

République Algérienne Démocratique Et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Thèse

présentée au département d'Electrotechnique
Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Université FERHAT Abbas Sétif

pour obtenir le titre

de Docteur d'Etat En Electrotechnique

Option :

Modélisation des Réseaux Electriques

Par:

BAYADI Abdelhafid

Thème:

Contribution à l'étude des performances
des parafoudres à base d'oxyde de zinc
soumis à des contraintes transitoires
rapides dans les systèmes électriques

Soutenue le 21 Novembre 2005 devant la commission d'examens composée de :

<i>BENMAHAMMED Khier</i>	<i>Prof. à l'Université Ferhat Abbas de Sétif</i>	<i>Président</i>
<i>ZEHAR Khaled</i>	<i>Prof. à l'Université Ferhat Abbas de Sétif</i>	<i>Rapporteur</i>
<i>BOUZID Aissa</i>	<i>Prof. à l'Université Mentouri de Constantine</i>	<i>Examineur</i>
<i>ZEBBOUDJ Youcef</i>	<i>Prof. à l'Université A. Mira de Béjaia</i>	<i>Examineur</i>
<i>MOKHNACHE Leila</i>	<i>MC. à l'Université Hadj Lakhdar de Batna</i>	<i>Examineur</i>

Dédicaces

A mon père,

A ma mère,

A mes frères,

A ma soeur,

A ma femme,

A mon fils Abderahmène,

Je dédie ce modeste travail en témoignage de ma
reconnaissance

Remerciements

Je voudrais commencer par remercier mon directeur de thèse, Prof. Zehar Khaled, qui m'a encadré pendant cette thèse. Il m'a beaucoup apporté par son exigence de clarté et de rigueur ainsi que par son expérience et ses conseils très précieux. Je suis également redevable à Dr Harid Noureddine (Cardiff School of Engineering) du temps qu'il m'a consacré et de ses encouragements durant cette période.

Le travail que je présente ici n'aurait pu aboutir sans les contributions de Dr Haddad Abderahmène (Cardiff School of engineering UK), Dr Talhi Chaabane et Prof Bui Ai (Laboratoire de Génie électrique de Toulouse) avec qui j'ai eu beaucoup de plaisir à travailler et qui m'ont beaucoup apporté.

J'adresse mes sincères remerciements au groupe HT de Cardiff School of engineering pour son accueil au sein du laboratoire HT et pour ses conseils durant cette période.

Mon séjour au laboratoire haute tension de Cardiff school of engineering et au laboratoire de génie électrique de Toulouse a été très enrichissant grâce à la convivialité de leurs membres. Je remercie aussi Dr. Farhad Rachidi (Ecole polytechnique Fédérale de Lausanne) et Prof. K. L. Khrzan (Pologne) pour leurs collaborations fructueuses et enrichissantes. Je remercie aussi infiniment Dr Hadj Ben Yedder (France) toujours disponible.

Je tiens à remercier *Prof. Benmahammed Khier* d'avoir accepté de présider mon jury de thèse, *Prof. Bouzid Aissa*, *Prof. Zebboudj Youcef* et *Dr. Mokhnache Leila* d'avoir bien voulu rapporter ce travail.

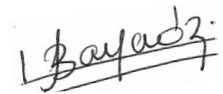
Je tiens également à adresser mes remerciements aux membres de l'administration et du comité scientifique du département d'électrotechnique pour l'aide apporté.

Et bien sûr une mention particulière va à ma famille et en particulier à mes parents, à ma femme et mon fils Abderahmène. Je veux leur témoigner toute la gratitude et ma reconnaissance pour leur soutien constant.

Enfin, et pour être sûr de n'oublier personne, merci à vous lecteurs pour l'intérêt (scientifique ou autre) que vous portez à mon travail. Un intérêt dont la preuve est que vous avez pris le temps de lire ce document.

Enfin je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

M. Bayadi Abdelhafid

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'M. Bayadi Abdelhafid', with a horizontal line drawn underneath the name.

Résumé : L'objectif du travail exposé dans cette thèse concerne la modélisation et l'étude des performances de protection des parafoudres à oxyde métallique (ZnO) dans un réseau réel lorsque des surtensions transitoires à front rapide sont présentes. Pour réaliser cet objectif, une nouvelle technique basée sur les algorithmes génétiques pour l'identification des paramètres des modèles de parafoudres ZnO est développée. Elle a été testée sur une version modifiée du modèle recommandé par IEEE qu'on a proposé. Les résultats obtenus sont très satisfaisants et la technique développée est très prometteuse pour l'identification automatique des paramètres de n'importe quel circuit équivalent du parafoudre ZnO. Un calcul plus exact des inductances sur les structures de parafoudres à oxyde métallique est développé. Ce calcul d'inductances est basé sur des formules analytiques. Les formules présentées prennent en compte tous les arrangements pratiques possibles des installations de parafoudres. Cette étude a été faite pour palier aux insuffisances observées dans les travaux précédents où l'inductance était estimée en multipliant une inductance par unité de longueur par la longueur du conducteur ou par la hauteur du parafoudre. Un exemple d'application a été implanté dans l'EMTP (Electromagnetic transients program) et des résultats satisfaisants ont été obtenus. L'étude nous a permis de tenir compte de l'effet de l'angle entre le conducteur de connexion et le jeu de barres. L'effet de l'inductance des structures de parafoudres sur le problème de la protection contre les surtensions a été mis en évidence. L'analyse des performances dynamiques de protection des parafoudres ZnO sur un réseau HT a été réalisée. La version modifiée du modèle recommandé par IEEE a été introduite. Ses paramètres ont été identifiés en utilisant la technique développée dans cette thèse. Le poste de transformation opérationnel El-Hassi de la zone de Sétif qui a servi d'exemple a été représenté par un schéma complet triphasé. Les surtensions résultantes en plusieurs points fondamentaux ont été présentées et discutées. Le logiciel spécialisé EMTP (Electromagnetic transients program) a été utilisé à cet effet.

Mots-clés : Réseau électrique; Modélisation ; Foudre ; Surtensions; Simulation ; parafoudre ZnO, Estimation paramètre ; ATP-EMTP ; Régimes transitoires, contraintes rapides, coordination des isolements, mesures.

Abstract: The aim of the work exposed in this thesis relates to the modelling and the study of the protection performances of metal oxide surge arrester (ZnO) in a real network when fast front transient overvoltages are present. To carry out this objective, a new technique based on genetic algorithms for the identification of ZnO surge arrester models parameters is developed. It was tested on a modified version of the IEEE recommended model that we have proposed. The results obtained are very satisfactory and the proposed technique can be used for the automatic identification of the parameters of any ZnO arrester equivalent circuit. A more exact calculation of inductances on the structures of metal oxide surge arrester is developed. This calculation of inductances is based on analytical formulas. The formulas presented take into account all possible practical arrangements of the installations of surge arresters. This study was made to overcome the insufficiencies observed in preceding work where inductance was estimated by multiplying an inductance per unit length by the length of the lead wire or the height of the surge arrester. An example of application was implemented in the EMTP (Electromagnetic transients program) and satisfactory results were obtained. The study enabled us to take into account the effect of the angle between the lead wire and the busbar. The effect of the inductance of surge arrester structures on the problem of the overvoltage protection was outlined. The analysis of the dynamic protection performances of ZnO surge arrester on an HV network was carried out. The proposed modified version of the IEEE recommended model was introduced. Its parameters were identified by using the technique developed in this thesis. The operational substation El-Hassi of Setif which is used as an example was represented by a three-phase complete diagram. Resulting overvoltages in several fundamental points were presented and discussed. The specialized software EMTP (Electromagnetic transients program) was used for this purpose.

Key words: Power systems, Modeling, lightning, overvoltages, Simulation, Metal Oxide Surge Arrester, parameter Estimation, ATP-EMTP, Electromagnetic Transients, fast surges, Insulation coordination, measurements.

Sommaires

1. Introduction générale	1.1
1.1 Introduction	1.1
1.2 Présentation	1.2
1.3 Contribution du présent travail	1.4
1.4 Références	1.6
2. Parafoudres dans les réseaux électriques	2.1
2.1 Introduction	2.1
2.2 Classification CEI des contraintes de tension :	2.1
2.2.1 Définitions	2.1
2.2.1.1 Tensions continues	2.2
2.2.1.2 Tensions à basses fréquences	2.2
2.2.1.3 Surtensions transitoires	2.2
2.2.1.4 Surtensions combinées	2.3
2.2.2 Tension permanente	2.5
2.2.3 Surtensions temporaires	2.5
2.2.3.1 Effet Ferranti	2.5
2.2.3.2 Court-circuit monophasé	2.6
2.2.3.3 Alimentation d'une charge capacitive	2.7
2.2.3.4 Mise sous tension des transformateurs	2.7
2.2.3.5 Perte brusque d'une charge	2.7
2.2.3.6 Ferrorésonance	2.7
2.2.4 Surtensions transitoires lentes	2.8
2.2.4.1 Manœuvre des batteries de condensateurs	2.8

2.2.4.2	Mise et remise sous tension d'une ligne à vide.....	2.8
2.2.4.3	Elimination ou apparition de défauts.....	2.9
2.2.5	Surtensions transitoires à front rapide dues aux manœuvres.....	2.9
2.2.5.1	Coupure de courants capacitifs ou inductifs.....	2.9
2.2.5.2	Manœuvre des sectionneurs.....	2.10
2.2.6	Surtensions transitoires à front rapide dues à la foudre.....	2.10
2.2.6.1	Coup de foudre sur une phase.....	2.10
2.2.6.2	Coup de foudre sur un câble de garde ou un pylône.....	2.11
2.2.6.3	Coup de foudre à proximité de la ligne.....	2.12
2.2.6.4	Propagation des surtensions de foudre vers les postes.....	2.12
2.3	Paramètres des coups de foudre.....	2.13
2.3.1	Niveau kéraunique et densité de coups de foudre.....	2.13
2.3.2	Répartition des amplitudes des courants de foudre	2.13
2.3.3	Autres paramètres des courants de foudre.....	2.15
2.4	Dispositifs de protection contre les surtensions.....	2.15
2.4.1	Eclateur à air.....	2.16
2.4.2	Parafoudre au carbure de Silicium.....	2.18
2.4.3	Parafoudre à l'oxyde de zinc.....	2.19
2.4.3.1	Principe de fonctionnement du parafoudre ZnO.....	2.21
2.4.3.2	Caractéristiques des parafoudres ZnO.....	2.23
2.4.3.3	Principaux critères de dimensionnement d'un parafoudre.....	2.24
2.4.3.4	Avantages par rapport aux parafoudres SiC.....	2.24
2.4.3.5	Avantages des parafoudres synthétiques.....	2.25
2.4.4	Comportement dynamique des parafoudres ZnO.....	2.26
2.5	Conclusions.....	2.26
2.6	Références.....	2.26

3. Modélisation des parafoudres ZnO soumis à des contraintes transitoires rapides.....3.1

3.1	Introduction.....	3.1
3.2	Modèle conventionnel ou à résistance non-linéaire.....	3.2
3.3	Modèle proposé par Tominaga et al.....	3.5
3.4	Modèle proposé par W. Breilemann.....	3.6
3.5	Modèle proposé par Schmidt et al	3.7
3.6	Modèle proposé par Ozawa et al.....	3.8
3.7	Modèle recommandé par le groupe IEEE	3.9
3.8	Modèle proposé par Kim et al	3.10
3.9	Modèle proposé par T. Hagiwara et al.....	3.10
3.10	Modèle proposé par Haddad et al	3.11
3.11	Modèle proposé par Pinceti et al.....	3.11
3.12	Modèle proposé par Fernandez et al.....	3.13
3.13	Implantation des modèles.....	3.13
3.14	Résultats de simulation.....	3.14
3.15	Conclusions.....	3.23
3.16	Références.....	3.23

4. Identification des paramètres des modèles des parafoudres ZnO par les algorithmes génétiques.....4.1

4.1	Introduction.....	4.1
4.2	Formulation du problème.....	4.3
4.3	Procédure d'optimisation.....	4.5
4.3.1	Description de.....	4.5
4.3.2	Procédure générale d'un Algorithmes génétique.....	4.6

4.3.3	Algorithmes génétiques simples (AGS).....	4.7
4.3.4	Algorithme génétique développé (AGD).....	4.8
4.3.5	Validation du programme.....	4.12
4.3.5.1	Résultats sur des fonctions tests.....	4.12
4.3.5.2	Résultats sur une résistance non-linéaire.....	4.13
4.4	Modèle IEEE modifié du parafoudre à Oxyde métallique.....	4.15
4.5	Exemples numériques.....	4.17
4.6	Application.....	4.20
4.7	Conclusions.....	4.22
4.8	Références.....	4.23
5.	<i>Inductance des structures de parafoudre et son effet sur la protection contre les surtensions</i>	5.1
5.1	Introduction.....	5.1
5.2	Inductance d'un conducteur rectiligne.....	5.2
5.3	Inductance Mutuelle de deux conducteurs sécants.....	5.4
5.4	Application aux cas pratiques.....	5.5
5.5	Simulation du cas test étudié	5.7
5.6	Conclusions.....	5.12
5.7	Références.....	5.13
6.	<i>Analyse des performances dynamiques de protection des parafoudres ZnO sur un réseau HT</i>	6.1
6.1	Introduction.....	6.1
6.2	Présentation du poste de transformation.....	6.2
6.3	Simulation EMTP.....	6.2

6.4	Modélisation des éléments du système.....	6.3
6.4.1	Modélisation du coup de foudre.....	6.4
6.4.2	Les lignes de transmission.....	6.5
6.4.3	Les pylônes.....	6.5
6.4.4	Amorçage des isolateurs.....	6.9
6.4.5	Transformateur de puissance.....	6.11
6.4.6	Parafoudres à oxyde métallique.....	6.11
6.4.7	Influence des conducteurs de connection.....	6.13
6.4.8	Les jeux de barres Omnibus.....	6.13
6.5	Résultats de simulation et discussion.....	6.14
6.5.1	Les contraintes subit par le poste de transformation.....	6.17
6.5.2	Comparaison entre le modèle statique et dynamique	6.20
6.5.3	Le courant dans les parafoudres.....	6.21
6.6	Performances de protection des parafoudres ZnO.....	6.21
6.6.1	L'effet de la distance de protection.....	6.21
6.6.2	Effet du courant de foudre.....	6.22
6.6.3	Effet de nombre de lignes connectées.....	6.24
6.6.4	Emplacement des parafoudres.....	6.25
6.6.5	Effet du point d'impact.....	6.26
6.7	Conclusions.....	6.28
6.8	Références.....	6.29
7.	<i>Conclusions générales et recommandations.....</i>	7.1
<i>Annexe A : L'ATP-EMTP : Outil de simulation dynamique des réseaux électriques.....</i>		A.1
<i>Annexe B Les données techniques du poste EL-Hassi.....</i>		B.1

Chapitre 1

Introduction générale

Chapitre 1

Introduction générale

1.1 Introduction

La foudre est un phénomène perturbateur important du fonctionnement de toutes les installations électriques, à plusieurs titres:

- Elle constitue un danger pour les personnes (tension de pas, élévation de potentiel des masses et du circuit de terre),
- Elle concerne toute la gamme de puissance et tous les niveaux de tension sont concernés : depuis le transport d'énergie THT jusqu'aux circuits intégrés en passant par les alimentations BT et les transmissions de données,
- Elle peut être à l'origine de perturbations momentanées causant des dégradations de la qualité des alimentations,
- Elle peut causer des destructions de matériel, et en conséquence de longues interruptions de service des installations.

La foudre a toujours été une cause de perturbations dans l'utilisation de l'électricité. Mais il faut noter l'exigence assez récente et croissante de la qualité des systèmes électriques (fiabilité, continuité de service...) ainsi que le souci toujours permanent de minimiser les coûts de production. Cela conduit à constater que la foudre est devenue un 'point dur' dans l'amélioration de la fiabilité des systèmes.

C'est pour cela qu'elle fait maintenant partie des grandes préoccupations des électriciens, qu'ils soient distributeurs d'énergie, constructeurs de matériels, concepteurs ou installateurs.

Une étude des effets de la foudre nécessite au préalable une bonne connaissance du phénomène. Pour cela des travaux de recherche importants ont été entrepris, depuis les années 70, permettant maintenant une description acceptable de ses mécanismes. Cette étude a pour objectif essentiel de prévoir ce qui peut se passer sur une installation donnée et préconiser des solutions d'amélioration. Ceci est possible par l'utilisation de logiciels spécialisés tel que l'EMTP, EUROSTAG, EMTDC qui simulent le comportement des installations.

Les dispositifs de protection contre les surtensions notamment celles provoquées par les coups de foudre indirects sont généralement les éclateurs et les parafoudres. Ces derniers sont soit à carbure de silicium (SiC) avec éclateurs, soit à oxyde de zinc (ZnO) sans éclateurs. Cependant, les parafoudres à oxyde de zinc gagnent actuellement du terrain et sont de plus en plus utilisés au niveau mondial à cause de leurs performances électriques, telle que la forte non-linéarité de la caractéristique (V-I), le faible courant de fuite en régime permanent et le fort pouvoir d'absorption d'énergie électrique ainsi que la facilité d'implantation et le coût compétitif. Par ailleurs, les parafoudres à oxyde de zinc sont utilisés pratiquement dans toute la gamme de tensions allant de la basse tension à la très haute tension.

1.2 Présentation.

L'analyse des données collectées sur les caractéristiques des parafoudres à oxyde métallique avait suggéré que les études de coordination des isolements peuvent être réalisées en les représentant seulement par leurs caractéristiques non-linéaires (V-I). Cependant, les travaux menés par des groupes de recherche à travers le monde indiquent que ces parafoudres se comportent différemment en présence de surtensions de foudre ou autres ondes à front rapide. Ce comportement est

caractérisé par une augmentation de la tension résiduelle du parafoudre ZnO lorsque le temps de front du courant de décharge diminue. Cette tension résiduelle atteint son maximum avant que le courant dans le parafoudre atteigne le sien. Typiquement, le courant du parafoudre qui atteint son maximum en $1\mu\text{s}$ produira une tension, aux bornes 10% plus élevée que la tension obtenue par un courant de décharge qui atteint son maximum en $8\mu\text{s}$. Ce comportement est connu sous le nom de comportement dynamique des parafoudres. Une modélisation correcte et adéquate de leurs caractéristiques dynamiques est très importante pour les études de fiabilité des systèmes électriques. D'autant plus que les courants de foudre se déchargeant par l'inductance des fils de connexion produisent une tension qui s'ajoute à la tension de décharge du parafoudre. Une tension généralement admise à ajouter est de l'ordre de $5,25\text{ kV/m}$ de fil ou encore une inductance de $1,25\mu\text{H/m}$ [1.1 – 1.3]. Par exemple, pour un courant de décharge de 10 kA qui atteint son maximum en $1\mu\text{s}$ ($di/dt = 10\text{ kA}/\mu\text{s}$), la tension développée sur un mètre de câble sur le front montant de l'onde est de $12,5\text{ kV/m}$. Si ce courant atteint son maximum en $8\mu\text{s}$, la tension développée sera seulement de $1,56\text{ kV/m}$. Ces valeurs ne sont que des estimations. Des formules analytiques pour le calcul des inductances propres et mutuelles sont donc d'une importance capitale dans les applications électriques. Une détermination plus exacte des inductances des conducteurs de connexion est plus que nécessaire et apportera sans doute une solution définitive.

Dans l'exploitation, le problème lié aux surtensions de foudre est critiquement posé. Ces surtensions sont les plus difficiles et les plus contraignantes à cause de la fréquence élevée mise en jeu d'autant plus qu'il faut s'assurer de la bonne tenue diélectrique des éléments de la chaîne du système électrique. Ces éléments ont des niveaux d'isolement fondamentaux différents, et par conséquent se pose d'une

manière concrète la question de la nécessité d'adjonction de parafoudres, de leur emplacement et de leur dimensionnement.

1.3 Contribution du présent travail

Cette thèse apporte les contributions suivantes :

1. Dans le chapitre 2, on a présenté une revue extensive sur les contraintes de tension subies par les systèmes électriques et les facteurs importants affectant leur fonctionnement telles qu'elles sont définies par les normes CEI 71-1 et CEI 71-2 relatives à la coordination des isolements [1.4, 1.5]. D'autre part on a donné un aperçu sur les moyens de protection contre les surtensions, particulièrement les parafoudres à oxyde métallique (ZnO). La tendance mondiale à les utiliser pour veiller au bon fonctionnement des systèmes et offrir au client la garantie sur la continuité de service a été mise en évidence.
2. Dans le chapitre 3, une investigation supportée par une modélisation des différents modèles pour le calcul de la réponse transitoire des parafoudres soumis à des courants de différentes amplitudes et formes d'ondes a révélé les avantages et les inconvénients de quelques modèles dynamiques des parafoudres à oxyde métallique disponibles dans la littérature. L'EMTP est utilisé pour cette investigation. Les résultats montrent que le problème majeur avec ces modèles réside essentiellement dans le calcul et l'ajustement de leurs paramètres.
3. Pour y remédier une nouvelle technique basée sur les algorithmes génétiques pour l'identification des paramètres des modèles de parafoudres ZnO est développée (chapitre 4). Elle a été testée sur une version modifiée du modèle IEEE [1.6] que nous avons modifié. Cette

approche est applicable pour des circuits équivalents qu'ils soient linéaires ou non. Les résultats obtenus sont très satisfaisants et prometteurs en se basant sur la comparaison des résultats prédits et des résultats publiés dans les catalogues des constructeurs pour différents temps de front et différentes amplitudes. On estime la possibilité d'appliquer cette méthode pour l'identification des paramètres de n'importe quel circuit équivalent des équipements électriques.

4. Un calcul plus exact (chapitre 5) des inductances des conducteurs de connexion et du parafoudre est développé. Ce calcul des inductances des structures de parafoudre est basé sur des formules analytiques. Tous les arrangements pratiques possibles des installations de parafoudres ont été pris en considération. Cette approche nous a permis de palier aux insuffisances observées dans les travaux précédents où l'inductance était estimée en multipliant une inductance par unité de longueur par la longueur du conducteur ou celle du parafoudre. L'étude nous a permis de tenir compte de l'effet de l'angle entre le conducteur de connexion et le jeu de barres. L'effet de l'inductance des structures de parafoudres sur le problème de la protection contre les surtensions a été élucidé.
5. Les deux investigations citées précédemment à savoir l'approche génétique pour l'identification des paramètres du modèle dynamique du parafoudre et la prise en considération du calcul exact des inductances des structures des parafoudres ont servi comme base pour une étude réelle réalisée (chapitre 6) sur le poste El-Hassi (Sétif). L'analyse des performances dynamiques de protection des parafoudres à oxyde métallique a été réalisée. Le poste opérationnel EL-Hassi (Sétif) est

représenté par un schéma complet triphasé. La version modifiée du modèle IEEE en conjonction avec la technique d'identification de paramètres développée a été utilisée. Les surtensions résultantes en plusieurs points sensibles de notre système sont évaluées et présentées.

A toutes fins utiles nous terminons cette thèse (chapitre 7) par les conclusions et les recommandations pour le travail futur dans ce domaine.

1.4 Références

- [1.1] IEEE Std C62.22, *IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems*, 1991.
- [1.2] IEEE Std C62.22, *IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems*, 1997.
- [1.3] BS EN 60099-5: 1996, IEC 99-5: 1996, including amendment A1: 1999, *surge arresters — Part 5: Selection and application recommendations*
- [1.4] BS EN 60071-1: 1996, IEC 71-1: 1993, *Insulation-Co-ordination part 1: Definition, principles and rules*
- [1.5] BS EN 60071-2: 1997, IEC 71-2: 1996, *Insulation-Co-ordination Part 2: Application guide*
- [1.6] IEEE Working Group 3.4.11, *Modeling of metal oxide surge arresters*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, N° 1, pp. 302-309, 1992.

Chapitre 2
Parafoudres dans
les réseaux électriques

Chapitre 2

Les parafoudres dans les réseaux électriques

2.1 Introduction.

Les réseaux d'alimentation électrique, quel que soit leur niveau de tension, sont affectés par des surtensions qui, compte tenu de leur ampleur, sont très souvent dangereuses pour les équipements qui y sont raccordés.

Le niveau de ces surtensions peut atteindre plusieurs centaines de kilovolts voir des milliers et peut donc largement dépasser la tenue diélectrique des équipements raccordés au réseau. Dans pareils cas, et en l'absence d'une protection adaptée, les destructions et les défaillances sont très fréquentes.

L'exploitant ne peut alors que constater les dégâts occasionnés et regretter de n'avoir pas encore réalisé l'investissement nécessaire à l'installation de parafoudres qui, compte tenu du sinistre, se révélerait finalement très rentable.

Dans la suite de ce chapitre, une revue sur les différentes contraintes de tension et les moyens préconisés pour la protection des réseaux électriques sera donnée.

2.2 Classification CEI des contraintes de tension.

2.2.1 Définitions.

Les contraintes de tension dont les caractéristiques sont reprises dans le tableau 2.1 sont réparties en deux classes à savoir:

- les tensions basses fréquences ;
- les surtensions transitoires.

Cette répartition est basée sur les caractéristiques de forme des surtensions [2.1– 2.9] et repose sur une description plus physique de ces surtensions.

2.2.1.1 Tensions continues.

Ce sont des contraintes de tension qui apparaissent sur les capacités du réseau lorsqu'elles sont mises hors tension. Ces tensions tendent à décroître plus ou moins rapidement en fonction du temps. Ces surtensions jouent un rôle important sur, par exemple, les manœuvres des lignes à vide, des charges capacitatives et des sectionneurs de postes sous enveloppe métallique (PSEM).

2.2.1.2 Tensions à basses fréquences.

Elles sont divisées en deux sous-classes :

- ☞ *la tension permanente à fréquence industrielle*: c'est la tension du réseau qui contraint de façon continue les équipements pendant toute leur exploitation [2.10];
- ☞ *les surtensions temporaires*: Ce sont des surtensions à fréquence industrielle ou à une fréquence harmonique ou sous-harmonique, pas ou faiblement amorties, et dont la durée est supérieure à une période de la fréquence industrielle [2.10 – 2.12].

2.2.1.3 Surtensions transitoires.

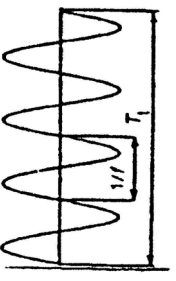
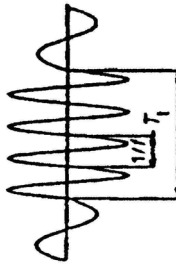
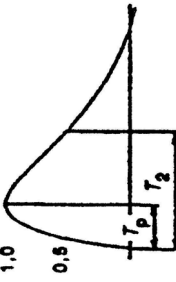
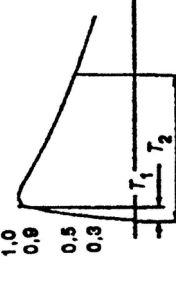
Ce sont des surtensions de courte durée, oscillantes ou non et généralement fortement amorties ; elles peuvent être superposées ou non à des surtensions temporaires. Elles se répartissent en trois types [2.1, 2.3]:

- ☞ *les surtensions à front lent* ayant un temps de crête compris entre 20 et 5000 μs et une durée totale jusqu'à la mi-amplitude de moins de 20 ms;
- ☞ *les surtensions à front rapide* ayant un temps de front compris entre 0,1 et 20 μs , et un temps jusqu'à la mi-amplitude de moins de 300 μs ;
- ☞ *les surtensions à front très rapide*, ayant un temps de front inférieur à 0,1 μs , et un temps jusqu'à la mi-amplitude de moins de 3 ms.

2.2.1.4 Surtensions combinées.

Ces surtensions résultent très souvent de la superposition de surtensions d'origine ou de natures différentes. La tension de régime permanent à fréquence industrielle se superpose pratiquement toujours aux contraintes d'autres natures. Par exemple, la présence d'une tension continue rend plus sévères les surtensions dues aux manœuvres. On peut également citer d'une surtension à front rapide due à la foudre arrivant sur l'un des contacts d'un disjoncteur ouvert, l'autre étant alimenté à la tension à fréquence industrielle du réseau. En coordination de l'isolement, il est très commode d'exprimer toutes les contraintes de tension en une unités relatives (per unit p.u.) et définie par référence à la tension phase-terre la plus élevée du réseau sur lequel sont évaluées les surtensions [2.8].

A partir de là et pour assurer un fonctionnement sécurisé des systèmes électriques il est nécessaire d'avoir des connaissances détaillées sur les types et les sources de ces contraintes de tensions. En examinant la classification donnée dans le tableau 2.1 et selon leurs origines les principales surtensions peuvent être résumées dans ce qui suit:

Classe	Basse fréquence		Transitoire	
	Permanente	Temporaire	A front lent	A front rapide
Forme de tension				
Domaine des formes de tension	$f = 50$ ou 60 Hz $T_1 > 1$ h (durée)	$10 < f < 500$ Hz $0,03 < T_1 < 3600$ s	$20 < T_p < 5000$ μ s $T_2 \leq 20$ ms	$3 < T_f < 100$ ns, $3 < f_1 < 100$ MHz $30 \text{ kHz} < f_2 < 30 \text{ MHz}$ $T_t < 3$ ms (durée)
Forme normalisée de tension	$f = 50$ ou 60 Hz	$48 < f < 62$ Hz	$T_p = 250$ μ s $T_2 = 2\,500$ μ s	aucune
Essai de tenue normalisé	Aucun	Essai de courte durée à fréquence industrielle	Essai aux chocs de manœuvre normalisé	Essai aux chocs de foudre normalisé

Tab. 2.1 Classification des surtensions sur les réseaux électrique triphasés, formes normalisées de tensions d'essais [2.1].

2.2.2 Tension permanente.

Les contraintes diélectriques dont les durées sont les plus élevées sont celles qui résultent de la tension de service du réseau sur lequel le matériel considéré est utilisé. Pour cette raison, plusieurs tensions pour un même réseau sont définies [2.13-2.15]:

- ☞ *la tension nominale d'un réseau triphasé* est la valeur efficace de la tension entre phases par laquelle le réseau est dénommé ;
- ☞ *la tension de service* est la valeur efficace de la tension entre phases, existant le plus souvent en un point d'un réseau en fonctionnement normal;
- ☞ *la tension la plus élevée d'un réseau triphasé* est la valeur efficace de la tension entre phases la plus élevée qui puisse apparaître en un point du réseau, dans les conditions d'exploitation normales.
- ☞ *la tension la plus élevée pour le matériel* est la valeur efficace de la tension entre phases, la plus élevée pour laquelle un matériel est spécifié. Cette tension doit être au moins égale à la tension la plus élevée du réseau auquel le matériel est destiné.

2.2.3 Surtensions temporaires.

Dans les sections suivantes nous allons décrire quelques événements typiques conduisant à des surtensions temporaires.

2.2.3.1 Effet Ferranti.

Lorsqu'une ligne, alimentée par l'une de ses extrémités, est ouverte à l'autre extrémité, il se produit un phénomène de résonance propre à la ligne ; ce phénomène se manifeste par une tension croissante vers l'extrémité ouverte.

Pour un réseau à 50 Hz, le facteur de surtension est de l'ordre de 1,05 pour une ligne de 300 km et de 1,16 pour une ligne de 500 km [2.17].

L'amplification de tension en extrémité de ligne ouverte ne se limite pas à la tension à fréquence industrielle mais affecte aussi les tensions harmoniques existantes. Les manœuvres de réseau qui engendrent les surtensions temporaires dues à l'effet Ferranti sont toutes celles qui conduisent une ligne à être ouverte à une extrémité alors que l'autre reste alimentée. On peut citer :

- ☞ *l'enclenchement ou le réenclenchement de ligne ouverte en extrémité*
- ☞ *la perte de charge.*

Il existe essentiellement deux moyens [2.17] pour réduire ces surtensions qui peuvent être gênantes sur les lignes très longues :

- ☞ *la réactance shunt*, qui consiste à placer en plusieurs points de la ligne une réactance phase-terre permettant de diminuer la capacité apparente de la ligne;
- ☞ *la capacité série*, qui contribue aussi à réduire l'effet Ferranti en diminuant l'inductance apparente de la ligne.

2.2.3.2 Court-circuit monophasé.

Lorsqu'un défaut met à la terre l'une des phases d'un réseau triphasé, les deux autres phases subissent, jusqu'à l'élimination du défaut, une surélévation de tension. On caractérise celle-ci par le facteur de défaut à la terre lequel est définie comme étant le rapport entre la tension efficace la plus élevée entre les phases saines et la terre en présence du défaut et la tension efficace entre phase et terre en l'absence de défaut à l'emplacement considéré [2.16].

2.2.3.3 Alimentation d'une charge capacitive.

C'est le cas, par exemple, d'une ligne aérienne ou d'un réseau de câbles, alimenté par un ensemble de centrales de puissance limitée ou encore l'enclenchement de transformateurs ayant une forte charge capacitive.

2.2.3.4 Mise sous tension des transformateurs.

Ces contraintes apparaissent lorsqu'il existe à la fois de fortes capacités localisées et des inductances nonlinéaires (circuit magnétique saturable de transformateurs).

Une résonance à fréquence harmonique ou sous-harmonique peut apparaître. On rencontre ce cas lors de l'enclenchement d'un transformateur à vide. Une solution peut être entreprise qui consiste à modifier la longueur du câble ou en amortissant l'excitation à l'aide d'une résistance insérée temporairement. La mise à la terre du neutre peut être également une solution efficace.

2.2.3.5 Perte brusque d'une charge.

Dans ce cas, la chute de tension interne des alternateurs et de leurs transformateurs disparaît entraînant l'égalité de la tension fixée et de la force électromotrice des alternateurs. L'élévation de la vitesse des alternateurs peut aggraver la surélévation de tension. Celle-ci disparaît plus ou moins rapidement, en fonction de l'action des régulateurs de tension et de vitesse des alternateurs.

2.2.3.6 Ferrorésonance.

Ce phénomène apparaît sur un réseau comportant des inductances non linéaires et des éléments capacitifs. Dans ce cas plusieurs régimes stables peuvent exister pour une même excitation.

2.2.4 Surtensions transitoires lentes.

Ces surtensions sont généralement dues à des changements de configuration électrique du réseau qui se traduisent par des régimes transitoires complexes, pouvant comporter des surtensions plus ou moins élevées.

2.2.4.1 Manoeuvres des batteries de condensateurs.

La mise sous tension de batteries de condensateurs, en particulier si leur neutre est isolé, peut générer des surtensions entre phases qui peuvent être contraignantes pour les isollements entre enroulements des transformateurs.

2.2.4.2 Mise et remise sous tension d'une ligne à vide.

La mise sous tension, ou la remise sous tension rapide d'une ligne de transmission engendre des surtensions transitoires à front lent dont les amplitudes les plus élevées sont situées à l'extrémité ouverte de la ligne.

Ces surtensions dépendent de la nature de la ligne et des éléments dont elle est constituée, de la puissance de court-circuit de la source, du type de disjoncteur et de l'instant de l'enclenchement [2.18, 2.19]. Elles sont en général prises en compte pour dimensionner les matériels sur les réseaux à très haute tension. Le niveau de ces surtensions peut dépasser 2,4 pu à l'extrémité ouverte de la ligne.

Ces surtensions dépendent de l'instant de fermeture effectif sur chacune des phases. Leurs valeurs crête suivent une fonction de répartition que l'on peut déterminer par une approche statistique en effectuant des calculs à l'aide d'un programme de simulation, tel que l'EMTP, sur un nombre important de cas où l'instant de fermeture est fixé de façon aléatoire.

Dans le but de réduire ces surtensions on peut insérer temporairement une résistance dans le circuit pendant la fermeture du disjoncteur, on peut aussi installer des parafoudres aux extrémités de la ligne ou encore maîtriser l'instant de fermeture du disjoncteur en synchronisant tous les pôles ou fermer chaque pôle au passage par zéro de la tension entre les contacts.

2.2.4.3 Elimination ou Apparition de défauts.

L'apparition d'un défaut provoque simultanément des surtensions à front lent et des surtensions temporaires [2.12]. La partie à front lent est générée par la propagation sur le réseau de l'échelon de tension dû à la chute brutale de tension à l'endroit du défaut. L'élimination d'un défaut provoque aussi simultanément des surtensions à front lent et des surtensions temporaires. En l'absence de perte de charge, la partie transitoire seule a des amplitudes qui peuvent atteindre 1,7 à 1,8 pu sur les réseaux THT à neutre mis à la terre et 2,2 pu sur des réseaux HT et MT à neutre isolé ou mis à la terre par bobine de Petersen.

2.2.5 Surtensions transitoires à front rapide dues aux manœuvres.

2.2.5.1 Coupure de courants capacitifs ou inductifs.

De façon générale, la coupure de courants capacitifs ou inductifs peut provoquer des surtensions qui méritent attention car les disjoncteurs peuvent se retrouver dans des conditions de tension transitoire de rétablissement (TTR) mal couvertes par les normes et donc réamorcer entre contacts, générant ainsi des surtensions dangereuses pour les matériels.

2.2.5.2 Manœuvre des sectionneurs.

Les manœuvres de sectionneurs aussi bien dans les postes aériens que dans les postes sous enveloppe métallique PSEM génèrent des surtensions à la terre à front très rapide dont les amplitudes dépendent fortement des tensions résiduelles du côté de la charge avant l'amorçage ou le réamorçage entre les contacts du sectionneur. L'amortissement de ces surtensions est très important dans l'air alors que, dans les PSEM, il est quasi nul.

2.2.6 Surtensions transitoires à front rapide dues à la foudre.

2.2.6.1 Coup de foudre sur une phase.

Pour déterminer les conséquences d'un coup de foudre touchant un conducteur de phase, on raisonne généralement sur une injection de courant $i(t)$ due à la foudre. Ce courant se divise par moitié de part et d'autre du point d'impact et se propage vers les extrémités de la ligne. La tension va se propager le long de la ligne vers les pylônes en subissant des déformations dues aux éventuels amorçages des chaînes d'isolateurs. Dans le cas d'amorçage, il y a défaut d'isolement de la ligne dont l'élimination nécessite l'ouverture des disjoncteurs. Sur les lignes de tension inférieure à 400 kV, l'amorçage sur le premier pylône rencontré est pratiquement systématique car l'isolement de ces lignes en choc de foudre est inférieur ou de l'ordre de 1000kV.

Un coup de foudre tombant sur une ligne de transmission sans câble de garde provoque toujours un défaut. La surtension due à un coup de foudre assez fort peut provoquer des amorçages sur plusieurs supports consécutifs, en particulier pour les isollements ayant les tenues les plus faibles.

La montée en potentiel du sommet du pylône qui suit l'amorçage d'une chaîne d'isolateurs peut entraîner l'amorçage des chaînes des autres phases si l'amplitude du coup de foudre est forte ou si la tenue de la ligne est faible. Une forte impédance du pylône et de sa prise de terre favorise aussi ce phénomène. Le défaut provoqué devient alors polyphasé.

2.2.6.2 Coup de foudre sur un câble de garde ou un pylône.

Si le coup de foudre tombe sur un pylône ou un câble de garde qui lui est relié, l'écoulement du courant vers la terre entraîne une élévation du potentiel de la tête du pylône. Lorsque la différence de potentiel aux bornes des chaînes d'isolateurs atteint ou dépasse leur tenue diélectrique, il y a amorçage d'une au moins de celles-ci. On parle alors d'amorçage en retour.

Les surtensions se propagent le long de la ligne vers les postes et peuvent à nouveau provoquer des amorçages sur d'autres pylônes si le coup de foudre est de forte amplitude et la tenue diélectrique des chaînes d'isolateurs est faible.

Le comportement des lignes de transmission peut être étudié à l'aide de programmes de simulation permettant de représenter les différents éléments dans le but de déterminer les conditions d'amorçage en retour et l'amplitude des surtensions. Pour limiter le nombre d'amorçages en retour, on peut :

- ☞ augmenter la tension d'amorçage des chaînes d'isolateurs;
- ☞ diminuer la résistance des prises de terre des pylônes;
- ☞ diminuer l'impédance des pylônes;
- ☞ installer des parafoudres ZnO, en parallèle avec la chaîne d'isolateurs.

Cette mesure permet aussi d'éviter les amorçages dus aux coups de foudre directs et peut facilement remplacer le câble de garde.

2.2.6.3 Coup de foudre à proximité de la ligne.

Ces coups de foudre engendrent des surtensions induites qui peuvent atteindre plusieurs centaines de kilovolts sur la ligne. Ces surtensions n'ont d'importance que sur les réseaux de distribution. Il convient d'en tenir compte pour les lignes MT, mais surtout pour les lignes BT [2.20, 2.21]. Pour réduire ces surtensions on peut procéder à:

- ☞ la diminution de la hauteur des conducteurs ;
- ☞ l'amélioration de la mise à la terre du neutre, pour le réseau BT;
- ☞ l'utilisation de parafoudres ZnO.

2.2.6.4 Propagation des surtensions de foudre vers les postes.

La surtension de foudre, dont la forme dépend des éventuels amorçages au niveau des pylônes, se propage le long de la ligne jusqu'au poste en subissant un amortissement dû à l'effet de peau mais surtout à l'effet couronne. Les surtensions réellement contraignantes pour le matériel constituant le poste sont dues à des coups de foudre tombant sur la ligne entre le poste et une distance dite distance limite, de quelques kilomètres au maximum. Pour les coups de foudre tombant au-delà de cette distance limite, les surtensions sont le plus souvent suffisamment amorties par l'effet couronne pour ne plus pouvoir provoquer d'amorçage dans le poste.

Par ailleurs, pour les postes, on parle d'effet d'autoprotection lorsque plusieurs lignes sont en permanence raccordées au poste, car dans ce cas, la pente de l'onde de foudre incidente est divisée par le nombre de lignes raccordées.

2.3 Paramètres des coups de foudre.

D'une manière générale, l'activité orageuse dans une région peut être caractérisée par :

- ☞ la densité des coups de foudre au sol ;
- ☞ la fonction de répartition des amplitudes des courants de foudre;
- ☞ les pentes associées aux courants de foudre;
- ☞ les temps de crêtes et de queues des courants de foudre;
- ☞ le nombre d'arcs subséquents et les intervalles de temps les séparant.

2.3.1 Niveau kéraunique et densité de coups de foudre.

Dans la conception de réseaux on a utilisé et on utilise toujours des relations liant la densité de coups de foudre et le niveau kéraunique tel qu'il est depuis longtemps mesuré par les stations météorologiques : le niveau kéraunique représente, pour une région, le nombre de jours de l'année pendant lesquels le tonnerre a été entendu.

Des formules empiriques ont donc été proposées. Elles relient la densité de coups de foudre au sol avec le niveau kéraunique.

2.3.2 Répartition des amplitudes des courants de foudre.

Beaucoup de fonctions de répartition des amplitudes des courants des premiers arcs en retour des coups de foudre négatifs peuvent exister; La distribution statistique expérimentale [2.22, 2.23], selon la IEEE, des coups de foudre en amplitude répond à une loi normale donnée dans la figure 2.1 et celle en raideur de front des coups de foudre est donnée dans la figure 2.2.

