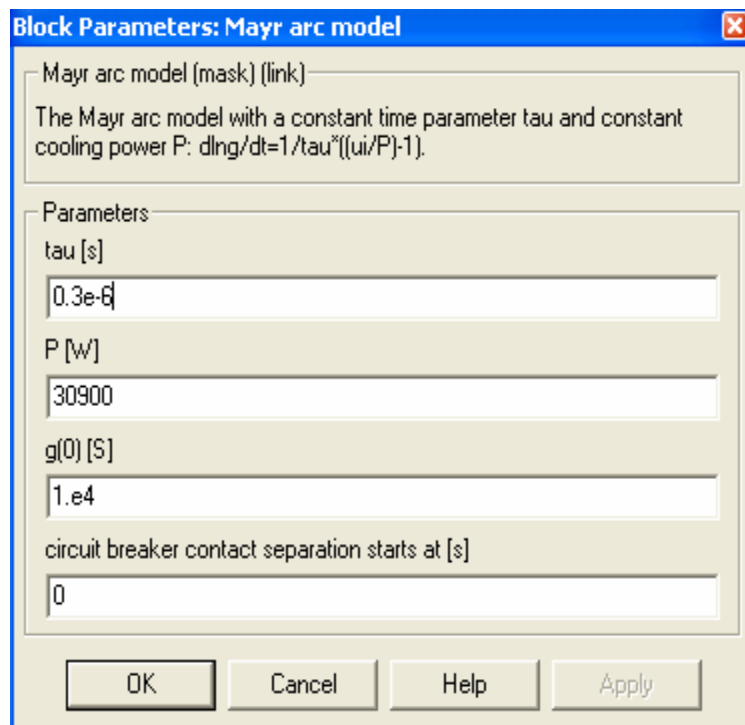


Fig. 4-2— boîte de dialogue du modèle de Mayr

4.2.2 Reproduction du processus d'interruption par l'AMB

Afin de reproduire le processus d'interruption d'un courant de défaut par l'AMB, on a choisi le modèle de Schavemaker avec les paramètres suivants [24] :

$$\tau = 0.27\mu s \quad P_0 = 15917 W \quad P_1 = 0.9913$$

Le circuit test utilisé est représenté sur la figure 4-3. Du côté de la source, le circuit $R_1L_1C_1$ est introduit pour produire la tension transitoire de rétablissement (TTR) tandis que le circuit $R_2L_2C_2$ de droite, représente une ligne de transmission courte, court-circuitée.

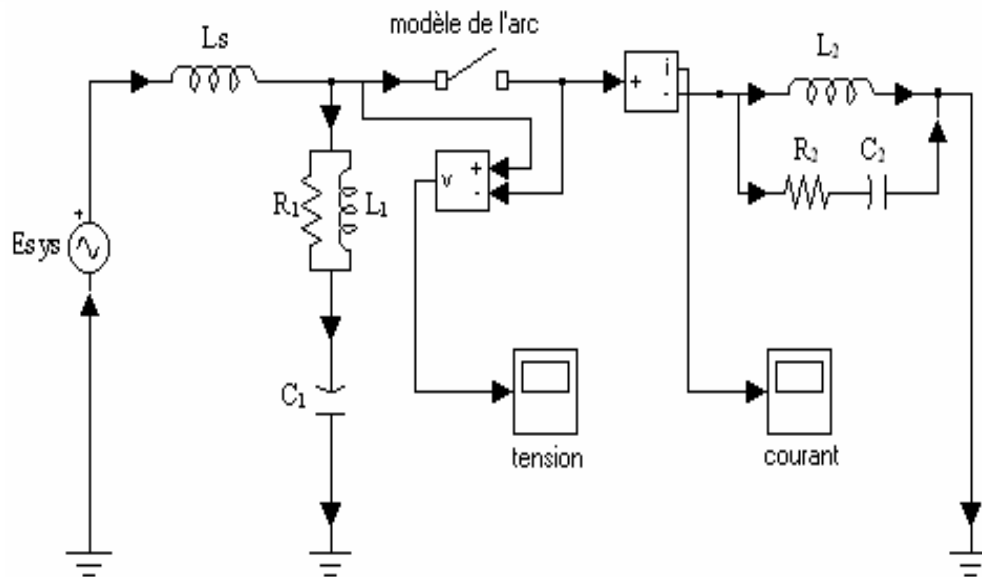


Fig. 4-3— Circuit test utilisé pour les simulations dans l'AMB.

Les paramètres du circuit sont :

$E_{sys} = 59196$ V(amplitude maximale), phase 90° , 60 Hz

$L_s = 3.52 \times 10^{-3}$ H

$R_1 = 29.8 \, \Omega$

$L_1 = 5.28 \times 10^{-3}$ H

$C_1 = 1.98 \times 10^{-6}$ F

$R_2 = 450 \, \Omega$

$L_2 = 6.256 \times 10^{-4}$ H

$C_2 = 1.93 \times 10^{-9}$ F

4.2.2.1 La séparation des contacts commence à $t_s=0$

A l'instant $t_s=0$ de l'onde du courant de court-circuit, on ouvre les contacts du disjoncteur; la durée d'arc est dans ce cas une demi période ; puisqu'on a choisi une fréquence du réseau de 60 Hz, la période est 16.66 ms, donc la durée d'arc est 8.33 ms.

La figure 4-4 et la figure 4-5 représentent respectivement le courant et la tension calculés de l'arc. On observe une interruption réussie car le courant s'annule après le passage par zéro et la TTR s'amortie.

Fig. 4-4— courant calculé quand la séparation des contacts commence à $t_s=0$

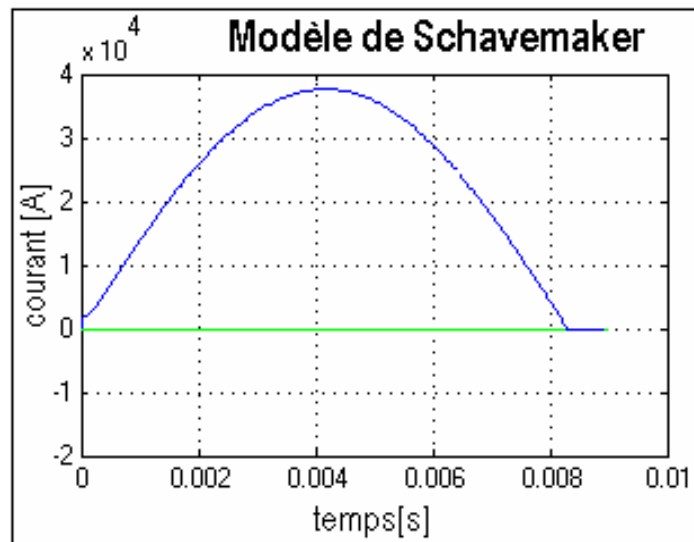
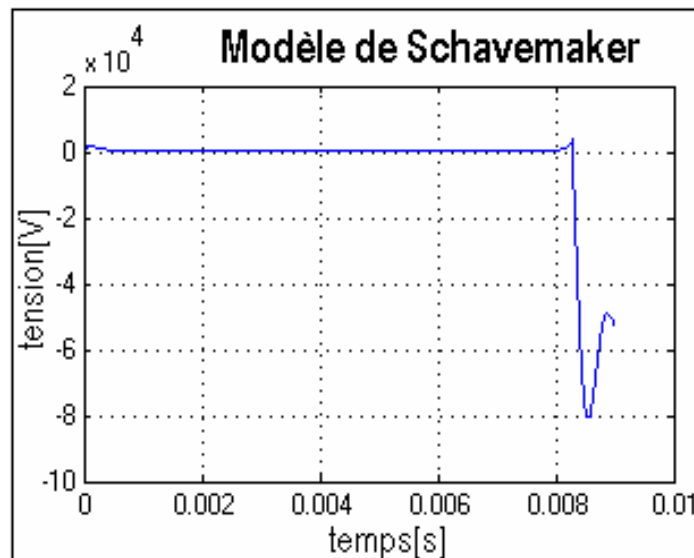


Fig. 4-5— tension calculée quand la séparation des contacts Commence à $t_s=0$



Le voisinage du zéro du courant sous la loupe

En faisant un zoom au voisinage du zéro du courant dans l'intervalle 8.296 ms à 8.299 ms (Fig. 4-6 et Fig. 4-7) on observe :

- un courant post-arc de - 0.045 A
- une TTR de valeur maximale - 80 kV
- un pic d'extinction de 5.74 kV

Fig. 4-6— courant post-arc calculé quand la séparation des contacts commence à $t_s=0$

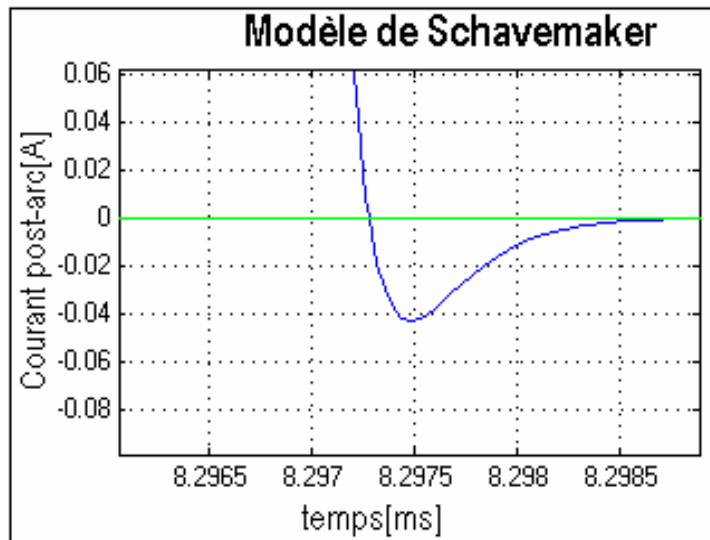
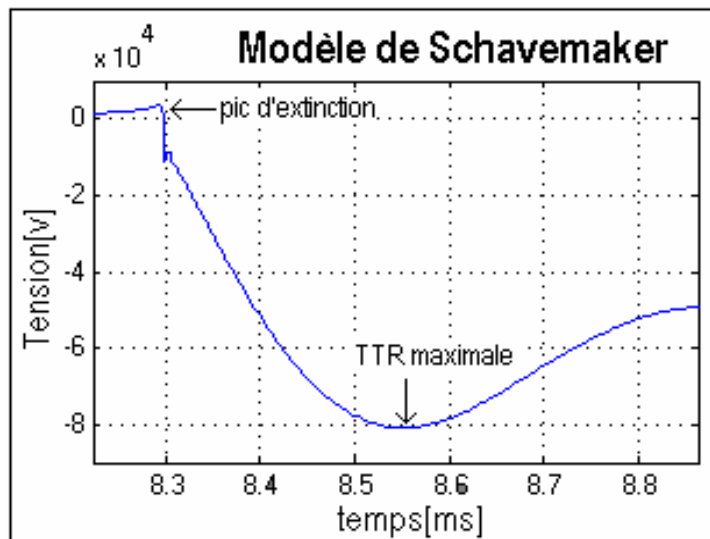


Fig. 4-7— tension transitoire de rétablissement (TTR) et le pic d'extinction calculés quand la séparation des contacts commence à $t_s=0$



4.2.2.2 La séparation des contacts commence à $t_s=8.24$ ms

A l'instant $t_s=8.24$ ms, on ouvre les contacts du disjoncteur. La durée d'arc est dans ce cas : $8.33-8.24=0.09$ ms.

La figure 4-8 et la figure 4-9 représentent respectivement le courant et la tension calculés de l'arc. On observe une interruption réussie car le courant s'annule après le passage zéro et la tension transitoire de rétablissement s'amortie.

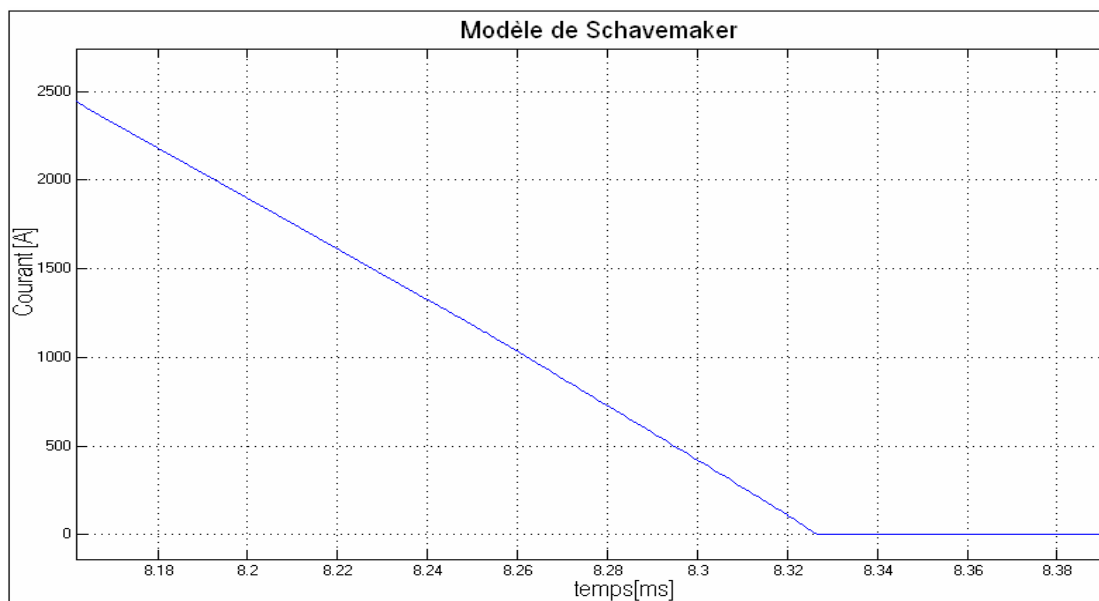


Fig. 4-8— courant calculé quand la séparation des contacts commence à $t_s=8.24$ ms

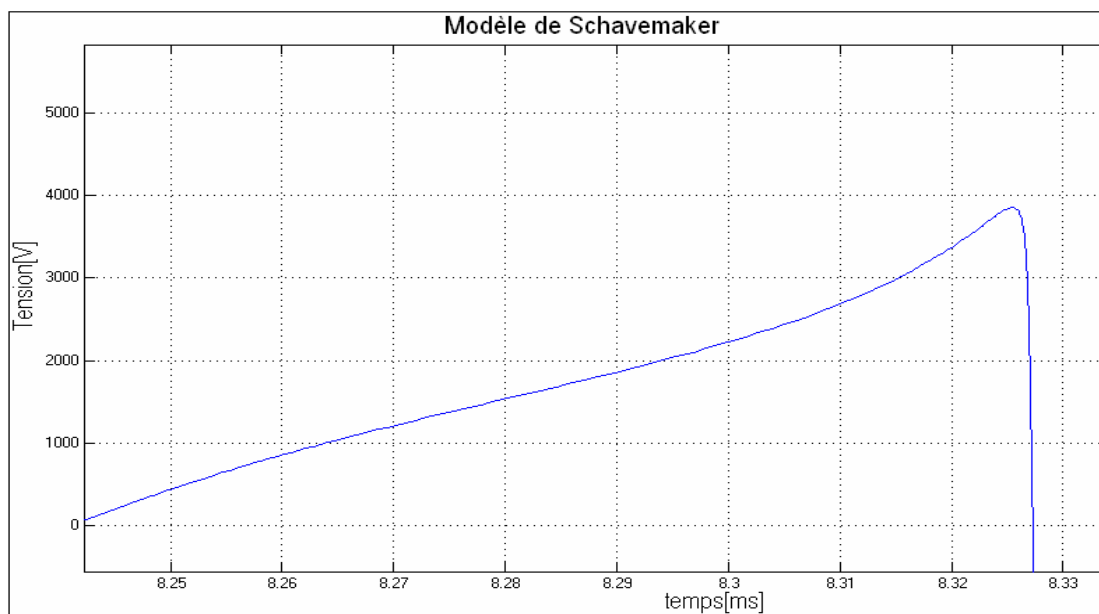


Fig. 4-9— tension calculée quand la séparation des contacts commence à $t_s=8.24$ ms

Le voisinage du zéro du courant sous la loupe

En faisant un zoom au voisinage du zéro du courant (Fig. 4-10 et Fig. 4-11), on observe :

- un courant post-arc de - 0.042 A
- une TTR de valeur maximale - 80.64 kV
- un pic d'extinction de 3.85 kV

