

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI, TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET DE L'INFORMATIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

**Mémoire de Magister**  
en **Electrotechnique**

Option : **Machines Electriques**

Présenté par

**AMRANI Omar**

**Sujet : Etude des surtensions impulsionnelles dans les enroulements de réglage des transformateurs et autotransformateurs.**

Devant le jury d'examen :

BENAMROUCHE Nacerdine  
MUFIDZADA Nahid Abdulla  
HADDAD Salah  
HANDALA Mohand Amokrane  
RACHEK Mhamed

Professeur à l'UMMTO  
Professeur à l'UMMTO  
Professeur à l'UMMTO  
Maître de conférences à l'UMMTO  
Maître de conférences à l'UMMTO

Président  
Rapporteur  
Examineur  
Examineur  
Examineur

Soutenu le :

## REMERCIEMENTS

Je remercie M. MUFIDZADA pour avoir proposé et dirigé ce travail. Qu'il trouve ici l'expression de ma gratitude.

J'adresse mes remerciements aux différentes personnes qui ont accepté d'être dans le jury :

- N. BENAMROUCHE pour avoir accepté de présider le jury,
- S.HADDAD,
- M. A. HANDALA,
- M. RACHEK,

qui ont bien voulu examiner ce travail.

Je remercie MM D. BELKACEMI et M. BOUDJEMA, pour leur accueil et leur disponibilité au département « transformateurs » de l'ENEL.

Je tiens à remercier :

S. AKACHA, qui m'a toujours aidé au laboratoire de machines électriques particulièrement dans les moments difficiles. Je lui en suis reconnaissant.

N. BENAMROUCHE, pour ses encouragements. Il sera content de voir écrit « quelque chose ».

A. CHALLAL, qui m'a encouragé et écouté.

Mon neveu, M. CHAOUI, qui m'a toujours encouragé et soutenu moralement et matériellement.

H. HOUASSINE, pour son aide et surtout sa disponibilité.

R.IBTIOUEN qui m'a encouragé à « revenir »... des décennies après.

M. MOUDOUD pour la documentation, ses encouragements et sa sympathie.

R. KACHENOURA, pour son aide et la « pression ».

S. RABAHALLAH dont l'enthousiasme et les encouragements pour ce travail m'ont profondément touché.

Je tiens également à remercier toutes les personnes qui, par un geste ou une parole, me souhaitaient sincèrement voir ce travail aboutir. Je pense à G. AGGOUN, H. BESSAI...à celles que j'ai oubliées (il y en a sûrement), je les assure de mon amitié et de ma gratitude.

## TABLE DES MATIERES

|   | Page     |
|---|----------|
| <b>Introduction.....</b>  | <b>1</b> |
| <br><b>CHAPITRE I : Transformateur et autotransformateur</b>                              |          |
| I. 1. Transformateur.....   | 6        |
| I. 1. 1. Définition.....  | 6        |
| I. 1. 2. Principe de fonctionnement.....  | 6        |
| I. 1. 3. Principaux éléments des transformateurs.....                                     | 6        |
| I. 1. 3. 1. Partie active.....  | 6        |
| a) Le circuit magnétique.....   | 6        |
| b) Les Enroulements.....  | 7        |
| I.1.3.2. Partie constructive.....   | 7        |
| a) La cuve.....   | 7        |
| b) couvercle de cuve et sorties.....  | 7        |
| I. 1. 4. Couplage des enroulements.....   | 8        |
| I. 1. 5. Caractéristiques du transformateur.....  | 9        |
| I. 1. 6. Fonctionnement du transformateur.....  | 10       |
| I. 1. 6. 1. Fonctionnement à vide.....  | 10       |
| I. 1. 6. 2. Fonctionnement en charge.....   | 11       |
| a) Equations de fonctionnement en régime permanent.....                                   | 11       |
| b) Schéma équivalent.....   | 11       |
| c) Comportement simplifié dans l'hypothèse de Kapp.....                                   | 12       |
| d) Circuit équivalent correspondant.....  | 12       |
| I. 1. 6. 3. Transformateur réduit ou ramené.....  | 12       |
| a) Schéma équivalent ramené au primaire.....  | 13       |
| b) Schéma équivalent ramené au primaire dans l'hypothèse de Kapp.....                     | 13       |
| c) Schéma équivalent en hautes fréquences.....  | 13       |
| I. 1. 6. 4. Tension de court-circuit.....   | 14       |
| a) Paramètres de court-circuit.....   | 14       |
| b) Détermination des paramètres de court-circuit d'un transformateur.....                 | 14       |
| c) Essai en court-circuit.....  | 14       |
| I. 1.7. Réglage de la tension.....  | 15       |
| I. 1. 7. 1. Les régleurs à vide de transformateurs.....                                   | 16       |
| I. 1. 7. 2. Les régleurs en charge de transformateurs.....                                | 16       |
| I. 1. 7. 3. Principe de fonctionnement.....   | 17       |
| I. 1. 8. Défauts dans les transformateurs.....  | 17       |
| I. 1. 9. Domaine d'utilisation des transformateurs de puissance.....                      | 18       |
| I. 2. Autotransformateur.....   | 18       |
| I. 2. 1. Définition.....  | 18       |
| I. 2. 2. Autotransformateur de puissance.....   | 18       |
| I. 2. 3. Description des enroulements.....  | 19       |
| I. 2. 4. Fonctionnement.....  | 20       |
| I. 2. 5. Puissances.....  | 21       |
| I. 2. 6. Autotransformateur réel ramené au côté « haute tension ».....                    | 21       |
| I. 2. 7. Détermination des paramètres de l'autotransformateur.....                        | 23       |
| I. 2. 7. 1. Détermination à partir des grandeurs totales ramenées côté haute tension..... | 24       |
| I. 2. 7. 2. Détermination à partir des puissances et des tensions de courts circuits..... | 25       |

|  |    |
|--|----|
| a) Calcul des résistances à partir des puissances.....               | 25 |
| b) Calcul des réactances à partir des tensions de court circuit..... | 26 |
| I. 2. 8. Avantage de l'autotransformateur.....                       | 27 |
| I. 2. 9. Inconvénients de l'autotransformateur.....                  | 28 |
| I. 2. 10. Domaine d'utilisation.....                                 | 28 |
| Conclusion.....  | 28 |

## CHAPITRE II : Surtensions

|   |    |
|---|----|
| Introduction.....   | 29 |
| II.1. Définition.....   | 29 |
| II. 2. Description d'une onde de surtension de foudre.....                  | 29 |
| II. 3. Origines des surtensions.....  | 30 |
| II. 3. 1. Surtensions d'origine atmosphérique.....                          | 31 |
| II. 3. 1. 1. Formation des orages.....                                      | 31 |
| II. 3. 1. 2. Principe du coup de foudre.....                                | 32 |
| II. 3. 1. 3. Le coup de foudre direct.....                                  | 32 |
| II. 3. 1. 4. Courant de foudre et onde de tension associée.....             | 33 |
| II. 3. 1. 5. Le coup de foudre indirect.....                                | 34 |
| II. 3. 1. 6. Surtensions conduites.....                                     | 34 |
| II. 3. 1. 7. Elévation du potentiel de terre.....                           | 34 |
| II. 3. 1. 8. Coup de foudre sur le câble de garde.....                      | 35 |
| II. 3. 1. 9. Le rayonnement.....  | 36 |
| II. 3. 2. Surtension par décharges électrostatique.....                     | 36 |
| II. 3. 3. Surtensions de manœuvre.....                                      | 37 |
| II. 3. 3. 1. La commutation de courants inductifs.....                      | 37 |
| II. 3. 3. 2. La commutation des circuits capacitifs.....                    | 37 |
| II. 3. 3. 3. L'interruption d'un fort courant par un organe de coupure..... | 38 |
| II. 3. 4. Surtensions à fréquence industrielle.....                         | 38 |
| II. 3. 4. 1. Courant de suite des éclateurs MT.....                         | 38 |
| II. 3. 4. 2. La rupture de continuité du neutre.....                        | 38 |
| II. 3. 4. 3. Le défaut d'isolement.....                                     | 38 |
| II. 3. 4. 4. La ferrorésonance.....   | 39 |
| II. 3. 5. Les surtensions de manœuvre.....                                  | 39 |
| II. 3. 6. Tensions de chocs.....  | 40 |
| II. 3. 8. Ondes normalisées.....  | 40 |
| II. 3. 9. Onde coupée.....  | 41 |
| II. 4. Effets des surtensions sur les matériels.....                        | 42 |
| II. 5. Conséquences d'un claquage en HT.....                                | 42 |
| Conclusion.....   | 43 |

## CHAPITRE III : Régimes transitoires impulsionsnels dans l'enroulement du transformateur

|  |    |
|--|----|
| Introduction.....  | 44 |
| III. 1. Définitions.....                                       | 44 |
| III. 1. Surtensions transitoires dans les transformateurs..... | 44 |
| III. 2. Particularités des surtensions «haute fréquence».....  | 44 |
| III. 3. Conséquences quant à leurs études.....                 | 45 |
| III. 4. Contraintes transversales.....                         | 45 |

|  |    |
|--|----|
| III. 5. Contrainte longitudinale.....  | 45 |
| III. 6. Réfraction et réflexion des ondes.....                                 | 45 |
| III. 6. 1. Coefficient de réflexion.....                                       | 46 |
| III. 6. 2. Coefficient de réfraction.....                                      | 46 |
| III. 7. Méthode de Petersen.....   | 47 |
| III. 8. Les phénomènes surtensions et le transformateur.....                   | 47 |
| III. 9. Répartitions initiale et finale de la tension.....                     | 48 |
| III. 9. 1. Répartition initiale de la tension.....                             | 48 |
| III. 9. 1. 1. Cas où $K = 0$ .....   | 48 |
| III. 9. 1. 2. Cas où $C = 0$ .....   | 49 |
| III. 9. 2. Répartition finale de la tension.....                               | 51 |
| III. 10. Propagation des ondes dans un enroulement à constantes réparties..... | 52 |

## CHAPITRE IV : Protection et moyens de protection

|   |    |
|---|----|
| Introduction.....   | 54 |
| IV. 1. Protection du transformateur.....  | 54 |
| IV. 1. 1. Protection interne.....   | 55 |
| IV. 1. 2. Protection externe.....   | 55 |
| IV. 2. Les principes de la protection.....  | 55 |
| IV. 2. 1. protection primaire.....  | 55 |
| IV. 2. 2. protection secondaire.....  | 56 |
| IV. 3. Dispositifs de protection : les éclateurs et parafoudres.....                        | 56 |
| IV. 3. 1. L'éclateur.....   | 56 |
| IV. 3. 1. 1. Inconvénients de l'éclateur.....   | 57 |
| IV. 3. 1. 2. Avantages des éclateurs.....   | 58 |
| IV. 3. 2. Les parafoudres.....  | 58 |
| IV. 3. 2. 1. Les anciens modèles : parafoudres à résistances variables et éclateurs.....    | 58 |
| IV. 3. 2. 1. 1. Caractéristiques.....   | 59 |
| IV. 3. 2. 2. Les nouveaux modèles : parafoudres à oxyde de zinc (ZnO).....                  | 59 |
| IV. 3. 2. 2. 1. Caractéristiques.....   | 59 |
| IV. 3. 2. 3. Les modèles les plus récents : parafoudres à enveloppes synthétiques.....      | 59 |
| IV. 3. 3. Avantages des parafoudres.....  | 60 |
| IV. 3. 4. Fonctionnement.....   | 60 |
| IV. 3. 5. Distance de protection.....   | 60 |
| IV. 3. 5. 1. Calcul de la distance de protection $L$ avec réflexion complète de l'onde..... | 61 |
| IV. 3. 6. Implantation.....   | 61 |
| IV. 3. 7. Définitions concernant le parafoudre.....   | 62 |
| IV. 3. 7. 1. Niveau de protection au choc.....  | 62 |
| IV. 3. 7. 2. Tension maximale de régime permanent $U_c$ .....                               | 62 |
| IV. 3. 7. 3. Tension résiduelle ou niveau de protection $U_p$ .....                         | 62 |
| IV. 3. 7. 4. Tension assignée (ou d'extinction) d'un parafoudre.....                        | 62 |
| IV. 4. Réduction des risques et des niveaux de surtensions.....                             | 62 |
| IV. 4. 1. Cas de la surtension due à la ferrorésonance.....                                 | 62 |
| IV. 4. 2. Cas de la surtension provoquée par la coupure de courants capacitifs.....         | 63 |
| IV. 4. 3. Cas de la surtension provoquée par l'enclenchement d'une ligne à vide.....        | 63 |
| IV. 4. 4. Cas de la surtension provoquée par un coup de foudre.....                         | 63 |
| IV. 5. Coordination de l'isolement.....   | 63 |
| Conclusion.....   | 63 |

## CHAPITRE V : Modélisation des enroulements et calculs des paramètres

|   |    |
|---|----|
| Introduction.....   | 64 |
| V. 1. Modélisation par inductances propres et mutuelles.....  | 64 |
| V. 2. Schéma équivalent retenu.....   | 65 |
| V. 3. Schéma équivalent et modélisation.....  | 66 |
| V. 4. Simulation de l'enroulement sur P- Spice.....   | 66 |
| V. 5 Caractéristiques du transformateur proposé.....  | 67 |
| V. 5.1. Caractéristiques électriques.....   | 67 |
| V. 5.2. Caractéristiques géométriques.....  | 67 |
| V. 6. Calcul des paramètres du schéma équivalent.....   | 68 |
| V. 6.1. Calcul des résistances.....   | 69 |
| V. 6.2. Calcul des inductances.....   | 70 |
| V. 6.2.1. Inductance propre de l'enroulement HT.....  | 70 |
| V. 6.2.2. Inductance d'un élément $i$ de l'enroulement HT.....  | 70 |
| V. 7. Détermination des coefficients de mutualité.....  | 71 |
| V. 8. Coefficients de mutualités entre l'enroulement de réglage et les différents éléments de l'enroulement HT..... | 74 |
| V. 9. Inductance propre $L_H$ d'un élément.....   | 74 |
| V. 10. Inductance propre $L_R$ de l'enroulement de réglage.....   | 75 |
| V. 11. Détermination des inductances mutuelles.....   | 75 |
| V. 12. Calcul des capacités.....  | 75 |
| V. 12.1. Calcul des capacités transversales.....  | 76 |
| V. 12.1.1. Capacité transversale $C_{HT}$ de l'enroulement HT.....  | 76 |
| V. 12.1.2. Capacité transversale $C_H$ , relative à un élément de l'enroulement HT.....                             | 78 |
| V. 12.1.3. Capacité $C_R$ , entre l'élément de l'enroulement de réglage et la terre.....                            | 78 |
| V. 12.1.4. Capacité $C_{HR}$ , entre élément de l'enroulement de réglage et enroulement HT.....                     | 78 |
| V. 12.2. Calcul des capacités longitudinales.....   | 79 |
| V. 12.2.1. Capacité longitudinale $K_{HT}$ de l'enroulement HT.....   | 80 |
| V. 12.2.2. Capacités longitudinale $K_H$ , relative à un élément de l'enroulement HT.....                           | 80 |
| V. 12.2. Capacités longitudinale $K_R$ , de l'enroulement de réglage.....   | 80 |
| V. 13. Equations électriques de l'enroulement.....  | 80 |
| V. 13.1. Equations aux tensions.....  | 81 |
| V. 13.2. Equations aux courants.....  | 83 |
| V. 14. Exemples de situations de l'enroulement de réglage.....  | 84 |
| V. 14.1. Enroulement de réglage utilisé.....  | 84 |
| V. 14.2. Enroulement de réglage non utilisé.....  | 84 |
| V. 15. Caractéristiques de l'autotransformateur proposé.....  | 85 |
| V. 15.1. Caractéristiques électriques.....  | 85 |
| V. 15.2. Caractéristiques géométriques.....   | 85 |
| V. 15.3. Calcul des paramètres de court circuit de l'autotransformateur.....  | 86 |
| V. 15.3.1. Résistances des enroulements.....  | 87 |
| V. 15.3.2. Résistances d'ondes des enroulements.....  | 87 |
| V. 15.3.3. Calculs des réactances inductives.....   | 88 |
| V. 15.3.4. Calculs des capacités transversales.....   | 94 |
| V. 15.3.5. Calculs des capacités longitudinales.....  | 95 |

## CHAPITRE VI : Résultats de la simulation des surtensions dans les enroulements de réglage

|   |            |
|---|------------|
| Introduction.....   | 97         |
| <b>VI. 1. Résultats de la simulation pour le transformateur.....</b>                          | <b>97</b>  |
| VI. 1. 1. Enroulement de réglage utilisé, protections désactivées.....                        | 97         |
| VI. 1. 1. 1. Tensions aux différents nœuds lorsque le neutre est mis à la terre.....          | 97         |
| VI. 1. 1. 2. Tensions aux différents nœuds de l'enroulement avec neutre isolé de la terre.... | 99         |
| VI. 1. 2. L'enroulement de réglage n'est pas utilisé, protections désactivées.....            | 100        |
| VI. 1. 2. 1. Tensions aux différents nœuds de l'enroulement avec neutre mis à la terre.....   | 100        |
| VI. 1. 2. 2. Tensions aux différents nœuds de l'enroulement avec neutre isolé de la terre...  | 101        |
| VI. 1. 3. L'enroulement de réglage est utilisé, protection de l'enroulement HT activée.....   | 102        |
| VI. 1. 3. 1. Tensions aux différents nœuds de l'enroulement avec neutre mis à la terre.....   | 102        |
| VI. 1. 3. 2. Tensions aux différents nœuds de l'enroulement avec neutre isolé de la terre...  | 103        |
| VI. 1. 4. Sans enroulement de réglage, protection de l'enroulement HT activée.....            | 104        |
| VI. 1. 4. 1. Tensions aux différents nœuds de l'enroulement avec un parafoudre.....           | 104        |
| VI. 1. 4. 2. Tensions aux différents nœuds de l'enroulement avec neutre isolé de la terre...  | 104        |
| VI. 1. 5. Avec enroulement de réglage, protections activées.....                              | 105        |
| VI. 1. 5. 1. Tensions aux différents nœuds de l'enroulement avec neutre mis à la terre.....   | 105        |
| VI. 1. 5. 2. Tensions aux différents nœuds de l'enroulement avec neutre isolé de la terre...  | 105        |
| <b>VI. 2. Résultats de la simulation pour l'autotransformateur.....</b>                       | <b>106</b> |
| VI. 2. 1. Onde de tension du côté HT.....   | 106        |
| VI. 2. 1. 1. Protections désactivées, enroulement de réglage inséré.....                      | 106        |
| VI. 2. 1. 2. Protections désactivées, enroulement de réglage non inséré.....                  | 106        |
| VI. 2. 1. 3. Protections activées, enroulement de réglage inséré.....                         | 107        |
| VI. 2. 1. 4. Protections activées, enroulement de réglage non inséré.....                     | 108        |
| VI. 2. 1. 5. Protections activées avec 2 parafoudres, enroulement de réglage inséré.....      | 108        |
| VI. 2. 1. 5. Protections activées avec 2 parafoudres, enroulement de réglage non inséré.....  | 109        |
| VI. 2. 2. Onde de tension du côté MT.....   | 109        |
| VI. 2. 2. 1. Protections désactivées, enroulement de réglage inséré.....                      | 109        |
| VI. 2. 2. 2. Protections désactivées, enroulement de réglage non inséré.....                  | 110        |
| VI. 2. 2. 3. Protections activées, enroulement de réglage inséré.....                         | 111        |
| VI. 2. 2. 4. Protections activées, enroulement de réglage inséré.....                         | 112        |
| <b>Conclusion.....</b>  | <b>113</b> |
| <b>Bibliographie.....</b>   | <b>115</b> |

# INTRODUCTION

La production, le transport et la distribution de l'énergie électrique, s'effectue principalement sous forme de tension et de courant alternatif. Il est difficile de produire ou de distribuer cette énergie à haute tension. Par contre un transport économique de cette énergie à grandes distances ne peut être réalisé qu'en haute tension. Ce problème est résolu à l'aide des transformateurs.

Un transformateur ou un autotransformateur est une machine statique capable de recevoir l'énergie électrique sous une tension et un courant à fréquence donnée, et la restituer avec une autre tension et un autre courant à la même fréquence.

De part sa fonction, on rencontre le transformateur, dans l'ensemble d'un réseau électrique, aux points de production (BT/HT), aux points de distribution sectoriels (HT/MT) et aux points d'utilisation (MT/BT). En effet en plus des raisons économiques, des considérations technologiques et sécuritaires, font que l'énergie électrique est produite en basse ou moyenne tension, transportée en haute tension, distribuée de nouveau en moyenne tension et utilisée en basse tension.

En un point d'un réseau électrique, souvent la tension n'est pas fixe à cause des chutes de tension produites dans les transformateurs et les lignes par les différentes charges alimentées. Or la tension doit rester dans une plage autorisée en tout point du réseau. Pour maintenir la tension dans les limites contractuelles, le distributeur d'énergie électrique a souvent recours au réglage de la tension.

Un premier réglage se fait au niveau de la centrale électrique par l'excitation des alternateurs. Ce réglage ne suffit pas. Un deuxième réglage est effectué à tous les échelons du transport et de la distribution, sur l'enroulement « haute tension » du transformateur. Souvent cet enroulement présente des « prises » à son bout et grâce à un commutateur de prises on peut passer d'une prise à l'autre, faire varier ainsi le nombre de spires utilisées de l'enroulement et régler donc la tension à une valeur déterminée.

Lorsque le réglage atteint  $\pm 10$  à  $\pm 12\%$  de la valeur de la tension nominale, les prises se trouvent sur un enroulement auxiliaire dit de réglage, en série avec l'enroulement haute tension.

Le réglage peut s'effectuer de deux façons :

- Le transformateur est déconnecté du réseau, solution courante pour les petits transformateurs.
- En charge, dans les grands transformateurs, pour assurer la continuité de service.

L'assurance de la fiabilité de fonctionnement du transformateur de puissance est le but majeur de ce travail. Un transformateur dans un réseau peut être soumis à des surtensions en provenance du réseau. Elles sont dues à des manœuvres en amont (ouverture d'appareils de commutation, fermetures ouvertures d'appareils de commandes...). Ces surtensions sont

dangereuses pour le matériel. Les plus dangereuses sont les surtensions de chocs de foudres directs ou indirects. Les décharges nuage sol directes ou au voisinage des structures sont à l'origine, chaque année, de nombreuses dégradations et de catastrophes humaines.

La foudre qui atteint un fil de ligne produit des ondes de tension dans le temps au point d'impact. Ces ondes se propagent de part et d'autre du point d'impact avec une vitesse voisine de celle de la lumière et une certaine déformation.

Lorsque l'onde de surtension arrive en un point de raccordement d'éléments du réseau, tel le point de raccordement d'un transformateur avec la ligne aérienne par exemple, son amplitude augmente et continue à se propager dans l'enroulement du transformateur. Cette situation peut provoquer des amorçages dans le transformateur, éventuellement des incendies et même des accidents de personnes se trouvant au poste.

Ces différents dangers, ainsi que l'exigence assez récente et croissante de la qualité des systèmes électriques (fiabilité, disponibilité, continuité de service...) font que la foudre fait partie des grandes préoccupations des électriciens, qu'ils soient distributeurs, constructeurs, concepteurs ou installateurs.

Afin de limiter les risques et garantir la qualité de service, on doit prévoir en plus d'un niveau d'isolement à fréquence industrielle, un isolement aux ondes de choc. Une protection harmonieuse contre les surtensions à fréquence industrielle et à haute fréquence relève du domaine de la coordination des isolements. Cette discipline propose et développe une méthode d'analyse du risque foudre. Elle permet de déterminer si une protection foudre est nécessaire ou non en fonction d'un risque humain, économique, environnement ou autre.

Pour la détermination du niveau d'isolement et du schéma des protections contre les surtensions (utilisation de parafoudres essentiellement), il faut préalablement évaluer ces surtensions et connaître les contraintes qu'elles imposent aux transformateurs.

Les contraintes assez sévères peuvent se rencontrer au niveau des enroulements de réglage s'ils sont en bouts libres, lorsqu'ils ne sont pas utilisés ou complètement utilisés, et donc soumis à des surtensions plus importantes du fait qu'ils restent hors de la zone de protection du parafoudre à l'entrée HT.

Le choix d'un niveau d'isolation relativement bas a pour conséquences de diminuer le gabarit et le poids du transformateur, ce qui facilite son transport et réduit son coût.

L'étude des surtensions dans les transformateurs est possible par des méthodes utilisant :

- Des expériences sur l'objet réel ;
- Des modèles mathématiques ;
- Des modèles électromagnétiques.

La première méthode, consistant à effectuer des mesures dans des conditions similaires à la réalité exige la construction d'un prototype de transformateur de taille réelle comme celui qu'on veut étudier. Cette méthode présente l'inconvénient d'être onéreuse quand il s'agit de grands transformateurs et la difficulté de réaliser les mêmes contraintes rencontrées que lorsque le transformateur est relié au réseau (il faut comprendre qu'avec cette méthode, à chaque transformateur, selon ses caractéristiques, il faut construire un prototype de taille réelle).

Parmi les méthodes mathématiques, on peut citer :

Le modèle EMTP

Le modèle EMTP (ElectroMagnetic Transient Program), est un programme de simulation des phénomènes transitoires et permanents des réseaux électriques. Ce logiciel, mondialement utilisé, permet à partir d'une bibliothèque de matériels (transformateurs, lignes, machines...) de modéliser toutes sortes de réseaux électriques, de simuler un défaut ou une manoeuvre d'appareil et de calculer précisément l'évolution des courants et tensions. Ce logiciel a été initié dans les années 70, et ne cesse depuis d'être amélioré en performances et complété par de nouvelles fonctions.

Le transformateur est représenté par un schéma équivalent classique auquel on ajoute des capacités pour tenir compte des hautes fréquences. Le calcul tient compte du caractère non linéaire de la branche de magnétisation et de l'effet de peau. Il tient compte des éléments non linéaires tels les parafoudres et présente donc l'avantage d'étudier le réseau dans des configurations quasi-réelles. Cependant, il n'est pas adapté à l'étude spéciale interne du transformateur.

Le modèle RESEL

Développé à EDF (France); il est basé sur deux schémas équivalents du transformateur, couplés entre eux. L'un traduit le comportement électrique, l'autre le comportement magnétique.

Le circuit électrique est composé de plusieurs cellules résistances, capacités et forces électromotrices. L'association de ces cellules dépend des techniques de bobinage du transformateur. Le circuit magnétique est composé d'un réseau de réluctances et de forces magnétomotrices. Les sources du circuit électrique sont liées aux variations de flux du circuit magnétique. Les sources du circuit magnétique sont liées au courant dans les enroulements. Pour prendre en compte les effets de la fréquence, le circuit magnétique est décomposé en éléments de géométrie simple pour lesquels la résolution des équations de Maxwell est relativement simple. Les réluctances complexes ainsi calculées se composent de cellules résistances- inductances.

De même, pour tenir compte de l'effet de peau, on introduit des éléments complexes qui traduisent les pertes dans les conducteurs. Le programme ne traite que des éléments de réseau

à constantes localisées, et ne permet pas une analyse fréquentielle systématique du transformateur.

Le modèle utilisant les inductances propres et mutuelles :

Ce modèle est le plus répandu et utilisé, à l'heure actuelle, pour modéliser un transformateur face à des surtensions impulsionnelles.

C'est le modèle retenu dans ce travail. En tenant compte des fréquences élevées, il introduit les capacités entre spires, bobines...par rapport à la masse. Il utilise un schéma équivalent de l'enroulement, comme un assemblage complexe de circuits résonants parallèles. Les paramètres de ce schéma à constantes réparties (résistances, inductances et capacités), sont déterminés en tenant compte du type de bobinage, de la géométrie réelle du transformateur et du caractère impulsionnel des surtensions. On discrétise le transformateur par spires ou galettes ou par des bobinages que l'on appellera éléments. Chaque élément est représenté par sa résistance et son inductance propre qui est couplée mutuellement avec les autres inductances. Entre les éléments, il existe des capacités de couplages et pour chaque élément une capacité par rapport à la masse.

Lors d'une surtension, l'enroulement du transformateur subit une contrainte sur son isolement par rapport à un autre enroulement, par rapport au noyau, par rapport à la cuve (à la masse). Une telle contrainte est dite transversale. Les diélectriques assurant cet isolement seront représentés par des capacités dites transversales. La contrainte qui s'exerce sur l'isolement entre galettes, spires...d'un conducteur bobiné s'appelle contrainte longitudinale et donne lieu à des fuites capacitatives longitudinales dont il faudra également tenir compte en considérant dans le schéma équivalent du transformateur soumis à des surtensions des capacités dites longitudinales. Cette façon de voir le comportement de l'enroulement du transformateur vis-à-vis d'une onde de choc est attribuée à Heller et Veverka.

La mise en équations, pour déterminer les surtensions en différents points le long de l'enroulement se fera sur un schéma équivalent où l'enroulement est à constantes réparties. Ce dernier est subdivisé en 10 éléments identiques (groupes de spires, galettes...) en séries, faisant intervenir leur résistance, leur inductance, les capacités de fuites transversales et longitudinales et les mutuelles inductances entre ces éléments.

Les paramètres de ce modèle à constantes réparties seront déterminés à partir de l'essai en court-circuit du transformateur en utilisant le schéma équivalent classique du transformateur à constantes localisées d'autant plus valable que la fréquence est basse, tout en ne perdant pas de vue que les surtensions ont des fréquences élevées. En effet, l'efficacité des méthodes utilisées pour l'étude des transformateurs à constantes localisées, incite à chercher, même dans le cas du modèle à constantes réparties, une modélisation faisant appel au modèle à éléments localisés.

On considérera différents nœuds le long de l'enroulement ainsi obtenu, le nombre de nœuds devant être inférieur à 100 (imposé par le logiciel utilisé). Les équations sont établies

en utilisant les deux lois de Kirchhoff. Les calculs seront faits pour un transformateur et un autotransformateur HT, possédant un enroulement de réglage, sous l'influence d'une onde normalisée  $1,2/50 \mu s$  arrivant à l'entrée de l'enroulement HT. Pour l'autotransformateur, on envisagera le cas où l'onde arrive du côté MT puisqu'il s'agit d'un même enroulement.

Lors de la conception d'un réseau électrique HT, il faut choisir un schéma de liaison du neutre à la terre : le neutre peut être soit isolé, soit relié intentionnellement à la terre. Dans l'autotransformateur, le neutre est toujours relié à la terre.

Il y a donc lieu de tenir compte de quatre cas :

- Enroulement à neutre isolé, sans protection, avec l'enroulement de réglage utilisé.
- Enroulement à neutre isolé, sans protection, avec l'enroulement de réglage non utilisé.
- Enroulement avec neutre à la terre, sans protection, avec l'enroulement de réglage utilisé.
- Enroulement avec neutre à la terre, sans protection, avec l'enroulement de réglage non utilisé.

On réexaminera les cas précédents en utilisant la protection par parafoudres.

Les calculs se feront en utilisant le logiciel P-SPICE, conçu pour l'étude des phénomènes transitoires dans les circuits électriques.

## **Introduction**

Ce chapitre donne des rappels non exhaustifs sur le transformateur. Outre les définitions, il contient certains rappels de calculs, indispensables à la suite du travail. Il existe différents types de transformateurs. On s'intéresse aux transformateurs de puissance, haute tension, triphasés, utilisés dans les réseaux, où, la production et le transport de l'énergie électrique sont réalisés en triphasé et qui sont exposés aux surtensions d'origine atmosphérique.

### **I. 1. Transformateur**

#### **I. 1. 1. Définition**

Un transformateur est un appareil statique à induction destinée à transformer un système de courants alternatifs en un autre système de courants alternatifs d'intensités et de tensions généralement différentes mais de même fréquence [1].

#### **I. 1. 2. Principe de fonctionnement**

Son fonctionnement est basé sur l'interaction électromagnétique de deux ou de plusieurs circuits immobiles l'un par rapport à l'autre.

Si deux bobines sont placées sur un même circuit magnétique, et si l'une des bobines, dite primaire, est reliée à une source de courants alternatifs, elle crée dans le noyau un flux alternatif dont les variations provoquent dans la deuxième bobine, dite secondaire, une force électromotrice d'induction alternative de même fréquence que celle du courant d'alimentation [1].

#### **I. 1. 3. Principaux éléments des transformateurs**

Le transformateur comporte deux parties essentielles: la partie active et la partie constructive.

##### **I. 1. 3. 1. Partie active**

###### **a) Le circuit magnétique**

Un circuit magnétique est un assemblage de tôles d'acier magnétique, isolées les unes des autres pour diminuer les pertes par courants de Foucault, destiné à canaliser le flux.

L'utilisation de flux magnétiques a imposé la réalisation de circuits magnétiques, avec des formes adaptées aux besoins.

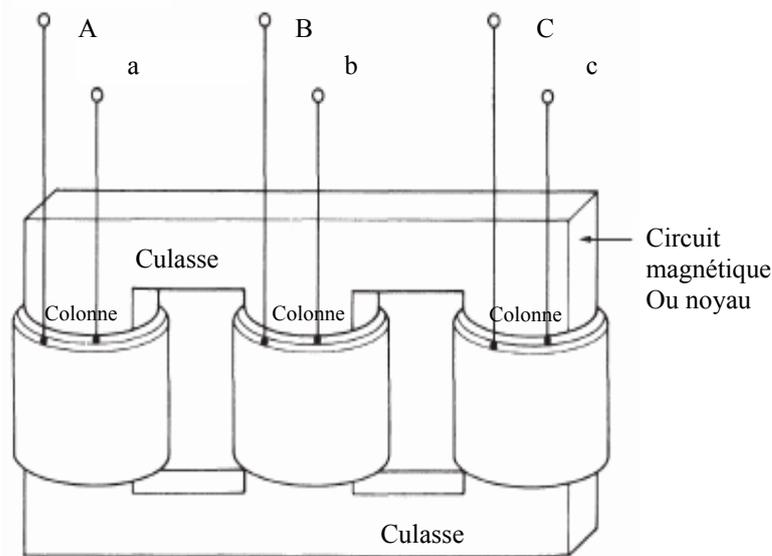
Dans le cas des transformateurs triphasés, ceux-ci se présentent fréquemment sous forme de trois colonnes, à section circulaire, reliées entre elles par deux culasses. Sur chaque colonne sont placés un enroulement primaire et un enroulement secondaire. Chaque colonne se comporte comme un transformateur monophasé.

### b) Les Enroulements

Les enroulements sont constitués de conducteurs de section ronde ou rectangulaire, enroulés en bobines sur les colonnes du transformateur.

Les enroulements haute tension (A, B, C) et basse tension (a, b, c) concentriques, sont isolés électriquement les uns des autres de telle sorte que l'énergie n'est transmise que grâce à leur couplage magnétique. Ces derniers sont plus proches du noyau que les premiers (fig.I.1).

Pour éviter des efforts axiaux en cas de forts courants, la hauteur des enroulements doit être la même.



**Fig.I-1 : partie active d'un transformateur triphasé.**

On place le circuit magnétique, muni de ses enroulements dans une cuve remplie d'huile minérale très fluide. L'huile, circulant le long des parties actives du transformateur véhicule la chaleur dégagée, chaleur qu'elle transmet ensuite à la cuve munie de radiateurs [1].

#### I.1.3.2. Partie constructive

##### a) La cuve

La construction de la cuve est liée au calcul thermique du transformateur. En général la cuve des transformateurs de puissance est de forme ovale, installée sur un chariot avec galets prévus pour supporter le poids total des parties actives et de l'huile de refroidissement [1].

##### b) couvercle de cuve et sorties

Sur le couvercle sont placées plusieurs pièces dont les plus importantes sont :

- Les isolateurs de sorties pour assurer une liaison électrique entre les réseaux haute tension et moyenne tension et les enroulements. Dans les transformateurs prévus pour une tension ne

dépassant pas 35 kV on utilise des isolateurs en porcelaine remplis d'air ou d'huile. Par contre dans les transformateurs de 110 kV et plus, on utilise des isolateurs en porcelaine remplis d'huile [1].

- Le conservateur d'huile ;
- Le tube d'évacuation des gaz pour les transformateurs à puissance de 1000 kVA et plus ;

#### **I. 1. 4. Couplage des enroulements**

Les enroulements d'un transformateur polyphasé peuvent être connectés en étoile, en polygone ou en zigzag (fig. I-2). Le choix du couplage est guidé par des considérations de construction et d'emploi :

- En étoile lorsqu'ils ont une de leurs extrémités reliées à un point commun appelé neutre ;
- En polygone lorsqu'ils sont montés en série de manière à réaliser un circuit fermé,
- Dans le cas des appareils triphasés ce mode de connexion est dit triangle ;
- En zigzag lorsque chaque enroulement est divisé en deux parties dans lesquelles sont induites des tensions de phases différentes [1].

Du point de vue dimensionnement des enroulements, on a toujours intérêt à choisir un couplage étoile aux très hautes tensions (répartition de la tension sur deux enroulements) et un couplage triangle aux faibles tensions (aux fortes intensités). Un couplage étoile-étoile convient aux charges équilibrées (réseau de transport en HT). En cas de charge déséquilibrée, il n'est pas conseillé d'utiliser le montage triangle (courant de circulation dans le triangle). Pour cette raison, les secondaires des transformateurs de distribution ne sont pas couplés en triangle. Quand on souhaite disposer de deux tensions, le secondaire doit être en étoile avec fil neutre sorti. Pour cette raison les transformateurs des réseaux de distribution ont leurs secondaires en étoile. Leur primaire est souvent en triangle. Un couplage en étoile du primaire est déconseillé en distribution à cause des surtensions qu'il peut engendrer en cas de charge déséquilibrée. Le montage étoile zigzag n'est pas employé : il présente des inconvénients de la connexion étoile-étoile. Le montage triangle zigzag est le plus commun : il est utilisé pour alimenter des charges à quatre fils, à partir d'un réseau à trois fils et pour alimenter des redresseurs.

Le couplage des enroulements du transformateur est désigné par un symbole formé d'une succession de lettres associées à un indice numérique :

Lettres majuscules pour l'enroulement primaire (Y pour le couplage en étoile,  $\Delta$  pour le couplage en triangle) ;

Lettres minuscules pour l'enroulement secondaire (y pour le couplage en étoile, d pour le couplage en triangle et z pour le couplage en zigzag).

Les indices numériques ou indices horaires expriment d'une façon simple le déphasage relatif, multiple de  $30^\circ$ , introduit par un transformateur entre tensions homologues (par exemple entre la tension simple (HT)  $V_{AN}$ , et la tension simple BT  $V_{an}$ ) [1].

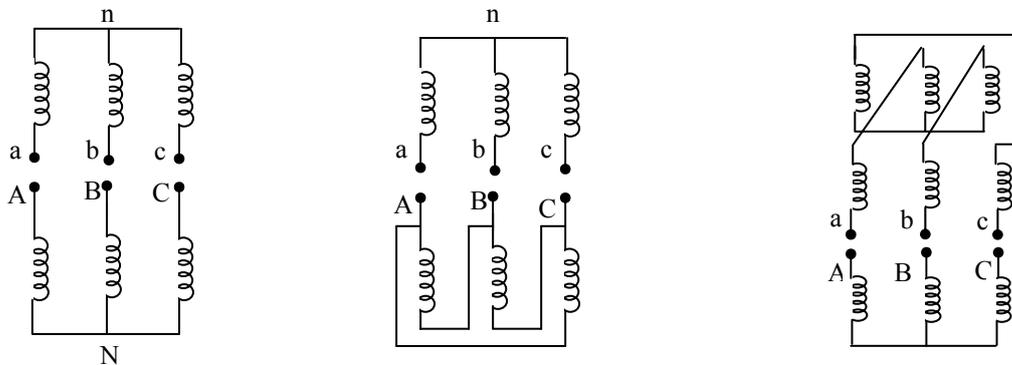


Fig.I-2. Exemples de couplages : Yy0, Δy11 et Yz5.

### I. 1. 5. Caractéristiques du transformateur

Un transformateur est caractérisé principalement par :

- Sa puissance apparente ;
- Sa tension primaire (tension du réseau d'alimentation);
- Sa tension secondaire ;
- La fréquence ;
- Les couplages des enroulements ;
- Le lieu d'installation, intérieur ou extérieur ;
- Le mode de refroidissement.

La puissance, les tensions, les courants, la fréquence... qui caractérisent le régime de fonctionnement auquel le transformateur est destiné par son constructeur, sont appelés paramètres nominaux.

La tension nominale  $U_{1n}$  est la tension entre phases au primaire.

Le courant nominal  $I_{1n}$  est le courant dans un fil de ligne d'alimentation.

La puissance apparente nominale  $S_n$  est  $\sqrt{3}$  fois le produit des valeurs nominales de la tension et du courant.

La tension secondaire  $U_2$  dépend du courant et de la nature de la charge. De ce fait, pour exclure toute ambiguïté, on prend pour tension secondaire nominale  $U_{2n}$ , la tension secondaire à vide lorsque le primaire est alimenté sous la tension nominale. Si  $U_{1n}$  est plus grande que  $U_{2n}$ , le transformateur est dit abaisseur. Le primaire est l'enroulement HT (haute tension) et le secondaire l'enroulement BT (basse tension). Par contre si  $U_{1n}$  est plus petite que  $U_{2n}$ , le transformateur est dit élévateur : son primaire est l'enroulement BT et son secondaire son enroulement HT. Le transformateur ayant un excellent rendement, on considère que la puissance

apparente nominale est la même au secondaire. Le courant nominal secondaire est alors défini comme le rapport de la puissance apparente sur  $\sqrt{3}$  fois la tension secondaire nominale.