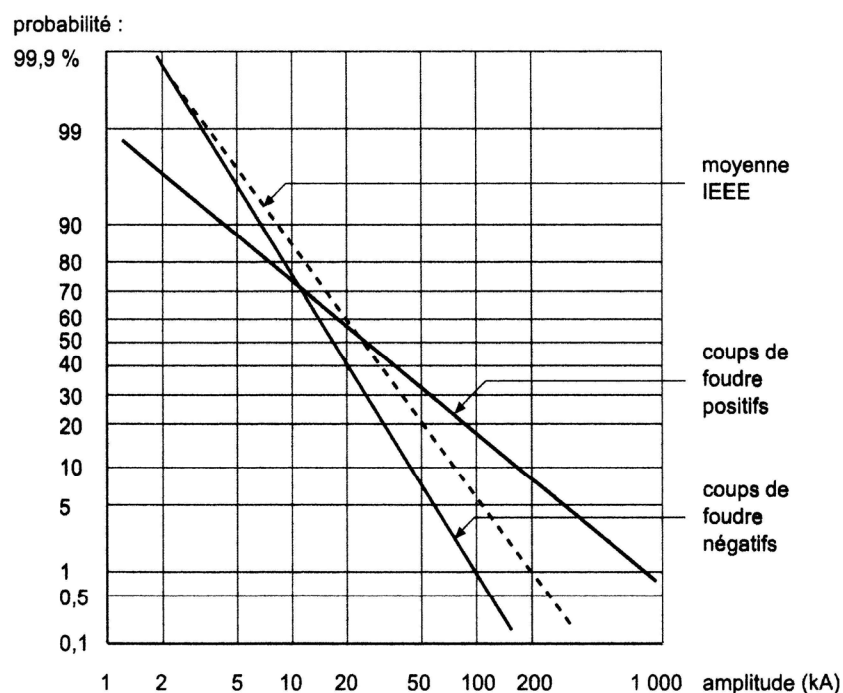


Fig. 2.1 Distribution statistique expérimentale, en amplitude, des coups de foudre positifs et négatifs, selon IEEE [2.22].

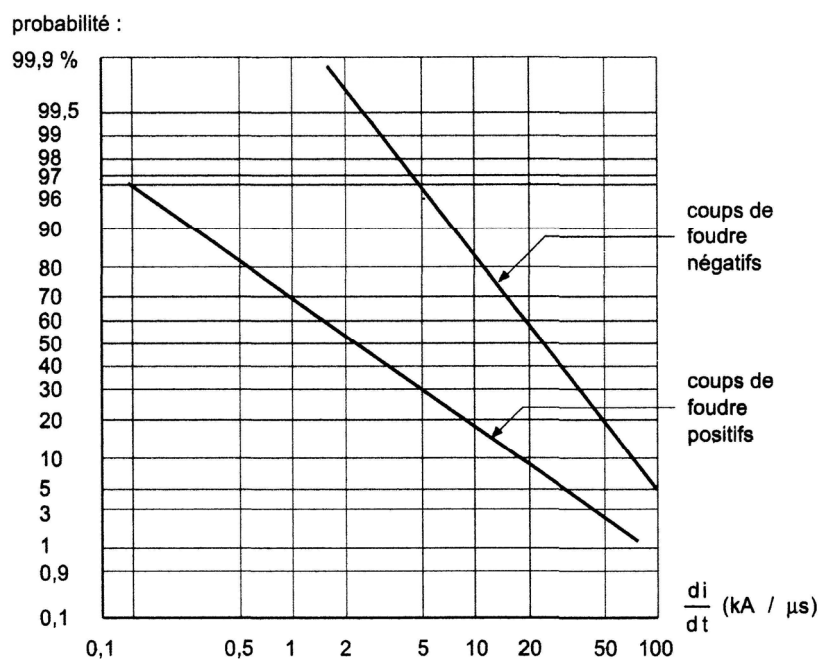


Fig. 2.2 Distribution statistique expérimentale, en raideur de front, des coups de foudre positifs et négatifs, selon IEEE [2.22].

2.3.3 Autres paramètres des courants de foudre.

Les autres paramètres des coups de foudre négatifs, utiles pour la coordination de l'isolement des réseaux électriques, sont donnés dans le tableau 2.2 pour les premiers arcs en retour négatifs et dans le tableau 2.3 pour les arcs négatifs subséquents. Environ 50 % des coups de foudre ne comportent que le seul premier arc en retour. Le nombre moyen d'arcs par coup de foudre est de 3. La durée totale moyenne d'un coup de foudre (premier arc en retour-dernier arc subséquent) est de l'ordre de 200 ms.

% au-dessus des valeurs indiquées.....	95 %	50 %	5 %
Pente maximale (kV/ μ s).....	9,1	24	65
Pente moyenne (kV/ μ s)	1,7	5	14
Temps de crête (μ s)	1,8	5,5	18
Temps de queue à mi-amplitude (μ s).....	30	77,5	200

Tab. 2.2 Paramètres des premiers arcs en retour des coups de foudre négatifs [2.8].

% au-dessus des valeurs indiquées	95 %	50 %	5 %
Pente maximale (kV/ μ s).....	10	40	162
Pente moyenne (kV/ μ s)	3,3	15	72
Temps de crête (μ s)	0,2	1,1	4,5
Temps de queue à mi-amplitude (μ s).....	6,5	30,2	140

Tab. 2.3 Paramètres des arcs subséquents des coups de foudre négatifs [2.8].

2.4 Dispositifs de protection contre les surtensions.

Les dispositifs de protection des réseaux électriques contre les surtensions peuvent être de deux types, à savoir éclateur à air et parafoudre, qui sont raccordés entre phase et terre dans la très grande majorité des cas. L'éclateur est

encore très utilisé sur les réseaux de distribution lorsqu'il s'agit d'isolation dans l'air ou de matériels pour lesquels il n'est pas économiquement intéressant de rechercher de très bas niveaux d'isolement. En revanche, dès que l'on veut améliorer la qualité du service, il devient nécessaire d'utiliser des parafoudres qui présentent de meilleures caractéristiques de protection.

Deux technologies de parafoudre existent à l'heure actuelle [2.3, 2.6, 2.22, 2.24–2.28]:

- les parafoudres SiC: leur partie active est constituée d'un empilage de varistances au carbure de silicium en série avec des éclateurs.
- les parafoudres ZnO : leur partie active est uniquement constituée de varistances à base d'oxyde de zinc.

Ces derniers, apparus au début des années 1970, se sont rapidement répandus, en raison de leur réalisation plus simple, de leur meilleure performance et de leur robustesse notamment dans leur dernière génération avec enveloppe synthétique née au début des années 1980.

2.4.1 Eclateur à air.

L'éclateur est généralement constitué de deux électrodes, l'une reliée à l'élément à protéger et l'autre à la terre. Leur distance est généralement réglable de façon à ajuster la tension d'amorçage. Son écartement est réglé pour provoquer l'amorçage si les surtensions des réseaux sont importantes. La forme et la nature de ces électrodes sont très variables. Le principal avantage de l'éclateur est son faible prix. Il est aussi très robuste et très facilement réglable de sorte que ses caractéristiques peuvent être ajustées suivant sa fonction.

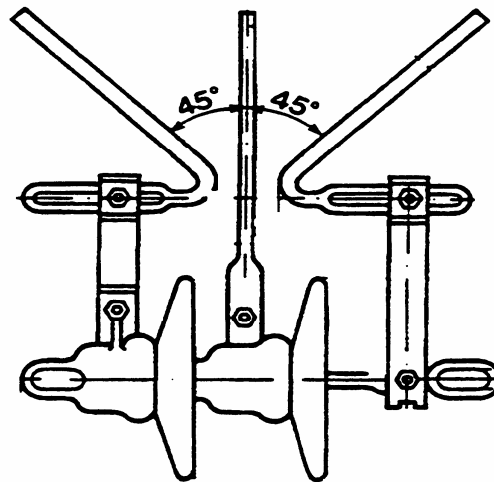


Fig. 2.3 Schéma d'un éclateur [2.5].

Malheureusement, ces avantages ne vont pas sans inconvénients :

- Une fois amorcé entre les deux électrodes, l'arc ne se désamorce pas spontanément. Le défaut artificiel ainsi créé doit être éliminé par l'action des protections et du disjoncteur associé. Il est, par ailleurs, à l'origine de coupures brèves très gênantes pour la qualité de service
- Le fonctionnement de l'éclateur conduit à une onde de tension coupée à front raide susceptible de provoquer des avaries au matériel bobiné situé à proximité ;
- Le niveau d'amorçage est très fluctuant.
- Les éclateurs sont sensibles aux agressions extérieures.

En tout état de cause, l'éclateur demeure un excellent moyen de protection des isolations dans l'air puisque la tenue diélectrique du matériel à protéger subit les mêmes fluctuations que sa tension d'amorçage. En revanche, il est moins bien adapté à la protection des autres matériels tels que les transformateurs, les câbles,

les postes électriques sous enveloppe métallique. On est alors amené à le remplacer de façon avantageuse par des parafoudres.

2.4.2 Parafoudre au carbure de Silicium.

Les parafoudres SiC permettent de remédier à la plupart des inconvénients inhérents au principe de l'éclateur.

Ce type de parafoudre est constitué d'une ou plusieurs varistances au carbure de silicium, associées en série avec un ou plusieurs éclateurs. L'ensemble est placé dans une enveloppe isolante remplie d'un gaz sec (air ou azote). L'étanchéité est primordiale pour éviter la corrosion interne donc la dérive des caractéristiques et, à terme, la défaillance du parafoudre. En subdivisant l'intervalle d'amorçage en plusieurs éclateurs élémentaires, on stabilise les caractéristiques d'amorçage du parafoudre.

Les résistances variables sont constituées de grains de carbure de silicium agglomérés par un liant et pressés sous forme de disques dont les faces parallèles sont métallisées et le pourtour recouvert d'un revêtement isolant destiné à éviter les contournements. Sous la tension de service, les éclateurs internes isolent le parafoudre. Lorsque survient une surtension supérieure au niveau d'amorçage, les éclateurs deviennent conducteurs et provoquent l'écoulement du courant de décharge à travers les varistances dont la résistance diminue au fur et à mesure que le courant augmente, ce qui permet de limiter la surtension. Après le passage du courant de décharge, le parafoudre reste conducteur, mais la non-linéarité des varistances entraîne une décroissance très rapide du courant pouvant alors être facilement interrompu au premier passage par zéro de la tension appliquée. Ainsi, la surtension est écrêtée sans provoquer de défaut.

Son niveau de protection est la valeur maximale des trois tensions suivantes :

- la tension maximale d'amorçage au choc de foudre (1.2/50 μ s);
- la tension maximale d'amorçage sur onde à front raide, divisée par 1,15;
- la tension résiduelle au courant nominal de décharge.

Bien que d'un coût plus élevé, le parafoudre SiC se révèle très avantageux par rapport à un éclateur à air classique :

- l'extinction de l'arc interne est spontanée après passage de la surtension ;
- la tension à ses bornes est non nulle après amorçage, ce qui évite la transmission d'une onde de tension coupée ;
- sa tension d'amorçage est plus stable ;
- il présente une bonne insensibilité aux agressions extérieures puisque les éléments actifs sont placés dans une enveloppe hermétiquement fermée.

2.4.3 Parafoudre à l'oxyde de zinc.

C'est au cours des années 1970 que des constructeurs de parafoudres se sont lancés dans la mise au point de parafoudres utilisant ces varistances qui présentent deux avantages essentiels :

- un coefficient de non-linéarité très important sur une large plage de courant;
- une capacité d'absorption d'énergie très élevée.

La partie active des parafoudres ZnO (figure 2.4) est simplement constituée d'un empilage de varistances à oxyde de zinc, placé dans une enveloppe étanche et isolante en porcelaine ou, plus récemment, en matériau synthétique.

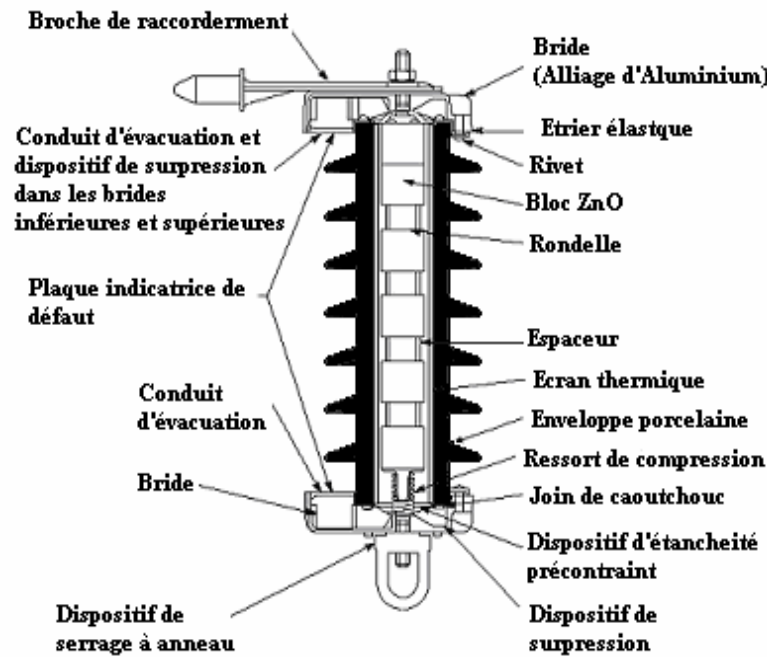


Fig. 2.4 Structure d'un parafoudre ZnO en enveloppe porcelaine.

Cette simplicité de constitution n'est pas pour autant synonyme de facilité de construction. La fabrication de ces céramiques requiert en effet beaucoup de soin et de savoir-faire, car leurs caractéristiques et leur fiabilité dépendent des paramètres de fabrication de façon très sensible. Elles sont principalement constituées d'oxyde de zinc (90% en masse) et d'un mélange d'autres oxydes (oxyde de bismuth, de cobalt, de manganèse, de chrome, d'étain, ...) de pureté et de granulométrie soigneusement contrôlées, qui sont mélangés en phase aqueuse. Ce mélange est ensuite asséché et la poudre résultante est compactée sous forme de disques. Les pièces sont alors frittées à très haute température (1000°C et plus) de façon à densifier l'ensemble et obtenir l'effet de non-linéarité recherché. Les disques sont finalement revêtus, en périphérie, d'une couche isolante assurant la tenue diélectrique de la varistance, puis métallisés sur chacune de leurs faces par projection d'un alliage métallique en fusion.

2.4.3.1 Principe de fonctionnement du parafoudre ZnO.

Les parafoudres à oxyde métallique protègent l'isolation des équipements dans les systèmes électriques contre les surtensions internes et externes.

Sous la tension de service permanent (tension phase/terre de réseau), l'impédance d'un parafoudre ZnO est très élevée si bien qu'il est parcouru par un courant très faible dit courant de fuite (inférieur à 1 mA). Lorsqu'une surtension apparaît, sa résistance diminue rapidement de manière à constituer un chemin préférentiel pour écouler l'énergie correspondante vers la terre, et donc à limiter le niveau de la contrainte résiduelle.

Par suite, la caractéristique V-I de l'appareil est fortement non-linéaire. La non-linéarité est telle que lorsque le courant traversant le parafoudre passe de 0,1 mA à 10 kA, la tension à ses bornes n'est multipliée que par deux environ : Cela fait du parafoudre ZnO un dispositif de protection presque idéal. Les parafoudres à oxyde métalliques ont rapidement remplacé les parafoudres SIC, cela est dû à la forte non-linéarité de leurs caractéristiques (V-I ou E-J) comme montré dans la figure (2.5), ce qui a pour effet d'éliminer les éclateurs qui étaient présents dans leurs prédécesseurs et les caractéristiques électriques sont exclusivement déterminées par les propriétés des blocks à oxyde métallique.

On augmente la tension assignée en ajoutant des varistances en série par contre pour avoir de plus forte énergie on augmente le diamètre des varistances ou on réalise des colonnes parallèles. Le niveau de protection d'un parafoudre ZnO correspond à sa tension résiduelle au courant nominal de décharge qui le caractérise.

A partir des caractéristiques élémentaires d'une varistance, dimensionner un parafoudre ZnO consiste à définir le nombre de varistances élémentaires à associer en série.

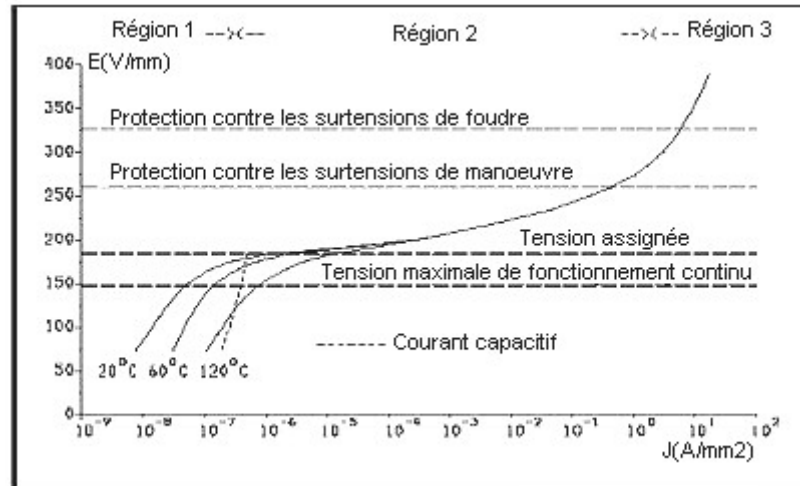


Fig. 2.5 Caractéristique E - J du parafoudre ZnO.

Deux exigences influent sur le nombre de varistances à placer en série :

- un bas niveau de protection (un nombre maximal)
- la tenue à une tension de service donnée (un nombre minimal).

Par ailleurs, le parafoudre doit être capable en toutes circonstances de dissiper, sous forme de chaleur, l'énergie qui lui est injectée. Lors de l'écrêtage d'une surtension, l'échauffement des varistances peut être considéré comme adiabatique. Il est donc nécessaire que la puissance dissipable par le parafoudre soit, à tout instant, supérieure à la puissance qu'il absorbe, sachant que celle-ci croît fortement avec la température. Dans le cas contraire, un phénomène appelé "emballement thermique" conduit à la défaillance du parafoudre.

En dehors des décharges de foudre, le parafoudre écrête toutes les surtensions du réseau. La norme CEI 60099-4 définit ainsi des classes de décharge de ligne - de 1 à 5 - correspondant à des capacités d'énergie croissantes. Pour les réseaux de

distribution moyenne tension, la classe habituelle est la classe 1. Les classes 2 et 3 se retrouvent usuellement sur des réseaux de 60 à 225 kV et les classes 4 et 5 pour les réseaux 225kV, 400kV et au delà.

2.4.3.2 Caractéristiques des parafoudres ZnO.

L'étude des propriétés des parafoudres à oxyde de zinc et l'analyse des contraintes d'exploitation ont permis de définir les caractéristiques électriques (tableau 2.4) des parafoudres fixées par les spécifications d'essai tableau 2.1.

- *La notion de tension assignée (U_r)*, bien qu'ambiguë, est capitale. En fait, elle caractérise la tenue du parafoudre aux surtensions temporaires. Il s'agit plus précisément de la surtension maximale à fréquence industrielle que l'on peut appliquer, pendant 10s et suite à l'absorption d'une forte énergie, sans constater d'emballement thermique du parafoudre

- *La tension maximale de service permanent (U_c)* est la tension maximale que le parafoudre est capable de supporter en permanence dans des conditions ambiantes données.

- *Le courant nominal de décharge (I_n)* est la valeur de crête d'une onde de courant de forme bi-exponentielle 8/20 μ s, qui sert à classer le parafoudre. En moyenne tension, Il peut prendre la valeur 5 kA ou 10 kA. Le niveau de protection du parafoudre est défini à ce courant.

- La capacité d'absorption énergétique est traduite par la tenue aux ondes de courant de forme bi-exponentielle 4/10 (65 kA pour $I_n = 5$ kA et 100 kA pour $I_n = 10$ kA) et par la tenue aux ondes de courant de forme rectangulaire dont la durée et l'amplitude définissent la sévérité.

Tension nominale de réseau (kV_{eff})	63	90	225	400
Tension nominale d'exploitation (kV_{eff})	42	58	142	243
Tension assignée du parafoudre (kV_{eff})	72	96	192	360
Tension résiduelle au courant nominal (kV_{max})	180	235	475	850
Courant nominal, onde 8/20 μs (kA)	5	5	10	10

Tab. 2.4 Exemple de caractéristiques des parafoudres ZnO [2.8].

2.4.3.3 Principaux critères de dimensionnement d'un parafoudre.

Les principaux critères de dimensionnement d'un parafoudre sont [2.14, 2.15]:

- sa tension maximale permanente (**MCOV**) doit être supérieure à la tension maximale d'exploitation du réseau.
- sa tension nominale est fixée à $1.25 \times \text{MCOV}$
- son niveau de protection.
- sa capacité énergétique à supporter des surtensions temporaires, donnée par une courbe amplitude-durée.

L'utilisation d'un parafoudre n'est efficace que sous certaines conditions d'implantation, et en particulier selon les distances qui les séparent du matériel à protéger et de sa terre, d'où l'importance de la notion de distance de protection du parafoudre.

2.4.3.4 Avantages par rapport aux parafoudres SiC.

Les parafoudres ZnO offrent des performances supérieures à celles des parafoudres SiC:

- leur niveau de protection est mieux maîtrisé, du fait de l'absence d'éclateurs en série dont la tension d'amorçage reste dépendante de la forme d'onde de la

surtension, ainsi que de la plus forte non-linéarité de leur caractéristique courant-tension, notamment à fort courant ;

- leur encombrement et leur poids sont nettement moindres, grâce à la forte capacité d'absorption énergétique des varistances à l'oxyde de zinc, qui permet de réduire notablement le volume actif ;

- leur fiabilité est supérieure en zones polluées, dans lesquelles les parafoudres SiC peuvent être confrontés à des amorçages intempestifs de leurs éclateurs internes conduisant parfois à leur destruction.

2.4.3.5 Avantages des parafoudres synthétiques.

Grâce à leur structure d'ensemble, les parafoudres ZnO avec enveloppe en matériau synthétique présentent eux-mêmes des avantages significatifs par rapport aux parafoudres ZnO classiques avec enveloppe porcelaine :

- leur encombrement et leur poids sont encore plus réduits ;
- leurs robustesses mécanique et électrique sont accrues ;
- ils présentent une insensibilité presque totale aux chocs et au vandalisme du fait de la souplesse de leur enveloppe ;
- leur comportement en zones polluées est encore amélioré en raison de l'hydrophobicité de leur enveloppe, notamment lorsqu'elle est en gomme silicone
- ils ont un comportement très sain en cas de défaillance (mise en court-circuit), ce qui garantit un excellent niveau de sécurité à la fois pour les personnes et les équipements à proximité.

2.4.4 Comportement dynamiques des parafoudres ZnO.

L'analyse des données collectées sur les caractéristiques des parafoudres à oxyde métallique et les travaux menés par des groupes de recherche à travers le monde indiquent que les parafoudres à oxyde métallique ont des caractéristiques dynamiques qui dépendent de la fréquence et qui sont très importantes lorsqu'il s'agit des études de foudre ou d'autres ondes à front rapide. Pour des contraintes à front rapides, ceux pour des temps de montée inférieure à $8\mu\text{s}$, la tension de décharge du parafoudre atteint son maximum avant que le courant de décharge du parafoudre atteigne le sien et la tension de décharge du parafoudre à oxyde métallique augmente, lorsque le temps de front du courant de décharge diminue. Cette augmentation de la tension résiduelle peut atteindre 6% quand le temps de montée est réduit de $8\mu\text{s}$ à $1,3\mu\text{s}$.

2.5 Conclusions.

Dans ce chapitre on a donné des informations d'ordre général sur les parafoudres à base d'oxyde métallique et sur les tendances mondiales à les utiliser comme moyen de protection contre toute forme de surtension pouvant affecter les réseaux de transport afin de veiller au bon fonctionnement des systèmes et d'offrir au client la garantie sur la continuité de service.

2.6 Références.

- [2.1] BS EN 60071-1: 1996, IEC 71-1: 1993, Insulation-Co-ordination part 1: Definition, principles and rules.
- [2.2] BS EN 60071-2: 1997, IEC 71-2: 1996, Insulation-Co-ordination Part 2: Application guide.

- [2.3] A. Haddad, Attenuation and limitation of overvoltages on power systems, PHD thesis, UWCC, 1990.
- [2.4] D. Faluchiron, *Surtensions et Coordination de l'Isolement*, Cahier Technique n° 181, Schneider-electric, édition décembre 1992.
- [2.5] A. Fakkar, Contribution à l'étude du comportement thermique des varistances à base d'oxyde de zinc: Simulation et Mesures, Application aux parafoudres moyenne et Haute tension, Thèse de doctorat, Université de Paul Sabatier, 1994.
- [2.6] A. Bayadi, Etude des performances des éléments ZnO de parafoudre sous différents types de tension, Magister, Université de sétif, 1996.
- [2.7] Laszlo Prikler, Lightning performance and switching overvoltage studies of an uprated transmission lines, EEUG, pp 109–117, 1998.
- [2.8] Alain Sabot, Jean Michaud, *Lignes et postes: Choix et coordination des isolements*, Technique de l'Ingénieur D 4750, 2000.
- [2.9] Klaus Ragaller, "Surges in high voltage networks", BBC Brown Bowveri & Company Ltd, Published by Plenum Press N. York and London, ISBN 0 306 40457 5, 1980.
- [2.10] *Temporary overvoltage: Causes, Effects, and Evaluation*, CIGRE Session paper 33-210, CIGRE Proceedings, pp.38-49, Aug. 1998.
- [2.11] H. Clavitsch, Temporary overvoltages, in ragaller, K.(ed.) 'Surges in high voltage networks', pp 131-163, 1980.
- [2.12] G. Leroy, Les surtensions temporaires, dans 'les propriétés diélectrique de l'air et les très hautes tensions', EDF, Eyrolles, Paris, pp11-43, 1984.
- [2.13] G. Leroy, Tensions permanente, dans 'les propriétés diélectrique de l'air et les très hautes tensions', EDF, Eyrolles, Paris, pp9-10, 1984.

- [2.14] IEEE Std C62.22, IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems, 1991.
- [2.15] IEEE Std C62.22, IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems, 1997.
- [2.16] BS EN 60099-5: 1996, IEC 99-5: 1996, including amendment A1: 1999, *surge arresters — Part 5: Selection and application recommendations*
- [2.17] M. Kadri, A. Bayadi, Etude de la surélévation de la tension le long de ligne longue ouverte à son extrémité, Thèse d'Ingénieur d'état, Université de Sétif, 1991.
- [2.18] J. D. Brown et al, *switching surges*, in ragaller, K. (Ed.), *Surges in high voltage networks*, Plenum press, pp 63-97, 1980.
- [2.19] G., Leroy, les contraintes internes, dans, les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tension, EDF, Eyrolles, Paris, pp 44-91, 1984.
- [2.20] F. Rachidi, Effets électromagnétiques de la foudre sur les lignes de transmission aériennes: Modélisation et Simulation, Thèse de docteur es sciences techniques, Lausanne, EPFL, 1991.
- [2.21] D. Orzan, Couplage externe et interne entre un champ électromagnétique et un réseau de lignes multifilaires, Thèse de docteur es sciences techniques, Lausanne, EPFL, 1998.
- [2.22] Electric Power Research Institute, *Transmission Line Reference Book, 345 kV and Above*, Second Edition, Palo Alto, California, 1982.
- [2.23] B. Noblat, *La foudre et les installations électriques HT*, Cahier Technique n° 168, Schneider-electric, édition juillet 1993.
- [2.24] A. Greenwood, *Electrical transients in power systems*, New York: Wiley & sons, Inc, first edition, 1971.

- [2.25] A. Greenwood, *Electrical transients in power systems*, New York: Wiley & sons, Inc, second edition, 1991.
- [2.26] ANSI/IEEE Std C62.2, IEEE Guide for the Application of Gapped Silicon-Carbide Surge Arresters for Alternating-Current Systems, 1987.
- [2.27] IEEE Std C62.1, IEEE Standard for Gapped Silicon-Carbide Surge Arresters for AC power circuits, 1989.
- [2.28] E.C. Sakshaug, *A brief history of AC surge arresters*, IEEE Power Engineering Review, Vol. 11, Issue. 8, pp 11 – 13, 1991.

Chapitre 3
Modélisation des parafoudres
ZnO soumis à des contraintes
transitoires rapides

Chapitre 3

Modélisation des parafoudres ZnO soumis à des contraintes transitoires rapides

3.1 Introduction.

Les parafoudres à oxyde métallique protègent l'isolation des équipements dans les systèmes électriques contre les surtensions internes et externes. En fonctionnement normal, l'appareil conduit un très faible courant si non aucun. Par contre en régime de surtension il fait circuler vers la terre un fort courant sans pour autant causer de défauts.

A partir de là, le parafoudre doit montrer une résistance extrêmement élevée en fonctionnement normal et une très faible résistance durant les surtensions transitoires. Par suite, la caractéristique V-I de l'appareil doit être non-linéaire [3.1 — 3.14]. La forte non-linéarité de la caractéristique V-I à pour effet d'éliminer la nécessité des éclateurs séries et les caractéristiques électriques sont exclusivement déterminées par les propriétés des blocks à oxyde métallique. Les parafoudres à oxydes métalliques avec éclateurs sont toujours fabriqués par plusieurs constructeurs pour des applications moyenne tension.

Un autre comportement de ces appareils a été observé. En effet, l'analyse des données collectées sur les caractéristiques des parafoudres à oxyde métallique et les travaux menés par des groupes de recherche à travers le monde indiquent que les parafoudres à oxyde métallique ont aussi des caractéristiques dynamiques qui dépendent de la fréquence et qui sont très importants lorsqu'il s'agit des études de foudre ou d'autres ondes à front rapide [3.15 — 3.23]. Pour des contraintes à front rapides, ceux pour des temps de montée inférieur à $8\mu\text{s}$, la tension de

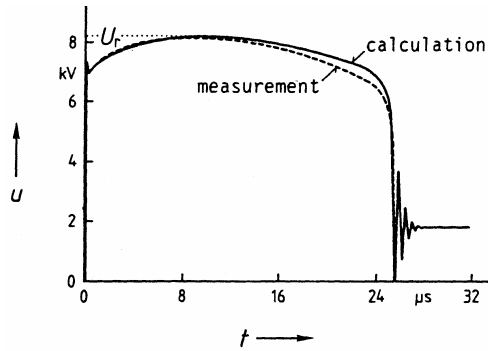
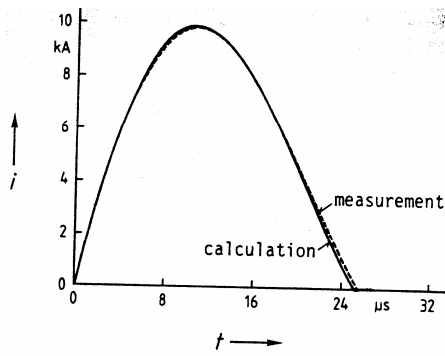
décharge du parafoudre atteint son maximum avant que le courant de décharge du parafoudre atteigne le sien et la tension de décharge du parafoudre à oxyde métallique augmente, lorsque le temps de front du courant de décharge diminue. Cette augmentation de la tension résiduelle peut atteindre 6% quand le temps de montée est réduit de $8\mu\text{s}$ à $1,3\mu\text{s}$ [3.21 — 3.30]. Ce ne serait pas le cas si le parafoudre est représenté par une simple résistance non-linéaire.

Dans la figure 3.1 on montre des mesures expérimentales réalisées par différents chercheurs de part le monde dans le but de quantifier la réponse des varistances ZnO.

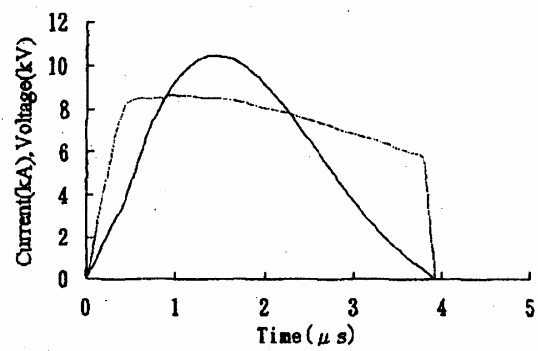
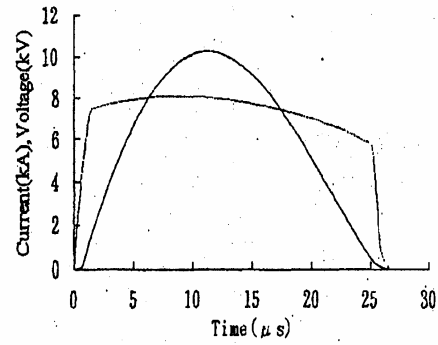
La modélisation des parafoudres à oxyde métallique est nécessaire pour plusieurs raisons et un progrès considérable dans ce domaine a été fait. Il est très difficile de construire un modèle général des parafoudres ZnO dans lequel on prend en compte tous les facteurs tel que la pollution, les processus thermiques, la réponse aux contraintes rapides et harmoniques. Cependant la construction d'un modèle limité pour un but spécial seulement semble une très bonne idée. Dans la suite de ce chapitre, nous présenterons les nombreux modèles (circuits équivalents) proposés dans la littérature pour décrire ces phénomènes dynamiques en faisant une étude comparative de quelques modèles. L'ATP-EMTP [3.32, 3.33] est utilisé pour cette investigation.

3.2 Modèle conventionnel ou à résistance non-linéaire.

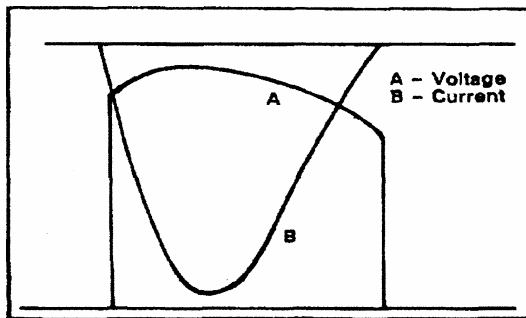
Un des objectifs de l'étude transitoire est d'évaluer les performances des parafoudres à oxyde métallique durant les surtensions temporaires et les surtensions de manœuvre sur le système. Un modèle du parafoudre à oxyde métallique convenable pour ces études pourra être une résistance non-linéaire.



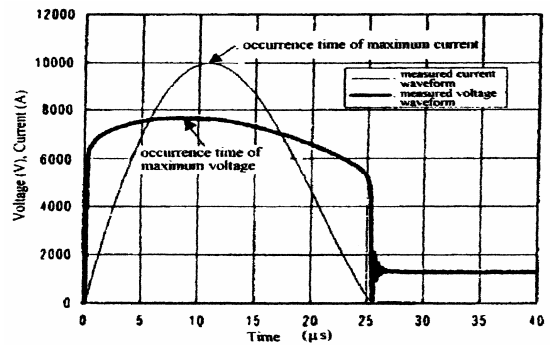
a) Référence [3.15].



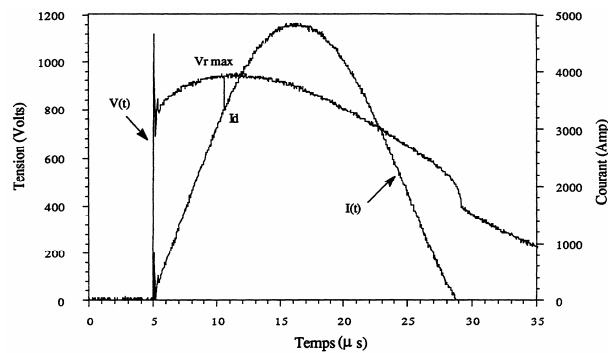
b) Référence [3.21] 8/20 μs et 1/2 μs



c) Référence [3.16]



d) Référence [3.22]



e) Référence [3.29]

Fig. 3.1 Tension résiduelle maximale et courant maximal correspondant.

Une résistance non-linéaire (figure 3.2) n'a pas les mêmes formes de tension et de courant quand elle fonctionne dans le domaine non-linéaire. Plusieurs types de modèles sont disponibles dans le programme EMTP (l'Annexe A donne plus de détails sur ce logiciel), mais on préfère généralement utiliser la résistance non-linéaire dont la variation est exponentielle (type 92, 5555) [3.13, 3.32, 3.33].

Dans ce modèle la caractéristique V-I est représentée par un nombre arbitraire de segments exponentiels dont l'équation de chaque segment est défini par:

$$i = p \left(\frac{v}{V_{ref}} \right)^q \quad (3.1)$$

Dans cette équation:

i : est le courant du parafoudre en (A) ou (kA);

v : est la tension aux bornes du parafoudre en (V) ou (kV);

p , q et V_{ref} sont des constantes propres de l'appareil.

Nous notons que V_{ref} est la tension de référence peut être choisie arbitrairement et a pour fonction de normaliser l'équation (3.1) et prévient les débordements numériques pendant l'exponentiation. Les paramètres p et q sont uniques pour l'appareil. Le premier segment de l'appareil est linéaire, ce qui nous permet d'une part d'éviter les problèmes numériques possibles et d'autre part d'augmenter la vitesse de simulation [3.32, 3.33].

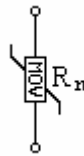


Fig. 3.2 *Modèle à résistance non-linéaire.*

Pour utiliser le modèle EMTP (type-92, 5555) on devrait avoir les données suivantes:

- les caractéristiques nominales de fonctionnement;
- les courbes de la caractéristique V-I des constructeurs.

Ces données peuvent être obtenues des catalogues des différents constructeurs de parafoudres [3.34, 3.35]. Les constructeurs testent chaque parafoudre par un courant impulsionnel et enregistrent une tension de référence. La tension résiduelle obtenue pour un courant de décharge de 10kA en onde (8/20 μ s) est utilisée comme une tension de base V_{10} . L'étape suivante est de sélectionner V_{ref} , le nombre de colonnes et la caractéristique V-I en unité relative (pu).

3.3 Modèle proposé par Tominaga et al.

Dans la référence [3.16] Tominaga et al ont proposé un modèle simple (figure 3.3). La caractéristique dynamique est introduite similairement à l'effet d'hystérésis à travers l'ajout d'une inductance série L . La valeur de cette inductance peut être estimée une fois que le courant du parafoudre est approximativement connu en utilisant de la méthode Essai-Erreur. Cette approche a une certaine mérite parce que la tension à travers l'inductance et donc à travers le parafoudre augmente lorsque le temps à la crête du courant diminue. Ce type de modèle avait certains succès pour un test particulier [3.22]. Par exemple, une inductance peut être choisie pour un modèle, de telle manière, qu'elle reproduit raisonnablement l'amplitude et la forme d'onde de la tension avec un courant de décharge du parafoudre qui arrive à sa crête en 8 μ s.

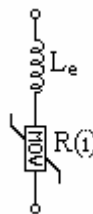


Fig. 3.3 *Modèle à inductance linéaire [3.16].*

Cependant, lorsque cette même inductance est utilisée, toute chose égale par ailleurs, pour un courant de décharge d'un parafoudre qui arrive à sa crête en $1\mu\text{s}$, une erreur considérable de l'amplitude de la tension est enregistrée. Ce qui, nous oblige à effectuer un nouveau choix de paramètres pour obtenir les résultats voulus pour ce temps de front.

3.4 Modèle proposé par W. Breilmann.

En 1987 Breilman [3.15] propose un modèle de parafoudre pour les études en présence de contraintes transitoires rapides (figure 3.4). Dans ce modèle, la résistance non-linéaire totale est divisée en trois résistances non-linéaires A_0 , A_1 et A_2 qui peuvent être dérivées à partir des caractéristiques statiques V-I et calculé par des formules. Ces résistances sont séparées par des filtres passe bas. Les paramètres R_1 , R_2 , L_1 , L_2 , et L_0 sont proportionnels à la hauteur du parafoudre et déterminées par des formules empiriques. Les autres paramètres R_0 , C_p et Z sont utilisés seulement pour but de stabiliser la procédure d'intégration numérique. Les résultats en utilisant le modèle de parafoudre montrent une parfaite adéquation avec les résultats expérimentaux et seulement une erreur de 4% a été enregistrée. Cette erreur est attribuée à la complexité du modèle EMTP du générateur d'impulsion à 4 étages.

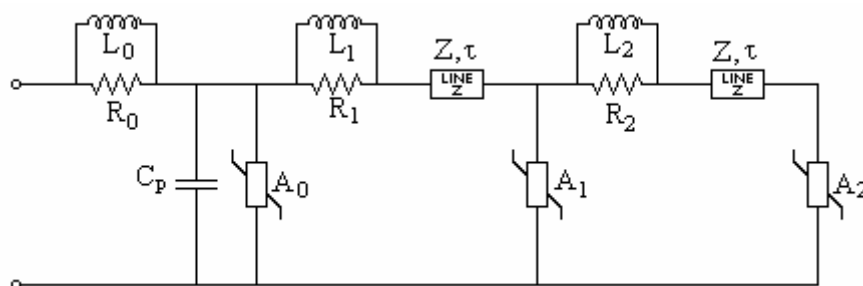


Fig. 3.4 *Modèle proposé dans [3.15].*

3.5 Modèle proposé par Schmidt et al.

Basé sur leurs résultats expérimentaux, les auteurs ont développé un modèle pour un élément de parafoudre montré dans la figure 3.5. Comme mentionné par les auteurs [3.17], Ce circuit est capable de décrire le phénomène observé.

L'élément "TURN-ON" A dans le circuit équivalent est évalué à partir des résultats de mesure. Les autres paramètres ont été évalués à partir de mesures indépendantes ou encore à partir des résultats décrits dans la littérature. Les éléments R et L sont attribués aux grains ZnO, alors que les autres éléments sont relatifs aux joints de grains. La résistance non-linéaire représente l'effet non-linéaire aux joints de grains et la résistance linéaire représente les grains ZnO. Un élément "TURN-ON" A, qui reflète la distribution de la charge dynamique aux joints de grains. Son comportement dynamique dépend de la forme d'onde de la tension $\left(\frac{dU}{dt}, U\right)$ et d'une constante de temps " τ " pour atteindre l'équilibre électron-trou dans les joints de grains.

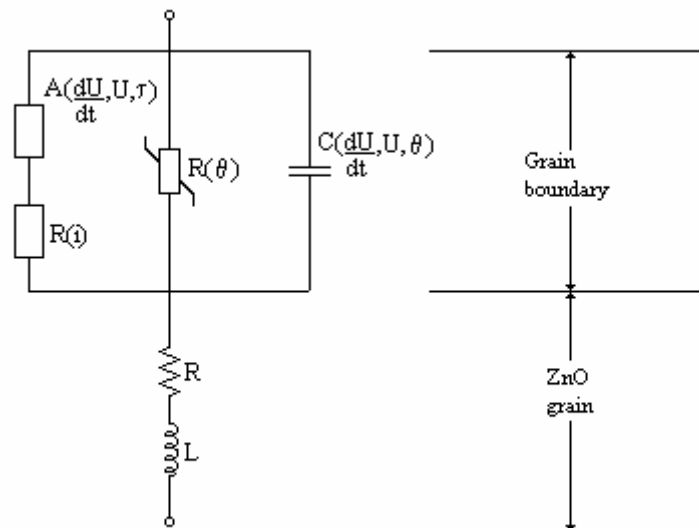


Fig. 3.5 Modèle proposé dans [3.17].

En supposant une inductance de $1\mu\text{H/m}$ de hauteur, La simulation du modèle résulte en un parfait accord avec les résultats expérimentaux en dépit de l'utilisation des données d'autres chercheurs dans la détermination des paramètres du circuit.

3.6 Modèle proposé par Ozawa et al.

Dans la référence [3.18], les auteurs ont développé un modèle pour un parafoudre à oxyde métallique (figure 3.6) basé sur des caractéristiques V-t qu'ils mesurent. Dans ce modèle, NR représente la caractéristique tension-courant non-linéaire pour le courant nominal. Le circuit parallèle R_1 , L_1 représente le retard de conduction observé dans le comportement du parafoudre. La capacitance C_1 et l'inductance L_2 désignent la capacitance propre et l'inductance résiduelle des éléments de parafoudre à oxyde métallique.