Fig. 4-10— courant post-arc calculé quand la séparation des contacts commence à $t_s=8.24$ ms

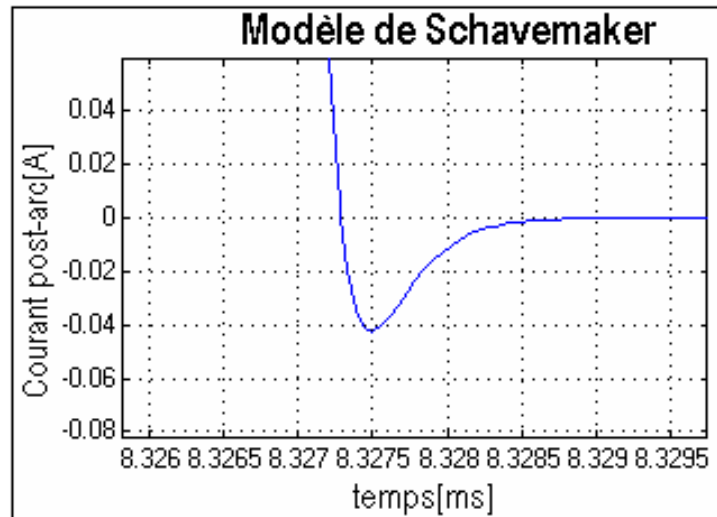
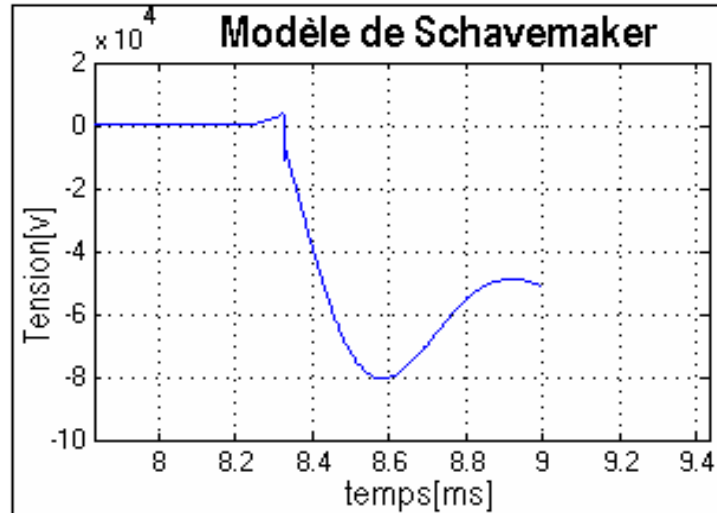


Fig. 4-11— tension transitoire de rétablissement (TTR) et le pic d'extinction quand la séparation des contacts commence à $t_s=8.24$ ms



PARTIE B

4.3 Comparaison des modèles d'arc

4.3.1 Les modèles d'arc à comparer

Dans cette partie, quatre modèles d'arc à boîte noire seront comparés; le modèle de Cassie, le modèle de Mayr, le modèle de Mayr modifié et le modèle de Schavemaker (voir chapitre 3).

4.3.2 Conditions nécessaires à la comparaison des modèles d'arc

Pour faire la comparaison des modèles d'arc cités ci-dessus, on doit utiliser :

- le même temps de coupure, soit 0.09 ms dans ce cas.
- les mêmes conditions du test avec lesquelles on a obtenu les oscillogrammes de tension et de courants mesurés (simulés), soit le circuit test de la figure 4-3 .
- les mêmes oscillogrammes de tension et de courant mesurés pour extraire les paramètres des équations différentielles décrivant la résistance non linéaire de l'arc électrique pour les mesures du test spécifique, soit les oscillogrammes de tension et de courant (simulés) des figures 4-8 et 4-9.

٤,٣,٣

Extraction des paramètres des modèles d'arc

Les quatre programmes MATLAB écrits pour extraire leurs paramètres des modèles à comparer sont basés sur le même algorithme [33]. La figure 4-12 donne l'algorithme général d'extraction des paramètres.

4.3.3.1 Description de la logique des programmes

1. des paramètres initiaux basés sur des connaissances préalables doivent être donnés.
2. les oscillogrammes de tension et de courant mesurés de l'arc, durant un test particulier sont donnés.
3. à partir de ces courbes les programmes calculent la conductance g et dI_{ng}/dt .
4. l'expression de la somme des erreurs au carré, en appliquant la méthode des moindres carrés est donnée pour chaque modèle.
5. la fonction *fmins* de MATLAB donne les paramètres qui donnent la somme des erreurs au carré minimale.
6. On fait l'optimisation des paramètres en jouant sur les paramètres initiaux.
7. les mêmes programmes seront utilisés après les simulations pour tracer les oscillogrammes de tension et de courant calculés.

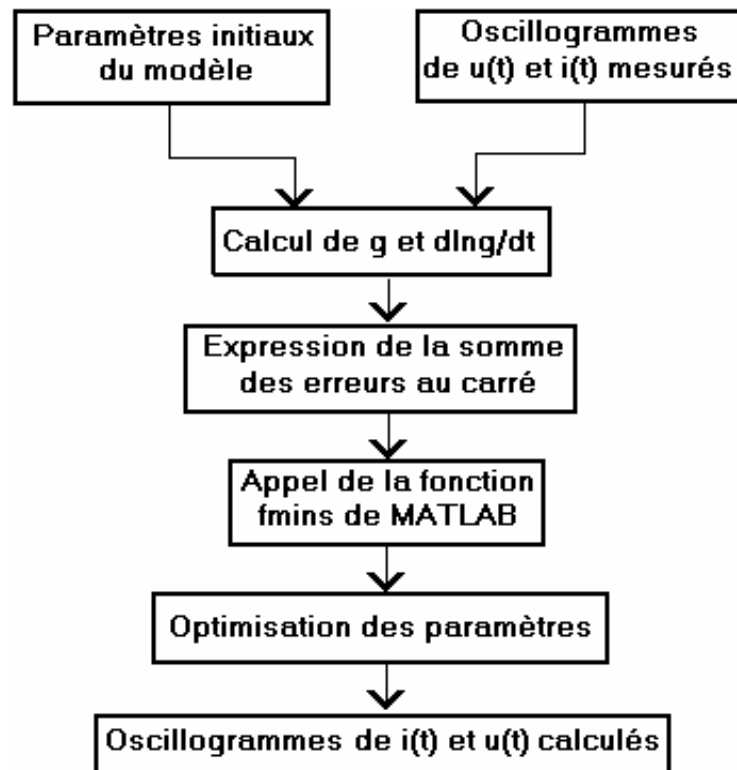


Fig. 4-12— algorithme général d'extraction des paramètres

4.3.3.2 Importation des données du Simulink vers l'environnement MATLAB

Pour commencer le processus d'identification des paramètres, on importe le groupe de données des figures 5-8 et 5-9 du Simulink vers l'environnement MATLAB. Pour cela on utilise le block 'to Workspace' et on choisi 'data explorer' du menu Tools de Simulink. Par la suite on sauvegarde les données dans un fichier .dat et on utilise la commande load pour charger ce fichier de données dans les quatre programmes.

4.3.3.3 Courbes mesurées données par les programmes

Les quatre programmes MATLAB donnent les courbes mesurées suivantes:

- le courant mesuré de l'arc (Fig. 4-13)
- la tension mesurée de l'arc (Fig. 4-14)
- la conductance mesurée de l'arc (Fig. 4-15)
- $dlng/dt$ mesurée (Fig. 4-16)

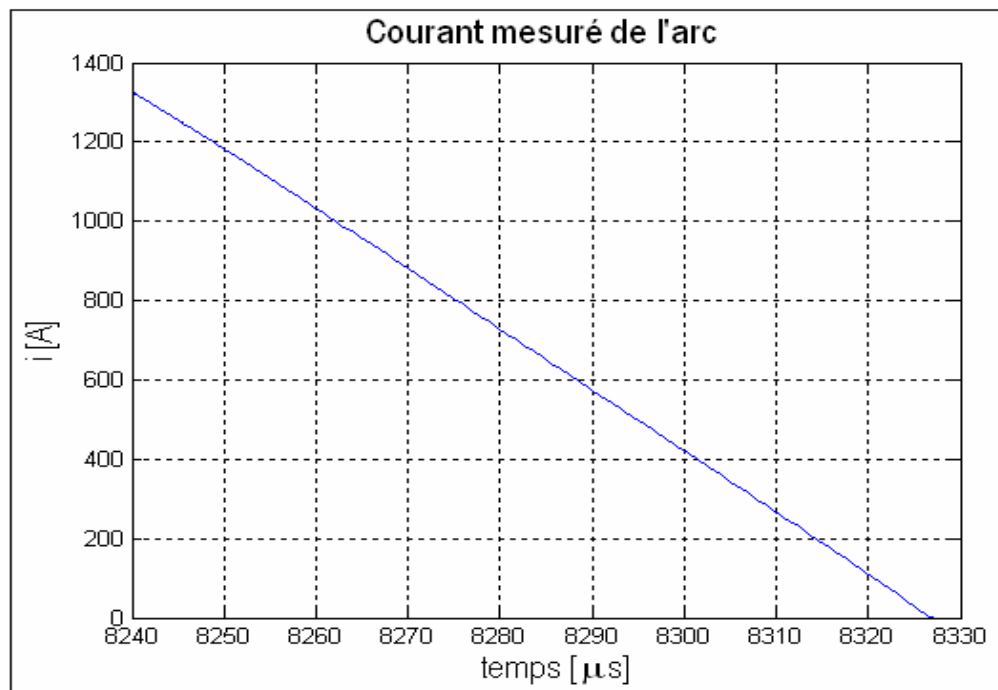


Fig. 4-13— Courant mesuré de l'arc.

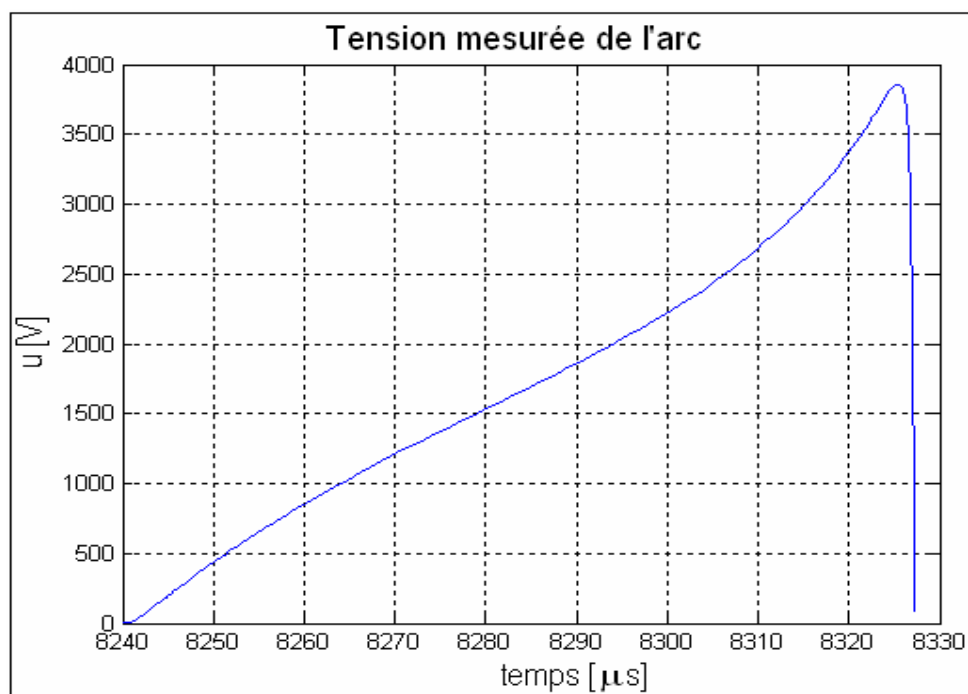


Fig. 4-14— Tension mesurée de l'arc.

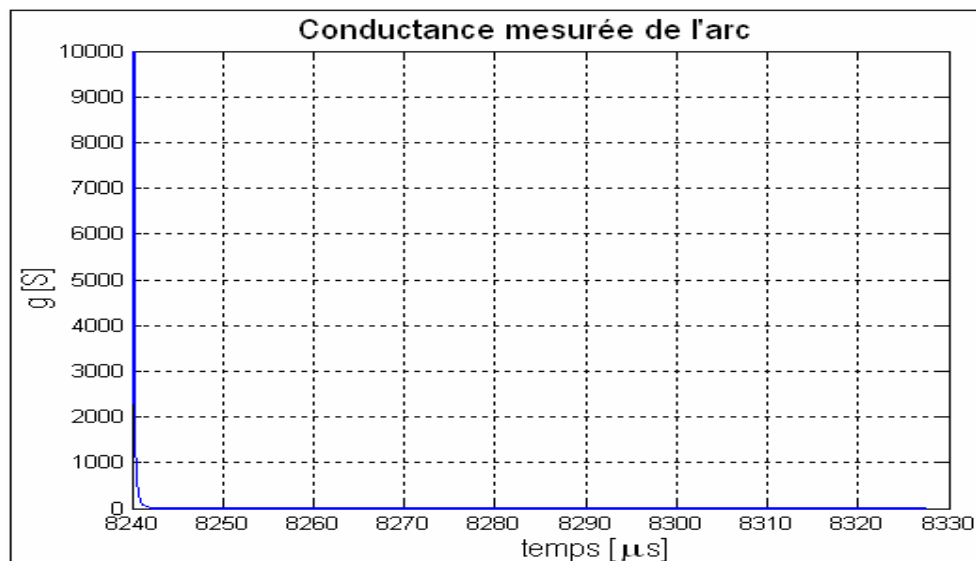


Fig. 4-15— Conductance mesurée de l'arc.

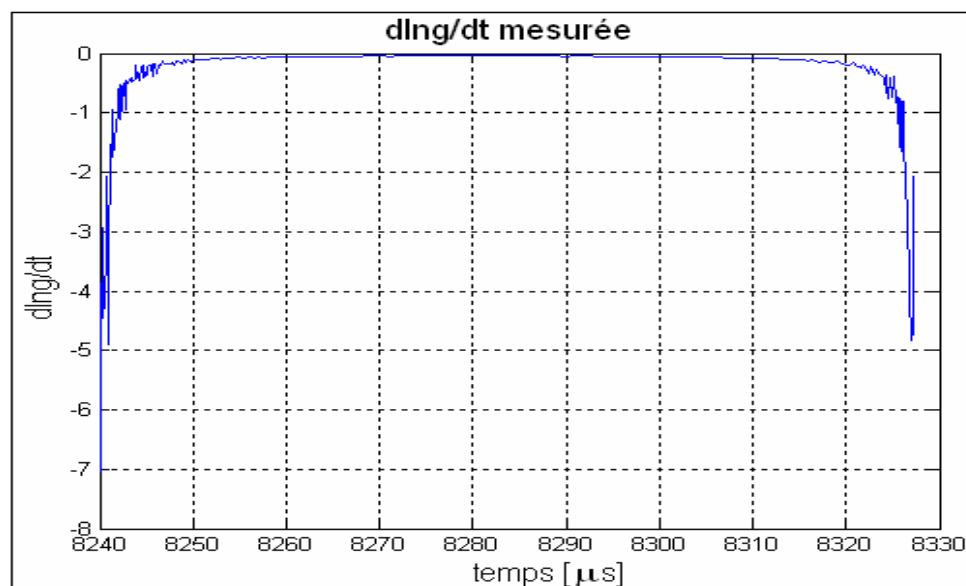


Fig. 4-16— $d\ln g/dt$ mesurée.

4.3.3.4 Identification des paramètres

Afin d'identifier les paramètres relatifs à chaque modèle, on fait varier les paramètres initiaux pour minimiser le plus possible l'écart entre $d\ln g/dt$ mesurée et $d\ln g/dt$ calculée. Les résultats sont les suivants :

1/ Le modèle de Cassie

Le programme relatif au modèle de Cassie donner les figures 4-17 et 4-18.