### I. 1. 6. Fonctionnement du transformateur

En régime équilibré, chaque colonne du transformateur peut être considéré comme un transformateur monophasé, en négligeant quelques particularités liées au circuit magnétique et au calcul du courant magnétisant. Les relations obtenues pour le transformateur monophasé sont valables pour chaque phase du transformateur triphasé.

Dans les réseaux électriques les transformateurs sont alimentés sous une tension primaire variant harmoniquement :  $u_1 = U_{1m} \sin 2\pi f t$  (I. 1)

Pour représenter correctement le transformateur tel qu'il se comporte réellement, on doit tenir compte :

- Des résistances ohmiques  $R_1$  et  $R_2$  des enroulements.
- Des réactances de fuites  $X_1$  et  $X_2$  du primaire et du secondaire.
- Des pertes par hystérésis et courants de Foucault dans l'acier, dans une résistance  $R_f$  « équivalente » au fer.
- Du courant magnétisant  $I_\mu$ , dans une réactance de magnétisation  $X_\mu$ .
- Des nombres de spires  $n_1$  et  $n_2$  du primaire et du secondaire.

#### I. 1. 6. 1. Fonctionnement à vide

Si le transformateur ne transforme aucune énergie, on dit qu'il marche à vide (le courant dans le secondaire est nul dans ce cas).

Soit  $\varphi_{10t}$  le flux total engendré par l'enroulement primaire en régime à vide. Ce flux se décompose en un flux magnétique principal  $\varphi_{10}$  et un flux de fuite  $\varphi_{10f}$ . Le flux total embrassé par l'enroulement primaire est  $\Psi_{10} = n_1 \varphi_{10t} = n_1 \varphi_{10} + n_1 \varphi_{10f}$ . Le flux total embrassé par l'enroulement secondaire est  $\Psi_{20} = n_2 \varphi_{10}$ . Ces flux variant périodiquement, produisent des f.e.m induites dans les enroulements :

$$e_{1t} = - \frac{d\Psi_{10}}{dt} = - n_1 \frac{d\varphi_{10}}{dt} - n_1 \frac{d\varphi_{10f}}{dt} = e_{10} + e_{1f}$$

$$e_{2t} = - \frac{d\Psi_{20}}{dt} = - n_2 \frac{d\varphi_{10}}{dt} = e_{20}$$

$e_{10}$  est la f.e.m d'induction mutuelle au primaire (fem. d'auto-induction).

$e_{1f}$  est la f.e.m. de dispersion au primaire.

$e_{20}$  est la f.e.m. d'induction mutuelle au secondaire.

Les équations de Kirchhoff s'écrivent :

$$u_1 + e_{10} + e_{10f} = R_1 i_0 \quad \text{soit} \quad u_1 = n_1 \frac{d\phi_{10}}{dt} + n_1 \frac{d\phi_{10f}}{dt} + R_1 i_0$$

$$u_2 = e_{20} \quad \text{soit} \quad u_2 = -n_2 \frac{d\phi_{10}}{dt}$$

A vide, pour la plupart des transformateur, surtout pour les transformateurs de puissance, on peut négliger  $e_{10f}$  et  $R_1 i_0$  devant  $e_{10}$  et écrire :

$$u_1 = n_1 \frac{d\phi_{10}}{dt} = -e_{10} \quad \text{et} \quad u_2 = -n_2 \frac{d\phi_{10}}{dt} = e_{20} \quad (I.2)$$

On déduit : 
$$-\frac{u_1}{u_2} = \frac{e_{10}}{e_{20}} = m \quad (I.3)$$

$m$  s'appelle rapport de transformation.

**Remarque:** Dans les transformateurs triphasés, selon le couplage des enroulements, le rapport de transformation n'est pas toujours égal au rapport du nombre de spires car il est défini par le rapport des tensions composées à vide.

### I. 1. 6. 2. Fonctionnement en charge

En charge, le flux dans le circuit magnétique est un flux mutuel, dû aux ampères-tours primaires et secondaires en même temps. Ce flux  $\Phi$  est sensiblement le même que le flux à vide  $\Phi_{10}$ .

#### a) Equations de fonctionnement en régime permanent

Des considérations précédentes, découlent les relations suivantes (fig. I-3) :

$$\bar{U}_1 = R_1 \bar{I}_1 + jX_1 \bar{I}_1 - \bar{E}_1 \quad \text{où} \quad \bar{E}_1 = -jn_1 \omega \bar{\Phi} \quad (I.4)$$

$$\bar{U}_2 = -R_2 \bar{I}_2 - jX_2 \bar{I}_2 + \bar{E}_2 \quad \text{où} \quad \bar{E}_2 = -jn_2 \omega \bar{\Phi} \quad (I.5)$$

$$I_f = E_1 / R_f$$

$$I_\mu = E_1 / X_\mu$$

Comme  $\Phi \approx \Phi_{10}$ , on peut écrire :  $n_1 \bar{I}_1 - n_2 \bar{I}_2 = n_1 \bar{I}_{10}$ . (I.6)

#### b) Schéma équivalent

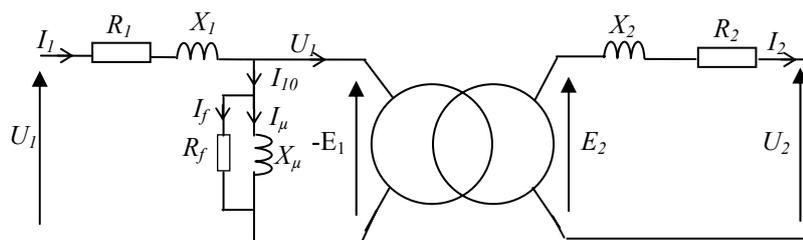


Fig.I-3: Schéma équivalent complet d'un transformateur réel.

### c) Comportement simplifié dans l'hypothèse de Kapp

Les tensions primaire et secondaire à vide sont proportionnelles : elles sont dans le rapport de transformation. En ce qui concerne les courants,  $I_\mu$  intervient dans  $n_1 \bar{I}_1 + n_2 \bar{I}_2 = n_1 \bar{I}_\mu$ . Or, les transformateurs sont réalisés de manière à ce que le courant à vide (donc  $n_1 I_\mu$ ) soit le plus faible possible. L'hypothèse de Kapp permet de négliger ce courant vis à vis de  $I_1$  si bien que  $I_1$  et  $I_2$  sont dans le rapport de transformation :  $n_1 I_1 = n_2 I_2$  ou encore  $I_1 = m I_2$ .

Dans l'hypothèse de Kapp :

$$\text{A vide : } \frac{\bar{U}_1}{\bar{U}_{20}} = \frac{-\bar{E}_1 + R_1 \bar{I}_1 + jX_1 \bar{I}_1}{\bar{U}_{20}} \approx -E_1 / U_{20} = E_1 / E_2 = m.$$

En charge :  $\frac{\bar{E}_1}{\bar{E}_2} = m$ . Cette relation est toujours vraie, mais peu exploitable en pratique.

$$I_1 = \frac{I_2}{m} \quad (\text{I.7})$$

### d) Circuit équivalent correspondant

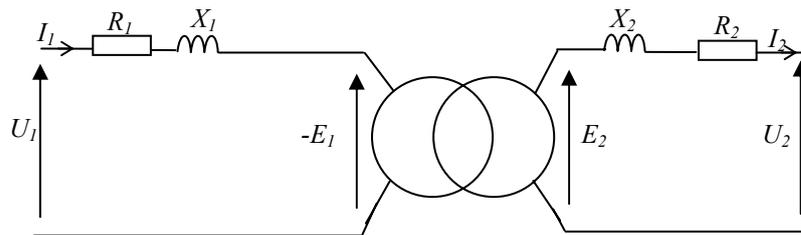


Fig. I-4: Transformateur réel dans l'hypothèse de Kapp.

#### I. 1. 6. 3. Transformateur réduit ou ramené

L'étude analytique et graphique du fonctionnement d'un transformateur est simplifiée lorsqu'on remplace un transformateur réel, dans lequel les enroulements sont couplés électromagnétiquement, par un schéma, dont les éléments ne sont couplés qu'électriquement.

Pour cela, on utilise un modèle dans lequel les deux enroulements ont un même nombre de spires. C'est-à-dire un transformateur dont le rapport de transformation est égal à un. Ce transformateur fictif est dit réduit. On peut réduire (ou ramener) l'enroulement secondaire à l'enroulement primaire ou réduire l'enroulement primaire à l'enroulement secondaire. Généralement on réduit l'enroulement secondaire à l'enroulement primaire. A cette fin, on remplace l'enroulement secondaire à  $n_2$  spires, par un enroulement réduit équivalent à  $n_1$  spires, comme l'enroulement primaire. Toutes les grandeurs qui se rapportent à l'enroulement secondaire ramené sont appelées grandeurs réduites ou ramenées et sont désignées par les lettres primes des valeurs réelles :  $E'_2, I'_2, R'_2, X'_2...$  etc. [1].

$$E'_2 = E_1 \quad \text{et} \quad E_2 = \frac{n_2}{n_1} E_1 \quad \text{soit} \quad E'_2 = \frac{n_1}{n_2} E_2. \quad (\text{I.8})$$

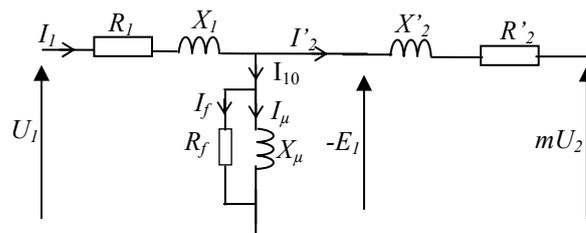
$$I'_2 = I_1 \quad \text{et} \quad I_1 = \frac{n_2}{n_1} I_2 \quad \text{soit} \quad I'_2 = \frac{n_2}{n_1} I_2 \quad (\text{I.9})$$

Les puissances de l'enroulement secondaires doivent rester les mêmes. Les pertes devant rester les mêmes :

$$R_2 I_2^2 = R'_2 I'^2_2 = R'_2 \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2 I_2^2 \quad \text{d'où} \quad R'_2 = \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2 R_2 \quad (\text{I.10})$$

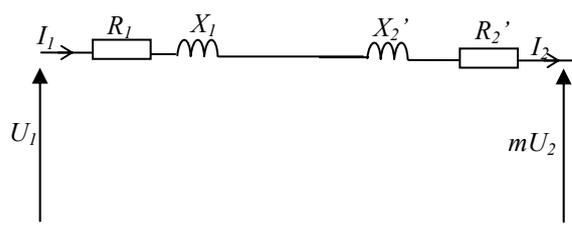
$$X_2 I_2^2 = X'_2 I'^2_2 = X'_2 \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2 I_2^2 \quad \text{soit} \quad X'_2 = \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2 X_2 \quad (\text{I.11})$$

**a) Schéma équivalent ramené au primaire :**



**Fig. I-5: Transformateur réel réduit au primaire.**

**b) Schéma équivalent ramené au primaire dans l'hypothèse de Kapp**



**Fig. I-6 : Circuit équivalent du transformateur dans l'hypothèse de Kapp.**

**c) Schéma équivalent en hautes fréquences**

A des fréquences élevées, l'influence de  $X_\mu$  sur le courant magnétisant le rend encore plus négligeable. De même,  $X_1$  et  $X_2$  prennent des valeurs qu'on ne peut plus ignorer. Il en est de même pour les résistances  $R_1$  et  $R_2$  à cause du phénomène électromagnétique engendrant l'effet de peau dans les enroulements. On obtient le schéma précédent (fig.I-6), à hautes fréquences,

avec beaucoup de légitimité. Ses paramètres seront repris avec intérêt dans le modèle qu'on utilisera pour le calcul des surtensions [3].

#### I. 1. 6. 4. Tension de court-circuit

Lorsque le transformateur est en court-circuit, la tension  $U_{cc}$  appliquée au transformateur pour laquelle les courants dans les enroulements sont égaux aux valeurs nominales, exprimée en pour cent de la tension nominale correspondante, est appelée tension de court-circuit du transformateur :

$$u_{cc} = \frac{U_{cc}}{U_n} 100 \quad (\text{I.12})$$

#### a) Paramètres de court-circuit

Les paramètres du schéma équivalent ramené, du transformateur en court-circuit, sont appelés paramètres de court-circuit du transformateur :

$$R_{cc} = R_1 + R_2' ; \quad X_{cc} = X_1 + X_2' ; \quad Z_{cc} = \sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2} \quad (\text{I.13})$$

#### b) Détermination des paramètres de court-circuit d'un transformateur

Le court-circuit dit symétrique d'un transformateur triphasé où les trois enroulements sont court-circuités ne présente pas de particularité en comparaison avec le court-circuit d'un transformateur monophasé. En effet, en court-circuit le fer n'étant pas saturé, les courants et les puissances sont réparties entre les phases et les fem ne sont pas déformées. Tout ce qui est dit pour le court-circuit d'un transformateur monophasé reste valable pour le court-circuit d'un transformateur triphasé symétrique, le calcul se faisant pour une phase.

Pour déterminer les paramètres  $R_1$  et  $X_1$  de l'enroulement primaire, on détermine les paramètres de court-circuit  $Z_{cc}$ ,  $R_{cc}$ ,  $X_{cc}$ , en faisant subir au transformateur l'essai en court-circuit.

#### c) Essai en court-circuit

Dans un essai avec secondaire en court circuit, il faut limiter la tension primaire pour se placer au régime nominal de courant au secondaire. Dans ces conditions, les tensions sont faibles.

Pour amener le courant secondaire à la valeur nominale, la tension primaire est réglée avec un autotransformateur (fig.I-7). On mesure la tension primaire à l'aide d'un voltmètre supposé parfait (impédance infinie), les courants primaire et secondaire (ampèremètres d'impédance nulle) et la puissance absorbée au primaire.

On relève les grandeurs suivantes :

- Tension primaire  $U_{Icc}$  avec V ;

- Courant primaire  $I_{1cc}$  avec  $A_1$ , essentiellement pour contrôler le courant dans le wattmètre et éviter de dépasser le calibre courant de cet appareil ;
- Courant secondaire  $I_{2cc} = I_{2n}$  avec  $A_2$  ;
- La puissance primaire  $P_{1cc}$  avec  $W$ .

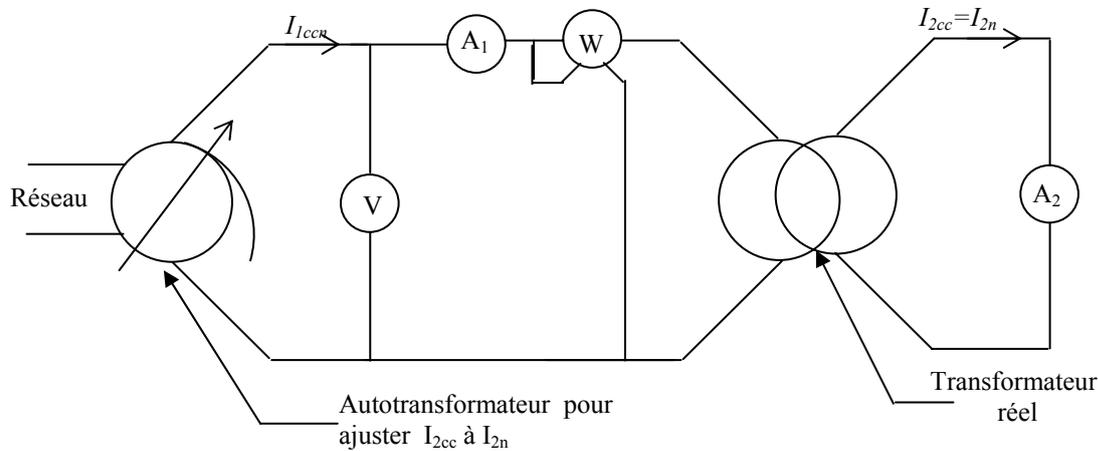


Fig.I-7: Schéma de montage de l'essai en court-circuit.

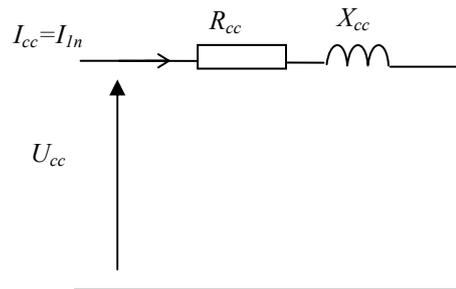


Fig.I-8: Schéma équivalent ramené au primaire, en court-circuit.

$$\text{Avec : } Z_{cc} = \frac{U_{cc}}{I_{cc}}, \quad R_{cc} = \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2} \quad \text{et} \quad X_{cc} = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_{cc}^2} \quad (\text{I.14})$$

Pour les puissants transformateurs à haute tension  $R_{cc} \ll Z_{cc}$ , on peut calculer  $X_{cc}$  par

$$X_{cc} = \frac{U_{cc}}{I_{cc}}. \quad (\text{I.15})$$

### I. 1.7. Réglage de la tension

La tension constitue, avec la fréquence, le principal paramètre de la qualité de l'énergie électrique. Ce paramètre est commun aux différents utilisateurs : clients, distributeurs, producteurs, raccordés sur un même nœud électrique.

Le réglage de la tension est une nécessité pour exploiter le réseau en assurant la sûreté, maintenir la tension d'alimentation des clients dans les plages contractuelles, respecter les contraintes de fonctionnement des matériels, minimiser les pertes, utiliser au mieux la capacité des ouvrages de transport.

Pour les clients et les distributeurs, chaque contrat de fourniture définit la tension d'alimentation déclarée et la plage de variation acceptée autour de cette valeur. Ces deux termes, qui conditionnent le dimensionnement des appareils récepteurs des clients, doivent être, à tout moment, respectés :

- des tensions trop hautes entraînent le vieillissement ou la destruction des matériels raccordés;
- des tensions trop basses provoquent des surcharges dans les lignes, perturbent le bon fonctionnement de certaines protections, affectent la tenue des auxiliaires des installations de production ...

Sur les réseaux, le réglage de la tension est assuré par les régleurs en charge automatiques installés sur les transformateurs THT/HT et HT/MT. Dans les transformateurs couplés en étoile, le réglage est placé du côté du neutre où les contraintes sont plus faibles.

Lorsque le réglage est de  $\pm 10$  à  $\pm 12\%$ , les prises se trouvent sur un enroulement auxiliaire dit de réglage en série avec l'enroulement HT.

#### **I. 1. 7. 1. Les régleurs à vide de transformateurs**

Afin de maintenir le plan de tension sur les réseaux, les transformateurs sont munis de régleurs de tension. En modifiant le rapport de transformation, en fonction des variations de la tension au primaire, les régleurs permettent de maintenir la tension autour de la valeur de consigne au secondaire. Ces régleurs peuvent être manuels ou automatiques.

Le réglage à vide exige la mise hors tension du transformateur avant toute manœuvre, d'où des interruptions de service.

#### **I. 1. 7. 2. Les régleurs en charge de transformateurs**

Par contre, les régleurs en charges permettent de modifier la tension sans interrompre le courant de charge. Le réglage en charge, par phase, nécessite un enroulement de réglage, une résistance de passage (ou une inductance), des interrupteurs pour assurer les commutations. Les changements de prises sont effectués avec une temporisation initiale (passage de la première prise) de 30 secondes pour les transformateurs du réseau de transport (1 minute pour les transformateurs HT/MT), puis de 10 secondes pour le passage des prises suivantes.

Ces dispositifs sont très utiles en situation normale. Ils peuvent se placer sur l'enroulement HT ou BT.

On préfère les placer habituellement sur l'enroulement HT pour les raisons suivantes :

- Le courant est plus faible, ce qui facilite sa mise en œuvre.
- L'enroulement HT est plus accessible car il est à l'extérieur de l'enroulement BT.

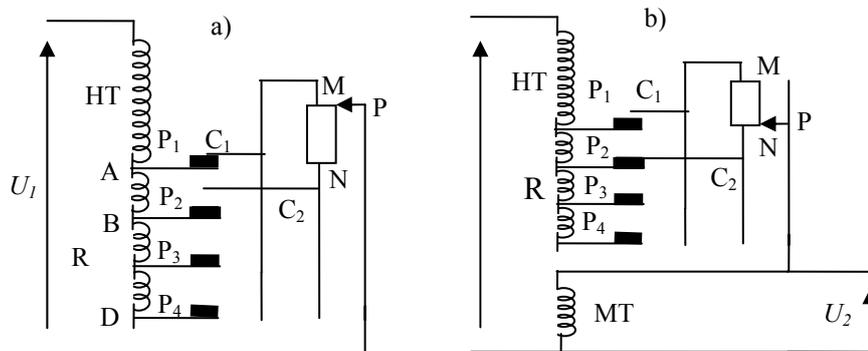
### I. 1. 7. 3. Principe de fonctionnement

L'enroulement de réglage est pourvu de prises. Le passage d'une prise à l'autre met la partie de l'enroulement se trouvant entre ces deux prises en court-circuit.

Le commutateur le plus simple comporte deux contacts ( $C_1$  et  $C_2$ ) entre lesquels est insérée une résistance  $MN$  (ou une inductance), dite de passage, permettant de limiter le courant de court-circuit quand on passe d'une prise à l'autre (fig.I-9).

Lorsque la prise  $P_1$  est utilisée, le contact  $C_1$  est en  $P_1$  et le contact  $C_2$  ne touche aucune prise. Pour passer à la prise  $P_2$ , on met le contact  $C_2$  sur cette prise le contact  $C_1$  étant toujours sur  $P_1$ .

La partie  $AB$  de l'enroulement est alors en court circuit à travers la résistance  $MN$ . On ouvre le contact  $C_1$ , c'est la prise  $P_2$  qui est utilisée. Pour éviter des pertes dans la résistance de passage, le curseur  $P$  est en  $M$  lorsque la prise  $P_1$  (ou  $P_3$ ) est utilisée, en  $N$  lorsque c'est la prise  $P_2$  (ou  $P_4$ ) qui est utilisée [12].



**Fig. I-9:** a) Enroulements HT et de réglage R d'un transformateur avec régleur en charge.  
 - Prise  $P_1$  en service.  
 b) Autotransformateur, avec régleur en charge de la tension.  
 - Prise  $P_2$  en service.

### I. 1. 8. Défauts dans les transformateurs

Ils peuvent être de natures très diverses :

- électrique : mauvais contacts dans les connexions et le changeur de prises.
- diélectrique : amorçages entre enroulements ou entre pièces sous tension et la masse, décharges partielles.
- thermique : échauffement anormal, vieillissement thermique, pollution de l'huile.
- mécanique : vibrations, fuites, fonctionnement défectueux de changeurs de prises.
- électromagnétique : courants de Foucault induits dans le circuit magnétique, les pièces de serrage, la cuve.

### I. 1. 9. Domaine d'utilisation des transformateurs de puissance

On utilise les transformateurs de puissance dans les cas suivants :

- liaison entre les gros alternateurs des centrales thermiques ou hydrauliques et les réseaux haute tension sur lesquels ils débitent.
- alimentation des services auxiliaires des centrales thermiques ou hydrauliques.
- liaison entre les réseaux haute tension ou entre les réseaux haute tension et moyenne tension.
- liaison entre les réseaux haute tension et les usines très importantes [1].

### I. 2. Autotransformateur

Un autotransformateur n'a qu'un seul enroulement par phase. On notera AX ; A étant l'entrée et X la sortie, l'enroulement de la phase à laquelle on s'intéresse, les phénomènes électriques étant les mêmes sur les autres phases en régime équilibré.

#### I. 2. 1. Définition

On appelle **autotransformateur**, un **transformateur** dont une partie de l'enroulement unique appartient simultanément au primaire et au secondaire (fig. I-10).

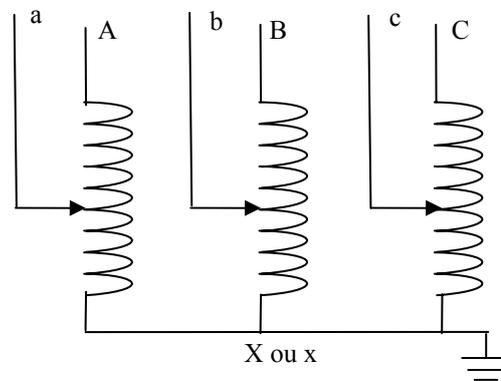
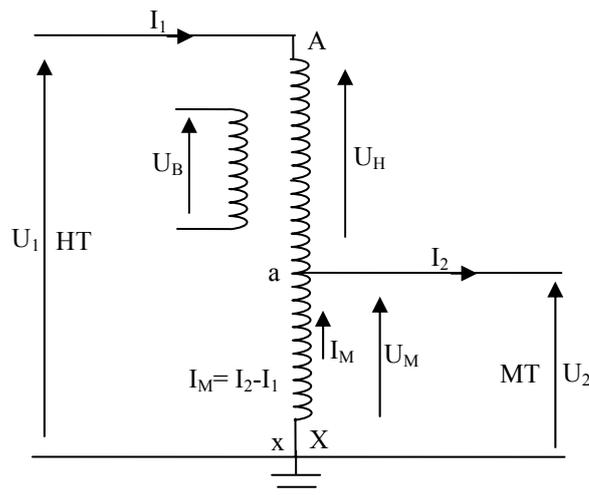


Fig.I-10 : Schéma d'autotransformateur triphasé.

#### I. 2. 2. Autotransformateur de puissance

L'autotransformateur de puissance est un appareil triphasé, avec un couplage en étoile, assurant la liaison entre les réseaux de transport. Il possède des prises de réglage en charge, un enroulement dit tertiaire, à basse tension (10 à 15 kV). Cette enroulement, couplé en triangle alimente, soit des réactances (pour l'équilibre du réseau, pour éviter l'effet FERANTI), soit un transformateur de service auxiliaire (fig.I-11).



**Fig. I-11 : Schéma monophasé, de principe, d'un autotransformateur « haute tension » abaisseur.**

### I. 2. 3. Description des enroulements

La partie ax (souvent x et X sont confondus) de cet enroulement, appelée enroulement shunt ou commun et appartenant simultanément au circuit du côté source et à celui du côté charge, constitue la basse tension, tandis que l'autre partie, Aa, appelée enroulement série, est particulière au côté source seul ou au côté charge seul. Les extrémités A et X sont les bornes haute tension, a et x les bornes moyenne tension. On remarque que le secondaire et le primaire sont électriquement liés : il n'y a plus d'isolation galvanique qui caractérise le transformateur classique, avec ses enroulements distincts. Comme le transformateur ordinaire, l'autotransformateur peut être utilisé comme abaisseur ou élévateur [13].

#### Notation :

Par la suite, dans la notation adoptée, les indices H, M, B sont donnés dans un ordre déterminé. H désigne le côté haute tension, M le côté moyenne tension et B le côté basse tension. Si un seul existe cela signifie que la grandeur ou le paramètre appartient au côté que désigne cet indice. Si deux existent, cela signifie que la grandeur ou le paramètre est ramené au côté désigné par le premier indice et fait intervenir le côté indiqué par le deuxième indice. Si les trois existent, cela signifie que la grandeur ou le paramètre appartenant au côté indiqué par le troisième indice est ramené au côté indiqué par le deuxième indice, puis ramené du côté indiqué par le premier indice. Si les indices sont séparés par un tiret, il s'agit d'une grandeur totale ramenée. Exemples :  $R_{HM}$  est la résistance de la phase « moyenne tension » ramenée au côté « haute tension » ;  $R_{M-B}$  est la résistance totale ramenée au côté moyenne tension et faisant intervenir la résistance du côté basse tension ;  $X_{HMB}$  est la réactance de fuite de la basse tension ramenée à la moyenne tension, puis ramenée à la haute tension ;  $P_{ccH}$  est la puissance consommée en court circuit par la résistance  $R_H$ , c'est-à-dire la résistance de l'enroulement haute tension ;  $R_{ccH-M}$  est la résistance totale ramenée au côté haute tension lorsque la moyenne tension est en court circuit. Elle consomme la puissance  $P_{ccH-M}$  sous la tension  $U_{ccH-M}$  [1].

### I. 2. 4. Fonctionnement

Dans l'autotransformateur de la fig. I-11, représenté en abaisseur, on peut imaginer un « transformateur intérieur » dont le primaire serait constitué par la partie Aa de l'enroulement, appelé enroulement série, ou abusivement, enroulement HT, à  $n_H$  spires, et le secondaire par la partie ax, appelée enroulement commun ou shunt, qui sera l'enroulement MT à  $n_M$  spires.

Si on considère l'enroulement tertiaire, il constituera l'enroulement BT à  $n_B$  spires. L'ensemble, peut être vu dès lors, comme un transformateur à trois enroulements.

Dans cet autotransformateur, supposé idéal et sans enroulement tertiaire dans un premier temps, on peut écrire, sachant que les enroulements sont traversés par le même flux :

$$\bar{U}_H = -j\omega n_H \bar{\Phi}$$

$$\bar{U}_M = -j\omega n_M \bar{\Phi}$$

D'où :

$$\frac{\bar{U}_H}{\bar{U}_M} = \frac{U_H}{U_M} = \frac{n_H}{n_M} = k_{HM} \quad (I.16)$$

Si  $I_H$  et  $I_M$  désignent respectivement les courants dans les enroulements HT et MT, on a :

$$\begin{aligned} n_H \bar{I}_H + n_M \bar{I}_M &= 0 \\ -\frac{\bar{I}_M}{\bar{I}_H} &= \frac{I_M}{I_H} = k_{HM} \end{aligned} \quad (I.17)$$

$k_{HM}$  est le rapport de transformation du transformateur intérieur.

Entre les grandeurs externes et les grandeurs internes, on peut écrire :

$$\begin{aligned} \bar{U}_1 &= \bar{U}_H + \bar{U}_M \\ \bar{U}_2 &= \bar{U}_M \\ \frac{\bar{U}_1}{\bar{U}_2} &= \frac{\bar{U}_H + \bar{U}_M}{\bar{U}_M} = \frac{\bar{U}_H}{\bar{U}_M} + 1 = k_{HM} + 1 = \frac{n_H + n_M}{n_M} = K_{HM} \\ \bar{I}_1 &= \bar{I}_H \\ \bar{I}_2 &= \bar{I}_M + \bar{I}_1 \\ \frac{\bar{I}_2}{\bar{I}_1} &= \frac{\bar{I}_M}{\bar{I}_H} + 1 = \frac{n_H}{n_M} + 1 = \frac{U_1}{U_2} = K_{HM} \end{aligned} \quad (I.18)$$

$K_{HM}$  est le rapport de transformation de l'autotransformateur.

Le courant dans la partie ax vaut:

$$\bar{I}_M = \bar{I}_2 - \bar{I}_1 = \bar{I}_2 - \frac{\bar{I}_2}{K_{HM}} = \bar{I}_2 \left(1 - \frac{1}{K_{HM}}\right)$$

(on remarque que  $I_M$  et  $I_2$  sont dans le même sens).

Ce dernier résultat montre que l'enroulement MT est traversé par un courant plus faible que dans le cas d'un transformateur classique. Pour un même courant secondaire et une même densité de courant, on peut réduire la section des conducteurs ax.

**I. 2. 5. Puissances**

La puissance apparente qui passe du primaire au secondaire est appelée puissance traversante :

$$S_1 = U_1 I_1 = U_2 I_2 \quad (\text{par phase}).$$

$$S_1 = (U_H + U_M) I_1 = U_H I_1 + U_M I_1$$

$S_{elm.} = U_H I_1$  est la puissance de dimensionnement (puissance transmise au secondaire par induction, c'est une puissance électromagnétique).

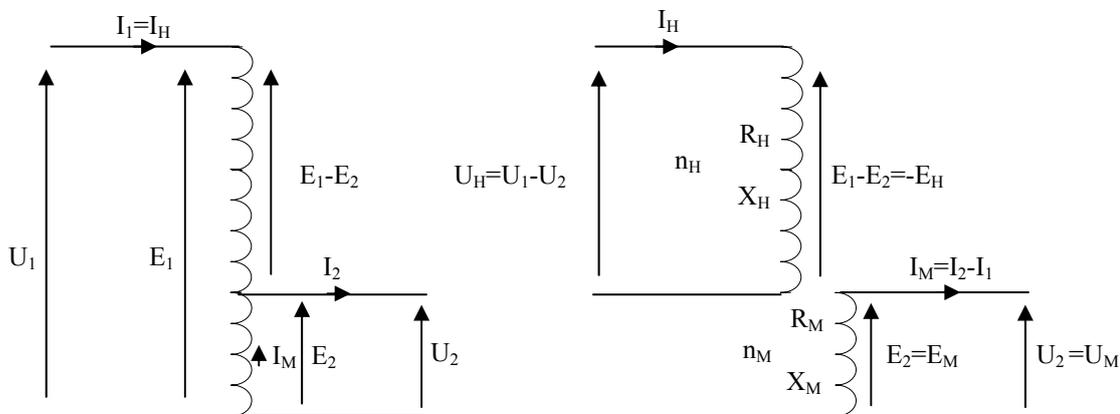
$S_{el.} = U_M I_1$  est la puissance électrique (transmise au secondaire par conduction).

**I. 2. 6. Autotransformateur réel ramené au côté « haute tension »**

Dans l'autotransformateur réel, l'enroulement série, dit enroulement haute tension possède une résistance  $R_H$  et une réactance de fuite  $X_H$ ; l'enroulement commun, dit enroulement moyenne tension, une résistance  $R_M$  et une réactance de fuite  $X_M$ . Avec l'enroulement tertiaire de résistance  $R_B$  et de réactance  $X_B$ , l'autotransformateur se présente comme un transformateur à 3 enroulements. On peut dans ce cas, ramener l'autotransformateur au côté haute tension en procédant par paire d'enroulements :

- ramener le côté moyenne tension au côté haute tension ;
- ramener de la même façon le côté basse tension à la haute tension.

Pour le premier cas, en s'appuyant sur le schéma de la figure I-12, on peut écrire (en écriture complexe), en posant  $\overline{E}_1 = -j\omega(n_H + n_M)\overline{\Phi}$  et  $\overline{E}_2 = -j\omega n_M\overline{\Phi}$  :



**Fig.I-12: Autotransformateur réel et transformateur intérieur associé.**

$$\overline{E}_H = \overline{E}_1 - \overline{E}_2 = -j(n_H + n_M)\omega\overline{\Phi} - (-jn_M\omega\overline{\Phi}) = -jn_H\omega\overline{\Phi}$$

$$\overline{E}_M = \overline{E}_2 = -jn_M\omega\overline{\Phi}$$

$$\frac{\overline{E}_H}{\overline{E}_M} = \frac{\overline{E}_1 - \overline{E}_2}{\overline{E}_2} = \frac{n_H}{n_M} \quad \text{soit} \quad \frac{n_H}{n_M} \overline{E}_M = \overline{E}_H \quad (1)$$

$$n_H \overline{I}_H + n_M \overline{I}_M = 0 \quad \text{soit} \quad \overline{I}_M = -\frac{n_H}{n_M} \overline{I}_H \quad (2)$$

Dans le transformateur intérieur, en considérant le primaire comme un récepteur et le secondaire comme un générateur :

$$\overline{U}_H = -\overline{E}_H + R_H \overline{I}_H + jX_H \overline{I}_H \quad (3)$$

$$\overline{E}_M = \overline{U}_M + R_M \overline{I}_M + jX_M \overline{I}_M \quad (4)$$

On multiplie cette dernière équation par  $n_H/n_M$  :

$$\frac{n_H}{n_M} \overline{E}_M = \frac{n_H}{n_M} \overline{U}_M + \frac{n_H}{n_M} R_M \overline{I}_M + j \frac{n_H}{n_M} X_M \overline{I}_M$$

$$\text{Soit, selon (1): } \overline{E}_H = \frac{n_H}{n_M} \overline{U}_M + \frac{n_H}{n_M} R_M \overline{I}_M + j \frac{n_H}{n_M} X_M \overline{I}_M$$

En remplaçant  $\overline{I}_M$  par  $-\frac{n_H}{n_M} \overline{I}_H$ , d'après (2):

$$\overline{E}_H = \frac{n_H}{n_M} \overline{U}_M - \left(\frac{n_H}{n_M}\right)^2 R_M \overline{I}_H - j \left(\frac{n_H}{n_M}\right)^2 X_M \overline{I}_H$$

Ce résultat porté dans (3) donne :

$$\overline{U}_H = -\frac{n_H}{n_M} \overline{U}_M + \left(\frac{n_H}{n_M}\right)^2 R_M \overline{I}_H + j \left(\frac{n_H}{n_M}\right)^2 X_M \overline{I}_H + R_H \overline{I}_H + jX_H \overline{I}_H \quad (5)$$

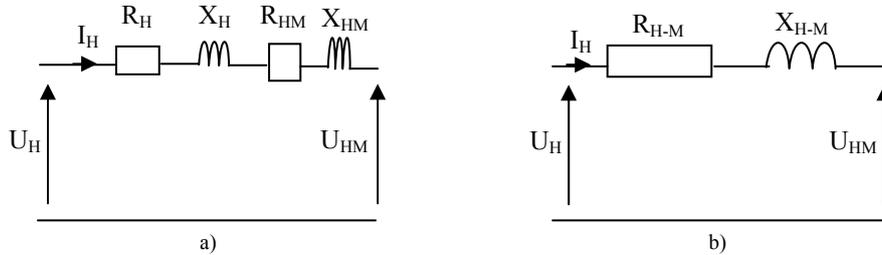
On pose  $\overline{U}_{HM} = -\frac{n_H}{n_M} \overline{U}_M$  ; (5) peut se mettre sous la forme :

$$\overline{U}_H = [R_H + \left(\frac{n_H}{n_M}\right)^2 R_M] \overline{I}_H + j[X_H + \left(\frac{n_H}{n_M}\right)^2 X_M] \overline{I}_H + \overline{U}_{HM}$$

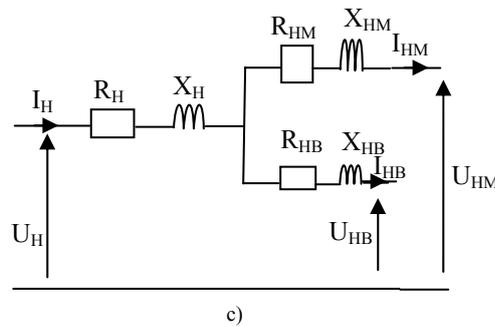
$$\overline{U}_H = [R_H + R_{HM}] \overline{I}_H + j[X_H + X_{HM}] \overline{I}_H + \overline{U}_{HM}$$

$$\begin{aligned} \overline{U}_H &= R_{H-M} \overline{I}_H + j X_{H-M} \overline{I}_H + \overline{U}_{HM} \\ \overline{U}_H &= \overline{Z}_{H-M} \overline{I}_H + \overline{U}_{HM} \end{aligned} \tag{I. 16}$$

**Schémas équivalents avec les différentes notations**



On obtient le schéma équivalent complet ramené, en ajoutant à ce schéma les paramètres ramenés de l'enroulement tertiaire, obtenus de la même façon, en considérant la paire d'enroulements haute tension - basse tension. On arrive au schéma final suivant :



**Fig. I-13 : Différents schémas équivalents a), b), c) ; ramenés à l'enroulement série.**

**I. 2. 7. Détermination des paramètres des enroulements de l'autotransformateur**

En utilisant ce dernier schéma, on peut déterminer les paramètres des enroulements de l'autotransformateur à partir d'un essai à vide et de trois essais en court circuit (fig. I-14).

A partir de l'essai à vide, en alimentant du côté HT, les côtés MT et BT restant ouverts, on mesure  $U_H$ ,  $U_M$  et  $U_B$  pour déterminer 3 rapports de transformation:

$$\begin{aligned} k_{HM} &= U_H/U_M = n_H/n_M \\ k_{HB} &= U_H/U_B = n_H/n_B \\ k_{MB} &= U_M/U_B = n_M/n_B. \end{aligned} \tag{I.17}$$

On peut remarquer que  $k_{MB} = k_{HB}/k_{HM}$ .

Les 3 essais en court circuit se font chacun :

- entre les enroulements HT et MT, l'enroulement BT restant ouvert;
- entre les enroulements HT et BT, l'enroulement MT restant ouvert;

- entre les enroulements MT et BT, l'enroulement HT restant ouvert.

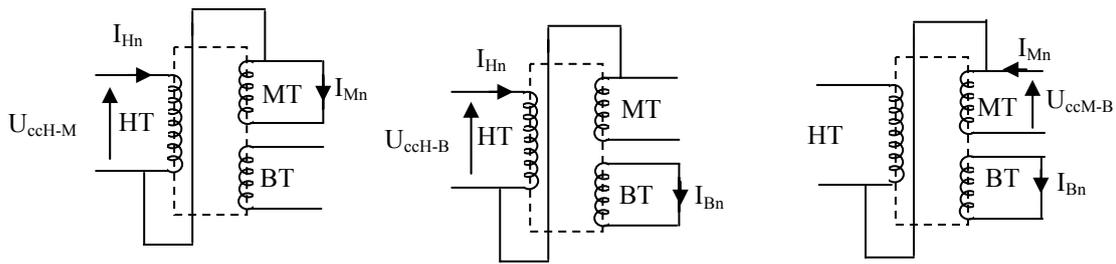


Fig.I-14 : Schéma par phase, illustrant les 3 essais en court circuit.