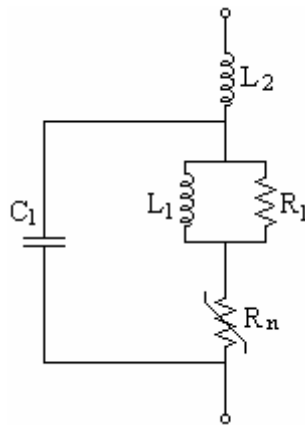


Fig. 3.6 *Modèle proposé dans [3.18].*

Les résultats de simulation en utilisant ce modèle montrent une bonne concordance avec les résultats expérimentaux menés par les auteurs. Ce modèle a été ensuite utilisé dans l'analyse transitoire des surtensions.

3.7 Modèle recommandé par le groupe IEEE.

Un modèle [3.22] qui peut reproduire le comportement dynamique du parafoudre à oxyde métallique est montré dans la figure 3.7. Dans ce modèle, la caractéristique non-linéaire (V-I) du parafoudre est présentée avec deux sections non-linéaires séparées par un filtre R-L. Pour les contraintes lentes, l'impédance du filtre R-L est extrêmement faible qui conduira à considérer que les résistances du modèle sont pratiquement connectées en parallèle. Par contre pour les ondes très rapides l'impédance du filtre R-L devient plus importante. Et de ce fait les courants à haute fréquence sont forcés par le filtre R-L à circuler plus dans la section désignée par A_0 plutôt que dans la section désignée par A_1 . Du moment que la caractéristique A_0 possède une tension plus élevée pour un courant donné par rapport à A_1 , le résultat est que le modèle du parafoudre génère une tension plus élevée.

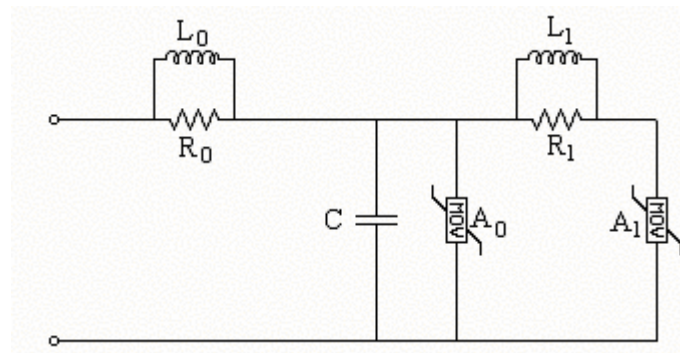


Fig. 3.7 *Modèle proposé dans [3.22].*

L'inductance L_0 dans le modèle représente l'inductance associée avec le champ magnétique dans le voisinage immédiat du parafoudre.

La résistance R_0 est utilisée pour se stabiliser l'intégration numérique quand le modèle sera implanté dans un programme de calcul numérique.

La capacité C représente la capacitance externe associée avec la hauteur du parafoudre.

3.8 Modèle proposé par Kim et al.

Le modèle à inductance non-linéaire des parafoudres ZnO proposé [3.23] est montré dans la figure 3.8. Il se compose d'une inductance non-linéaire en série avec une résistance non-linéaire. Comme mentionné par les auteurs ce modèle fournit une bonne caractéristique de réponse aux ondes impulsionnelles à front rapide.

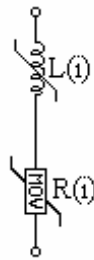


Fig. 3.8 *Modèle à inductance non-linéaire* [3.23].

Ce modèle nécessite un programme informatique pour calculer la caractéristique de l'inductance non-linéaire et relativement un grand nombre de points courant-tension qui ne sont pas toujours disponibles dans les catalogues des constructeurs.

3.9 Modèle proposé par T. Hagiwara et al.

Ce modèle [3.24] est montré dans la figure 3.9. Il se compose d'une inductance linéaire L_r représentant l'épaisseur de la varistance ($1\mu\text{H/m}$) en série avec une résistance non-linéaire R_n simulant la caractéristique V-I statique de la varistance, le tout en série avec une source de tension V_n qui a pour objectif de représenter la caractéristique d'une différence de tension entre les formes 8/20 μs et 1/2,5 μs . Cette différence peut prendre une forme exponentielle.

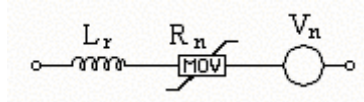


Fig. 3.9 *Modèle proposé par Hagiwara et al [3.24].*

Les résultats du modèle ont été comparés aux résultats expérimentaux menés par les auteurs et une bonne concordance est obtenue.

3.10 Modèle proposé par Haddad et al.

Le circuit équivalent proposé [3.25] est montré dans la figure 3.10. Il se compose de deux sections en série; une pour représenter la résistance des grains d'oxyde de zinc (R_{grain}) et l'inductance propre (L_{body}) due à la taille physique du parafoudre et un réseau parallèle pour représenter les propriétés des couches inter-granulaires. Une branche du réseau laisse passer le courant de décharge de forte amplitude, de telle manière que la branche a une résistance fortement non-linéaire R_{lg} et une faible inductance L_{c1} . La seconde branche se compose d'une résistance linéaire R_c et une inductance de valeur plus élevée L_{c2} pour tenir compte du retard des fronts de courant et le concept du courant à chemins multiples. Un élément capacitif C_{lg} pour représenter la capacitance shunt du parafoudre a été aussi introduit dans le circuit équivalent. La simulation du modèle résulte en une excellente concordance avec l'expérience conduite au laboratoire mais la détermination des paramètres du modèle est réalisée expérimentalement laquelle est parfois difficile à accomplir.

3.11 Modèle proposé par Pinceti et al.

Le modèle présenté par les auteurs dérive du modèle IEEE de la section 3.6 avec des différences mineures [3.27]. Ce modèle est montré dans la figure 3.11.

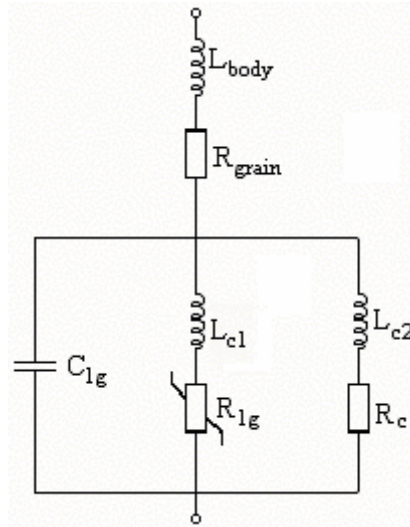


Fig. 3.10 *Modèle proposé dans [3.25].*

- la capacitance est éliminée en raison du faible effet sur le comportement du modèle.
- les deux résistances en parallèle avec les inductances sont remplacées par une résistance R de $1\text{M}\Omega$ environ entre les bornes d'entrée du modèle; cette résistance est seulement utilisée dans le but d'éviter les troubles numériques. Le principe de fonctionnement et sensiblement similaire à celui du modèle IEEE.

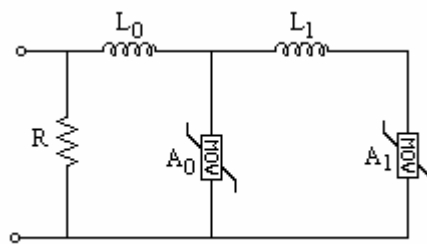


Fig. 3.11 *Modèle proposé dans [3.27].*

Une amélioration du modèle pour être applicable pour les parafoudres ayant des tensions assignées comprises entre 3 et 36kV a été réalisée dans [3.30].

3.12 Modèle proposé par Fernandez et al.

Le modèle proposé [3.28] est montré dans la figure 3.12 et dérive lui aussi de celui de la référence [3.22]. Il est projeté pour la simulation des caractéristiques dynamiques pour des courants de décharge avec des temps de front inférieur à $8\mu\text{s}$. Entre les résistances non-linéaires A_0 et A_1 seulement une inductance L_1 est prise en considération. R_0 et L_0 sont négligées. C représente la capacitance entre les bornes du parafoudre. La résistance R en parallèle avec A_0 est utilisée pour éviter les oscillations numériques. Le modèle fonctionne essentiellement de la même manière que celui décrit dans la référence [3.22].

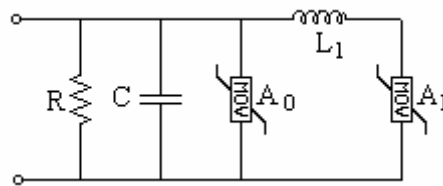


Fig. 3.12 *Modèle proposé dans [3.28].*

3.13 Implémentation des modèles.

Quelques modèles présentés dans les sections précédentes ont été implantés dans l'EMTP [3.32, 3.33]. Ces circuits nous permettent de simuler le comportement de chaque modèle de parafoudre avec différents courants impulsionnels. Dans cette étude les simulations considérées concernent les tests généralement publiés dans les catalogues des constructeurs. Il s'agit des courants impulsionnels rapides (onde $1/2\mu\text{s}$), des courants impulsionnels type manœuvre ($45/135\mu\text{s}$) et les courants impulsionnels type foudre (onde $8/20\mu\text{s}$) avec des amplitudes comprises entre 0.5 kA et 40 kA.

Les modèles sont construits pour des parafoudres Tranquell ayant différentes tensions assignées, 3 kV, 30 kV, 90 kV et 144kV. Les hauteurs respectives de ces parafoudres sont: 0,485m, 0,714m, 1,285m et 2,098m. Les autres données techniques sont reportées dans le tableau 3.1.

Tension assignée (kV)	1/2μs	8/20μs						45/90μs
	10kA	1.5 kA	3 kA	5 kA	10 kA	20 kA	40 kA	0.5 kA
3	9,1	6,9	7,2	7,5	8,0	9,0	10,3	6,3
30	84,9	64,3	67,4	70,3	75,1	84,2	96,5	58,7
90	236,0	185,0	195,0	202,0	214,0	237,0	266,0	169,0
144	368,0	287,0	303,0	314,0	232,0	369,0	413,0	271,0

Tab. 3.1 Caractéristiques techniques des parafoudres GE-TRANQUELL [3.34].

3.14 Résultats de Simulation.

Le logiciel ATP, (Alternative Transients Program) a été utilisé pour cette investigation. On injecte dans chacun des modèle réalisés un courant impulsionnel de même amplitude et de même forme d'onde que celui donné dans les catalogues et on enregistre ensuite les valeurs maximales des tensions résiduelles et les temps à la crête de chaque modèle. Les résultats obtenus pour les courants de formes d'onde 1/2 μs, 45/135μs et 8/20μs sont présentés dans les tableaux 3.2 à 3.5 pour les différentes tensions assignées choisies.

L'erreur relative ε_r en % est calculée selon:

$$\varepsilon_r = \frac{V_{rsim} - V_{rman}}{V_{rman}} \times 100 \quad (3.2)$$

Où

V_{rsim} : est la tension résiduelle simulée;

V_{rman} : est la tension résiduelle expérimentale du constructeur.

Pour un courant à front rapide (10kA en onde 1/2 μ s), les résultats obtenus pour le modèle conventionnel montrent que d'une part la tension résiduelle et le courant de décharge atteignent leurs maximums en même temps et de l'autre part des courants ayant une même amplitude et une forme d'onde différente produiront une même tension résiduelle maximale. Par suite, Le comportement dynamique n'est pas du tout reproduit. Cela peut être expliqué par le fait que ce modèle est construit seulement par une résistance non-linéaire. Au contraire, pour les autres modèles la tension résiduelle atteint sa valeur maximale avant que le courant de décharge atteigne la sienne. Les retards enregistrés sont autour de 0.5 μ s pour le modèle IEEE, autour de 0.4 μ s pour le modèle de Pinceti et le modèle de Fernandez respectivement. Pour les tests expérimentaux réalisés par les constructeurs et dans le cas des contraintes rapides le retard enregistré est de 0.5 μ s, et par suite les résultats de simulation sont satisfaisants en comparaison avec les données des constructeurs. De plus la tension résiduelle augmente pour un courant a front rapide par rapport a celle obtenu pour un courant type foudre. Les amplitudes enregistrées pour les modèles conventionnel, IEEE et le modèle Fernandez produisent des erreurs relativement importantes, jusqu'à 12,2% pour le premier, 10% pour le second et 8,5% pour le dernier alors que cette erreur ne dépasse pas les 4% pour le modèle proposé par Pinceti comme montré dans les tableaux 3.2 à 3.5.

A titre d'exemple des formes d'onde obtenus, nous présentons dans la figure 3.13.a les résultats de simulation d'un parafoudre 3kV, pour une impulsion de courant d'amplitude 10 kA et de forme d'onde 1/2 μ s.

De même nous présentons dans la figure 3.13.b les résultats d'un parafoudre 144kV obtenus pour le même courant injecté.

Parafoudre 3kV								
Type d'onde, μs	1/2	45/135	8/20					
Modèle \ I (kA)	10	0.5	1.5	3	5	10	20	40
Constructeur	9,10	6,30	6,90	7,20	7,50	8,00	9,00	10,30
Conv	V _{res} [kV]	8,00	6,38	6,89	7,22	7,49	8,00	10,27
	T ₁ [μs]	1,00	45,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
	Erreur [%]	12,09	1,27	0,14	0,28	0,13	0,00	0,29
IEEE	V _{res} [kV]	10,04	6,30	6,87	7,32	7,55	8,00	9,75
	T ₁ [μs]	0,36	44,60	7,60	5,30	4,40	4,00	3,60
	Erreur [%]	10,33	0,00	0,43	1,67	0,67	0,00	2,78
Pinceti	V _{res} [kV]	9,25	6,73	7,09	7,39	7,67	8,11	9,58
	T ₁ [μs]	0,40	44,50	7,45	6,95	6,65	5,47	5,36
	Erreur [%]	1,65	6,83	2,75	2,64	2,27	1,37	2,78
Fernandez	V _{res} [kV]	9,03	6,38	6,89	7,23	7,49	8,02	10,39
	T ₁ [μs]	0,40	44,90	7,73	7,45	7,08	6,65	5,82
	Erreur [%]	0,77	1,27	0,14	0,42	0,13	0,25	0,89

Tab. 3.2 Résultats de simulation pour un parafoudre 3kV GE TRANQUELL.

Parafoudre 30kV								
Type d'onde, μs	1/2	45/135	8/20					
Modèle \ I (kA)	10	0.5	1.5	3	5	10	20	40
Constructeur	84,90	58,70	64,30	67,40	70,30	75,10	84,20	96,50
Conv	V _{res} [kV]	75,10	59,20	64,21	67,59	70,19	75,10	84,81
	T ₁ [μs]	1,00	45,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
	Erreur [%]	11,54	0,85	0,14	0,28	0,16	0,00	0,72
IEEE	V _{res} [kV]	86,32	58,82	63,74	68,78	71,13	75,25	81,81
	T ₁ [μs]	0,52	43,10	7,70	5,40	4,50	4,00	4,05
	Erreur [%]	1,67	0,20	0,87	2,05	1,18	0,20	2,84
Pinceti	V _{res} [kV]	87,16	62,21	66,56	69,30	72,03	76,18	82,23
	T ₁ [μs]	0,40	44,90	7,43	6,83	6,57	5,42	5,30
	Erreur [%]	2,66	5,98	3,51	2,82	2,46	1,44	2,34
Fernandez	V _{res} [kV]	91,91	59,20	64,22	67,63	70,39	75,49	85,53
	T ₁ [μs]	0,38	44,90	7,60	7,19	6,22	5,95	6,09
	Erreur [%]	8,26	0,85	0,12	0,34	0,13	0,52	1,58

Tab. 3.3 Résultats de simulation pour un parafoudre 30kV GE TRANQUELL.

Parafoudre 90kV								
Type d'onde, μ s	1/2	45/135	8/20					
I (kA)	10	0.5	1.5	3	5	10	20	40
Modèle								
Constructeur	236	169,0	185,0	195,0	202,0	214,0	237,0	266,0
Conv	V_{res} [kV]	213,64	169,97	184,84	194,9	202,6	213,6	238,1
	T_1 [μ s]	1,00	45,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
	Erreur [%]	9,47	0,57	0,09	0,06	0,31	0,17	0,21
IEEE	V_{res} [kV]	246,36	166,26	178,26	188,7	197,5	212,9	233,8
	T_1 [μ s]	0,56	41,40	7,18	6,35	5,44	4,42	4,25
	Erreur [%]	4,39	1,62	3,64	3,21	2,20	0,52	1,33
Pinc	V_{res} [kV]	243,83	180,11	189,68	197,4	205,1	216,6	233,3
	T_1 [μ s]	0,42	44,80	7,53	7,04	6,82	5,76	5,60
	Erreur [%]	3,32	6,57	2,53	1,24	1,55	1,21	1,54
Fern	V_{res} [kV]	256,08	169,97	184,86	195,0	202,9	214,7	239,9
	T_1 [μ s]	0,39	44,90	7,67	7,34	6,88	5,77	6,05
	Erreur [%]	8,51	0,57	0,08	0,02	0,43	0,35	1,22

Tab. 3.4 Résultats de simulation pour un parafoudre 90kV GE TRANQUELL.

Parafoudre 144kV								
Type d'onde, μ s	1/2	45/135	8/20					
I (kA)	10	0.5	1.5	3	5	10	20	40
Modèle								
Constructeur	368,0	271,0	287,0	303,0	314,0	332,0	369,0	413,0
Conv	V_{res} [kV]	331,7	278,3	287,0	302,6	314,6	331,7	369,9
	T_1 [μ s]	1,00	45,0	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
	Erreur [%]	9,85	2,68	0,00	0,13	0,20	0,08	0,23
IEEE	V_{res} [kV]	379,1	271,0	285,7	304,0	314,3	332,1	360,6
	T_1 [μ s]	0,57	43,44	7,55	5,53	4,63	4,07	4,09
	Erreur [%]	3,02	0,00	0,45	0,33	0,09	0,04	2,29
Pince	V_{res} [kV]	381,0	287,6	294,3	306,3	318,3	336,3	362,5
	T_1 [μ s]	0,40	44,50	7,49	6,96	6,74	5,64	5,48
	Erreur [%]	3,54	6,12	2,55	1,09	1,38	1,28	1,75
Ferna	V_{res} [kV]	399,1	278,3	287,0	302,7	315,0	333,5	372,8
	T_1 [μ s]	0,39	44,78	7,66	7,32	6,85	5,73	6,02
	Erreur [%]	8,44	2,68	0,01	0,09	0,33	0,46	1,04

Tab. 3.5 Résultats de simulation pour un parafoudre 144kV GE TRANQUELL.

On montre aussi dans les figures 3.15 et 3.16 les courbes dynamiques d'hystérésis associées avec les modèles étudiés. Il est clair que l'aire du cycle d'hystérésis est pratiquement négligeable dans le cas du modèle conventionnel conduisant à confirmer l'absence du comportement dynamique. Au contraire quand on examine les courbes dynamiques d'hystérésis associées avec les modèles IEEE, Pinceti et Fernandez, on peut facilement voir que ce cycle d'hystérésis est très important. Cela confirme bien le retard observé entre la tension résiduelle et le courant de décharge.

Pour un courant type foudre (onde 8/20 μ s) de différentes amplitude, les résultats de simulation obtenus montrent que tous les modèles produisent des erreurs acceptables entre 0.00% to 5% à l'exception de quelques tests avec un courant impulsionnel 40kA sur les modèles IEEE et Pinceti où on a enregistrées des erreurs importantes (tableaux 3.2 à 3.5). A titre d'exemple des formes d'onde obtenus, nous présentons dans la figure 3.14.a les résultats de simulation d'un parafoudre 3kV, pour une impulsion de courant d'amplitude 10 kA et de forme d'onde 8/20 μ s. De même nous présentons dans la figure 3.14.b. Les courbes d'hystérésis associées avec les modèles IEEE, Pinceti et Fernandez présentées dans les figures 3.15 et 3.16 montrent que l'aire du cycle d'hystérésis dans ce cas est relativement petite comparée avec le cas des impulsions de courant rapides, ce qui est en parfait accord avec le retard de conduction observé dans la figure 3.14.a et la figure 3.14.b.

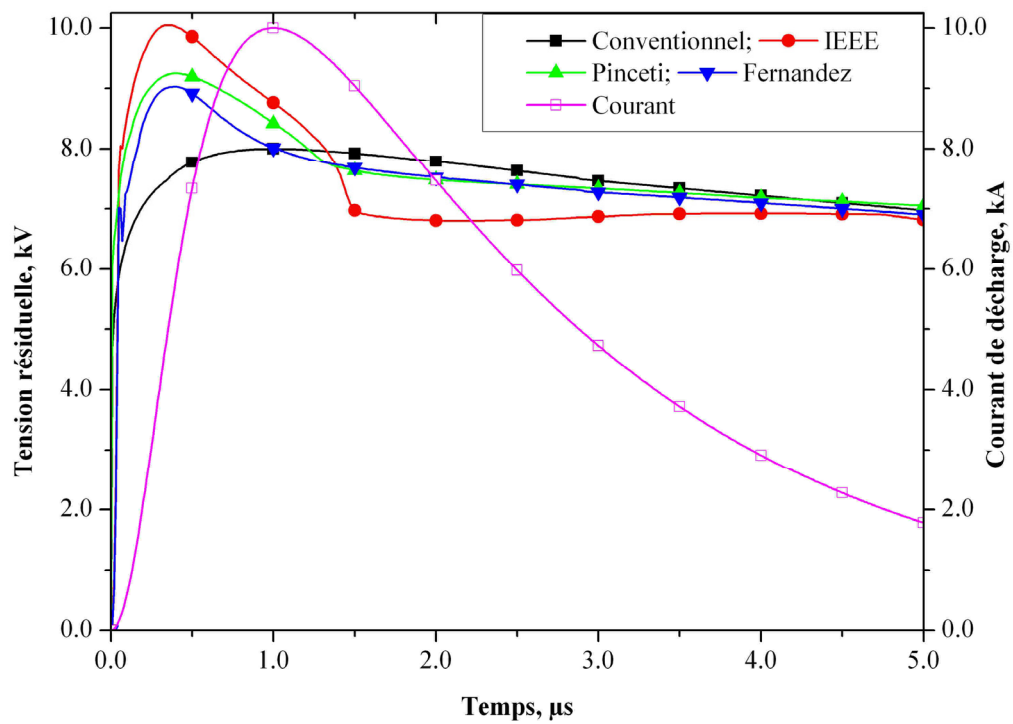


Fig. 3.13 (a) Réponse d'un parafoudre 3kV à une onde 10kA, 1/2 μ s.

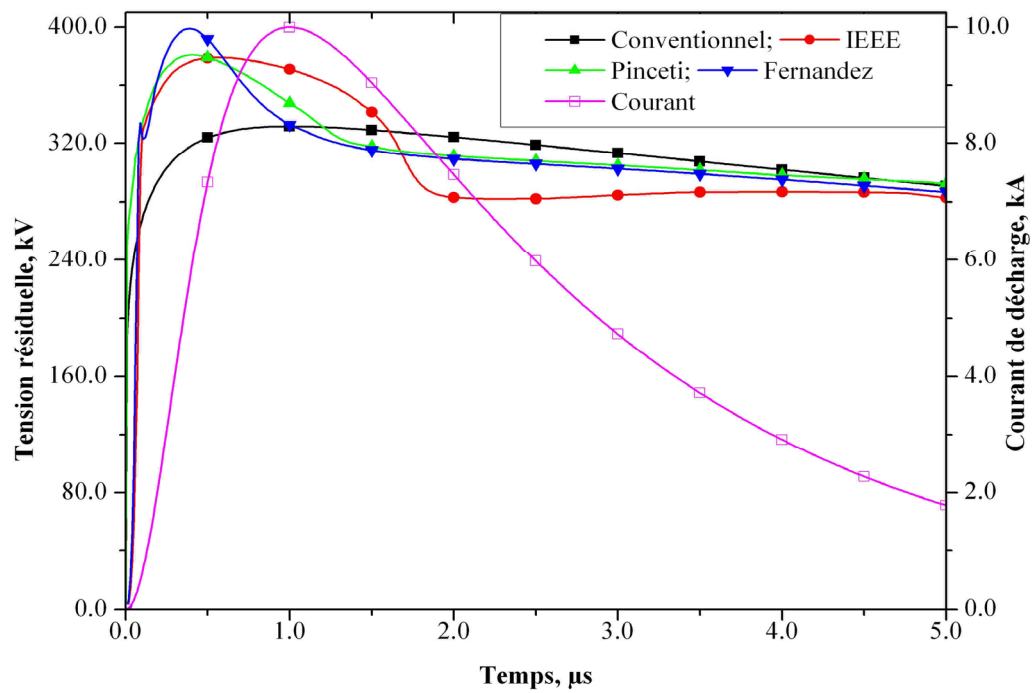


Fig. 3.13 (b) Réponse d'un parafoudre 144kV à une onde 10kA, 1/2 μ s.

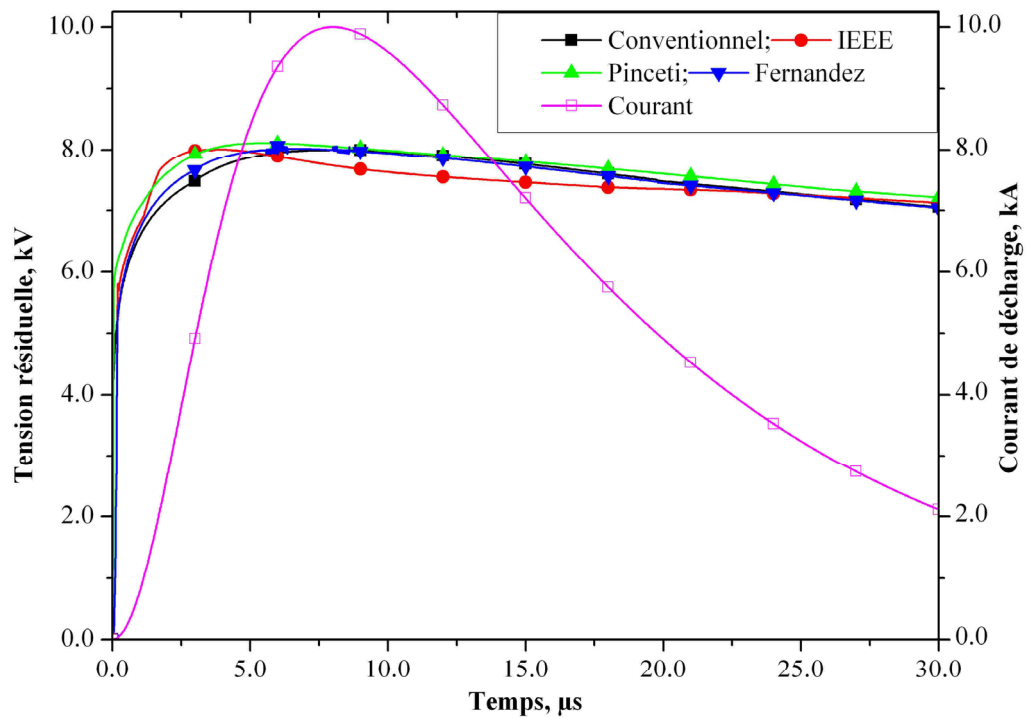


Fig. 3.14 (a) Réponse d'un parafoudre 3kV à une onde 10kA, 8/20 μ s.

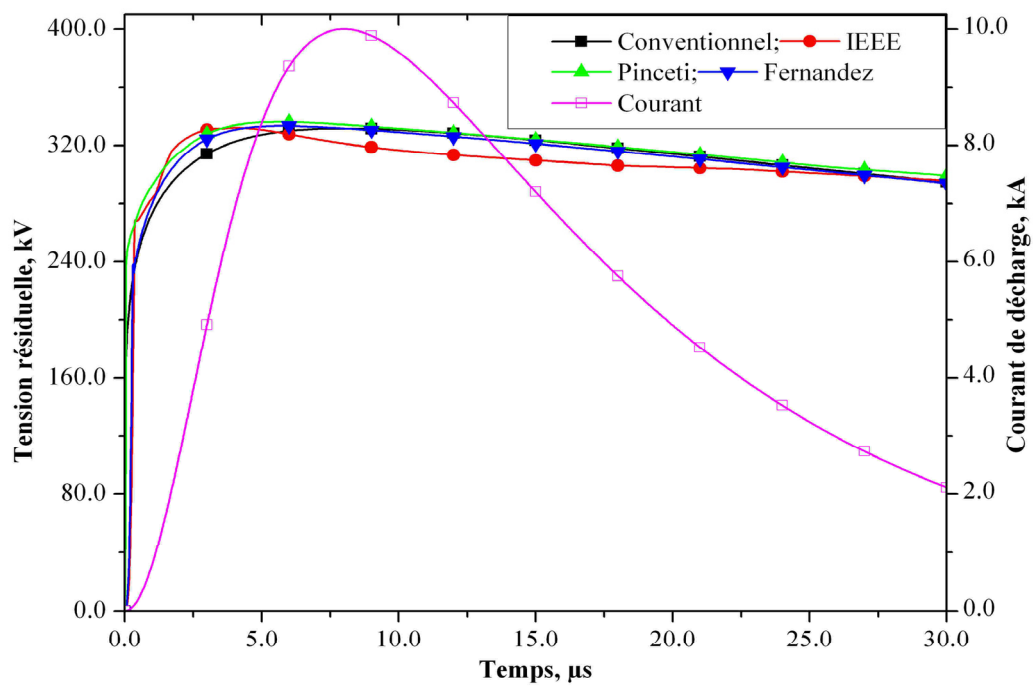


Fig. 3.14 (b) Réponse d'un parafoudre 144kV à une onde 10kA, 8/20 μ s.

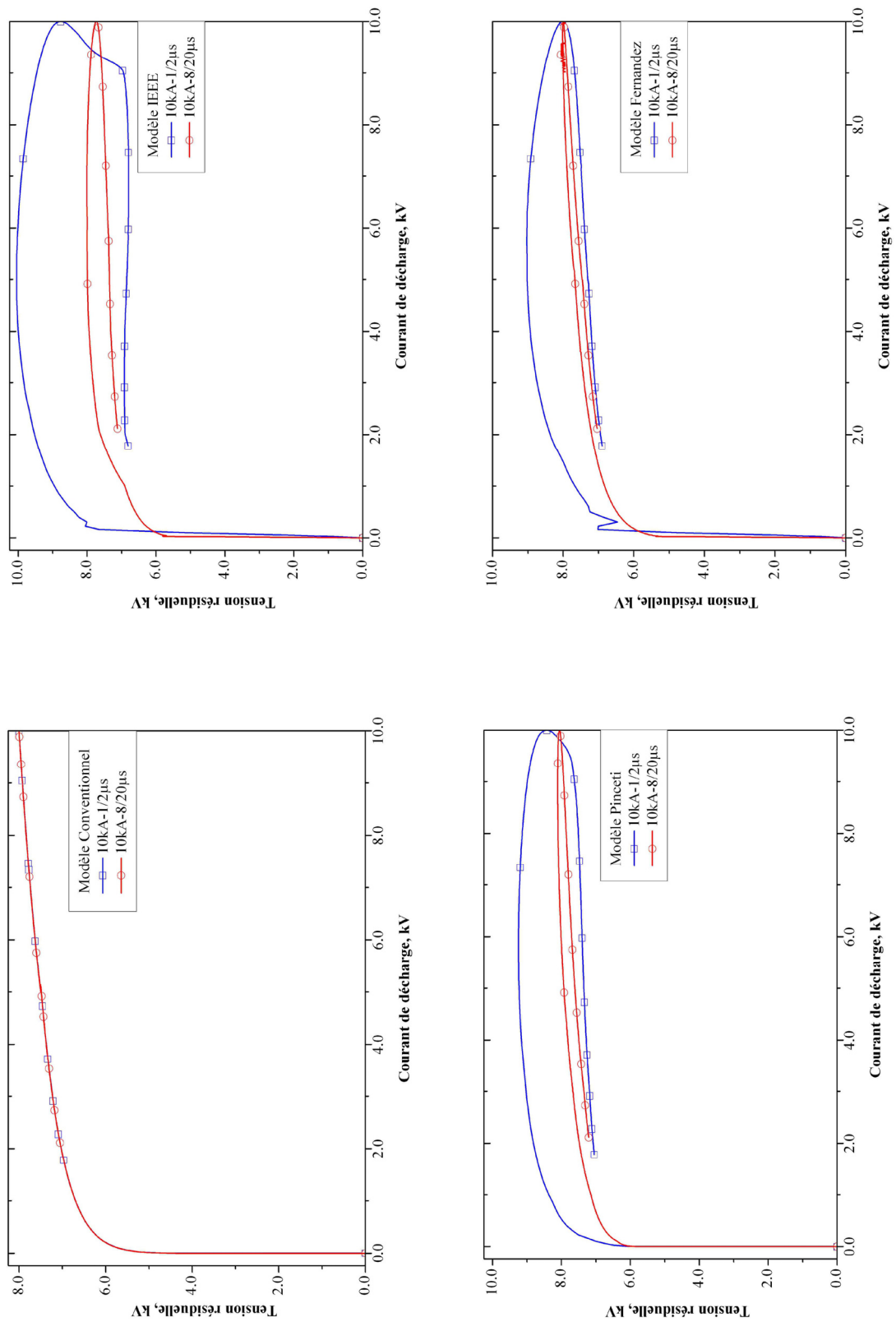


Fig. 3.15 Comportement dynamique des modèles pour un parafoudre 3kV.

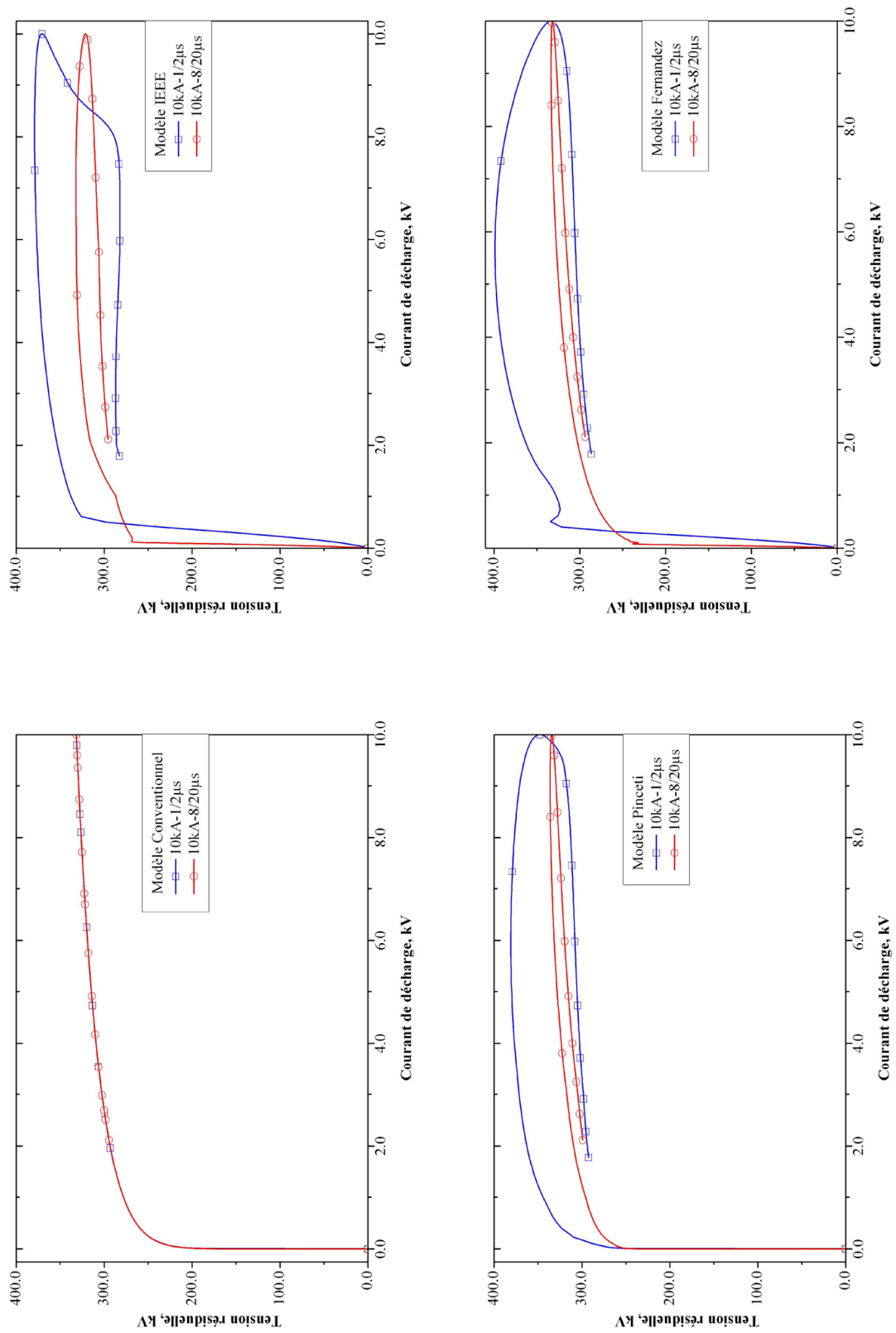


Fig. 3.16 Comportement dynamique des modèles pour un parafoudre 144kV.

3.15 Conclusions

Dans ce chapitre, la simulation du comportement dynamique des modèles des parafoudres à oxyde métallique soumis à des tests impulsionnels rapides a été faite. Les simulations ont été réalisées avec l'ATP "Alternative Transient Program" version de l'EMTP "Electromagnetic transients program". Les résultats obtenus comparés aux données reportées sur les catalogues des constructeurs ont été présentés pour démontrer l'exactitude des modèles des parafoudres ZnO. Il est montré que les modèles dynamiques proposés dans la littérature reproduisent d'une manière acceptable les tensions résiduelles maximales des constructeurs pour des courants et présentent une erreur relativement élevée pour d'autres. Cela est attribué aux méthodes utilisées pour la détermination des paramètres des modèles dynamiques et les incertitudes qui peuvent être importantes et par suite influera sur la réponse de ces modèles. Concernant l'occurrence du maximum de l'onde de tension avant celui du courant, le modèle conventionnel est le seul modèle qui ne peut pas reproduire cet effet et les deux maximums ont lieu en même temps. Les autres modèles sont en parfait accord avec le catalogue du constructeur.

3.16 Références.

- [3.1] L. Stenström et al, *Design and testing of polymer housed surge arrester*, GCC CIGRÉ, 9th Symposium, Abu Dhabi, October 1998.
- [3.2] IEEE Std C62.22, *IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems*, 1991.
- [3.3] IEEE Std C62.22, *IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems*, 1997.

- [3.4] IEEE Std C62.11, *IEEE Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current power circuits*, 1993.
- [3.5] IEEE Std C62.11, *IEEE Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current power circuits (>1kV)*, 1999.
- [3.6] BS EN 60099-1, IEC 60099-1(1991), incorporating amendment n°1 *Surge arresters — Part 1: Non-linear resistor type gapped surge arresters for a.c. systems*, 1994.
- [3.7] BS EN 60099-4, IEC 60099-4 (1991), incorporating amendment n°1 *Surge arresters — Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems*, 1993.
- [3.8] BS EN 60099-5, incorporating amendment n°1, *surge arresters — Part 5: Selection and application recommendations*, 1995.
- [3.9] Haddad A., Elayyan H.S.B., Ercan B, German D.M. and Waters R.T, *A new test cell for the characterisation of zinc oxide arrester elements*, 6th International Symposium on High Voltage Engineering, Paper 26.08, New Orleans (USA), 1989.
- [3.10] Haddad A., Fuentes-Rosado J., German D.M. and Waters R.T., *Equivalent circuit for ZnO surge arrester elements at power frequency voltages*, 25th IUPEC, pp.361-364, Aberdeen (UK), 1990.
- [3.11] Haddad A., Fuentes-Rosado J., German D.M. and Waters R.T., *Characterisation of ZnO surge arrester elements with direct and power frequency voltages*, IEE Proc., Pt. A, Vol.137, No.5, pp.269-279, 1990.
- [3.12] Haddad A., Elayyan H.S.B., German D.M. and Waters R.T., *ZnO surge arrester elements with mixed direct and 50 Hz voltages*, IEE Proc., Pt.A, Vol.138, No.5, pp.265-272, 1991.

- [3.13] A. Bayadi, *Using metal oxide surge arrester models for power system transients studies*, Conference on Electrical Engineering, CEE'02, University of Batna, 2002.
- [3.14] Bargigia, A, de Nigris, M & Pignini, A, *The response of metal oxide resistors for surge arresters to steep front current pulses*, Fifth International Symposium on High Voltage Engineering, Paper 82.01, Braunschweig (Federal Republic of Germany), 1987.
- [3.15] W. Breilmann, *Protective characteristics of complete zinc-oxide arresters and of single elements for fast surges*, Fifth ISH, Paper 82.04, Braunschweig (Federal Republic of Germany), 1987.
- [3.16] S. Tominaga, K. Azumi, Y. Shibuya, M. Imataki, Y. Fujiwara and S. Nichida, *Protective performance of metal oxide surge arrester based on the dynamic v-i characteristics*, IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-98, pp. 1860-1871, 1979.
- [3.17] W. Schmidt, J. Meppelink, B. Richter, K. Feser, L. Kehl and D. Qiu, *Behaviour of MO- surge arrester blocks to fast transients*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, N° 1, pp. 292-300, 1989.
- [3.18] J. Ozawa, K. Ooishi, K. Shindo, S. Shirakawa, K. Nakano, A. Mizukoshi, S. Maruyama, *Fast transient response and its improvement of metal oxide surge arresters for GIS*, 6th ISH, paper 26.03, New Orleans, 1989.
- [3.19] Hileman, J. Roguin, K. H. Weck, *Protection performance of metal oxide surge arresters*, Electra No. 133, pp 132-143, 1990.
- [3.20] Miller, D.B.; Fan, H.B.; Barnes, P.R.; *The response of MOV and SiC arresters to steep-front longer duration current pulses* IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.6 , Issue: 2, pp 666 – 671, 1991.

- [3.21] Nigol, O.; *Methods for analyzing the performance of gapless metal oxide surge arresters*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7 , Issue: 3, pp. 1256 - 1264, 1992.
- [3.22] IEEE Working Group 3.4.11, *Modeling of metal oxide surge arresters*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, N° 1, pp. 302-309, 1992.
- [3.23] I. Kim, T. Funabashi, H. Sasaki, T. Hagiwara, M. Kobayashi, *Study of ZnO arrester model for steep Front Wave*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, N°2, pp. 834-841, 1996.
- [3.24] T. Hagiwara, T. Funabashi, H. Watanabe, N. Takeuchi, T. Ueda, *A Metal-Oxide Surge Arrester Model with Active V-I Characteristics*; Electrical Engineering in Japan, Vol. 121, No. 1, pp 35-42, 1997.
- [3.25] A. Haddad and P. Naylor, Dynamic response of ZnO arresters under high amplitude fast impulse currents, International power electric conference, Vol1, pp. 292-297, 1999.
- [3.26] Haddad A, Naylor P.: "Dynamic impulse conduction in ZnO arresters", 11th International Symposium on High Voltage Engineering(ISH), Vol. 2, pp.254-257, London (UK), 1999.
- [3.27] P. Pinceti, M. Giannettoni, *A simplified model for zinc oxide surge arresters*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, N° 2, pp. 393-398, 1999.
- [3.28] F. Fernandez, R. Diaz, *Metal oxide surge arrester model for fast transient simulations*, paper 144, International conference on power system transients, IPST'01, 2001.
- [3.29] Bayadi A., Harid N., Zehar K. and Belkhiat S. *Simulation of metal oxide surge arrester dynamic behavior under fast transients*, paper 14-b1,

International conference on power system transients, IPST'03, New Orleans, 2003.