Les paramètres obtenus sont les suivants: $\tau=1.4745 \mu s$ $U_0=172\,970\,000\text{ V}$

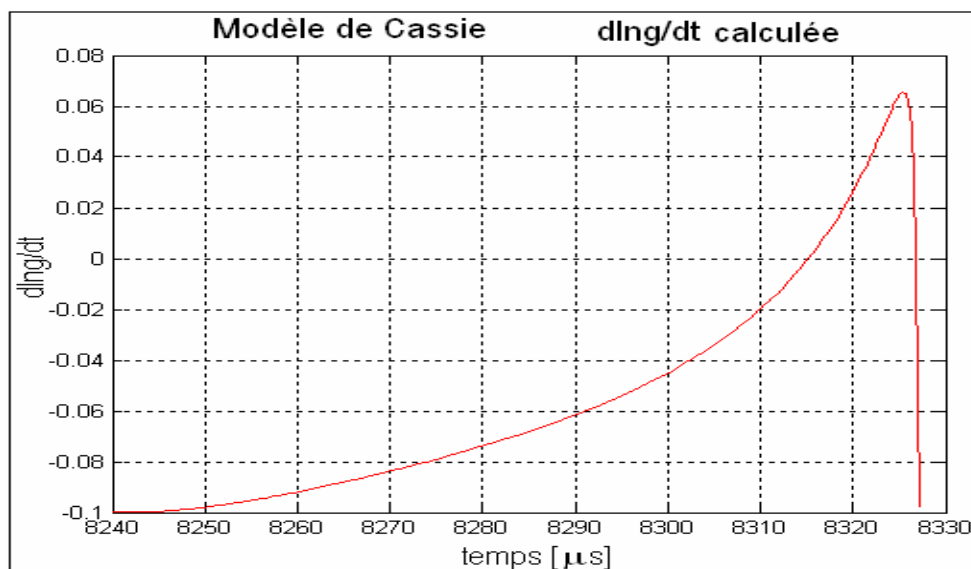


Fig. 4-17— dI_{ing}/dt calculée.

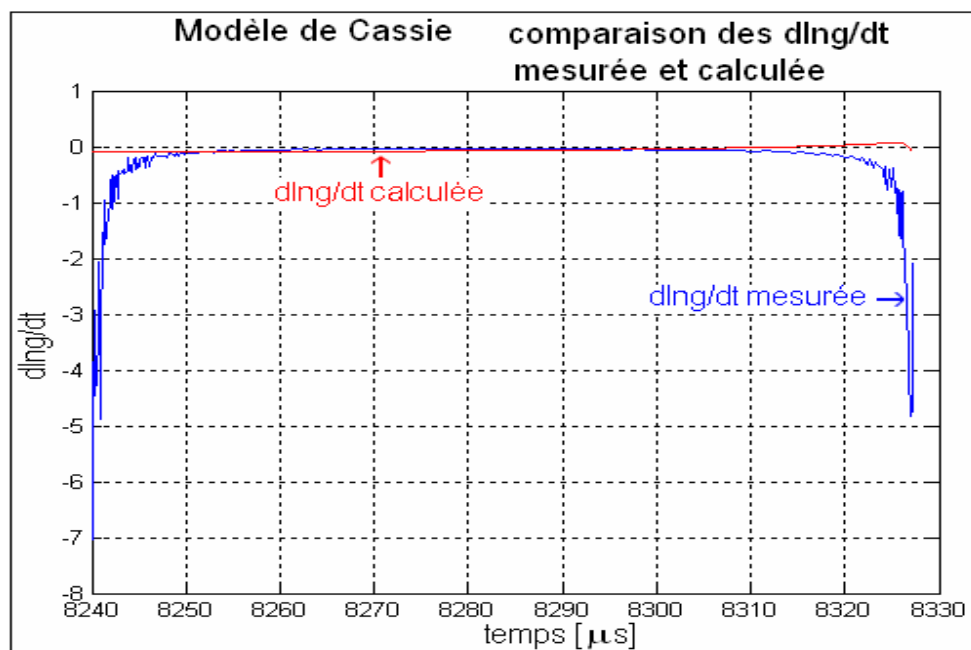


Fig. 4-18— Comparaison des courbes calculée et mesurée de dI_{ing}/dt .

2/ Le modèle de Mayr

Le programme relatif au modèle de Mayr donne les figures 4-19 et 4-20.

Les paramètres obtenus sont les suivants : $\tau = 0.67 \mu s$ et $P_0 = 846770 W$

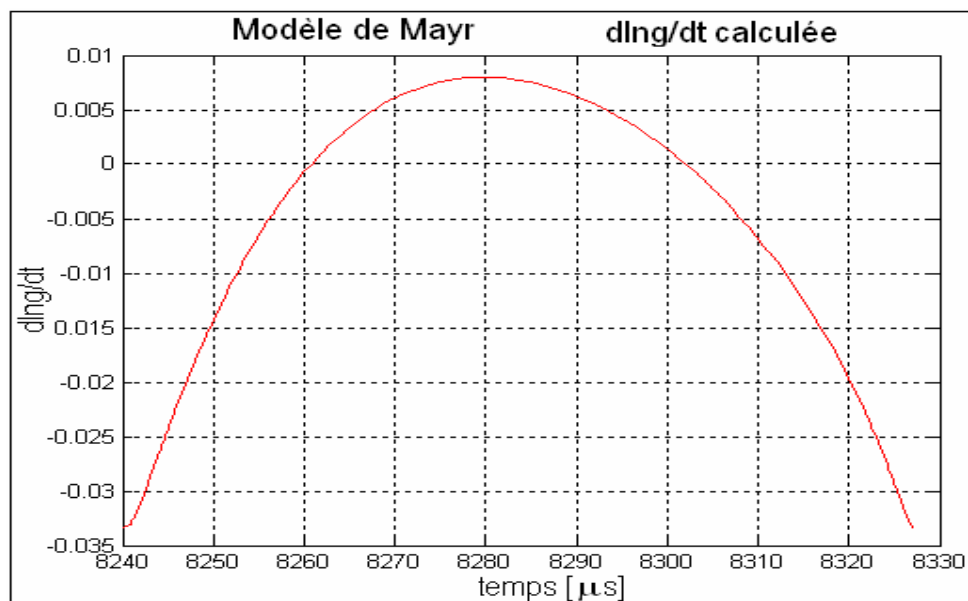


Fig. 4-19— $d\ln g/dt$ calculée.

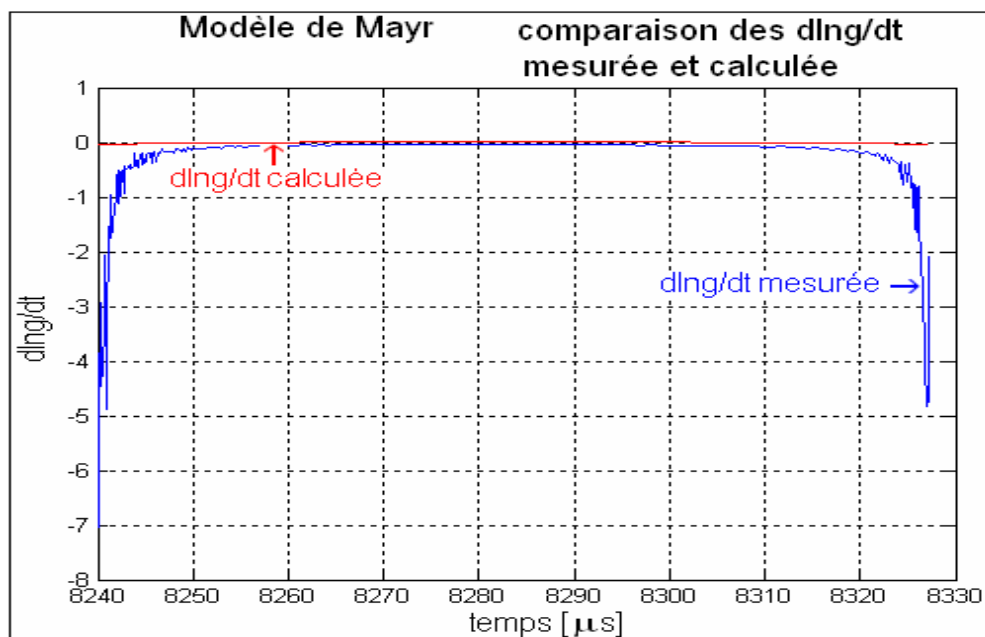


Fig. 4-20— Comparaison des courbes calculée et mesurée de $d\ln g/dt$.

3/ Le modèle de Mayr-modifié

Le programme relatif au modèle de Mayr modifié donne les figures 4-21 et 4-22.

Les paramètres obtenus sont les suivants : $\tau = 0.66 \mu s$ $P_0 = 209440 \text{ W}$ $U_0 = -83.045 \text{ V}$

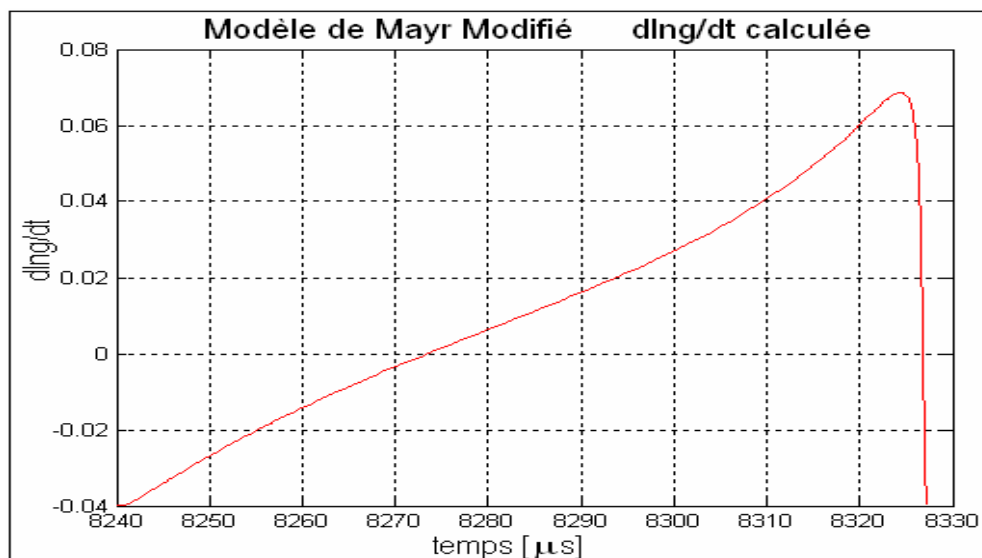


Fig.4-21— $d \ln g / dt$ calculée.

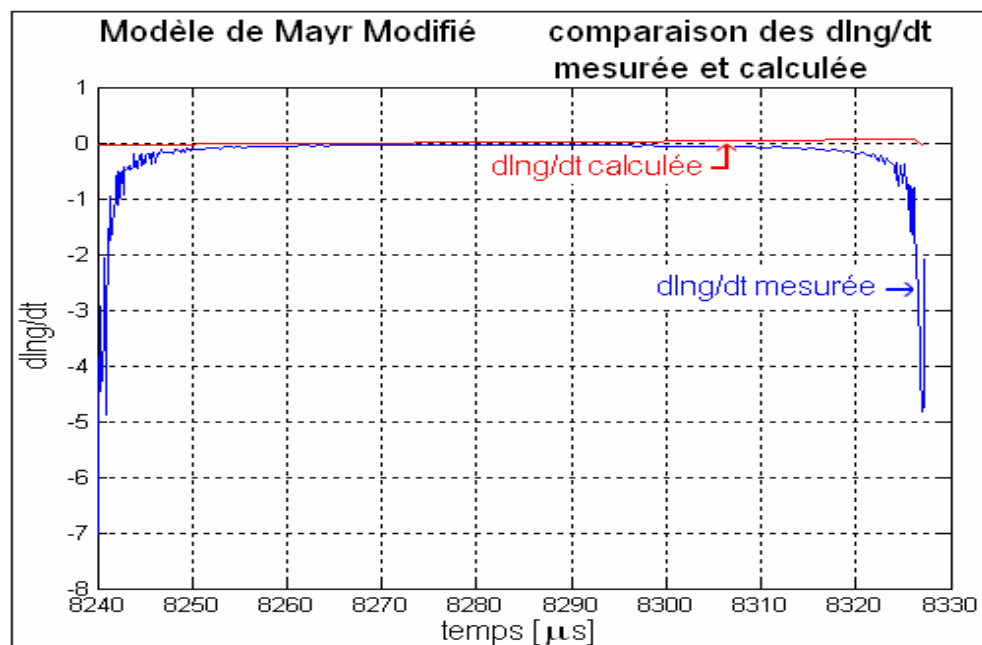


Fig.4-22— Comparaison des courbes calculée et mesurée de $d \ln g / dt$.

4/ Le modèle de Schavemaker

Le programme relatif au modèle de Schavemaker donne les figures 4-23 et 4-24.

Les paramètres obtenus sont les suivants : $\tau = 0.21\mu\text{s}$ $P_0 = 17931.07\text{ W}$ $P_1 = 0.9902$

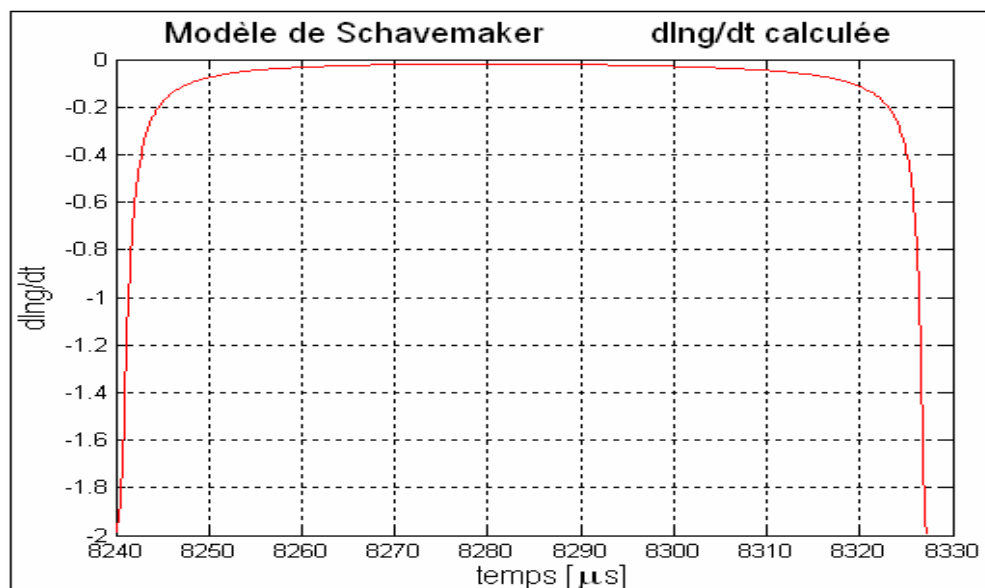


Fig. 4-23— dI_{lg}/dt calculée.

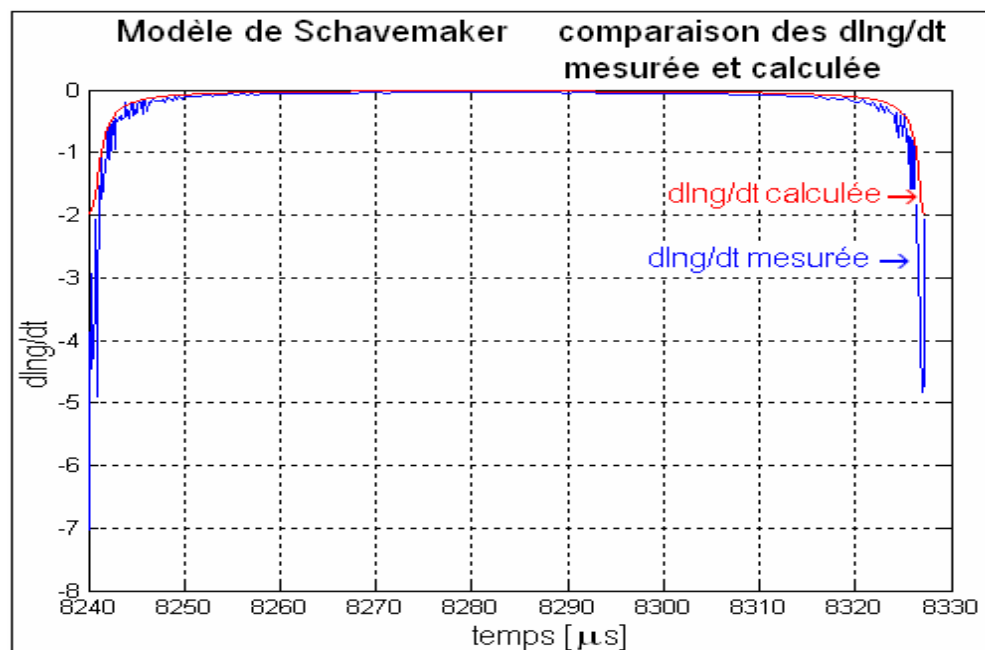


Fig. 4-24— Comparaison des courbes calculée et mesurée de dI_{lg}/dt .