Les grandeurs déterminées directement par les essais sont:

$$\begin{aligned} R_{ccH-M} &= P_{ccH-M} / 3I_{Hn}^2 ; \\ R_{ccH-B} &= P_{ccH-B} / 3I_{Hn}^2 ; \\ R_{ccM-B} &= P_{ccM-B} / 3I_{Mn}^2, \text{ soit } R_{ccHM-B} = k_{HM}^2 R_{ccM-B}. \end{aligned} \quad (I.18)$$

De même, sont déterminées les réactances  $X_{ccH-M}$ ,  $X_{ccH-B}$  et  $X_{ccHM-B}$ , par :

$$\begin{aligned} X_{ccH-M} &= U_{ccH-M} / I_{Hn} \\ X_{ccH-B} &= U_{ccH-B} / I_{Hn} \\ X_{ccM-B} &= U_{ccM-B} / I_{Mn} . \end{aligned} \quad (I.19)$$

### I. 2. 7. 1. Détermination, à partir des grandeurs totales ramenées côté haute tension

Comme pour un transformateur à 2 enroulements, on a les paramètres de chaque paire d'enroulements.

1er essai: impédance totale ramenée,

$$Z_{ccH-M} = R_{ccH-M} + jX_{ccH-M} = R_H + k_{HM}^2 R_M + j (X_H + k_{HM}^2 X_M).$$

2<sup>ème</sup> essai : impédance totale ramenée,

$$Z_{ccH-B} = R_{ccH-B} + jX_{ccH-B} = R_H + k_{HB}^2 R_B + j (X_H + k_{HB}^2 X_B).$$

3<sup>ème</sup> essai: impédance totale ramenée,

$$Z_{ccM-B} = R_{ccM-B} + jX_{ccM-B} = R_M + k_{MB}^2 R_B + j (X_M + k_{MB}^2 X_B).$$

On peut, pour des commodités de calcul, ramener de nouveau cette dernière du côté HT :

$$Z_{ccH-MB} = k_{HM}^2 Z_{ccMB} = k_{HM}^2 R_M + k_{HM}^2 k_{MB}^2 R_B + j (k_{HM}^2 X_M + k_{HM}^2 k_{MB}^2 X_B).$$

$$Z_{ccH-MB} = k_{HM}^2 R_M + k_{HB}^2 R_B + j (k_{HM}^2 X_M + k_{HB}^2 X_B); \text{ (en utilisant } k_{HM}^2 k_{MB}^2 = k_{HB}^2 \text{)}.$$

On arrive à deux systèmes de 3 équations à 3 inconnues : un pour les résistances et l'autre pour les réactances de fuites des 3 enroulements, bien que réellement ces réactances n'ont pas de sens physique.

$$\begin{aligned} R_{ccH-M} &= R_H + k_{HM}^2 R_M & X_{ccH-M} &= X_H + k_{HM}^2 X_M \\ R_{ccH-B} &= R_H + k_{HB}^2 R_B & X_{ccH-B} &= X_H + k_{HB}^2 X_B \\ R_{ccHM-B} &= k_{HM}^2 R_M + k_{HB}^2 R_B & X_{ccHM-B} &= k_{HM}^2 X_M + k_{HB}^2 X_B \end{aligned} \quad (I.20) \quad (I.21)$$

En résolvant ces deux systèmes d'équations, on obtient :

$$\begin{aligned} R_H &= \frac{1}{2} (R_{ccH-M} + R_{ccH-B} - k_{HM}^2 R_{ccM-B}) \\ R_M &= \frac{1}{2} (R_{ccH-M}/k_{HM}^2 - R_{ccH-B}/k_{HM}^2 + R_{ccM-B}) \\ R_B &= \frac{1}{2} (-R_{ccH-M}/k_{HB}^2 + R_{ccH-B}/k_{HB}^2 + (k_{HM}/k_{HB})^2 R_{ccM-B}) \end{aligned} \quad (I.22)$$

$$\begin{aligned} X_H &= \frac{1}{2} (X_{ccH-M} + X_{ccH-B} - k_{HM}^2 X_{ccM-B}) \\ X_M &= \frac{1}{2} (X_{ccH-M}/k_{HM}^2 - X_{ccH-B}/k_{HM}^2 + X_{ccM-B}) \\ X_B &= \frac{1}{2} (-X_{ccH-M}/k_{HB}^2 + X_{ccH-B}/k_{HB}^2 + (k_{HM}/k_{HB})^2 X_{ccM-B}). \end{aligned} \quad (I.23)$$

### I. 2. 7. 2. Détermination à partir des puissances et des tensions de courts circuits

#### a) Calcul des résistances à partir des puissances

Les puissances mesurées en courts circuits correspondent avec une bonne précision aux pertes joule dans la paire d'enroulements concernées par l'essai. Pour déterminer les résistances  $R_H$ ,  $R_M$  et  $R_B$ , il suffit de calculer la puissance consommée par chacune des résistances et de diviser cette puissance par le carré de l'intensité du courant de court circuit qui la traverse.

Soient  $P_{ccHM}$ ,  $P_{ccHB}$  et  $P_{ccMB}$  les puissances de courts circuits mesurées, mises en jeu respectivement dans les trois essais ;  $P_{ccH}$ ,  $P_{ccM}$  et  $P_{ccB}$  les pertes joule respectives dans les trois enroulements s'expriment par :

$$P_{ccH} = 3 R_H I_{ccH}^2 \quad P_{ccM} = 3 R_M I_{ccM}^2 \quad P_{ccB} = 3 R_B I_{ccB}^2 \quad (I.24)$$

Pour les trois essais, on peut écrire (voir schéma équivalent fig. I-13 c) :

$$P_{ccHM} = 3 R_H I_{ccH}^2 + 3 R_{HM} I_{ccHM}^2 = 3 R_H I_{ccH}^2 + 3 R_M I_{ccM}^2 = P_{ccH} + P_{ccM}$$

$$P_{ccHB} = 3 R_H I_{ccH}^2 + 3 R_{HB} I_{ccHB}^2 = 3 R_H I_{ccH}^2 + 3 R_B I_{ccB}^2 = P_{ccH} + P_{ccB}$$

$$P_{ccMB} = 3 R_M I_{ccM}^2 + 3 R_{MB} I_{ccMB}^2 = 3 R_M I_{ccM}^2 + 3 R_B I_{ccB}^2 = P_{ccM} + P_{ccB}$$

Ce qui donne :

$$\begin{aligned} P_{ccH} &= \frac{1}{2} (P_{ccHM} + P_{ccHB} - P_{ccMB}) \\ P_{ccM} &= \frac{1}{2} (P_{ccHM} - P_{ccHB} + P_{ccMB}) \\ P_{ccB} &= \frac{1}{2} (-P_{ccHM} + P_{ccHB} + P_{ccMB}) \end{aligned} \quad (I.25)$$

Sachant que l'essai en court circuit se fait à intensité de courant nominal :

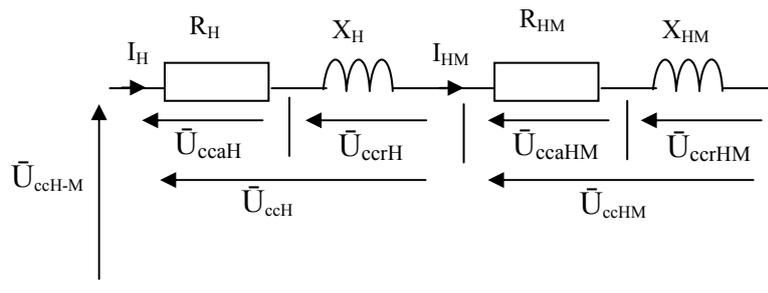
$$\begin{aligned} I_{ccH} &= S_n / \sqrt{3} U_{Hn} \\ I_{ccM} &= S_n / \sqrt{3} U_{Mn} \quad (S_{Hn} = S_{Mn} = S_n) \\ I_{ccB} &= S_n / 2\sqrt{3} U_{Hn} \quad (S_{Bn} = 0,2 \text{ à } 0,5 S_n) \end{aligned} \quad (I.26)$$

On trouve pour les résistances :

$$\begin{aligned}
 R_H &= P_{ccH} / 3 I_{ccH}^2 = \frac{1}{2} (P_{ccHM} + P_{ccHB} - P_{ccMB}) \cdot U_{Hn}^2 / S_n^2 \\
 R_M &= P_{ccM} / 3 I_{ccM}^2 = \frac{1}{2} (P_{ccHM} - P_{ccHB} + P_{ccMB}) \cdot U_{Mn}^2 / S_n^2 \\
 R_B &= P_{ccB} / 3 I_{ccB}^2 = \frac{1}{2} (- P_{ccHM} + P_{ccHB} + P_{ccMB}) \cdot 4U_{Bn}^2 / S_n^2
 \end{aligned} \tag{I.27}$$

**b) Calcul des réactances à partir des tensions de courts circuits**

De même, à partir des tensions de courts circuits mesurées  $U_{ccH-M}$ ,  $U_{ccH-B}$  et  $U_{ccM-B}$ , on peut déduire les chutes de tensions inductives  $U_{ccrH}$ ,  $U_{ccrM}$  et  $U_{ccrB}$  dues aux réactances  $X_H$ ,  $X_M$  et  $X_B$  et calculer ces réactances. La figure I-15 représente le schéma de la répartition des chutes de tensions lors du court circuit faisant intervenir les enroulements HT et MT.



**Fig.I-15 : Différentes chutes de tensions dans l'autotransformateur en c-c.**

$$\bar{U}_{ccH-M} = \bar{U}_{ccH} + \bar{U}_{ccHM} = (\bar{U}_{ccaH} + \bar{U}_{ccrH}) + (\bar{U}_{ccaHM} + \bar{U}_{ccrHM})$$

On peut négliger  $\bar{U}_{ccaH}$  et  $\bar{U}_{ccaHM}$  (les résistances étant très petites devant les réactances) et écrire l'égalité sous forme arithmétique :

$$U_{ccH-M} = U_{ccrH} + U_{ccrHM} = U_{ccH} + U_{ccHM} = U_{ccH} + k_{HM} U_{ccM} \tag{1}$$

$$\text{Soit } U_{ccH-M} = X_H I_H + X_{HM} I_{HM} = X_H I_H + (n_H/n_M)^2 X_M \cdot n_M/n_H I_M$$

$$U_{ccH-M} = X_H I_H + k_{HM} X_M I_M \tag{11}$$

Par le même procédé, dans le cas des deux autres essais en court circuit, on trouve:

$$U_{ccH-B} = U_{ccH} + U_{ccHB} = U_{ccH} + k_{HB} U_{ccB} \tag{2}$$

$$U_{ccH-B} = X_H I_H + k_{HB} X_B I_B \tag{22}$$

$$U_{ccM-B} = U_{ccM} + U_{ccMB} = U_{ccM} + k_{MB} U_{ccB}$$

$$U_{ccM-B} = X_M I_M + k_{MB} X_B I_B$$

En multipliant par  $k_{HM}$  cette dernière équation, on obtient :

$$k_{HM} U_{ccM-B} = k_{HM} U_{ccM} + k_{HB} U_{ccB} \quad (3)$$

$$k_{HM} U_{ccM-B} = k_{HM} X_M I_M + k_{HB} X_B I_B \quad (33)$$

Le système (1) (2) (3) donne :

$$\begin{aligned} U_{ccH} &= \frac{1}{2} (U_{ccH-M} + U_{ccH-B} - k_{HM} U_{ccM-B}) \\ U_{ccM} &= \frac{1}{2} (U_{ccH-M} - U_{ccH-B} + k_{HM} U_{ccM-B}) / k_{HM} \\ U_{ccB} &= \frac{1}{2} (-U_{ccH-M} + U_{ccH-B} + k_{HM} U_{ccM-B}) / k_{HB} \end{aligned} \quad (I.28)$$

En utilisant (I. 26) :

$$\begin{aligned} X_H &= U_{ccH} \sqrt{3} U_{Hn} / S_n \\ X_M &= U_{ccM} \sqrt{3} U_{Mn} / k_{HM} S_n \\ X_B &= U_{ccB} \sqrt{3} U_{Bn} / k_{MB} S_n \end{aligned} \quad (I.29)$$

Le système (11) (22) (33) a pour solution :

$$\begin{aligned} X_H &= 0,5 (U_{ccH-M} + U_{ccH-B} - k_{HM} U_{ccM-B}) / I_H \\ X_H &= \frac{1}{2} (U_{ccH-M} + U_{ccH-B} - k_{HM} U_{ccM-B}) \cdot \sqrt{3} U_{Hn} / S_n \\ X_M &= 0,5 (U_{ccH-M} - U_{ccH-B} + k_{HM} U_{ccM-B}) / k_{HM} I_M \\ X_M &= \frac{1}{2} (U_{ccH-M} - U_{ccH-B} + k_{HM} U_{ccM-B}) \cdot \sqrt{3} U_{Mn} / k_{HM} S_n \\ X_B &= 0,5 (-U_{ccH-M} + U_{ccH-B} + k_{HM} U_{ccM-B}) / k_{MB} I_B \\ X_B &= \frac{1}{2} (U_{ccH-M} - U_{ccH-B} + k_{HM} U_{ccM-B}) \cdot \sqrt{3} U_{Bn} / k_{MB} S_n \end{aligned} \quad (I.30)$$

### I. 2. 8. Avantage de l'autotransformateur

L'autotransformateur est un appareil d'un dimensionnement plus avantageux par rapport au transformateur de mêmes caractéristiques :

- A intensité secondaire nominale identique, l'autotransformateur utilise moins de cuivre qu'un transformateur à 2 enroulements, cette économie de cuivre est d'autant plus important que le rapport de transformation a une valeur proche de l'unité.
- Moins de pertes joules dans les bobines.

- Moins de fer, puisqu'il y a moins de cuivre à disposer autour du circuit magnétique ; donc moins de pertes fer.

**En conclusion :** à performances égales (tensions et puissance nominale), un autotransformateur est plus économique, moins encombrant donc plus facile à transporter, et de meilleur rendement qu'un transformateur.

### **I. 2. 9. Inconvénients de l'autotransformateur**

Il est soumis en services, à des sollicitations plus élevées : la liaison galvanique entre le primaire et le secondaire : transmission de potentiels élevés et de surtensions directes, du primaire au secondaire, dans le cas d'un autotransformateur abaisseur par exemple.

### **I. 2. 10. Domaine d'utilisation**

En règle générale, l'autotransformateur est retenu pour les applications spéciales où son emploi est justifié. Dans les réseaux électriques, son utilisation n'est envisagée que si certaines conditions sont réunies :

- réseau effectivement mis à la terre ;
- réseau, de puissance de court-circuit limitée ;
- situation peu exposée au point de vue surtensions ;
- rapport de transformation voisin de l'unité ;
- charges sensiblement équilibrées.

### **Conclusion**

Ce qu'il faut retenir de ce chapitre, c'est le schéma équivalent du transformateur en haute fréquence, à partir duquel on déterminera les paramètres du modèle utilisé pour le calcul des surtensions, au chapitre V. Il coïncide avec le schéma équivalent de Kapp. Ce qui montre que l'inductance propre du modèle, est obtenue à partir de l'inductance de fuite du modèle de Kapp, que l'on sait déterminer à l'aide des essais classiques à vide et en court circuit, décrits dans le présent chapitre. C'est dire qu'en haute fréquence, le flux magnétique dans le transformateur n'est plus qu'un flux de fuites.

## Introduction

Bien que dans ce travail on pense plus particulièrement aux surtensions conduites d'origine atmosphérique, ce chapitre décrit des surtensions d'origines diverses, qui peuvent se manifester en mode commun et/ou en mode différentiel et capables d'affecter le bon fonctionnement des transformateurs ou même de les détériorer. Pour des besoins de calculs des surtensions par simulation, des modèles normalisés de différentes ondes de tensions et de courants représentant assez fidèlement les ondes réelles, sont également décrits dans cette partie. Pour se protéger correctement des diverses surtensions apparaissant sur le réseau, il est nécessaire de bien les connaître et donc de les caractériser, c'est l'objet de ce chapitre.

### II. 1 Définition

Toute tension appliquée à un équipement dont la valeur de crête sort des limites d'un gabarit défini par une norme ou une spécification est une surtension [5].

A ce titre, on peut introduire la notion de tension de service maximale  $U_{max}$ , établies pour les transformateurs en fonction de la classe d'isolement des enroulements, et qualifiée de surtension, toute élévation de la tension au dessus de la tension de service maximale [1].

Selon leur origine, on peut atteindre des valeurs de surtensions, données par ce tableau :

|             | Enclenchement<br>déclenchement | Avaries         | Causes<br>atmosphériques |
|-------------|--------------------------------|-----------------|--------------------------|
| Surtensions | 2 à 5 $U_{max}$                | 7 à 8 $U_{max}$ | 7 à 12 $U_{max}$         |

### II. 2. Description d'une onde de surtension de foudre

Elle se présente sous la forme d'une impulsion apériodique à front raide (fig. II-1). Elle est définie par la valeur crête entre phase et terre [8].

On peut distinguer 3 phases successives dans une surtension :

- Montée rapide de la tension : c'est le front de l'onde. La durée de front  $t_f$  est de 1,2  $\mu s$  pour l'onde complète de tension d'essai normalisée de foudre.
- Passage par une tension maximale : c'est la crête de l'onde. Ce maximum peut être très élevé.
- Diminution de la tension : c'est la queue de l'onde. La diminution de la tension est beaucoup moins rapide que la montée. La durée jusqu'à la mi-amplitude  $t_q$  est de 50  $\mu s$  pour l'onde normalisée de tension de foudre [8].

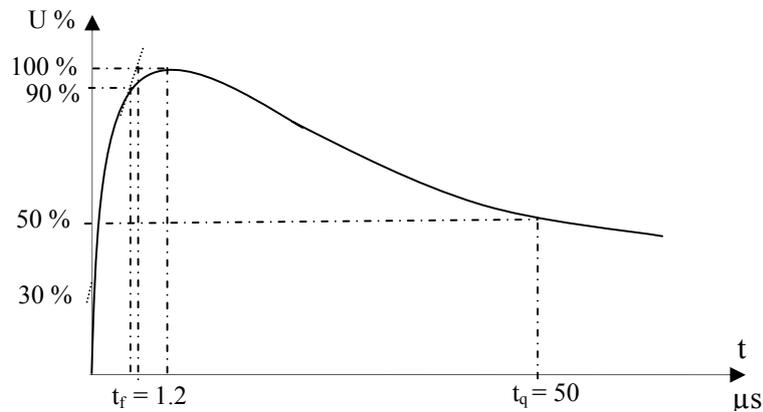


Fig. II-1 : Onde de tension de choc de foudre.

### II. 3. Origines des surtensions

Quatre types de surtensions existent :

- d'origine atmosphérique,
- par décharge électrostatique,
- de manœuvre,
- à fréquence industrielle.

Elles sont définies dans les publications CEI 1000-4. Ces perturbations qui se superposent à la tension du réseau peuvent s'appliquer selon deux modes :

- en **mode commun**, entre les conducteurs actifs et la terre

La surtension survient en mode commun lorsque la perturbation est transmise à l'ensemble des conducteurs actifs : la surtension apparaît entre chaque conducteur actif et la terre (fig. II-1).

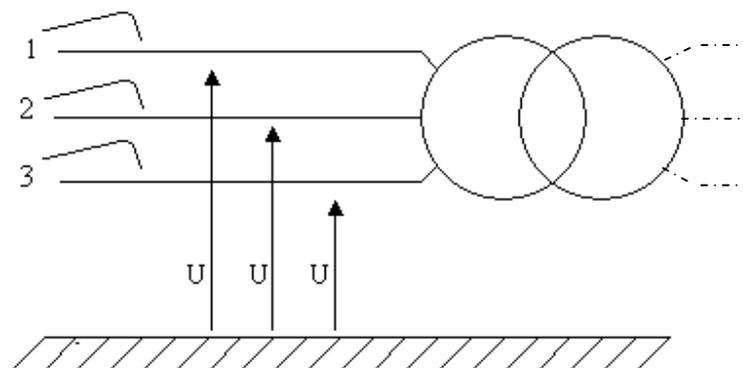
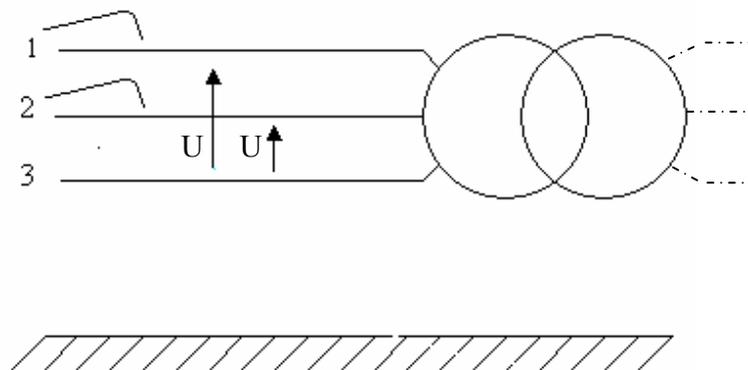


Fig. II-2 : Surtensions de mode commun.

Les surtensions de mode commun concernent l'isolement des matériels par rapport à la masse. Les surtensions en mode commun sont dangereuses en raison des risques de claquage diélectrique pour les équipements dont la masse est reliée à la terre.

- en **mode différentiel**, entre les différents conducteurs actifs.

La surtension est de mode différentiel lorsque la perturbation est transmise à un seul des conducteurs actifs. La surtension apparaît entre les conducteurs actifs (fig. II-3) [5].



**Fig. II-3 : Surtensions de mode différentiel.**

Les surtensions de mode différentiel, concernent les parties actives des matériels électriques. Ces surtensions sont particulièrement dangereuses pour les équipements électroniques.

Dans les deux cas, les dégâts occasionnés proviennent d'un claquage diélectrique entraînant des destructions de matériels. Des moyens de protection existent.

### **II. 3. 1. Surtensions d'origine atmosphérique**

La foudre est un phénomène naturel apparaissant en cas d'orage.

#### **II. 3. 1. 1. Formation des orages**

Le nuage orageux est généralement du type cumulo-nimbus (forme d'enclume, couleur sombre à la base). Sa base est à 2 km et le sommet à 14 km d'altitude environ. Sa constitution est rendue possible par l'élévation d'air chaud en provenance du sol. Lors de son ascension, cette masse d'air se charge d'humidité jusqu'à devenir un nuage. Les violents courants d'air ascendants

et descendants entraînent des collisions entre les particules d'eau et les cristaux de glace, provoquant ainsi la création de charges positives et négatives. Les charges de signes opposés se séparent : les charges positives se situent dans la partie supérieure, alors que les charges négatives se situent dans la partie inférieure du nuage. Ce nuage forme un énorme condensateur avec le sol. Après les premiers éclairs intra nuages, des éclairs se forment entre le nuage et le sol : Ceux sont les coups de foudre. Ils s'accompagnent de fortes précipitations et de rafales de vent. C'est la phase d'effondrement du nuage.

### II. 3. 1. 2. Principe du coup de foudre

Par temps normal, le champ électrique au sol est de 120 V/m. Avec l'arrivée d'un nuage chargé électriquement, il peut atteindre 15 à 20 kV/m. Une décharge initiale (traceur), se développe à partir du nuage. Elle est constituée de particules électriques arrachées au nuage par le champ électrique nuage - sol. Ces particules forment un canal lumineux qui se dirige vers le sol en progressant par bonds. Au niveau du sol le champ électrique est accentué par les aspérités (relief, arbres, habitations...). Ces dernières créent un effet de pointe qui accentue localement le champ. Ce phénomène appelé effet Couronne, favorise l'apparition du coup de foudre à cet endroit. Lorsque le traceur arrive à proximité du sol, des effluves (étincelles) partent du sol. Ces effluves entrent en contact avec la pointe du traceur : Un arc électrique circule dans le canal ionisé créé par le traceur. Cet arc très lumineux permet l'échange des charges électriques entre le nuage et le sol.

En fonction de la polarité du nuage par rapport au sol, il est question de coup négatif (nuage négatif) ou positif (nuage positif), et dans la réalité le traceur peut avoir comme origine le sol ou le nuage : le coup de foudre est ascendant ou descendant.

Le courant de foudre est un phénomène électrique haute fréquence qui va provoquer en plus des effets d'induction et de surtension, les mêmes effets que tout autre courant basse fréquence.

On distingue les coups de foudre directs (sur une ligne ou sur une structure) et les effets indirects d'un coup de foudre (surtensions induites et montée en potentiel de la terre).

Lorsque la foudre tombe sur une structure le courant de foudre  $I$ , génère une surtension impulsionnelle de valeur crête  $U$ .

### II. 3. 1. 3. Le coup de foudre direct

Dans le domaine de l'électrotechnique, le coup de foudre «direct» est celui qui atteint directement l'objet considéré (lignes aériennes, postes, ...). La figure II.4, donne un exemple d'un tel coup de foudre sur une ligne [5] [7].

### II. 3. 1. 4. Courant de foudre et onde de tension associée

Lorsque le coup de foudre tombe sur le conducteur de phase d'une ligne, le courant  $I$  se répartit par moitié de part et d'autre du point d'impact et se propage le long du conducteur. Il entraîne avec lui une onde de tension, dont la valeur en première approximation est donnée par

$$u(t) = Z_c \cdot i(t)/2$$

où  $Z_c$  est l'impédance caractéristique du conducteur. Cette surtension croit en un point de la ligne tant que  $i(t)$  croit jusqu'à atteindre  $I_{max}$ .

Son énergie est importante puisque 50 % des coups de foudre dépassent 25 kA crête et 1% sont au-delà de 180 kA. La raideur de ces décharges peut atteindre 100 kA/ $\mu$ s. Les effets destructeurs d'un coup de foudre direct sont bien connus :

électrocution d'êtres vivants, fusion de composants si ce n'est incendie des bâtiments. L'installation d'un paratonnerre sur une construction limite ces risques, de même les fils de garde protègent les lignes THT.

En désignant par  $I_{max}$ , la valeur maximale du courant de foudre :

Si  $Z_c \cdot \frac{I_{max}}{2} < U_a$  (tension d'amorçage au niveau de la chaîne d'isolateurs), l'onde

continue à se propager en onde pleine.

Si  $Z_c \cdot \frac{I_{max}}{2} > U_a$  l'onde se propage au delà, en onde coupée, à la tension d'amorçage.

Le courant  $I_c$  tel que  $Z_c \cdot \frac{I_c}{2} = U_a$  est appelé courant critique :

$$I_c = 2 \frac{U_a}{Z_c}$$

$$I_c = 5.5 \text{ kA} \text{ dans les lignes } 225 \text{ kV}$$

$$I_c = 8.5 \text{ kA} \text{ dans les lignes } 400 \text{ kV}$$

$$I_c = 19 \text{ kA} \text{ dans les lignes } 750 \text{ kV}$$

En 20 kV,  $I_c$  est très petit, il y a amorçages systématiques.

Pratiquement tout coup de foudre sur conducteur provoque un amorçage pour les lignes de tensions inférieures à 400 kV [6, 7].

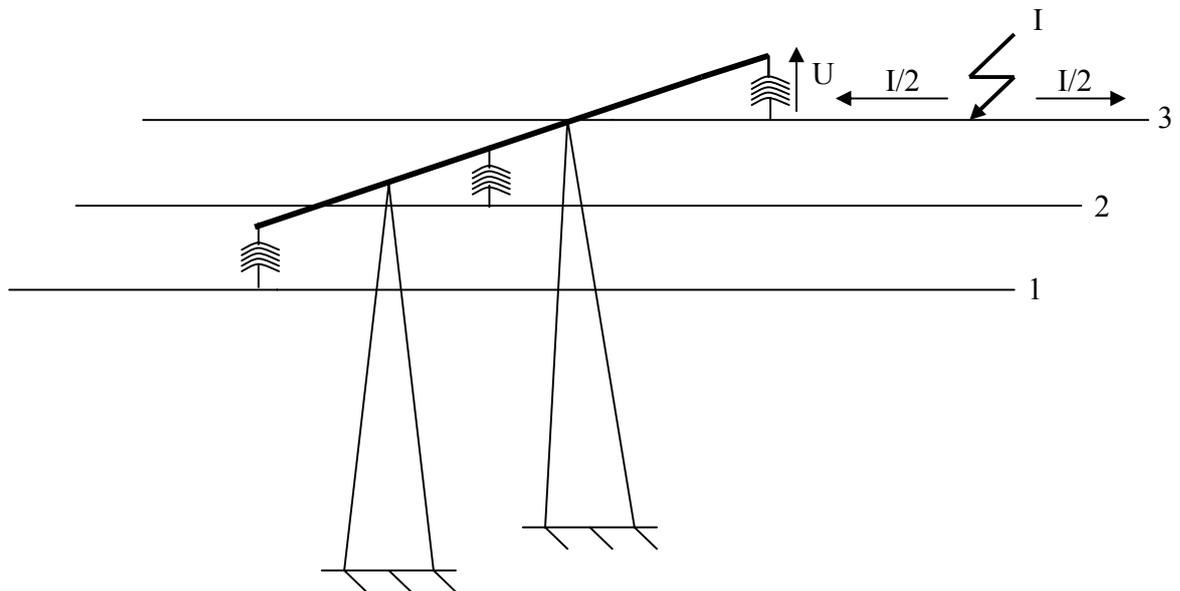


Fig. II-4: Exemple de coup de foudre direct sur un conducteur de phase.

### II. 3. 1. 5. Le coup de foudre indirect

C'est la manifestation à distance d'un coup de foudre direct. Ses effets sont ici abordés selon trois aspects : les surtensions conduites, l'élévation du potentiel de terre, et le rayonnement [5].

### II. 2. 1. 6. Surtensions conduites

- Des surtensions conduites font suite à un impact sur des lignes aériennes. Elles peuvent atteindre plusieurs centaines de kilovolts. Si l'impact a lieu sur un réseau HT, la transmission par le transformateur à la MT se réalise par couplage capacitif. En général moins de 4 % de l'amplitude de la surtension côté HT se retrouve du côté MT [6].

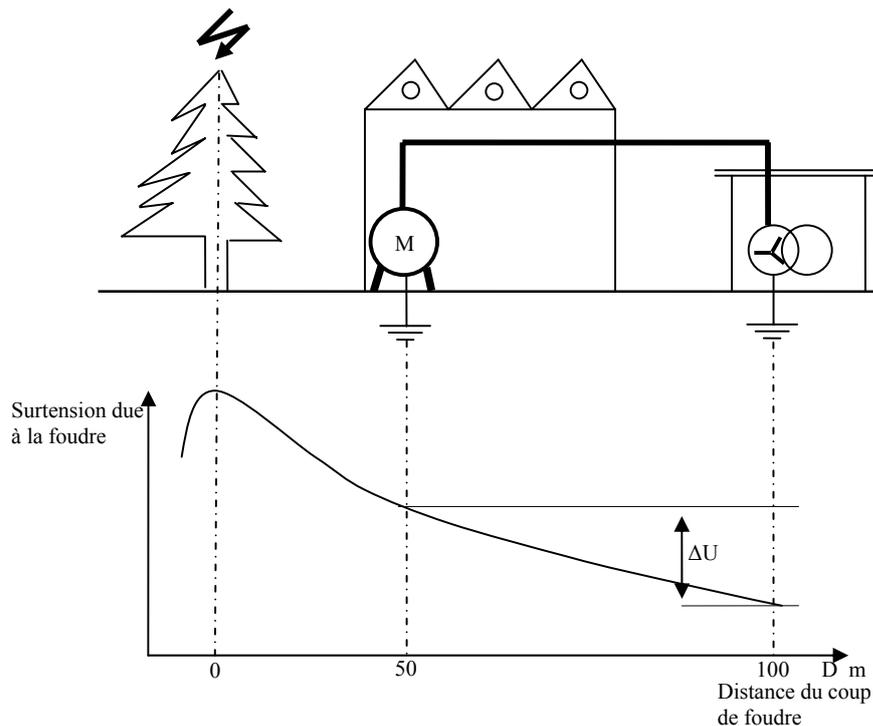
### II. 3. 1. 7. Elévation du potentiel de terre

- Une élévation du potentiel de terre a lieu lorsque le courant de foudre est écoulé par le sol. Cette variation du potentiel de terre touche les installations lorsque l'impact de la foudre au sol est à proximité de leurs prises de terre (fig. II-5). Ainsi à une distance donnée  $D$  du point d'impact de la foudre, le potentiel  $U$  s'exprime par l'équation :

$$U = 0,2 \cdot I \cdot \rho_s / D$$

Avec,  $I$  : courant de foudre,  $\rho_s$  : résistivité du sol.

En appliquant cette formule au cas de la figure II.4, avec  $I = 20 \text{ kA}$ ,  $\rho_s = 1\,000 \text{ Ohm.m}$ ,  $D_{\text{neutre}}=100 \text{ m}$ ,  $D_{\text{installation}} = 50 \text{ m}$ , le potentiel de la prise de terre du neutre atteint 40 kV alors que celui de la prise de terre de l'installation est de 80 kV soit une différence de potentiel (ddp) entre les mises à la terre du neutre et de l'installation de 40 kV. Cet exemple demeure un cas d'école, puisque dans la réalité les valeurs atteintes au niveau de l'installation excèdent rarement 10 kV [7].



**Fig. II-5: diagramme expliquant les montées et différences de potentiel des terres d'une installation électrique.**

C'est ce phénomène qui explique souvent le foudroiement indirect des animaux : même à 100 m du point d'impact, un cheval dans un pré peut subir entre ses pattes arrière et ses pattes avant une différence de potentiel de 500 V.

**II. 3. 1. 8. Coup de foudre sur le câble de garde**

En THT l'installation de câbles de garde (fig. II.6) est intéressante (pas d'amorçage en retour) car le niveau d'amorçage des isolateurs est élevé donc pas d'interruption de service. En dessous de 90 kV, l'amorçage en retour se produit même pour des valeurs faibles de la résistance de terre au choc [6, 7]. La tension d'amorçage s'écrit :

$$u=R.i(t)+L\frac{di(t)}{dt}$$

$R$  : est la résistance de terre

$L$  : inductance du pylône

$U > U_a$  d'où un intérêt limité des câbles de garde en moyenne tension.

Ils sont même nuisibles, car une partie du courant se propage sur la ou les phases amorcées, vers les utilisateurs :

Ce courant est en général supérieur à celui d'un coup de foudre.

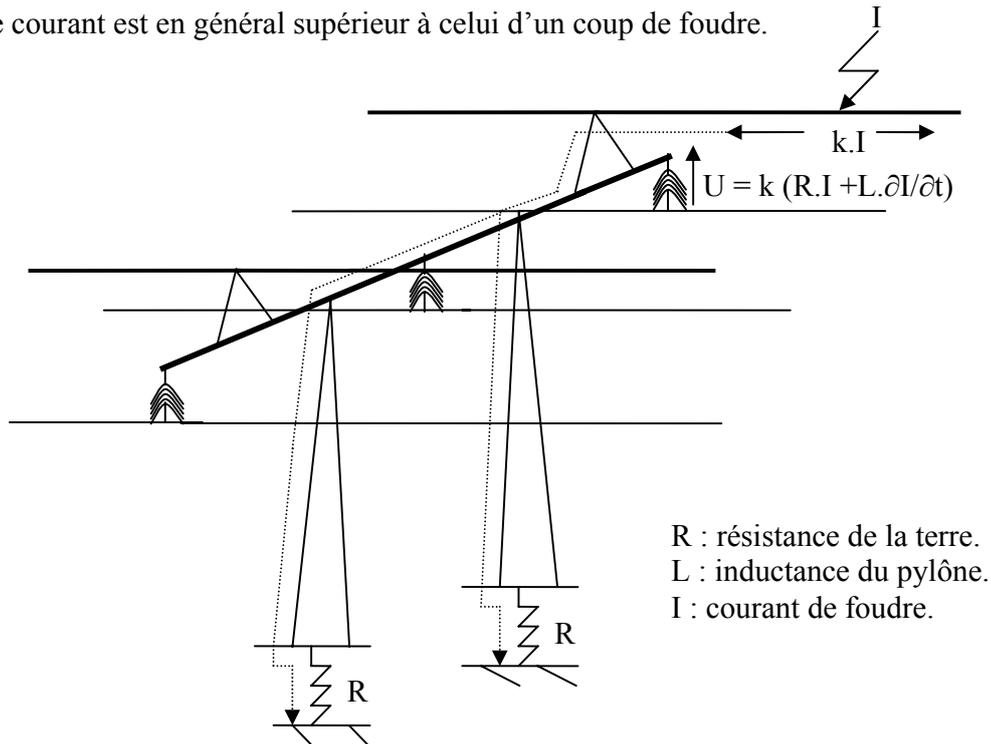


Fig. II.6 : coup de foudre sur le câble de garde.

**II. 3. 1. 9. Le rayonnement**

Le rayonnement est un autre effet, car un coup de foudre indirect peut produire une variation extrêmement rapide du champ électromagnétique. Celle-ci est à l'origine des tensions induites dans les boucles. Ainsi il est courant de trouver à proximité des orages, des tensions induites d'une centaine de volts par mètre carré de boucle. Les champs électriques associés, rayonnés par l'éclair, peuvent atteindre 50 kV/m. Ils peuvent induire des tensions importantes dans les circuits ouverts qui se comportent comme des antennes. Un front très raide et un amortissement rapide caractérisent ces phénomènes.

### II. 3. 2. Surtension par décharges électrostatique

Une ligne située à proximité d'un nuage électrisé se charge en électricité de signe contraire. Si le nuage se décharge brusquement à la terre, la charge de la ligne est libérée, il en résulte une surtension qui peut atteindre 500 kV en  $1\mu\text{s}$ . Ce n'est dangereux que pour les réseaux MT et BT (fig. II-7) [7].

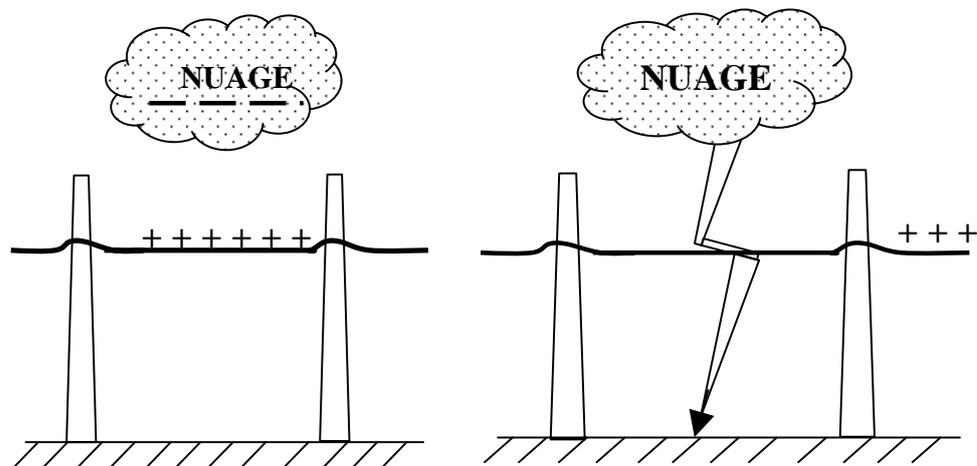


Fig. II. 7: Surtension par décharge électrostatique.

### II. 3. 3. Surtensions de manœuvre

Ce type de phénomène apparaît sur des réseaux électriques subissant des modifications rapides de leur structure (ouverture d'appareils de protection, fermeture et ouverture d'appareils de commande). Les surtensions engendrées se propagent en général sous forme d'ondes haute fréquence à amortissement rapide [9].

#### II. 3. 3. 1. La commutation de courants inductifs

Lors de l'établissement ou de l'interruption de circuits inductifs, des impulsions assez grandes et de temps de montée très court peuvent se produire. Ainsi un disjoncteur commandant une source, un transformateur dans les lignes ... génère une surtension de mode différentiel de grande amplitude avec des fronts de montée de quelques microsecondes. Des surtensions de manoeuvre par commutation de courants inductifs peuvent également provenir de la MT [9].

### II. 3. 3. 2. La commutation des circuits capacitifs

Alors que les réseaux électriques sont plutôt inductifs, la présence de capacités (batteries de condensateurs ou tout simplement lignes à vide) constitue un circuit résonant LC. Les manoeuvres provoquent alors des surtensions de type oscillatoire. Un facteur de surtension de 3,2 à 3,5 peut être rencontré en cas de réamorçage après coupure [9].

### II. 3. 3. 3. L'interruption d'un fort courant par un organe de coupure

Interrompre un courant de court-circuit assymétrique (surtout monophasé dans les réseaux à neutre isolé de la terre) génère des surtensions si la coupure est très rapide et sans consommation d'énergie par l'arc.

### II. 3. 4. Surtensions à fréquence industrielle

Sous cette appellation de fréquence industrielle sont regroupées les surtensions ayant des fréquences inférieures à 500 Hz. La caractéristique principale d'une de ces surtensions, est donc sa fréquence qui épouse celle du réseau : 50, 60 ou 400 Hz.