- [3.30] Magro, M.C.; Giannettoni, M.; Pinceti, P.; *Validation of ZnO surge arresters model for overvoltage studies*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.19, Issue: 4, pp1692-1695, 2004.
- [3.31] G., Penchenat, *Contribution à l'étude de dispositifs de protection à base de varistance à l'oxyde de zinc et d'éclateurs pour les installations basse tension*, Thèse d'ingénieur, Université de Paul Sabatier, 1994.
- [3.32] Leuven EMTP Center (LEC), *ATP-EMTP Rule Book*, 1992.
- [3.33] Leuven EMTP Center (LEC), *EMTPtheory book*, 1992.
- [3.34] General Electric Company, TRANQUELL® Surge Arresters, Product Selection & Application Guide, GE Arresters datasheets, 2001.

Chapitre 4
Identification des
paramètres des modèles de parafoudres ZnO
par les algorithmes génétiques

Chapitre 4

Identification des paramètres des modèles des parafoudres ZnO par les algorithmes génétiques

4.1 Introduction

La modélisation correcte et adéquate des caractéristiques des parafoudres à oxyde métallique est très importante pour les études de coordinations des isolements et de fiabilité des systèmes. Pour la protection contre les surtensions de manœuvre les parafoudres peuvent être représentés avec leur caractéristique non-linéaire Volt-Ampère [4.1 — 4.5]. Cependant, une telle pratique ne serait pas appropriée lorsqu'il s'agit des études de protection contre les surtensions de foudre. Ce la est dû au fait que les parafoudres se comportent différemment en présence d'une perturbation rapide (Chapitre 3). Typiquement, la tension résiduelle prédite pour une impulsion de courant ayant un temps de front égale à $1\mu\text{s}$ est de 6–10% supérieure à celle prédite pour un courant de choc ayant un temps de front égale à $8\mu\text{s}$. Pour des temps de montée plus longs se rangeant entre 45 et $60\mu\text{s}$, la tension est de 2 à 4% inférieure à celle due à une impulsion de courant ayant un temps de montée de $8\mu\text{s}$ [4.1, 4.4, 4.5].

Dans le but de reproduire les caractéristiques dynamiques des parafoudres à oxyde métallique mentionnés précédemment, plusieurs chercheurs [4.1, 4.6 — 4.11] ont adressé des efforts considérables au développement de modèles de parafoudres (Chapitre 3). Les auteurs dans la référence [4.1] recommandent un modèle basé sur leurs bases de données pour des courants de foudre et des courants transitoires rapides avec un temps de montée compris entre 0.5 et $45\mu\text{s}$. Pour déterminer les paramètres du modèle une procédure

itérative essai-erreur a été proposée pour reproduire raisonnablement l'amplitude de la tension obtenue pour une onde de courant $8/20 \mu s$. Pour déterminer les valeurs des paramètres de départ du processus de détermination des paramètres du modèle, des expressions, faisant intervenir la hauteur et le nombre de colonnes du parafoudre, pour cinq éléments linéaires et deux tables pour les deux éléments non-linéaires ont été proposées. Le modèle IEEE a été ensuite simplifié par les auteurs de la référence [4.6], le nombre d'éléments a été réduit à cinq. Ces paramètres sont rapportés aux tests de courants $1/5\mu s$ et $8/20\mu s$. un autre modèle simple qui se compose d'une inductance localisée en série avec une résistance non-linéaire a été développé dans [4.8]. La valeur de l'inductance peut être estimée une fois que le courant circulant dans le parafoudre soit approximativement connu en utilisant une fois encore la méthode essai-erreur. Un autre modèle dans lequel l'inductance linéaire est remplacée par une inductance non-linéaire a été développé dans [4.9]. Le modèle est défini en faisant intervenir la différentiation de la forme d'onde du courant et la construction d'un cycle d'hystérésis. Une étude comparative, présentée dans le chapitre 3 et publiée dans la référence [4.12], des différents modèles proposés dans la littérature a été faite. Il a été conclu que les difficultés avec ces modèles résident essentiellement dans le calcul et l'ajustement de leurs paramètres.

Les techniques d'identification des paramètres ont été largement utilisées dans le domaine de la modélisation et de la commande. Récemment une alternative ayant pour objectif l'identification des paramètres des modèles proposés dans les références [4.1, 4.6, 4.9] en utilisant une méthode d'optimisation classique a été proposée dans [4.13]. Les auteurs avaient représenté les deux résistances non-linéaires par des segments de fonctions linéaires (piecewise functions) et par suite une linéarisation a été adoptée. Durant l'optimisation et en terme des

paramètres des modèles de parafoudres ZnO, les équations différentielles linéarisées ont été résolues par la méthode de Runge-Kutta. Le problème d'optimisation est résolu en deux étapes dans le but d'éviter des oscillations numériques possibles de la tension prédite.

Ce chapitre se propose de fournir une nouvelle solution basée sur la méthode des algorithmes génétiques pour obtenir la meilleure série possible de valeurs des paramètres des modèles de parafoudre ZnO. Une version modifiée du modèle dynamique IEEE est proposée pour servir de spécimen sur lequel l'algorithme génétique sera testé. La validité des paramètres prédits est ensuite vérifiée en comparant les résultats prédits avec ceux disponibles dans la littérature. Pour cela quelques parafoudres en provenance de constructeurs mondiaux (GE Tranquell, UltraSil, DynaVar, Siemens, ...) seront utilisés. L'utilisation du modèle modifié en conjonction avec les paramètres optimisés dans une configuration typique de schéma de protection par parafoudre sera présentée et discutée.

4.2 Formulation du problème

Un circuit simplifié typique du montage de mesure pour tester les parafoudres ZnO est montré dans la figure 4.1. Dans cette figure $V_m(t)$ est la tension enregistrée aux bornes du parafoudre ZnO pour un courant injecté $I(t)$ [4.14]. La réponse peut être correctement prédite, cela dépendra bien sûr sur la précision de sélection des paramètres du modèle du parafoudre utilisé :

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (4.1)$$

Ces paramètres peuvent être déterminés en minimisant la fonction objective suivante:

$$F = \int_0^T [V(t, x) - V_m(t)]^2 dt \quad (4.2)$$

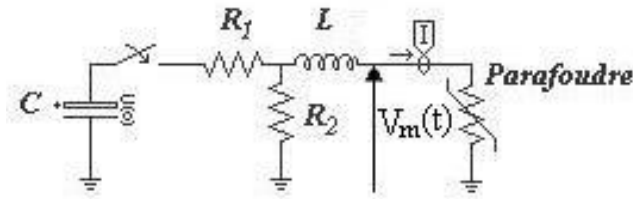


Fig. 4.1 Circuit de test simplifié pour les parafoudres ZnO.

Dans cette équation (4.2):

T : est la durée du courant impulsionnel injecté;

$V(t, x)$: est la tension résiduelle prédite;

$V_m(t)$: la tension résiduelle mesurée.

On note qu'une fonction objective similaire a été proposée dans [4.13]. Elle présente un terme en plus (c'est la fonction poids) pour accélérer la convergence de l'algorithme d'optimisation classique proposée dans cette référence. Sa détermination exigeait une certaine expérience de calcul numérique. Cette fonction poids n'est guère nécessaire dans l'équation objective pour l'algorithme génétique proposé.

L'équation (4.2) est bien connue sous le nom de somme des erreurs quadratiques de mesure. Selon les formes discrètes des fonctions temporelles la fonction objective (4.2) peut être réécrite de la manière suivante:

$$F = \sum_{j=1}^N [V(j\Delta t, x) - V_m(j\Delta t)]^2 \Delta t \quad (4.3)$$

Dans cette équation N est le nombre total de points discrets et $\Delta t = T/N$ représente le pas de temps de calcul.

Nous annotons ici que les paramètres à identifier sont des paramètres électriques, et par suite les x_j doivent être positifs. Ce sera pratiquement direct de les considérer dans un intervalle borné.

4.3 Procédure d'optimisation

Le problème d'optimisation est basé sur les algorithmes génétiques (GA). Ces algorithmes utilisent le concept artificiel de Darwin dans lequel seul les individus les plus forts survivent.

Pour l'identification des paramètres d'un modèle dont la structure est connue, l'individu est l'ensemble des paramètres inconnus et par conséquent chaque gène coïncide avec un paramètre. Dans la suite on présentera cet algorithme en explicitant son mode de fonctionnement.

4.3.1 Description de l'Algorithme génétique

Le but d'un algorithme génétique est d'optimiser une fonction f dite fonction objectif sur un espace de recherche. Pour cela, une population d'individus, typiquement un Puplet de points de l'espace de recherche, évolue selon un darwinisme artificiel (évaluation, sélection, reproduction) basé sur la fonction d'adaptation F de chaque individu [4.15 — 4.22]. La fonction d'adaptation est directement liée à la valeur de la fonction objectif f de cet individu (exemple, la fonction f elle-même). Des opérateurs appliqués à la population permettent de créer de nouveaux individus (croisement et mutation) et de sélectionner les individus de la population qui vont survivre (sélection et remplacement) [4.15].

Les opérateurs appliqués à un individu ne sont pas en général définis sur le même espace que celui sur lequel est défini la fonction objective, appelé espace des phénotypes, mais sur un espace de représentation appelé l'espace des génotypes.

Par exemple pour un codage binaire les algorithmes génétiques simples utilisent un espace de génotypes de la forme $\{0, 1\}^n$.

4.3.2 Procédure générale d'un algorithme génétique.

La figure 4.2 illustre le schéma général d'un algorithme génétique:

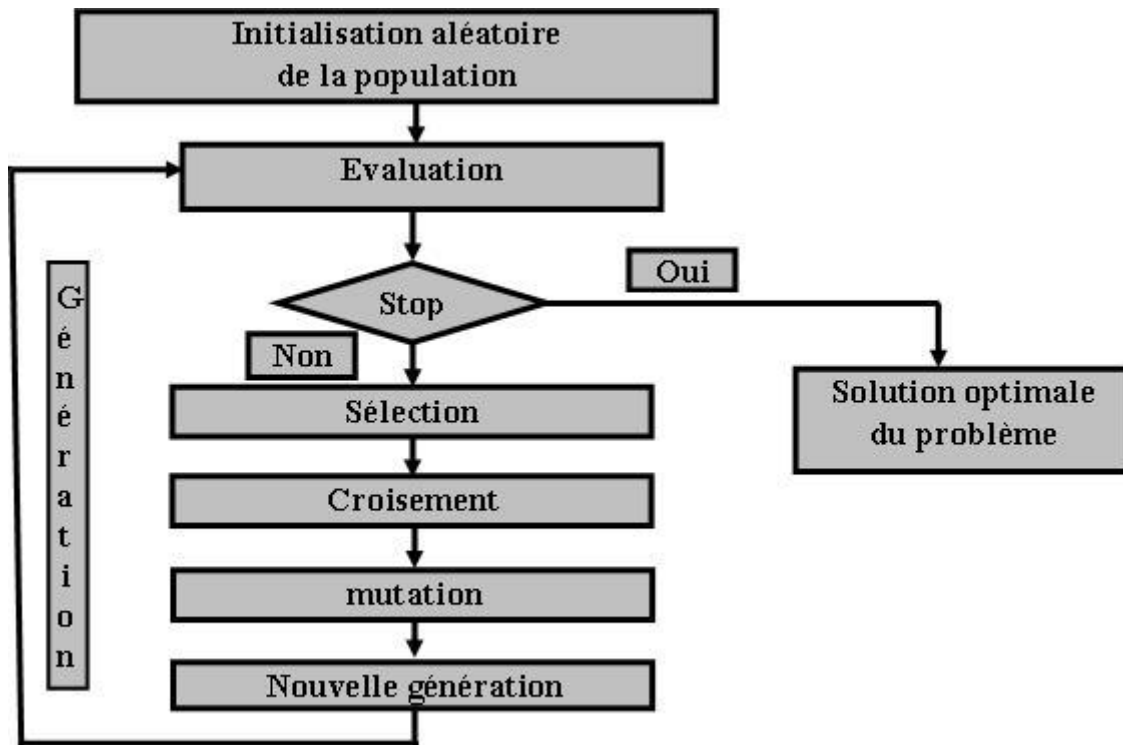


Fig. 4.2 Schéma général d'un algorithme génétique.

- Après l'initialisation de la population (généralement d'une façon aléatoire) l'algorithme évalue la fonction d'adaptation de chaque individu. La boucle de l'algorithme suit les étapes suivantes :

- *Critère d'arrêt :*

C'est un critère qui permet à l'utilisateur d'arrêter le processus. Un des critères simples souvent utilisé est lorsque le nombre maximum de générations, fixé par l'utilisateur, est atteint.

- *Sélection :*

Cet opérateur sélectionne parmi les parents ceux qui vont générer des enfants. La sélection est basée sur la fonction d'adaptation des individus.

– *Création de nouveaux individus :*

La création de nouveaux individus se fait essentiellement à l'aide des opérateurs de croisement et de mutation. L'opérateur de croisement est un opérateur stochastique qui combine k parents pour créer un ou plusieurs enfants. L'opérateur de mutation est un opérateur stochastique qui modifie un individu pour en créer un autre qui lui est généralement proche.

Dans la suite, on présente les différentes mises en oeuvre des algorithmes génétiques. En première phase, on donne d'abord l'exemple d'un Algorithme Génétique Simple (AGS) utilisant des opérateurs basiques pour le croisement, la mutation et la sélection. En seconde phase on donne l'algorithme génétique (AG), développé dans le cadre de ce travail.

4.3.3 Algorithmes Génétiques Simples (AGS)

Les premiers algorithmes génétiques utilisaient un codage binaire avec un espace de génotype de la forme $\{0, 1\}^n$. Les opérateurs de sélection testés sont la roulette et la roulette stochastique où la probabilité P_{X_p} de sélectionner un individu X_p est proportionnelle à sa fonction d'adaptation $F(X_p)$. Pour la roulette, P_{X_p} est donnée par :

$$P_{X_p} = \frac{F(X_p)}{\sum_{i \in Population} F(X_i)} \quad (4.4)$$

L'opérateur de croisement le plus simple consiste à remplacer une partie des chromosomes de l'un des parents par ceux de l'autre parent.

Par exemple, deux parents

$$X_1 = (x_1^1, x_1^2, \dots, x_1^n) \quad \text{et} \quad X_2 = (x_2^1, x_2^2, \dots, x_2^n), \quad (4.5)$$

permettent de générer deux enfants

$$Y_1 = (x_1^1, x_1^2, \dots, x_1^q, x_2^{q+1}, \dots, x_2^n) \text{ et } Y_2 = (x_2^1, x_2^2, \dots, x_2^q, x_1^{q+1}, \dots, x_1^n) \quad (4.6)$$

Où l'entier q appartient à l'intervalle dans $[1, n]$ et est choisi d'une manière aléatoire.

La mutation dans le cas d'un codage binaire consiste à substituer un 0 par 1 ou inversement. Dans le cas d'un codage réel, la mutation peut se faire en remplaçant une variable x_i par $x_i + \delta x_i$ où δx_i est une variation minime de la variable x_i . Le remplacement se fait par un remplacement générationnel.

4.3.4 Algorithme Génétique développé (AGD)

L'algorithme développé pour résoudre le problème de l'identification des paramètres des modèles de parafoudres ZnO a été écrit en Fortran. Cet algorithme utilise un codage réel. La sélection utilisée est soit la sélection par roulette soit la sélection par reste stochastique. Les croisements disponibles sont le croisement multi-points et le croisement barycentrique.

Dans le cas d'un croisement multi-points avec deux points, le croisement se fait de la manière suivante :

Deux parents

$$X_1 = (x_1^1, x_1^2, \dots, x_1^n) \text{ et } X_2 = (x_2^1, x_2^2, \dots, x_2^n) \quad (4.7)$$

gènèrent deux enfants

$$Y_1 = (x_1^1, x_1^2, \dots, x_1^{q_1}, x_2^{q_1+1}, \dots, x_2^{q_2}, x_1^{q_2+1}, x_1^n) \quad (4.8)$$

et

$$Y_2 = (x_2^1, x_2^2, \dots, x_2^{q_1}, x_1^{q_1+1}, \dots, x_1^{q_2}, x_2^{q_2+1}, x_2^n) \quad (4.9)$$

Où les entiers q_1 et q_2 sont choisis aléatoirement dans $[1, n]$.

Avec un croisement barycentrique les enfants créés sont donnés par:

$$Y_1 = (y_1^l, y_1^2, \dots, y_1^n) \quad \text{et} \quad Y_2 = (y_2^l, y_2^2, \dots, y_2^n), \quad (4.10)$$

Avec pour tout i ,

$$y_1^i = \alpha y_1^i + (1 - \alpha) y_2^i \quad \text{et} \quad y_2^i = \alpha y_2^i + (1 - \alpha) y_1^i \quad (4.11)$$

Où α est un réel dans $[0, 1]$.

Ce nombre α est soit choisi par l'utilisateur, soit choisi aléatoirement. Dans le dernier cas il s'agit d'un croisement barycentrique aléatoire.

Deux types de mutations sont possibles. La première est la mutation gaussienne avec une variance constante ou une variance décroissante au cours des itérations.

La seconde est une mutation non-uniforme [4.15, 4.16] où une variable $x_i \in [x_{\min_i}, x_{\max_i}]$ prend la nouvelle valeur x'_i :

$$x'_i = \begin{cases} x_i + \Delta(t, x_{\max_i} - x_i) & \text{si } s \leq 0,5; \\ x_i - \Delta(t, x_i - x_{\min_i}) & \text{si } s \geq 0,5; \end{cases} \quad (4.12)$$

Où t représente le nombre de génération, où s un nombre aléatoire dans $[0, 1]$ et où la fonction $\Delta(t, x)$ est définie comme suit :

$$\Delta(t, x) = x.r.\left(1 - \frac{t}{T}\right)^b \quad (4.13)$$

Avec r un nombre aléatoire dans $[0, 1]$, T le nombre maximal de générations et b est un paramètre de raffinement représentant le degré de non-linéarité. L'allure de la fonction $\Delta(t, x)$ est représentée dans la figure 4.3. Ainsi, au début l'amplitude maximale de la mutation est grande alors qu'elle très petite vers la fin de l'algorithme : on passe d'une recherche globale à une recherche locale au cours de l'algorithme. Le paramètre b permet d'ajuster l'amplitude de la mutation. Le choix de b détermine la stratégie de compromis entre l'exploration

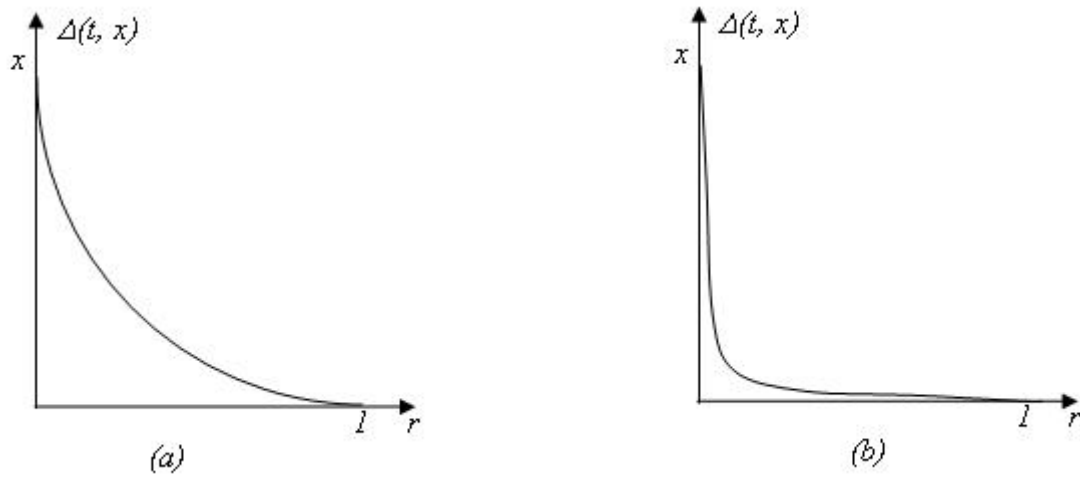


Fig. 4.3 La fonction $\Delta(t, x)$ à deux instants t_1 et t_2 (resp. (a) et (b)) avec $t_1 < t_2$.

et l'exploitation. Pour une grande valeur de b (figure 4.4 (a)) on s'oriente vers l'exploration de l'espace et pour une petite valeur de b (figure 4.4 (b)) on s'oriente vers la phase d'exploitation et de recherche locale.

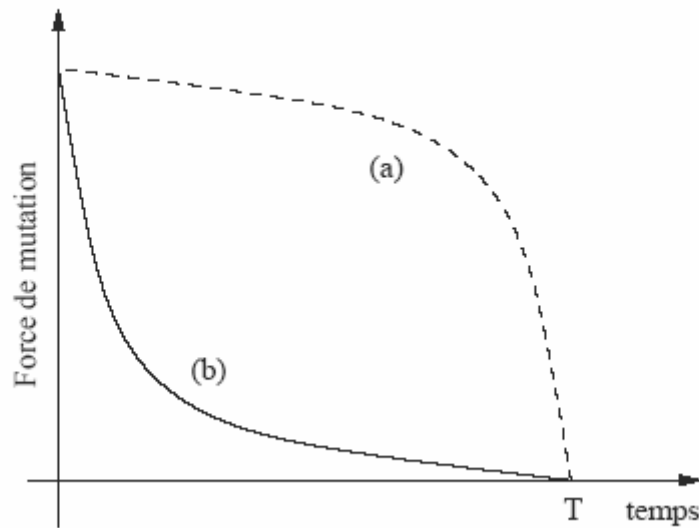


Fig. 4.4 Evolution de l'amplitude de la mutation en fonction du temps.

L'algorithme utilise aussi la mutation dépendant de la distance (MDD) proposée dans [4.22]. La MDD augmente la probabilité de mutation des enfants lorsque la distance entre les parents est petite pour éviter l'apparition d'un super-individu et par suite éviter une convergence prématurée.

La technique de nichage qui consiste à favoriser les individus qui sont éloignés des autres individus de la population a été introduite en augmentant leur fonction d'adaptation. L'élitisme a également été utilisé par l'algorithme. Il assure la décroissance de la meilleure valeur trouvée au cours des générations.

Une autre technique, importante pour le bon fonctionnement de l'algorithme, est la mise à l'échelle. Cette technique est imposée par le choix de la méthode de sélection basée sur la méthode de la roulette où la probabilité P_{X_p} est donnée par l'expression (4.4). Cette formule oblige à avoir une fonction d'adaptation positive pour tous les individus. D'où une première idée de mise à l'échelle qui consiste à prendre pour fonction d'adaptation :

$$F(X_p) = f(X_p) - \min_{i \in \text{Population}} f(X_i) \quad (4.14)$$

Ce choix est insuffisant car si on considère la fonction $g = f + C$ où C est une constante grande devant les valeurs de f , les individus ne sont plus réellement différents à la vue de leur fonction d'adaptation donnée avec la fonction g . La sélection se fait alors différemment pour les fonctions f et g et devient sensible aux translations.

Le choix de la mise à l'échelle doit satisfaire une autre condition dont le but est d'éviter qu'un super-individu soit le seul sélectionné pour la génération suivante. Plusieurs stratégies de la mise à l'échelle satisfaisant à ces exigences ont été testées. La meilleure pour nos tests est la mise à l'échelle par le sigma tronqué :

$$F(X_p) = f(X_p) + (\bar{f} - c\sigma) \quad (4.15)$$

Où $\bar{f}$ et σ représentent respectivement la moyenne et la variance de la fonction f sur la population et où c est une constante généralement prise entre 1 et 5. Les valeurs négatives éventuelles de $F(X_p)$ sont tronquées et ramenées à zéro.

L'ensemble des techniques présentées ci-dessus a permis d'accroître les performances de l'algorithme développé.

4.3.5 Validation du programme

4.3.5.1 Résultats sur des fonctions tests.

Dans cette section on présente les résultats obtenus par l'algorithme évolutionnaire sur des fonctions tests prises dans la littérature [4.22]. Il s'agit de :

☞ la fonction Sphère définie par :

$$f(x) = \sum_{i=1}^{30} x_i^2 \quad (4.16)$$

☞ la fonction Elliptique définie par :

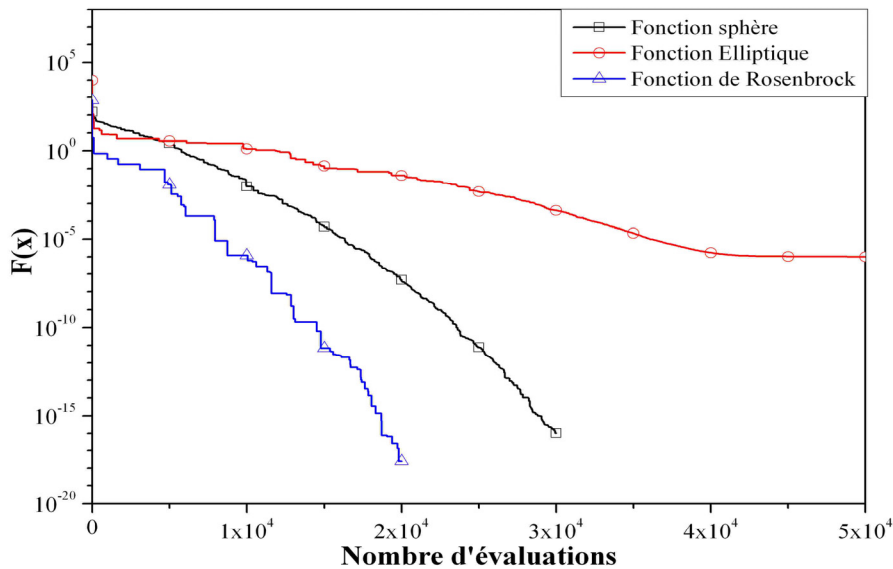
$$f(x) = \sum_{i=1}^3 1.5^{i-1} x_i^2 \quad (4.17)$$

☞ la fonction de Rosenbrock définie par :

$$f(x) = 100(x_1^2 - x_2)^2 + (1 - x_1^2)^2 \quad (4.18)$$

Ces exemples ont été choisis de façon à illustrer le fonctionnement de l'algorithme présenté et à mettre en évidence ses spécificités. Il est à noter qu'un effort particulier a été fourni pour ajuster les paramètres utilisés. Ceci a été utile dans la suite pour l'ajustement des paramètres sur le problème de l'identification des paramètres des modèles de parafoudres ZnO. On présente dans le tableau 4.1 les résultats de l'algorithme génétique développé (AGD). L'évolution de ces fonctions en fonction du nombre d'évaluations est montrée dans la figure 4.5.a. De ces résultats on peut noter que l'algorithme converge vers l'optimum global. Cet optimum est atteint, selon la fonction, pour un nombre d'évaluations plus ou moins important.

Fonction	Minimum global		Résultats		
	x_i	$f(x)$	x_i	$f(x)$	Nombre d'évaluations
Sphère	0	0	0	$1,0610^{-16}$	310^4
Elliptique	0	0	0	$4,7610^{-17}$	510^4
Rosenbrock	1	0	0,999	$9,94 10^{-7}$	210^4

Tab. 4.1 Résultats sur les fonctions tests**Fig. 4.5.a** Convergence en fonction du nombre d'évaluations

4.3.5.2 Résultats sur une résistance non-linéaire.

L'algorithme génétique développé a fait l'objet d'un autre test pour approximer les données expérimentales en provenance de constructeurs de parafoudres et comparé avec la méthode des moindres carrées utilisé par l'EMTP.

Les caractéristiques V-I expérimentales des parafoudres sont généralement modélisées par une résistance non-linéaire (chapitre 3) dont la variation est exponentielle. Les résultats obtenus par l'AGD sont très satisfaisants comparés à ceux obtenus par l'EMTP et avec les données des constructeurs comme montré dans la figure 4.5.b.

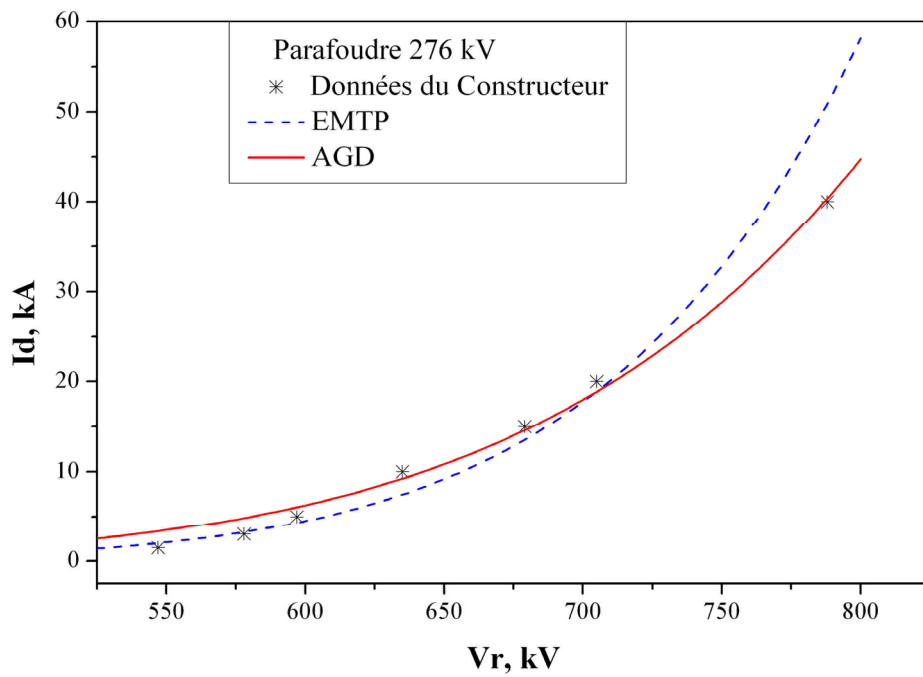
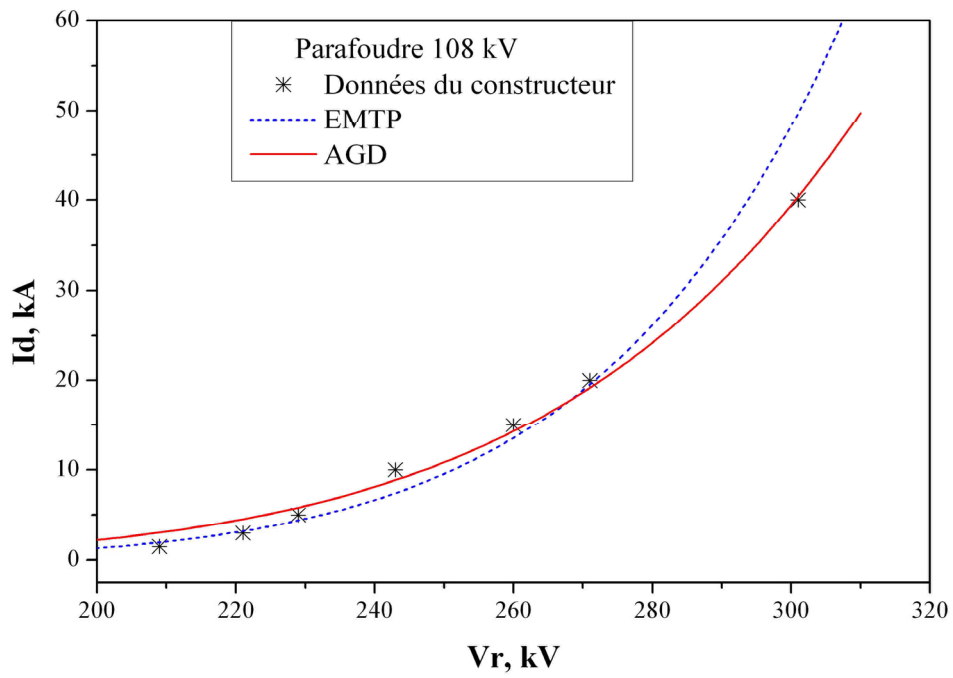


Fig. 4.5.b Comparaison avec l'EMTP et les données des constructeurs

4.4 Modèle IEEE modifié du parafoudre à Oxyde métallique.

Le modèle IEEE est montré dans la figure 4.6 avec une légère modification. Cela étant dit, le même concept pour la modélisation des lignes de transmission est utilisé, la capacitance du parafoudre est divisée en C_0 et C_1 . Ce changement n'affecte guère la structure du modèle d'origine. Il sera appelé dans la suite de ce chapitre modèle IEEE modifié.

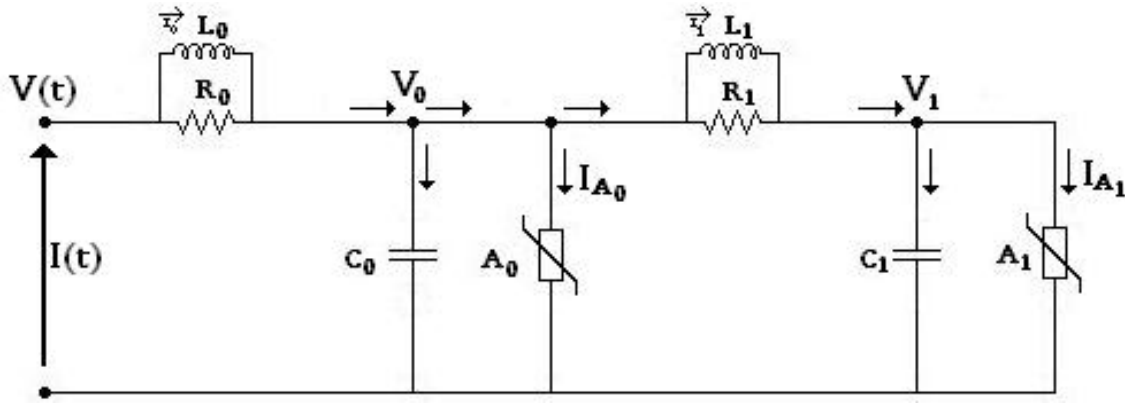


Fig. 4.6 *Modèle modifié de l'IEEE.*

Les équations d'état développées pour ce modèle peuvent être écrites de la manière suivante:

$$\begin{cases} L_0 \frac{dI_0}{dt} = R_0 (I - I_0) \\ L_1 \frac{dI_1}{dt} = R_1 \left(C_1 \frac{dV_1}{dt} + I_{A1} - I_1 \right) \\ C_0 \frac{dV_0}{dt} = I - \left(I_{A0} + I_1 + \frac{V_0 - V_1}{R_1} \right) \\ C_1 \frac{dV_1}{dt} = \frac{V_0 - V_1}{R_1} + I_1 - I_{A1} \end{cases} \quad (4.19)$$

En réarrangeant on obtient:

$$\begin{cases} \frac{dI_0}{dt} = \frac{R_0}{L_0}(I - I_0) \\ \frac{dI_1}{dt} = \frac{1}{L_1}(V_0 - V_1) \\ \frac{dV_0}{dt} = \frac{1}{C_0} \left[I - \left(I_{A0} + I_1 + \frac{V_0 - V_1}{R_1} \right) \right] \\ \frac{dV_1}{dt} = \frac{1}{C_1} \left[\frac{V_0 - V_1}{R_1} + I_1 - I_{A1} \right] \end{cases} \quad (4.20)$$

Finalement on obtient:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= A \cdot X + B \cdot U + M \cdot W \\ Y &= C^T \cdot X + D \cdot U \end{aligned} \quad (4.21)$$

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \end{bmatrix}; \quad X = \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ V_0 \\ V_1 \end{bmatrix}; \quad U = I; \quad W = \begin{bmatrix} I_{A0} \\ I_{A1} \end{bmatrix}$$

Avec:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_0}{L_0} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_1} & -\frac{1}{L_1} \\ 0 & -\frac{1}{C_0} & -\frac{1}{R_1 C_0} & \frac{1}{R_1 C_0} \\ 0 & \frac{1}{C_1} & \frac{1}{R_1 C_1} & -\frac{1}{R_1 C_1} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{R_0}{L_0} \\ 0 \\ 1 \\ \frac{1}{C_0} \\ 0 \end{bmatrix}; \quad M = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -\frac{1}{C_0} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_1} \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} -R_0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad D = R_0 \quad (4.23)$$

Les deux équations non-linéaires A_0 et A_1 sont représentées par:

$$I_{A_0} = p_0 \left(\frac{V_0}{V_{ref0}} \right)^{q_0} \text{ et } I_{A_1} = p_1 \left(\frac{V_1}{V_{ref1}} \right)^{q_1} \quad (4.24)$$

Durant l'optimisation les équations différentielles sont résolues en utilisant la méthode de différentiation rétrograde (MDR) jusqu'à l'ordre 5 (Backward Differentiation Formulas BDF). La MDR est souvent appelée méthode de Gear. Pour le modèle les paramètres à déterminer sont : R_0 , L_0 , R_1 , L_1 , C_0 , C_1 , p_0 , p_1 , q_0 , q_1 , V_{ref0} et V_{ref1} .

4.5 Exemples Numériques

Dans cette section, la méthode numérique est appliquée pour identifier les paramètres du modèle modifié du parafoudre à oxyde métallique. Les parafoudres choisis proviennent de plusieurs constructeurs. Le tableau 4.1 montre les caractéristiques techniques de ces parafoudres. L'optimisation est réalisée en utilisant la forme d'onde du courant de décharge 10kA, 8/20μs pour obtenir les paramètres du modèle. Les figures 4.7 et 4.8 donnent un exemple de formes d'onde obtenues pour un courant 10kA, 8/20μs et 10kA, 1/2μs respectivement.

Parafoudre		Tension assignée	Tension maximale de décharge kV _{max}				
			$I/T_2 \mu s$	8/20μs			
N°	Type	I, kA	10	5	10	20	40
1	Tranquell	18,0	53,3	44,1	47,1	52,8	60,6
2	UltraSil	96,0	294,0	233,0	251,0	278,0	315,0
3	Siemens AG	189,0	491,0	435,0	463,0	519,0	579,0
4	DynaVar	172,0	446,0	381,0	404,0	448,0	502,0

Tab. 4.1 Données dans les catalogues des constructeurs.

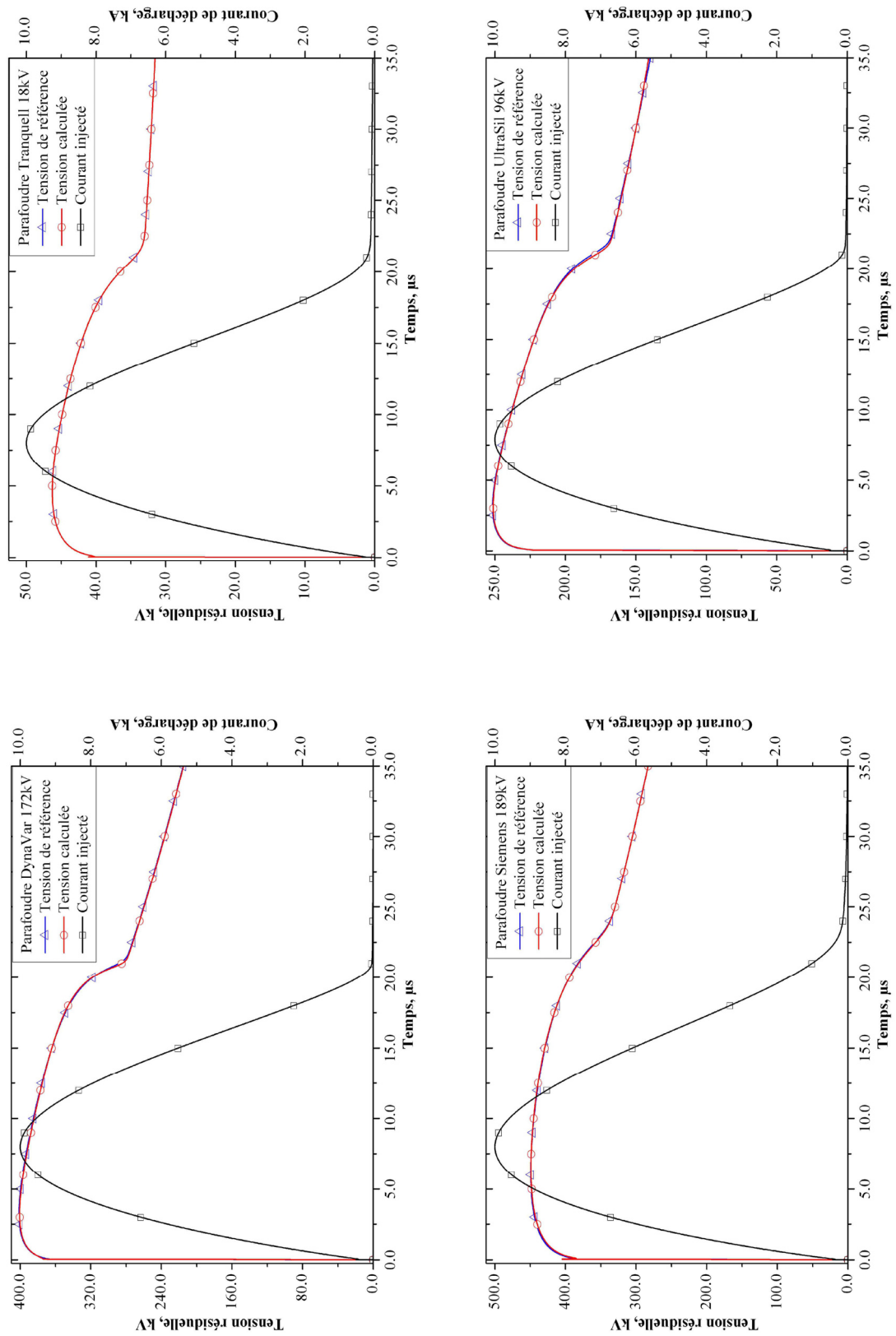


Fig. 4.7 Tension résiduelle calculée pour un courant de décharge 10 kA, 8/20μs.