4.4 Simulations numériques

Les simulations numériques se font en deux étapes :

1/ Dans la boîte de dialogue relative à chaque modèle du logiciel AMB, on écrit les paramètres optimisés de ce modèle et on lance le processus de simulation. Pour chaque modèle on obtient les courbes suivantes :

- Le courant de l'arc
- Le courant post-arc
- La TTR et le pic d'extinction

2/ On importe les données (résultats des simulations) de Simulink vers l'environnement MATLAB (voir paragraphe 4.3.3.2). Le programme de chaque modèle donne les courbes de la tension et du courant calculés.

4.4.1 Le modèle de Cassie

La figure 4-25 donne le courant de l'arc (voir après $t_s=8.24$ ms).

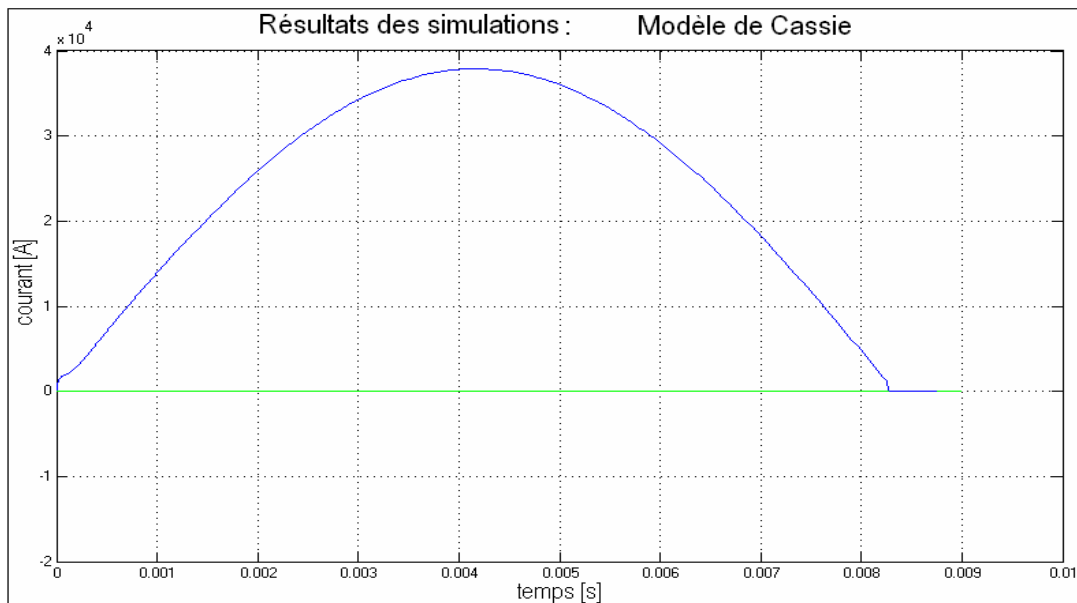


Fig. 4-25— courant calculé quand la séparation des contacts commence à $t_s=8.24$ ms – Modèle de Cassie –

En faisant un zoom au voisinage du zéro du courant, les figures 4-26 et 4-27 donnent successivement le courant post-arc, la TTR et le pic d'extinction .

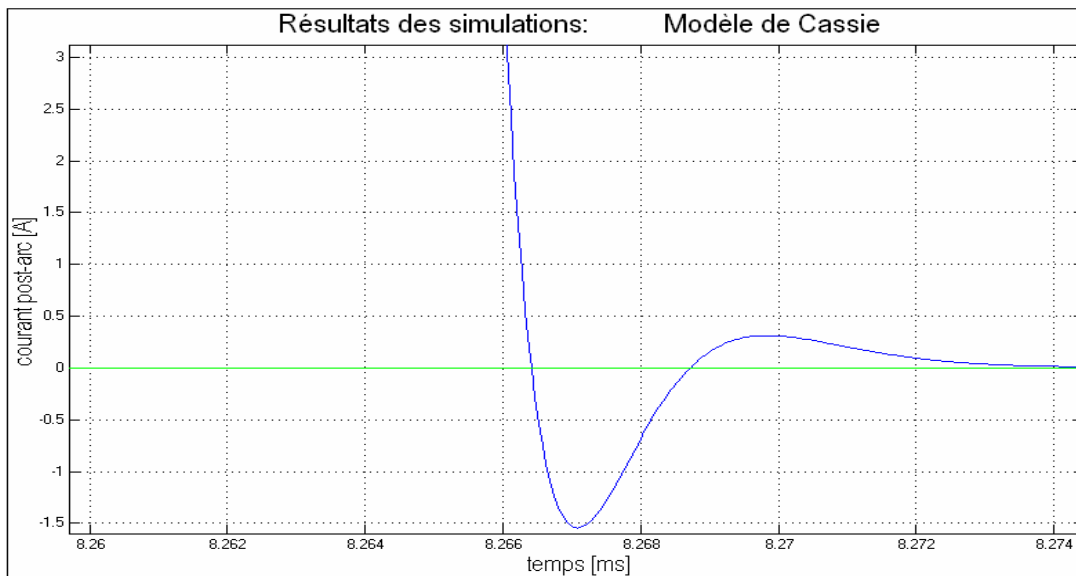


Fig. 4-26— courant post-arc quand la séparation des contacts commence à $t_s=8.24$ – Modèle de Cassie–

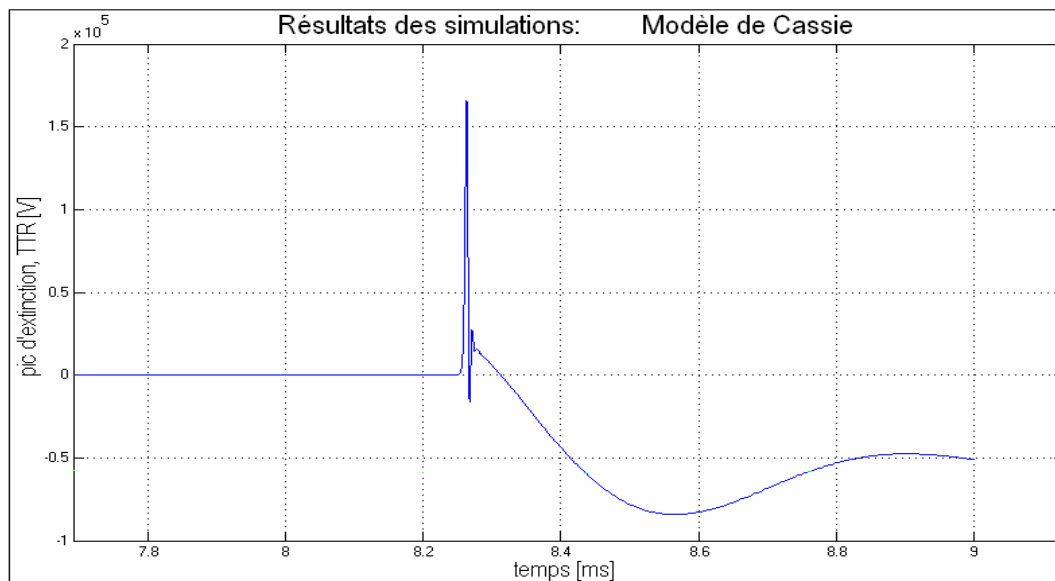


Fig. 4-27— tension transitoire de rétablissement (TTR) et le pic d'extinction – Modèle de Cassie–

On observe :

- un courant post-arc de - 1.5455 A
- une TTR maximale de - 84 276 V
- un pic d'extinction de 165 720 V

Le programme relatif au modèle de Cassie donne le courant calculé (Fig.4-28 et Fig. 4-29) et la tension calculée (Fig. 4-30 et Fig. 4-31):

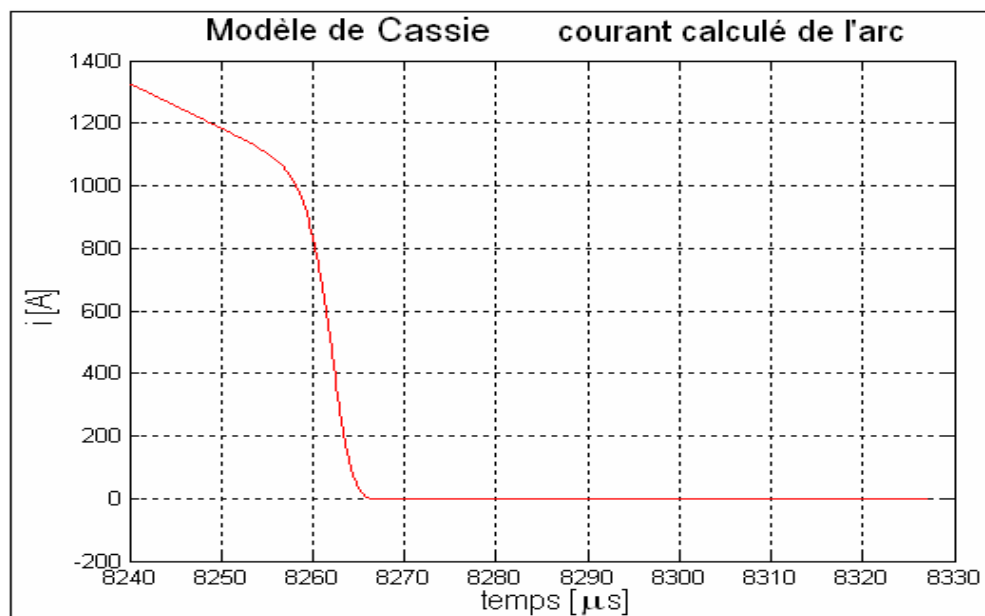


Fig. 4-28— courant calculé de l'arc

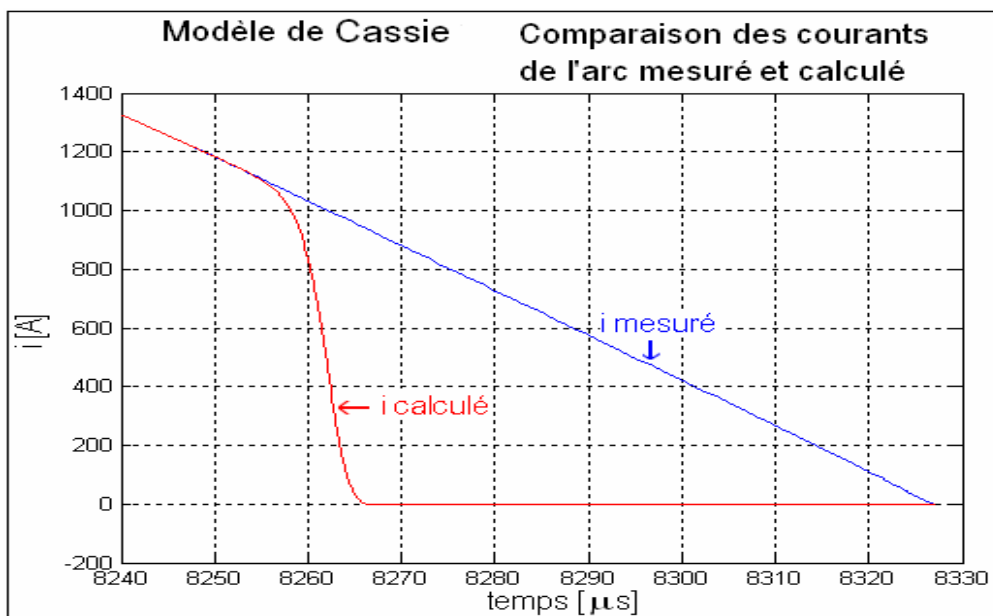


Fig. 4-29— comparaison des courants de l'arc mesuré et calculé

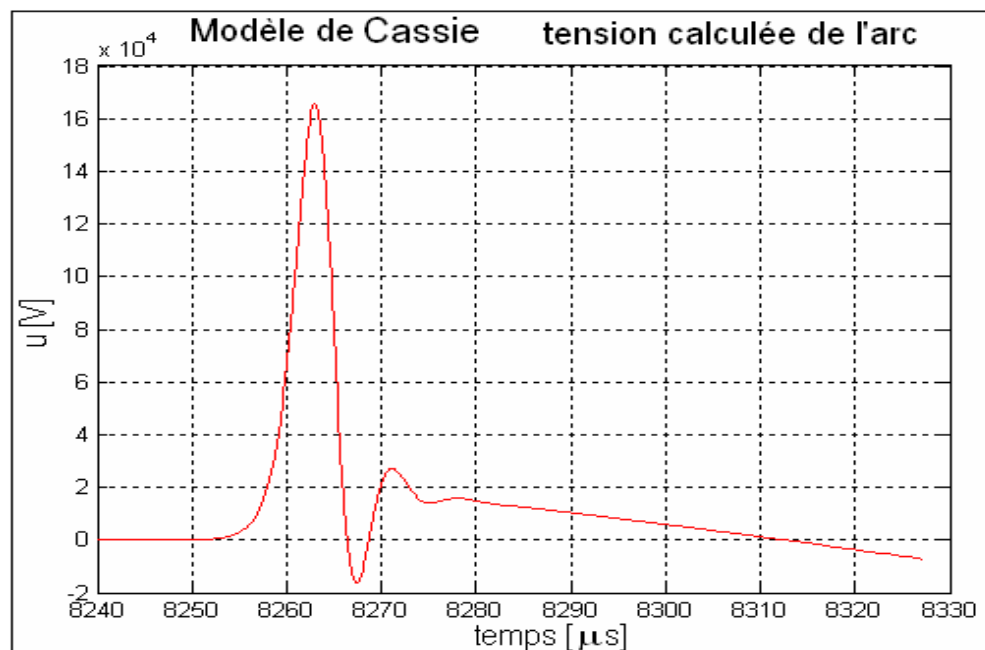


Fig. 4-30— tension calculée de l'arc

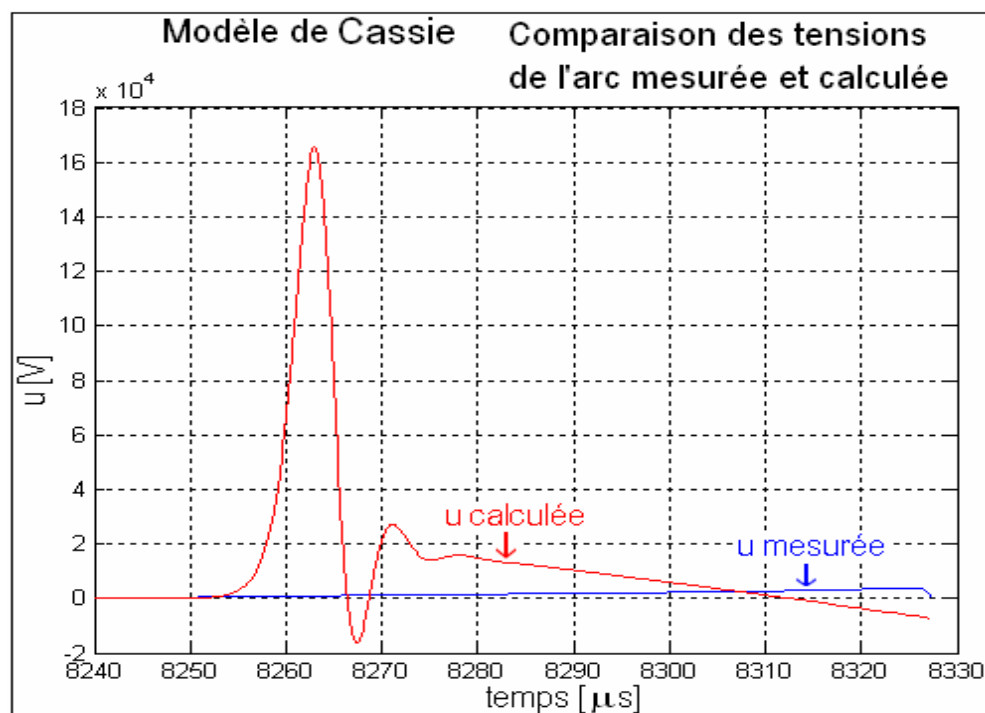


Fig. 4-31— comparaison des tensions de l'arc mesurée et calculée

Le modèle de Cassie donne une interruption réussie comme l'a donnée le test, car le courant s'annule après le passage par zéro et la TTR s'amortie, il donne une TTR maximale très proche de celle du test. Cependant il donne un grand courant post-arc, d'où la coupure risque d'échouer. Il donne aussi un pic d'extinction très élevé, car la coupure s'est produite bien avant le zéro naturel du courant, de ce fait, l'arc n'a pas eu le temps de s'allonger suffisamment, il en résulte une surtension fâcheuse pour le matériel. Ce modèle reproduit mal les courbes de tension et de courant mesurés sauf dans un petit domaine de courant forts supérieurs à 1100 A. Ce modèle n'est pas valide dans le domaine des courants faibles.