#### II. 3. 4. 1. Courant de suite des éclateurs MT

La foudre tombant sur une ligne MT provoque l'amorçage des éclateurs qui laissent ensuite circuler vers la terre un courant, à la fréquence du réseau, jusqu'à l'intervention des protections du poste source. Ce courant entraîne, pendant une fraction de seconde, une élévation du potentiel de terre du réseau BT et un risque de claquage en retour du matériel BT, ceci si la prise de terre des éclateurs est la même que celle du neutre BT.

Cette surtension peut apparaître plusieurs fois de suite par exemple lors des essais de remise sous tension alors que le défaut d'isolement est toujours présent (cas des cycles de réenclenchement automatique sur les réseaux aériens en distribution rurale).

Ce risque n'existe pas avec les parafoudres à oxyde de zinc qui n'ont pas de courant de suite. Une telle élévation du potentiel de terre du réseau BT se produit aussi en cas de claquage MT/masse d'un transformateur MT/BT si la masse du transformateur est reliée à la terre du neutre.

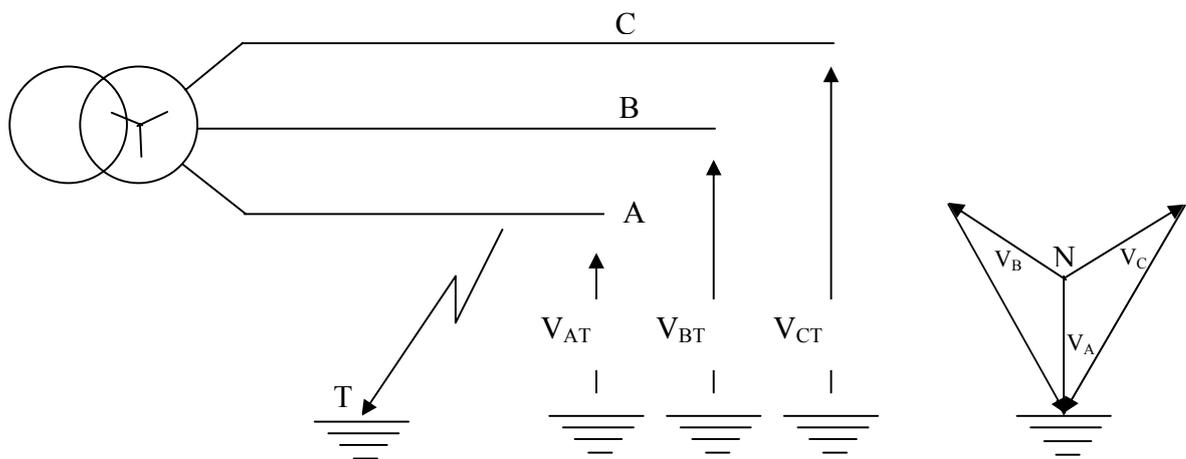
#### II. 3. 4. 2. La rupture de continuité du neutre

Si les réseaux de distribution sont généralement triphasés, de nombreux appareillages sont monophasés. En fonction du besoin de chacun des abonnés BT, des déséquilibres de tension peuvent se produire. Le cas le plus contraignant est en fait la rupture du neutre qui peut induire une montée en potentiel dommageable pour des appareils prévus pour fonctionner sous une tension simple et qui se retrouvent alors sous une tension proche de la tension composée.

### II. 3. 4. 3. Le défaut d'isolement

Les appareils alimentés par la phase la moins chargée voient leur tension augmenter (parfois jusqu'à la tension composée) [9].

Lors d'un défaut d'isolement entre une phase et la terre dans un réseau à neutre impédant ou isolé, la tension des phases saines par rapport à la terre peut atteindre la tension composée. Des surtensions sur les installations BT peuvent provenir des installations HT par l'intermédiaire de la prise de terre du poste HT/BT (fig.II.8).



**Fig. II-8: surtension temporaire sur un réseau à neutre isolé de la terre, en présence d'un défaut d'isolement.**

### II. 3. 4. 4. La ferrorésonance

Il s'agit d'un phénomène oscillatoire, non linéaire, rare, souvent dangereux pour le matériel, se produisant dans un circuit comportant un condensateur et une inductance saturable. Des dysfonctionnements ou des destructions de matériel mal élucidés lui sont volontiers attribués :

- Les défauts du régulateur d'un alternateur ou d'un régleur en charge de transformateur.
- La surcompensation de l'énergie réactive

Les condensateurs shunt produisent une augmentation de la tension depuis la source jusqu'au point où ils se trouvent. Cette tension est particulièrement élevée en période de faibles charges [9].

### II. 3. 5. Les surtensions de manœuvre

Elles sont provoquées par des modifications rapides de la structure du réseau (ouverture d'appareils de protection...). On distingue :

- les surtensions de commutation en charge normale,
- les surtensions provoquées par l'établissement et l'interruption de petits courants inductifs,
- les surtensions provoquées par la manœuvre de circuits capacitifs (lignes ou câbles à vide, gradins de condensateurs),

Par exemple la manœuvre d'une batterie de condensateurs provoque une surtension transitoire dont la première crête peut atteindre 2 fois la valeur efficace de la tension du réseau et une surintensité transitoire de valeur crête pouvant atteindre 100 fois le courant assigné du condensateur.

Les surtensions de manœuvre sont répétitives et leur probabilité d'apparition est nettement supérieure à celle de la foudre et de durée plus longue. Elles peuvent conduire à des dégradations aussi importantes que la foudre.

Parmi toutes ces surtensions, les plus dangereuses sont celles qui se propagent en mode commun, soit de foudre, soit à fréquence industrielle lorsque le courant homopolaire en MT est important.

L'expérience montre que les surtensions consécutives à ces différentes causes atteignent en valeur relative rapportée à la tension nominale :

3,0 ÷ 3,5 pour les surtensions de manœuvre ;

2,2 ÷ 2,7 pour les surtensions de défauts ;

Jusqu'à 12 pour les surtensions atmosphériques.

### II. 3. 6. Tensions de chocs

Un Choc est une tension ou un courant transitoire aperiodique appliqué intentionnellement, qui, habituellement croit rapidement jusqu'à une valeur de crête, puis décroît plus lentement jusqu'à zéro. Un tel choc est généralement bien représenté par la somme de deux exponentielles.

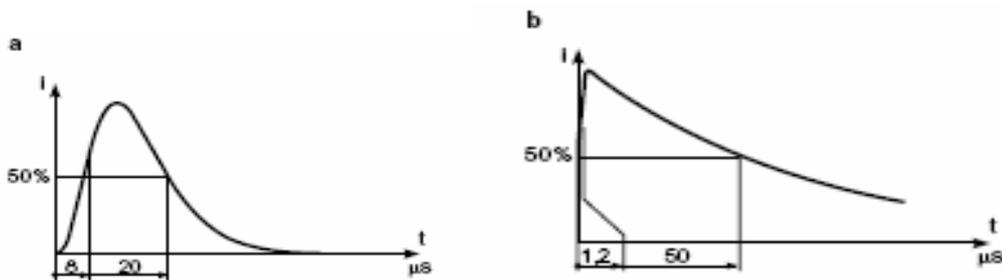
Le terme « choc » doit être distingué du terme « surtension » qui se réfère aux phénomènes transitoires se produisant dans les équipements électriques et les réseaux en service.

Il existe trois principaux chocs :

- le choc de manœuvre, produit par des générateurs et destiné à la simulation conventionnelle des surtensions de manœuvre positives ou négatives ;
- le choc de foudre également produit par des générateurs et destiné à la simulation des surtensions de foudre ;
- le choc à front raide généré par des éclateurs lors de leur amorçage...

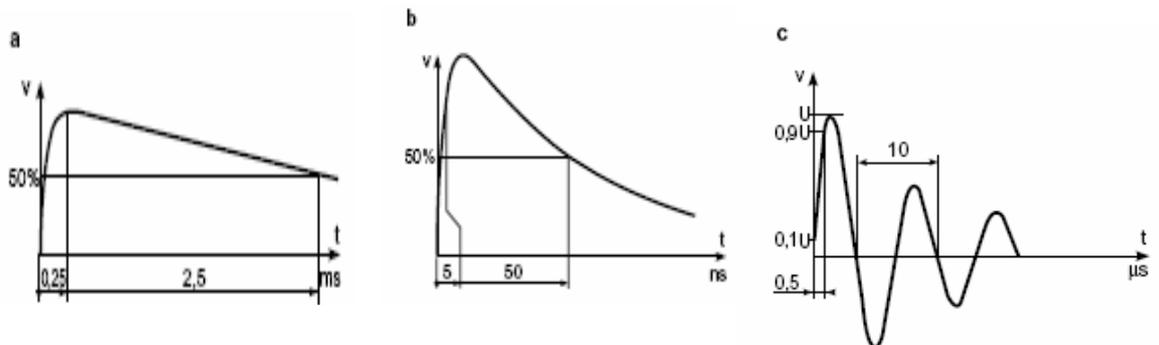
### II. 3. 8. Ondes normalisées

L'étude statistique des surtensions et surintensités a conduit à la norme CEI 71, qui a proposé une modélisation conventionnelle des contraintes réelles par des formes d'ondes réalisables en laboratoire et ayant démontré une équivalence satisfaisante. Ces ondes ont permis entre autres, à caractériser la tenue des matériels aux chocs de foudre et les tensions d'amorçage des dispositifs de protection. Les ondes normalisées de foudre sont représentées à la figure II-10 et les ondes normalisées de manœuvre sont représentées à la figure II-11. La caractérisation des matériels selon ces types d'ondes est une référence pour leur tenue à la foudre est aux surtensions de manœuvre respectivement [5, 8].



**Fig. II-10 : formes des ondes de foudre normalisées**

- a- Onde 8/20  $\mu\text{s}$  dite de courant,
- b- Onde 1,2/50  $\mu\text{s}$  dite de tension.



**Fig. II-11 : formes des ondes normalisées représentant les surtensions de manœuvre**

- a- onde 250/2 500  $\mu\text{s}$  dite onde longue amortie,
- b- onde 5/50 ns dite onde impulsionnelle récurrente (simulant par exemple la fusion d'un fusible),
- c- onde 0,5  $\mu\text{s}$ /100 kHz dite onde sinusoïdale amortie

### II. 3. 9. Onde coupée

Partie d'une onde de surtension, généralement de foudre, qui continue à se propager au-delà de l'amorçage d'un intervalle d'air (éclateur ou contournement d'isolateur). Le front

descendant très rapide généré par l'amorçage présente une grande sévérité pour certains matériels. La raideur du front, assez grande, constitue un danger certain pour l'isolation longitudinale (gradient de tension élevé).

#### II. 4. Effets des surtensions sur les matériels

Lorsque les surtensions appliquées à un matériel dépassent son niveau d'isolement, on peut avoir destruction de l'isolant ou des composants. La nocivité d'une surtension est liée à divers paramètres tels que :

- Son temps d'application ;
- Sa répétitivité ;
- Son amplitude ; la crête de l'onde, ce maximum, peut être très élevé et entraîner des perforations et contournements d'isolants, des amorçages phase terre ou phase- phase.
- Son mode de surtension (commun ou différentiel).
- La raideur de son front de montée ; le front de l'onde très rapide, peut provoquer des amorçages entre les bobines dans les transformateurs et les alternateurs.
- Sa fréquence.

Dans le cas du transformateur, on retiendra que :

Les défaillances internes entraînées par les surtensions, se présentent sous formes :

- de défauts d'isolement entre spires d'un même enroulement (cas le plus fréquent),
- de défauts entre enroulements,
- de défauts d'isolement entre l'enroulement sollicité et une partie conductrice proche (noyau ou cuve).

Les critères de sévérité des surtensions sont la valeur crête, bien entendu, mais également la vitesse de variation de la tension (front de montée, ou front de descente en cas d'amorçage à proximité, (« onde coupée ») qui amène une répartition inégale de contraintes dans les enroulements et aboutit ainsi à dépasser la tenue entre spires, même si, la valeur crête aux bornes de l'enroulement primaire ne dépasse pas les valeurs admises.

#### II. 5. Conséquences d'un claquage en HT

Une défaillance diélectrique (claquage ou amorçage) peut provoquer :

- le fonctionnement des protections dans le meilleur des cas,

- des destructions de matériels dans le pire des cas,
- une interruption de service à chaque défaillance.

En HT, la coupure d'alimentation qui survient occasionne :

- un risque de déstabilisation du réseau,
- une perte de facturation d'énergie pour le distributeur d'énergie,
- une perte de production pour les abonnés industriels,
- un danger pour les personnes (par exemple dans les hôpitaux) et pour les données informatiques.

### **Conclusion**

Les surtensions ont plusieurs origines. Pour éviter les incidents, des études doivent être effectuées pour toute installation nouvelle. Elles doivent permettre des réalisations cohérentes et optimisées face aux risques. Les ondes normalisées peuvent jouer un rôle important dans ces études. Une solution est d'augmenter le niveau d'isolement des installations par augmentation des distances d'isolement. Mais cela se traduit par une importante augmentation des coûts et des volumes. Le surdimensionnement n'est donc pas admissible. Vient alors la limitation des surtensions par des organes de protection (paratonnerres, parafoudres, éclateurs...).

### **Introduction**

La connaissance des sollicitations auxquelles est soumis l'enroulement du transformateur est particulièrement importante pour le calcul de l'isolement et la conception technologique de l'appareil ainsi que pour l'analyse des avaries qui peuvent survenir en cours d'exploitation.

Ce chapitre décrit les effets des surtensions au niveau des transformateurs et les phénomènes inhérents à ces surtensions.

Les plus dangereuses sont les surtensions conduites que produisent les coups de foudre directs dans les fils conducteurs de lignes aériennes de transport d'énergie électrique et les surtensions dues aux décharges orageuses qui induisent dans les lignes de transport d'énergie des ondes de haute fréquence. Ces surtensions arrivent à l'entrée du transformateur et peuvent se propager le long des enroulements.

### **III. 1. Définitions**

- Tension nominale d'isolement d'un matériel : tension à fréquence industrielle que peut supporter indéfiniment le matériel.
- Niveau d'isolement à fréquence industrielle : c'est la tension efficace à 50 Hz que peut supporter le matériel pendant une minute.

### **III. 2. Surtensions transitoires dans les transformateurs.**

Les transformateurs utilisés dans les réseaux électriques peuvent être soumis à des surtensions.

Ces surtensions peuvent prendre naissance, comme on l'a vu, lors des opérations ordinaires de commutation (enclenchement et déclenchements des différents organes d'un système électrique) ou, suite à des surtensions conduites que produisent les coups de foudre dans les fils conducteurs de lignes aériennes de transport d'énergie électrique ainsi que les surtensions dues aux décharges orageuses qui induisent dans les lignes de transport d'énergie des ondes de haute tension, de fréquence élevée. L'onde de surtension se propage dans les deux sens à partir de l'endroit où elle se manifeste, avec une vitesse voisine de celle de la lumière [2].

Les surtensions transitoires pouvant mettre en danger l'isolation de matériels d'exploitation et de lignes, sont essentiellement provoquées par des coups de foudre.

Pour cela, par la suite, par surtension, on sous entendra la surtension conduite d'origine atmosphérique.

#### **III. 2. 1. Particularités des surtensions «haute fréquence»**

Dans ce domaine de fréquences, les lois de l'électricité habituellement utilisées ne sont plus suffisantes :

- d'une part, l'hypothèse de quasi stationnarité, supposant que la tension se transmet instantanément en tous points d'un réseau, devient fautive : le temps de transmission n'est plus négligeable devant la période des phénomènes étudiés (exemple : à 1 MHz, la période est de 1  $\mu$ s soit 300 m) [6].

En pratique, le phénomène pourra être considéré comme instantané si sa longueur d'onde est beaucoup plus grande que les dimensions du système considéré [11].

- d'autre part, les capacités parasites des éléments, l'effet de peau, le couplage électromagnétique... deviennent importants voire prépondérants [6].

### **III. 2. 2. Conséquences quant à leurs études**

Il s'ensuit que pour arriver quantitativement aux effets de la foudre, il faut :

- tout d'abord considérer les lois de propagation des ondes, connues sous le nom des «équations du télégraphiste». Eu égard aux distances parcourues (quelques mètres à quelques kilomètres) le régime des ondes ne s'établit pas instantanément, dans l'espace et le temps,
- ensuite tenir compte des lois de réflexion, de réfraction aux points de discontinuités (point de raccordement de la ligne avec le transformateur par exemple), et de superposition des ondes à chaque instant et en chaque endroit,
- enfin, opter pour le modèle qui décrit les équations de fonctionnement physique des éléments en tenant compte des phénomènes prépondérants en haute fréquence.

Pour toutes ces raisons, on doit considérer que la surtension se propage dans l'enroulement du transformateur et, particulièrement aux premiers instants de l'arrivée de l'onde, cette propagation se fait selon la longueur  $l$  de l'enroulement, et non pas selon la longueur du conducteur constituant ce dernier, comme on le verra par la suite [6].

### **III. 3. Contraintes**

#### **III. 3. 1. Contrainte transversale**

La contrainte qui s'exerce sur l'isolement entre conducteurs raccordés à des phases différentes d'un réseau ou encore entre ces conducteurs et la masse s'appelle contrainte transversale. Au delà d'une certaine limite elle entraîne le claquage du diélectrique assurant l'isolement. Il s'agit d'une surtension en onde pleine, à évolution lente.

La contrainte transversale dépend surtout de l'amplitude de la surtension : elle est dangereuse pour la totalité de l'appareillage.

#### **III. 3. 2. Contrainte longitudinale**

La contrainte qui s'exerce sur l'isolement placé entre 2 portions voisines d'un même conducteur lorsque ce conducteur est bobiné s'appelle contrainte longitudinale. Au delà d'une certaine limite, elle entraîne la perforation de l'isolant. Il s'agit en général d'une surtension à front raide (onde coupée...), à amortissement rapide.

La contrainte longitudinale est fonction de la raideur de l'onde et de son amplitude. Elle est redoutable pour tous les appareils qui comportent des spires (transformateurs, machines tournantes...).

### **III. 4. Réfraction et réflexion des ondes**

La théorie de la propagation des ondes permet d'établir que, lorsqu'une onde se propageant le long d'un conducteur arrive sur un point de changement d'impédance, on observe une réflexion et une transmission partielles. C'est le cas (fig. III-1), à la jonction ligne transformateur où  $Z_L$ , l'impédance d'onde de la ligne est différente de l'impédance d'onde  $Z_T$  du transformateur [9, 11].

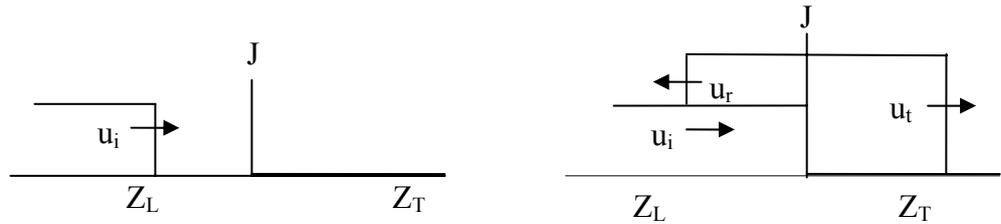


Fig. III-1 : Réflexion et réfraction d'une onde rectangulaire à la jonction ligne transformateur.

A tout instant, on peut écrire :

$$u_t = u_i + u_r \quad (1)$$

$$i_t = i_i - i_r \quad (2)$$

$$u_i = Z_L i_i \quad (3)$$

$$u_r = Z_L i_r \quad (4)$$

$$u_t = Z_T i_t \quad (5)$$

#### III. 4. 1. Coefficient de réflexion

On exprime les courants à partir des équations (3) (4) et (5) ; on remplace dans (2) :

$$\frac{u_t}{Z_T} = \frac{u_i}{Z_L} - \frac{u_r}{Z_L} \quad (6)$$

On remplace  $u_t$  par son expression obtenue à partir de l'équation (6) ; on combine avec l'équation (1), on obtient :

$$u_r = \frac{Z_T - Z_L}{Z_L + Z_T} u_i \quad (7)$$

Soit :

$$K_r = \frac{Z_T - Z_L}{Z_T + Z_L} \quad (\text{III. 1})$$

#### III. 4. 2. Coefficient de réfraction

De l'équation (6), on exprime la tension  $u_r$  qu'on remplace dans l'équation (1). On obtient après calcul:

$$u_t = \frac{2Z_T}{Z_L + Z_T} u_i \quad (8)$$

$$K_t = \frac{2Z_T}{Z_L + Z_T} \quad (\text{III. 2})$$

Les valeurs limites de ces coefficients correspondent à des cas physiques simples :

Si  $Z_L = Z_T$  alors  $K_r = 0$  et  $K_t = 1$  (pas de réflexion, la transmission vaut 1).

Si  $Z_T = 0$ ,  $K_r = -1$  et  $K_t = 0$  (réflexion totale avec changement de signe : il s'agit d'un court-circuit, la transmission est nulle).

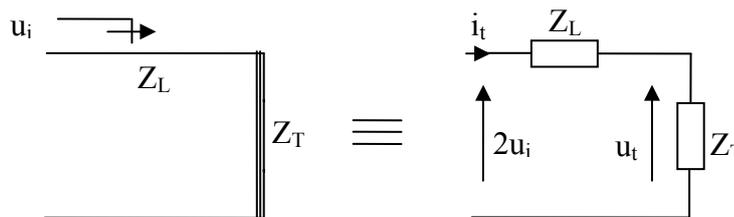
Si  $Z_T = \infty$ ,  $K_r = 1$  et  $K_t = 2$  (réflexion additive sans changement de signe, il s'agit d'une ligne ouverte. La tension au point de réflexion est donnée par la superposition de l'onde incidente et de l'onde réfléchie avec un facteur +1. Sa valeur maximale va alors être égale à deux fois l'onde incidente. Bien qu'il n'y ait pas propagation dans le milieu  $Z_T$ , la valeur à la frontière est toujours donnée par  $K_t$  qui vaut également 2. (Ce cas amène une contrainte élevée au point de réflexion et à son voisinage).

A la jonction aérienne ligne- transformateur  $K_r$  est sensiblement égal à 1 et  $K_t$  sensiblement égale à 2.

Lorsque les prises de réglage de la tension laissent une partie de l'enroulement non utilisé, elles risquent d'aggraver les surtensions qui résultent des perturbations à front raide, en facilitant la création d'ondes stationnaires dues à une réflexion sur l'extrémité libre, isolée, de l'enroulement.

**III. 5. Méthode de Petersen**

Lors d'une surtension dans une ligne, si le schéma équivalent a une impédance à éléments localisés la tension appliquée doit être doublée selon Petersen (fig.III-2).



**Fig. III-2 : Schéma équivalent de la ligne à éléments localisés.**

On peut montrer aisément ce résultat en utilisant les équations précédentes.

On multiplie l'équation (2) par  $Z_L$  :

$$Z_L i_t = Z_L i_i - Z_L i_r$$

$$u_t = u_i + u_r$$

On obtient :

$$Z_L i_t = u_i - u_r \tag{9}$$

Ce résultat donne avec l'équation (1), en sommant membre à membre :

$$u_t + Z_L i_t = 2u_i. \tag{III. 3}$$

**III. 6. Les phénomènes surtensions et le transformateur**

Les phénomènes surtensions agissent sur le transformateur comme des phénomènes oscillatoires de très hautes fréquences. Dans ce cas les réactances inductives ( $L\omega$ ) du transformateur deviennent très grandes, les réactances capacitives ( $\frac{1}{C\omega}$ ) diminuent, par conséquent le courant passe seulement par les réactances capacitives [1].

Dans ces conditions le schéma équivalent de l'enroulement est donné par la figure III-3.

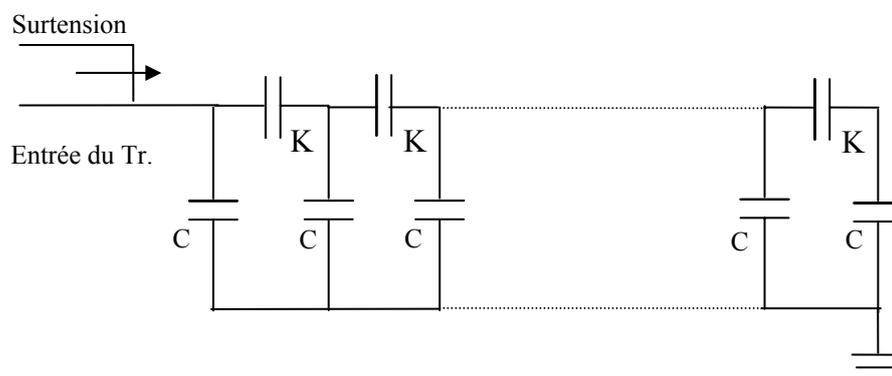


Fig III-3 • Schéma équivalent simplifié de l'enroulement HT lors de la répartition initiale

### III. 9. Répartitions initiale et finale de la tension

La répartition initiale de la tension correspond à l'instant où la tension sur les premières spires a atteint sa valeur maximale  $U_0$ . On peut dire qu'on a une tension initiale sur l'enroulement, à l'instant  $t_m$ , correspondant au temps de montée, et considérer  $t_m \equiv 0$  pour « ressaisir » la notion « d'initiale ».

Pour aboutir à la répartition initiale, l'onde  $u_i$  arrivant au transformateur est supposée à front rectangulaire, infiniment longue. Au bout de  $1,2 \mu s$  ( $t_m$ ), par réflexion, la valeur de la tension à l'entrée de l'enroulement passe à  $U_0 = 2 U_i$  et charge instantanément les capacités C et K. On obtient la répartition initiale de tension le long de l'enroulement. Le passage de la répartition initiale à la répartition finale (qui dure de  $t_m$  à un certain temps t, théoriquement infini), correspond pour chaque point de l'enroulement à un régime transitoire oscillant amorti à cause de la présence des capacités, des inductances et sous l'effet de la résistance ohmique de l'enroulement et de la conductibilité des isolants. Dans la réalité, au bout d'un certain temps  $\Delta t$  fini, les potentiels des différents points de l'enroulement se trouvent déjà portés à des valeurs fixes : c'est la répartition finale de la tension [1, 2,14].

On envisagera, dans le cadre de ces répartitions, les cas des deux régimes du neutre, à savoir, neutre relié à la terre et neutre isolé de la terre car selon la réglementation (CEI), en HT, les réseaux (110 kV) peuvent fonctionner avec le neutre, soit mis à la terre, soit isolé de la terre.

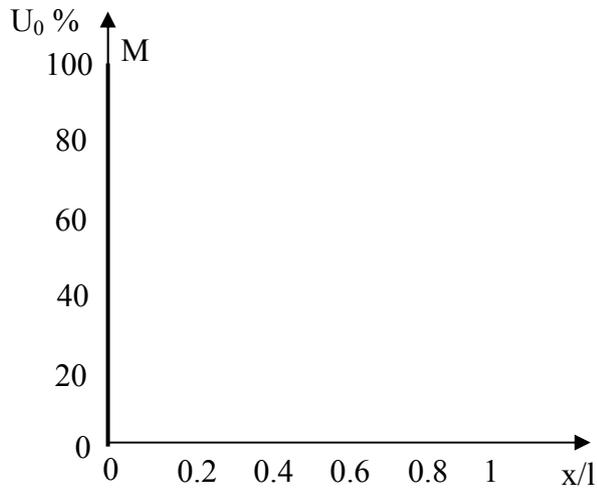
#### III. 10. 1. Répartition initiale de la tension

La répartition réelle de la tension initialement, le long de l'enroulement, se trouve entre les deux cas limites de répartition, obtenus pour  $C = 0$  et  $K = 0$  exclusivement.

##### III. 10. 1. 1. Cas où $K = 0$

S'il n'y avait pas de capacités K ( $K = 0$ ), le courant de la ligne se dirigerait vers la terre à travers la première capacité C, depuis le commencement de l'enroulement. Cela signifie que toute la tension est concentrée dans les premières spires, à l'entrée de l'enroulement, qui sont donc soumises à une très forte surtension.

Quel que soit le schéma de liaison à la terre, la répartition de la tension est représentée par une droite verticale réunissant le point M à l'origine des coordonnées (fig. III-4).



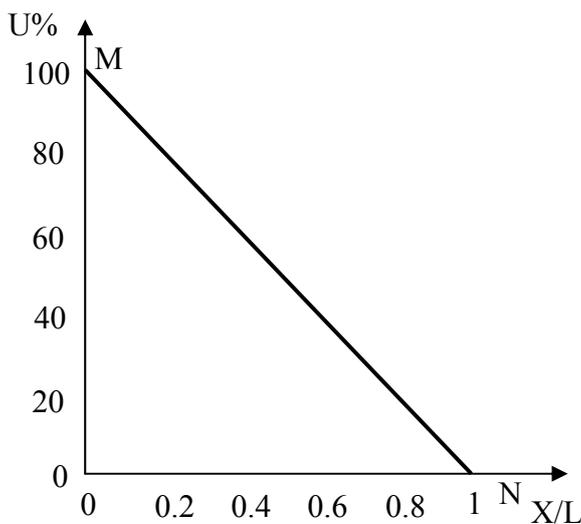
**Fig. III-4 : répartition initiale de la tension pour  $K=0$ .**

**III. 10. 1. 2. Cas où  $C = 0$**

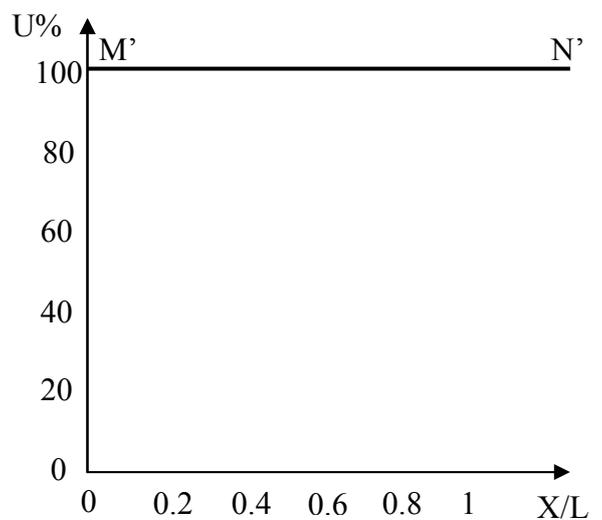
S'il n'y avait pas de capacités par rapport à la terre ( $C=0$ ), toutes les capacités  $K$  seraient en série et le circuit de la (fig. III-3) serait parcouru par un courant de la même valeur. On obtient alors une répartition uniforme de la tension suivant la longueur de l'enroulement (identique à la répartition au régime permanent).

- le neutre est mis à la terre : la répartition est représentée par une droite inclinée réunissant les points M et N qui correspondent respectivement à la borne d'entrée de l'enroulement qui se trouve sous la tension  $U$  et à sa fin, dont le potentiel est nul (fig. III-5).

- le neutre est isolé de la terre : la répartition est représentée par une droite horizontale  $M' N'$  (fig. III-6).



**Fig. III-5: répartition initiale de la tension pour  $C = 0$  et neutre à la terre.**



**Fig. III-6 : répartition initiale de la tension pour  $C=0$  et neutre isolé.**

Une analyse mathématique permet de montrer que la tension le long de l'enroulement est répartie suivant une loi hyperbolique dépendant du coefficient  $\alpha = \sqrt{\frac{C_{tot}}{K_{tot}}}$  [1,14]. Pour un enroulement de longueur l, soumis à la tension  $U_{Choc}$  ( $u_0(0)$ ) à sa borne d'entrée ; en un point d'abscisse 'x' comptée à partir de cette borne, la tension initiale  $u_{0x}$  est donnée par la relation :

$$u_{0x} = U_{Choc} \cdot \frac{Sh\alpha(l-x)}{Sh\alpha l}, \quad (III. 4)$$

si le neutre est mis à la terre. Si le neutre est isolé de la terre, on aurait :

$$u_{0x} = U_{Choc} \cdot \frac{Ch\alpha(x-l)}{Ch\alpha l}. \quad (III. 5)$$

(Dans les transformateurs  $\alpha$  est compris entre 5 et 15).

La répartition initiale de la tension dans l'enroulement, pour les différentes valeurs de  $\alpha$ , est donnée par les figures 7 et 8.

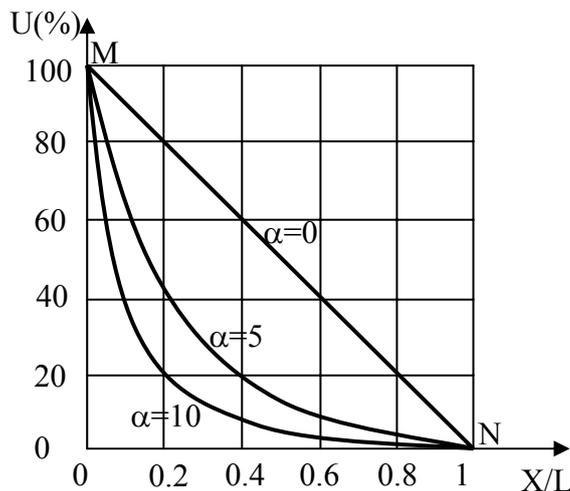


Fig. III-7 : répartition initiale avec neutre mis à la terre.

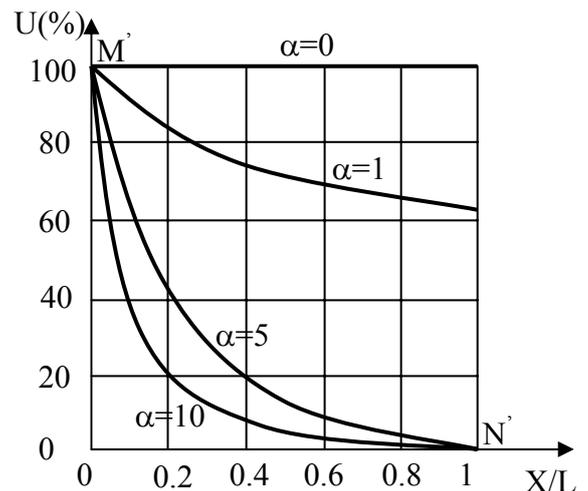


Fig. III-8 : répartition initiale avec neutre isolé de la terre.

**Remarque :**

Pour calculer la rigidité diélectrique de l'enroulement il faut connaître la différence de tension entre deux éléments voisins (bobines, spires) de l'enroulement.

D'après les figures (7 et 8), on remarque que le plus grand gradient de tension a lieu au début de l'enroulement sur ses premières spires. La valeur de ce gradient est déterminée par la dérivée première  $\frac{du_x}{dx}$ . Pour les valeurs de cette dérivée et en tenant compte du fait

que pour  $\alpha \geq 3$ , nous avons :

$$th\alpha \approx cth \alpha \approx 1.$$

Si le neutre est lié à la terre :

$$\left[ \frac{du_x}{dx} \right]_{x=0} = -\alpha \quad \text{en pu,}$$

$$\left[ \frac{du_x}{dx} \right]_{x=0} = -\alpha \cdot U_{\text{Choc}} \quad \text{en kV.} \quad (\text{III. 4})$$

Si le neutre est isolé de la terre :

$$\left[ \frac{du_x}{dx} \right]_{x=0} = -\alpha \quad \text{en pu}$$

$$\left[ \frac{du_x}{dx} \right]_{x=0} = -\alpha \cdot U_{\text{Choc}} \quad \text{en kV} \quad (\text{III. 5})$$

Ce résultat nous montre qu'à l'instant initial la partie de l'enroulement la plus proche de l'entrée se trouve sous une tension  $\alpha$  fois plus grande que lors d'une répartition uniforme de la tension. D'où la nécessité de prendre des précautions pour protéger les isolants contre le claquage [1].

**III. 10. 2. Répartition finale de la tension**

Lorsque le point neutre est mis à la terre la répartition finale de la tension est représentée par la droite inclinée MN de la figure 9. Pour un neutre isolé, tout l'enroulement acquiert à l'instant final le même potentiel, représenté dans la figure 10 par la droite M'N' parallèle à l'axe des abscisses.

Dans le cas de l'enroulement avec neutre à la terre, pour un point se trouvant à l'instant initial à la tension  $U_1$ , sa tension finale étant  $U_2$ , le passage de l'une à l'autre se fera par une série d'oscillations autour de la courbe 2 ; entre les courbes 1 et 4, qui en représentent à peu près l'enveloppe. Ces oscillations seront d'autant plus grandes que la différence  $U_2 - U_1$  sera plus élevée.

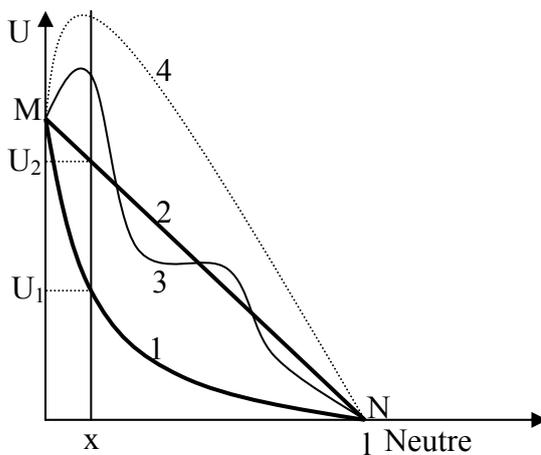


Fig. III-9 : oscillations autour de la répartition finale lorsque le neutre est à la terre.

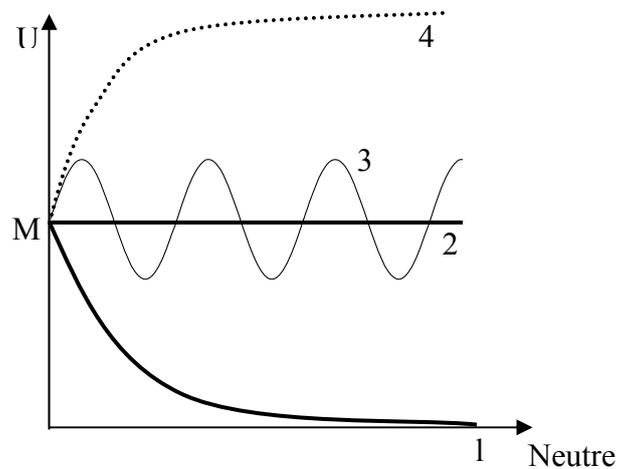


Fig. III-10 : oscillations autour de la répartition finale lorsque le neutre est isolé.

Les courbes 1, 2, 3 et 4 représentent respectivement : la répartition initiale, la répartition finale, une répartition intermédiaire de tension le long de l'enroulement et les maximums de tension en différents points de l'enroulement.

### III. 11. Propagation des ondes dans un enroulement à constantes réparties

Le schéma équivalent de l'enroulement du transformateur HT, après la répartition initiale, qui sera justifié dans le chapitre suivant, se présente formé de cellules (éléments) en séries, réparties sur la longueur  $l$  de l'enroulement. Le modèle se présente alors comme suit, (fig. III-11).

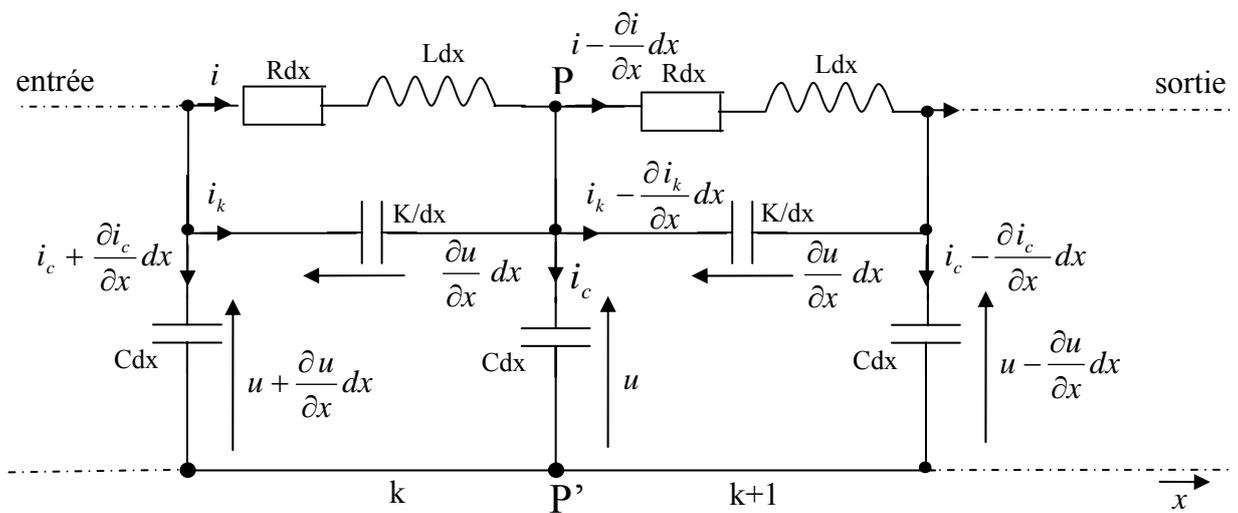


Fig. III-11 : Schéma équivalent partiel du transformateur HT lors d'une surtension haute fréquence.