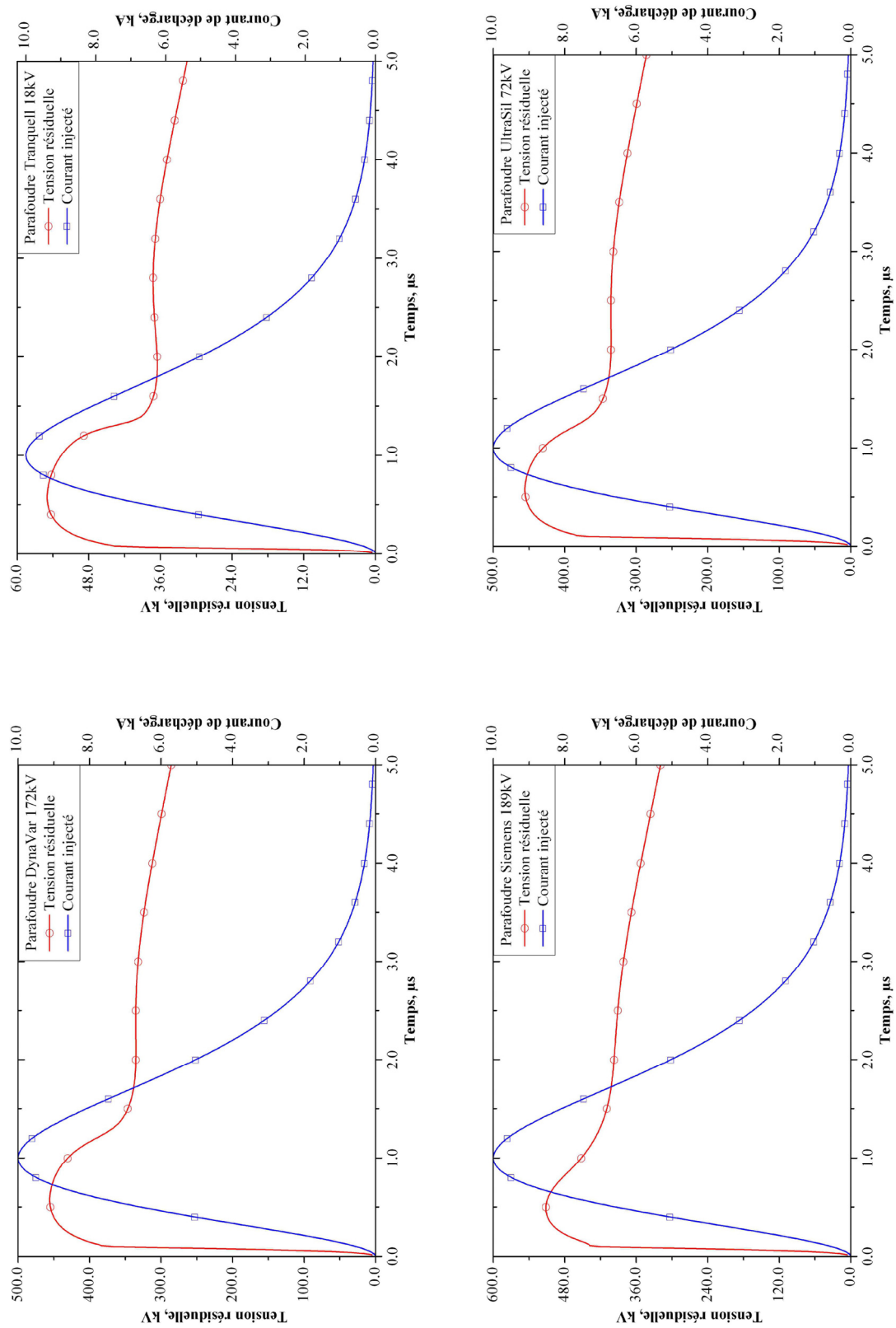


Fig. 4.8 Tension résiduelle calculée pour un courant de décharge, 10 kA, 1/2 μ s.

Les paramètres optimisés pour le modèle correspondant à chacun des parafoudres sont listés dans le tableau 4.2.

Parafoudre Paramètre	Tranquell	UltraSil	Siemens	DynaVar
R_0 (Ω)	62,64	96,9	318,55	264,54
R_1 (Ω)	36,13	70,65	205,55	135,82
L_0 (μH)	0,0989	0,176	0,668	0,640
L_1 (μH)	1,13	10,20	4,80	6,55
C_0 (pF)	85,0	48,30	19,70	23,0
C_1 (pF)	81,1	47,90	19,90	23,9
p_0	5,55	1,79	4,61	3,37
p_1	31,64	79,50	204,00	128,0
q_0	19,46	19,73	20,93	19,35
q_1	13,72	14,57	14,93	15,96
V_{ref0} (kV)	55,73	289,35	562,39	459,16
V_{ref1} (kV)	49,79	280,16	548,74	461,05

Tab. 4.2 Paramètres identifiés du modèle IEEE modifié.

4.6 Application

Le modèle modifié du parafoudre ZnO peut être incorporé dans un réseau pour étudier des transitoires électriques. L'évaluation du modèle avec ses paramètres optimisés par la présente technique est montrée. A titre d'illustration un simple réseau test montré dans la figure 4.9 est utilisé [4.23].

Dans ce réseau un parafoudre ZnO placé à une distance représenté par une ligne de transmission à paramètres distribués protège un transformateur de puissance. Ce transformateur est représenté par une capacité localisée. Un coup de foudre représenté par une source de courant en parallèle avec la résistance du canal de foudre frappe au point 1. L'onde de courant se divise en deux parties, une partie se propage dans le sens opposé de la ligne connecté au transformateur. La

réflexion de cette partie doit être évitée en considérant que la ligne est de longueur infinie.

L'autre partie se propage vers le transformateur. C'est contre cette partie d'onde que le parafoudre installé doit protéger le transformateur. Le logiciel EMTP est utilisé à cet effet.

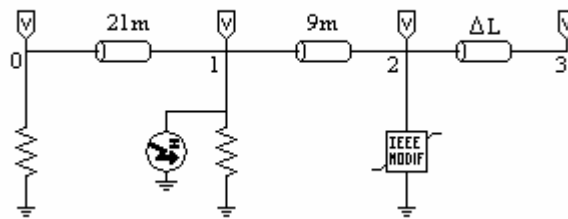


Fig. 4.9 Réseau test implanté dans l'EMTP.

Les données des différents éléments sont les suivants:

Elément	Caractéristiques
Lignes à paramètres répartis	$Z_c = 350 \Omega$; $V_p = 300 \text{ m}/\mu\text{s}$; Longueurs : 0-1 : 21m ; 1-2 : 9m ; 2-3 : 14,5m
Parafoudre ZnO	Type : Siemens, $U_r = 172\text{kV}$ Paramètres optimisés par algorithme génétique
Transformateur	3000pF
Courant de foudre	10kA, $1/2\mu\text{s}$ Résistance en parallèle : 400Ω

Tab. 4.2 Données du réseau test.

Les résultats de simulation sont montrés dans la figure 4.10 pour un courant à front rapide (10kA, $1/2\mu\text{s}$) pour une distance parafoudre- transformateur de 14,5m.

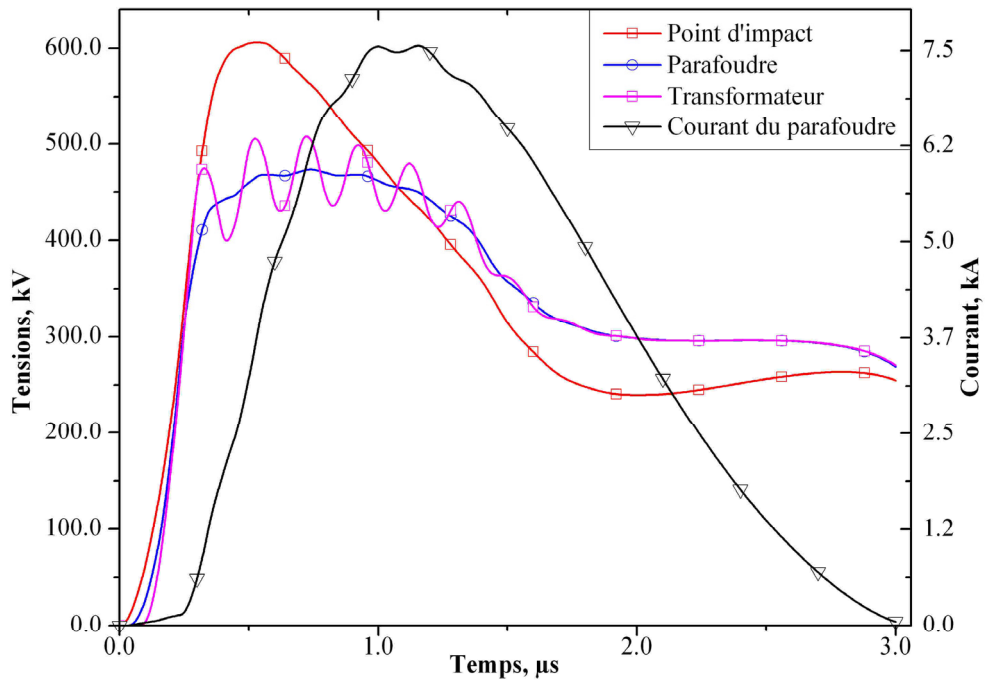


Fig. 4.10 Résultats obtenus pour le réseau test

La forme d'onde de la tension aux bornes du transformateur est oscillatoire. Cela est dû à la nature du circuit équivalent du réseau test qui est un circuit (L-C) formé d'une ligne équivalente à une impédance, et d'un transformateur équivalent à sa capacité d'entrée. La tension aux bornes du parafoudre est autour 475 kV, ce qui est inférieur devant la valeur crête de la surtension (600kV). On remarque que la valeur du courant dans le parafoudre augmente rapidement jusqu'à quelques kA, mais reste toujours en dessous de 8 kA, ce qui est en parfaite concordance avec un fonctionnement normal du parafoudre.

4.7 Conclusion

Ce chapitre a été consacré au problème de l'identification des paramètres des modèles de parafoudres ZnO utilisé dans les études relatives aux contraintes

rapides dans les systèmes électriques. Basé sur les techniques d'optimisation utilisant les algorithmes génétiques, une méthode a été proposée pour déterminer les paramètres du modèle IEEE modifié du parafoudre ZnO proposé. Les informations sur les dimensions des parafoudres à oxyde métallique ne sont guère nécessaires.

La procédure de détermination des paramètres du modèle de parafoudre a été trouvée très prometteuse en se basant sur la comparaison des résultats prédits et des résultats publiés dans les catalogues des constructeurs pour différents temps de front et différentes amplitudes. La qualité de la technique proposée est évaluée par comparaison des valeurs mesurées avec les valeurs prédites. Le modèle IEEE modifié avec les paramètres optimisés fournit une précision très élevée.

4.8 Références

- [4.1] IEEE Working Group 3.4.11, *Modeling of metal oxide surge arresters*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, N° 1, pp. 302-309, 1992.
- [4.2] A. Greenwood, *Electrical transients in power systems*, New York: Wiley & sons, Inc, first edition, 1971.
- [4.3] A. Greenwood, *Electrical transients in power systems*, New York: Wiley & sons, Inc, second edition, 1991.
- [4.4] P. Chowdhuri, *Electromagnetic Transients in Power Systems*, Research Studies Press Ltd, Taunton, Somerset, UK, printed by John Wiley & Sons Inc, 1996.
- [4.5] J. A. Martinez-Velasco, *Computer Analysis of Electric Power System Transients: Selected Readings, IEEE*, 1998.

- [4.6] P. Pinceti, M. Giannettoni, *A simplified model for zinc oxide surge arresters*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, N° 2, pp. 393-398, 1999.
- [4.7] W. Schmidt, J. Meppelink, B. Richter, K. Feser, L. Kehl and D. Qiu, *Behaviour of MO-surge arrester blocks to fast transients*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.4, No1, pp. 292-300, 1989.
- [4.8] S. Tominaga, K. Azumi, Y. Shibuya, M. Imataki, Y. Fujiwara and S. Nichida, *Protective performance of metal oxide surge arrester based on the dynamic v-i characteristics*, IEEE Transactions on power apparatus and systems., Vol.PAS-98, pp.1860-1871, 1979.
- [4.9] M. Kobayashi, T. Hagiwara, H. Sasaki, T. Funabashi, I. Kim, *Study of ZnO arrester model for steep Front Wave*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.11, No.2, pp. 834-841, 1996.
- [4.10] A. Haddad and P. Naylor, *Dynamic response of ZnO arresters under high amplitude fast impulse currents*, International power electric conference, pp. 292-297, 1999.
- [4.11] F. Fernandez, R. Diaz, *Metal oxide surge arrester model for fast transient simulations*, International conference on power system transients, IPST'01, 2001.
- [4.12] A. Bayadi, N. Harid, K. Zehar and S. Belkhiat, *Simulation of metal oxide surge arrester dynamic behavior under fast transients*, International conference on power system transients, IPST'03, 2003.
- [4.13] H.J. Li, S. Birlasekaran, S.S. Choi, *A parameter identification technique for metal-oxide surge arrester models*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.17, No.3, pp736 – 741, 2002.
- [4.14] M. Modrusan, *tests on high-voltage metal oxide surge arresters with impulse currents*, 4th ISH, 1983.

- [4.15] Z. Michalewicz, *Genetic algorithms + data structure = evolution programs*. Springer, 1999.
- [4.16] A. Ben Haj Yedder, *Optimisation numérique et Contrôle optimal: applications en chimie moléculaire*, thèse de docteur, école nationale des ponts et chaussées, 2002.
- [4.17] B. Nouri, *Elaboration d'un logiciel pour la commande d'un moteur asynchrone à base d'algorithmes génétiques*, Mémoire de magister, Université Ferhat abbas, 2000.
- [4.18] F. Alonge, F. D'Ipolito, G. Ferrante, F. M. Raimondi, *Parameter identification of induction motor model using genetic algorithms*, IEE Proc-Control Theory Appl., Vol.145, No6, pp.587-593, 1998.
- [4.19] K. S. Huang, W. Kent, Q. H. Wu, D. R. Turner, *Parameter identification of induction machine using genetic algorithms*, Proceeding of the 1999 IEEE International symposium on computer aided control system design, pp.510-515, 1999.
- [4.20] L. Yao, W.A. Sethares, *Nonlinear parameter estimation via the genetic algorithm*, IEEE Transactions on signal processing, Vol.42, No.4, pp927 – 935, 1994.
- [4.21] B., Abdelhadi, A. Benaoudjit, N. Nait-said, *Identification of induction machine parameters by genetic algorithm*, Conference on electrical engineering, CEE'02, Batna, pp 166-170, 2002.
- [4.22] M. Sefrioui, *Algorithmes Evolutionnaires pour le calcul scientifique. Application la mécanique des fluides et l'électromagnétisme*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, 1998.
- [4.23] J. A. Martinez-Velasco, *Modelling of metal oxide surge arrester using the Type -94 Component*, EEUG News, pp 46-54, 1995.

Chapitre 5
Inductance
des structures de parafoudres
et son effet sur la protection
contre les surtensions

Chapitre 5

Inductance des structures de parafoudre et son effet sur la protection contre les surtensions.

5.1 Introduction.

Les surtensions les plus élevées ont lieu lorsque les chocs de foudre ont des temps de montée rapides. Le courant de décharge d'un parafoudre qui atteint son maximum en $1\mu s$ produira une tension, aux bornes des parafoudres ZnO, 10% plus élevée que la tension obtenue par un courant de décharge qui atteint son maximum en $8\mu s$. Cette augmentation peut atteindre 30% pour un parafoudre au carbure de silicium. De plus, les courants de foudre se déchargeant par l'inductance des fils de connexion produisent une tension qui s'ajoute à la tension de décharge de parafoudre. La longueur totale de ces fils est mesurée à partir du point auquel la connexion du parafoudre est faite au point où l'interconnexion entre le câble de masse du parafoudre et le câble de masse de l'équipement à protéger, en excluant la longueur propre du parafoudre [5.1 – 5.6]. Une tension généralement admise à ajouter à la tension de décharge de parafoudre est de l'ordre de 5,25 kV/m de fil ou encore une inductance de $1.25\mu H/m$.

Par exemple Pour un courant de décharge de 10 kA qui atteint son maximum en $1\mu s$ $\left(\frac{di}{dt} = 10kA / \mu s\right)$, la tension développée sur un mètre de câble sur le front montant de l'onde est de : $1.25 \times 10 = 12.5kV/m$.

Si ce courant atteint son maximum en $8\mu s$, la tension développée sera seulement 1.56 kV/m.

Cette valeur est maintenant utilisée pour calculer les marges de protection sous les conditions des contraintes rapides. Ajoutant à cela, une inductance d'environ $1\mu\text{H/m}$ de hauteur de parafoudre [5.6-5.9] pour tenir compte du comportement des parafoudres lorsqu'ils sont soumis à des contraintes transitoires rapides.

Les formules pour le calcul des inductances propres et mutuelles sont d'une importance capitale dans les applications électriques. En absence de matériaux magnétiques les inductances propres et mutuelles sont des paramètres indépendants de la valeur du courant et dépendent essentiellement de la géométrie du système considéré. Pour certains cas simples des solutions exactes pour l'inductance ont été trouvées, mais les expressions sont compliquées [5.10]. Par exemple, l'expression pour un circuit formé de filaments rectilignes fait intervenir des fonctions hyperboliques inverses et des fonctions trigonométriques inverses.

De nos jours les systèmes de calculs sont suffisamment développés pour non seulement surmonter facilement cette difficulté mais aussi pour travailler avec des fonctions encore plus complexes. Un calcul plus exact des inductances des conducteurs de connexion et du parafoudre est développé. Ce calcul des inductances sur les structures de parafoudre est basé sur des formules analytiques. Les formules présentées prennent en compte tous les arrangements pratiques possibles des installations de parafoudres. Un exemple d'application a été implanté dans l'EMTP (Electromagnetic transients program). Les résultats obtenus sont satisfaisants et seront discutés et présentés dans ce chapitre.

5.2. Inductance d'un conducteur rectiligne.

Généralement l'inductance totale d'un conducteur rectiligne se compose d'une inductance propre et d'une inductance mutuelle.

L'inductance propre L d'un conducteur rectiligne de longueur d (en cm) est donnée, avec exactitude suffisante pour tous les cas pratiques, par la formule générale [5.11]:

$$L = 0.002d \left[\ln \frac{2d}{r} - 1 + \frac{\delta_l}{l} \right] \quad (5.1)$$

Avec :

δ_l : distance moyenne arithmétique,

r : distance moyenne géométrique donnée par:

$$\ln r = \ln \rho - \frac{l}{4} \quad (5.2)$$

Où ρ est le rayon du conducteur.

Le dernier terme de l'équation (5.1) est négligé dans la plus part des cas. Par suite L se résume pour un conducteur circulaire à:

$$L = 0.002d \left[\ln \frac{2d}{\rho} - \frac{3}{4} \right] \quad (5.3)$$

L'inductance mutuelle M_p de deux conducteurs circulaires en parallèle (figure 5.1) ayant une longueur d et séparés l'un de l'autre par une distance s (exprimées en centimètres), peut être calculée d'une manière précise en utilisant [5.11]:

$$M_p = 0.002d \left[\ln \left(\frac{d}{s} + \sqrt{1 + \frac{d^2}{s^2}} \right) - \sqrt{1 + \frac{s^2}{d^2}} + \frac{s}{d} \right] \quad (5.4)$$

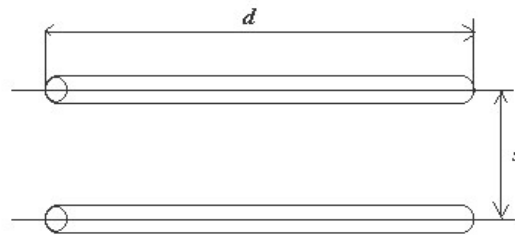


Fig. 5.1 Conducteurs parallèles

5.3 Inductance mutuelle de deux conducteurs sécants.

Les deux conducteurs ont des longueurs d_l et m_l faisant un angle α entre eux. On désigne par R la distance entre leurs extrémités (voir figure 5.2), par suite, l'inductance mutuelle M_α est donnée par [5.11]:

$$M_\alpha = 0.002 d_l S_l \cos \alpha \quad (5.5)$$

Avec S_l définie par:

$$S_l = \left[\tanh^{-1} \frac{m_l}{d_l + R} + \frac{m_l}{d_l} \tanh^{-1} \frac{d_l}{m_l + R} \right] \quad (5.6)$$

Ou encore en utilisant les transformations des fonctions trigonométriques aux fonctions logarithmiques on trouve:

$$M_\alpha = 0.001 d_l S_2 \cos \alpha \quad (5.7)$$

Avec S_2 définie par:

$$S_2 = \ln \frac{1 + \frac{m_l}{d_l} + \frac{R}{d_l}}{1 - \frac{m_l}{d_l} + \frac{R}{d_l}} + \frac{m_l}{d_l} \ln \frac{\frac{m_l}{d_l} + \frac{R}{d_l} + 1}{\frac{m_l}{d_l} + \frac{R}{d_l} - 1} \quad (5.8)$$

En pratique l'angle α ou la distance R est donnée. Les relations suivantes permettent de trouver les unes à partir des autres:

$$\cos \alpha = \frac{d_l^2 + m_l^2 - R^2}{2 d_l m_l} \quad (5.9)$$

$$R = \sqrt{d_l^2 + m_l^2 - 2 d_l m_l \cos \alpha} \quad (5.10)$$

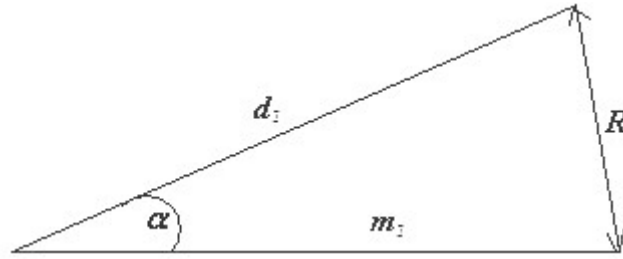


Fig. 5.2 Conducteurs sécants en un point.

Dans le cas où les deux conducteurs sont de même longueur d , les équations suivantes s'appliquent:

$$M_{\alpha} = 0.004 d \cos \alpha \tanh^{-1} \frac{l}{d + R} \quad (5.11)$$

Et:

$$\begin{cases} R^2 = 2d^2 (1 - \cos \alpha) \\ \cos \alpha = 1 - \frac{R^2}{2d^2} \end{cases} \quad (5.12)$$

5.4 Application aux cas pratiques.

La figure 5.3 montre une configuration typique du schéma de protection par parafoudre. Ce diagramme va servir d'exemple pour la présente investigation pour laquelle toutes les inductances ont été calculées en utilisant les formules présentées précédemment.

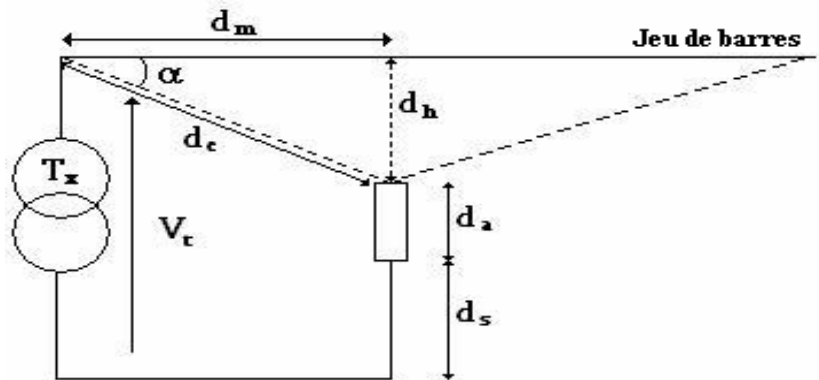


Fig. 5.3 Configuration Typique d'un schéma de protection par parafoudre.

Les données qui ont servi de base pour le calcul sont:

- ☞ La longueur du conducteur de connexion entre la borne inférieure du parafoudre et la terre d_s , prise égale à 3m;
- ☞ La hauteur du parafoudre d_a , prise égale à 3m;
- ☞ La longueur verticale du conducteur de connexion entre la borne supérieure du parafoudre et le conducteur de phase d_h , prise égale à 1.5m,
- ☞ La distance minimale entre le transformateur et le parafoudre d_m , prise égale à 5m,
- ☞ La longueur du jeu de barres, prise égale à 30m.

Le tableau 5.1 présente un exemple des inductances calculées par les formules développées précédemment pour un angle α ayant pour valeurs 30, 60 et 90°. Les inductances calculées en utilisant la procédure IEEE sont introduites pour but de comparaison. Cette procédure consiste à multiplier une inductance par unité de longueur par la longueur de la partie étudiée.

	Distances concernées	d_s	d_a	d_c		d_{mx}	
α	Inductances (μH)	L_s	L_a	L_c	M_c	L_m	M_m
30	Valeur actuelle	5.17	2.64	5.17	1.20	2.00	-0.33
	Valeur IEEE	3.75	3.00	3.75	--	3.00	--
60	Valeur actuelle	5.17	2.64	2.22	0.24	3.90	-0.20
	Valeur IEEE	3.75	3.00	2,16	--	5.17	--
90	Valeur actuelle	5.17	2.64	1.87	0.00	5.90	0.00
	Valeur IEEE	3.75	3.00	1.87	--	6.25	--

Tab. 5.1 Comparaison entre les inductances calculées et celles calculées avec la procédure IEEE.

Dans la figure 5.4 nous avons tracé la variation de l'inductance totale et propre en fonction de l'angle α ($^{\circ}$). L'inductance totale et propre tendent à être égales au fur et à mesure que l'angle α s'approche de 90° . Cela est dû au fait que l'inductance mutuelle diminue avec l'augmentation de l'angle α ($^{\circ}$) jusqu'à ce qu'elle s'annule pour $\alpha=90^{\circ}$ comme montré dans la figure 5.5. Une comparaison avec les valeurs obtenues avec la procédure IEEE est faite. Le résultat de cette comparaison est montré dans la figure 5.6.

Pour le cas triphasé, en plus des calculs précédents, les inductances mutuelles entre les différentes phases doivent être prises en considération.

5.5 Simulation du cas test étudié

Le cas étudié a été implanté dans l'EMTP comme montré dans la figure 5.7. Le parafoudre à oxyde métallique est modélisé par une inductance constante calculée à partir des dimensions du parafoudre en série avec une résistance non-linéaire à variation exponentielle (type 92, 5555) de l'EMTP [5.11, 5.12].

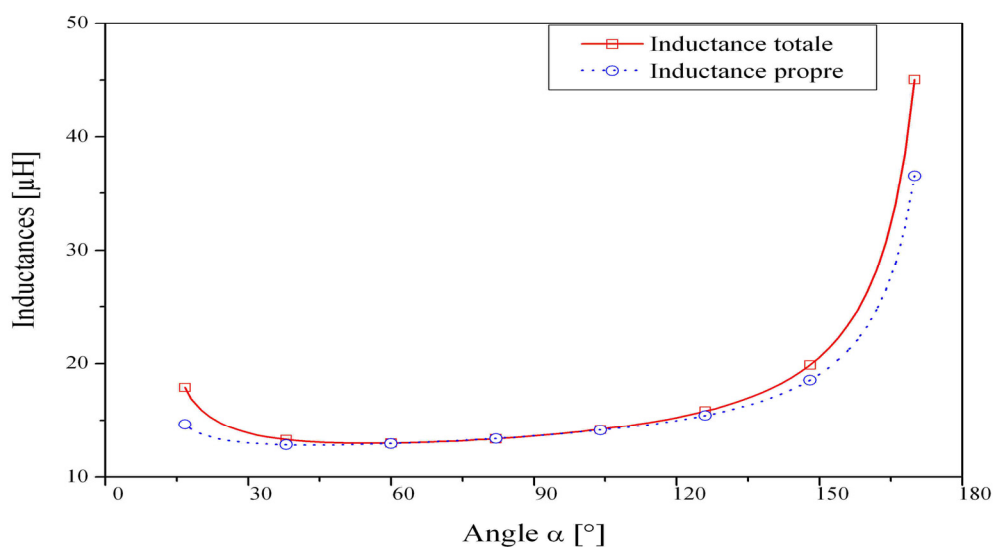


Fig. 5.4 Variation de l'inductance total et propre avec α

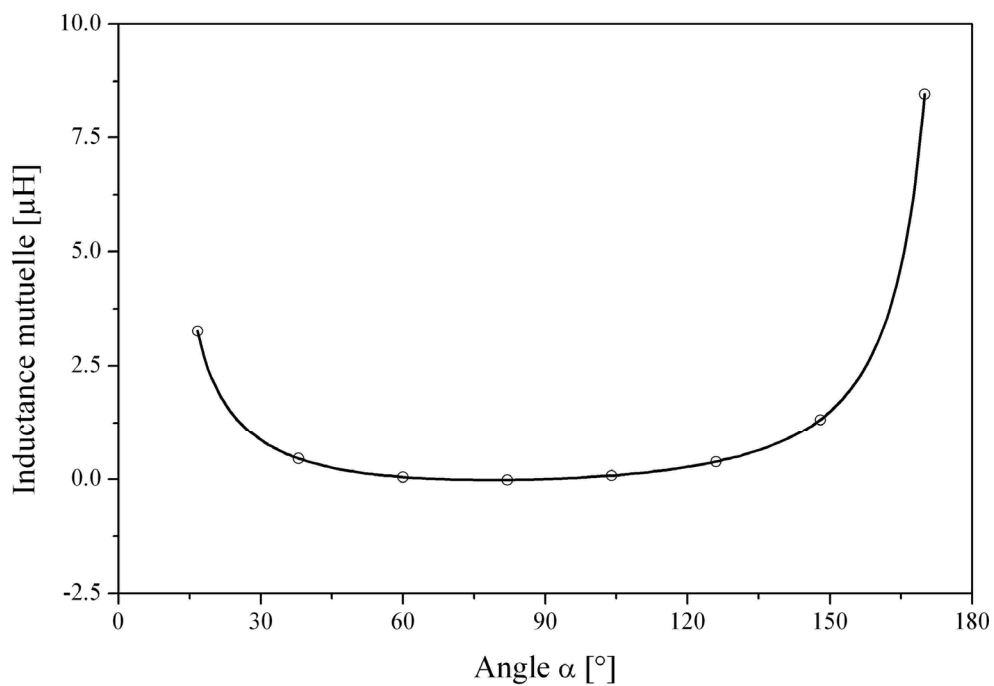


Fig. 5.5 Variation de l'inductance mutuelle avec α

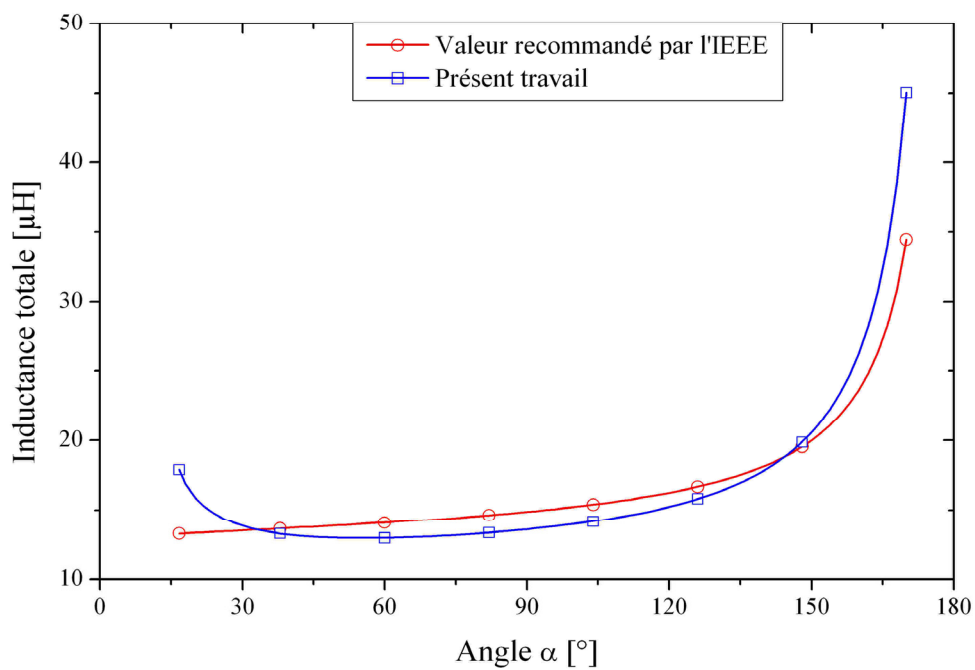


Fig. 5.6 Inductance des structures de parafoudre ZnO

Les points de la caractéristique V-I sont obtenus des catalogues des constructeurs [5.13] avec une tension assignée de 276kV ayant une tension de décharge en onde 10kA, 8/20 μ s de 635kV.

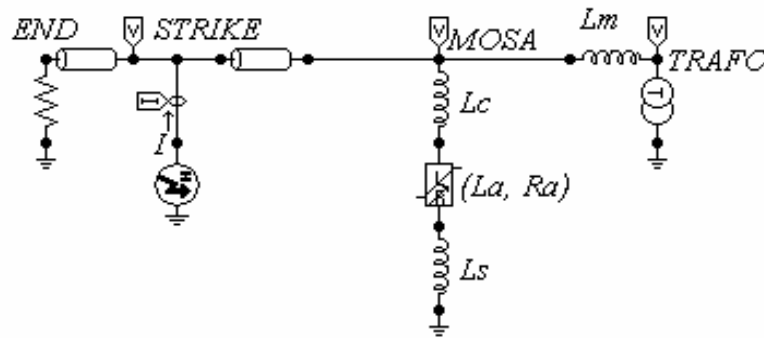


Fig. 5.7 *Implantation du cas étudié dans l'EMTP*

Les données techniques en unités relatives par rapport à la tension de décharge du parafoudre obtenue suite à un test type foudre (10kA, 8/20 μ s) sont résumées dans le tableau 5.2.

Le transformateur est représenté par une capacité localisée. Un courant impulsionnel type foudre (10kA, 8/20 μ s) est appliqué au jeu de barre. Les tensions aux bornes du transformateur et aux bornes du parafoudre sont enregistrées. Un exemple des formes d'ondes obtenues est montré dans la figure 5.8 pour un angle $\alpha=90^\circ$.

Dans la figure 5.9 une comparaison est faite pour le même angle α entre le cas où l'inductance du système est calculées par les formules proposées et celles calculée selon la tension développée sur un mètre de câble sur le front montant de l'onde (procédure IEEE). On peut facilement voir les différences dans les formes d'ondes enregistrées. Dans le but de comparer les deux procédures de calcul de l'inductance des structures de parafoudres ZnO et son effet sur le problème de la protection contre les surtension nous avons présenté dans

la figure 5.10 la dépendance de la tension maximale aux bornes du transformateur de l'angle α .

Courant [A]	Tension du parafoudre (pu) <i>Tensions assignées entre 54 kV et 360kV.</i>							
	Onde de test							
	1/2 μ s		8/20 μ s		36/90 μ s		Front d'onde 1ms	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
1	---	---	0.647	0.691	0.645	0.689	0.640	0.684
10	---	---	0.682	0.725	0.674	0.717	0.671	0.713
100	---	---	0.734	0.769	0.722	0.756	0.716	0.750
500	---	---	0.790	0.819	0.775	0.803	0.762	0.790
1000	0.927	0.958	0.820	0.847	0.802	0.828	0.787	0.813
2000	0.972	0.996	0.860	0.881	0.839	0.859	0.839	0.859
5000	1.044	1.070	0.963	0.946	---	---	---	---
10000	1.117	1.131	0.988	1.000	---	---	---	---
15000	1.167	1.200	1.032	1.061	---	---	---	---
20000	1.209	1.254	1.069	1.109	---	---	---	---
40000	1.318	1.414	1.166	1.251	---	---	---	---

Tab. 5.2 Caractéristiques courant- tension des parafoudres TRANQUELL.

On peut conclure que le calcul de l'inductance en utilisant des formules analytiques est nécessaire pour aboutir à des valeurs exactes de ces inductances et par suite une prédiction plus correcte des tensions de l'appareil à protéger (Transformateur).

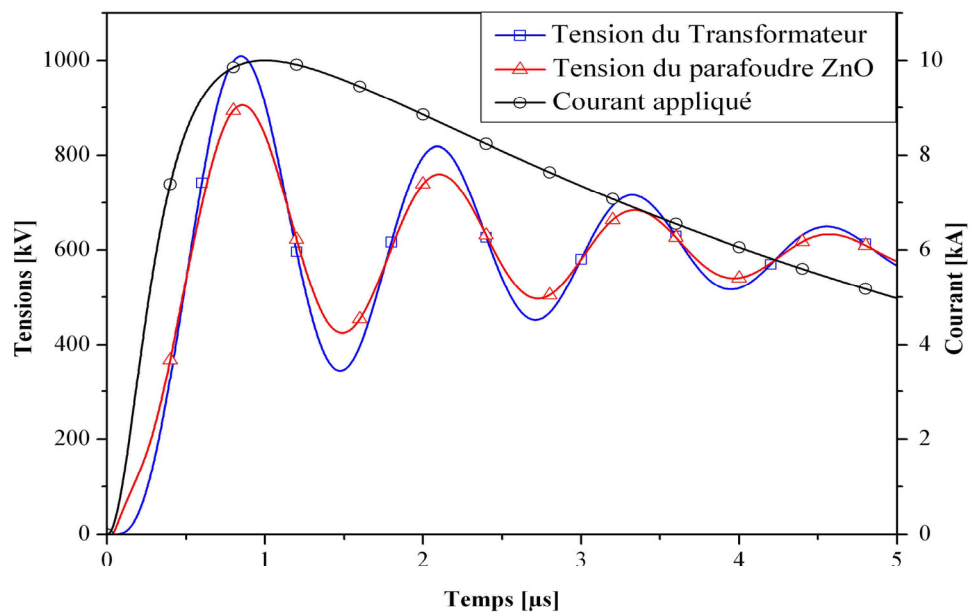


Fig. 5.8 Exemple de formes d'onde obtenues ($\alpha=90^\circ$)

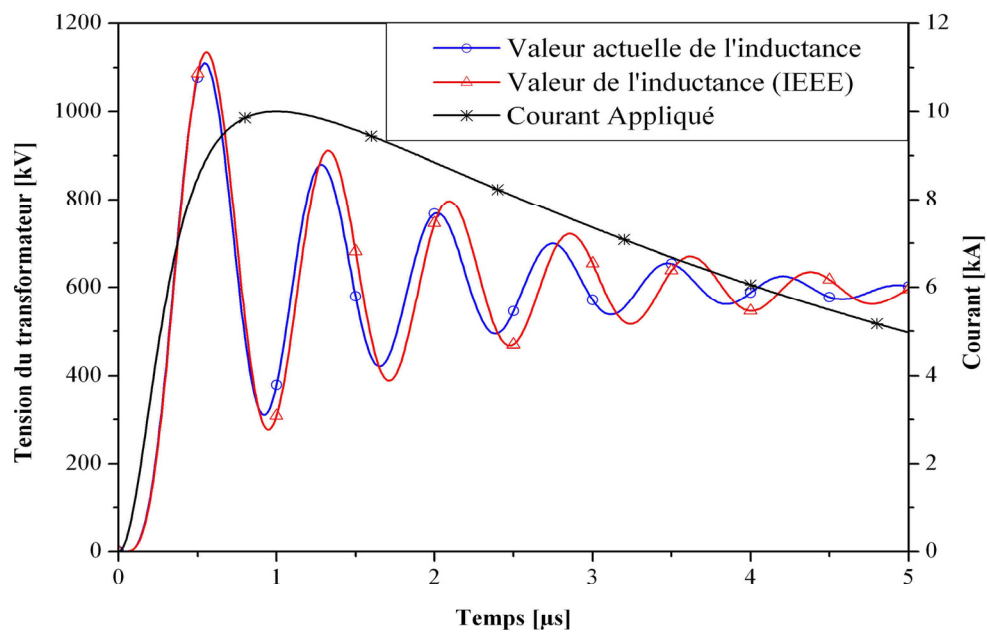


Fig. 5.9 Comparaison des formes d'ondes obtenues ($\alpha=90^\circ$)

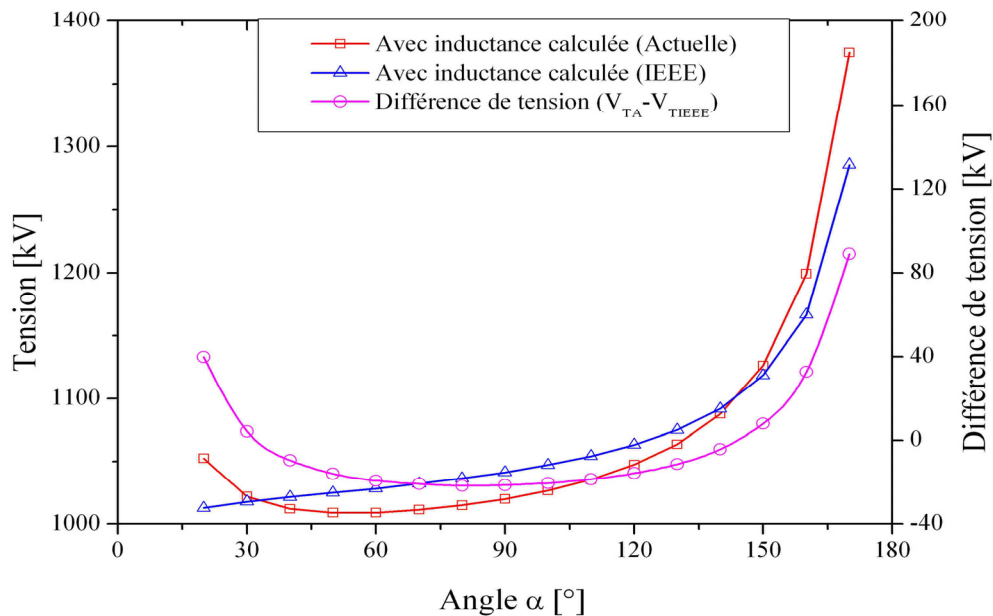


Fig. 5.10 Variation de la tension du transformateur en fonction de l'angle α .

5.6 Conclusions.

Différemment des travaux précédant où l'inductance des conducteurs de connexion ou du parafoudre étaient estimées en multipliant une inductance par unité de longueur par la longueur du conducteur ou par la hauteur du parafoudre un calcul de ces inductance plus exact basé sur des formules analytiques sur les structure de parafoudre est fait.

Les formules présentées prennent en compte tous les arrangements pratiques possibles des installations de parafoudres. Un exemple d'application a été implanté dans l'EMTP et des résultats satisfaisant ont été obtenus. L'angle entre le conducteur de connexion et le jeu de barres doit obligatoirement pris en considération. L'étude nous a permis de tenir compte de l'effet de l'inductance des structures de parafoudres sur le problème de la protection contre les surtensions.

5.7 Références.

- [5.1] A. Greenwood, *Electrical transients in power systems*, New York: Wiley & sons, Inc, second edition, 1991.
- [5.2] IEEE Std C62.22, *IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems*, 1991.
- [5.3] IEEE Std C62.22, *IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems*, 1997.
- [5.4] S EN 60099-5, incorporating amendment n°1, *surge arresters — Part 5: Selection and application recommendations*, 1995.
- [5.5] Hileman, J. Roguin, K. H. Weck, *Metal oxide surge arrester in ac systems part c: Protection performance of metal oxide surge arresters*, Electra No. 133, pp 132-143, 1990.
- [5.6] Pritindra Chowdhuri, *Electromagnetic Transients in Power Systems*, Research Studies Press Ltd, Taunton, Somerset, UK, printed by John Wiley & Sons Inc, 1996.
- [5.7] IEEE Working Group 3.4.11, *Modeling of metal oxide surge arresters*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, N° 1, pp. 302-309, 1992.
- [5.8] S. Tominaga, K. Azumi, Y. Shibuya, M. Imataki, Y. Fujiwara and S. Nichida, *Protective performance of metal oxide surge arrester based on the dynamic v-i characteristics*, IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-98, pp. 1860-1871, 1979.
- [5.9] W. Schmidt, J. Meppelink, B. Richter, K. Feser, L. Kehl and D. Qiu, *Behaviour of MO- surge arrester blocks to fast transients*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, N° 1, pp. 292-300, 1989.

- [5.10] Frederick W. Grover "Inductance calculations, Working formulas and tables", Special edition prepared for Instrument Society of America, 1980.
- [5.11] Leuven EMTP Center (LEC), *Alternative Transients Program Rule Book*, 1992.
- [5.12] H. W. Dommel, *Electromagnetic transients program reference manual (EMTP theory book)*, Bonneville Power Administration, 1995.
- [5.13] General Electric Company, TRANQUELL® Surge Arresters, Product Selection & Application Guide, GE Arresters datasheets, 2001.