4.4.2 Le modèle de Mayr

La figure 4-32 représente le courant de l'arc (voir après $t_s=8.24$ ms).

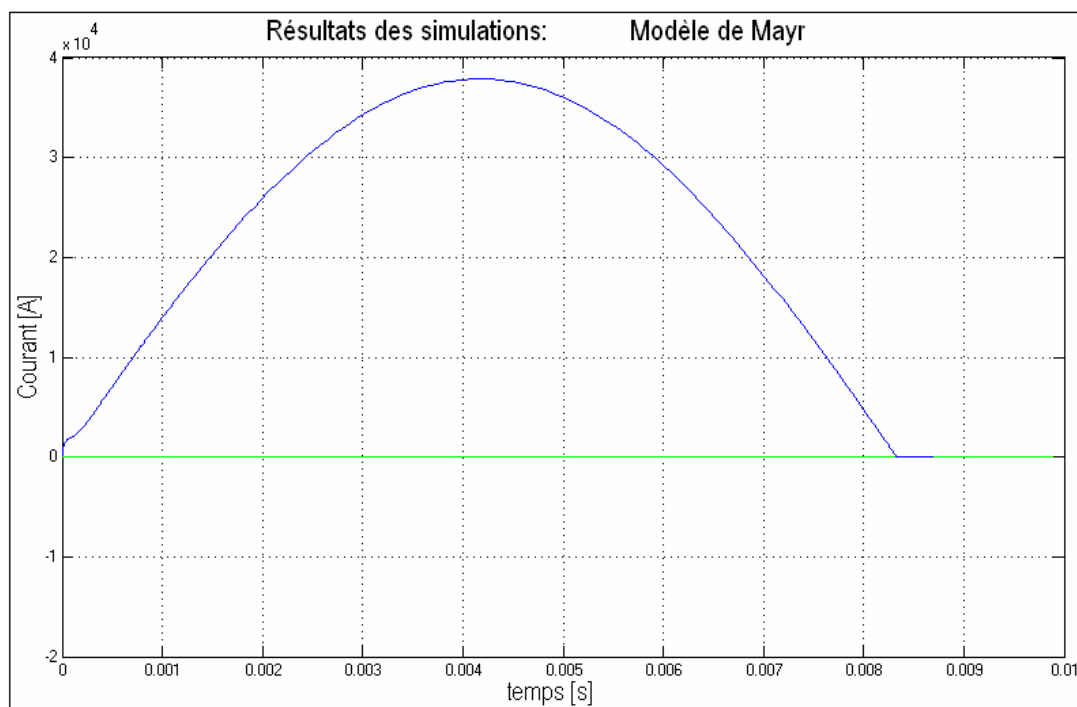


Fig. 4-32— courant calculé quand la séparation des contacts commence à $t_s=8.24$ ms – Modèle de Mayr –

En faisant un zoom au voisinage du zéro du courant, la figure 4-33 et la figure 4-34 représentent respectivement le courant post-arc, la TTR et le pic d'extinction .

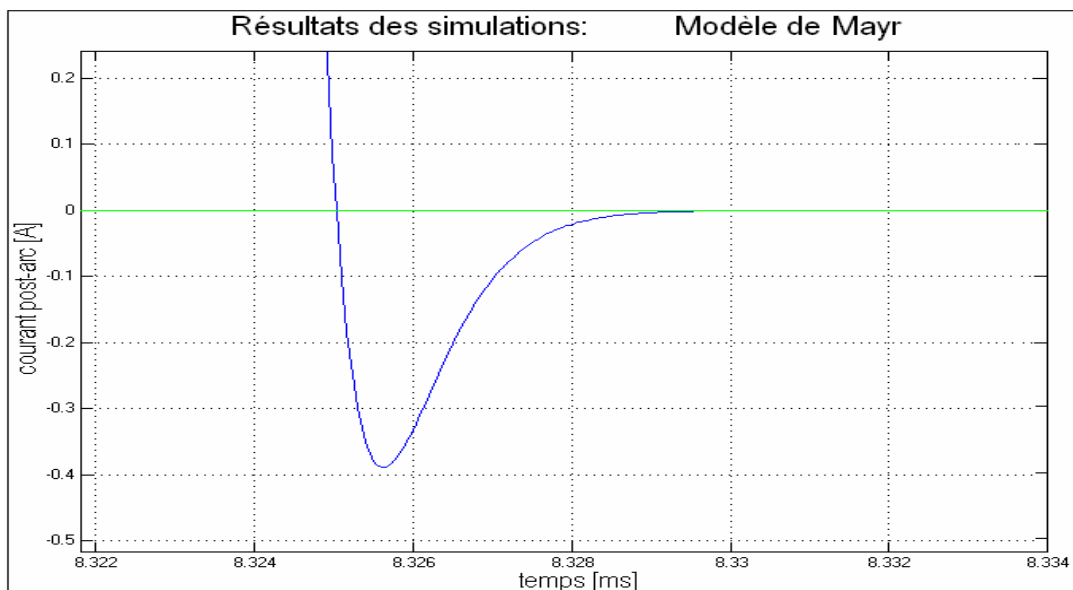


Fig. 4-33— courant post-arc calculé

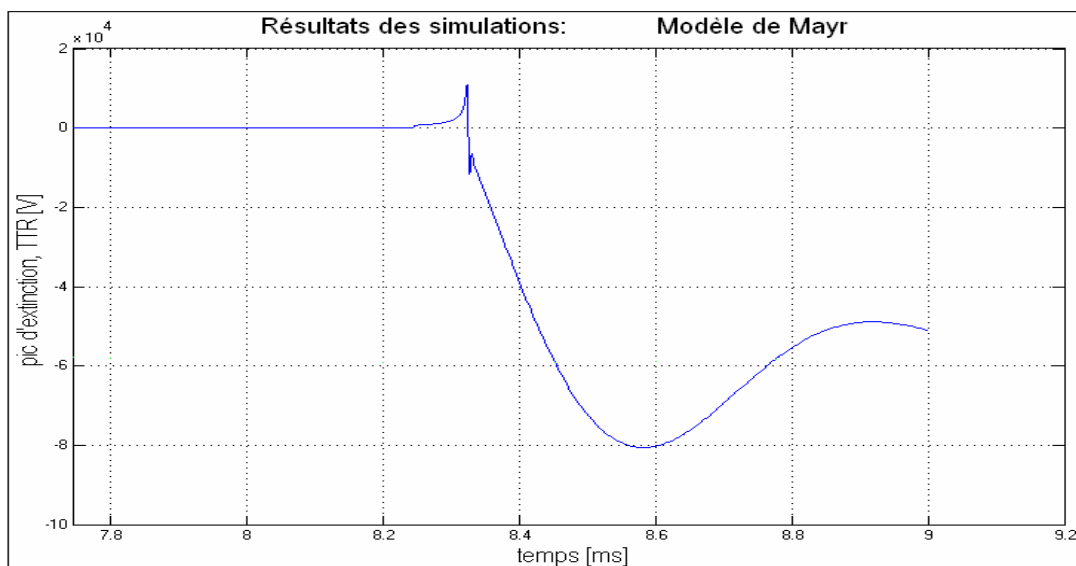


Fig. 4-34— tension transitoire de rétablissement (TTR) et le pic d'extinction

On observe :

- un courant post-arc de - 0.388 A
- une TTR maximale de - 80 632 V
- un pic d'extinction de 10 789 V

Le programme relatif au modèle de Mayr donne le courant calculé (Fig. 4-35 et Fig. 4-36) et la tension calculée (Fig. 4-37 et Fig. 4-38) :

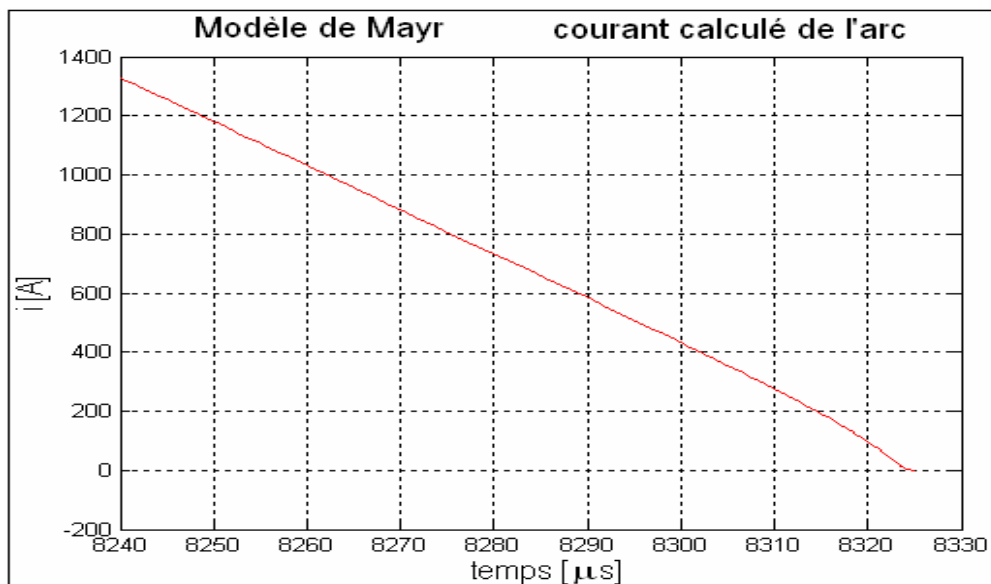


Fig. 4-35— courant calculé de l'arc

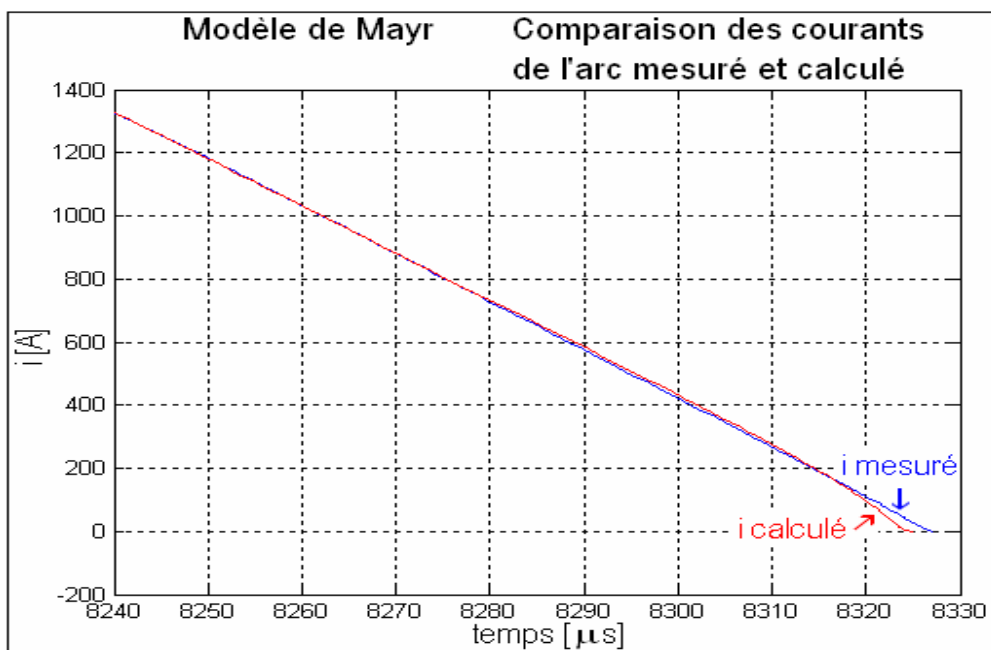


Fig. 4-36— comparaison des courants de l'arc mesuré et calculé

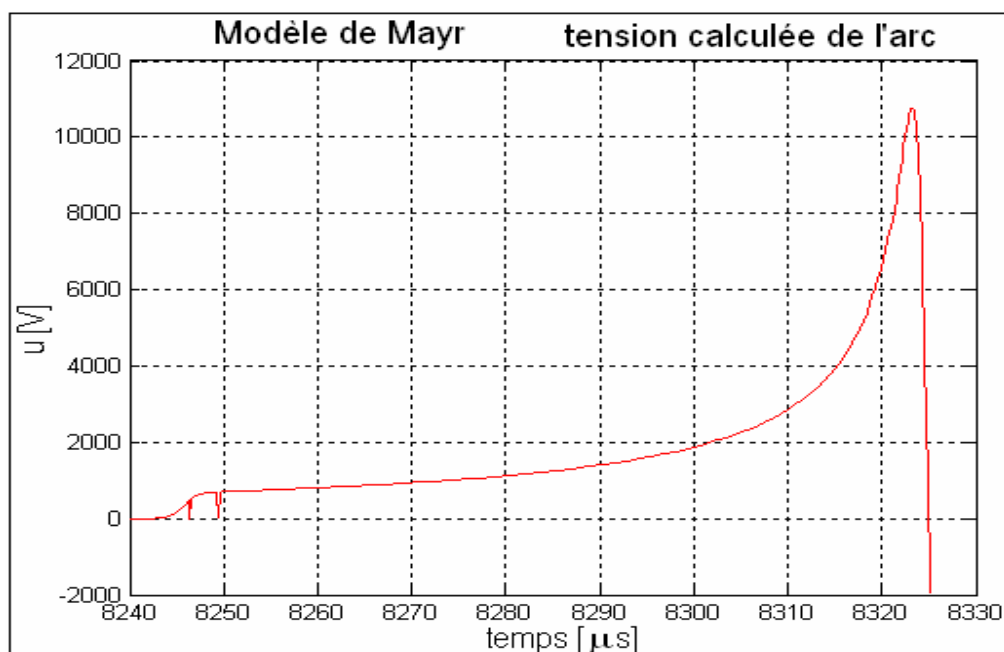


Fig. 4-37— tension calculée de l'arc

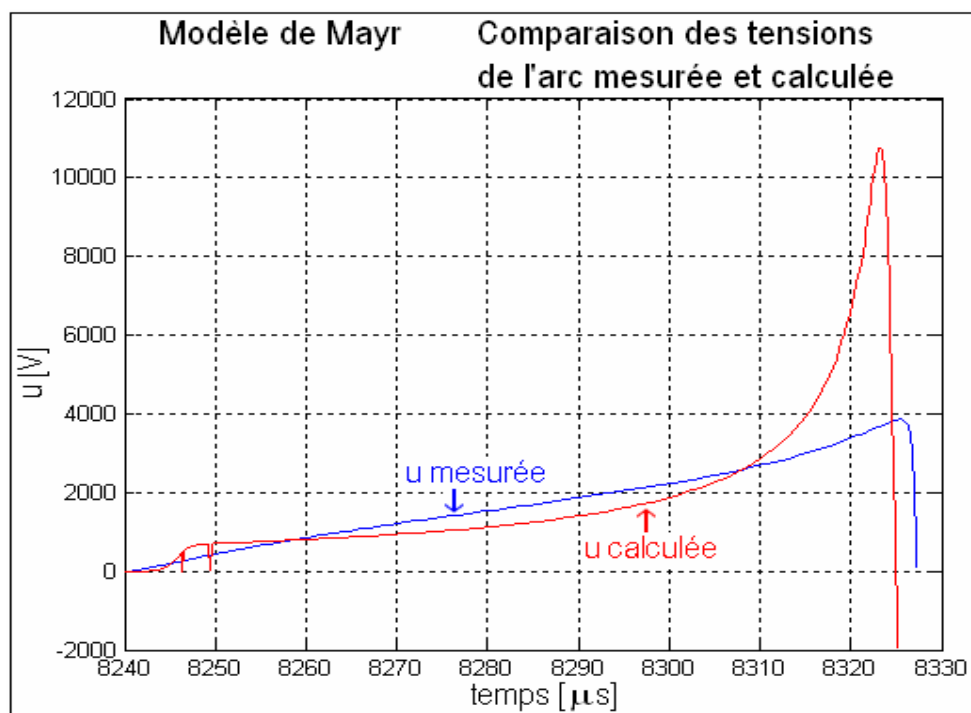


Fig. 4-38— comparaison des tensions de l'arc mesurée et calculée.