On considère deux cellules voisines  $k$  et  $k+1$ , séparées de  $dx$ . En passant de l'élément  $k$  à l'élément  $k+1$ , c'est-à-dire en se déplaçant de  $dx$ , la variation de tension est due à la chute inductive et à la chute ohmique :

$$\frac{\partial u}{\partial x} dx = Ldx \frac{\partial i}{\partial t} + Rdx.i$$

De même, la variation de l'intensité du courant correspond au courant qui s'écoule par la capacité  $Cdx$  de la branche  $PP'$  :

$$\frac{\partial(i + i_k)}{\partial x} dx = i_c$$

$$\frac{\partial(i + i_k)}{\partial x} dx = Cdx \frac{\partial u}{\partial t}$$

En développant :

$$\frac{\partial i}{\partial x} + \frac{\partial i_k}{\partial x} = C \frac{\partial u}{\partial t} \quad (1)$$

La première équation s'écrit : 
$$\frac{\partial u}{\partial x} = L \frac{\partial i}{\partial t} + R i \quad (2)$$

On élimine les courants dans le système 1 – 2 :

$$i_k = \frac{K}{\partial x} \frac{\partial^2 u}{\partial x} \frac{dx}{\partial t} = \frac{K}{dx} \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial u}{\partial x} dx \right) = K \frac{\partial^2 u}{\partial t \partial x}$$

En dérivant le courant  $i_k$  : 
$$\frac{\partial i_k}{\partial x} = K \frac{\partial^3 u}{\partial t \partial^2 x} \quad (3)$$

On élimine d'abord  $i_k$  en utilisant (1), tenant compte de (3) :

$$\frac{\partial i}{\partial x} = C \frac{\partial u}{\partial t} - K \frac{\partial^3 u}{\partial t \partial^2 x} \quad (4)$$

$$L \frac{\partial i}{\partial t} = \frac{\partial u}{\partial x} - R i \quad \text{soit} \quad \frac{\partial i}{\partial t} = \frac{1}{L} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{R}{L} i \quad (2')$$

En dérivant (2') par rapport à  $x$  :

$$\frac{\partial^2 i}{\partial t \partial x} = \frac{1}{L} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{R}{L} \frac{\partial i}{\partial x} \quad (5)$$

On élimine ensuite  $i$  en égalant  $\frac{\partial^2 i}{\partial x \partial t}$  à  $\frac{\partial^2 i}{\partial t \partial x}$ , donc en dérivant.

On dérive (4) par rapport au temps :

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x \partial t} = C \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - K \frac{\partial^4 u}{\partial t^2 \partial x^2} \quad (6)$$

Le résultat (6) est alors égal au résultat (5) :

$$\frac{1}{L} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{R}{L} \left( C \frac{\partial u}{\partial t} - K \frac{\partial^3 u}{\partial t \partial x^2} \right) = C \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - K \frac{\partial^4 u}{\partial t^2 \partial x^2},$$

soit :

$$\frac{1}{L} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{R}{L} \left( C \frac{\partial u}{\partial t} - K \frac{\partial^3 u}{\partial t \partial x^2} \right) + C \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - K \frac{\partial^4 u}{\partial t^2 \partial x^2} \quad (7)$$

Finalement :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = RC \frac{\partial u}{\partial t} + CL \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - KR \frac{\partial^3 u}{\partial t \partial x^2} - KL \frac{\partial^4 u}{\partial t^2 \partial x^2} \quad (\text{III. 6})$$

Les répartitions initiales définies par les équations (III. 4) et (III. 5) sont obtenues à partir de cette équation moyennant certaines hypothèses de simplification, de conditions initiales et aux limites [1, 14].

## Introduction

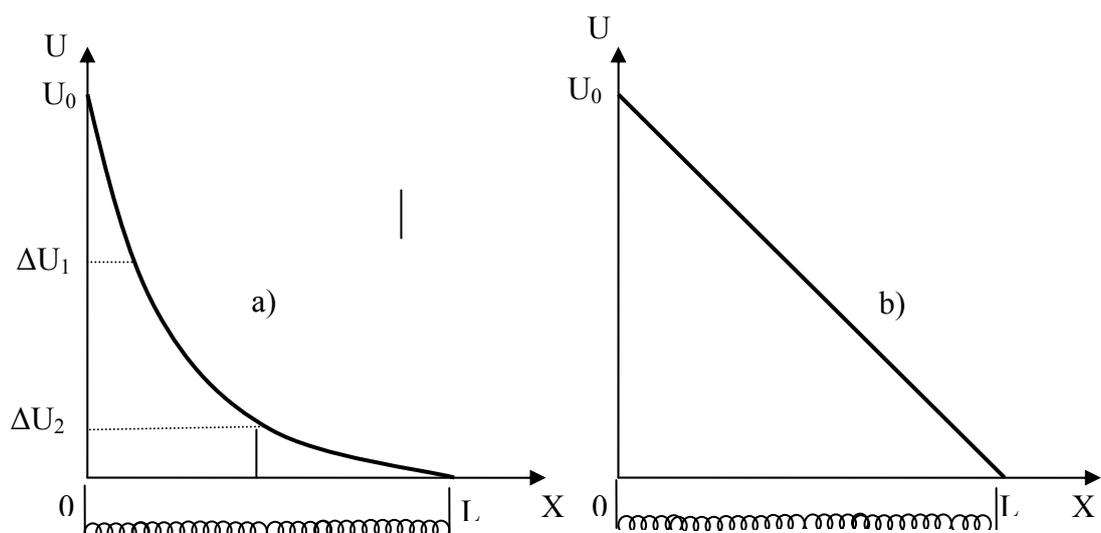
Un réseau en mode de fonctionnement anormal ne doit pas porter atteinte aux personnes et aux biens. La protection d'un réseau est l'ensemble des dispositions permettant la détection des situations anormales et les moyens d'y pallier de façon fiable, sélective et rapide. Des précautions de conception et d'exploitation doivent être prises. Dans le cas des surtensions dans le transformateur, on a recours à une protection interne (dès conception) et une protection externe (durant l'exploitation). La protection interne consiste à avoir une répartition de tension plus ou moins uniforme le long de l'enroulement, quel que soit le régime de fonctionnement du transformateur. La protection externe consiste à utiliser des dispositifs de protection. Ces dispositifs agissent de deux manières :

- ils évitent l'impact direct de la foudre sur les ouvrages électriques, en cas de foudre, et le dérivent vers le sol (paratonnerres, câbles de garde...);
- ils écoulent vers la terre les courants conduits par la ligne qui engendrent les surtensions et limitent ces dernières (éclateurs, parafoudres) [17].

### IV. 1. Protection du transformateur

Une onde à front raide qui aborde le transformateur, produit une répartition très inégale de la tension entre les différentes spires de l'enroulement (fig.IV-1-a): les spires d'entrée supportent une différence de potentiel  $\Delta U_1$  très supérieure à celle qui est supportée par les spires extrêmes  $\Delta U_2$ ; tout se passe comme si le bobinage s'opposait au passage de l'onde. Il en résulte un risque d'amorçage avec perforation d'isolant, court-circuit, etc... dans les premières spires de l'enroulement.

La mise hors service d'un transformateur en cas de défaut, est extrêmement chère. Or, les dispositions constructives dans ces machines, peuvent se révéler insuffisantes. L'emploi d'appareils de protection s'avère donc souvent indispensable. La protection du transformateur consiste à le protéger de ces perturbations extérieures ou mieux, à avertir de toute situation dangereuse et limiter le cas échéant les dégâts en cas d'avaries. Cette protection a recours à des dispositifs de protection (éclateurs, parafoudres...) et à l'adoption de dispositions constructives appropriées [15].



**Fig.IV-1 : Répartition initiale de tension dans un enroulement sous l'action d'une onde à front raide (a) et répartition uniforme (b).**

### IV. 1. 1. Protection interne

Certaines mesures de protection, comme par exemples l'amélioration de l'isolation de bobines d'extrémités, se sont avérées insuffisantes. L'idée est alors née de construire des transformateurs « résistant à la foudre », dans lesquels la tension est répartie le long de l'enroulement de façon plus ou moins uniforme quel que soit les régimes de fonctionnement des transformateurs.

Pour remédier à la situation de la figure IV-1-a , on recherche une répartition linéaire des tensions le long du bobinage (fig. IV-1-b). Dans le gros matériel en THT, où l'emploi est justifié, pour améliorer le passage de l'onde à front raide, on utilise le fait qu'il existe des capacités séries K entre spires et des capacités parallèles C entre spires et masse. Il convient alors d'augmenter les capacités séries ou de diminuer les capacités parallèles. Avec des bobinages complexes de réalisation difficile, on arrive à augmenter les capacités séries et obtenir une répartition des surtensions « excellente » le long de l'enroulement. En d'autres termes, il est souhaitable que  $\alpha$ , rapport de la répartition initiale de la tension, soit aussi petit que possible dans le transformateur.

Diminuer les capacités transversales revient à éloigner l'enroulement des masses métalliques mises à la terre, ce qui augmente les dimensions du transformateur et son coût.

La solution la plus économique est d'augmenter les capacités longitudinales. Les constructeurs ont imaginé des dispositions relatives des spires les unes par rapport aux autres, qui toutes visent à réduire ce rapport, capacité dérivée (transversale) sur capacité série (longitudinale). Cette recherche a conduit à la réalisation des enroulements, en galettes continues ( $\alpha = 0,4$ ) et en galettes entrelacées ( $\alpha = 0,1$ ). Un autre moyen consiste à placer le long de l'enroulement, en série, des anneaux d'aluminium ouverts. Ils sont reliés au commencement de l'enroulement. On renforce ainsi le couplage capacitif entre éléments de l'enroulement, ce qui diminue  $\alpha$  et par conséquent, la courbe de la répartition initiale, se rapproche de la répartition finale et devient donc plus linéaire en présentant des gradients de tension moins dangereux en particulier sur les premières spires de l'enroulement. Cette solution est considérée comme efficace [1] [2] [16].

### IV. 1. 2. Protection externe

Il ne serait pas économique, ni même possible, de concevoir les réseaux de transport et leurs équipements de telle façon qu'ils résistent à toutes les surtensions possibles. On dispose donc judicieusement des points d'isolement réduit où les surtensions pourront s'écouler sans dommage, protégeant ainsi les organes sensibles. Ces points d'isolement réduit sont constitués de dispositifs (éclateurs ou parafoudres) qui doivent aussi supporter sans amorcer les tensions « normales ».

L'utilisation des parafoudres modernes a conduit à spécifier actuellement des niveaux d'isolement au choc de foudre réduits : par exemple, des réseaux 220 kV ont vu leur niveau d'isolement passer de 1050 kV à 900 kV, pour atteindre enfin le niveau connu le plus bas de 650 kV. Ceci s'accompagne à la fois d'une réduction du prix des appareils et d'une augmentation de la sécurité d'exploitation [16].

## IV. 2. Les principes de la protection

Dans le cas des surtensions atmosphériques on a recours à deux types de protections.

### IV. 2. 1. Une protection primaire

Elle protège le bâtiment et sa structure contre les impacts directs de la foudre. Elle permet de capter, de conduire et d'écouler le coup de foudre vers le sol, dans des lieux d'écoulement privilégiés, au moyen de protections primaires : le paratonnerre, la cage maillées

(cage de Faraday), et le câble de garde (fil tendu). Un câble de garde est un paratonnerre pour une ligne aérienne.

L'utilisation de paratonnerres consiste à écouler le courant gigantesque qui s'établit entre sa pointe et le nuage au moment de la formation de l'éclair. Cela implique des conducteurs de section importante et une prise de terre irréprochable dans ses caractéristiques techniques.

L'installation de paratonnerres doit obéir à des normes précises. L'emplacement du paratonnerre ne peut se trouver à côté de l'édifice à protéger surtout lorsqu'on utilise des paratonnerres à tête active. Cela permet d'éviter à l'édifice le coup de foudre direct et ses conséquences électromagnétiques [21].

#### **IV. 2. 2. Une protection secondaire**

Elle protège les équipements contre les surtensions atmosphériques consécutives au coup de foudre indirects et complète la précédente. Elle est principale pour le transformateur.

Le principe de la protection, comme on l'a déjà dit, consiste à choisir des points d'amorçage de manière à ce que ces amorçages aient lieu dans l'air et à des endroits tels qu'aucun dommage sérieux ne puisse en résulter. Le but est d'assurer que le niveau d'isolement au choc (Basic Impulse Level : BIL) des éléments du poste n'est pas dépassé.

Des parafoudres (de moins en moins des éclateurs) sont installés sur les points des réseaux HT et MT, particulièrement exposés, et à l'entrée des postes [21].

#### **IV. 3. Dispositifs de protection : les éclateurs et parafoudres**

Les deux moyens de protection utilisés de manière large contre les surtensions sont les éclateurs et les parafoudres. Les éclateurs sont les dispositifs les moins coûteux et les plus rustiques. Ils sont utilisés exclusivement sur les réseaux aériens. Les parafoudres offrent une protection plus performante, mais pour un coût notablement plus élevé.

Eclateurs et parafoudres sont utilisés pour écrêter, limiter les surtensions transitoires de forte amplitude. Ils sont généralement dimensionnés pour intervenir sur les surtensions de foudre. Leur rôle est de constituer un point faible maîtrisé dans l'isolement du réseau, afin qu'un amorçage éventuel s'y produise systématiquement là.

##### **IV. 3. 1. L'éclateur**

C'est un dispositif de limitation des surtensions comportant un intervalle d'éclatement d'air libre entre une électrode sous tension et une autre relié à la terre.

Son rôle est de constituer un point faible maîtrisé dans l'isolement du réseau, afin qu'un amorçage éventuel se produise systématiquement là.

Le plus ancien des éclateurs est à simples tiges. L'éclateur à simples tiges (électrodes) est souvent utilisé pour protéger les isolateurs des appareils haute tension.

L'écartement B des électrodes est réglable et choisie de manière à obtenir un niveau de protection relatif au niveau de tenue de l'objet à protéger. La protection se fait par amorçage à la terre depuis la tige montée sur la borne haute tension vers la tige mise à la terre. Dans les transformateurs, pour protéger les isolateurs, il permet par amorçage des deux tiges de conduire le courant de défaut à la terre, via la cuve et la prise de terre. Il peut être à air ou à gaz au sein d'un tube étanche.

Il est utilisé encore sur les réseaux de distribution et de transport partout où il s'agit d'isolation dans l'air ou dans le cas des matériels pour lesquels il n'est pas économiquement intéressant de rechercher de très bas niveaux d'isolement.

Les modèles actuels les plus courants sont basés sur ce même principe mais comportent deux «cornes».

L'éclateur à cornes (électrodes en forme de corne fig. IV-2), destinées à provoquer un allongement de l'arc et entre lesquelles est placée une tige empêchant un oiseau de court-circuiter les deux cornes, est surtout utilisée pour la protection des matériels moyenne tension.

Utilisés en MT et HT, ils sont placés sur les points des réseaux particulièrement exposés et à l'entrée des postes MT/BT [21].

Les éclateurs n'ont aucun pouvoir de coupure. Ils sont destinés en dernier ressort, à écrêter les surtensions, dans le cas où les autres systèmes n'auraient pas fonctionné.

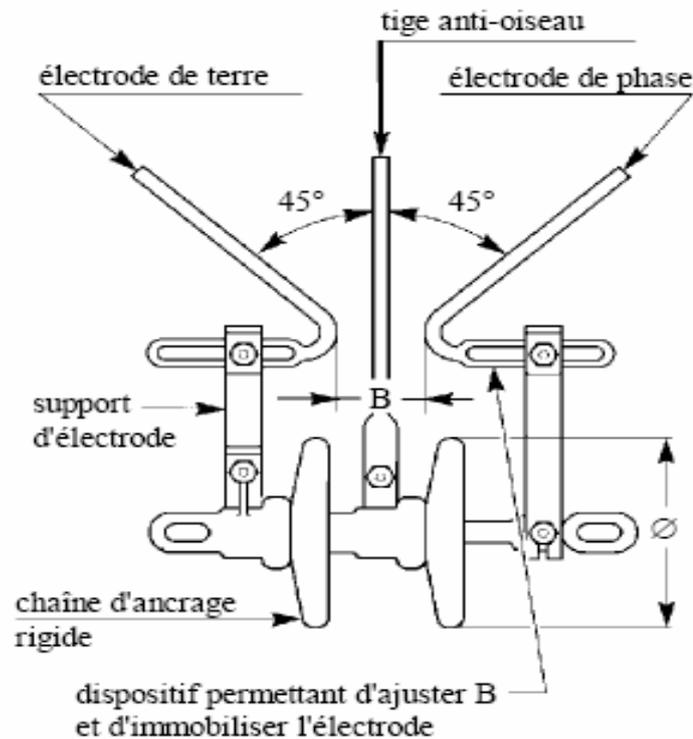


Fig. IV-2 : Eclateur MT avec tige anti-oiseaux.

#### IV. 3. 1. 1. Inconvénients de l'éclateur

Son mode de fonctionnement présente un certain nombre d'inconvénients :

- La tension d'amorçage présente une dispersion importante, fonction des conditions d'environnement (humidité, poussière, corps étrangers...).
- Le niveau de protection dépend de la raideur du front et de l'amplitude de la surtension. En effet, l'air présente un comportement « retard à l'amorçage » qui fait qu'une surtension importante à front très raide entraîne l'amorçage à une valeur de crête notablement supérieure au niveau de protection souhaité.
- Un courant de défaut à la terre, à fréquence industrielle, subsiste lors de l'intervention de l'éclateur. Ce courant « de suite », dont l'intensité dépend du mode de mise à la terre du neutre du réseau, ne peut généralement pas s'éteindre spontanément et impose l'intervention d'une protection en amont.
- Le cuivre peut s'accumuler sur les électrodes et diminuer la distance inter électrodes, ce qui peut provoquer des fonctionnements intempestifs.
- Ne réagit pas aux surtensions de manœuvres.
- L'amorçage provoque l'apparition d'une onde coupée à front raide susceptible d'endommager les enroulements (transformateurs et moteurs) situés à proximité.

- L'éclateur est inacceptable du point de vue continuité de service [9] [18] [21].

#### **IV. 3. 1. 2. Avantages des éclateurs**

- faible prix.
- pouvoir de transiter de grandes énergies et d'avoir une capacité parasite très faible.
- facile à régler.

Encore en place sur les réseaux, les éclateurs sont aujourd'hui de plus en plus remplacés par les parafoudres [9] [18] [21].

#### **IV. 3. 2. Les parafoudres**

Les parafoudres sont des appareils de protection qui protègent l'isolement des équipements de haute et moyenne tension contre les sollicitations dues à des surtensions inacceptables. Ces surtensions peuvent être provoquées par des décharges de foudre ou des manoeuvres de couplage dans les installations. Le parafoudre assure la protection contre les surtensions, en réduisant leur amplitude, par écoulement de courant à la terre. Dès que l'on veut réduire l'isolement des matériels ou améliorer la qualité de service, Il est nécessaire d'utiliser des parafoudres. Ces dispositifs présentent de meilleures caractéristiques de protection par rapport aux éclateurs, moyennant toutefois un prix élevé. Grâce à leur pouvoir élevé d'absorption d'énergie et leur grande rigidité mécanique, les parafoudres se prêtent particulièrement bien à la protection contre les surtensions des transformateurs, des câbles, des moteurs et des autres appareils et installations à haute et moyenne tension.

Il existe aujourd'hui sur le marché des parafoudres :

- au carbure de silicium et éclateurs (SiC),
- à oxyde de zinc depuis les années 70,
- à oxyde de zinc et enveloppe synthétique depuis les années 80.

Ce sont des résistances fortement non-linéaires qui présentent une diminution importante de leur résistance interne au-dessus d'une certaine valeur de tension aux bornes. La reproductibilité de fonctionnement est bien meilleure que pour les éclateurs et le phénomène de retard est inexistant.

#### **IV. 3. 2. 1. Les anciens modèles : parafoudres à résistances variables et éclateurs**

Les modèles au carbure de silicium (SiC) ne sont pas capables de supporter de manière permanente la tension de service car leur courant résiduel est trop important et génère un dégagement de chaleur inadmissible. Ils sont donc associés à un dispositif éclateur en série capable d'interrompre le courant résiduel et de tenir la tension de service.

Ce type de parafoudre associe en série des éclateurs et des résistances non linéaires (varistances) capables de limiter le courant après le passage de l'onde de choc. Après l'écoulement de l'onde de courant de décharge, le parafoudre n'est plus soumis qu'à la tension du réseau. Celle-ci maintient un arc sur l'éclateur, mais le courant correspondant, dit «courant de suite», traverse la résistance dont la valeur est maintenant élevée. Il est donc assez faible, pour ne pas endommager l'éclateur, et être interrompu lors du premier passage à zéro du courant (extinction naturelle de l'arc). La non linéarité des résistances permet de conserver une tension résiduelle, qui apparaît aux bornes de l'ensemble, proche du niveau d'amorçage car, plus le courant augmente, plus la résistance décroît. Diverses techniques ont été utilisées pour la réalisation des parafoudres à varistances et éclateurs. La plus classique utilise une résistance au carbure de silicium (SiC). Certains parafoudres comportent également des systèmes répartiteurs de tension (diviseurs résistifs ou capacitifs) et des systèmes de soufflage de l'arc (aimants ou bobines pour un soufflage magnétique).

#### IV. 3. 2. 1. 1. Caractéristiques

Ce type de parafoudre est caractérisé par :

- sa tension d'extinction, ou tension assignée, qui est la tension à fréquence industrielle la plus élevée sous laquelle le parafoudre peut se désamorcer spontanément. Elle doit être supérieure à la plus forte surtension temporaire à fréquence industrielle susceptible d'apparaître sur le réseau.
- ses tensions d'amorçage suivant les formes d'onde (fréquence industrielle, choc de manoeuvre, choc de foudre...); elles sont définies statistiquement.
- son pouvoir d'écoulement de courant de choc, c'est-à-dire la capacité de dissipation d'énergie. On traduit généralement la capacité d'absorption par la tenue à des ondes rectangulaires de courant.

#### V. 3. 2. 2. Les nouveaux modèles : parafoudres à oxyde de zinc (ZnO)

Ils sont constitués uniquement de varistances et remplacent de plus en plus les parafoudres à résistances variables et éclateurs. Les modèles à l'oxyde de zinc ZnO présentent une non-linéarité beaucoup plus accentuée, qui leur permet d'avoir, en l'absence d'éclateur, un courant de fuite à la tension de service de l'ordre de 10 mA. De ce fait, il est possible de maintenir les parties actives en permanence sous tension. Leur très forte non-linéarité améliore également l'efficacité de la protection aux forts courants. Les parafoudres à oxyde de zinc, dont l'usage tend à se généraliser, sont disponibles dans des réalisations adaptées aux utilisations sur réseaux aériens, en cellules ou en extension sur des accessoires de prises embrochables[15].

Cette non-linéarité est telle que la résistance passe de 1,5 MΩ à 15Ω entre la tension de service et la tension au courant nominal de décharge. Ces parafoudres ont pour avantages des performances de limitation et une fiabilité accrue par rapport aux parafoudres à carbure de silicium. Des améliorations ont été apportées ces dernières années, en particulier dans le domaine de la stabilité thermique et électrique des pastilles de ZnO lors de leur vieillissement. Ces parafoudres existent en enveloppes porcelaines pour à peu près toutes les tensions de services.

#### V. 3. 2. 2. 1. Caractéristiques

Un parafoudre à ZnO est caractérisé par:

- sa tension maximale de service permanent ;
- sa tension assignée qui peut être liée, par analogie avec les parafoudres à carbure de silicium, à la tenue aux surtensions temporaires ;
- le niveau de protection, défini arbitrairement comme la tension résiduelle du parafoudre soumis à un choc de courant donné (5, 10 ou 20 kA selon la classe), onde 8/20 ms ;
- courant nominal de décharge ;
- tenue aux courants de choc. (elle traduit le besoin de tenue à des ondes longues entraînant une dissipation d'énergie importante et non la nécessité d'écouler de tels courants en exploitation).

#### IV. 3. 2. 3. Les modèles les plus récents : parafoudres à enveloppes synthétiques

On rencontre les parafoudres à enveloppes synthétiques (fibre de verre plus résine) dans les réseaux de distribution.

Cette deuxième technique, plus récente, permet d'obtenir des parafoudres notablement plus légers, moins fragiles au vandalisme et dont les éléments actifs sont mieux protégés contre l'humidité car étant totalement surmoulés. L'humidité est en effet la principale cause de défaillance identifiée sur les ZnO. L'extérieur de ces parafoudres est généralement

constitué de polymère silicone assurant la tenue à l'environnement et la reconstitution de lignes de fuite suffisantes. Ces parafoudres, de par leur constitution interne et leurs enveloppes silicones, sont beaucoup plus tolérants sur les positions d'installation et permettent également d'optimiser la mise en oeuvre (par exemple : montage à l'horizontale).

L'empilage de résistances MO et d'armatures de connexion est maintenu ensemble par de forts tirants plats en matière synthétique renforcée de fibres de verre.

L'enveloppe à la silicone moulée directement le protège de toute influence ambiante ou atmosphérique. Cette construction a fait ses preuves depuis des années dans toutes les conditions ambiantes. Pour l'utilisation dans des installations intérieures sans pollution, l'enveloppe peut être dépourvue de jupes.

En résumé il apparaît que ces différents types de parafoudres sont utilisés pour la protection d'appareillage, de transformateurs et de câbles. Dans ce cas la quasi-totalité des dispositifs mis en service sont des parafoudres à oxyde de zinc qui remplacent progressivement les éclateurs à cornes et les parafoudres à carbure de silicium. Cette évolution vise à obtenir une meilleure précision des niveaux de protection permettant de mieux garantir la coordination des isolements.

#### IV. 3. 3. Avantages des parafoudres

Leur avantage est de ne pas présenter de courant de suite et d'éviter que le réseau soit mis en court-circuit, puis hors tension après amorçage.

Leurs avantages sur l'éclateur sont :

- une dispersion moins grande de la tension d'amorçage ;
- une extinction spontanée de l'arc ; le parafoudre limite l'amplitude et la durée des courants de suites sans que les disjoncteurs du réseau n'aient à fonctionner.
- une tension aux bornes du parafoudre, dite tension résiduelle, non nulle après amorçage, évitant ainsi la transmission d'une onde de tension coupée ;
- une insensibilité (jusqu'à un certain point) aux agressions extérieures [18].

#### IV. 3. 4. Fonctionnement

Leur principe de fonctionnement est très simple et repose sur la caractéristique fortement non linéaire des varistances à ZnO. Cette non-linéarité est telle que la résistance passe de 1,5 M $\Omega$  à 15 $\Omega$  entre la tension de service et la tension au courant nominal de décharge. A la tension maximale d'exploitation  $U_c$  il ne passe qu'un faible courant capacitif de l'ordre du mA. Si la tension augmente, les résistances MO passent pratiquement sans retard à l'état de bon conducteur. Ainsi une augmentation supplémentaire de la tension est limitée à la valeur spécifique de la tension résiduelle.

Après l'amortissement de l'onde de surtension, le parafoudre revient aussitôt à l'état de non ou de faible conduction. Le parafoudre à oxyde métallique transforme l'énergie de l'onde de surtension en chaleur qu'il évacue vers l'environnement [20].

#### IV. 3. 5. Distance de protection

Le parafoudre ne joue son rôle protecteur que sur une distance limitée  $l$ . Ce paramètre est étroitement lié au niveau de protection du parafoudre (tension résiduelle  $U_p$ ) et à la raideur  $S$  du front de l'onde. Sa valeur est calculée avec l'équation donnée ci-dessous, et suppose le cas le plus défavorable avec réflexion d'onde complète à une extrémité ouverte. Sachant que les parafoudres n'offrent pas tous le même niveau de protection, leur distance de protection varie également.

Plus la distance séparant le parafoudre et l'équipement est courte, meilleure est la protection. Il est donc logique d'en conclure que pour une protection maximale, le parafoudre doit être installé près de l'équipement, voire directement intégré à celui-ci. Cette notion de distance de protection doit impérativement être prise en compte lors de l'implantation, dans un poste, des parafoudres ou des éclateurs de protection des matériels [20,21].

#### IV. 3. 5. 1. Calcul de la distance de protection $l$ avec réflexion complète de l'onde

Le parafoudre écrête à une tension  $U_p$ . S'il est situé à une distance élevée, la tension maximale au niveau du matériel à protéger sera donc  $2U_p$ . Or, la tenue au choc du matériel est généralement inférieure à  $2U_p$ .

Pour palier cet inconvénient, on installe le parafoudre à une distance inférieure à la distance de "protection"  $l$ . Le parafoudre subit alors la somme de l'onde incidente et de l'onde réfléchi. Il amorce donc pour une onde incidente inférieure à  $U_p$ .

En supposant qu'au point de raccordement du matériel, l'onde est totalement réfléchi, on montre que la surtension au niveau du matériel est limitée à  $U = U_p + 2S \frac{l}{V}$  pour une tension de tenue au choc de foudre  $U_{BIL}$ , il faut donc que le parafoudre soit situé à  $l$  telle que :

$$U_p + 2S \frac{l}{V} \leq U_{BIL}.$$

$$\text{D'où :} \quad l = \frac{U_{BIL} - U_p}{2S} V \quad (\text{IV-1})$$

$l$  : distance de protection, en mètres.

$U_{BIL}$  : niveau d'isolement de base du transformateur, en kV (tension de tenue au choc de foudre).

$U_p$  : niveau de protection du parafoudre, en kV, égal à la tension résiduelle.

$S$  : raideur de l'onde de surtension (environ 1200 kV/μs).

$V$  : vitesse de propagation de l'onde. Dans une ligne aérienne environ 300 m/μs ; dans un câble environ 150 m/μs.

Alors que la distance de protection s'accroît lorsque la tension résiduelle  $U_p$  diminue, elle décroît si la raideur de l'onde  $S$  augmente. En cas de choc de foudre éloigné, une raideur d'environ 1200 kV/μs est typique [20].

#### IV. 3. 6. Implantation

Les parafoudres protègent les appareils uniquement quand ceux-ci se trouvent à l'intérieur du périmètre de protection. Cette distance de protection n'est que de quelques mètres.

La longueur des raccordements est déterminante. Les parafoudres doivent être placés au voisinage immédiat des transformateurs. En effet, du fait qu'ils présentent une grande impédance, il y aura réflexion et donc augmentation locale de la tension. La combinaison des ondes peut conduire à des nœuds et des ventres de tension. Un parafoudre placé à quelques dizaines de mètres peut très bien se trouver dans un nœud et ne jamais s'amorcer.

Dans les grands postes, il y a même intérêt à placer plusieurs parafoudres sur les mêmes barres.

Les parafoudres doivent être placés à raison de un par phase. La liaison à la terre s'effectue par une ligne de terre aussi courte que possible et une prise de terre de très faible résistance [11].

### IV. 3. 7. Définitions concernant le parafoudre

#### IV. 3. 7. 1. Le niveau de protection au choc

Le niveau de protection au choc d'un dispositif de protection est la valeur de crête la plus élevée de la tension qui peut exister entre ses bornes lors de l'application d'une onde de choc normalisée. Pour un parafoudre à résistance variable, ce sera la tension résiduelle correspondant à l'intensité de décharge la plus élevée à laquelle on puisse s'attendre. Il est clair qu'il faudra veiller à ce qu'une relation convenable existe entre ce niveau de protection et le niveau d'isolement du matériel. Un niveau de protection d'environ 25% au-dessous du niveau d'isolement est recommandé.

#### IV. 3. 7. 2. Tension maximale de régime permanent $U_c$

Cette valeur doit se situer nettement sous le point d'inflexion de la courbe courants-tensions du parafoudre, là où les pertes d'énergie sont faibles, où les courants sont essentiellement capacitifs et où les propriétés isolantes sont garanties en permanence. Le parafoudre peut, cependant, fonctionner à des surtensions temporaires élevées sur des périodes limitées (secondes-heures). Par exemple, la tension alternative assignée  $U_r$  spécifiée par la CEI est généralement de 25 % supérieure à  $U_c$  ; la valeur réelle varie selon les caractéristiques thermiques du parafoudre.

#### IV. 3. 7. 2. Tension résiduelle ou niveau de protection $U_p$

Souvent,  $U_p$  est normalisée à la valeur crête  $\hat{U}_c$  de la tension maximale de régime permanent (parfois également à la valeur efficace); on l'appelle alors rapport de protection  $R$  du parafoudre.

#### IV. 3. 7. 3. Tension assignée (ou d'extinction) d'un parafoudre

La tension assignée (ou d'extinction) d'un parafoudre est la tension maximale, à fréquence industrielle, pour laquelle le parafoudre est capable de se désamorcer spontanément. Elle doit être supérieure à toute surtension temporaire.

### IV. 4. Réduction des risques et des niveaux de surtensions

Vis-à-vis des différentes surtensions examinées dans le chapitre II, des solutions simples peuvent être envisagées dès les premiers projets d'installation.

#### IV. 4. 1. Cas de la surtension due à la ferrorésonance

Le seul moyen de s'en affranchir totalement est que  $\frac{1}{C\omega}i$  soit supérieur à la pente à l'origine de  $L\omega i$ . Cependant d'autres solutions sont envisageables et, en particulier, en MT où :

- une discordance entre les 3 phases peut se produire dans le cas de protection par interrupteur à commande phase par phase ; il faut rechercher la plus grande simultanéité possible lors de l'enclenchement des 3 phases du réseau (appareillage omnipolaire);
- l'enclenchement d'un transformateur à vide peut être le phénomène transitoire qui provoque la ferrorésonance ; pour l'éviter, il faut réduire les capacités en rapprochant par exemple l'appareillage de mise sous tension du transformateur. La connexion d'une charge préalablement à la mise sous tension est bénéfique. Elle intervient en effet comme une résistance d'amortissement pouvant interdire la mise en résonance. Mettre le neutre à la terre est aussi une solution vis-à-vis des résonances phase/terre.

**IV. 4. 2. Cas de la surtension provoquée par la coupure de courants capacitifs**

La solution consiste à éviter les rallumages successifs par l'augmentation de la vitesse de séparation des contacts, et l'utilisation d'un bon diélectrique (vide ou SF6).

**IV. 4. 3. Cas de la surtension provoquée par l'enclenchement d'une ligne à vide**

Elle est évitée sur les réseaux de transport par une mise sous tension progressive, obtenue en associant des résistances d'insertion au disjoncteur.

**IV. 4. 4. Cas de la surtension provoquée par un coup de foudre**

Les moyens à mettre en oeuvre sont de trois types :

- disposition de câbles de garde pour éviter les chocs directs,
- installations de protections aux points sensibles (éclateurs, ou préférentiellement, parafoudres),
- réalisation de prises de terre de bonne qualité.

**IV. 5. Coordination de l'isolement**

Les appareillages des postes et des réseaux de distribution à haute tension, on le rappelle, sont soumis en exploitation à des surtensions d'origine atmosphérique ou de service provenant de manoeuvres, de mises à la terre, de courts-circuits ou d'autres incidents conduisant à des phénomènes transitoires.

On entend par **coordination de l'isolement**, l'ensemble des mesures qui sont prises pour éviter des décharges disruptives de perforation ou de contournement dans le matériel des installations.

Obtenir une bonne coordination d'isolement c'est réaliser la protection des personnes et des matériels contre les surtensions avec le meilleur compromis technico-économique.

Elle nécessite :

- de connaître le niveau et l'énergie des surtensions pouvant exister sur le réseau,
- de choisir le niveau de tenue aux surtensions des composants du réseau permettant de satisfaire aux contraintes,
- d'utiliser des protections quand cela est nécessaire.

**Conclusion**

Dans ce chapitre on a présenté les risques pour un transformateur, la protection et les moyens de protection contre les surtensions. Il faut ajouter à cela que le parafoudre à implanter est commercialisé par référence à la tension nominale du réseau auquel il est destiné. Dans la simulation, au chapitre suivant, le logiciel utilisé tient compte du parafoudre par sa caractéristique tension-courant, donnée dans les ouvrages.

## Introduction

L'objectif de ce chapitre est de montrer comment présenter une modélisation de l'enroulement du transformateur, en fonction de sa géométrie et des propriétés physiques du milieu où il se trouve afin d'identifier et de déterminer ses différents paramètres, en vue de l'exploiter pour l'étude des surtensions qui se propagent vers le transformateur (surtensions conduites), dans le cas des surtensions impulsionnelles telles celles engendrées par des manœuvres sur le réseau ou par des décharges de foudre sur la ligne ou à proximité.

### V. 1. Modélisation par inductances propres et mutuelles

L'enroulement du transformateur de puissance haute tension, soumis à une onde de choc, ne peut plus être représenté simplement par une résistance et une inductance en série. Il est constitué d'un système de condensateurs, de résistances et d'inductances. Dans ce cas, il faut définir ces constituants de telle sorte à « représenter » le plus possible la réalité du transformateur, dans sa géométrie (types d'enroulements, distances et dispositions des enroulements les uns par rapport aux autres, par rapport au noyau, à la cuve...), dans son environnement (milieux diélectriques...) et de trouver un moyen de calculer leurs valeurs. C'est le modèle du transformateur de puissance, dit basé sur les inductances propres et mutuelles [19].

Dans le cas des basses fréquences, les calculs sont faciles dans un transformateur, parce que :

- une valeur globale est suffisante pour les impédances (impédances localisées),
- les effets capacitifs sont négligés.

Pour les fréquences élevées ce n'est plus la même chose. Les effets capacitifs deviennent importants et il faut, décomposer l'enroulement en un certain nombre de circuits élémentaires comportant des résistances, inductances et capacités pour en tenir compte en tant que support du phénomène de propagation.

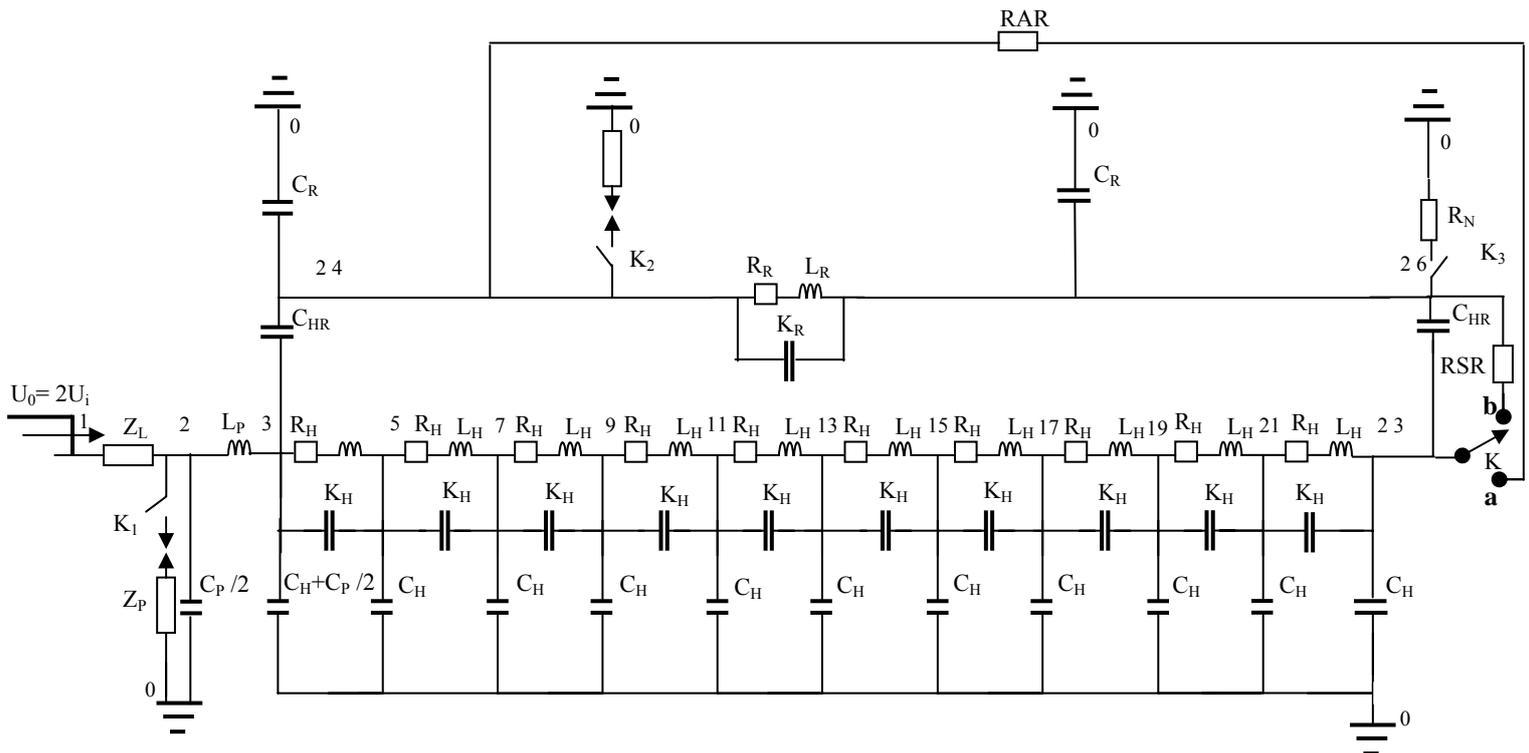
L'enroulement sera alors représenté par groupes de spires ou galettes, ou par bobinages que l'on appellera éléments. Chaque élément représente une énième partie de l'enroulement. On a à faire à  $n$  éléments en série. L'élément est constitué par une résistance et une inductance propre et est couplé mutuellement avec les autres éléments. Entre deux éléments, il existe une capacité (longitudinale) de couplage et chaque élément possède une capacité (transversale) par rapport à la masse (terre). Ces paramètres sont calculés à partir des dimensions géométriques du bobinage, des caractéristiques diélectriques du milieu où se trouve ce

bobinage, et des caractéristiques géométriques et magnétiques du noyau. Ils peuvent être déterminés par voie d'expérience pour certains d'entre eux.