Chapitre 6
Analyse des performances
dynamiques de protection des parafoudres
ZnO sur un réseau haute tension

Chapitre 6

Analyse des performances dynamiques de protection des parafoudres ZnO sur un réseau HT

6.1 Introduction.

Les surtensions de foudre sont les plus difficiles et les plus contraignantes que subissent les postes de transformation à cause de la fréquence élevée mise en jeu [6.1 – 6.6]. L'étude présentée concerne la simulation des surtensions de foudre générées par des amorçages en retours sur des modèles de lignes réelles. La coordination d'isolement du poste très haute tension est nécessaire et il faut s'assurer de la bonne tenue diélectrique des éléments de la chaîne du système électrique. Ces éléments ont des niveaux d'isolement fondamentaux (BIL) différents, et concrètement se pose la question de la nécessité d'adjonction de parafoudres, et de leur définition (emplacement, dimensionnement).

La coordination des isolements nécessite une prédiction correcte des surtensions en différents points d'un poste de transformation du point de vue protection des équipements. Pour cet objectif, un des aspects les plus importants est de considérer les caractéristiques dynamiques des parafoudres à oxyde métallique. Une version modifiée du modèle IEEE est proposée. Ses paramètres ont été identifiés en utilisant la technique développée et qui est basée sur les algorithmes génétiques. Ce modèle est utilisé pour évaluer la protection contre les surtensions de foudre dans un schéma complet triphasé d'un poste de transformation 220 kV

opérationnel. Le poste de transformation EL-Hassi de la zone de Sétif a servi d'exemple. Les performances dynamiques de protection des parafoudres ZnO seront examinées. Les surtensions résultantes en plusieurs points fondamentaux seront évaluées et présentées. Le logiciel spécialisé EMTP a été utilisé à cet effet.

6.2 Présentation du poste de transformation.

Le poste d'El -Hassi est un poste d'interconnexion et de transformation. Cinq lignes sont connectées à l'étage 220kV et neuf à l'étage 60 kV. Une représentation schématique de ce poste est montrée dans la figure 6.1. Le poste est doté d'appareils de mesure, de sectionneurs, de disjoncteurs et de deux transformateurs de puissance ayant une puissance de 120 MVA chacun. La modélisation de chacun des éléments du poste est indispensable pour réaliser cette étude. Le choix des modèles est étroitement lié aux phénomènes qu'on veut simuler.

6.3 Simulations EMTP.

Avec le programme digital EMTP [6.7, 6.8] des réseaux complexes et des systèmes de commandes et de contrôle de structure arbitraire peuvent être simulés (voir aussi l'Annexe A).

L'EMTP a prouvé qu'il est un outil souhaitable pour l'analyse des surtensions de foudre dans les postes de transformations et les études de coordination des isollements [6.4 – 6.6, 6.9 – 6.19]. Un modèle complet du système nous permet d'analyser le problème de la protection contre les surtensions d'un poste de transformation dans sa complexité.

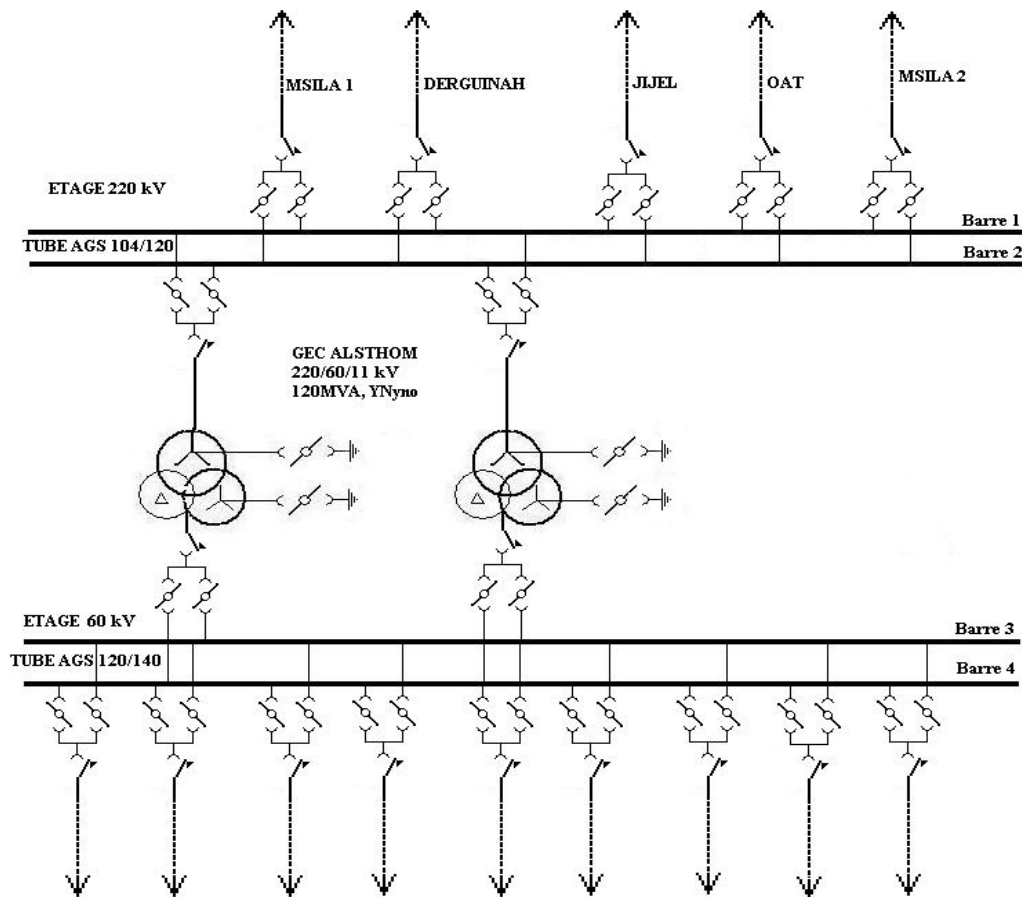


Fig. 6.1 Le schéma unifilaire du poste d'EL-Hassi (220kV).

Les éléments du modèle utilisé (figure 6.2) dans la simulation digitale pour examiner les performances de protection des parafoudres à oxyde métallique sont décrits dans la suite de ce chapitre.

6.4 Modélisation des éléments du système.

Dans cette section, la modélisation des différents éléments qui se trouvent au niveau du poste et les lignes qui y sont connectées sera faite. Les modèles traités sont relatifs à l'EMTP mais leur caractère général leur confère la faculté d'être suffisamment généraux pour être utilisés par d'autres programmes digitaux (EUROSTAG, EMTDC,...).

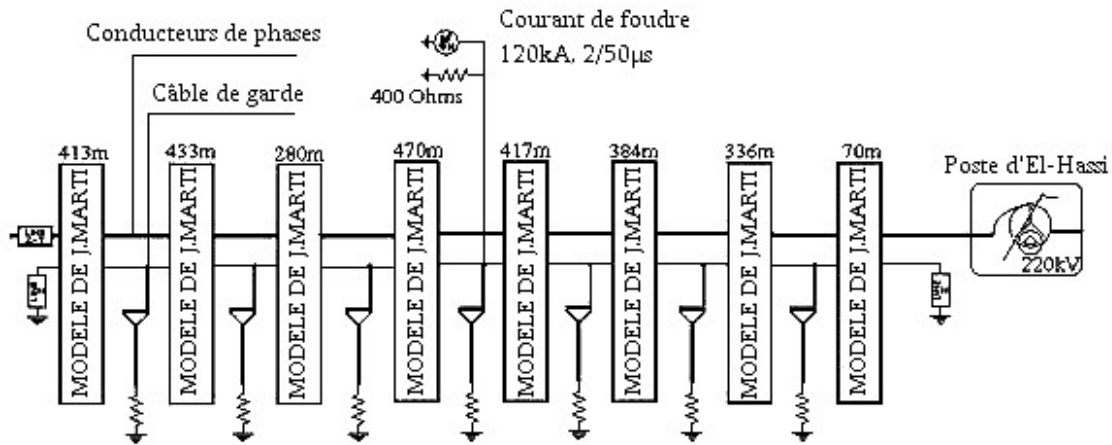


Fig. 6.2 *Modèle utilisé dans la simulation digitale pour examiner les performances de protection des parafoudres à oxyde métallique.*

6.4.1 Modélisation du coup de foudre.

On modélise le coup de foudre par une source de courant d'amplitude variable et de forme d'onde de type Heidler [6.20] en parallèle avec une résistance simulant le canal de foudre.

La source de Heidler est donnée par:

$$i(t) = k \frac{\left(\frac{t}{\tau}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau}\right)^n} e^{-t/\tau} \quad (6.1)$$

Où

k: est un nombre multiplicatif de la fonction en (A);

τ : est la durée de choc en (s);

n: représente un facteur influençant la raideur de la fonction.

L'influence des tensions à fréquence industrielle sur la probabilité de l'amorçage en retour ne peut pas être négligée. Elles sont considérées, dans le cas étudié, par

des sources Thevenin triphasées équivalentes connectées à l'extrémité éloignée de la ligne.

6.4.2 Les lignes de transmission.

Dans chaque simulation une ligne aérienne connectée au poste est sélectionnée pour être considérée comme foudroyée. Cette ligne est représentée par des modèles multi-phases en considérant la nature distribuée de ses paramètres et leur dépendance en fonction de la fréquence. Le modèle JMARTI [6.7, 6.8] est choisi dans ce cas. Les conducteurs de phase et les câbles de garde sont explicitement modélisés entre les pylônes et seulement quelques portées sont considérées. Les données nécessaires (Tableau 6.1) au modèle de la ligne sont la configuration géométrique des conducteurs, leurs diamètres, géométries des faisceaux, etc.

La ligne après le dernier pylône peut être représentée par une matrice de résistance propre et mutuelle égale à l'impédance caractéristique correspondante. Cela évitera les réflexions aux extrémités de la ligne.

Le modèle à paramètres distribués constants type K., C., Lee est utilisé pour les autres lignes. Les paramètres de la ligne sont calculés par le sous-programme LINE CONSTANTS de l'EMTP en introduisant les données géométriques de la ligne.

6.4.3 Les pylônes.

Les pylônes sont des supports qui portent les câbles de garde et les conducteurs de phase par les isolateurs. Les pylônes relient le câble de garde à la terre pour écouler une partie de courant en cas de défaut.

Les pylônes qui constituent la ligne de transport de l'énergie électrique peuvent être des pylônes :

1. d'arrêt qu'on trouve juste à la sortie du poste, le conducteur de phase est porté par deux chaînes d'isolation en forme de chapeau, les deux parties du conducteur sont reliées par une bretelle qui assure la liaison électrique.
2. d'alignement utilisé dans la partie de la ligne de transport sans angle. La phase est portée par une seule chaîne d'isolation montée verticalement.
3. d'angle utilisé dans la partie où il est nécessaire de changer la direction de la ligne. Le conducteur de phase est porté par deux chaînes d'isolation.

La figure 6.3 donne un exemple de pylônes d'alignement utilisé dans la ligne Msila₁ par la compagnie SONELGAZ (voir dans l'annexe B pour plus de détails). Les pylônes ne font pas partie intégrante du modèle de la ligne et peuvent être créés de différentes manières. Dans cette étude les pylônes sont modélisés en représentant chaque partie de la structure métallique du pylône par des tronçons de lignes monophasées utilisant le modèle Clark en introduisant la vitesse de propagation et l'impédance caractéristique relative [6.6, 6.9 – 6.11].

Il est généralement adopté que la vitesse de propagation de l'onde dans les pylônes est égale si non inférieure à la vitesse de la lumière. La littérature reporte des valeurs comprises entre 210 m/μs et 300m/μs [6.5, 6.6].

L'impédance caractéristique [6.21, 6.22] peut être calculée par :

$$Z_T = 60 \left[\ln \left(\sqrt{2} \frac{2h}{r} \right) - 1 \right] \quad (6.2)$$

Où h et r sont définies dans la figure 6.4

Pylônes	N°	1	2	3	4	5	6	7	8
	Types	CR4	AS4	AS4	AS4	A0	A0	BS8	AS4
	Hauteur, m	20,8	29,3	29,3	29,3	25,3	25,3	32	29,3
	Portée, m	70	336	384	417	470	280	433	413
	Z, Ω	172	205	205	205	195,6	195,6		205
Câble de phase, 411 mm ²	R _{in} , cm	0,600							
	R _{ext} , cm	1,320							
	R ₀ , Ω /Km	0,089							
	Distance horizontale, m	7,7	7	7	7	7	7	7,25	7
	H, m	16,2	26,8	26,8	26,8	22,8	22,8	28,3	26,8
	p, m	1300							
	H', m		10,6	0	0	4	0	5,5	1,5
	f, m		10,85	14,18	16,72	21,23	7,54	18,02	16,4
	H _{mid} , m	9,6	10,64	12,62	10,08	3,57	15,26	7,52	9,64
Câble de garde, 116 mm ²	R _{in} , cm	0,435							
	R _{ext} cm	0,607							
	R ₀ Ω /Km	0,512							
	Distance horizontale, m	5,05	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	5,05	4,4
	H, m	20,8	29,3	29,3	29,3	25,3	25,3	32	29,3
	Paramètre, m	1450							
	H', m		8,5	0	0	4	0	6,7	2,7
	f, m		10,14	12,71	14,99	19,03	6,76	16,15	14,94
	H _{mid} , m	11,9	14,91	16,59	14,31	8,27	18,54	12,5	15,71

Z : Impédance caractéristique du pylône, R_{in} : rayon intérieur du conducteur, R_{ext} : rayon extérieur du conducteur, R₀ : résistance linéique du conducteur, H : hauteur du conducteur au niveau du pylône, H_{mid} : la hauteur de conducteur à demi portée, p : paramètre de la ligne, H' : différence entre les hauteurs totales des deux pylônes, f : flèche

Tab. 6.1 Exemple des données techniques des lignes de transmission (Msila₁).

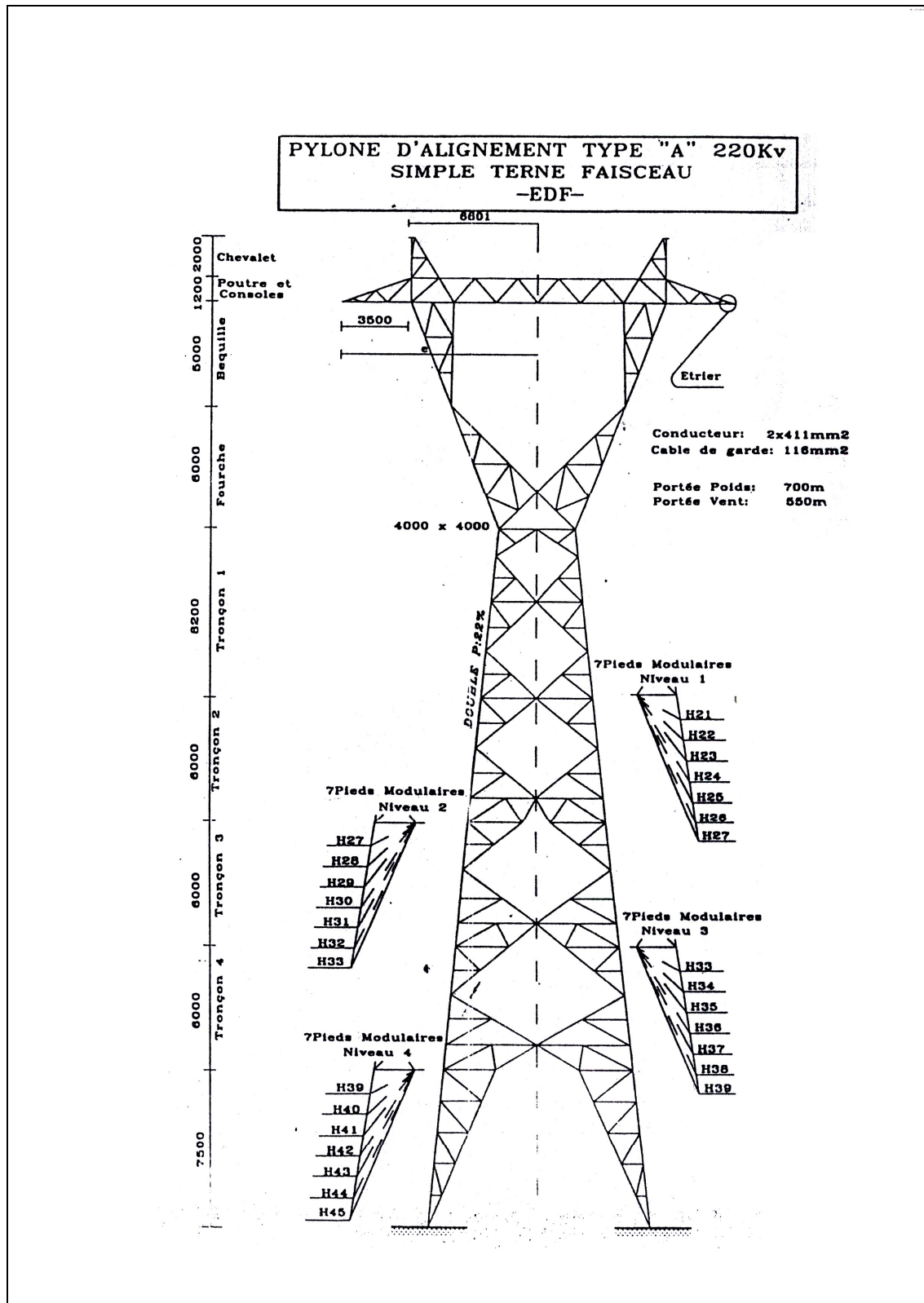


Fig. 6.3 Exemple de pylônes utilisés par la compagnie SONELGAZ (Msila₁).

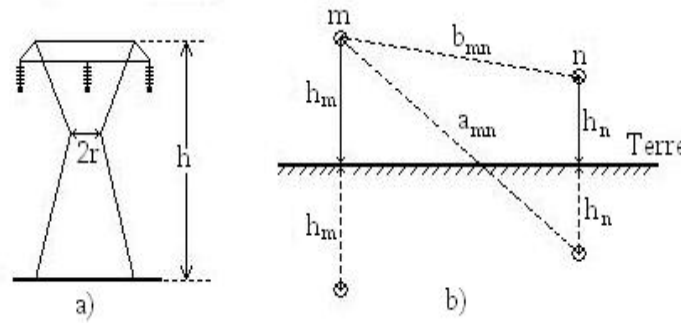


Fig. 6.4 Structure du pylône

a) Dimensions b) Disposition des câbles de garde.

L'impédance caractéristique des câbles de garde peut être estimée par :

$$\begin{cases} Z_{mm} = 60 \ln \frac{4h_{mm}}{b_{mm}} \\ Z_{mn} = 60 \ln \frac{a_{mn}}{b_{mn}} \end{cases} \quad (6.3)$$

h_{mm} et b_{mm} : sont la hauteur et le diamètre du conducteur en mètre;

b_{mn} et a_{mn} : sont définis dans la figure 6.4.b.

L'impédance totale Z_s de tous les câbles de garde.

$$Z_s = \frac{1}{\sum (\text{tous les élément de } [Y]_m)} \quad (6.4)$$

6.4.4 Amorçage des isolateurs.

La fonction principale des isolateurs est d'assurer l'isolement des conducteurs sous tension par rapport à des masses qui sont généralement chargées du rôle de support. Leurs caractéristiques dépendent en particulier [6.23] :

- ☞ de la tension nominale du réseau;
- ☞ du courant de court-circuit du poste ;
- ☞ des caractéristiques mécaniques recherchées;
- ☞ de la sévérité de pollution du site.

La tension de tenue d'un isolateur est le niveau maximal de tension que puisse supporter une isolation sans provoquer de décharge disruptive. Dans ce travail, les isolateurs sont représentés par des interrupteurs TACS contrôlés à travers MODELS [6.24]. Pour une modélisation précise, la caractéristique tension-temps des isolateurs est représentée par le modèle CIGRE comme étant une fonction de la longueur de l'isolateur [6.6, 6.22, 6.25]. La tension d'amorçage de l'isolateur peut être calculée en utilisant l'équation (6.5) durant la simulation et comparée à la tension actuelle aux bornes de l'isolateur. Le temps de début de la caractéristique tension-temps doit être synchronisé avec l'instant où le choc de foudre frappe le câble de garde ou le sommet du pylône. L'amorçage de l'isolateur aura lieu au moment où la tension à ses bornes dépasse la caractéristique tension-temps.

$$V_{FO}(t) = \left(400 + \frac{710}{t^{0.75}} \right) W \quad (6.5)$$

Où: V_{FO} : tension d'amorçage, kV ; W : longueur de l'isolateur, m et t : temps à l'amorçage, μs

Le tableau 6.2 donne les paramètres essentiels des isolateurs utilisés dans les lignes connectées au poste d'El-Hassi.

Ligne	Type	Nbr	Ligne de fuite (mm)	Pas (mm)	D (mm)	L _{tot} (m)	U (kV)
Msila ₂	F16p; E160/70	14	545	170	320	2,38	1355
Msila ₁	F12N; CT245	16	315	146	255	2,34	1165
Derguina	CT245	16	315	146	255	2,34	1165
OAT	CT245	16	315	146	255	2,34	1165
Jijel	F12N	16	315	146	255	2,34	1165

Tab. 6.2 Données techniques des isolateurs utilisés.

6.4.5 Transformateurs de puissance.

Le transformateur est l'appareil le plus sensible dans le poste. Les constats pratiques montrent que ce sont les spires des enroulements du transformateur qui sont le plus souvent endommagées par le claquage de leur isolation entraînant ainsi la mise hors service de l'appareil.

Les phénomènes liés à une surtension de foudre ou autre surtension rapide, se déroulent à très grande vitesse agissant sur le transformateur comme des phénomènes oscillatoires de très haute fréquence, de ce fait, la réactance inductive des transformateurs devient très importante tandis que la réactance capacitive diminue. Par suite nous pouvons admettre que lors des surtensions de foudre, le courant passe seulement à travers les réactances capacitives. Cela signifie que le transformateur peut être considéré comme une capacité localisée [6.6, 6.11, 6.26, 6.27]. Les transformateurs ont une puissance de 120MVA la valeur de cette capacité est comprise entre 1000 et 3000 pF. De même, nous pouvons représenter les transformateurs de mesure par leurs capacités parasites. La valeur généralement admise tourne autour de 500pF [6.28, 6.29]

6.4.6 Parafoudres à oxyde métallique.

Plusieurs travaux avaient représenté les parafoudres à oxyde métalliques seulement par leurs caractéristiques statiques non-linéaires (V-I) [6.6, 6.9, 6.10, 6.12 – 6.14, 6.29, 6.30]. Dans ce modèle la caractéristique V-I est représentée par un nombre arbitraire de segments exponentiels [6.7 – 6.8] (voir chapitre 3) où l'équation de chaque segment est défini par:

$$i = p \left(\frac{v}{V_{ref}} \right)^q \quad (6.6)$$

Avec

i , v : Courant et tension du parafoudre respectivement;

p , q et V_{ref} : sont des constantes propres de l'appareil.

Cependant, l'analyse des données collectées sur les caractéristiques des parafoudres à oxyde métallique indique que ces appareils avaient aussi des caractéristiques dynamiques, très importants lorsqu'il s'agit des études de foudre ou d'autres ondes à front rapide, et que l'utilisation de ce modèle n'est pas adéquate pour ce genre de contraintes [6.5, 6.6, 6.11, 6.15, 6.32 – 6.42].

Dans ce travail, une version modifiée du modèle IEEE est proposée (figure 6.5). Les paramètres de ce modèle ont été optimisés en utilisant les algorithmes génétiques (chapitre 4).

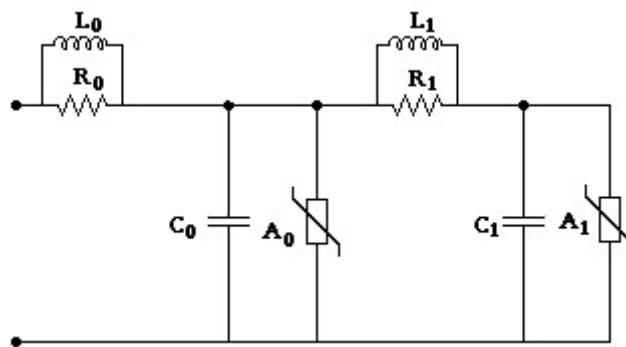


Fig. 6.5 Modèle dynamique modifié du parafoudre.

Le parafoudre installé dans le poste est de type SIEMENS 3EP2 dont les caractéristiques techniques sont résumé dans tableau 6.3.

3EP2	1/2 μ s		8/20 μ s			30/60 μ s	
I (kA)	10	5	10	20	40	1	2
U_{res} (kV)	491	435	463	519	579	384	403

Tab. 6.3 Données techniques du parafoudre SIEMENS.

Les paramètres identifiés par le programme informatique développé dans le cadre de cette thèse sont résumés dans le tableau 6.4.

R_0	R_1	L_0	L_1	C_0	C_0
318,55	205,55	0,668	4,80	19,70	19,90
p_0	p_1	q_0	q_1	V_{ref0}	V_{ref1}
4,61	204,00	20,93	14,93	562,39	548,74

Tab. 6.4 Paramètres du modèle optimisés par l'AGD.**6.4.7 Influence des longueurs des connexions.**

Les courants de foudre se déchargeant par l'inductance des fils de connexion produisent une tension qui s'ajoute à la tension de décharge de parafoudre. La longueur des connexions à prendre en considération est la somme des longueurs entre le parafoudre et le raccordement HT plus la longueur de la connexion "terre" du parafoudre à la prise de terre de l'équipement. La diminution des longueurs de raccordement assure une meilleure protection. Dans le présent cas, la longueur de fils de connexion entre la phase et le parafoudre est de 8,96m faisant un angle α de 90° et la longueur de fils à la masse est de 2,8m. Il a été montré (chapitre 5) que l'inductance de ces fils de connexion peut être déterminée d'une manière exacte en utilisant les formules développées.

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau 6.5

	L_s	M_{s12}	M_{s13}	L_c	M_{c12}	M_{c13}
Inductances, μH	3.108	0.181	0.092	12.031	1.552	0.886

Tab. 6.5 Inductances des conducteurs de connection des parafoudres**6.4.8. Les jeux de barres omnibus.**

Les jeux de barres omnibus sont de type AGS. D'une façon générale, ils sont réalisés en alliage d'aluminium AGS/L 120 / 104 (diamètre extérieur $\times$ diamètre intérieur en mm $\times$ mm) qui contient, outre l'aluminium, 0,6 % de silicium et 0,7

% de magnésium. Ils sont représentés par des tronçons de lignes type Clark triphasées.

Le schéma triphasé complet de ce poste est implanté dans l'EMTP (figure 6.6) pour le cas où la ligne de Msila₁/ EL-Hassi est foudroyée.

6.5 Résultats de simulation et discussion.

Cette étude a pour but essentiel d'évaluer en premier lieu les contraintes en tension dans le poste de transformation en absence des parafoudres et d'étudier en second lieu, le cas de leur présence en explicitant l'effet du point d'impact, l'effet du courant de foudre (amplitude, temps de front), l'effet de la distance de protection, l'emplacement des parafoudres et l'effet du nombre de lignes connectées au poste.

Le choc de foudre est représenté par une source de courant de 120kA et de forme d'onde 1/50 μ s frappant un câble de garde de la ligne "*M'sila₁/El-Hassi*". L'amorçage de la chaîne d'isolateurs aura lieu lorsque la tension à ses bornes aura atteint sa tension de tenue.

L'analyse de la figure 6.7 montre que les pylônes écoulent l'essentiel du courant de foudre vers la terre et que l'amplitude du courant écoulé par le premier pylône est plus importante que celle écoulé par les autres pylônes. Alors que seulement moins de 15kA arrivent au poste figure 6.8.

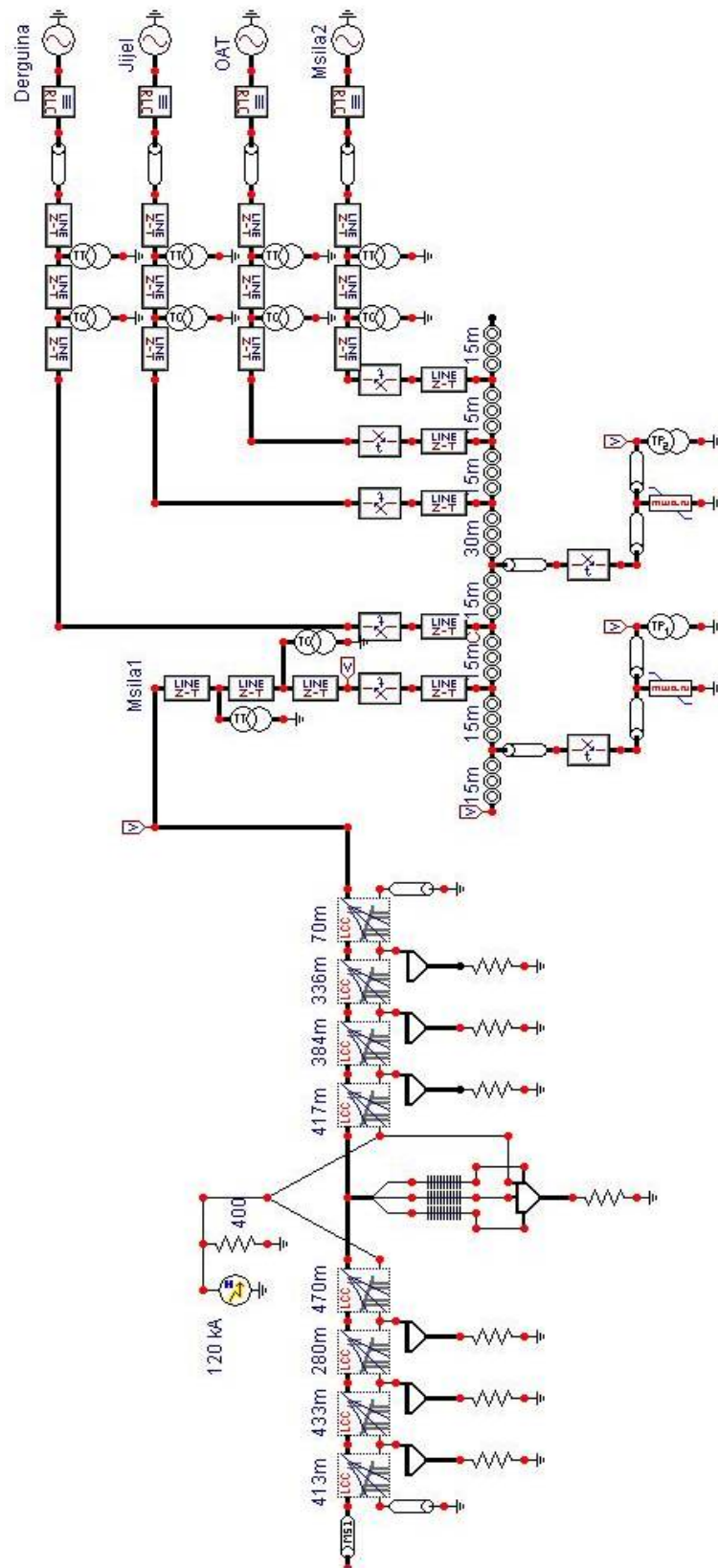


Fig.6.6 Schéma du poste implanté dans l'EMTP (cas de Msila₁).

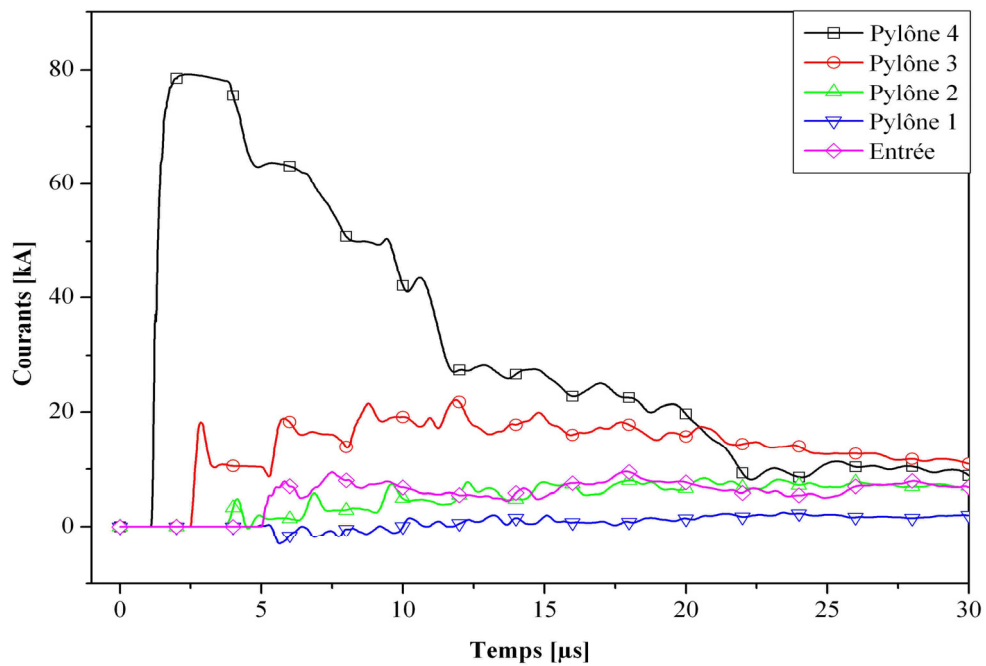


Fig. 6.7 Courants écoulés par les différents pylônes.

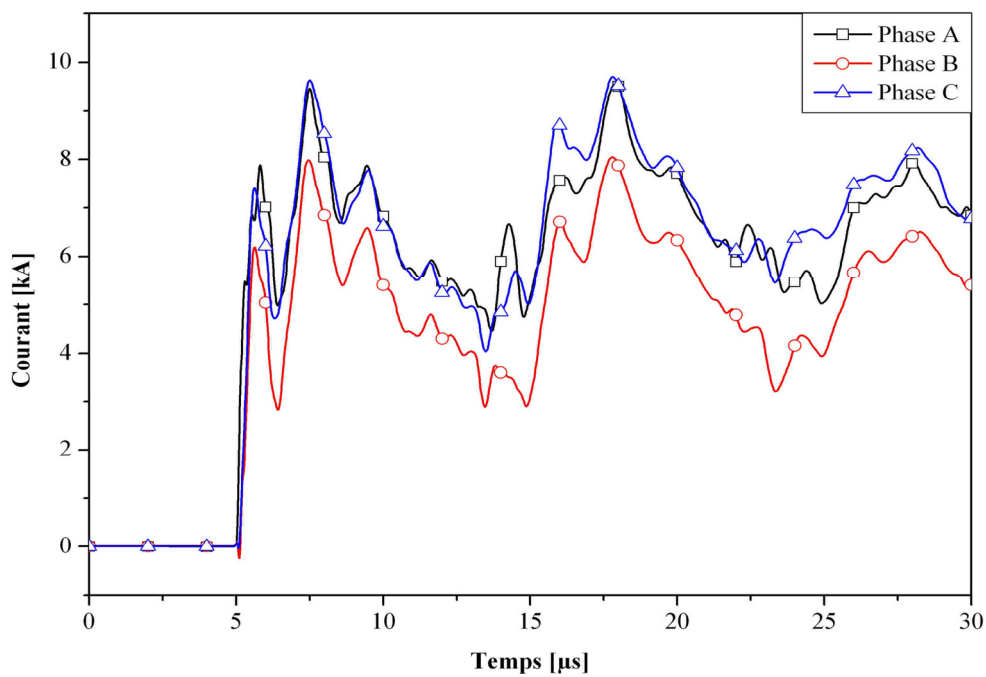


Fig. 6.8 Courant entrant au poste.

6.5.1 Les contraintes subit par le poste de transformation.

Les amplitudes des surtensions subies par le poste de transformation sont étroitement liées aux temps de front, aux de nombre de lignes connectées et à la position du point d'impact. L'amplitude du courant de foudre (figure 6.9) engendre des surtensions de plus en plus dangereuses, Le temps de montée T_f de courant influe d'une manière remarquable sur les tensions des deux transformateurs; la forme d'onde choisie est $T_f/50 \mu s$ où T_f est variée entre 1 et $10 \mu s$. l'amplitude de courant restant constante (120kA). Toutes les lignes sont maintenues connectées. La figure 6.10 indique que les contraintes de foudre avec des temps de front rapide sont les plus contraignantes pour le matériel du poste.

Le nombre de lignes connectées au poste est un autre facteur qui influe sur les amplitudes enregistrées. Dans le but d'élucider cet effet nous avons varié le nombre de lignes connectées de 1 à 5, toutes choses constantes par ailleurs (i. e. 120kA, 2/50 μs).

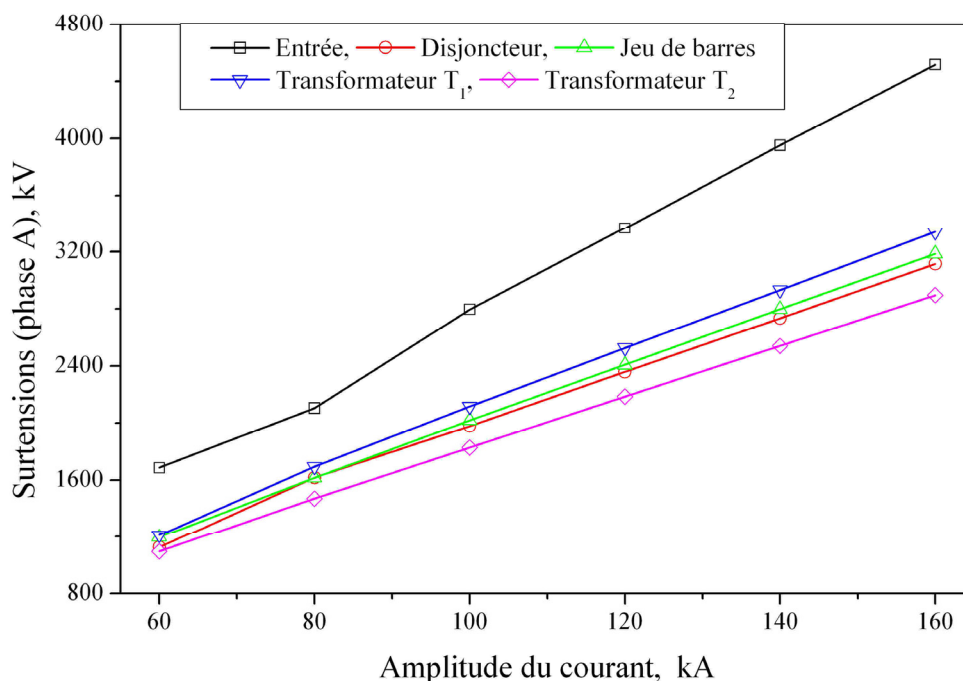


Fig. 6.9 Effet de l'amplitude du courant de foudre.

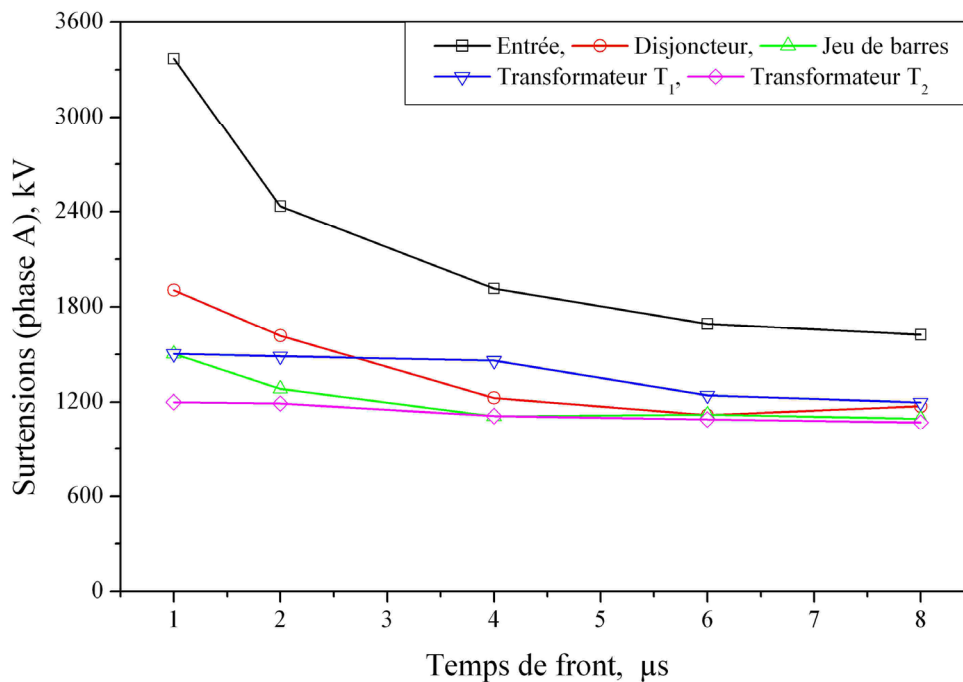


Fig. 6.10 Effet du front du courant de foudre.

La figure 6.11 montre les variations des tensions à l'entrée, aux disjoncteurs, au jeu de barre et des deux transformateurs. Il est clair qu'en augmentant le nombre de lignes connectées les tensions enregistrées sont de plus en plus faibles conduisant à une meilleure protection. Un autre effet que nous jugeons très important est la position du point d'impact. En faisant varier la position du point d'impact entre le pylône N°1 et le pylône N°7 en gardant le même choc et toutes les lignes connectées, les contraintes (figure 6.12) subies par le poste sont de plus en plus importantes en se rapprochant de celui-ci. De ce qui précède, les valeurs enregistrées sont très dangereuses pour le poste et à partir de là il est impératif d'installer des parafoudres pour assurer sa protection.