Le modèle de Mayr donne une interruption réussie comme l'a donnée le test et une TTR maximale très proche de celle du test, il donne un courant post-arc supérieur à celui donné par le test mais acceptable et un pic d'extinction qui dépasse deux fois celui donné par le test. Ce modèle reproduit bien les courbes de tension et de courant mesurées sauf dans un petit domaine de courants faibles inférieurs à 70 A.

4.4.3 Le modèle de Mayr modifié

La figure 4-39 représente le courant de l'arc (voir après $t_s=8.24$ ms).

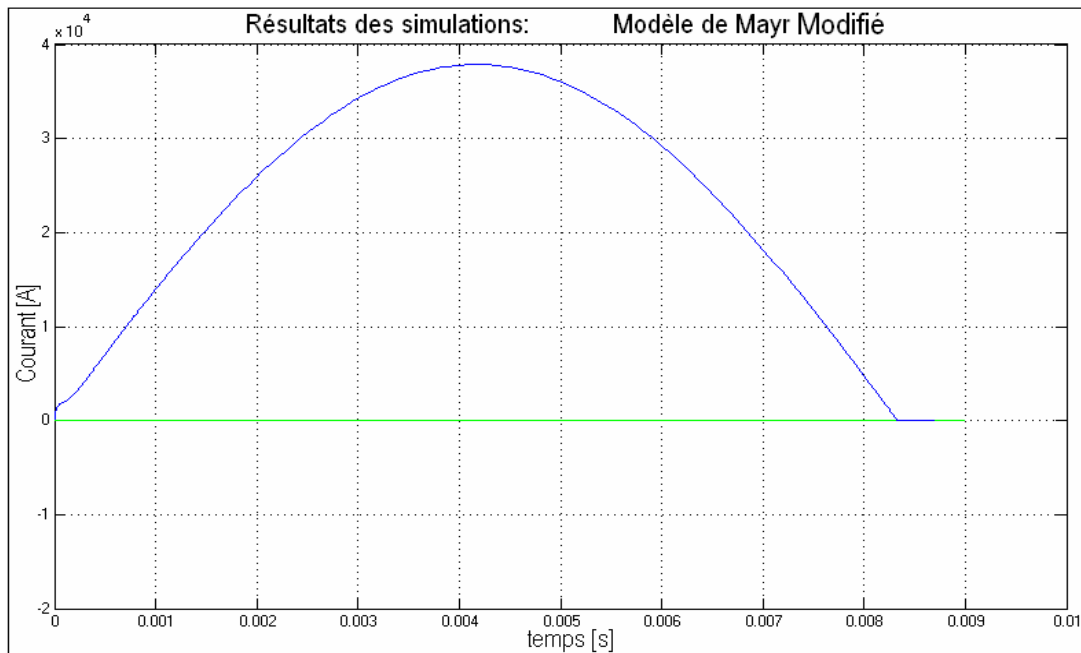


Fig. 4-39— courant calculé quand la séparation des contact commence
à $t=8.24$ –Modèle de Mayr modifié–

En faisant un zoom au voisinage du zéro du courant (Fig. 4-40 et Fig. 4-41), on observe :

- un courant post-arc de - 0.2779 A
- une TTR maximale de - 80 692 V
- un pic d'extinction de 13 975 V

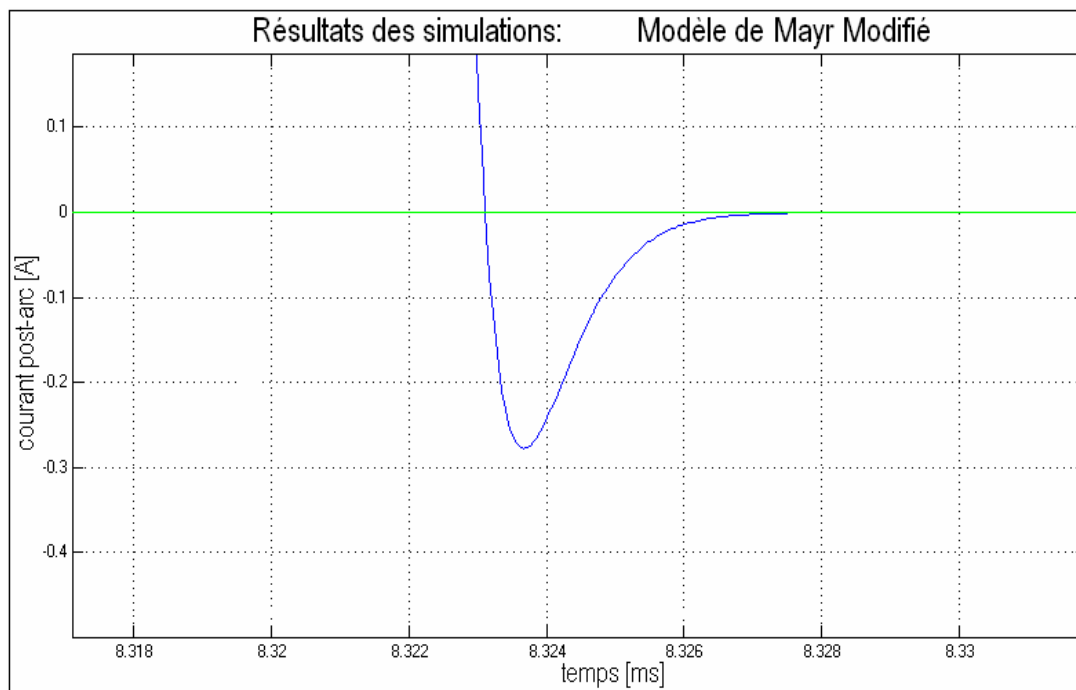


Fig. 4-40— courant post-arc calculé

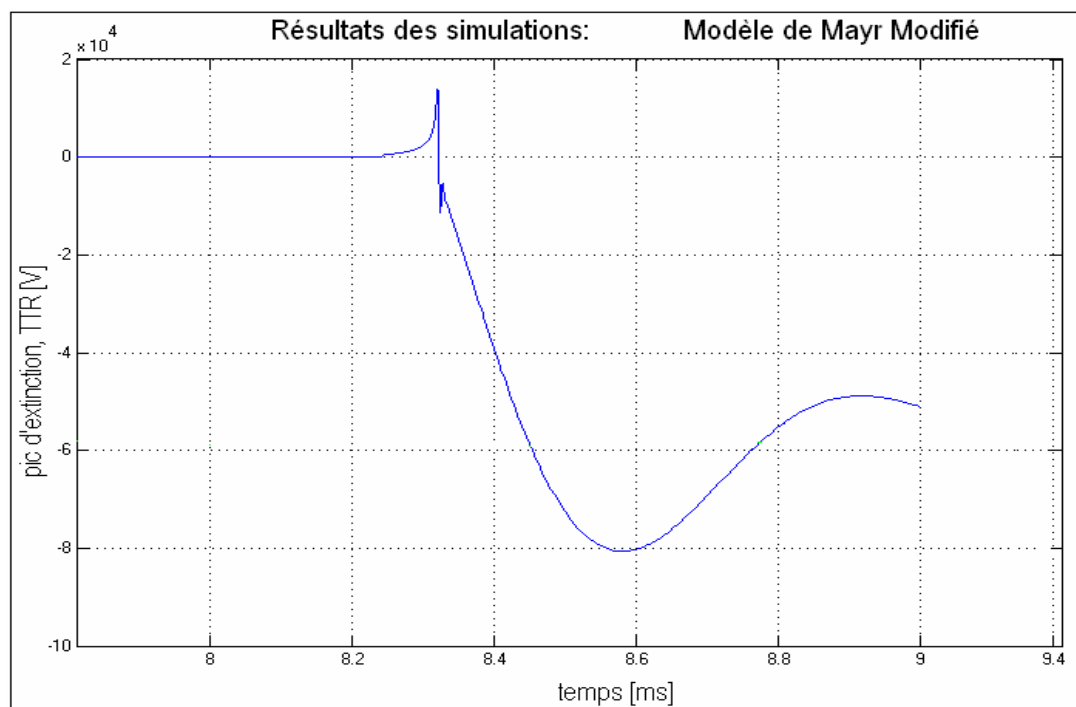


Fig. 4-41— tension transitoire de rétablissement (TTR) et le pic d'extinction

Le programme relatif au modèle de Mayr modifié donne le courant calculé (Fig. 4-42 et Fig. 4-43) et la tension calculée (Fig. 4-44 et Fig. 4-45) :

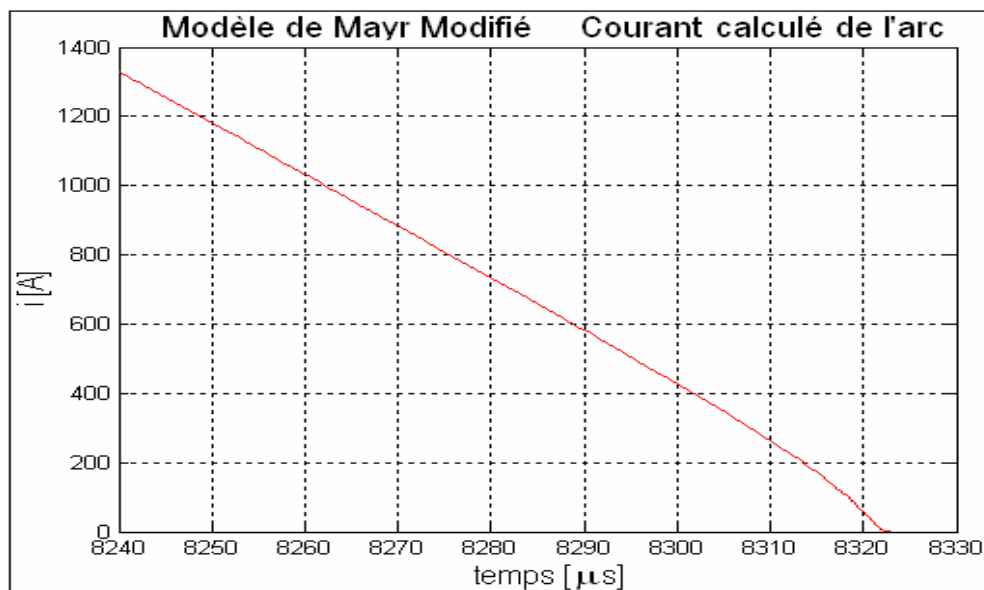


Fig. 4-42— courant calculé de l'arc

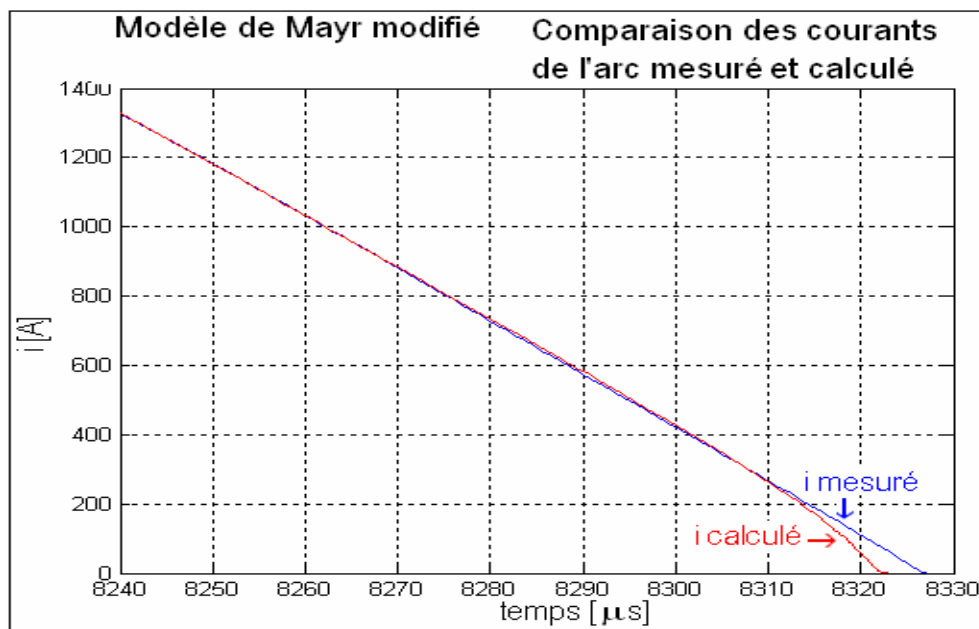


Fig. 4-43— comparaison des courants de l'arc mesuré et calculé

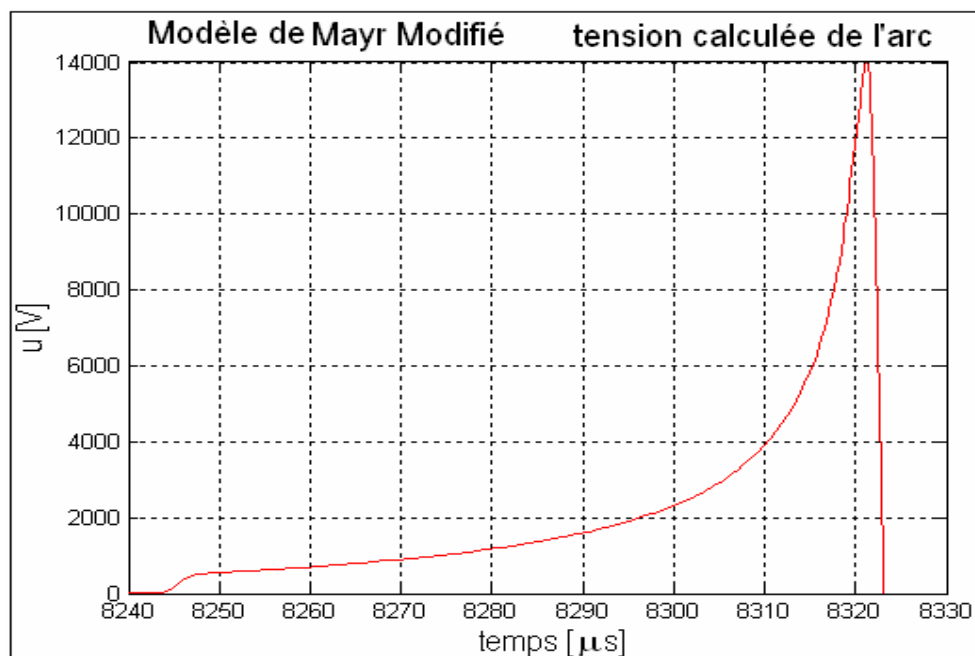


Fig. 4-44— tension calculée de l'arc

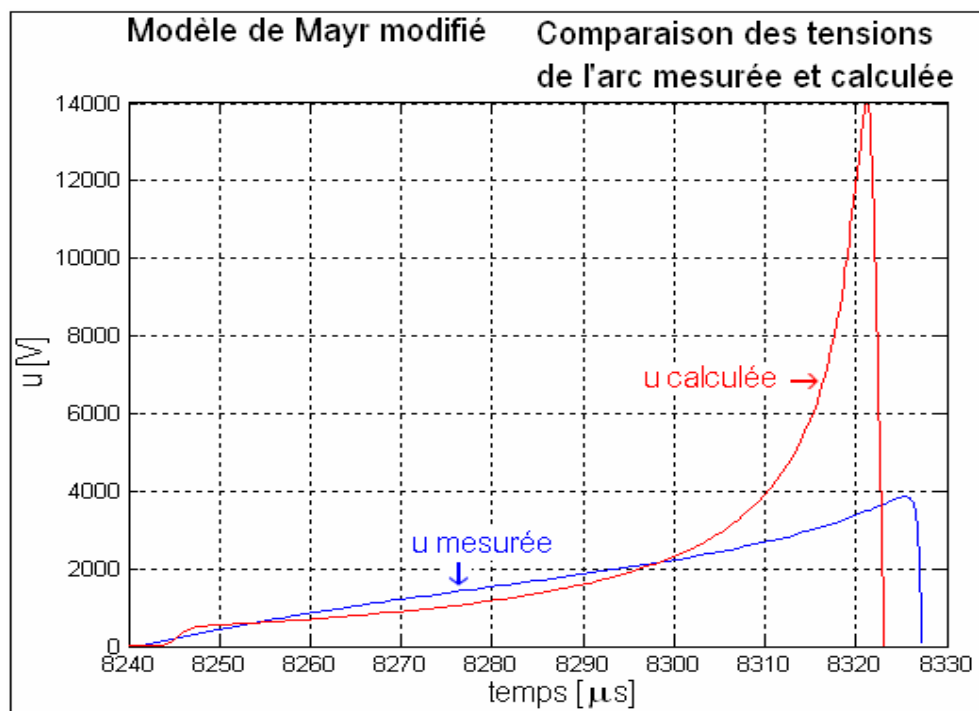


Fig. 4-45— comparaison des tensions de l'arc mesurée et calculée

Le modèle de Mayr modifié donne une interruption réussie comme l'a donnée le test et une TTR maximale très proche de celle du test, il donne un courant post-arc supérieur à celui donné par le test mais acceptable et un pic d'extinction supérieur à trois fois celui donné par le test. Ce modèle reproduit bien les courbes de tension et de courant mesurés sauf dans le domaine des courants très faibles inférieurs à 250 A car la coupure a eu lieu légèrement avant le zéro naturel du courant.