La subdivision de l'enroulement en 10 éléments suffit. Cette approche permet de savoir le gradient de tension tous les 10% de la longueur de l'enroulement.

### V. 2. Schéma équivalent retenu

Les modèles retenus sont donnés par la figure V-1 pour le transformateur et V-2 pour l'autotransformateur.

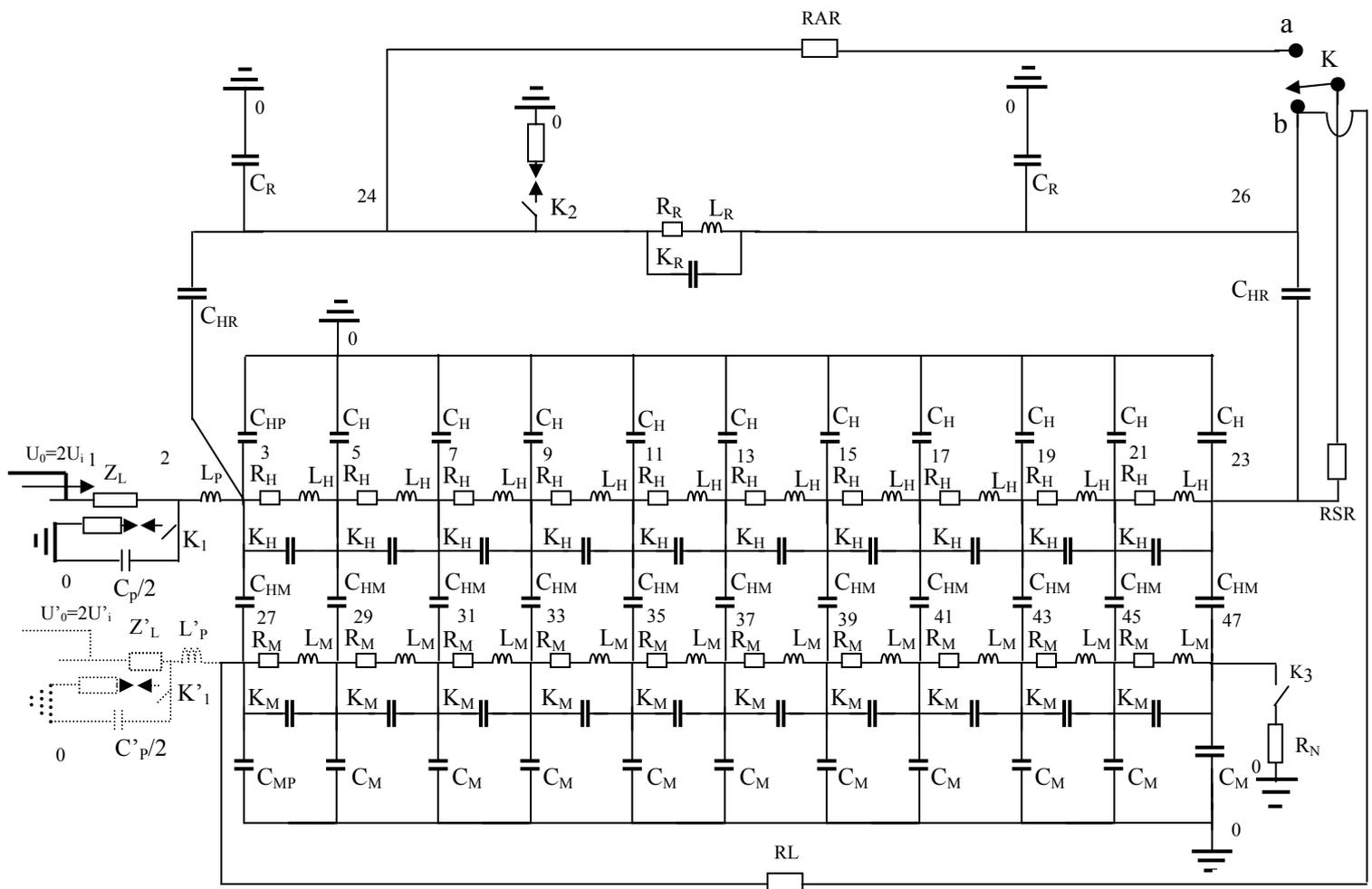


**Fig.V-1 : Schéma équivalent complet des enroulements HT et de réglage du transformateur.**

- K fermé sur a,  $K_3$  fermé : enroulement de réglage utilisé, neutre à la terre.
- K fermé sur b,  $K_3$  fermé : enroulement de réglage non utilisé, neutre à la terre.
- $K_3$  ouvert : neutre isolé.
- $K_1$  et  $K_2$  ouverts : protections inactives.
- $K_1$  et  $K_2$  fermées : protections activées.

Pour justifier ces modèles, il importe de remarquer qu'en fonctionnement normal, à la fréquence industrielle, le passage du courant s'effectue à travers les résistances et les réactances des enroulements. Les courants de fuite à travers les capacités existantes entre spires, entre galettes, entre enroulements ou entre enroulement et masse restent négligeables. Par contre, les phénomènes liés aux surtensions sont de nature oscillatoire, à fréquence très élevée, de sorte que pour ces régimes, les réactances inductives deviennent très grandes tandis

que les réactances capacitives diminuent. La modélisation du transformateur en vue de l'étude de la distribution de la tension le long de l'enroulement doit donc tenir compte, non seulement des résistances et des inductances mais surtout des capacités.



**Fig.V-2 : Schéma équivalent complet des enroulements HT, MT et de réglage.**

- K fermé sur a, K<sub>3</sub> fermé : enroulement de réglage utilisé, neutre à la terre.
- K fermé sur b, K<sub>3</sub> fermé : enroulement de réglage non utilisé, neutre à la terre.
- K<sub>3</sub> ouvert : neutre isolé éventuellement.
  
- K<sub>1</sub> et K<sub>2</sub> ouverts : protections inactives.
- K<sub>1</sub> et K<sub>2</sub> fermées : protections activées.

### V. 3. Schéma équivalent et modélisation

Sur le schéma de la figure V-1, l'impédance caractéristique de la phase du côté haute tension (HT) est notée  $Z_L$ . La distance entre le parafoudre et le transformateur est introduite dans les calculs à l'aide du paramètre inductif  $L_p$ . On tient compte des capacités d'entrée du poste par la capacité  $C_p$ . L'enroulement est subdivisé en dix parties représentées par dix éléments connectés en série. Il est à noter que le logiciel mis en œuvre (P-Spice) ne permet pas de considérer des schémas comportant plus de cents nœuds. Chaque élément du schéma

représente un ou plusieurs éléments constitutifs de l'enroulement (galette, bobine ou simplement groupe de spires selon la construction). Les résistances, les inductances propres et mutuelles, les capacités transversales (capacités équivalentes des capacités entre les enroulements, entre enroulement et cuve, enroulement et noyau) et les capacités longitudinales (entre éléments voisins) sont représentés respectivement par  $R_H$ ,  $L_H$ ,  $M_H$ ,  $C_H$  et  $K_H$  pour l'enroulement HT, par  $R_M$ ,  $L_M$ ,  $M_M$ ,  $C_M$  et  $K_M$  pour l'enroulement MT et par  $R_R$ ,  $L_R$ ,  $M_R$ ,  $C_R$  et  $K_R$  pour l'enroulement de réglage. En tenant compte de la haute fréquence de l'onde appliquée et de l'existence dans les transformateurs d'un enroulement connecté en triangle, on néglige l'influence du noyau. Afin d'obtenir des résultats correspondant aux plus sévères sollicitations de l'isolation, nous avons choisi une tension de choc, caractérisée par l'onde complète 1,2/50  $\mu$ s.

#### V. 4. Simulation de l'enroulement sur P- Spice

Pour la simulation de l'enroulement sur le P-Spice il faut numéroter l'enroulement depuis l'entrée, de telle sorte à insérer un ou des composants (résistance, inductance, capacité...) d'un élément, entre deux numéros consécutifs comme indiqué sur les figures V-1 et V-2.

Il faut calculer les valeurs des paramètres du schéma équivalent V-1 :  $R_H$ ,  $R_R$ ,  $L_H$ ,  $L_R$ ,  $C_H$ ,  $C_R$ ,  $C_{HR}$ ,  $K_H$ ,  $K_R$ , les inductances mutuelles  $M_{Hij}$  et  $M_{Rk}$  respectivement entre éléments du même enroulement HT et entre ces éléments et l'enroulement de réglage. Ces mutuelles ne figurent pas sur la figure, mais il faudra en tenir compte, en introduisant dans les programmes

les coefficients  $\frac{M_{ij}}{L}$  relatifs à ces mutuelles. On fera les mêmes calculs ultérieurement, pour

déterminer les valeurs des paramètres du modèle de l'autotransformateur de la figure V-2.

#### V. 5 Caractéristiques du transformateur proposé

##### V. 5 .1. Caractéristiques électriques

La plaque signalétique du transformateur proposé comporte les indications suivantes :

$$S_n = 63 \text{ MVA} \quad U_{nHT} / U_{nMT} = 115 / 38,5 \text{ kV.}$$

$$P_{cc} = 245 \text{ Kw} \quad u_{cc} = 10,5 \% \quad (\text{puissance et tension de court circuit}).$$

$$P_o = 50 \text{ Kw} \quad I_o = 0,5 \% \quad (\text{puissance et courant à vide})$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$\text{Réglage de la tension: } \pm 12 \%$$

$$\text{Couplage : Y/y.}$$

##### V. 5 .2. Caractéristiques géométriques

$$\begin{aligned} d_{He} &= 1264 \text{ mm (diamètre extérieur de l'enroulement haute tension) ;} \\ d_{Hi} &= 1032 \text{ mm (diamètre intérieur de l'enroulement haute tension) ;} \\ d_{Me} &= 932 \text{ mm (diamètre extérieur de l'enroulement moyenne tension) ;} \\ d_{Mi} &= 796 \text{ mm (diamètre intérieur de l'enroulement moyenne tension) ;} \\ d_R &= 1340 \text{ mm (diamètre de l'enroulement de réglage) ;} \\ d_{noy} &= 750 \text{ mm (diamètre du noyau) ;} \\ d_{cuve} &= 2250 \text{ mm (diamètre moyen de la cuve) ;} \\ l_{enr} &= 1660 \text{ mm (longueur des enroulements) ;} \end{aligned}$$

La représentation schématique, de la géométrie du transformateur, de la subdivision de l'enroulement HT, de l'enroulement de réglage est donnée par la figure V-3.

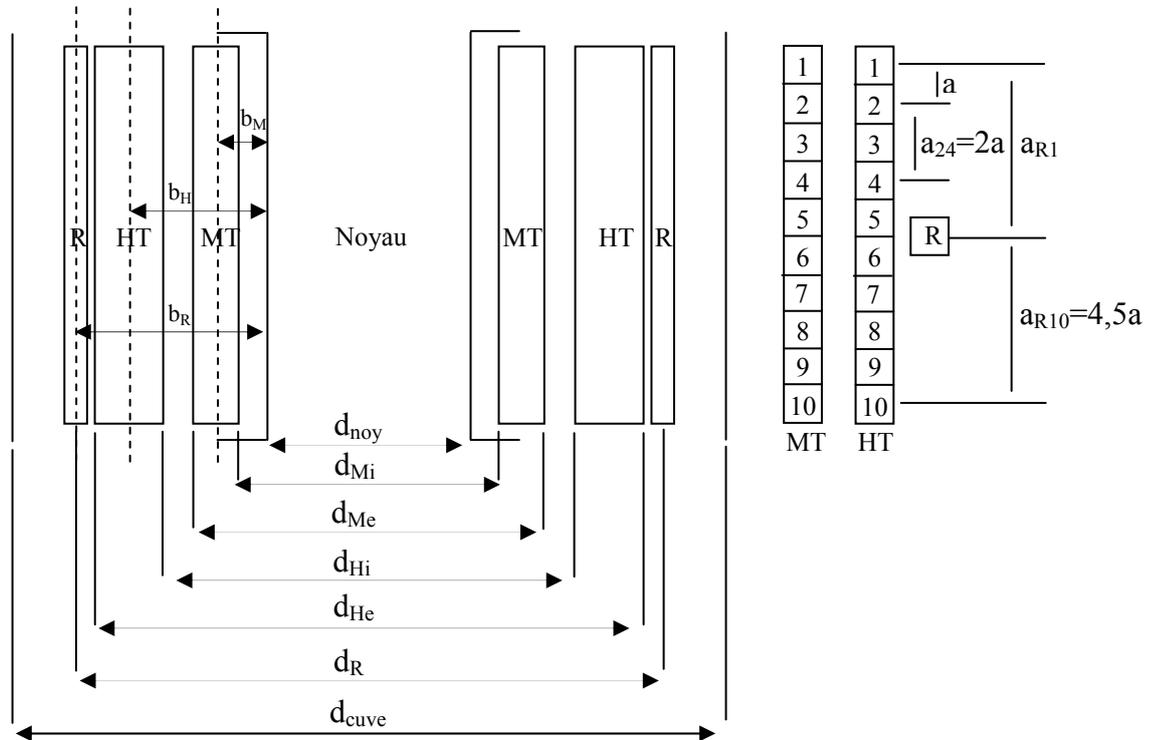


Fig.V-3 : Schéma en coupe, de la disposition des enroulements autour du noyau et subdivisions des enroulements en éléments.

### V. 6. Calcul des paramètres du schéma équivalent

La détermination des paramètres du schéma équivalent nécessite l'introduction de certaines grandeurs géométriques telles que la distance « a » entre deux éléments consécutifs du même enroulement, la distance  $a_{ij}$  entre l'élément i et l'élément j du même enroulement, la distance  $a_{ik}$  entre l'élément i et l'élément k de deux enroulements différents. On utilise également la distance moyenne b de l'enroulement au noyau. Cette distance b est aussi la distance  $b_i$  ( $b=b_i$ ) de tout élément i, issu de la subdivision de l'enroulement en question, au noyau. Lorsque les éléments i et k n'appartiennent pas au même enroulement, on tient compte de la distance  $b=\sqrt{b_i b_k}$ . On notera  $b_H$ ,  $b_M$  et  $b_R$  respectivement les distances moyennes de l'enroulement HT, de l'enroulement MT et de l'enroulement de réglage R au noyau (fig. V-3). Il est évident que  $a = \frac{l_{enr}}{n}$ . Ces distances interviennent dans la détermination des inductances propres et mutuelles associées aux éléments constituant le schéma équivalent (fig. V-1).

$$b_H = \frac{\frac{d_{He} + d_{Hi}}{2} - d_{noy}}{2} \tag{V. 1}$$

$$b_M = \frac{\frac{d_{Me} + d_{Mi}}{2} - d_{noy}}{2}$$

$$b_R = \frac{d_R - d_{noy}}{2} \quad (V. 2)$$

### V. 6. 1. Calcul des résistances

La résistance de l'enroulement dépend de la forme de l'onde appliquée, elle est donnée par la relation suivante :

$$R_\Delta = \frac{1,0575 \cdot \frac{R_{cc}}{2}}{\sqrt{\omega \cdot t_h}} = K_1 \cdot \frac{R_{cc}}{2} \quad (V. 3)$$

Où :

$R_\Delta$  est la résistance correspondante au cas de l'application d'une onde de tension « triangulaire » 1,2/50µs.

$R_{cc}$ , la résistance totale du transformateur ramenée à l'enroulement HT, correspondante à la fréquence de 50 Hz et déterminée par l'essai en court-circuit. Elle est calculée par l'expression suivante :

$$R_{cc} = \frac{\Delta P_{cc} \cdot U_{nHT}^2}{S_n^2} \quad (V. 4)$$

-  $\omega$  la pulsation correspondante à la fréquence de service  $f$  de 50 Hz:  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$

-  $t_h = 2 \cdot T$  , où  $T$  est la durée de « l'onde triangulaire » 1,2/50 µs.

$$t_h = 2 \cdot 100 \cdot 10^{-6} \text{ µs.}$$

$$K_1 = 4,22.$$

$$R_{cc} = \frac{245 \cdot 10^3 \cdot (115 \cdot 10^3)^2}{(63 \cdot 10^6)^2}$$

$$R_{cc} = 0,816 \text{ Ω.}$$

Résistance de l'enroulement HT à l'onde de foudre :

$$R_\Delta = K_1 \cdot \frac{R_{cc}}{2} = 4,22 \cdot \frac{0,816}{2} = 1,722 \text{ Ω.}$$

Résistance d'un élément de l'enroulement haute tension :

$$R_H = \frac{R_\Delta}{n} = \frac{1,722}{10} = 0,172 \text{ Ω.} \quad \underline{\underline{R_H = 0,172 \text{ Ω.}}}$$

Résistance d'onde  $R_{\Delta R}$  de l'enroulement de réglage :

$$R_{\Delta R} = \frac{R_{\Delta}}{n_H} \cdot n_R = R_{\Delta} \cdot \frac{0,12 U_{nHT}}{U_{nHT}} = 0,12 R_{\Delta} \Omega. \quad (\text{V. 5})$$

Dans le modèle, l'enroulement de réglage est représenté par un seul élément. Par conséquent :

$$R_R = R_{\Delta R} = 0,12 R_{\Delta} = 0,12 \cdot 1,722 \Omega. \quad \underline{\underline{R_R = 0,207 \Omega.}}$$

## V. 6. 2. Calcul des inductances

### V. 6. 2. 1. Inductance propre de l'enroulement HT

En hautes fréquences, l'inductance propre  $L_{HT}$  de l'enroulement se réduit à l'inductance de fuites. Cette dernière inductance sera attribuée au modèle comme inductance propre. Elle sera calculée à partir de l'inductance de court-circuit. L'inductance de court-circuit se calcule par la relation suivante :

$$L_{cc} = \frac{1}{2\pi f} \frac{u_{cc}}{100} \frac{U_{nHT}^2}{S_n}$$

$$L_{cc} = \frac{1}{2\pi 50} \frac{10,5}{100} \frac{(115 \cdot 10^3)^2}{63 \cdot 10^6} = 0,070 \text{ H}.$$

Inductance propre de l'enroulement HT :

$$L_{HT} = \frac{L_{cc}}{2} = \frac{0,070}{2} = 0,035 \text{ H}.$$

### V. 6. 2. 2. Inductance d'un élément i de l'enroulement HT

$$\mathfrak{L}_{Hi} = \frac{L_{HT}}{n} = \frac{0,035}{10} = 0,0035 \text{ H}.$$

Cette inductance de l'élément i, résulte de son inductance propre  $L_H$ , et des inductances mutuelles  $M_{Hij}$ , qu'il possède avec les autres éléments j, ( $j = 1, 10 ; j \neq i$ ), issus de la subdivision de l'enroulement :

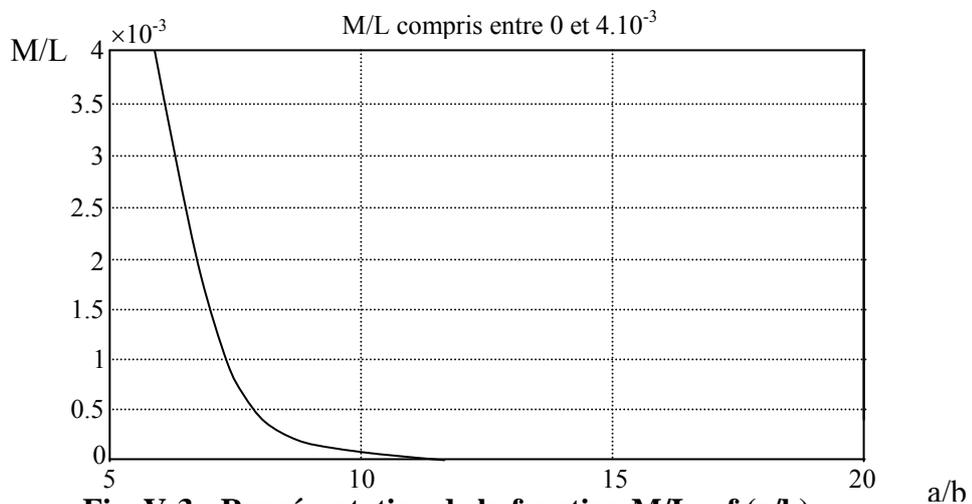
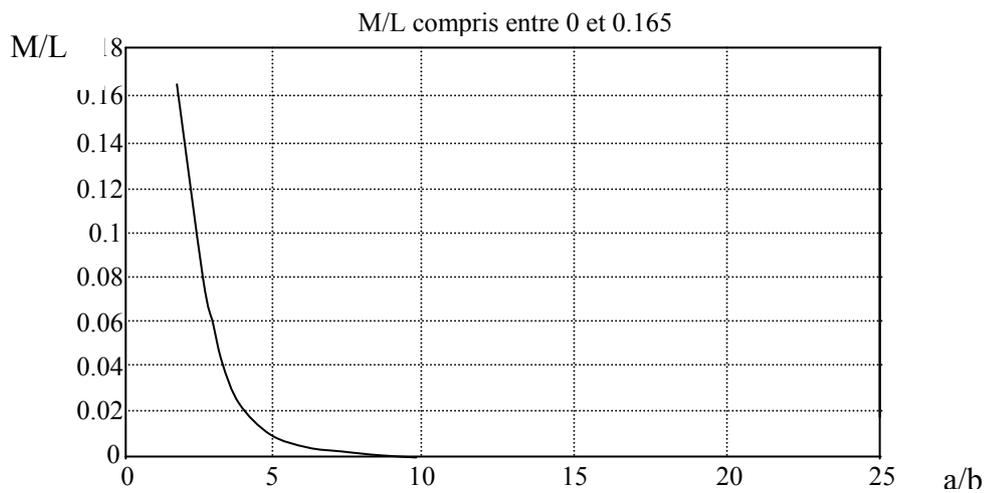
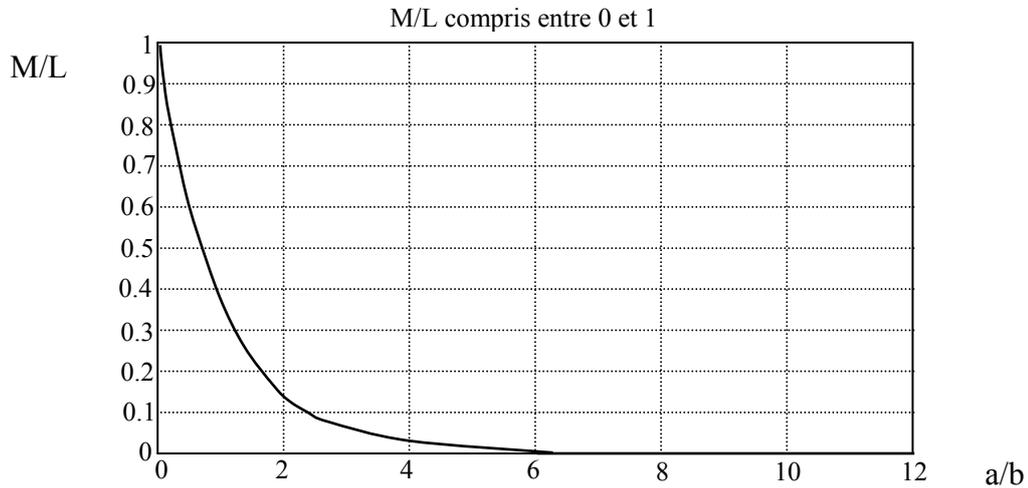
$$\mathfrak{L}_{Hi} = L_H + \sum M_{Hij} \quad j = 1, 10; j \neq i.$$

$$\mathfrak{L}_{Hi} = \left[ 1 + \sum \frac{M_{Hij}}{L_H} \right] L_H \quad j = 1, 10; j \neq i. \quad (\text{V. 6})$$

Pour déterminer  $L_H$ , il suffit de diviser  $\mathfrak{L}_{Hi}$  par  $\left[ 1 + \sum \frac{M_{Hij}}{L_H} \right]$ .

**V. 7. Détermination des coefficients de mutualité**  $\sigma_{Hij} = \frac{M_{Hij}}{L_H}$

Les coefficients de mutualité  $\frac{M_{ij}}{L}$  sont déterminés graphiquement à partir de la courbe représentative de ces coefficients en fonction du rapport  $\frac{a_{ij}}{b} : \frac{M_{ij}}{L} = f\left(\frac{a_{ij}}{b}\right)$ , (fig. V-3).



**Fig. V-3 : Représentation de la fonction  $M/L = f(a/b)$**

Pour l'enroulement HT et l'enroulement de réglage :

$$b_H = \frac{\frac{1264 + 1032}{2} - 750}{2} = 199 \text{ mm} .$$

$$b_R = \frac{1340}{2} - \frac{750}{2} = 295 \text{ mm} .$$

$$a_{ij} = |j-i|.a = |j-i|. \frac{l_{enr}}{n} = |j-i|. \frac{1660}{10} = |j-i|.166 \text{ mm}.$$

Pour l'élément 1, on obtient :

|                                      |       |        |        |        |        |        |                      |                      |                      |
|--------------------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|----------------------|----------------------|----------------------|
| $E_{1j}$                             | 2     | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8                    | 9                    | 10                   |
| $a_{1j}$                             | a=166 | 2a=332 | 3a=498 | 4a=664 | 5a=830 | 6a=996 | 7a=1162              | 8a=1328              | 9a=1494              |
| $b_H$                                | 199   |        |        |        |        |        |                      |                      |                      |
| $\frac{a_{1j}}{b_H}$                 | 0,83  | 1,67   | 2,50   | 3,34   | 4,17   | 5,00   | 5,84                 | 6,67                 | 7,50                 |
| $\sigma_{H1j} = \frac{M_{H1j}}{L_H}$ | 0,450 | 0,220  | 0,090  | 0,055  | 0,018  | 0,010  | $\frac{3,653}{10^3}$ | $\frac{2,004}{10^3}$ | $\frac{0,730}{10^3}$ |
| $\sum \frac{M_{H1j}}{L_H}$           | 0,850 |        |        |        |        |        |                      |                      |                      |

Pour l'élément 2 :

|                                      |       |       |        |        |        |        |        |                      |                      |
|--------------------------------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|----------------------|----------------------|
| $E_{2j}$                             | 1     | 3     | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9                    | 10                   |
| $a_{2j}$ (mm)                        | a=166 | a=166 | 2a=332 | 3a=498 | 4a=664 | 5a=830 | 6a=996 | 7a=1162              | 8a=1328              |
| $b_H$ (mm)                           | 199   |       |        |        |        |        |        |                      |                      |
| $\frac{a_{2j}}{b_H}$                 | 0,83  | 0,83  | 1,67   | 2,50   | 3,34   | 4,17   | 5,00   | 5,84                 | 6,67                 |
| $\sigma_{H2j} = \frac{M_{H2j}}{L_H}$ | 0,450 | 0,450 | 0,220  | 0,090  | 0,055  | 0,018  | 0,010  | $\frac{3,653}{10^3}$ | $\frac{2,004}{10^3}$ |
| $\sum \frac{M_{H2j}}{L_H}$           | 1,299 |       |        |        |        |        |        |                      |                      |

Pour l'élément 3 :

|                                      |        |       |       |        |        |        |        |        |                      |
|--------------------------------------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|----------------------|
| $E_{3j}$                             | 1      | 2     | 4     | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10                   |
| $a_{3j}$ (mm)                        | 2a=332 | a=166 | a=166 | 2a=332 | 3a=498 | 4a=664 | 5a=830 | 6a=996 | 7a=1162              |
| $b_H$ (mm)                           | 199    |       |       |        |        |        |        |        |                      |
| $\frac{a_{3j}}{b_H}$                 | 1,67   | 0,83  | 0,83  | 1,67   | 2,50   | 3,34   | 4,17   | 5,00   | 5,84                 |
| $\sigma_{H3j} = \frac{M_{H3j}}{L_H}$ | 0,220  | 0,450 | 0,450 | 0,220  | 0,090  | 0,055  | 0,018  | 0,010  | $\frac{3,653}{10^3}$ |
| $\sum \frac{M_{H3j}}{L_H}$           | 1,517  |       |       |        |        |        |        |        |                      |

Pour l'élément 4 :

|                                      |        |        |       |       |        |        |        |        |        |
|--------------------------------------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $E_{4j}$                             | 1      | 2      | 3     | 5     | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |
| $a_{4j}$ (mm)                        | 3a=498 | 2a=332 | a=166 | a=166 | 2a=332 | 3a=498 | 4a=664 | 5a=830 | 6a=996 |
| $b_H$ (mm)                           | 199    |        |       |       |        |        |        |        |        |
| $\frac{a_{4j}}{b_H}$                 | 2,50   | 1,67   | 0,83  | 0,83  | 1,67   | 2,50   | 3,34   | 4,17   | 5,00   |
| $\sigma_{H4j} = \frac{M_{H4j}}{L_H}$ | 0,090  | 0,220  | 0,450 | 0,450 | 0,220  | 0,090  | 0,055  | 0,018  | 0,010  |
| $\sum \frac{M_{H4j}}{L_H}$           | 1,603  |        |       |       |        |        |        |        |        |

Pour l'élément 5 :

|                                      |        |        |        |       |       |        |        |        |        |
|--------------------------------------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| $E_{5j}$                             | 1      | 2      | 3      | 4     | 6     | 7      | 8      | 9      | 10     |
| $a_{5j}$ (mm)                        | 4a=664 | 3a=498 | 2a=332 | a=166 | a=166 | 2a=332 | 3a=498 | 4a=664 | 5a=830 |
| $b_H$ (mm)                           | 199    |        |        |       |       |        |        |        |        |
| $\frac{a_{5j}}{b_H}$                 | 3,34   | 2,50   | 1,67   | 0,83  | 0,83  | 1,67   | 2,50   | 3,34   | 4,17   |
| $\sigma_{H5j} = \frac{M_{H5j}}{L_H}$ | 0,055  | 0,090  | 0,220  | 0,450 | 0,450 | 0,220  | 0,090  | 0,055  | 0,018  |
| $\sum \frac{M_{H5j}}{L_H}$           | 1,648  |        |        |       |       |        |        |        |        |

Comme on peut le remarquer,  $\sum_j \frac{M_{Hij}}{L_H} \neq \sum_j \frac{M_{Hkj}}{L_H}$  pour  $i \neq k$ . Pour déterminer l'inductance propre d'un élément  $L_H$ , on prendra une valeur moyenne :

$$\text{soit } \left(\sum \frac{M_{Hij}}{L_H}\right)_{\text{moy}} = 1,3834.$$

Pour des raisons de symétrie, cette valeur moyenne est calculée en considérant les cinq premiers éléments. En effet  $\sum_j \frac{M_{Hij}}{L_H}$  a la même valeur pour les éléments 1 et 10; 2 et 9; 3 et 8; 4 et 7; 5 et 6.

**V. 8. Coefficients de mutualités entre l'enroulement de réglage et les différents éléments de l'enroulement HT (de 1 à 10)**

|  |          |          |          |          |         |         |          |          |          |          |
|--|----------|----------|----------|----------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|
| E <sub>Ri</sub>                        | 1        | 2        | 3        | 4        | 5       | 6       | 7        | 8        | 9        | 10       |
| a <sub>Ri</sub> (mm)                   | 4.5a=747 | 3.5a=581 | 2.5a=415 | 1.5a=249 | 0.5a=83 | 0.5a=83 | 1.5a=249 | 2.5a=415 | 3.5a=581 | 4.5a=747 |
| b <sub>H</sub> (mm)                    | 199      | 199      | 199      | 199      | 199     | 199     | 199      | 199      | 199      | 199      |
| b <sub>R</sub> (mm)                    | 295      | 295      | 295      | 295      | 295     | 295     | 295      | 295      | 295      | 295      |
| $\frac{a_{Rj}}{\sqrt{b_H \cdot b_R}}$  | 3.08     | 2.40     | 1.71     | 1.03     | 0.34    | 0.34    | 1.03     | 1.71     | 2.40     | 3.08     |
| $\sigma_{Ri} = \frac{M_{Ri}}{M_{0HR}}$ | 0.060    | 0.080    | 0.145    | 0.350    | 0.680   | 0.680   | 0.350    | 0.145    | 0.080    | 0.060    |

Où  $M_{0HR}$  est donné par :  $M_{0HR} = 4\pi \sqrt{r_R \cdot r_{HT\text{moy}}} \cdot \ln \frac{b_R + b_{HT}}{b_R - b_{HT}} \cdot 10^{-6} \mu\text{H}.$

Les coefficients de mutualité  $\sigma_{Ri}$  sont différents. On prendra la valeur moyenne :

$$(\sigma_{Ri})_{\text{moy}} = \left(\frac{M_{Ri}}{M_{0HR}}\right)_{\text{moy}} = 0.263.$$

**V. 9. Inductance propre L<sub>H</sub> d'un élément**

L'inductance propre  $L_H$  d'un élément, s'obtient, en tenant compte de l'enroulement de réglage, par la relation :

$$L_H = \frac{\mathfrak{L}_{Hi}}{\left[1 + \left(\sum \frac{M_{Hij}}{L_H}\right)_{\text{moy}} + \left(\frac{M_{Ri}}{M_{0HR}}\right)_{\text{moy}}\right]} \quad (\text{V. 7})$$

$$L_H = \frac{3500}{\left[1 + (1.3834 + 0.263)\right]} = 1325 \mu H. \quad \underline{L_H = 1325 \mu H.}$$

**V. 10. Inductance propre  $L_R$  de l'enroulement de réglage**

La valeur de l'inductance de l'enroulement de réglage peut être déduite de la valeur de l'inductance de l'enroulement HT, si on considère que ces deux enroulements sont constitués de conducteurs identiques et ne diffèrent que par leurs nombres de spires. Avec leurs géométries identiques et se trouvant dans un même milieu (du point de vue magnétique), on peut considérer que leurs inductances sont proportionnelles au carré du nombre de spires. On obtient pour  $L_R$  la valeur:

$$L_R = \frac{L_{HT}}{n_H^2} \cdot n_R^2 = L_{HT} \cdot \left(\frac{0.12U_{nHT}}{U_{nHT}}\right)^2 = 0.035 \cdot \left(\frac{12}{100}\right)^2$$

$$L_R = 504 \mu H. \quad \underline{L_R = 504 \mu H.}$$

**V. 11. Détermination des inductances mutuelles**

Connaissant les coefficients de mutualité  $\sigma_{Hij} = \frac{M_{Hij}}{L_H}$ , on peut calculer

les inductances mutuelles  $M_{Hij}$  :  $M_{Hij} = \sigma_{Hij} \cdot L_H$ .

| $L_H$       | $M_{H12}$   | $M_{H13}$   | $M_{H14}$   | $M_{H15}$   | $M_{H16}$   | $M_{H17}$   | $M_{H18}$    | $M_{H19}$   | $M_{H110}$   |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| 1324        | 0,450 $L_H$ | 0,220 $L_H$ | 0,090 $L_H$ | 0,055 $L_H$ | 0,018 $L_H$ | 0,010 $L_H$ | 0,0036 $L_H$ | 0,002 $L_H$ | 0,0007 $L_H$ |
| ( $\mu H$ ) | 596         | 291         | 119         | 73          | 24          | 13          | 5            | 2,7         | 0,97         |

**Remarque** : les inductances mutuelles  $M_{Hij}$ , forment une matrice symétrique par rapport à la première diagonale.

**V. 12. Calcul des capacités**

Calculer les capacités entre enroulements, enroulements et noyau, enroulements et cuve, dites capacités transversales, revient à calculer des capacités cylindriques, parce que nous avons à faire à des « armatures » cylindriques. Comme les distances séparant ces armatures

sont petites devant leurs rayons, on peut envisager ces calculs en utilisant la formule classique donnant la capacité des condensateurs plans :

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S_{moy}}{e} \tag{V.8}$$

Où  $S_{moy}$  est la surface moyenne des « armatures » (enroulements),  $e$  la distance séparant les « armatures »,  $\epsilon_0 \epsilon_r$  la permittivité diélectrique du milieu séparant ces armatures.

$\epsilon_0$  : permittivité absolue de l'air ( $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} F / M$ ).

$\epsilon_r$  : Permittivité relative de l'huile d'isolation ( $\epsilon_r = 3,3$ ).

### V. 12. 1. Calcul des capacités transversales

Pour le calcul des capacités transversales, on utilisera le schéma de base de la figure V-3.

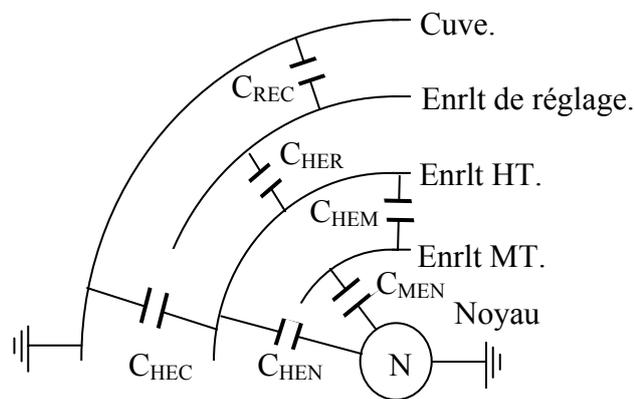


Fig.V-3 : Schéma de base pour la détermination des capacités de fuites dans le transformateur.