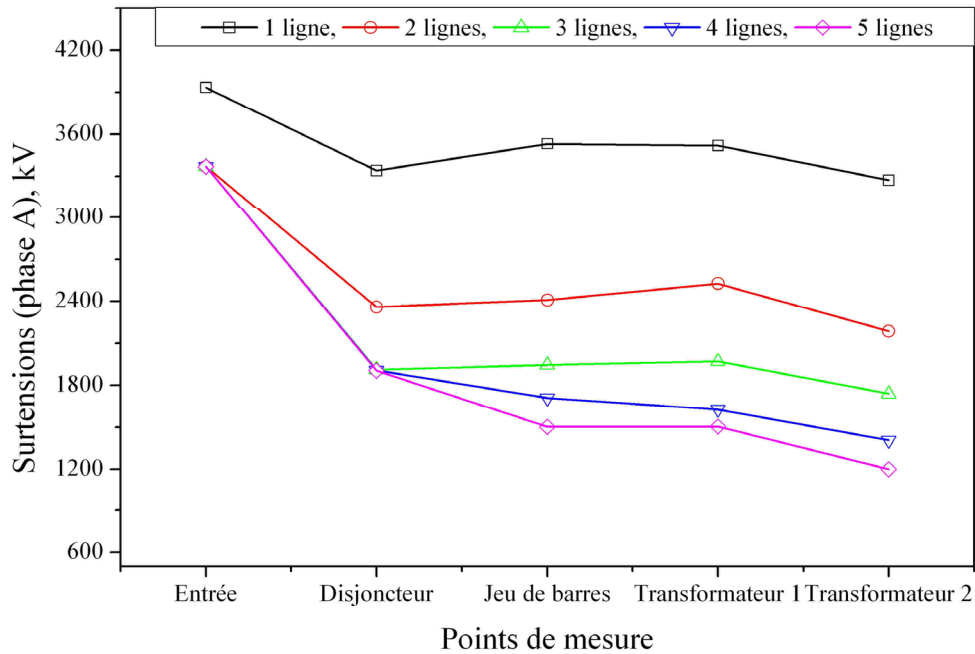


Fig. 6.11 Effet du nombre de lignes connectées

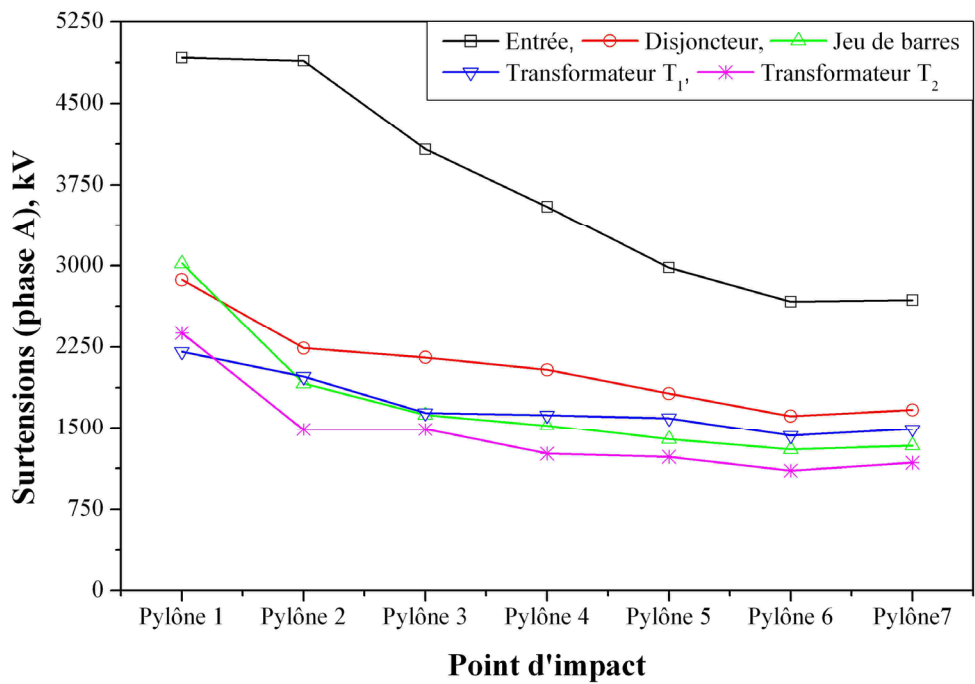


Fig. 6.12 Effet du point d'impact du coup de foudre

6.5.2 Comparaison entre le modèle statique et dynamique.

Comme il a été signalé aux paragraphes précédents, deux modèles de parafoudres peuvent être utilisés; le modèle statique et le modèle dynamique. Le premier modèle a été jugé inadéquat dans le cas de contraintes transitoires à front rapide. Pour justement étudier la différence entre ces deux modèles, un exemple est montré dans la figure 6.13. Un courant de foudre de 120kA en onde 2/50 μ s frappe le câble de garde du 4^{ème} pylône, les transformateurs T_1 et T_2 sont protégés par des parafoudres installés à 8,5m. Les résultats obtenus montrent bien que les surtensions prédites par le modèle dynamique sont plus importantes que celles prédites par le modèle statique ce qui est en parfait concordance avec le comportement dynamique de ces éléments discutés précédemment. A partir de là tous les futurs résultats seront relatifs au modèle dynamique.

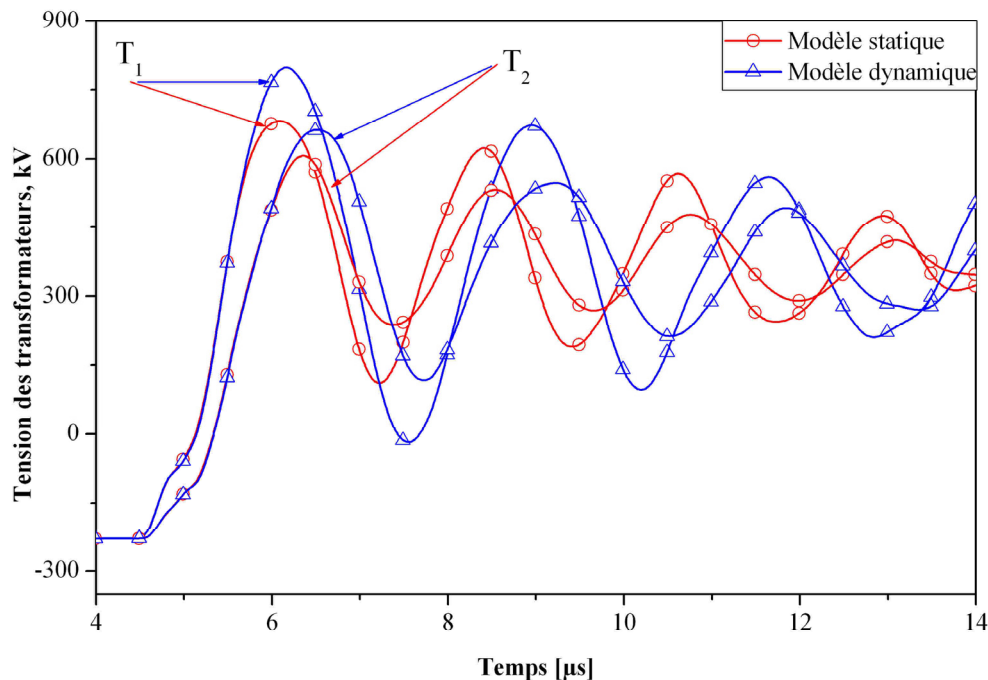


Fig.6.13 Comparaison entre le modèle statique et dynamique d'un parafoudre

6.5.3 Le courant dans les parafoudres

Les résultats de simulation sont présentés dans la figure 6.14. On remarque que la valeur du courant dans les parafoudres augmente rapidement jusqu'à quelques kA, mais reste toujours en dessous de 10 kA, ce qui est en parfaite concordance avec un fonctionnement normal des parafoudres.

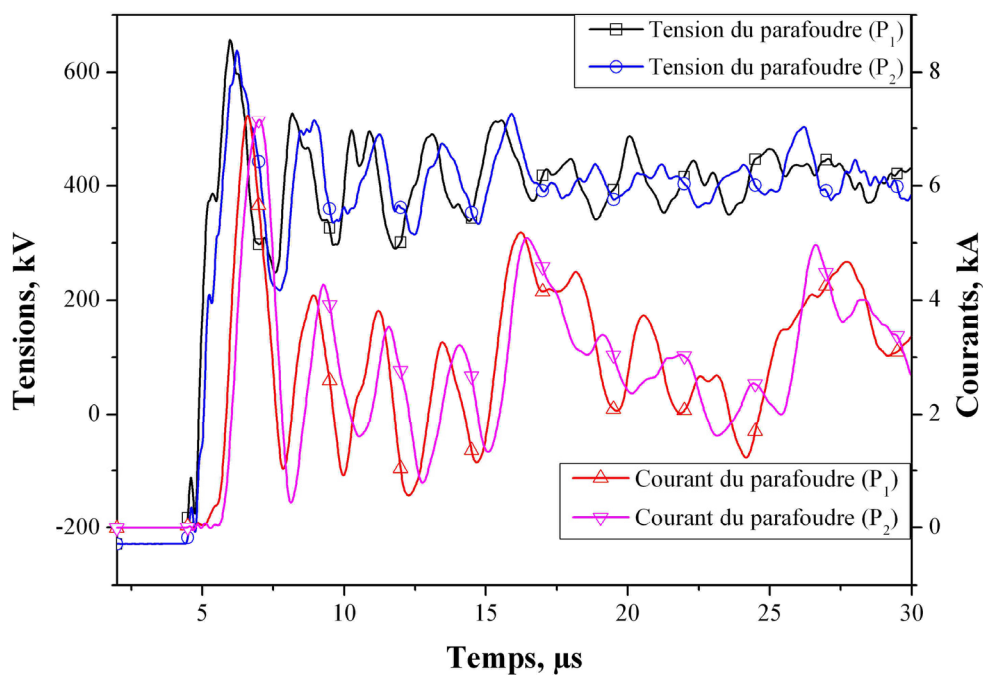


Fig. 6.14 Tension et courants des deux parafoudres.

6.6 Performance de protection des parafoudres ZnO

6.6.1 L'effet de la distance de protection

L'espace disponible au poste d'EL-Hassi est de 25m selon le plan de masse. La position des parafoudres par rapport aux transformateurs peut être varié entre 2 et 23m. Dans ce cas un courant de foudre d'environ 120kA en onde 2/50µs est

appliqué au 4^{ème} pylône et toute les lignes sont maintenues connectées. Les résultats de simulation obtenus sont montrés dans la figure 6.15. Ces résultats montrent que cette distance joue un rôle très important dans la qualité de protection. En effet, les parafoudres doivent être installés le plus proche possible des transformateurs pour balancer parfaitement les pics de surtensions en ces points à des niveaux favorablement bas.

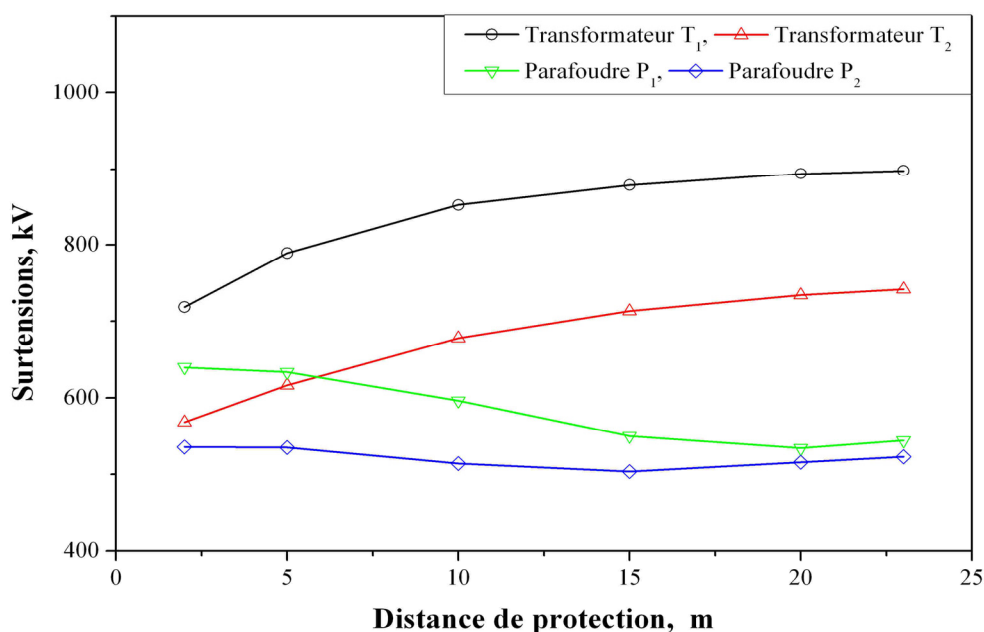


Fig. 6.15 Effet de la distance de protection.

6.6.2 Effet du courant de foudre.

L'effet de l'amplitude du courant de foudre est examiné avec et sans protection par parafoudres en utilisant la même forme d'onde (2/50 μ s). Les cinq lignes sont toutes connectées, les parafoudres sont seulement installés au niveau des transformateurs à une distance de 8,5m (Cas existant au poste actuellement). Différentes amplitudes du courant de foudre sont appliquées (60, 80, 100, 120, 140 et 160 kA). Le cas sans protection est introduit pour but de comparaison. Les

résultats de simulation montrés dans la figure 6.16 indiquent que l'amplitude du courant de foudre affecte la distribution des surtensions dans le poste de transformation. Plus importante est l'amplitude du courant de foudre plus sévères sont les contraintes sur les équipements du poste de transformation. De plus les résultats montrent que le comportement dynamique des parafoudres doit être pris en considération dans toutes les études de coordination des isolements dans la conception des nouveaux postes de transformation et éventuellement pour parvenir à une protection adéquate contre les surtensions de foudre des postes de transformation existants. En second lieu l'amplitude est fixée à 120 kA. La forme d'onde choisie est $T_f/50 \mu s$ où T_f est variée entre 1 et 8 μs . La figure 6.17 montre les résultats de simulation et une fois de plus le cas de l'absence des parafoudres est introduit pour but de comparaison. Nous pouvons remarquer que les parafoudres fonctionnent fréquemment pour des chocs rapides.

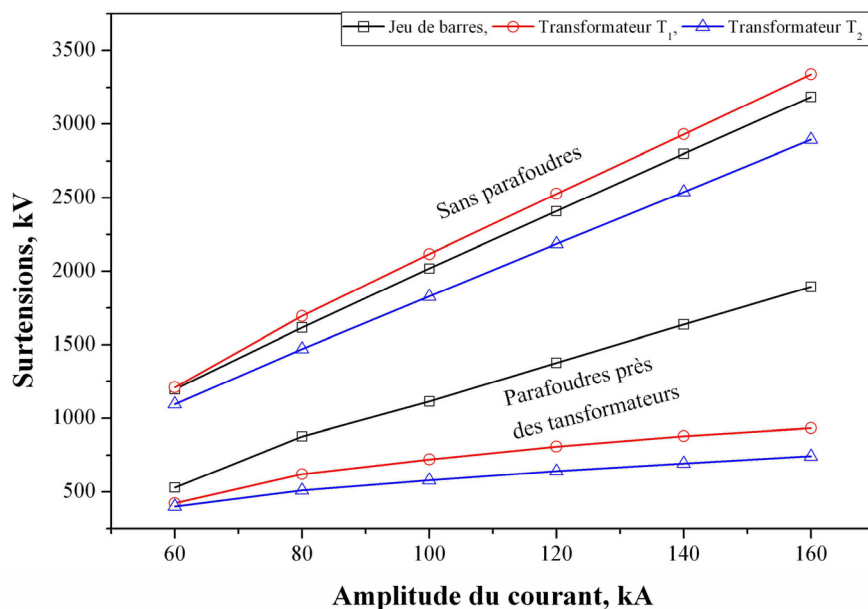


Fig.6.16 Effet de l'amplitude de courant.

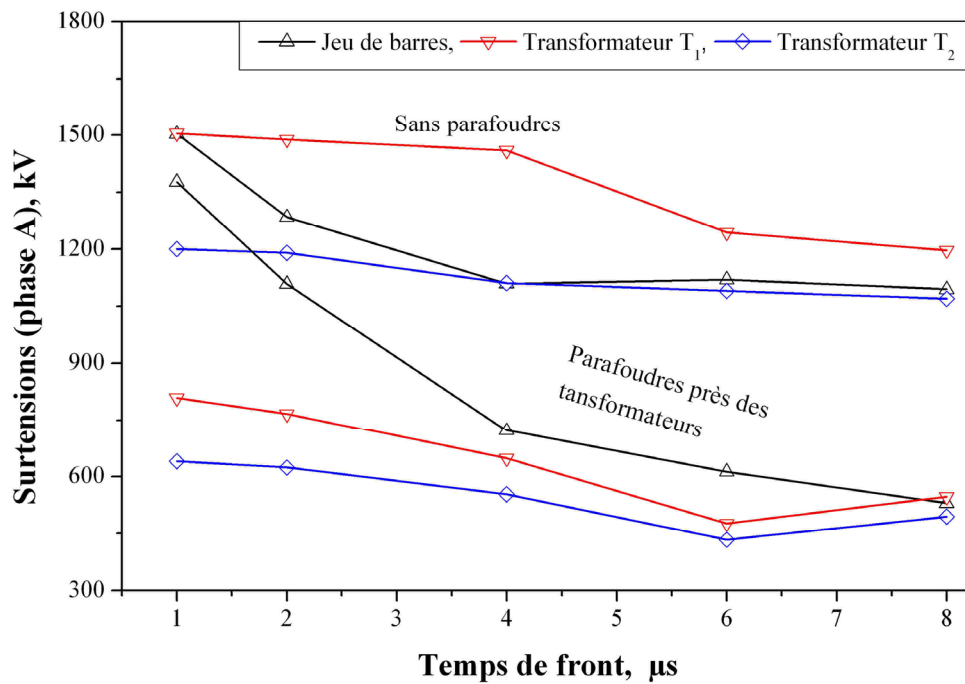


Fig.6.17 Effet du temps de front

6.6.3 Effet du nombre de lignes connectées.

Dans cette investigation, le nombre de lignes connectées au poste est varié entre 1 et 5. Le choc de courant est de 120kA en onde 2/50 μs et les parafoudres installés à une distance de 8,5m des transformateurs. La figure 6.18 montre les variations des tensions à l'entrée, aux disjoncteurs, au jeu de barres et aux deux transformateurs en fonction du nombre de lignes connectées au poste. Le cas de l'absence des parafoudres est introduit pour but de comparaison. Il est clair qu'en augmentant le nombre de lignes connectées au poste, les tensions enregistrées sont de plus faibles valeurs conduisant à une protection meilleure et plus facile.

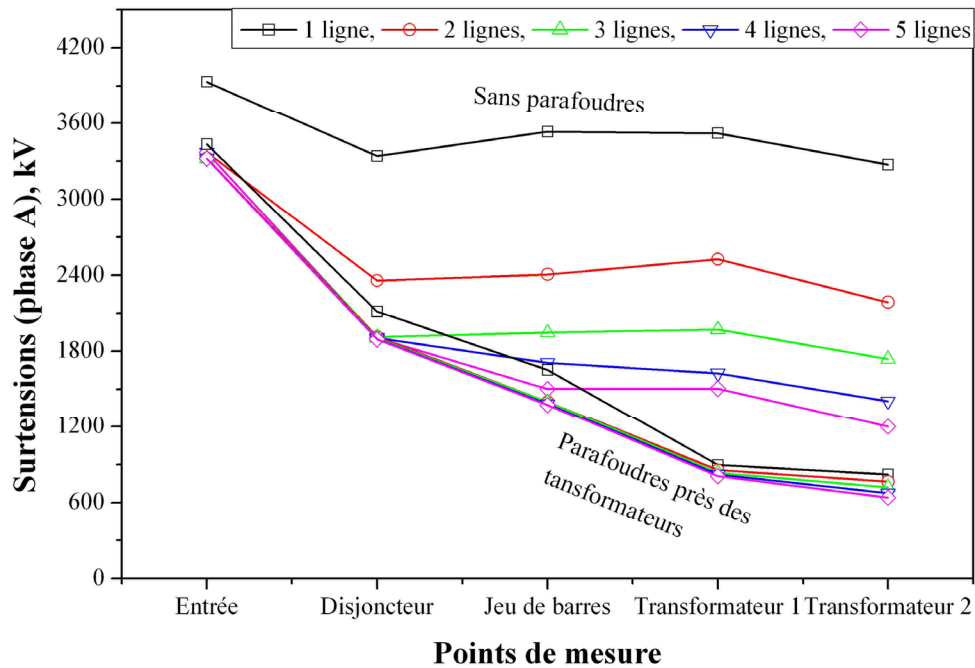


Fig. 6.18 Effet du nombre de lignes connectées aux postes.

6.6.4 Emplacement des parafoudres.

Les résultats de simulation précédents montrent que l'installation de parafoudres ZnO au niveau des transformateurs seuls n'apporte pas une solution rigoureuse. En effet cette protection n'est que locale et les équipements raccordés en d'autres points du poste ne sont pas protégés. Par suite une investigation visant à étudier l'influence de l'emplacement des parafoudres sur les amplitudes des surtensions et donc réaliser une optimisation de la protection est plus que nécessaire. Pour cela trois alternatives d'emplacement de parafoudres ont été réalisées :

1. au niveau des deux transformateurs seulement;
2. au niveau des deux transformateurs et chaque section de jeu de barre;
3. au niveau des deux transformateurs et l'entrée de poste.

Pour ces alternatives on enregistre les tensions maximales en différents points du poste (l'entrée de la ligne, le disjoncteur, le jeu de barres et les deux transformateurs). Les résultats obtenus sont montrés dans la figure 6.19. La troisième alternative apporte une nette amélioration de la qualité de protection. En effet, une répartition de tension uniforme et optimale en différents points du poste est obtenue. On donne dans la figure 6.20 les formes d'onde obtenues dans ce cas.

6.6.5 Effet du point d'impact.

L'effet du point d'impact du coup de foudre a été aussi étudié en le déplaçant entre le pylône N°1 et le pylône N°7. Le courant de foudre est maintenu constant (120kA, 2/50 μ s), toutes les lignes étant connectées et la distance de séparation transformateur-parafoudre est prise égale à 8,5m.

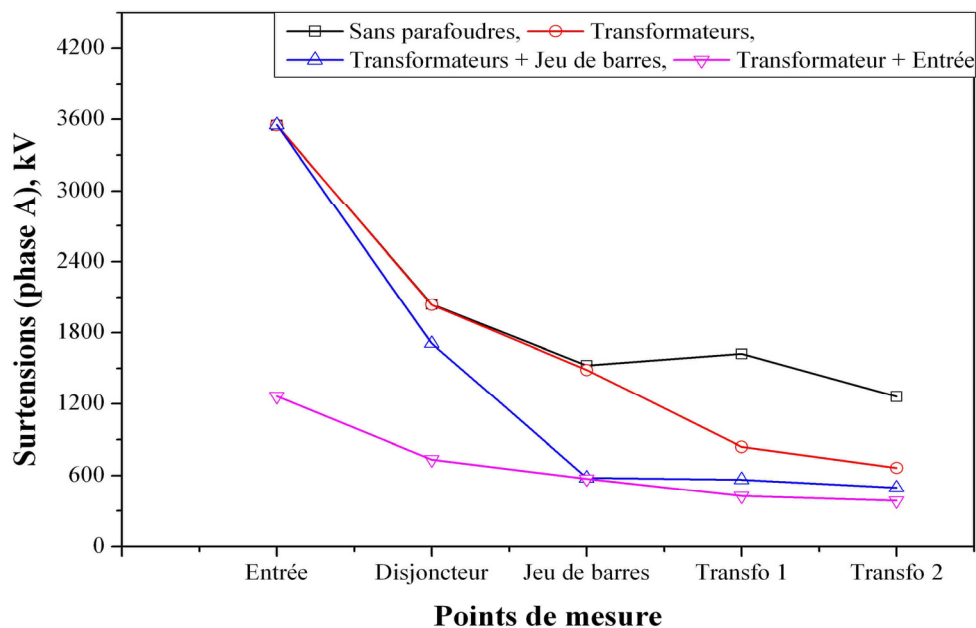


Fig.6.19 Effet de la position des parafoudres sur les surtensions.

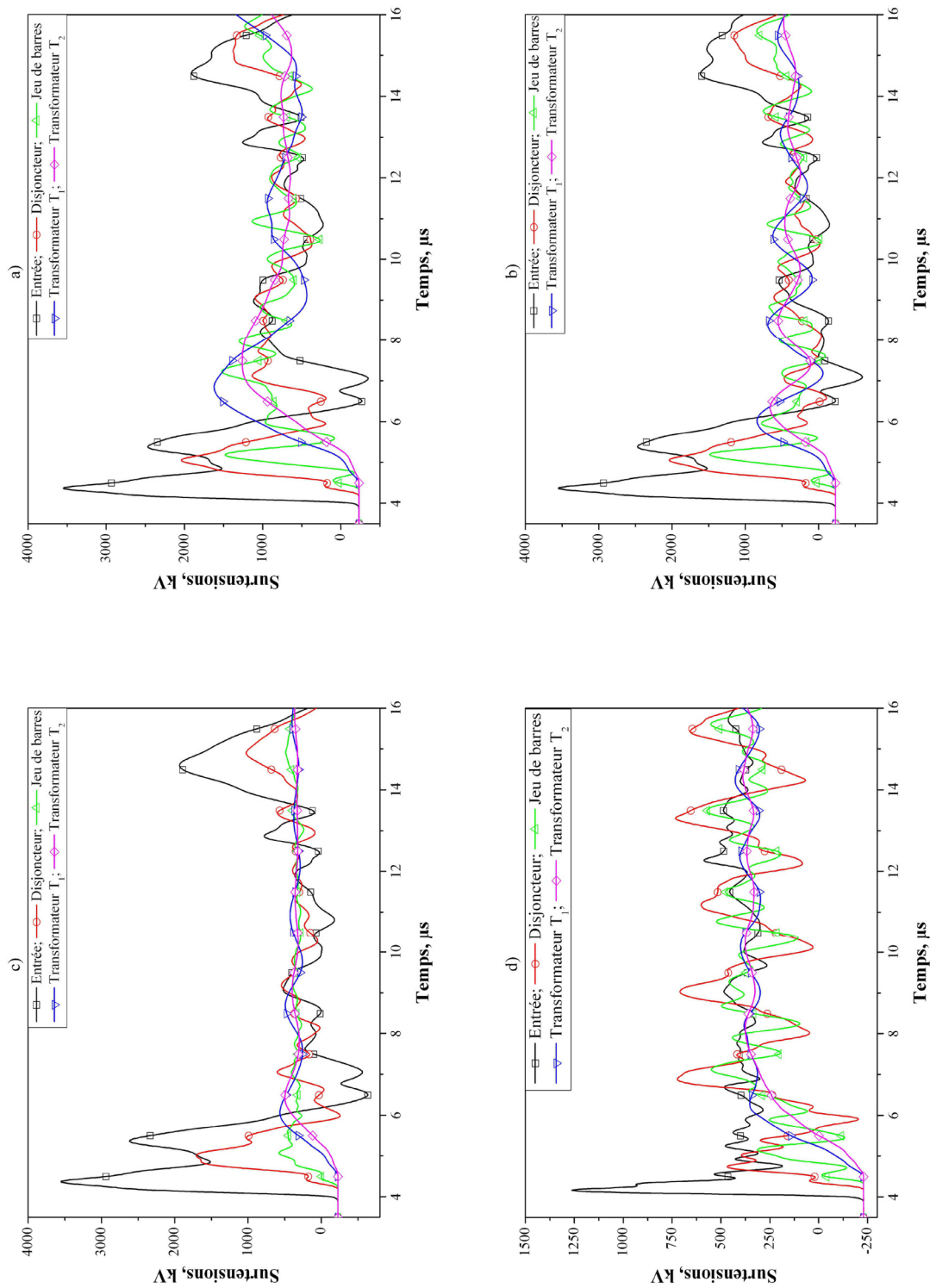


Fig. 6.20 Exemple de formes d'ondes de la phase A

a) Absence de parafoudre; b) Transformateurs;

c) Transformateurs + jeu de barres ; d) Transformateurs + Entrée

La figure 6.21 présente les variations de la tension en différents points du poste de transformation en fonction de la position du point d'impact, la tension à l'entrée du poste est introduite pour but de comparaison. Il est clair que le cas où le coup de foudre frappe le pylône le plus proche du poste constitue le cas le plus défavorable et les parafoudres fonctionnent souvent. La tension des deux transformateurs reste pratiquement constante quelque soit la position du point d'impact dans le cas de présence des parafoudres. Cela justifie bien que les parafoudres remplissent la fonction qui leur a été assignée.

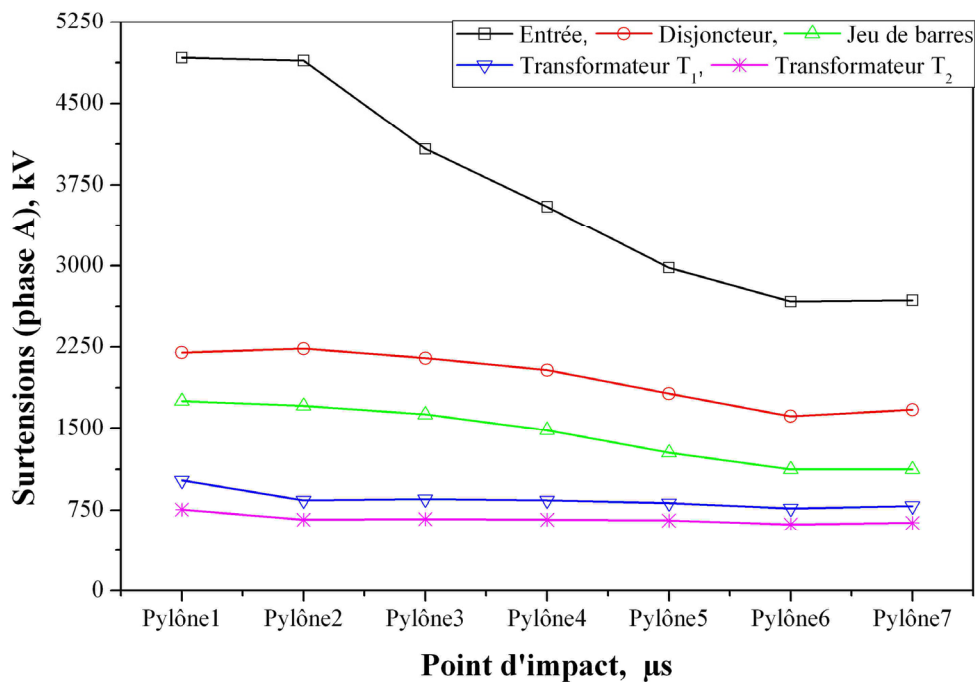


Fig.6.21 Effet de point d'impact.

6.7 Conclusions

Dans cette partie l'analyse des performances dynamiques de protection des parafoudres ZnO sur un réseau HT est réalisée. Les caractéristiques dynamiques en conjonction avec l'effet des conducteurs de connexion des parafoudres à

oxyde métallique ont été prises en considération. Une version modifiée du modèle IEEE est proposée. Ses paramètres ont été identifiés en utilisant la technique développée dans le chapitre 4. Ce modèle est utilisé pour évaluer la protection contre les surtensions de foudre dans un schéma complet triphasé d'un poste de transformation 220 kV opérationnel. Le poste de transformation EL-Hassi de la zone de Sétif a servi d'exemple. Les résultats indiqués montrent que la majeure partie du courant du foudre a été écoulee vers la terre par les pylônes de la ligne foudroyée, alors que seulement quelques kA arrivent au poste.

Les effets du courant de foudre (amplitude et forme d'onde) avec la position du point d'impact doivent être pris en considération dans les études de la protection contre les surtensions et de coordination des isolements.

En outre, une protection efficace et convenable exige que les parafoudres soient installés le plus proche des transformateurs. Le phénomène d'auto-protection a été aussi étudié et une amélioration de la qualité de protection des postes de transformation a été obtenue. Dans le but de garantir une meilleure protection du poste de transformation d'EL-Hassi on a suggéré d'installer des parafoudres ZnO à son entrée et les résultats obtenus montrent une répartition optimale de la tension en différents points du poste de transformation.

6.8 Références

- [6.1] D. Faluchiron, *Surtensions et Coordination de l'Isolement*, Cahier Technique n° 181, Schneider electric, édition 1992.
- [6.2] B. Noblat, *La foudre et les installations électriques HT*, Cahier Technique n° 168, Schneider electric, édition 1993.
- [6.3] Alain Sabot, Jean Michaud, *Lignes et postes: Choix et coordination des isolements*, Technique de l'Ingénieur D 4750, 2000.

- [6.4] W.J. Lannes, Herman Schneider, Matt Spading, *Performance Of Uprated Substations In Contaminated Environments*, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 13, No. 4, pp 1143-1156, 1998.
- [6.5] S. Tominaga, K Azumi, Y. Shibuya, M. Imataki, Y. Fujiwara and S. Nichida, *Protective performance of metal oxide surge arrester based on the dynamic v-i characteristics*, IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-98, pp. 1860-1871, 1979.
- [6.6] Task Force of the IEEE Modelling and Analysis of System Working Group, *Modeling Guidelines for Fast Front Transients*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.11, No.1, pp. 493-506, 1996.
- [6.7] Electromagnetic Transients Programme (EMTP), *Rule Book*, Canadian / American EMTP User Group, 1987-92.
- [6.8] Electromagnetic Transients Programme (EMTP), *Theory Book*, Canadian / American EMTP User Group, 1987-92.
- [6.9] L.Kocis, M.Svancar, et al, *Fast transient overvoltages in substation* 10th International Symposium on high voltage engineering, 1997.
- [6.10] M. P. Pereira, *Protection of air insulated substation against lightning overvoltages*, European EMTP-ATP Users Group Meeting, 1997.
- [6.11] A Bayadi, N. Harid and K. Zehar, *Dynamic Surge Arrester Protection Performance on high voltage systems using EMTP*, *39th International Power Engineering Conference (UPEC 2004)*, UWE Bristol UK, pp 118-122, 2004.
- [6.12] A. R. Hileman, *insulation coordination of air insulated station*, in *Surges in high voltage networks*, ed. by Ragaller, Plenum press, London, pp 323-344, 1980.

- [6.13] A. Schei, *Overvoltage protection and insulation coordination of GAS insulated substation*, in *Surges in high voltage networks*, ed. by Ragaller, Plenum press, London, pp 345-405, 1980.
- [6.14] Y. Kawaguchi, S. Kojima and I. Ohshima, *Practical protection of GIS against lightning surge*, in *Surges in high voltage networks*, ed. by Ragaller, Plenum press, London, pp 407-418, 1980.
- [6.15] Hileman, J. Roguin, K. H. Weck, *Protection performance of metal oxide surge arresters*, *Electra* No. 133, pp 132-143, 1990
- [6.16] Babuder, M.; Kenda, M.; Kotar, P.; Brocard, E.; Tartier, S.; Joulie, R.; Sadovic, S.; Lightning performance improvement of 123 kV transmission line by use of line surge arresters Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering, Vol. 2, pp250 – 253, 1999.
- [6.17] Orille-Fernandez, A.L.; Rodriguez, S.B.; Gotes, Ma.A.G.; Optimization of surge arrester's location, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.19, Issue:1, pp145-150, 2004.
- [6.18] Tarchini, J.A.; Gimenez, W.; Line surge arrester selection to improve lightning performance of transmission lines, *Power Tech Conference Proceedings*, 2003 IEEE Bologna , Vol.2 , 2003.
- [6.19] Mamis, M.S.; Computation of electromagnetic transients on transmission lines with nonlinear components, *IEE Proceedings Generation, Transmission and distribution*, Vol.150, Issue: 2, pp 200 – 204, 2003.
- [6.20] F. Heidler, J.M. Cvetić, B. V. Stanić, *Calculation of lightning current parameters*, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.14, n° 2, pp 399 – 404, 1999.

- [6.21] J. G. Anderson, *Surge impedances of shield wires and voltage coupled to the phase conductors*, Transmission line reference book 345 kV and above, second edition, Appendice 12.3, pp 578-589, 1982.
- [6.22] J. G. Anderson, *Lightning Performance of Transmission Lines*, Transmission line reference book 345 kV and above, second edition, pp 545-578, 1982.
- [6.23] IEEE Std C62.22, IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems, 1991.
- [6.24] Laurent Dubé, *MODELS in ATP*, Language manual, 1996.
- [6.25] IEEE Working group report, *Estimating lightning performance of transmission lines II- Updates to Analytical Models*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.8, n° 3, pp 1254 – 1267, 1993.
- [6.26] A. Greenwood, *Electrical transients in power systems*, New York: Wiley & sons, Inc, first edition, 1971.
- [6.27] A. Greenwood, *Electrical transients in power systems*, New York: Wiley & sons, Inc, second edition, 1991.
- [6.28] Dennis Carroll, *Introduction to EMTP, data structure basic circuit examples*, University of Florida, 1995.
- [6.29] D. Agoris, M. Psalidas, E. Pyrgioti, C. Karagianopoulos, *ATP-EMTP models for the estimation of LEMP hazard for electronic systems in high voltage sub station using ATPDRAW*, 26th international conference on lightning protection, paper 3b. 2, Poland, 2002.
- [6.30] M. S. Savić, *Engineering method for high voltage substation lightning performance estimation*, IEE proceedings vol 136, n°4, pp 222-229, 1989.
- [6.31] Bargigia, A, de Nigris, M & Pigni, A, *The response of metal oxide resistors for surge arresters to steep front current pulses*, 5th ISH, paper 82.01, Braunschweig, 1987.

- [6.32] W. Breilmann, *Protective characteristics of complete zinc-oxide arresters and of single elements for fast surges*, 5th ISH, Paper 82.04, Braunschweig, 1987.
- [6.33] W. Schmidt, J. Meppelink, B. Richter, K. Feser, L. Kehl and D. Qiu, *Behaviour of MO- surge arrester blocks to fast transients*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, N° 1, pp. 292-300, 1989.
- [6.34] J. Ozawa, K. Ooishi, K. Shindo, S. Shirakawa, K. Nakano, A. Mizukoshi, S. Maruyama, *Fast transient response and its improvement of metal oxide surge arresters for GIS*, 6th ISH, paper 26.03, New Orleans, 1989.
- [6.35] Miller, D.B.; Fan, H.B.; Barnes, P.R.; *The response of MOV and SiC arresters to steep-front longer duration current pulses* IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.6 , Issue: 2, pp 666 – 671, 1991.
- [6.36] IEEE Working Group 3.4.11, *Modeling of metal oxide surge arresters*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, N° 1, pp. 302-309, 1992.
- [6.37] I. Kim, T. Funabashi, H. Sasaki, T. Hagiwara, M. Kobayashi, *Study of ZnO arrester model for steep Front Wave*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, N°2, pp. 834-841, 1996.
- [6.38] T. Hagiwara, T. Funabashi, H. Watanabe, N. Takeuchi, T. Ueda, *A Metal-Oxide Surge Arrester Model with Active V-I Characteristics*; Electrical Engineering in Japan, Vol. 121, No. 1, pp 35-42, 1997.
- [6.39] A. Haddad and P. Naylor, *Dynamic response of ZnO arresters under high amplitude fast impulse currents*, International power electric conference, Vol1, pp. 292-297, 1999.
- [6.40] P. Pinceti, M. Giannettoni, *A simplified model for zinc oxide surge arresters*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, N° 2, pp. 393-398, 1999.

- [6.41] F. Fernandez, R. Diaz, *Metal oxide surge arrester model for fast transient simulations*, paper 144, International conference on power system transients, IPST'01, 2001.
- [6.42] Magro, M.C.; Giannettoni, M.; Pinceti, P.; *Validation of ZnO surge arresters model for overvoltage studies*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.19, Issue: 4, pp1692-1695, 2004.

Chapitre 7
Conclusion générale
et recommandations

Chapitre 7

Conclusions générales et recommandations

Le travail exposé dans cette thèse concerne l'étude des performances de protection des parafoudres à oxyde métallique (ZnO) lorsque des surtensions transitoires à front rapide sont présentes. Les travaux menés par des groupes de recherche à travers le monde indiquent que les parafoudres à oxyde métallique ont des caractéristiques dynamiques qui dépendent de la fréquence et qui sont très importantes lorsqu'il s'agit des études de foudre ou d'autres ondes à front rapide. Ces caractéristiques dynamiques font que la tension de décharge du parafoudre à oxyde métallique augmente, lorsque le temps de front du courant de décharge diminue. Cette tension de décharge atteint son maximum avant que le courant de décharge du parafoudre atteigne le sien. Typiquement, la tension résiduelle prédite pour une impulsion de courant ayant un temps de front égale à $1\mu\text{s}$ est de 6–10% supérieure à celle prédite pour un courant de choc ayant un temps de front égale à $8\mu\text{s}$. Pour des temps de montée plus longs se rangeant entre 45 et $60\mu\text{s}$, la tension est de 2 à 4% inférieure à celle due à une impulsion de courant ayant un temps de montée de $8\mu\text{s}$.

Une modélisation correcte et adéquate de ces caractéristiques est très importante pour les études de coordinations des isolements et de la fiabilité des systèmes.

En vue d'établir une synthèse, une revue extensive des travaux publiés des facteurs importants affectant le fonctionnement des parafoudres soumis à des contraintes rapides est présentée. Les nombreux modèles à base de circuits équivalents publiés dans le but de reproduire les caractéristiques dynamiques des parafoudres à oxydes métalliques sont présentés. L'analyse et la synthèse des travaux en relation avec le

thème choisi ont été faite. Une investigation supporté par une modélisation des différents modèles pour le calcul de la réponse transitoire des parafoudres à des courants de différentes amplitudes et formes d'ondes a révéler les avantages et les inconvinients de quelques modèles acceptées au niveau international pour représenter les parafoudres à oxyde métallique lorsque ceux-ci sont soumis à des contraintes rapides. Les résultats obtenus comparés aux données expérimentales reportées sur les catalogues des constructeurs montrent que les modèles dynamiques proposés dans la littérature reproduisent d'une manière acceptable les tensions résiduelles maximales des constructeurs pour des courants et présentent une erreur relativement élevée pour d'autres. Il est conclu que le problème majeur avec ces modèles réside essentiellement dans le calcul et l'ajustement de leurs paramètres.

Dans le but de palier à ces erreurs, une nouvelle technique basée sur les algorithmes génétiques pour l'identification des paramètres des modèles de parafoudres ZnO est développée. Elle a été testée sur une version modifiée du modèle IEEE qu'on a proposé. Les résultats obtenus sont très satisfaisants et ouvre des portes pour l'identification automatique des paramètres de n'importe quel circuit équivalent. Le modèle a été ensuite implanté dans l'EMTP avec une configuration typique du schéma de protection par parafoudre dans le but de valider cette approche. Les informations sur les dimensions des parafoudres à oxyde métallique ne sont guère nécessaires.

La qualité de la technique proposée est évaluée par comparaison des valeurs mesurées (Constructeurs) avec les valeurs prédites. Le modèle IEEE modifié proposé avec les paramètres optimisés fournit une précision très élevée.

Un calcul plus exact des inductances des conducteurs de connexion et du parafoudre est développé. Tous les arrangements pratiques possibles des installations de parafoudres ont été pris en considération.

Cette étude a été faite pour justement palier aux insuffisances observées dans les travaux précédents où l'inductance était estimée en multipliant une inductance par unité de longueur par la longueur du conducteur ou par la hauteur du parafoudre. Un exemple d'application a été implanté dans l'EMTP et des résultats satisfaisants ont été obtenus. L'étude nous a permis de tenir compte de l'effet de l'angle entre le conducteur de connexion et le jeu de barres. L'effet de l'inductance des structures de parafoudres sur le problème de la protection contre les surtensions a été élucidé.

L'analyse des performances dynamiques de protection des parafoudres ZnO sur un réseau HT est réalisée. Les caractéristiques dynamiques des parafoudres à oxyde métallique ont été prises en considération. La version modifiée du modèle IEEE est utilisée. Ses paramètres ont été identifiés en utilisant la technique développée dans cette thèse. Ce modèle est utilisé pour évaluer la protection contre les surtensions de foudre dans un schéma complet triphasé d'un poste de transformation 220 kV opérationnel. Le poste de transformation EL-Hassi de la zone de Sétif a servi de cas exemple. Les surtensions résultantes en plusieurs points fondamentaux ont été évaluées et présentées. Les résultats indiqués montrent que la majeure partie du courant du foudre a été écoulee vers la terre par les pylônes de la ligne foudroyée, alors que seulement quelques kA arrivent au poste.

Les effets du courant de foudre (amplitude et forme d'onde) avec la position du point d'impact doivent être pris en considération dans les études de la protection

contre les surtensions et de coordination des isolements. En outre, une protection efficace et convenable exige que le parafoudre soit installé le plus proche du transformateur. Le phénomène d'auto-protection a été aussi étudié et participe d'une manière remarquable dans l'amélioration de la qualité de protection des postes de transformation. Cette étude a révélé que l'installation de parafoudre ZnO à l'entrée du poste de transformation d'El-Hassi est nécessaire en vue de garantir une meilleure protection. Les résultats obtenus pour ce cas montrent une répartition optimale de la tension en différents points du poste de transformation. Comme travail futur une étude sur les systèmes électriques compact est vivement recommandée. Ces derniers prennent de plus en plus l'ascendant et nécessitent une attention particulière. Une investigation sur leurs performances sous surtensions de manoeuvres et de foudre devrait se faire :

1. pour les lignes de transmission en tenant compte de l'emplacement de parafoudres ZnO le long de la ligne de transmission en incluant les cas où les parafoudres sont installés entre phase- terre et entre phase-phase.
2. pour les postes de transformations compacts

Cette étude aboutira sans doute à des résultats importants et économiquement justifiables pour les compagnies d'électricité telle que la SONELGAZ.