4.4.4 Le modèle de Schavemaker

La figure 4-46 représente le courant de l'arc (voir après $t_s=8.24$ ms).

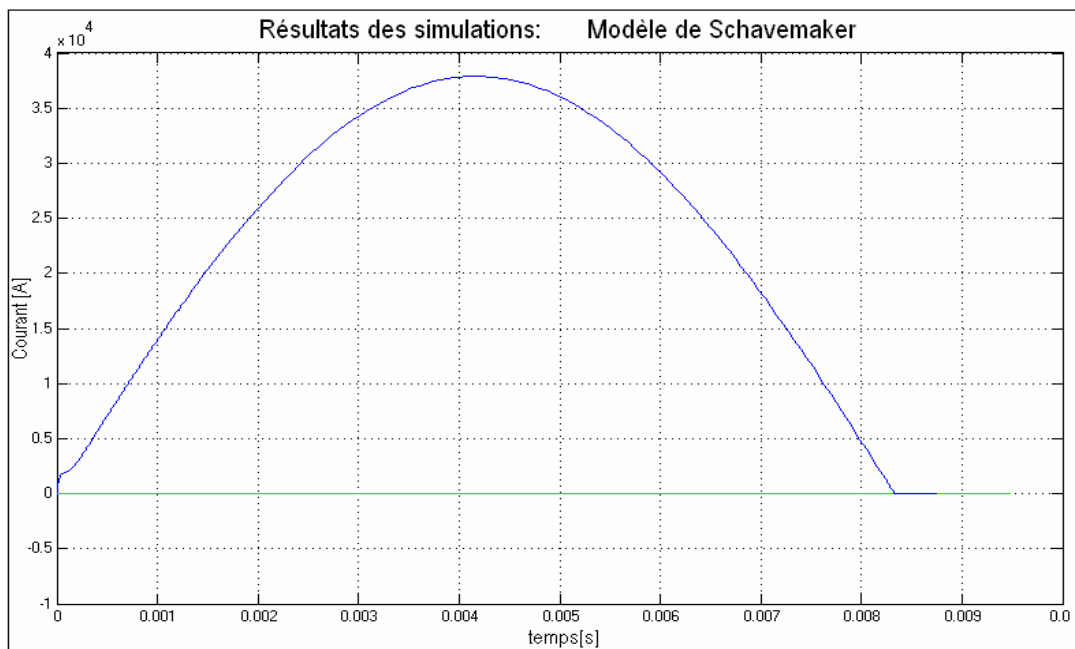


Fig. 4-46— courant calculé quand la séparation des contacts commence
à $t_s=8.24$ – Modèle de Schavemaker—

En faisant un zoom au voisinage du zéro du courant (Fig. 4-47 et Fig. 4-48), on remarquera :

- un faible courant post-arc de -0.049 A
- une TTR maximale de $-80\,607$ V
- un pic d'extinction faible de $3\,998.41$ V

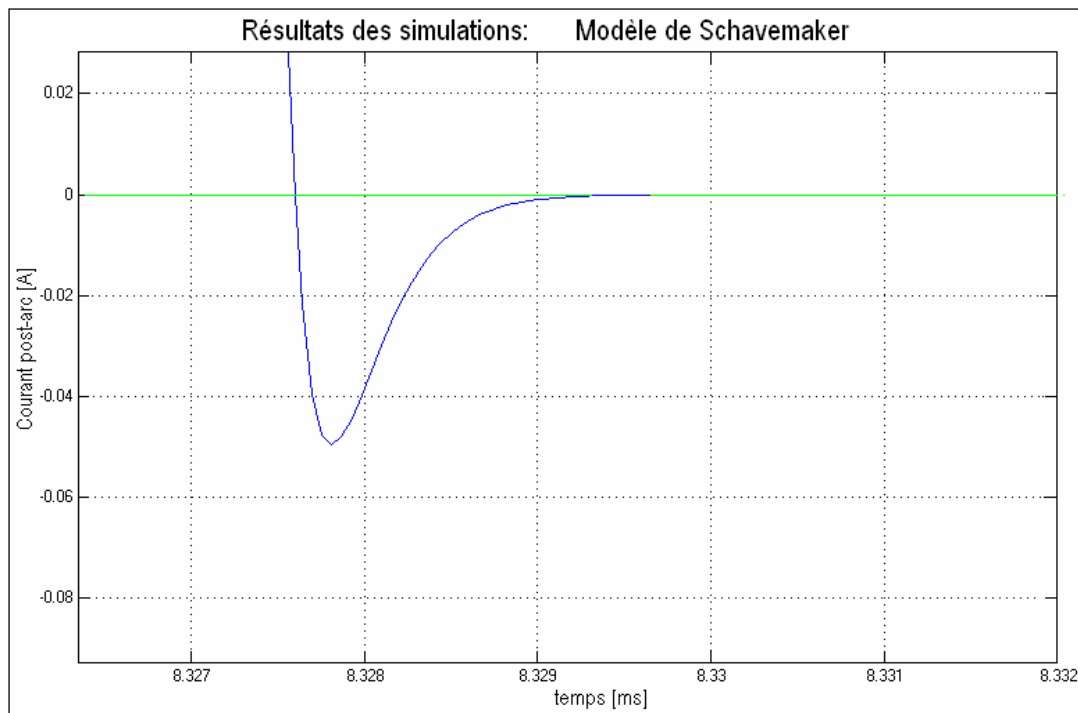


Fig. 4-47— courant post-arc calculé

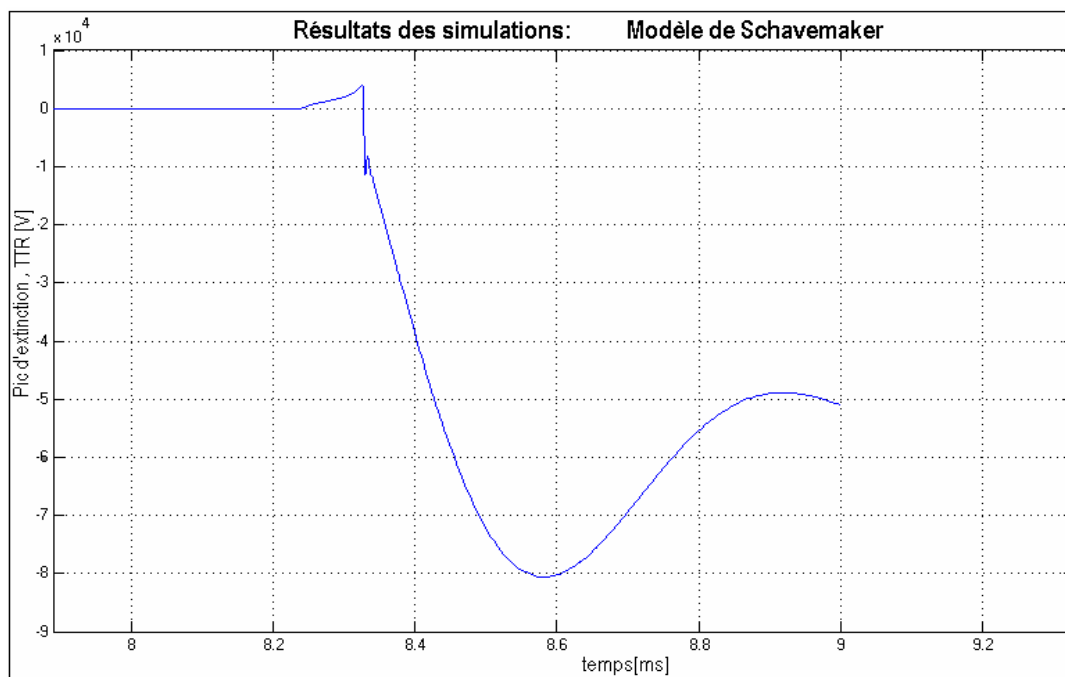


Fig. 4-48— tension transitoire de rétablissement (TTR) et le pic d'extinction

Le programme relatif au modèle de Schavemaker donne le courant calculé (Fig. 4-49 et Fig. 4-50) et la tension calculée (Fig. 4-51 et Fig. 4-52) :

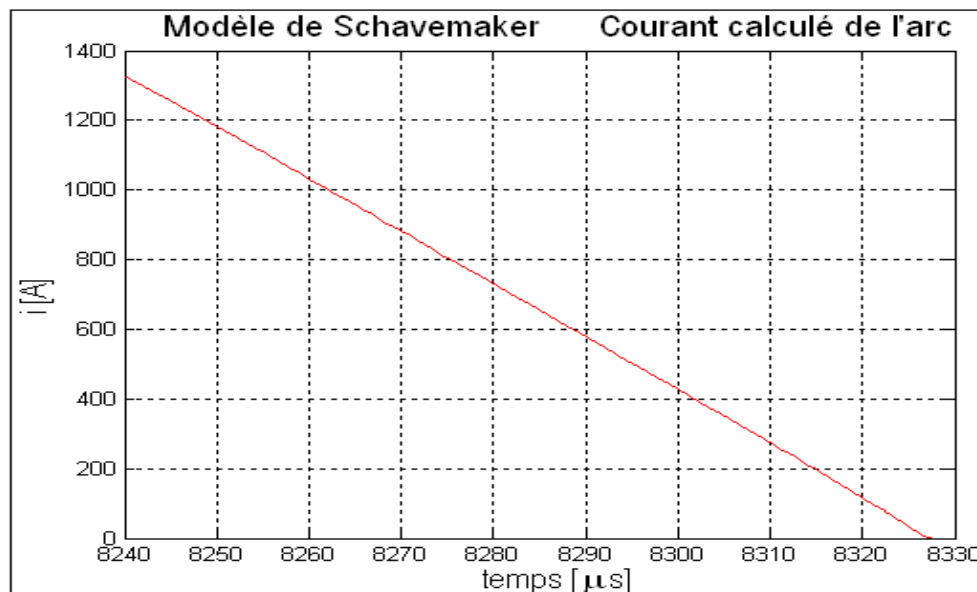


Fig. 4-49— courant calculé de l'arc

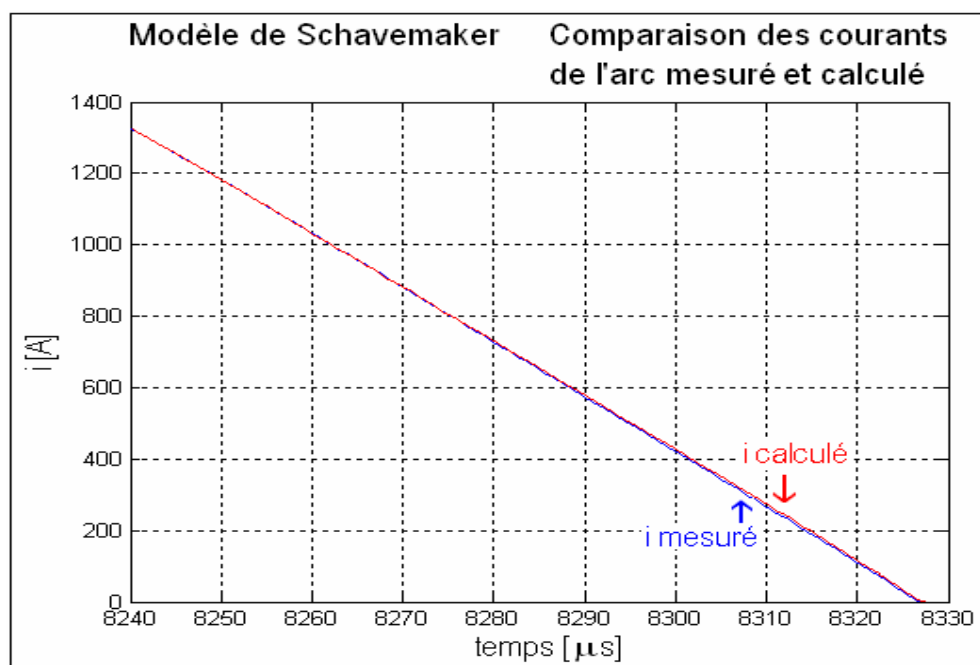


Fig. 4-50— comparaison des courants de l'arc mesuré et calculé

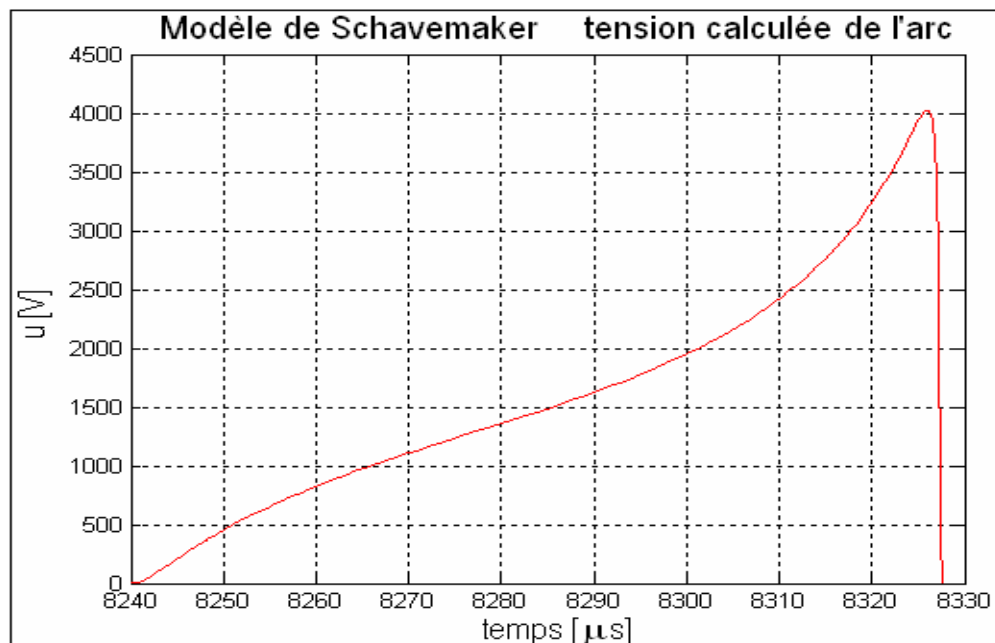


Fig. 4-51— tension calculée de l'arc

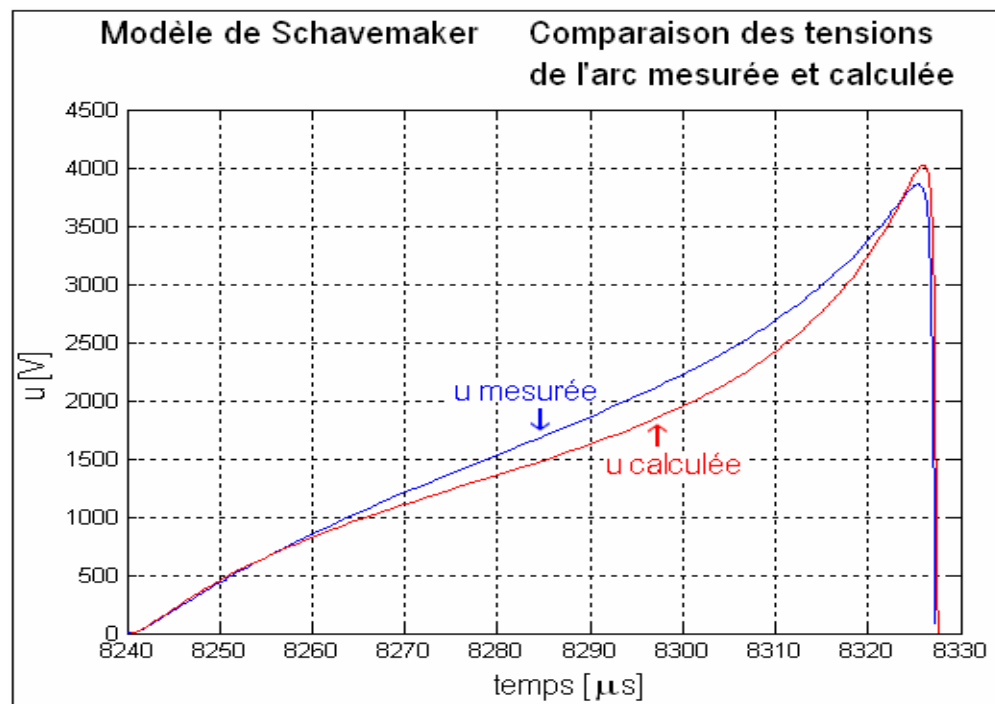


Fig. 4-52— comparaison des tensions de l'arc mesurée et calculée

Le modèle de Schavemaker est le meilleur modèle parmi les modèles étudiés, car non seulement il donne une interruption réussie, comme l'a donnée le test, et une TTR maximale très proche de celle du test, il donne aussi un courant post-arc très faible et très proche de celui du test et un pic d'extinction très faible et très proche de celui du test. Ce modèle reproduit parfaitement le courant mesuré, il coupe au zéro naturel du courant exactement. Il reproduit bien la tension mesurée toutefois il nécessite une légère correction pour la reproduire aussi parfaitement que le courant mesuré.