#### V. 12. 1. 1. Capacité $C_{MEN}$ , entre l'enroulement MT et le noyau N

$$S_{MN_{moy}} = \pi d_{moy} l_{enr} \quad (\text{Surface latérale d'un cylindre})$$

$$d_{moy} = \frac{d_{Mi} + d_N}{2}$$

$$e_{MN} = \frac{d_{Mi} - d_N}{2} \quad (\text{Distance séparant le noyau et l'enroulement MT})$$

$$C_{MEN} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S_{MN_{moy}}}{e_{MN}}$$

$$C_{MEN} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\pi d_{moy} \cdot l_{enr}}{\frac{d_{Mi} - d_N}{2}}$$

Finalement :

$$C_{MEN} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \pi l_{enr} \frac{d_{Mi} + d_N}{d_{Mi} - d_N} \quad (V. 9)$$

$$C_{MEN} = 8.854 \cdot 10^{-12} \cdot 3.3 \cdot \pi \cdot 1660 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{796 + 750}{796 - 750}$$

$$C_{MEN} = 5121 pF.$$

#### V. 12. 1. 2. Capacité $C_{HEM}$ , entre l'enroulement HT et l'enroulement MT :

$$C_{HEM} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \pi l_{enr} \frac{d_{Hi} + d_{Me}}{d_{Hi} - d_{Me}}$$

$$C_{HEM} = 8.854 \cdot 10^{-12} \cdot 3.3 \cdot \pi \cdot 1660 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1032 + 932}{1032 - 932}$$

$$C_{HEM} = 2993 pF.$$

#### V. 12. 1. 3. Capacité $C_{HER}$ , entre l'enroulement HT et l'enroulement de réglage R

$$C_{HER} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \pi l_{enr} \frac{d_R + d_{He}}{d_R - d_{He}}$$

$$C_{HER} = 8.854 \cdot 10^{-12} \cdot 3.3 \cdot \pi \cdot 1660 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1340 + 1264}{1340 - 1264}$$

$$C_{HER} = 5220 pF.$$

#### \* Capacité $C_{HR}$ , entre l'élément de l'enroulement de réglage et l'enroulement HT

$$C_{HR} = \frac{C_{HER}}{n + 1}$$

$$C_{HR} = \frac{5220}{1 + 1}$$

$$\underline{C_{HR} = 2610 pF.}$$

#### V. 12. 1. 4. Capacité $C_{REC}$ , entre l'enroulement de réglage R et la cuve :

Cette grandeur sera calculée selon la formule donnant la capacité d'un condensateur cylindrique vu l'importance de l'intervalle séparant les armatures ;

$$C_{REC} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \pi l_{enr} \frac{1}{\text{Log} \frac{d_C}{d_R}} \quad (\text{V. 10})$$

$$C_{REC} = 8.854 \cdot 10^{-12} \cdot 3.3 \cdot \pi \cdot 1660 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{\text{Log} \frac{2250}{1340}}$$

$$C_{REC} = 294 \text{ pF}.$$

#### \*Capacité $C_R$ , entre l'élément de l'enroulement de réglage et la cuve

Dans le modèle, l'enroulement de réglage est représenté par un seul élément, par conséquent :

$$C_R = \frac{C_{REC}}{n+1} \quad C_R = \frac{294}{1+1} \quad \underline{C_R = 147 \text{ pF.}}$$

#### V. 12. 1. 5. Capacité transversale $C_{HT}$ de l'enroulement HT

D'après la figure V-3, cette capacité résulte de la mise en parallèle des capacités  $C_{HEN}$  et  $C_{HEC}$  que forme cet enroulement, respectivement avec le noyau et la cuve. Ces dernières étant obtenues par les capacités en séries  $C_{MEN}$  et  $C_{HEM}$ , d'une part,  $C_{REC}$  et  $C_{HER}$  d'autre part.

$$C_{HEC} = \frac{C_{HER} \cdot C_{REC}}{C_{HER} + C_{REC}} \quad C_{HEC} = \frac{5220 \cdot 294}{5220 + 294} \quad C_{HEC} = 278 \text{ pF.}$$

$$C_{HEN} = \frac{C_{MEN} \cdot C_{HEM}}{C_{MEN} + C_{HEM}} \quad C_{HEN} = \frac{5121 \cdot 2993}{5121 + 2993} \quad C_{HEN} = 1889 \text{ pF.}$$

$$C_{HT} = C_{HEC} + C_{HEN} \quad \underline{C_{HT} = 2167 \text{ pF.}}$$

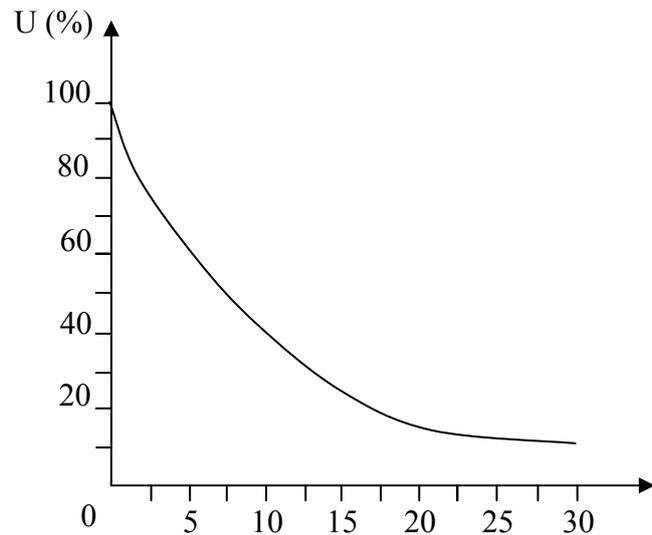
#### - Capacité transversale $C_H$ , relative à un élément de l'enroulement HT

$$C_H = \frac{C_{HT}}{n+1} \quad C_H = \frac{2167}{10+1} \quad \underline{C_H = 197 \text{ pF.}}$$

### V. 12. 2. Calcul des capacités longitudinales

Pour calculer les capacités longitudinales il faut d'abord déterminer la valeur de la constante de capacité  $\alpha$ , à partir de la répartition initiale de la tension fournie par le constructeur et résumée dans le tableau de la figure V-4 :

| N° du nœud | U (%) |
|------------|-------|
| A-0        | 100   |
| 2-0        | 84    |
| 4-0        | 71    |
| 6-0        | 58    |
| 8-0        | 47    |
| 10-0       | 40    |
| 12-0       | 33.2  |
| 14-0       | 29    |
| 16-0       | 25.3  |
| 18-0       | 23    |
| 20-0       | 19.7  |
| 22-0       | 17.6  |
| 24-0       | 15.8  |
| 26-0       | 15    |
| 28-0       | 13,5  |
| 30-0       | 13,4  |



**Fig. V-4 : Répartition initiale de la tension, fournie par le constructeur.**

Cette répartition suppose qu'il y a 16 nœuds équidistants le long de l'enroulement considéré. Le nœud A se trouve au début de l'enroulement où la tension initiale est maximale et vaut  $U_0$ , le nœud 30 se trouve à la fin de l'enroulement, à la distance L, où la tension vaut 13,4 % de  $U_0$ . Au nœud intermédiaire k, situé à la distance l de A, la tension vaut  $U\%( \frac{l}{L} = x )$  de  $U_0$ . La répartition de la tension est de la forme :  $U(x) = U_0 \cdot e^{-\alpha x}$ .  $\alpha$  est la

constante de capacité définie par la racine carrée du rapport de la capacité transversale totale de l'enroulement sur la capacité longitudinale totale de ce dernier,  $\alpha = \sqrt{\frac{C_{tot}}{K_{tot}}}$  soit

$K_{tot} = \frac{C_{tot}}{\alpha^2}$ . La détermination de  $\alpha$  permet de trouver les capacités longitudinales. Le calcul

montre qu'on obtient des valeurs légèrement différentes pour  $\alpha$  à partir de nœuds différents, en utilisant cette répartition initiale. On prendra une valeur moyenne.

$$U\%(x) = \frac{U(x)}{U_0} 100 = \frac{U_0 e^{-\alpha x}}{U_0} 100 \quad \text{soit} \quad U\%(x) = 100 e^{-\alpha x}$$

D'où  $\alpha = -\frac{1}{x} \text{Log} \frac{U\%(x)}{100}$ . Comme  $x = \frac{l}{L} \equiv \frac{k}{30}$ , on obtient les résultats suivants :

$$\text{Pour le nœud 2, } x = 2/30 \quad \text{et} \quad \alpha = -30/2 \text{ Log } 84/100 \quad \alpha = 2,615$$

$$\text{Pour le nœud 10, } x = 10/30, \quad \alpha = -30/10 \text{ Log } 40/100 \quad \alpha = 2,749$$

$$\text{Pour le nœud 26, } x = 26/30, \quad \alpha = -30/26 \text{ Log } 15/100 \quad \alpha = 2,189$$

$$\alpha = (2,615 + 2,749 + 2,189)/3 \quad \underline{\alpha = 2,517.}$$

### V. 12. 2. 1. Capacité longitudinale $K_{HT}$ de l'enroulement HT

$$K_{HT} = \frac{\Sigma C_{HT}}{\alpha^2} \quad K_{HT} = \frac{2167}{2,517^2} \quad \underline{K_{HT} = 317 \text{ pF.}}$$

### V. 12. 2. 2. Capacités longitudinale $K_H$ , relative à un élément de l'enroulement HT

$$K_H = n.K_{HT} \quad K_H = 10.317 \quad \underline{K_H = 3170 \text{ pF.}}$$

### V. 12. 2. Capacités longitudinale $K_R$ , de l'enroulement de réglage

Bien que représenté par un seul élément dans le modèle, on peut attribuer à cet enroulement la capacité longitudinale de l'enroulement HT, puisqu'ils ont la même géométrie et se trouvent dans un même milieu diélectrique.

$$K_R = K_{HT} \quad \underline{K_R = 317 \text{ pF.}}$$

## V. 13. Equations électriques de l'enroulement

Pour évaluer la surtension en différents points de l'enroulement, lorsqu'on passe de la répartition initiale à la répartition finale, on établit un système d'équations différentielles pour l'enroulement dont les solutions, donnent en fonction du temps, la tension et le courant au niveau de chaque élément.

Les valeurs linéiques de l'inductance et de la capacité de la liaison parafoudre transformateur sont respectivement 1,33  $\mu\text{H}$  et 8,33 pF ; ce qui nous permet de calculer les valeurs de  $L_p$  et de  $C_p$  pour une longueur de 120m :

$$L_p = 120 \times 1,33 = 160 \mu\text{H}$$

$$C_p = 120 \times 8,33 = 1000 \text{ pF}$$

Au point d'impact :

$$u_0 = U_0 (\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)).$$

L'amplitude de l'onde est prise égale à la tension d'amorçage de l'isolateur de la ligne foudroyée. Pour la ligne de tension nominale 115 kV,  $U_0$  vaut 680 kV.

On désignera par  $u_k$  ( $2 \leq k \leq 13$ ), la tension au nœud  $j = 2k+1$ , avec :

$$\begin{aligned} j = 1 & \quad u_0 = U_0 (\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)) \quad \text{onde de tension de foudre (écrêtée).} \\ j = 2 & \quad u_1 = u_p \quad \text{niveau de protection du parafoudre.} \end{aligned}$$

Les courants relatifs à chaque élément auront l'indice du rang de l'élément dans le modèle.

Dans la ligne le courant de foudre sera  $i_0$ .  $i_p$  est le courant dans le parafoudre.

La caractéristique (tension courant) du parafoudre à oxyde de zinc utilisé est donnée par le tableau suivant :

|              |   |       |      |     |     |     |     |     |
|--------------|---|-------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Tension (kV) | 0 | 160   | 175  | 180 | 190 | 230 | 250 | 280 |
| Courant (kA) | 0 | 0,001 | 0,01 | 0,1 | 1   | 3   | 5   | 10  |

### V. 13. 1. Equations aux tensions

Si on tient compte du parafoudre sa tension est exprimée, en fonction du courant qu'il écoule, par :

$$u_p = A i_p^\eta \tag{1}$$

donc :  $Ln(u_p) = Ln(A) + \eta Ln(i_p)$  soit :  $Ln(i_p) = \frac{Ln(u_p) - Ln(A)}{\eta}$

d'où :  $i_p = \exp\left(\frac{Ln(u_p) - Ln(A)}{\eta}\right)$  (2)

on a :

$$u_p - u_1 = L_p \frac{d i_0}{dt} - L_p \frac{d i_p}{dt} \tag{3}$$

$$u_0 - u_p = Z_L i_0 \quad i_0 = \frac{u_0 - u_p}{Z_L} \tag{4}$$

On dérive (2) par rapport au temps :

$$\frac{d i_p}{dt} = \frac{1}{\eta u_p} \frac{d u_p}{dt} \exp\left(\frac{Ln(u_p) - Ln(A)}{\eta}\right) = \frac{1}{\eta u_p} \frac{d u_p}{dt} i_p$$

D'où : 
$$\frac{du_p}{dt} = \eta Z_p \frac{di_p}{dt} \quad (Z_p \text{ impédance non linéaire du parafoudre})$$

Ce qui donne :

$$\frac{di_p}{dt} = \frac{1}{\eta Z_p} \frac{du_p}{dt} \quad (5)$$

En reportant (4) et (5) dans (3) :

$$u_p - u_1 = L_p \frac{d(u_0 - u_p)}{Z_L dt} - L_p \frac{1}{\eta Z_p} \frac{du_p}{dt}$$

$$u_p - u_1 = \frac{L_p}{Z_L} \frac{du_0}{dt} - \frac{L_p}{Z_L} \frac{du_p}{dt} - L_p \frac{1}{\eta Z_p} \frac{du_p}{dt}$$

$$u_p - u_1 = \frac{L_p}{Z_L} \frac{du_0}{dt} - \left( \frac{L_p}{Z_L} + \frac{L_p}{\eta Z_p} \right) \frac{du_p}{dt}$$

$$u_p - u_1 = \frac{L_p}{Z_L} \frac{du_0}{dt} - \left( \frac{L_p}{Z_L} + \frac{L_p}{\eta Z_p} \right) \eta Z_p \frac{di_p}{dt}$$

$$u_p - u_1 = \frac{L_p}{Z_L} U_0 [\beta \exp(-\beta t) - \alpha \exp(-\alpha t)] - \left( \frac{\eta Z_p}{Z_L} + 1 \right) L_p \frac{di_p}{dt}$$

$$u_1 - u_2 = Ri_1 + L \frac{di_1}{dt} + \sum_2^{10} M_{1j} \frac{di_j}{dt}$$

$$u_2 - u_3 = Ri_2 + L \frac{di_2}{dt} + \sum_1^{10} M_{2j} \frac{di_j}{dt} \quad j \neq 2$$

$$u_3 - u_4 = Ri_3 + L \frac{di_3}{dt} + \sum_1^{10} M_{3j} \frac{di_j}{dt} \quad j \neq 3$$

.....

$$u_k - u_{k+1} = Ri_k + L \frac{di_k}{dt} + \sum_1^{10} M_{kj} \frac{di_j}{dt} \quad j \neq k$$

.....

$$u_{10} - u_{11} = Ri_{10} + L \frac{di_{10}}{dt} + \sum_1^{10} M_{10j} \frac{di_j}{dt} \quad j \neq 10$$

$$u_{11} - u_{12} = R_R i_R + L_R \frac{di_R}{dt} + \sum_1^{10} M_{Rj} \frac{di_j}{dt} \quad \text{si l'enroulement de réglage est utilisé.}$$

$$u_{12} = 0 \quad \text{si le neutre est à la terre.}$$

$$u_{11} - u_{12} = \sum_1^{10} M_{Rj} \frac{di_j}{dt} \quad \text{si l'enroulement de réglage n'est pas utilisé.}$$

### V. 13. 2. Equations aux courants

Au nœud « 3 » à l'entrée du transformateur on a :

$$i_0 - i_P - i_1 = i_{C_H + C_P} + i_{C_{HR1}} + i_{K_{H1}} + i_{K_{H1-1}}$$

$$i_0 - i_P - i_1 = (C_H + C_P) \frac{du_1}{dt} + C_{HR} \frac{d(u_1 - u_{11})}{dt} + K \frac{d(u_1 - u_2)}{dt}$$

$$i_0 - i_P - i_1 = (C_H + C_P + C_{HR} + K) \frac{du_1}{dt} - C_{HR} \frac{du_{11}}{dt} - K \frac{du_2}{dt}$$

Au nœud « 5 » :

$$i_1 - i_2 = -i_{KH1} + i_{CH2} + i_{KH2}$$

$$i_1 - i_2 = -K_H \frac{d(u_1 - u_2)}{dt} + C_H \frac{du_2}{dt} + K_H \frac{d(u_2 - u_3)}{dt}$$

$$i_1 - i_2 = -K_H \frac{du_1}{dt} + (C_H + 2K_H) \frac{du_2}{dt} - K_H \frac{du_3}{dt}$$

Au nœud « 7 » :

$$i_2 - i_3 = -i_{KH2} + i_{CH3} + i_{KH3}$$

$$i_2 - i_3 = -K_H \frac{d(u_2 - u_3)}{dt} + C_H \frac{du_3}{dt} + K_H \frac{d(u_3 - u_4)}{dt}$$

$$i_2 - i_3 = -K_H \frac{du_2}{dt} + (C_H + 2K_H) \frac{du_3}{dt} - K_H \frac{du_4}{dt}$$

Au nœud  $j=2k+1$        $2 \leq k \leq 10$

$$i_{k-1} - i_k = -K_H \frac{du_{k-1}}{dt} + (C_H + 2K_H) \frac{du_k}{dt} - K_H \frac{du_{k+1}}{dt}.$$

V. 14. Exemples de situations de l'enroulement de réglage

V. 14. 1. Enroulement de réglage utilisé

Dans ce cas la haute tension est appliquée aux enroulements HT et de réglage en séries. C'est la dernière prise, au bout de l'enroulement de réglage qui est utilisée. La figure V-5 illustre cette situation du modèle du transformateur, « avec » enroulement de réglage.

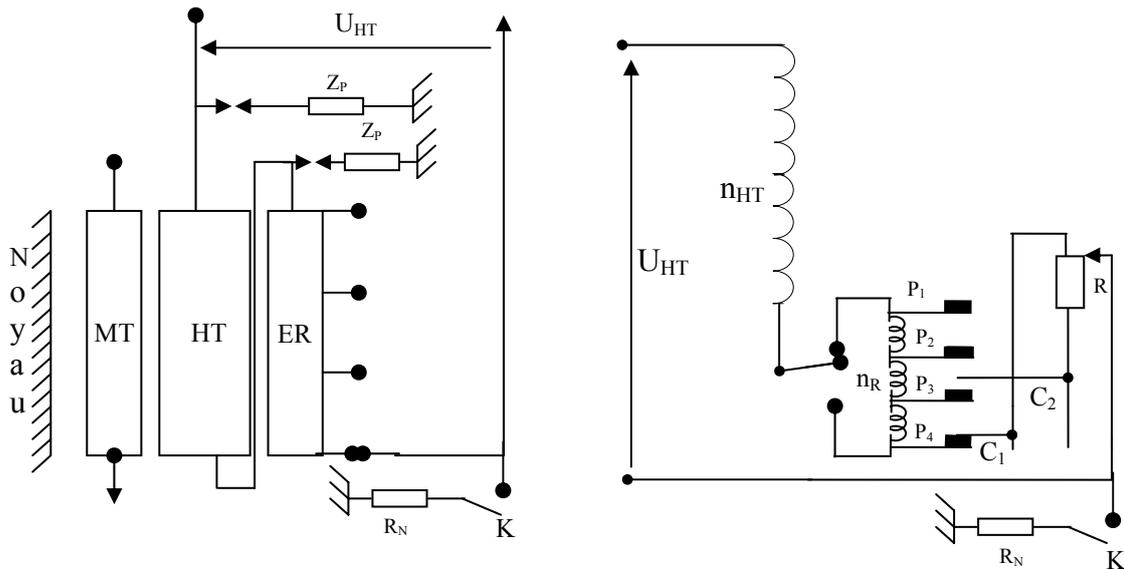


Fig. V-5 : Transformateur à neutre isolé (K ouvert) ou à la terre (K fermé), avec enroulement de réglage inséré.

V. 14. 2. Enroulement de réglage non utilisé

Cette situation, « sans » enroulement de réglage, correspond au schéma de la figure V-6 dans l'autotransformateur. C'est la prise au début de l'enroulement de réglage qui est utilisée. L'enroulement de réglage n'est pas inséré entre phase et neutre. Il se trouve en bout libre.

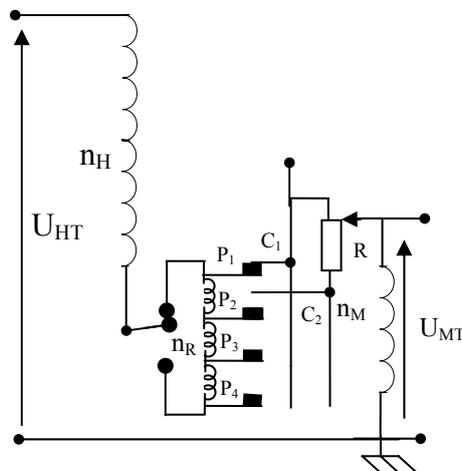


Fig. V-6 : Autotransformateur où l'enroulement de réglage n'est pas inséré (en bout libre), neutre à la terre.

Il est important de signaler, que le danger sur l'enroulement MT ne peut pas être éliminé par le parafoudre installé du côté HT, si l'onde de surtension provenait du côté MT. Ce cas est envisagé avec autant d'importance que le cas précédent afin d'assurer la protection de l'enroulement MT.

## V. 15. Caractéristiques de l'autotransformateur proposé

### V. 15 .1. Caractéristiques électriques

Les calculs porteront sur un autotransformateur du type ATDUTH-200.000/220/110, dont les indications sont les suivantes:

Caractéristiques électriques :

$$S_n = 200 \text{ MVA} ;$$

$$U_{nHT} = 230 \text{ kV} ;$$

$$U_{nMT} = 121 \text{ kV} ;$$

$$U_{nBT} = 11 \text{ kV} ;$$

$$u_{ccHM} = 10.2;$$

$$u_{ccHB} = 33.2;$$

$$u_{ccMB} = 21.2;$$

$$P_{ccHM} = 456 \text{ kW} ; P_{ccHB} = 346 \text{ kW} ; P_{ccMB} = 38 \text{ kW} ;$$

$$P_0 = 116 \text{ kW (pertes à vide)}.$$

### V. 15 .2. Caractéristiques géométriques

- Enroulement HT :

$$d_{HTe} = 2055 \text{ mm (diamètre extérieure de l'enroulement haute tension)} ;$$

$$d_{HTi} = 1624 \text{ mm (diamètre intérieure de l'enroulement haute tension)} ;$$

- Enroulement MT :

$$d_{MTe} = 1548 \text{ mm (diamètre extérieure de l'enroulement moyenne tension)} ;$$

$$d_{MTi} = 1184 \text{ mm (diamètre intérieure de l'enroulement moyenne tension)} ;$$

- Enroulement de réglage :

$$d_R = 2160 \text{ mm}$$

- Noyau :

$$d_{noy} = 1100 \text{ mm (diamètre du noyau)} ;$$

- Cuve :

$$d_{cuve} = 3200 \text{ mm (diamètre moyen de la cuve ovale)} ;$$

- Enroulements :

$l_{\text{enr}} = 1645$  mm (longueur des enroulements).

Nombres de spires :

- $n_H = 329$  (enroulement HT).
- $n_M = 316$  (enroulement MT).
- $n_R = 45$  (enroulement de réglage).

### V. 15. 3. Calcul des paramètres de court circuit de l'autotransformateur

D'après les résultats et les notations du chapitre I et le schéma de la figure I-14 :

$$U_{nHT} = 230 \text{ kV} \quad U_{nHT} = 230 \text{ kV} \quad U_{nMT} = 121 \text{ kV}$$

$$U_1/U_2 = K_{HM} = (n_H+n_M)/n_M \quad k_{HM} = n_H/n_M \quad k_{HM}+1 = (n_H+n_M)/n_M = K_{HM}.$$

$$k_{HM} = U_H/U_M = n_H/n_M \quad k_{HB} = U_H/U_B = n_H/n_B \quad \text{et} \quad k_{MB} = U_M/U_B = n_M/n_B.$$

$$k_{MB} = k_{HB}/k_{HM}.$$

$$u_{ccX} = \frac{U_{ccX}}{U_{nX}} \cdot 100\% \quad \text{soit} \quad U_{ccX} = \frac{u_{ccX}}{100} \cdot U_{nX}$$

$$U_{ccH-M} = \frac{u_{ccH-M}}{100} \cdot U_{nHT} \quad U_{ccH-B} = \frac{u_{ccH-B}}{100} \cdot U_{nHT} \quad U_{ccM-B} = \frac{u_{ccM-B}}{100} \cdot U_{nMT}$$

$$U_{ccH-M} = \frac{u_{ccH-M}}{100} \cdot U_{nHT} = \frac{10.2}{100} \cdot 230 = 23.46 \text{ kV}$$

$$U_{ccH-B} = \frac{u_{ccH-B}}{100} \cdot U_{nHT} = \frac{33.2}{100} \cdot 230 = 76.36 \text{ kV}$$

$$U_{ccM-B} = \frac{u_{ccM-B}}{100} \cdot U_{nMT} = \frac{21.2}{100} \cdot 121 = 25.65 \text{ kV}$$

$$R_{HT} = 0.5 (P_{ccHM} + P_{ccHB} - P_{ccMB}) \cdot \frac{U_{Hn}^2}{S_n^2}$$

$$R_{MT} = 0.5 (P_{ccHM} - P_{ccHB} + P_{ccMB}) \cdot \frac{U_{Mn}^2}{S_n^2}$$

$$R_{BT} = 0.5 (-P_{ccHM} + P_{ccHB} + P_{ccMB}) \cdot \frac{4U_{Bn}^2}{S_n^2}$$

**V. 15. 3. 1. Résistances des enroulements**

- Résistance de l'enroulement haute tension :

$$R_{HT} = [0.5 (456 + 346 - 38) \cdot (230^2 / 200^2)] \cdot 10^{-3} \quad R_{HT} = 0.505 \, \Omega.$$

- Résistance de l'enroulement moyenne tension :

$$R_{MT} = [0.5 (456 - 346 + 38) \cdot (230^2 / 200^2)] \cdot 10^{-3} \quad R_{MT} = 0.098 \, \Omega.$$

- Résistance de l'enroulement de réglage (en considérant qu'il est fait avec les mêmes conducteurs que l'enroulement HT) :

$$R_{ER} = \frac{R_{HT}}{n_H} \cdot n_R = \frac{0.505}{329} \cdot 45 \quad R_{ER} = 0.069 \, \Omega.$$

**V. 15. 3. 2. Résistances d'ondes des enroulements**

La résistance dépend de la forme de l'onde appliquée. Pour une onde triangulaire on retrouve

$$\text{la relation : } R_{\Delta} = \frac{1,0575 \cdot R}{\sqrt{\omega \cdot t_h}} = K_1 \cdot R \quad \text{où } K_1 = 4,22.$$

- Résistance d'onde de l'enroulement haute tension :

$$R_{\Delta HT} = \frac{1,0575 \cdot R_{HT}}{\sqrt{\omega \cdot t_h}} = K_1 \cdot R_{HT} = 4,22 \cdot 0,505 \quad R_{\Delta HT} = 2,131 \, \Omega.$$

- Résistance d'onde de l'enroulement moyenne tension :

$$R_{\Delta MT} = \frac{1,0575 \cdot R_{MT}}{\sqrt{\omega \cdot t_h}} = K_1 \cdot R_{MT} = 4,22 \cdot 0,098 \quad R_{\Delta MT} = 0,414 \, \Omega.$$

- Résistance d'onde  $R_{\Delta ER}$  de l'enroulement de réglage :

$$R_{\Delta ER} = K_1 \cdot R_{ER} = 4,22 \cdot 0,069 \quad R_{\Delta ER} = 0,291 \, \Omega.$$

- Résistance d'onde d'un élément de l'enroulement haute tension :

$$R_H = \frac{R_{\Delta HT}}{n} = \frac{2,131}{10} = 0,213 \, \Omega. \quad \underline{R_H = 0,213 \, \Omega.}$$

- Résistance d'onde d'un élément de l'enroulement moyenne tension :

$$R_M = \frac{R_{\Delta MT}}{n} = \frac{0,414}{10} = 0,041 \, \Omega. \quad \underline{R_M = 0,041 \, \Omega.}$$

- L'enroulement de réglage est modélisé par un seul élément. Par conséquent :

$$R_R = R_{\Delta ER} = 0,291 \, \Omega. \quad \underline{R_R = 0,291 \, \Omega.}$$

### V. 15. 3. 3. Calculs des réactances inductives

$$U_{ccH-M} = \frac{u_{ccH-M}}{100} \cdot U_{nHT} = \frac{10.2}{100} \cdot 230 = 23.46 \text{ kV}$$

$$U_{ccH-B} = \frac{u_{ccH-B}}{100} \cdot U_{nHT} = \frac{33.2}{100} \cdot 230 = 76.36 \text{ kV}$$

$$U_{ccM-B} = \frac{u_{ccM-B}}{100} \cdot U_{nMT} = \frac{21.2}{100} \cdot 121 = 25.65 \text{ kV}$$

$$X_{HT} = 0,5 (23.46 + 76.36 - 1.041 \cdot 25.65) \cdot 230 / 200$$

$$X_{HT} = 42.04 \ \Omega.$$

$$X_{HT} = (n_H/n_M)^2 \cdot X_{MT} = 1.041^2 \cdot X_{MT}$$

$$X_{MT} = 38.80 \ \Omega.$$

$$X_{HT} = (n_H/n_R)^2 \cdot X_R = 53.45 \cdot X_R$$

$$X_R = 0.786 \ \Omega.$$

- Inductances des enroulements

De l'expression  $X = L\omega = 2\pi \cdot f$ , on déduit :

$$L_{HT} = \frac{X_{HT}}{2\pi \cdot f} = \frac{42.04}{2\pi \cdot 50} = 0.139 \text{ H.}$$

$$L_{MT} = \frac{X_{MT}}{2\pi \cdot f} = \frac{38.80}{2\pi \cdot 50} = 0.124 \text{ H.}$$

$$L_R = \frac{X_R}{2\pi \cdot f} = \frac{0.786}{2\pi \cdot 50} = 0.0025 \text{ H.}$$

- Inductances associées au modèle

Inductances des éléments de l'enroulement HT :

$$\mathfrak{L}_{Hi} = \frac{L_{HT}}{n} = \frac{0.139}{10} = 0.0139 \text{ H.}$$

$$\mathfrak{L}_{Mi} = \frac{L_{MT}}{n} = \frac{0.124}{10} = 0.0124 \text{ H.}$$

$$\mathfrak{L}_R = \frac{L_R}{n} = \frac{0.0025}{1} = 0.0025 \text{ H.}$$

Cette inductance de l'élément  $i$ , résulte de son inductance propre  $L_H$ , et des inductances mutuelles  $M_{ij}$ , qu'il possède avec les autres éléments  $j$ , ( $j = 1 ; 10 ; j \neq i$ ) de l'enroulement HT auquel il appartient, ainsi que des inductances mutuelles avec les éléments  $k$  ( $k=1 ; 10$ ), des enroulements issus de la subdivision de l'enroulement MT, et de l'enroulement de réglage :

$$\mathfrak{L}_{Hi} = L_H + \sum M_{ij} + \sum M_{ik} + M_{iER}$$

$$\mathfrak{L}_{Hi} = L_{Hi} + \frac{\sum M_{ij}}{L_{Hi}} \cdot L_{Hi} + \frac{\sum M_{ik}}{L_{Hi}} \cdot L_{Hi} + \frac{M_{iER}}{L_{Hi}} \cdot L_{Hi}$$

$$\mathfrak{L}_{Hi} = \left(1 + \frac{\sum M_{ij}}{L_{Hi}} + \frac{\sum M_{ik}}{L_{Hi}} + \frac{M_{iER}}{L_{Hi}}\right) \cdot L_{Hi}$$

$$L_{Hi} = \frac{1}{1 + \frac{\sum M_{ij}}{L_{Hi}} + \frac{\sum M_{ik}}{L_{Hi}} + \frac{M_{iER}}{L_{Hi}}} \cdot \mathfrak{L}_{Hi}$$

Pour les éléments de l'enroulement moyenne tension :

$$L_{Mi} = \frac{1}{1 + \frac{\sum M_{ij}}{L_{Mi}} + \frac{\sum M_{ik}}{L_{Mi}} + \frac{M_{iER}}{L_{Mi}}} \cdot \mathfrak{L}_{Mi}$$

De même pour l'enroulement de réglage :

$$L_R = \frac{1}{1 + \frac{\sum M_{ij}}{L_R} + \frac{\sum M_{ik}}{L_R}} \cdot \mathfrak{L}_R$$

Ces inductances ne seront pas calculées pour l'autotransformateur, sachant que le logiciel P-SPICE utilise les coefficients de mutualité déterminés ci-dessous.

- Détermination des coefficients de mutualité  $\sigma_{Xij} = \frac{M_{Xij}}{L_X}$

Le coefficient de mutualité  $\frac{M_{Xij}}{L_X}$  de l'élément  $i$  de l'enroulement X avec un autre élément  $j$  appartenant ou n'appartenant pas à X, est déterminé graphiquement à partir de la courbe représentative de ce coefficient en fonction du rapport  $\frac{a_{ij}}{b} : \frac{M_{ij}}{L} = f\left(\frac{a_{ij}}{b}\right)$ . Les graphes relatifs à cette relation sont donnés au chapitre V.

$a_{ij}$ , on le rappelle, est la distance séparant les deux éléments.  $a$  étant la distance séparant 2 éléments consécutifs,  $a = \frac{l}{10} = 164.5 \text{ mm}$ .  $l$  est la longueur de l'enroulement. On peut écrire dans ce cas :

$$a_{ij} = |j-i| \cdot a = |j-i| \cdot \frac{l_{enr}}{n} = |j-i| \cdot \frac{1645}{10} = |j-i| \cdot 164.5 \text{ mm.}$$

$b$  est la distance moyenne, des éléments considérés au noyau :

$$b = r_{moy} - r_{noy}$$

$r_{moy}$  est le rayon moyen de l'enroulement,  $r_{noy}$  le rayon du noyau.

Pour l'enroulement HT :

$$b = b_H = \frac{\frac{d_{He} + d_{Hi}}{2} - d_{noy}}{2} \qquad b_H = 370 \text{ mm.}$$

Pour l'enroulement MT :

$$b_M = \frac{\frac{d_{Me} + d_{Mi}}{2} - d_{noy}}{2} \qquad b_M = 133 \text{ mm.}$$

Pour l'enroulement de réglage :

$$b_R = \frac{\frac{d_R}{2} - d_{noy}}{2} \qquad b_R = 530 \text{ mm.}$$

Si les deux éléments n'appartiennent pas au même enroulement, on fait intervenir la distance  $b = \sqrt{b_i b_j}$ , où  $b_i$  et  $b_j$  sont les distances moyennes respectives des éléments  $i$  et  $j$  au noyau.

La disposition géométrique des enroulements de l'autotransformateur est la même que celle du transformateur, avec en plus l'enroulement tertiaire placé le plus proche du noyau (figureV- 7).

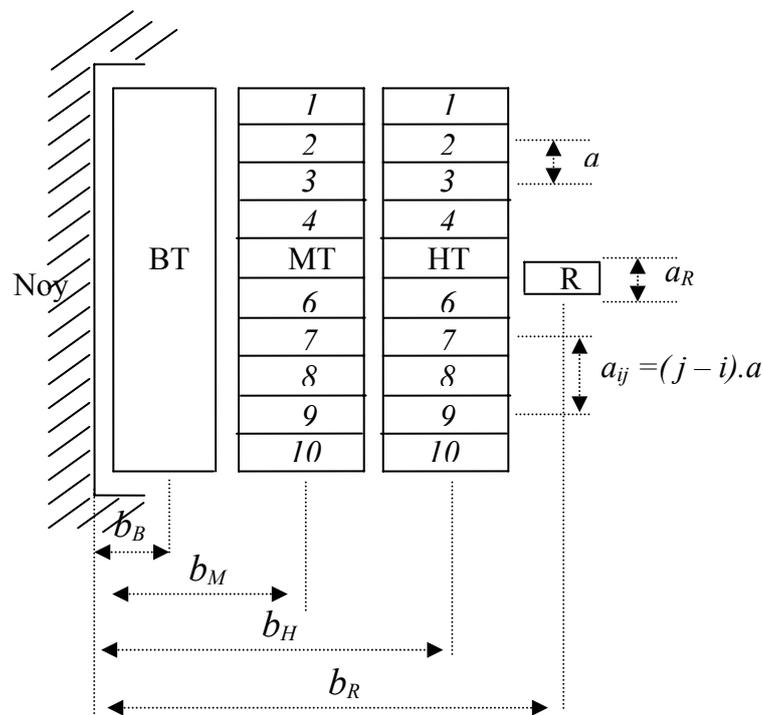


Fig. (V- 7) : Disposition des enroulements de l'autotransformateur avec leur subdivision en éléments.

## Calcul des coefficients d'inductances mutuelles entre éléments de l'enroulement HT

| Entre éléments | $a_{ij}$ (mm) | $b_H$ (mm) | $\frac{a_{ij}}{b_H}$ | $\sigma_{H1j} = \frac{M_{H1j}}{L_H}$ |
|----------------|---------------|------------|----------------------|--------------------------------------|
| 1 et 2         | 164.5         | 370        | 0.44                 | 0.58                                 |
| 1 et 3         | 329           |            | 0.89                 | 0.41                                 |
| 1 et 4         | 493.5         |            | 1.33                 | 0.25                                 |
| 1 et 5         | 658           |            | 1.78                 | 0.17                                 |
| 1 et 6         | 822.5         |            | 2.22                 | 0.11                                 |
| 1 et 7         | 987           |            | 2.67                 | 0.076                                |
| 1 et 8         | 1151.5        |            | 3.11                 | 0.054                                |
| 1 et 9         | 1316          |            | 3.56                 | 0.032                                |
| 1 et 10        | 1480.5        |            | 4.00                 | 0.022                                |

Tableau 1

## Calcul des coefficients d'inductances mutuelles entre éléments de l'enroulement MT

| Entre éléments | $a_{ij}$ (mm) | $b_M$ (mm) | $\frac{a_{ij}}{b_M}$ | $\sigma_{M1j} = \frac{M_{M1j}}{L_M}$ |
|----------------|---------------|------------|----------------------|--------------------------------------|
| 1 et 2         | 164.5         | 133        | 1.24                 | 0.29                                 |
| 1 et 3         | 329           |            | 2.47                 | 0.098                                |
| 1 et 4         | 493.5         |            | 3.71                 | 0.03                                 |
| 1 et 5         | 658           |            | 4.95                 | 0.01                                 |
| 1 et 6         | 822.5         |            | 6.18                 | 0.002                                |
| 1 et 7         | 987           |            | 7.42                 | 0.0016                               |
| 1 et 8         | 1151.5        |            | 8.66                 | 0.00039                              |
| 1 et 9         | 1316          |            | 9.89                 | 0.00013                              |
| 1 et 10        | 1480.5        |            | 11.13                | 0.000043                             |

Tableau 2

## Calcul des coefficients de mutualités entre éléments HT et éléments MT

| Entre éléments | $a$ (mm) | $b_H$ (mm) | $b_M$ (mm) | $\frac{a}{\sqrt{b_{HT} \cdot b_{MT}}}$ | $\sigma_{1j} = \frac{M_{1j}}{M_{0HM}}$ | $M_{1j} \text{ HM}$ |
|----------------|----------|------------|------------|--|--|---------------------|
| 1 et 1         | 0        | 370        | 133        | 0                                      | 1                                      | 0.00750             |
| 1 et 2         | 164.5    |            |            | 0.74                                   | 0.46                                   | 0.00345             |
| 1 et 3         | 329      |            |            | 1.48                                   | 0.24                                   | 0.00180             |
| 1 et 4         | 493.5    |            |            | 2.22                                   | 0.12                                   | 0.00090             |
| 1 et 5         | 658      |            |            | 2.97                                   | 0.054                                  | 0.000405            |
| 1 et 6         | 822.5    |            |            | 3.71                                   | 0.025                                  | 0.000186            |
| 1 et 7         | 987      |            |            | 4.45                                   | 0.017                                  | 0.000126            |
| 1 et 8         | 1151.5   |            |            | 5.19                                   | 0.0090                                 | 0.000068            |
| 1 et 9         | 1316     |            |            | 5.93                                   | 0.0040                                 | 0.000030            |
| 1 et 10        | 1480.5   |            |            | 5.67                                   | 0.0031                                 | 0.000023            |

Tableau 3

**Calcul des coefficients de mutualités entre éléments HT et élément de réglage**

| Entre éléments | $a_{H-R}$<br>(mm) | $b_H$<br>(mm) | $b_R$<br>(mm) | $\frac{a}{\sqrt{b_{HT} \cdot b_{MT}}}$ | $\sigma_{iR} = \frac{M_{iR}}{M_{0HR}}$ | $M_{iR HR}$ |
|----------------|-------------------|---------------|---------------|--|--|-------------|
| 1 et Régl.     | 740.25            | 370           | 530           | 1.67                                   | 0.21                                   | 0.005374    |
| 2 et Régl.     | 575.75            |               |               | 1.30                                   | 0.29                                   | 0.007904    |
| 3 et Régl.     | 411.25            |               |               | 0.93                                   | 0.43                                   | 0.012961    |
| 4 et Régl.     | 246.75            |               |               | 0.56                                   | 0.61                                   | 0.018335    |
| 5 et Régl.     | 82.25             |               |               | 0.19                                   | 0.84                                   | 0.031612    |
| 6 et Régl.     | 82.25             |               |               | 0.19                                   | 0.84                                   | 0.031612    |
| 7 et Régl.     | 246.75            |               |               | 0.56                                   | 0.61                                   | 0.018335    |
| 8 et Régl.     | 411.25            |               |               | 0.93                                   | 0.43                                   | 0.012961    |
| 9 et Régl.     | 575.75            |               |               | 1.30                                   | 0.29                                   | 0.007904    |
| 10 et Régl.    | 740.25            |               |               | 1.67                                   | 0.21                                   | 0.005374    |

Tableau 4

**Calcul des coefficients de mutualités entre éléments MT et élément de réglage**

| Entre éléments | $a_{M-R}$ | $b_M$ | $b_R$ | $\frac{a_{M-R}}{\sqrt{b_M \cdot b_R}}$ | $\sigma_{iR} = \frac{M_{iR}}{M_{0MR}}$ | $M_{iR MR}$ |
|----------------|-----------|-------|-------|--|--|-------------|
| 1 et Régl.     | 740.25    | 133   | 530   | 2.79                                   | 0.071                                  | 0.000161    |
| 2 et Régl.     | 575.75    |       |       | 2.17                                   | 0.130                                  | 0.000483    |
| 3 et Régl.     | 411.25    |       |       | 1.55                                   | 0.230                                  | 0.001577    |
| 4 et Régl.     | 246.75    |       |       | 0.92                                   | 0.530                                  | 0.004666    |
| 5 et Régl.     | 2.25      |       |       | 0.31                                   | 0.770                                  | 0.016090    |
| 6 et Régl.     | 82.25     |       |       | 0.31                                   | 0.770                                  | 0.016090    |
| 7 et Régl.     | 246.75    |       |       | 0.92                                   | 0.530                                  | 0.004666    |
| 8 et Régl.     | 411.25    |       |       | 1.55                                   | 0.230                                  | 0.001577    |
| 9 et Régl.     | 575.75    |       |       | 2.17                                   | 0.130                                  | 0.000483    |
| 10 et Régl.    | 740.25    |       |       | 2.79                                   | 0.071                                  | 0.000161    |

Tableau 5

Le calcul des inductances mutuelles entre les éléments de l'enroulement HT et de l'enroulement MT, entre les éléments de l'enroulement HT et de réglage, entre les éléments de l'enroulement MT et de réglage, se font respectivement en utilisant les coefficients multiplicatifs suivants :

$$M_{0HM} = 4\pi \sqrt{r_{HTmoy} \cdot r_{MTmoy}} \cdot \ln \frac{b_{HT} + b_{MT}}{b_{HT} - b_{MT}} \cdot 10^{-6} \qquad M_{0HM} = 0.007500$$

$$M_{0HR} = 4\pi \sqrt{r_R \cdot r_{HTmoy}} \cdot \ln \frac{b_R + b_{HT}}{b_R - b_{HT}} \cdot 10^{-6} \qquad M_{0HR} = 0.031612$$

$$M_{0MR} = 4\pi \sqrt{r_R \cdot r_{MTmoy}} \cdot \ln \frac{b_R + b_{MT}}{b_R - b_{MT}} \cdot 10^{-6} \qquad M_{0MR} = 0.016090$$

Après le calcul de tous les coefficients de mutualités, on précise les valeurs des inductances propres des éléments des enroulements HT et MT, comme dans le transformateur en cas de besoin :

$$L_{Hi} = \frac{1}{1 + \frac{\sum M_{ij}}{L_{Hi}} + \frac{\sum M_{ik}}{M_{0HM}} + \frac{M_{iER}}{M_{0HR}}} \cdot \mathfrak{L}_{Hi} = \frac{1}{1 + 1.804 + 1.757 + 0.176} \cdot 0.0139$$

$$L_H = 2934 \mu H.$$

$$L_{Mi} = \frac{1}{1 + \frac{\sum M_{ij}}{L_{Mi}} + \frac{\sum M_{ik}}{M_{0HM}} + \frac{M_{iER}}{M_{0MR}}} \cdot \mathfrak{L}_{Mi} = \frac{1}{1 + 0.432 + 1.757 + 0.346} \cdot 0.0124$$

$$L_M = 3508 \mu H.$$

$$L_R = \frac{1}{1 + \frac{\sum M_{ij}}{M_{0HR}} + \frac{\sum M_{ik}}{L_{0MR}}} \cdot \mathfrak{L}_R = \frac{1}{1 + 4.76 + 3.46} \cdot 0.0025$$

$$L_R = 271 \mu H.$$

### V. 15. 3. 4. Calcul des capacités transversales

Le calcul des capacités de l'autotransformateur est analogue à celui du transformateur étant donnée la même disposition géométrique des enroulements à la seule différence qu'il y a quatre enroulements au lieu de trois.