Annexes

Annexe A

L'ATP-EMTP : Outil de simulation dynamique des réseaux électriques

Si les lois physiques régissant le fonctionnement statique des réseaux électriques sont bien connues et permettent donc de construire un modèle mathématique précis, le fonctionnement du système en dehors de l'équilibre ne peut être décrit qu'en tenant compte du comportement dynamique des moyens de production et de la charge, souvent mal connu. En outre, l'étude des grandes perturbations conduit à analyser des fonctionnements très éloignés des conditions normales d'exploitation et exige donc des modèles dont le domaine de validité est très étendu. Malgré la difficulté intrinsèque de modélisation, le recours à la simulation dynamique est de plus en plus fréquent et nécessaire pour pouvoir satisfaire, au moindre coût, à des exigences toujours plus sévères. Cet Annexe s'est voulu pour objectif de donner un aperçu général sur les capacités de l'un des logiciels utilisés à cette fin qui est l'ATP "Alternative Transients Program" version de "ElectroMagnetic Transient Program (EMTP)" et l'utilisation des programmes de support.

A.1 Introduction

La nécessité de modéliser les réseaux pour en simuler le fonctionnement dynamique remonte sans doute aux origines des réseaux électriques eux-mêmes. Les premiers simulateurs étaient des simulateurs analogiques où des modèles réduits de réseaux (représentés par des composants élémentaires R, L, C) et de machines tournantes permettaient de mieux prévoir ou de connaître le comportement du système en régime dynamique. Ils permettaient de couvrir

certains besoins comme la mise au point ou le test d'équipements de régulation et de protection des ouvrages. De nombreux simulateurs analogiques de cette génération, fonctionnant en temps réel et pouvant comporter jusqu'à plusieurs dizaines de machines synchrones, sont toujours utilisés aujourd'hui. L'apparition des simulateurs numériques, sur ordinateur, date des années 1960.

Il faut noter que les grands incidents survenus sur les réseaux ont été des aiguillons pour que les compagnies électriques se dotent de ces outils de simulation. Les conséquences de ces incidents sont en effet gigantesques pour un pays ou une compagnie électrique. Ainsi, les incidents durant lequel les pays ont été privé de courant pendant plusieurs heures a déclenché des actions de recherche et de développement, ainsi que de formation, pour trouver des parades, et éviter qu'ils se reproduisent. Ceci a conduit au développement de plusieurs simulateurs (d'étude, de formation et de tests d'équipements).

L'ATP-EMTP (Alternative Transients Program version of the ElectroMagnetic Transients Program) est un des logiciels le plus utilisé au monde qui est très puissant dans le calcul des régimes transitoires dans les systèmes électroénergétiques. En plus du module principal de simulation, le logiciel est doté de plusieurs supports de calcul. Ces supports (routines) peuvent être utilisés pour générer les données nécessaires des modèles pour le calcul des constantes de la ligne ou encore pour la dérivation de la matrice RL couplée utilisée pour la représentation des transformateurs polyphasés à plusieurs enroulements dans les simulations temporelles. Dans la suite on présente ce logiciel et ses différentes capacités.

A.2 Modules de l'ATP-EMTP

L'ATP prédit les variables d'intérêt du réseau électriques comme étant fonction du temps, typiquement initié par des perturbations. Principalement, la règle d'intégration trapézoïdale est utilisée pour la résolution des équations différentielles du système dans le domaine temporel. Les conditions initiales non nulles peuvent être déterminées automatiquement en utilisant les solutions du régime permanent ou peuvent être données par l'utilisateur pour des composants simples.

L'ATP possède une variété importante de modèles tels que les machines tournantes, transformateurs, parafoudres, lignes de transmission et câbles souterrains. Interfaçage avec les modules programme TACS acronyme de (Transient Analysis of Control Systems) et MODELS (langage de simulation) permettant la modélisation des systèmes de contrôle et des composants avec des caractéristiques non-linéaires tels les arcs électriques et l'effet couronne. Des perturbations symétriques ou asymétriques sont permises comme les défauts, les chocs de foudre et plusieurs types de manœuvre incluant les commutations des composants de l'électronique de puissance.

A.3 Analyse transitoire des systèmes de contrôle (TACS)

C'est un module de simulation pour l'analyse temporelle des systèmes de contrôle. Il a été originellement développé pour la simulation du contrôle des convertisseurs en courant continu (HVDC). Pour les TACS, une représentation en block est utilisée.

L'Interface entre le réseau électrique et les TACS est établie par l'échange de signaux tels que les tensions de nœuds, courant des interrupteurs et l'état d'un

interrupteur, des résistance à variation temporelle sources de tension et de courant.

A.4 Langage de simulation MODELS

C'est un langage général de programmation [1, 2] supporté par une série d'outils de simulation pour la représentation et l'étude des systèmes variant en fonction de temps. Le langage MODELS se base sur la description de la structure d'un modèle et sur la fonction de ces éléments. Il y a une distinction clair dans MODELS entre la description d'un modèle et l'utilisation d'un modèle. Des modèles individuels sont développés séparément et peuvent être groupés dans une bibliothèque de modèles et être utilisés dans d'autres modèles sous forme de blocks indépendants dans la construction d'un système.

Un système peut être décrit dans MODELS comme un arrangement de sous modèle interconnectés, indépendamment l'un de l'autre dans leur description interne et leur simulation. La description de chaque modèle utilise des instructions propres en format libre.

A.5 Les composants type-94 via MODELS

Dans l'ATP, le composant non-linéaire type-94 est un circuit multi-branches défini par l'utilisateur. Le fonctionnement du composant est complètement décrit par l'utilisateur par un modèle, placé dans la section MODELS du fichier de données de l'ATP est utilisé par un composant type-94 dans le circuit. Ce modèle peut être écrit par le langage MODELS ou par un langage de programmation extérieur tels que le FORTRAN et ensuite être appelé à l'intérieur de MODELS.

L'interface avec le circuit est une vraie connexion électrique définie en terme de tensions et courants du cas étudié.

A.6 Sous-programmes intégrés importants

LINE CONSTANTS : est un sous-programme pour le calcul des paramètres électriques des lignes aériennes dans le domaine fréquentiel tels que les matrices impédances et capacitances par unité de longueur, circuit équivalent en π , les données du modèle de ligne à paramètres distribués constant (LPDC).

CABLE CONSTANTS / CABLE PARAMETERS : est un sous-programme pour le calcul des paramètres électriques des câbles souterrains. CABLE PARAMETERS est plus nouvelle que CABLE CONSTANTS et elle a plus d'option tels que transpositions de câbles.

BCTRAN : est sous programme de support qui peut être utilisé pour dériver la représentation matricielle linéaire $[R]$, $[\omega L]$ ou $[A],[R]$ pour les transformateur monophasés et triphasés en utilisant les données résultant des test d'excitation et de court-circuit à fréquence nominale.

XFORMER : est utilisée pour dériver une représentation linéaire pour les transformateurs monophasé à deux et trois enroulement par l'intermédiaire des branches couplées RL. BCTRAN est préférable à XFORMER

SATURA : est un sous programme de conversion pour dériver la courbe de saturation flux-courant à partir de la caractéristique tension RMS-courant ou encore à partir de la caractéristique inductance incrémentale -courant. La courbe de saturation flux-courant est utilisée pour modéliser une inductance non-linéaire, ie, pour la modélisation des transformateurs.

ZNO FITTER : est un sous-programme qui peut être utilisé pour la dérivation du modèle de résistance non-linéaire (branche type 92) pour la représentation des parafoudres ZnO, démarrant à partir des données du fabricants. ZNO FITTER

approxime les données du constructeurs (caractéristiques V-I) par un nombre arbitraire de segments exponentiels.

DATA BASE MODULE permet à l'utilisateur de moduler les sections de réseaux. Chaque module peut contenir plusieurs éléments de circuit. Quelques données, comme les noms de nœud ou des données numériques peuvent avoir des valeurs fixes à l'intérieur du module, tandis que d'autres données peuvent être traitées comme étant des paramètres que l'on doit faire passer au module de base de données.

ATPDRAW : est un pré-processeur graphique pour générer le fichier de données d'entrée de l'ATP. Il assiste l'utilisateur à créer et éditer le modèle du réseau électrique à simuler, interactivement. Dans le programme l'utilisateur peut construire un circuit électrique en sélectionnant des composants prédéfinis à partir d'une palette étendue.

PlotXY est un programme pour la représentation graphique des différentes variables d'intérêt conçu originalement pour l'ATP-EMTP. Le programme est aussi capable de performer quelque analyses sur les graphes obtenus:

A.7 Conclusions

Par cette brève présentation d'un des logiciel les plus utilisés dans le monde pour l'analyse et l'études des régimes transitoires des systèmes électriques, On a voulu viser les capacité de l'ATP-EMTP et les programmes de support tels l'ATPDraw sous environnement WINDOWS. Il résume les options de modélisation du logiciel et décrit les outils disponibles pour travailler efficacement avec l'ATP-EMTP.

A.8 Références

- [A.1] Lauren Dubé, *MODELS in ATP*, Language manual, February 1996.
- [A.2] Alternative Transients Programme (ATP), *Rule Book*, Canadian / American EMTP User Group, 1987-92.
- [A.3] ATPDRAW *version 3.5*, User Manual, 2002.
- [A.4] H.W. Dommel, Electromagnetic Transients Program. Reference Manual (EMTP Theory Book), Bonneville Power Administration, Portland, 1995.

Annexe B

Les données techniques du poste EL-Hassi

Cet Annexe présente des informations supplémentaires sur le poste d'EL-Hassi de la zone de Sétif.

B.1 Présentation du poste

Le poste d'El -Hassi est un poste d'interconnexion et de transformation. Cinq lignes sont connectées à l'étage 220kV et neuf à l'étage 60 kV. Le schéma unifilaire de ce poste est montré dans la figure B.1.

- Dans l'étage 220kV, nous avons cinq lignes (Msila₁, Msila₂, Derguinah, Jijel et Oued el-athmania)
- Dans l'étage 60kV, nous avons neuf lignes (Sonatrach₁, Sonatrach₂, Setif₁, Setif₂, El-Eulma₁, El-Eulma₂, Ain-Oulmène, Ain-El Kebira et Bordj).

Le poste est doté d'appareils de mesure (Transformateur de courant (TC) et circuit bouchon (TB) type HAEFELY), de sectionneurs HAPAM, de disjoncteurs ASEA HPL et de deux transformateurs de puissance ALSTHOM ayant une puissance de 120 MVA chacun et connectés aux jeu de barre à travers des disjoncteurs MAGRINI. Dans le poste d'EL-Hassi, la SONEGAS a utilisé pour protéger les transformateurs de puissances des parafoudres type SIEMENS 3EP2 (figure B.2). Les éléments constitutifs de ces parafoudres sont des résistances à oxyde métallique, elles sont empilées en colonne et enfermées dans une enveloppe hermétique en porcelaine avec écran, de haute rigidité diélectrique.

Les données techniques de ces parafoudres fournis par le constructeurs sont résumés dans le tableau B.1

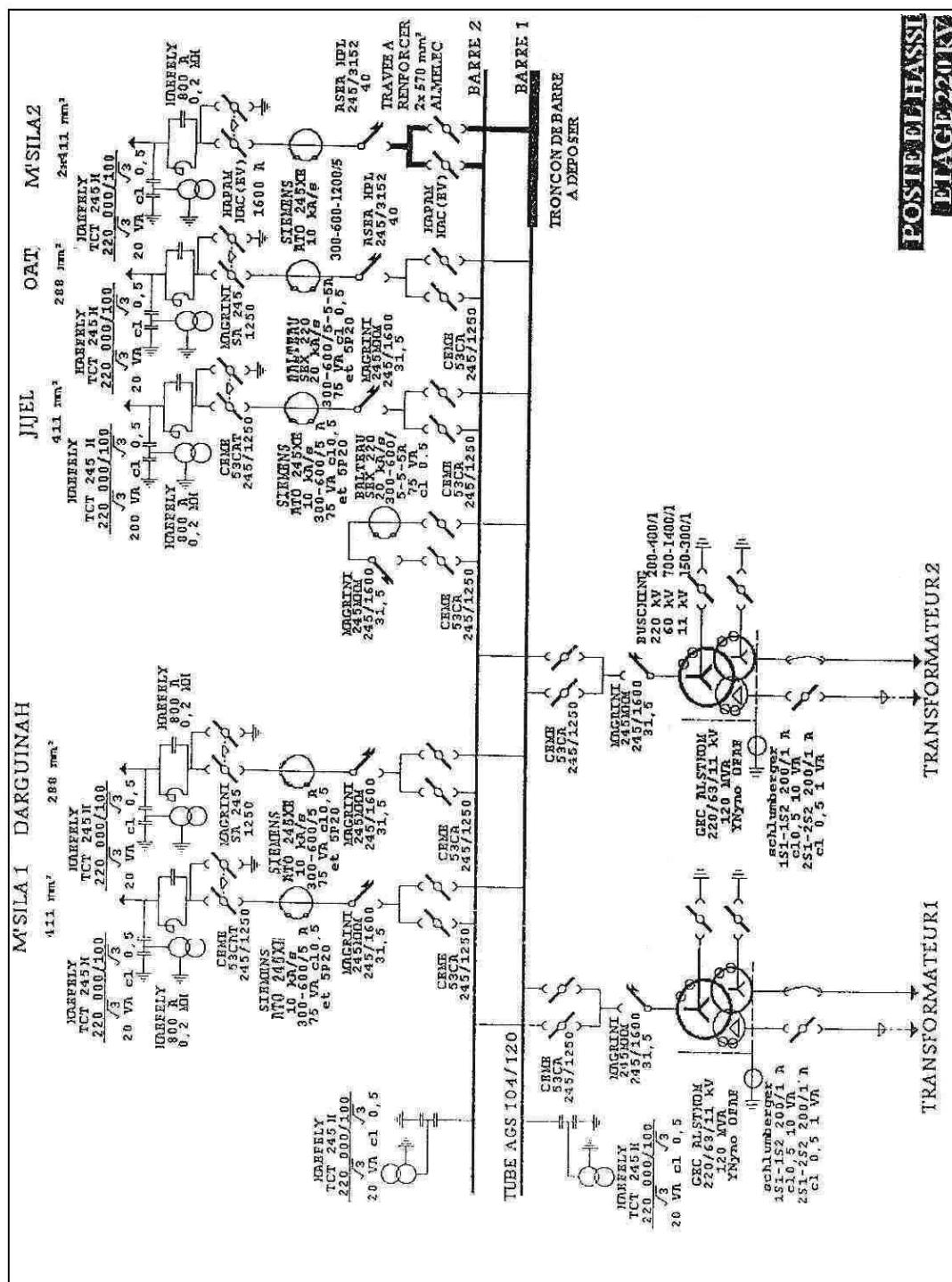


Fig. B.1 *Schéma unifilaire du poste d'EL-Hassi.*

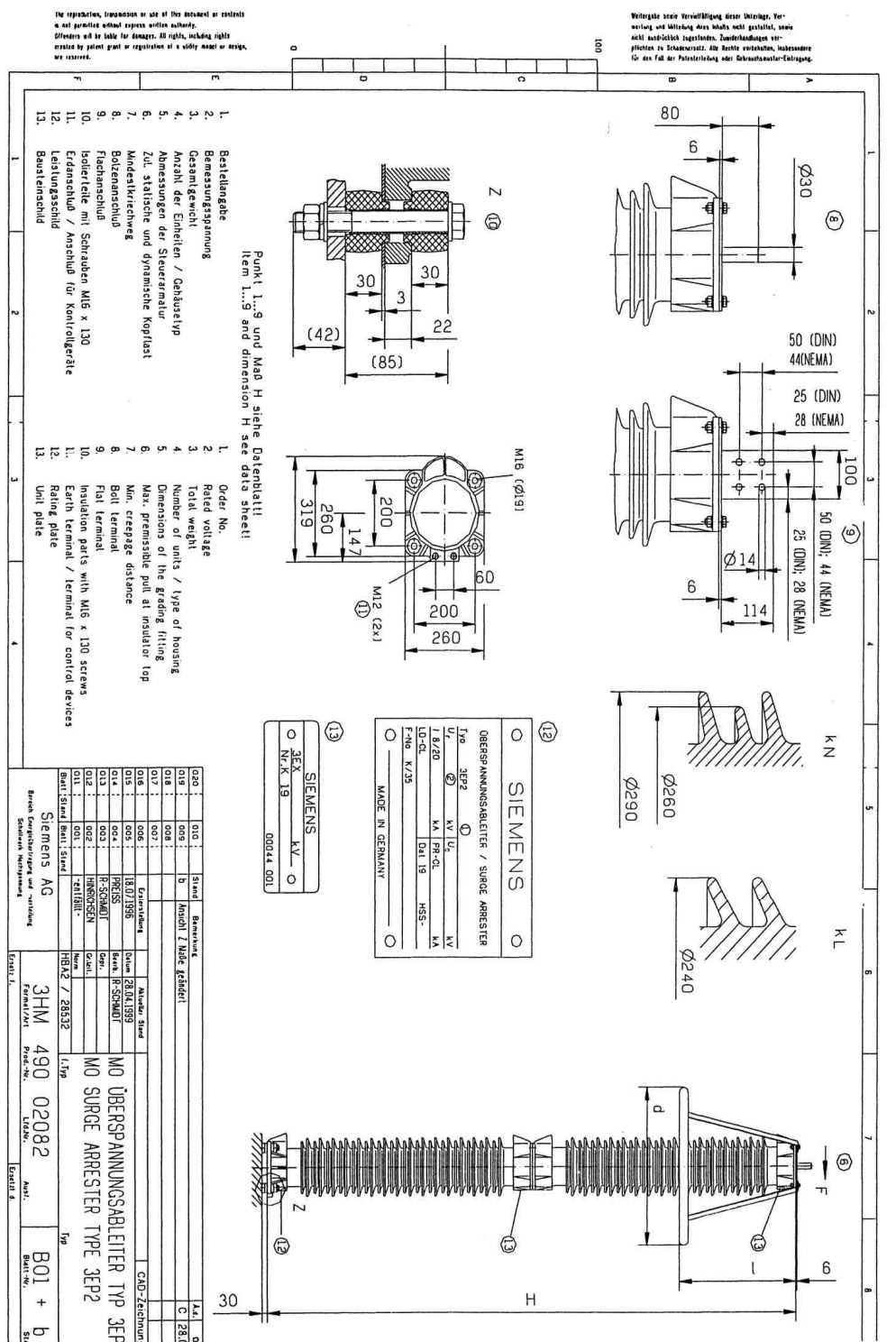


Fig.B.2 *Parafoudre utilisé dans le poste d'EL - Hassi*

SIEMENS

Offre EV HBA 4 / 590361 / ZA

APPEL D'OFFRE No. 01/2000 - LOT No. 2

27.07.00

Page 3

Données techniques**Position 1.0****Type 3EP2 189-2PN3**

Norme	IEC
Altitude d'installation (M.A.S.L)	1 000 m
Tension d'isolement maximale	245 kV
BIL (Réseau)	850 kV
Tension assignée	189.0 kV
Tension maximale en régime permanent	151.0 kV
Courant nominal de décharge (onde 8/20 µs)	10 kA
Classe de décharge de ligne	3
Capacité d'absorption d'énergie - thermal	8.0 kJ/kV
Courant de décharge de longue durée	850 A
Courant de court-circuit (pendant 0,2 s)	50.0 kA
Tensions résiduelles maximales	
10 kA 1/2µs	491.0 kV
5kA 8/20µs	435.0 kV
10kA 8/20µs	463.0 kV
20kA 8/20µs	519.0 kV
40kA 8/20µs	579.0 kV
500A 30/60µs	370.0 kV
1kA 30/60µs	384.0 kV
2kA 30/60µs	403.0 kV
Tension à fréquence industrielle (sec)	600 kV
Tension à fréquence industrielle (sous pluie)	520 kV
BIL (boîtier)	1 200 kV
Ligne de fuite	8 070 mm
Forces sur la borne H.T.	
statique	860 N
dynamique	2 200 N
Poids	262.0 kg
Hauteur	3 240 mm
Diamètre d'anneau de garde	1 000 mm
Longueur des contre-fiches	700 mm
Numero du plan d'encombrement	490 02082
Borne de raccordement	Bolt / Bolzen D30x80

Tab. B.1 Données techniques du parafoudre utilisé**B.2 Les lignes de transmissions HT connectées au poste****B.2.1 Les lignes 220kV Msila₁ et Jijel.**

Ces deux lignes sont équipées de supports qui sont des pylônes métalliques type 220kV SADEMI (figure B.3). les conducteurs sont en Alu/Acier de section 411mm² pour les câbles de phases et 116mm² pour le conducteur de garde sur 2km de part et d'autre du poste. Les données techniques réelles sont résumées dans le tableau B.2 pour la ligne Msila₁ et dans le tableau B.3 pour la ligne Jijel. L'isolement de la ligne est assuré par des chaînes d'isolateurs type capot et tige en verre trempé. Seize isolateurs antipollution constituent les chaînes en ancrage et en suspension. Les massifs sont constitués de dîs indépendants. Les massifs, leur dimension sont déterminés selon la nature des terrains rencontrés lors de l'ouverture des fouilles.

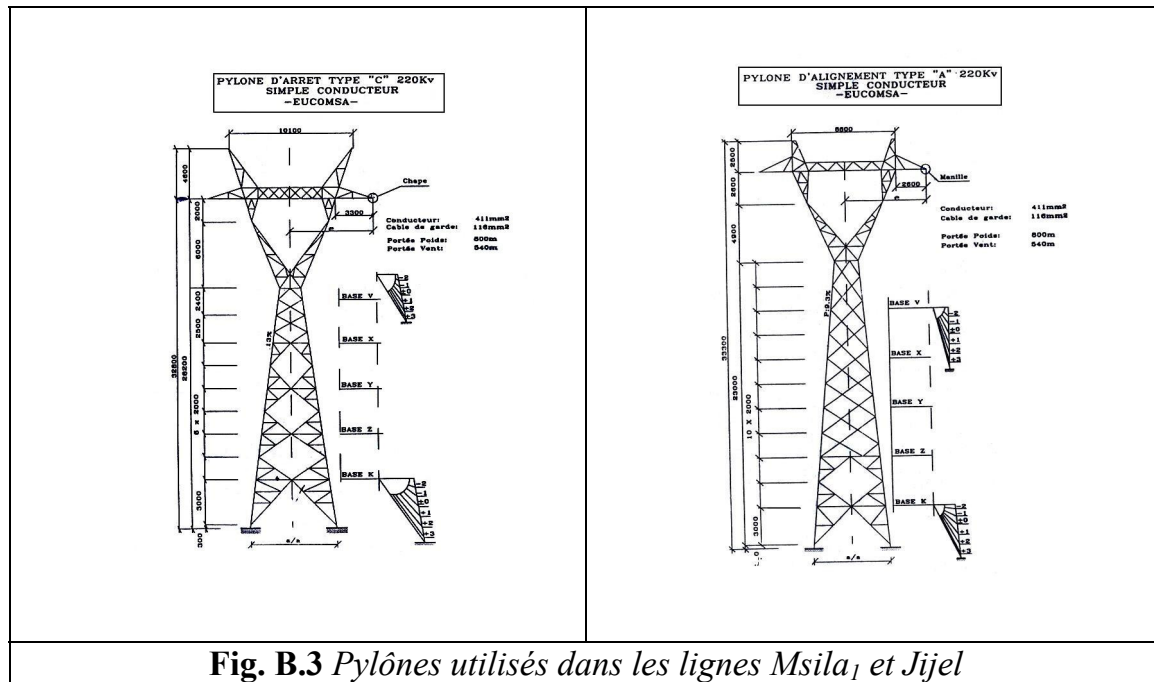


Fig. B.3 Pylônes utilisés dans les lignes Msila₁ et Jijel

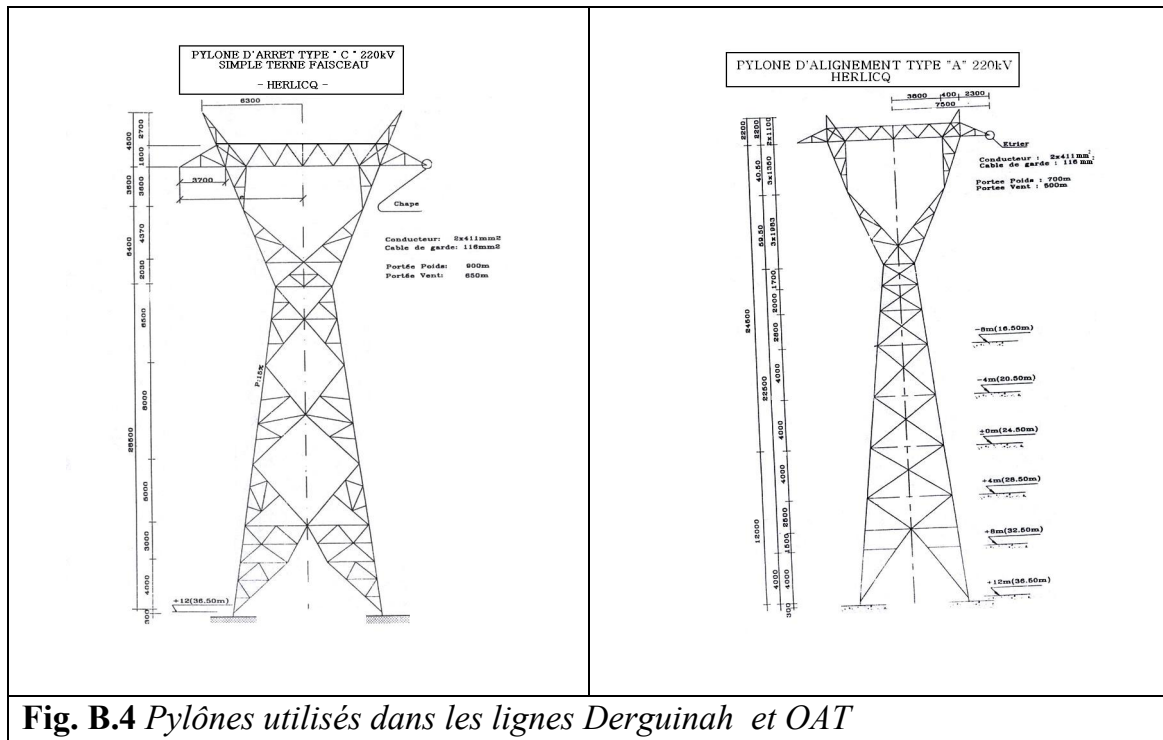
Pylônes	N°	1	2	3	4	5	6	7	8
	Types	CR4	AS4	AS4	AS4	A0	A0	BS8	AS4
	Hauteur, m	20,8	29,3	29,3	29,3	25,3	25,3	32	29,3
	Portée, m	70	336	384	417	470	280	433	413
	Z, Ω	172	205	205	205	195,6	195,6	182	205
Câble de phase 411 mm ²	R _{in} , cm	0,600							
	R _{ext} , cm	1,320							
	R ₀ , Ω/Km	0,089							
	Distance horizontale, m	7,7	7	7	7	7	7	7,25	7
	H, m	16,2	26,8	26,8	26,8	22,8	22,8	28,3	26,8
	Paramètre, m	1300							
	H', m		10,6	0	0	4	0	5,5	1,5
	f, m		10,85	14,18	16,72	21,23	7,54	18,02	16,4
	H _{mid} , m	9,6	10,64	12,62	10,08	3,57	15,26	7,52	9,64
Câble de garde 116mm ²	R _{in} , cm	0,435							
	R _{ext} , cm	0,607							
	R ₀ , Ω/Km	0,512							
	Distance horizontale, m	5,05	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	5,05	4,4
	H, m	20,8	29,3	29,3	29,3	25,3	25,3	32	29,3
	Paramètre, m	1450							
	H', m		8,5	0	0	4	0	6,7	2,7
	f, m		10,14	12,71	14,99	19,03	6,76	16,15	14,94
	H _{mid} , m	11,9	14,91	16,59	14,31	8,27	18,54	12,5	15,71

Tab. B.2 Données techniques de la ligne Msila₁.

Pylônes	N°	1	2	3	4	5	6	7	8
	Types	CR4	CR4	AR4	AR4	A0	AS4	AR8	A0
	Hauteur, m	20,8	20,8	21,3	21,3	25,3	29,3	17,3	25,3
	Portée, m	70	263,7	327,6	329,1	372	387	414	401
	Z, Ω	172	172	185,3	185,3	195,6	205	172,8	195,6
Câble de phase 411 mm ²	R _{in} , cm	0,600							
	R _{ext} , cm	1,320							
	R ₀ , Ω /Km	0,089							
	Distance horizontale, m	7,7	7,7	7	7	7	7	7	7
	H, m	16,2	16,2	18,8	18,8	22,8	26,8	14,8	22,8
	Paramètre, m	1300							
	H', m		7,45	14,3	4,6	5,1	13,8	6,5	9,5
	f, m		6,68	10,31	10,41	13,29	14,4	16,48	15,46
	H _{mid} , m	9,6	5,8	8,93	6,08	6,95	5,5	7,07	2,6
Câble de garde 116 mm ²	R _{in} , cm	0,500							
	R _{ext} , cm	0,700							
	R ₀ , Ω /Km	0,512							
	Distance horizontale, m	5,05	5,05	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4
	H, m	20,8	20,8	21,3	21,3	25,3	29,3	17,3	25,3
	Paramètre, m	1450							
	H', m		7,45	12,2	4,6	5,1	13,8	6,5	9,5
	f, m		6,01	9,27	9,37	11,96	12,96	14,83	13,91
	H _{mid} , m	11,9	11,06	5,93	9,63	10,79	9,44	11,22	6,64

Tab. B.3 Données techniques de la ligne Jijel.**B.2.2 Les lignes de Derguinah et OAT**

Ces deux lignes sont équipées de supports qui sont des pylônes métalliques type nappe horizontale galvanisés (figure B.4). Les conducteurs sont en Alu/Acier de section 288mm² pour les câbles de phases et 94mm² pour les conducteurs de gardes sur le dernier canton avant l'entrée du poste. Les données techniques réelles sont résumées dans les tableaux B.4 et B.5. L'isolement de la ligne est assuré par des chaînes d'isolateurs type capot et tige en verre trempé. Le nombre d'isolateurs est 14 pour les chaînes de suspension et 16 pour les chaînes d'ancrage. Les massifs de fondation sont constitués de piliers indépendants. Les dimensions sont déterminées selon la nature des terrains rencontrés lors de l'ouverture des fouilles.



Pylônes	N°	42	41	40	39	38	37	36	35
	Types	C-4	A0	A0	A-4	A-4	A0	A0	C0
	Hauteur, m	25	26,7	26,7	22,7	22,7	26,7	26,7	29
	Portée, m	70	276,4	300	348	233	262	319	366
	Z, Ω	146,86	193,2	193,2	183,46	183,46	193,2	193,2	155,76
Câble de phase 411 mm ²	R _{in} , cm	0,788							
	R _{ext} , cm	1,103							
	R ₀ , Ω/Km	0,158							
	Distance horizontale, m	10	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	10
	H, m	20,5	24,5	24,5	20,5	20,5	24,5	24,5	24,5
	Paramètre, m	1150							
	H', m		14,3	7	1	8,5	5,5	15,5	4,7
	f, m		8,3	9,77	13,16	5,89	7,45	11,11	14,52
	H _{mid} , m	11,75	9,05	11,23	10,84	10,36	14,3	5,64	7,63
Câble de garde 116 mm ²	R _{in} , cm	0,420							
	R _{ext} , cm	0,525							
	R ₀ , Ω/Km	0,556							
	Distance horizontale, m	6,3	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	6,3
	H, m	25	26,7	26,7	22,7	22,7	26,7	26,7	29
	Paramètre, m	1280							
	H', m		12	7	1	8,5	5,5	15,5	7
	f, m		7,46	8,78	11,84	5,3	6,7	10	13
	H _{mid} , m	14	13,04	11,42	14,36	13,15	17,25	8,95	12,5

Tab. B.4 Données techniques de la ligne de Derguinah.

Pylônes	N°	47	46	45	44	43	42	41	40
	Types	C-4	A+4	A-4	A0	A-4	A-8	A-4	C-4
	Hauteur, m	25	30,7	22,7	26,7	22,7	18,7	22,7	25
	Portée, m	70	277	305	321	323	286	253	342
	Z, Ω	146,86	201,57	183,46	193,2	183,46	171,83	183,46	146,86
Câble de phase 3,411, mm ²	R _{in} , cm	0,788							
	R _{ext} , cm	1,103							
	R ₀ , Ω /Km	0,158							
	Distance horizontale, m	10	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	10
	H, m	20,5	28,5	20,5	24,5	20,5	16,5	20,5	20,5
	Paramètre, m	1150							
	H', m		19,3	1,5	10	0	2,5	12,5	9,2
	f, m		8,34	10,11	11,2	11,34	8,89	6,95	12,71
	H _{mid} , m	11,75	10,51	17,64	8,3	13,16	10,36	7,3	3,09
Câble de garde 116, mm ²	R _{in} , cm	0,420							
	R _{ext} , cm	0,525							
	R ₀ , Ω /Km	0,556							
	Distance horizontale, m	6,3	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	6,3
	H, m	25	30,7	22,7	26,7	22,7	18,7	22,7	25
	Paramètre, m	1280							
	H', m		17	1,5	10	0	2,5	12,5	11,5
	f, m		7,5	9,1	10,08	10,22	8	6,26	12,58
	H _{mid} , m	14	14,7	20,85	11,22	16,48	12,95	10,19	6,67

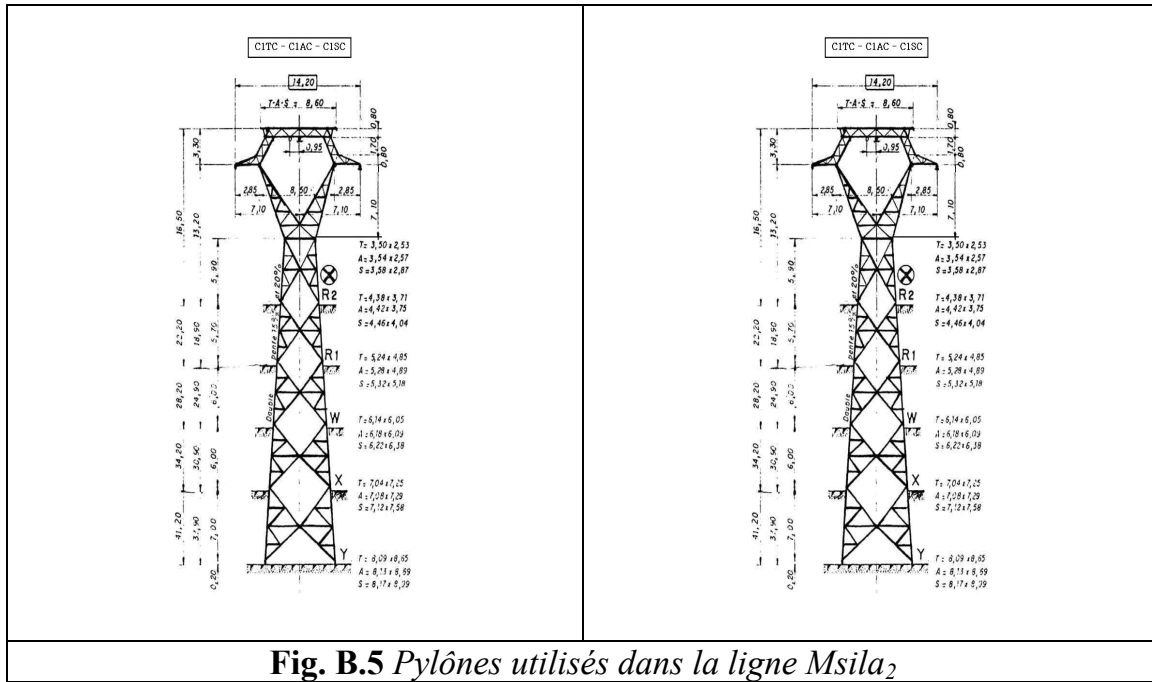
Tab. B.5 Données techniques de la ligne Oued El- Athmania.

B. 2.3 La ligne M'sila₂

Cette section réunit les documents du dossier relatif à la ligne THT 220kV entre le poste d'EL-Hassi et Msila₂. Les supports de cette ligne sont des pylônes métalliques en treillis type 220kV en nappe (figure B.5). Les conducteurs de phase sont en Alu-Acier. Un faisceau de 2 conducteurs par phase est utilisé. Leur section est de 411mm². Les conducteurs de garde au nombre de 2 sont en Alu-Acier de section 116mm². Les données techniques réelles sont résumées dans le tableau B.6. L'isolement de la ligne est assuré par des chaînes de 14 isolateurs normaux à capot et tige en verre trempé. Les massifs de fondations sont constitués de dîs indépendants. Leurs dimensions sont déterminées selon la nature des terrains rencontrés lors de l'ouverture des fouilles.

Pylônes	N°	410	409	408	407	406	405	404	403
	Types	C ₁ ScR ₁	C ₁ ScR ₁	C ₁ TcW	C ₁ TcX	C ₁ ScR ₁	C ₁ TcR ₁	C ₁ TcR ₁	C ₁ TcX
	Hauteur, m	22,2	22,2	28,2	34,2	22,2	22,2	22,2	34,2
	Portée, m	70	380,26	327,83	244,5	242	255	243	272,72
	Z, Ω	153,45	153,45	169,16	180,74	153,45	153,45	153,45	180,74
Câble de phase 411mm ²	R _{in} , cm	0,600							
	R _{ext} , cm	1,320							
	R ₀ , Ω/Km	0,089							
	Distance horizontale m	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1
	N° C/Ph	2	2	2	2	2	2	2	2
	Séparation, m	50	50	50	50	50	50	50	50
	H, m	18,7	18,7	24,7	30,7	18,7	18,7	18,7	30,7
		21,2	21,2	27,2	33,2	21,2	21,2	21,2	33,2
		18,7	18,7	24,7	30,7	18,7	18,7	18,7	30,7
	Paramètre, m	1300							
	H', m		0	6	6	12	0	0	12
	f, m		13,9	10,33	5,73	5,63	6,25	5,67	7,15
	H _{mid} , m	11,85	4,8	11,37	21,97	19,07	12,45	13,03	17,55
		13,1	7,3	14,37	24,47	21,57	14,95	14,53	20,05
		11,85	4,8	11,37	21,97	19,07	12,45	13,03	17,55
Câble de garde 116 mm ²	R _{in} , cm	0,500							
	R _{ext} , cm	0,700							
	R ₀ , Ω/Km	0,512							
	Distance horizontale, m	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3
	H, m	22,2	22,2	28,2	34,2	22,2	22,2	22,2	34,2
	Paramètre, m	1450							
	H', m		0	6	6	12	0	0	12
	f, m		12,46	9,25	6,42	5,04	5,6	5,1	6,4
	H _{mid} , m	13,6	9,73	15,95	24,78	23,16	16,6	17,11	21,79

Tab. B.6 Données techniques de la ligne Msila₂



Les symboles dans les tableaux B,2 à B,6 désignent :

Z : Impédance caractéristique du pylône

R_{in} : rayon intérieur du conducteur,

R_{ext} : rayon extérieur du conducteur,

R_0 : résistance linéique du conducteur,

H : hauteur du conducteur au niveau du pylône,

H_{mid} : la hauteur de conducteur à demi portée,

p : paramètre de la ligne,

H' : différence entre les hauteurs totales des deux pylônes,

f : flèche

N° C/Ph : Nombre de conducteurs élémentaires

Séparation : Distance entre deux conducteurs élémentaires

Résumé : L'objectif du travail exposé dans cette thèse concerne la modélisation et l'étude des performances de protection des parafoudres à oxyde métallique (ZnO) dans un réseau réel lorsque des surtensions transitoires à front rapide sont présentes. Pour réaliser cet objectif, une nouvelle technique basée sur les algorithmes génétiques pour l'identification des paramètres des modèles de parafoudres ZnO est développée. Elle a été testée sur une version modifiée du modèle recommandé par IEEE qu'on a proposé. Les résultats obtenus sont très satisfaisants et la technique développée est très prometteuse pour l'identification automatique des paramètres de n'importe quel circuit équivalent du parafoudre ZnO. Un calcul plus exact des inductances sur les structures de parafoudres à oxyde métallique est développé. Ce calcul d'inductances est basé sur des formules analytiques. Les formules présentées prennent en compte tous les arrangements pratiques possibles des installations de parafoudres. Cette étude a été faite pour palier aux insuffisances observées dans les travaux précédents où l'inductance était estimée en multipliant une inductance par unité de longueur par la longueur du conducteur ou par la hauteur du parafoudre. Un exemple d'application a été implanté dans l'EMTP (Electromagnetic transients program) et des résultats satisfaisants ont été obtenus. L'étude nous a permis de tenir compte de l'effet de l'angle entre le conducteur de connexion et le jeu de barres. L'effet de l'inductance des structures de parafoudres sur le problème de la protection contre les surtensions a été mis en évidence. L'analyse des performances dynamiques de protection des parafoudres ZnO sur un réseau HT a été réalisée. La version modifiée du modèle recommandé par IEEE a été introduite. Ses paramètres ont été identifiés en utilisant la technique développée dans cette thèse. Le poste de transformation opérationnel El-Hassi de la zone de Sétif qui a servi d'exemple a été représenté par un schéma complet triphasé. Les surtensions résultantes en plusieurs points fondamentaux ont été présentées et discutées. Le logiciel spécialisé EMTP (Electromagnetic transients program) a été utilisé à cet effet.

Mots-clés : Réseau électrique; Modélisation ; Foudre ; Surtensions; Simulation ; parafoudre ZnO, Estimation paramètre ; ATP-EMTP ; Régimes transitoires, contraintes rapides, coordination des isolements, mesures.

Abstract: The aim of the work exposed in this thesis relates to the modelling and the study of the protection performances of metal oxide surge arrester (ZnO) in a real network when fast front transient overvoltages are present. To carry out this objective, a new technique based on genetic algorithms for the identification of ZnO surge arrester models parameters is developed. It was tested on a modified version of the IEEE recommended model that we have proposed. The results obtained are very satisfactory and the proposed technique can be used for the automatic identification of the parameters of any ZnO arrester equivalent circuit. A more exact calculation of inductances on the structures of metal oxide surge arrester is developed. This calculation of inductances is based on analytical formulas. The formulas presented take into account all possible practical arrangements of the installations of surge arresters. This study was made to overcome the insufficiencies observed in preceding work where inductance was estimated by multiplying an inductance per unit length by the length of the lead wire or the height of the surge arrester. An example of application was implemented in the EMTP (Electromagnetic transients program) and satisfactory results were obtained. The study enabled us to take into account the effect of the angle between the lead wire and the busbar. The effect of the inductance of surge arrester structures on the problem of the overvoltage protection was outlined. The analysis of the dynamic protection performances of ZnO surge arrester on an HV network was carried out. The proposed modified version of the IEEE recommended model was introduced. Its parameters were identified by using the technique developed in this thesis. The operational substation El-Hassi of Setif which is used as an example was represented by a three-phase complete diagram. Resulting overvoltages in several fundamental points were presented and discussed. The specialized software EMTP (Electromagnetic transients program) was used for this purpose.

Key words: Power systems, Modeling, lightning, overvoltages, Simulation, Metal Oxide Surge Arrester, parameter Estimation, ATP-EMTP, Electromagnetic Transients, fast surges, Insulation coordination, measurements.