4.4.5 Tableau récapitulatif

	Paramètres du modèle	Période post-arc
Résultats du test	$\tau = 0.27 \mu s$ $P_0 = 15917 \text{ W}$ $P_1 = 0.9913$	Courant post-arc = - 0.042 A TTR maximale = - 80640 V Pic d'extinction = 3850 V
Modèle de Cassie	$\tau = 1.47 \mu s$ $U_0 = 172\,970\,000 \text{ V}$	Courant post-arc = - 1.5455 A Pic d'extinction = 165 720 V TTR maximale = - 84 276 V
Modèle de Mayr	$\tau = 0.67 \mu s$ $P_0 = 846770 \text{ W}$	Courant post-arc = - 0.388 A Pic d'extinction = 10 789 V TTR maximale = - 80 632 V
Modèle de Mayr modifié	$\tau = 0.66 \mu s$ $P_0 = 209440 \text{ W}$ $P_1 = -83.045 \text{ V}$	Courant post-arc = -0.277 A Pic d'extinction = 13 975 V TTR maximale = - 80 692 V
Modèle de Schavemaker	$\tau = 0.21 \mu s$ $P_0 = 17931 \text{ W}$ $P_1 = 0.9902$	Courant post-arc = - 0.049 A Pic d'extinction = 3 998.41 V TTR maximale = - 80 607 V

4.5 Conclusion

A travers ce chapitre, l'implantation des modèles d'arc à boîte noire dans le nouveau logiciel AMB a été expliquée et le processus d'interruption, en utilisant le modèle de Schavemaker, a été reproduit afin d'obtenir les oscillogrammes de tension et de courant mesurés nécessaires à l'extraction des paramètres des modèles à comparer suivants : le modèle de Cassie, le modèle de Mayr, le modèle de Mayr modifié et le modèle de Schavemaker.

Les programmes développés pour l'extraction des paramètres sont basés sur la méthode des moindres carrés et la fonction d'optimisation *fmins* de MATLAB. Les paramètres trouvés ont été introduits dans l'AMB pour lancer le processus d'interruption par chacun des modèles à comparer. Le tracé des oscillogrammes de tension et de courant calculés a été fait dans l'environnement MATLAB.

Les résultats des simulations sont conformes à la littérature et montrent que :

Le modèle de Cassie, reproduit mal les courbes de tension et de courant mesurées sauf dans un petit domaine de courants forts. Ce modèle est invalide dans le domaine des courants faibles.

Les modèles de Mayr et de Mayr modifié reproduisent bien les oscillogrammes de tension et de courant mesurés sauf au voisinage du zéro du courant car la coupure a eu lieu légèrement avant le zéro du courant.

Le modèle de Schavemaker est le modèle le plus performant parmi les modèles étudiés car il a donné de bons résultats dans les deux périodes simultanément, la période de l'arc et la période post-arc. Il reproduit parfaitement le courant mesuré, toutefois il nécessite une légère correction pour reproduire aussi parfaitement la tension mesurée.

Concernant le temps d'exécution des programmes d'extraction des paramètres, il est presque le même malgré que les modèles n'ont pas tous le même nombre de paramètres, cela est dû à la grande vitesse d'exécution des ordinateurs actuels.

Conclusion

Dans ce mémoire, la modélisation de l'arc électrique dans les disjoncteurs SF6 HT a été étudiée en utilisant les modèles d'arc à boîte noire. Les quatre modèles à boîte noire étudiés et comparés sont les suivants: le modèle de Cassie, le modèle de Mayr, le modèle de Mayr modifié et le modèle de Schavemaker, ces modèles sont implémentés dans le nouveau logiciel AMB (Arc Model Blockset).

Les programmes MATLAB développés pour l'extraction des paramètres des modèles étudiés sont basés sur une procédure utilisant la fonction d'optimisation *fmins* de MATLAB et la méthode des moindres carrés, cette procédure présente l'avantage d'être facile et rapide, mais elle nécessite un bon choix des paramètres initiaux et le minimum global n'est pas garanti. Pour surmonter cet inconvénient nous proposons de développer une procédure basée sur les réseaux de neurones qui servira de point de départ pour la procédure utilisant la fonction *fmins*, ou d'extraire les paramètres par les algorithmes génétiques.

Les paramètres trouvés ont été introduits dans l'AMB pour lancer le processus d'interruption par chacun des modèles, les résultats des simulations sont les suivants : Le modèle de Cassie reproduit mal les courbes de tension et de courant mesurées sauf dans un petit domaine de courants forts, ce modèle est invalide dans le domaine des courants faibles.

Les modèles de Mayr et de Mayr modifié reproduisent bien les courbes de tension et de courant mesurés sauf au voisinage du zéro du courant.

Le modèle de Schavemaker est le modèle le plus performant parmi les modèles étudiés car il a donné de bons résultats dans la période de l'arc et la période post-arc simultanément, comme il reproduit parfaitement le courant mesuré, toutefois il nécessite une légère correction pour reproduire aussi parfaitement la tension mesurée.

Enfin, ce mémoire constitue une riche et récente bibliographie d'un domaine aussi complexe que l'interruption des courants alternatifs HT et un état de l'art du courant post-arc devenu récemment un moyen efficace pour caractériser les disjoncteurs SF6 HT.

Comme **perspectives**, nous proposons de développer des programmes d'extraction des paramètres des modèles restants afin de réaliser un logiciel d'extraction des paramètres qui sera le complément du logiciel de simulation AMB. Nous proposons aussi d'appliquer la modélisation pour le calcul du pouvoir de coupure maximal des disjoncteurs SF6 haute tension.

Bibliographie

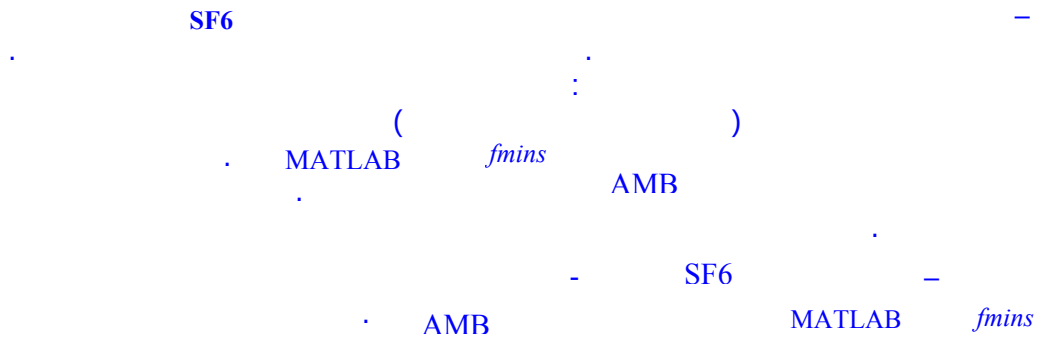
- [1] S. Theoleyre, “ Les techniques de coupure en MT“, CT 193 édition septembre 1998, 31p
- [2] Y. Pelenc, “ Appareillage électrique d’interruption à haute tension“, Technique de l’ingénieur D 4700, D 4701, D 4702, D 4703
- [3] E. Kabadanian, “Arc électrique : problèmes de la coupure d’un circuit“ Site, [www.sitelec.free.fr /arc. htm](http://www.sitelec.free.fr/arc.htm), modifié le 27-12-2003
- [4] J. Pasteau, “Introduction à l’appareillage très haute tension“ CT 127 édition juin 1984
- [5] D.Koch, “Propriétés et utilisations du SF₆ dans les appareils MT et HT “ CT 188 édition février 2003 22p
- [6] I. Fofana, “ L’utilisation de l’hexafluorure de soufre (SF₆) dans l’ingénierie haute tension“, Cours 6GEN607, Université du Québec à Chicoutimi 2003, pp 1-10
- [7] J.F. Martinez-Canales, J.M. Garay-Gordovil, “ An evaluation of the environmental impact and of the safety of compact and modular equipment using SF₆ up to 36 kV“, Conference Publication No. 438, IEE, 1997, pages : 1-5
- [8] I. Fofana, “ La technologie des disjoncteurs haute tension“, Cours 6GEN607, Université du Québec à Chicoutimi 2002, pp 1-9
- [9] D. Balnaves, “Practicalities of using SF₆ and vacuum switchgear “, The Institution of Electrical Engineers, London,UK, 1996, pages: 1-5
- [10] “Disjoncteurs Haute tension“ www.zonsol.com, modifié le 03-01-2004
- [11] H. Gurin, “ Chimie : tome 1, chimie physique “, troisième édition, DUNOD, PARIS, 1968, page 122
- [12] A. Leontiev, “ Théorie des échanges de chaleur et de masse “, Traduction française, Édition Mir, 1985, page 11.
- [13] T. Harris, H.Siddeley, “ Some contradictions in modern SF₆ and vacuum switchgear applications“ , The Institution of Electrical Engineers, London, UK, 1996, pages: 1-5

Bibliographie

- [14] P. H Schavemaker, L. van der Sluis, A. Pharmatrisanti, “ Post-arc current reconstruction based on actual circuit breaker measurements “, IEE Proc. Sci. Meas. Technol., Vol. 149 N°1, January 2002 pp 17-20.
- [15] C. Guilloux, V. Therme, P.G. Scarpa, “ Measurement of the post-arc current of HV circuit breakers: application to short circuit tests with ITRV”, IEEE Trans. 1993, PWRD-8, (3), pp 1148-1153.
- [16] J.A. Martinez-Velasco, “ Modeling of circuit breakers using the type-94 component “, EEUG News February 1997, pp 55-66.
- [17] B. Blez, C. Guilloux, ”Post-arc current in high Voltage SF6 circuit-breakers when breaking at up to 63 KA “, IEEE Trans, 1989, PWRD-4, (2), pp 1056-1062.
- [18] R.P.P Smeets, S. Nishiwaki, “ Performance Evaluation of High Voltage Circuit Breakers By Means of Current Zero Analysis”, IEEE trans, 2002, pp 424-429.
- [19] G.C Damstra, V. Kertész, “Development and application of a 10 Mhz digital system for current-zero measurements”, IEE Proc. Sci, Meas. Technol., Vol. 142, N° 2, March 1995, pp 125-132.
- [20] R. P.P Smeets and V. Kertész, “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.
- [21] J.A. Martinez-Velasco, “ Circuit Breaker Representation for TRV Calculations“, EEUG News Aug-Nov 1998, pp 77-87.
- [22] H. A Darwish and N. Elkalashy, “Comparison of Universal Circuit Breaker Arc Representation with EMTP Built-in Model”, International Conference on Power Systems Transients, IPST 2003, New Orleans, USA, pp1-6
- [23] S. Vaquié, “L’arc électrique “, CNRS Éditions, Paris, 2000, pp : 188-189
- [24] P. H Schavemaker and L. van der Sluis, “ An improved Mayr-Type arc model based on current-zero measurement“, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 15 Issue: 2, April 2000 pages: 580-584.

Bibliographie

- [25] L. van der Sluis and W.R Rutgers, “The comparison of Tests Circuits with Arc Models“, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 15 Issue: 2 1994 pp 137-142.
- [26] L. van der Sluis, W.R Rutgers, C.G.A. Koreman“ A physical arc model for the simulation of current zero behaviour of high-voltage circuit breakers“, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 7 Issue: 2, April1992 pp 1016-1022.
- [27] 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
- [28] H. Knoblokh, U. Habedank, A.G Siemens, “ Arc resistance at current zero: a tool to describe the breaking capacity of SF6 circuit breakers at short-line faults“, High Voltage Engineering Symposium, 22-27 August 1999 Conference Publication N° 467 ,IEE 1999, pp 205-208.
- [29] L. R Orama and B. R. Medina, “Numerical Arc Model Parameter Extraction for SF₆ Circuit Breaker Simulations“, International Conference on Power Systems Transients, IPST 2003, New Orleans, USA, pp1-5
- [30] P. H Schavemaker and L. van der Sluis, “Quantification of the interrupting performance of high-voltage circuit breakers “, IEE Proc. Sei. Meas. Technol., Vol. 149 N° 4, July 2002 pp 153-157.
- [31] P.H. Schavemaker, “Arc Model Blockset for use with MATLAB Simulink and Power System Blockset” User’s Guide, Version 2, 2001, Delft University of Technology
- [32] P. H Schavemaker and L. van der Sluis “The Arc Model Blockset”, Proceedings of the Second IASTED International Conference POWER AND ENERGY SYSTEMS (EuroPES) June 25-28, 2002, Crete, Greece
- [33] 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.



Résumé – Durant ces dernières années, quelques travaux ont été menés dans le domaine de la modélisation des disjoncteurs SF6 haute tension afin d’améliorer leurs pouvoirs de coupure à travers les simulations numériques. La plupart des recherches convergent vers la description du comportement du disjoncteur par des modèles mathématiques. Dans ce contexte, quatre programmes basés sur la méthode des moindres carrés et la fonction d’optimisation *fmins* de MATLAB ont été développés pour extraire les paramètres des quatre modèles d’arc suivants; le modèle de Cassie, le modèle de Mayr, le modèle de Mayr modifié et le modèle de Schavemaker implémentés dans le nouveau logiciel AMB (Arc Model Blockset). Les paramètres trouvés sont ensuite introduits dans l’AMB pour lancer le processus d’interruption par chacun des modèles cités ci-dessus. Les résultats des simulations sont discutés et les modèles sont comparés.

Mots clés – disjoncteurs SF6 HT, courant post-arc, modèles d’arc à boîte noire, extraction des paramètres, fonction *fmins* de MATLAB, simulations dans l’AMB.

Abstract – During these recent years some work has been conducted in the area of SF6 high voltage circuit breakers modelling in order to improve their capability through numerous simulations. Most of research has been concentrated in describing the circuit breaker behaviour in the pre or post current zero periods by mathematical models. This work present four routines based on the least square method and the MATLAB optimisation function *fmins* to extract the parameters of four arc models implemented in the new program AMB (Arc Model Blockset), witch are Cassie arc model, Mayr arc model, modified Mayr arc model and Schavemaker arc model. These parameters are then introduced into AMB for simulations. The results of simulations are then discussed and the models are compared.

Keywords – SF6 HV circuit breakers, post-arc current, black box arc models, parameters extraction, MATLAB *fmins* function , AMB simulations.