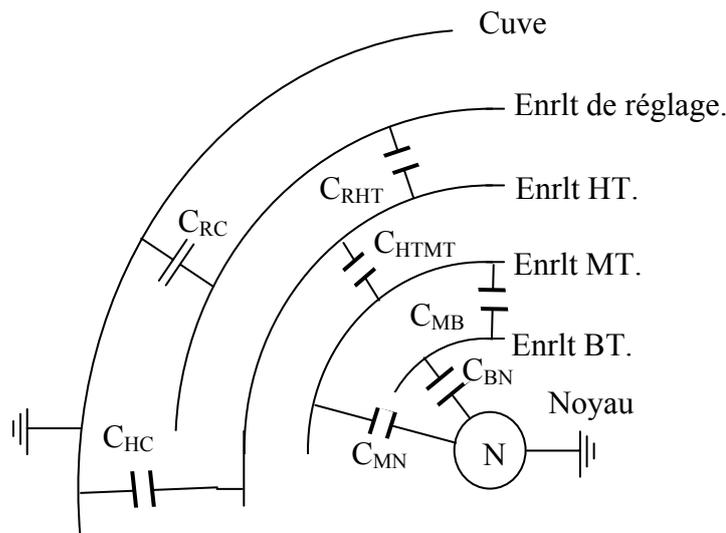


Fig. V-8 : Schéma de base pour la détermination des capacités de fuites dans l'autotransformateur.

- Capacité transversale  $C_{RC}$ , entre l'enroulement de réglage R et la cuve

Cette grandeur sera calculée selon la formule donnant la capacité d'un condensateur cylindrique vu l'importance de l'intervalle séparant les armatures ;

$$C_{RC} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \pi l_{enr} \frac{d_c + d_R}{d_c - d_R}$$

$$C_{RC} = 8.854 \cdot 10^{-12} \cdot 3.3 \cdot \pi \cdot 1645 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{3200 + 2160}{3200 - 2160}$$

$$C_{RC} = 778 pF.$$

- Capacité transversale  $C_{RHT}$ , entre l'enroulement HT et l'enroulement de réglage R

$$C_{RHT} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \pi l_{enr} \frac{d_R + d_{He}}{d_R - d_{He}}$$

$$C_{RHT} = 8.854 \cdot 10^{-12} \cdot 3.3 \cdot \pi \cdot 1645 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{2160 + 2055}{2160 - 2055}$$

$$C_{RHT} = 6062 pF.$$

- Capacité transversale  $C_{HC}$ , entre l'enroulement HT et la cuve

$$C_{HC} = \frac{C_{RHT} \cdot C_{RC}}{C_{RHT} + C_{RC}} \quad C_{HC} = \frac{6062 \cdot 778}{6062 + 778} \quad C_{HC} = 690 pF.$$

- Capacité  $C_{HTMT}$ , entre l'enroulement HT et l'enroulement MT

$$C_{HTMT} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \pi l_{enr} \frac{d_{Hi} + d_{Me}}{d_{Hi} - d_{Me}}$$

$$C_{HTMT} = 8.854 \cdot 10^{-12} \cdot 3.3 \cdot \pi \cdot 1645 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1624 + 1548}{1624 - 1548} \quad C_{HTMT} = 6302 pF.$$

- Capacité transversale  $C_{MN}$ , entre l'enroulement MT et le noyau N

$$C_{MN} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \pi l_{enr} \frac{d_{Mi} + d_N}{d_{Mi} - d_N}$$

$$C_{MN} = 8.854 \cdot 10^{-12} \cdot 3.3 \cdot \pi \cdot 1645 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1184 + 1100}{1184 - 1100} \quad C_{MN} = 4106 pF.$$

- Capacité transversale  $C_{MC}$ , entre l'enroulement MT et la cuve

$$C_{MC} = C_{HC} // C_{HTMT} = 690 // 6302 \quad C_{MC} = 622 pF.$$

- Capacité transversale  $C_{MT}$  de l'enroulement MT

$$C_{MT} = C_{MC} + C_{MN} \quad C_{MT} = 4728 \text{ pF.}$$

- Capacité transversale  $C_{HN}$ , entre l'enroulement HT et le noyau

$$C_{HN} = \frac{C_{HTMT} C_{MN}}{C_{HTMT} + C_{MN}} \quad C_{HN} = \frac{6302 \cdot 4106}{6302 + 4106} \quad C_{HN} = 2486 \text{ pF.}$$

- Capacité transversale  $C_{HT}$  de l'enroulement HT

$$C_{HT} = C_{HC} + C_{HN} \quad C_{HT} = 690 + 2486 \quad C_{HT} = 3176 \text{ pF.}$$

- Capacité transversale relative à un élément de l'enroulement HT

$$C_H = \frac{C_{HT}}{n+1} \quad C_H = \frac{3176}{10+1} \quad C_H = 289 \text{ pF.}$$

- Capacité transversale  $C_R$ , entre l'élément de l'enroulement de réglage et la terre

Dans le modèle, l'enroulement de réglage est représenté par un seul élément, par conséquent :

$$C_R = \frac{C_{RC}}{n+1} \quad C_R = \frac{778}{1+1} \quad C_R = 389 \text{ pF.}$$

- Capacité  $C_{HR}$ , entre l'élément de l'enroulement de réglage et l'enroulement HT

$$C_{HR} = \frac{C_{RHT}}{n+1} \quad C_{HR} = \frac{6062}{1+1} \quad C_{HR} = 3031 \text{ pF.}$$

- Capacités  $C_{HM}$ , entre éléments des enroulements HT et MT

$$C_{HM} = \frac{C_{HTMT}}{n+1} \quad C_{HM} = \frac{6302}{10+1} \quad C_{HM} = 573 \text{ pF.}$$

- Capacité transversale  $C_M$ , relative à un élément de l'enroulement MT

$$C_M = \frac{C_{MT}}{n+1} \quad C_M = \frac{4728}{10+1} \quad C_M = 430 \text{ pF.}$$

### V. 15. 3. 5. Calcul des capacités longitudinales

Pour calculer les capacités longitudinales il faut d'abord avoir la valeur de  $\alpha$  à partir de la répartition initiale de la tension fournie par le constructeur qui est résumée dans le tableau suivant et donnée approximativement par l'expression mathématique :  $u = U_0 e^{-\alpha x}$ .

Tableau 3

| N° du nœud | U (%) |
|------------|-------|
| A-0        | 100   |
| 2-0        | 82.8  |
| 4-0        | 71.6  |
| 6-0        | 60.3  |
| 8-0        | 50.2  |
| 10-0       | 41.6  |
| 12-0       | 35.0  |
| 14-0       | 29.4  |
| 16-0       | 24.1  |
| 18-0       | 19.8  |
| 20-0       | 15.4  |
| 22-0       | 14.8  |
| 24-0       | 14.8  |
| 26-0       | 14.4  |
| 28-0       | 14.0  |
| 30-0       | 11.5  |

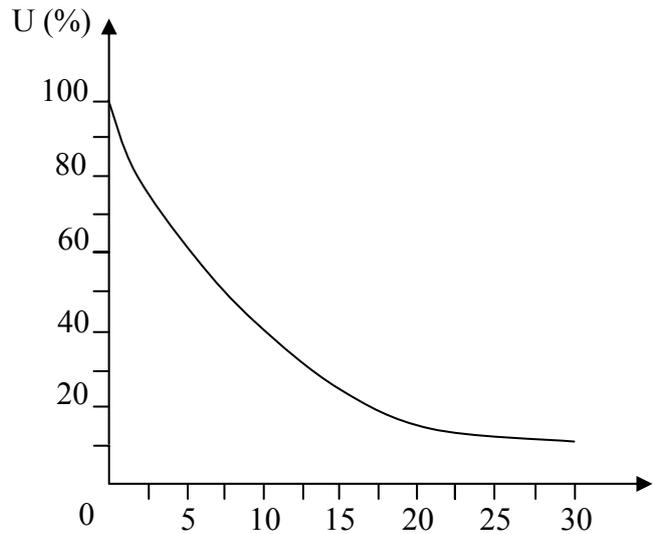


Fig. (V-8) : Répartition initiale de la tension fournie par le constructeur.

La valeur moyenne de  $\alpha$  est égale à 2.63.

- Capacité longitudinale de l'enroulement HT

$$\alpha^2 K_{HT} = C_{HT}$$

$$K_{HT} = C_{HT} / \alpha^2 \quad K_{HT} = 3176 / (2.63)^2 \quad K_{HT} = 459 \text{ pF.}$$

- Capacité longitudinale de l'enroulement MT

$$K_{MT} = C_{MT} / \alpha^2 \quad K_{MT} = 4728 / (2.63)^2 \quad K_{MT} = 683.5 \text{ pF.}$$

- Capacité longitudinale de l'enroulement de réglage

$$K_{RG} = C_{RC} + C_{RHT} / \alpha^2 \quad K_{RG} = 778 + 6062 / (2.63)^2 \quad K_{RG} = 989 \text{ pF.}$$

De ces trois derniers résultats, on déduit les valeurs de capacités longitudinales associées au modèle de l'autotransformateur.

$$K_H = 10 K_{HT}$$

$$K_H = 4590 \text{ pF.}$$

$$K_M = 10 K_{MT}$$

$$K_M = 6835 \text{ pF.}$$

$$K_R = K_{RG}$$

$$K_R = 989 \text{ pF.}$$

## Introduction

Les résultats de la simulation permettent de visualiser les tensions et les courants aux différents nœuds des modèles (fig. V-1) et (fig. V-2). On donnera les principaux graphes de la tension, à savoir aux entrées des enroulements HT (V(3)), MT (V(27)) au milieu des enroulements HT (V(13)) et MT (V(37)), à leurs sorties (V(23)) (V(47)) et aux extrémités des enroulements de réglage (V(24) et V(26)). Une attention est accordée à ces deux dernières tensions pour décider s'il est nécessaire ou non de protéger particulièrement l'enroulement de réglage, une fois que le transformateur et l'autotransformateur sont protégés aux entrées HT et MT.

### VI. 1. Résultats de la simulation pour le transformateur.

#### VI. 1. 1. Enroulement de réglage utilisé, protections désactivées.

Il n'y a aucun parafoudre de protection pour le transformateur. L'enroulement de réglage est inséré avec l'enroulement HT.

##### VI. 1. 1. 1. Tensions aux différents nœuds lorsque le neutre est mis à la terre.

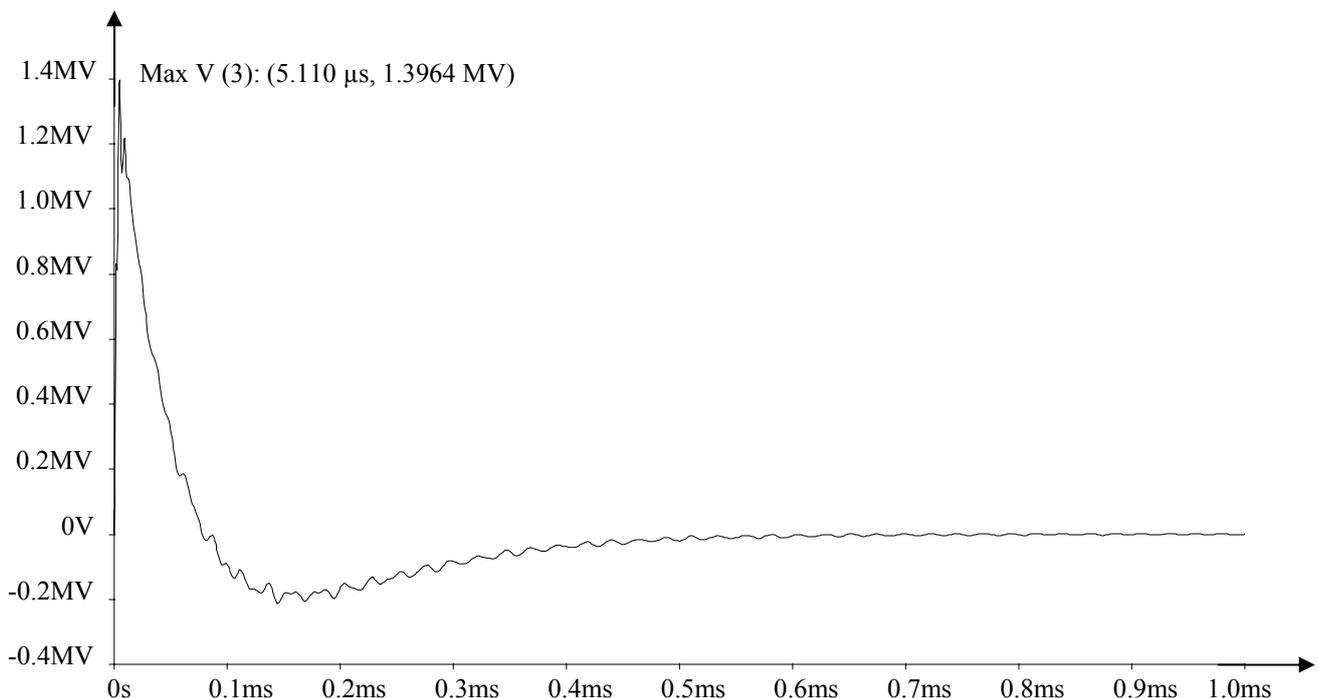
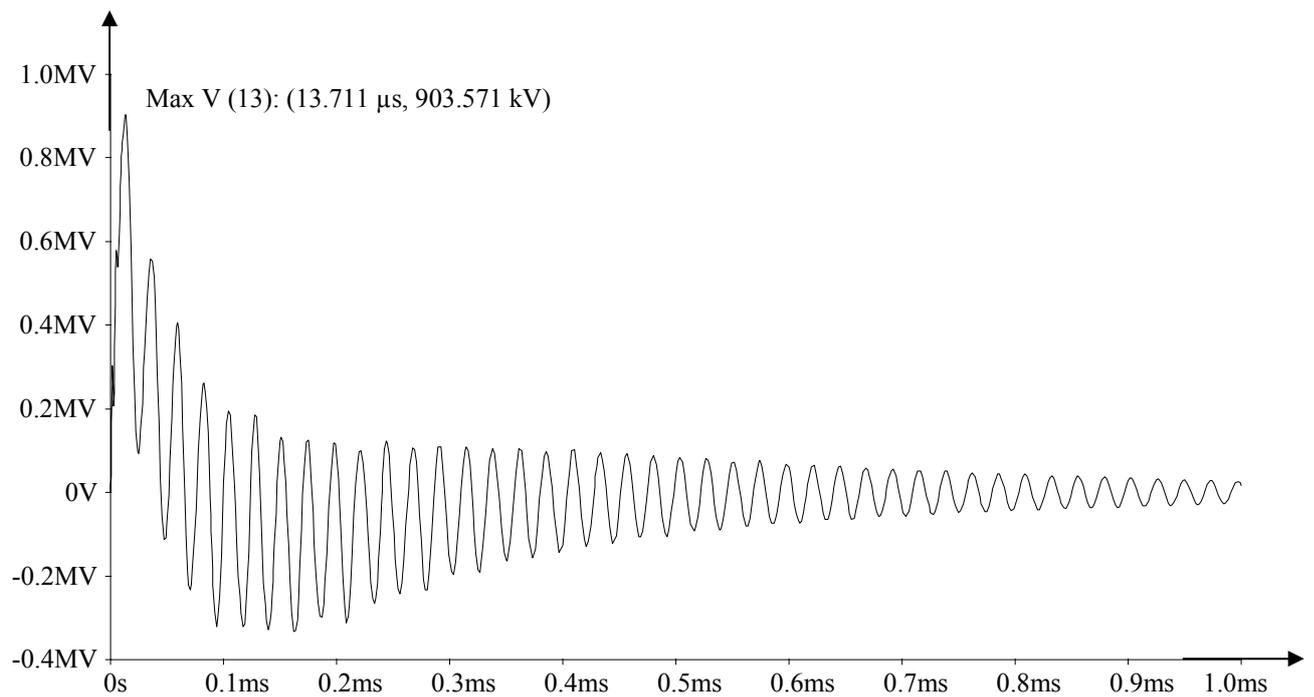
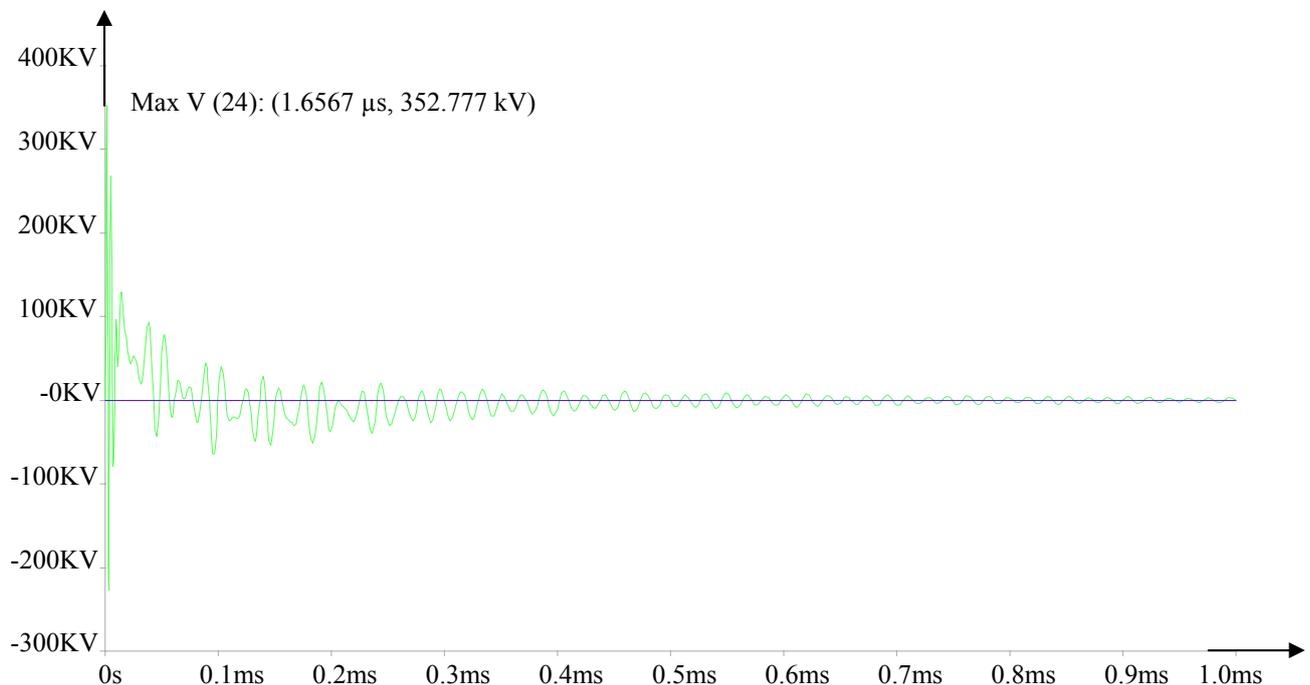


Fig. VI.1: Tension V(3) sur les premières spires, à l'entrée de l'enroulement HT. Neutre à la terre.

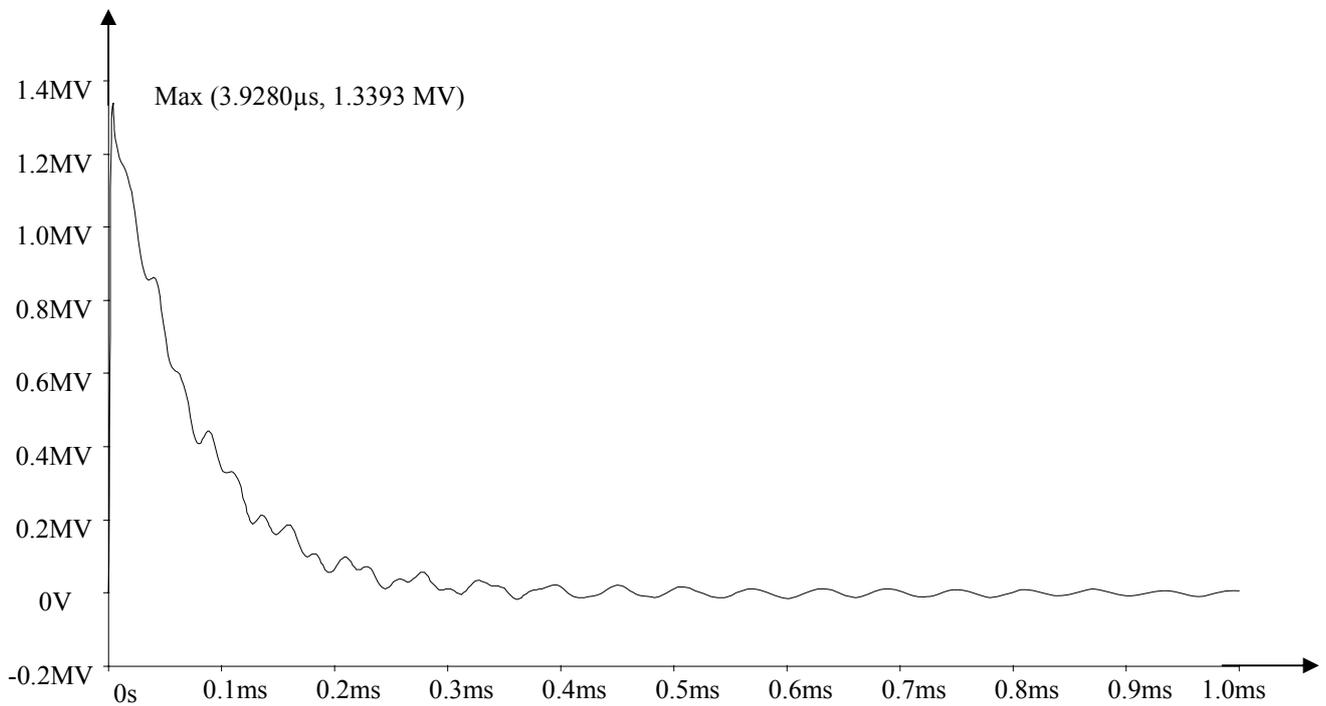
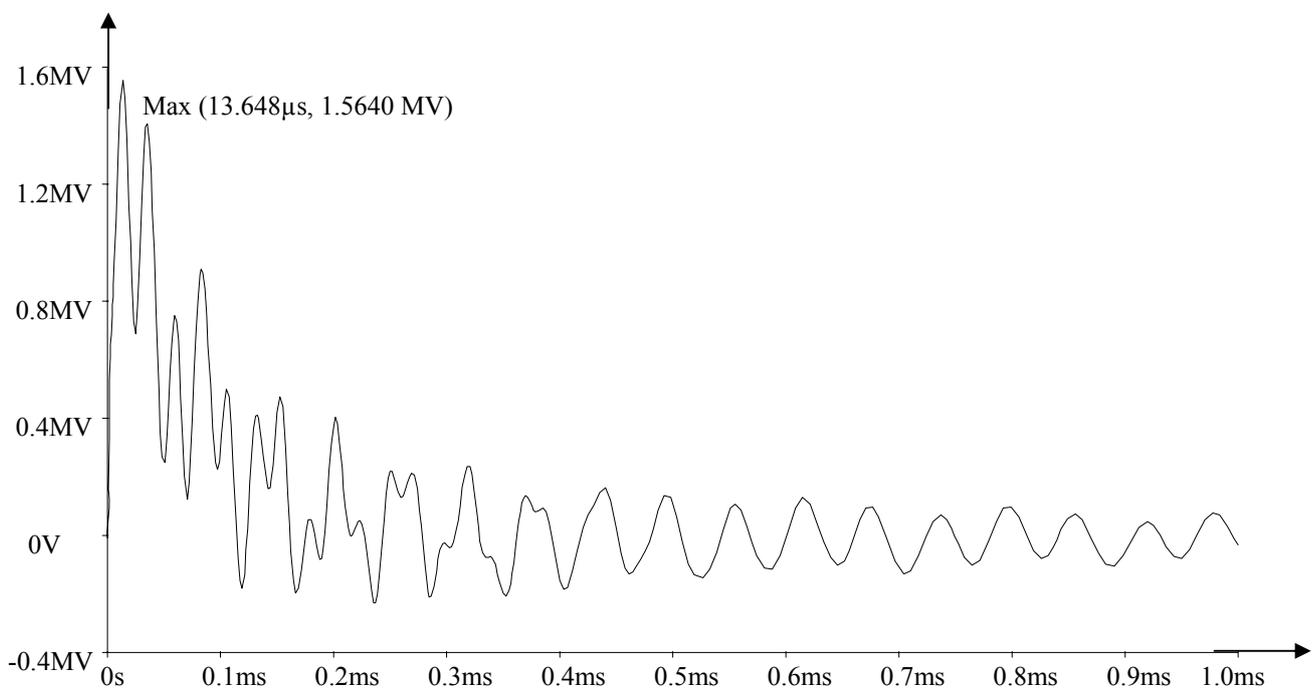


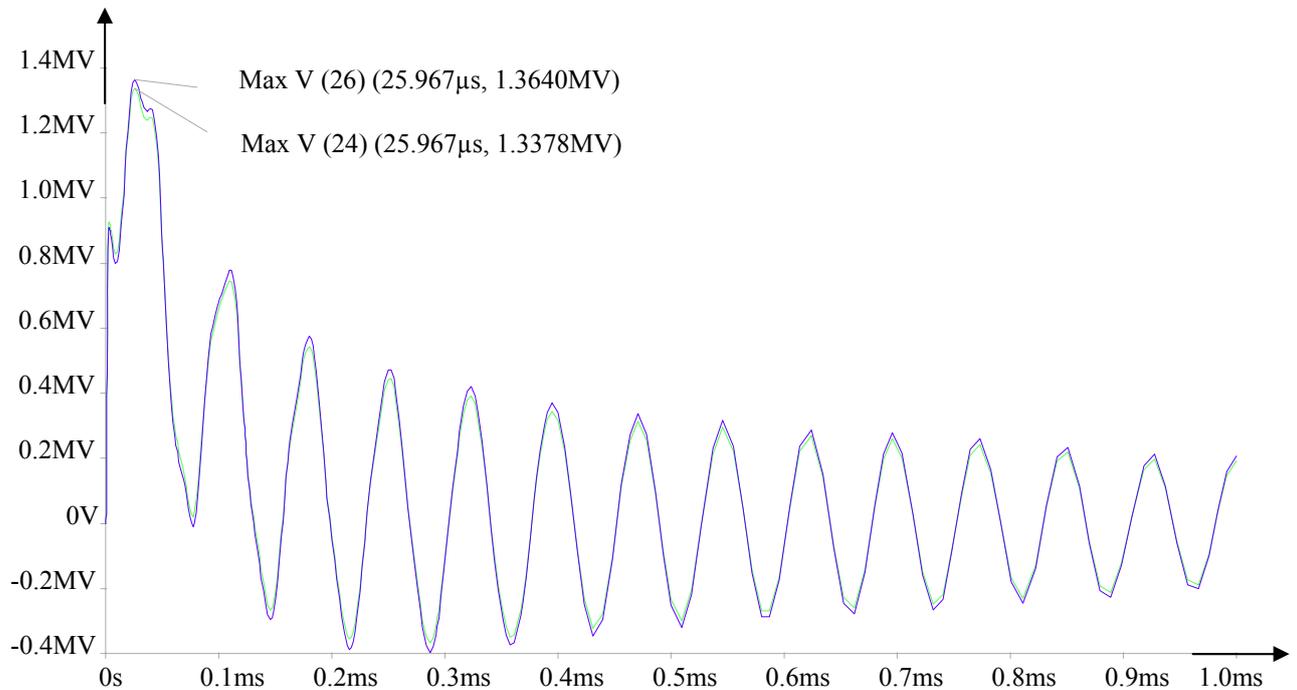
**Fig. VI.2: Tension V(13) sur les spires, au milieu de l'enroulement. Neutre à la terre.**



**Fig. VI.3: Tensions V(24) et V(26) à l'entrée et à la fin de l'enroulement de réglage. Neutre à la terre.**

L'enroulement de réglage, lorsqu'il est utilisé, avec neutre relié à la terre, est soumis à une tension dangereuse, d'après les tensions V(26) (nulle) et V(24) à ses extrémités. La contrainte transversale qui est la même dans ce cas, présente le même danger (maximum de 352.777 kV).

**VI. 1. 1. 2. Tensions aux différents nœuds de l'enroulement avec neutre isolé de la terre****Fig. VI.4 : Tension V(3) lorsque le neutre est isolé de la terre.****Fig. VI.5: Tension V(13) lorsque le neutre est isolé de la terre.**



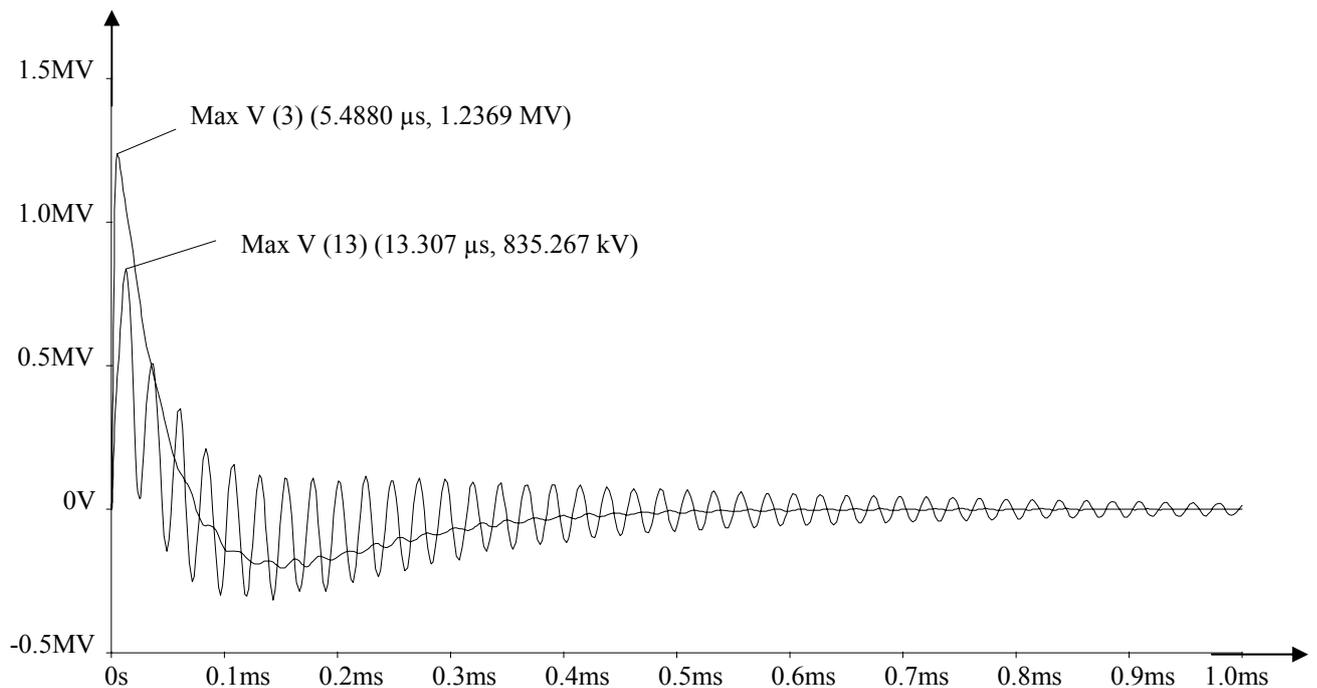
**Fig. VI.6: Tensions V(24) et V(26) à l'entrée et à la sortie de l'enroulement de réglage. Neutre isolé.**

Lorsque le neutre est isolé, les amplitudes des oscillations sont plus grandes aux premiers instants, le long de l'enroulement que dans le cas d'un neutre à la terre. Elles sont du même ordre de grandeurs aux premiers instants, le long de l'enroulement, contrairement au cas précédent où les amplitudes diminuent. Cette remarque fait penser aux répartitions initiales respectives, de la tension le long de l'enroulement, avec neutre à la terre ou isolé de la terre.

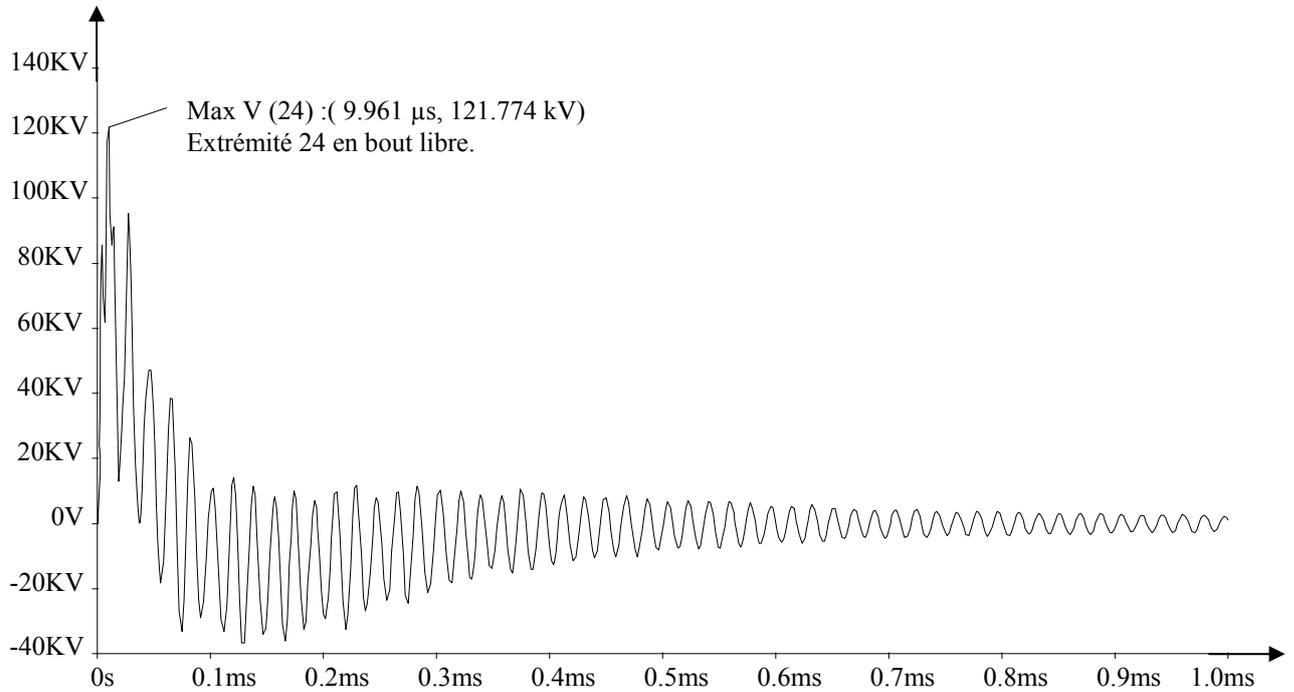
### VI. 1. 2. L'enroulement de réglage n'est pas utilisé, protections désactivées

Dans la simulation, l'enroulement de réglage n'est pas utilisé si l'interrupteur K est fermé sur b. Le neutre à la terre consiste à fermer  $K_3$  en faisant  $R_N \approx 0$ . Si  $RSR \approx 0$  et  $RAR$  infinie, l'extrémité 24 de l'enroulement de réglage est en bout libre (fig. V-1).

#### VI. 1. 2. 1. Tensions aux différents nœuds de l'enroulement avec neutre mis à la terre



**Fig. VI.7: Tensions V(3) et V(13), enroulement de réglage non inséré, neutre à la terre.**



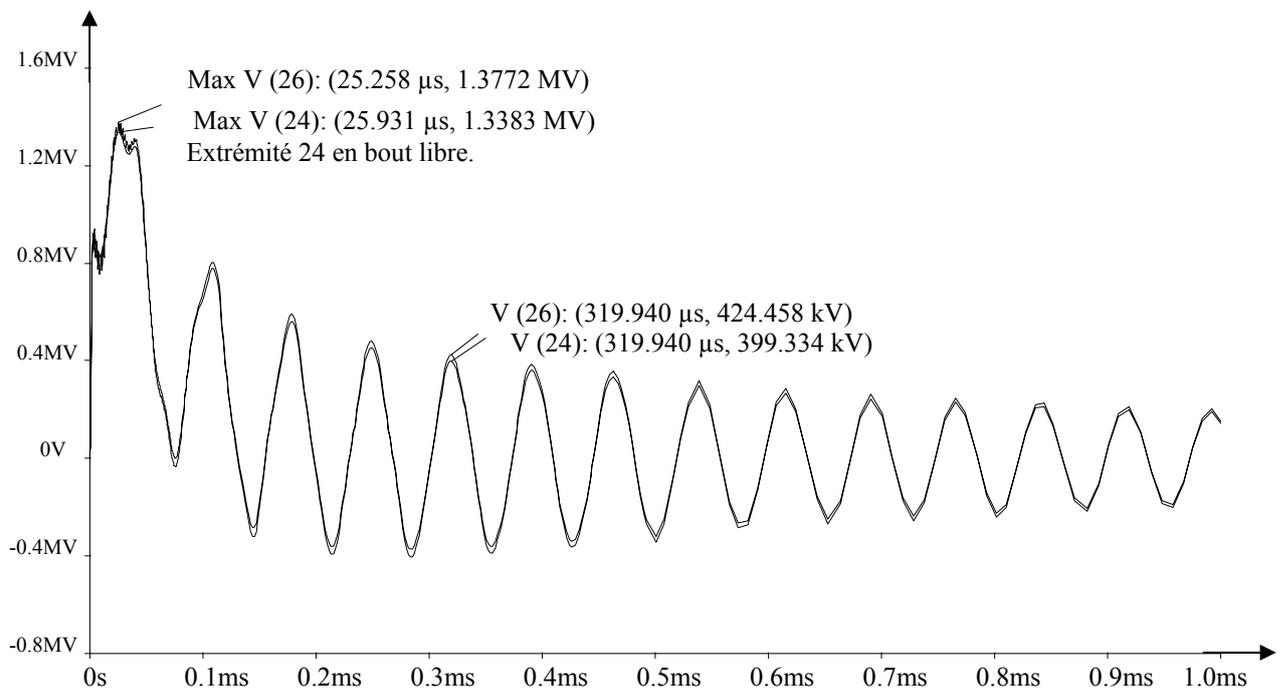
**Fig. VI.8: Tension V(24) au bout libre de l'enroulement de réglage, lorsqu'il n'est pas utilisé. Neutre à la terre.**

Les valeurs de la tension V(24) à l'extrémité libre de l'enroulement de réglage, témoignent sans doute, du phénomène de réflexion auquel on pouvait s'attendre, sur une extrémité libre (l'onde rencontre une impédance infinie).

La tension au nœud 26 est pratiquement nulle (potentiel de terre dans ce cas). Elle dépend de la valeur qu'on donne à  $R_N$ . La tension au nœud 23 ne vaut guère plus, si la résistance RSR intercalée entre les deux, venait à prendre la valeur strictement nulle.

Il est clair qu'avec les valeurs des tensions V (3), V (13), V (23), V (24), V (26)...on peut déduire des différences de tensions importantes, soient des gradients de tension importants, le long de l'enroulement, d'où des contraintes longitudinales sévères sur l'enroulement HT et particulièrement sur l'enroulement de réglage soumis à plus de 352 kV (fig.3) et plus de 121 kV (fig.8) entre ses extrémités, aux premiers instants, selon qu'il est utilisé ou non, avec neutre mis à la terre .

### VI. 1. 2. 2. Tensions aux différents nœuds de l'enroulement avec neutre isolé de la terre



**Fig. VI.9: Tensions V(24) et V(26) aux sorties des enroulements HT et de réglage; neutre isolé de la terre.**

Au nœud 24 en bout libre, la tension est élevée. Les oscillations aux premiers instants ont de grandes amplitudes. La protection est indispensable.

### VI. 1. 3. L'enroulement de réglage est utilisé, protection de l'enroulement HT activée.

Un parafoudre est placé à l'entrée de l'enroulement HT.

#### VI. 1. 3. 1. Tensions aux différents nœuds de l'enroulement avec neutre mis à la terre

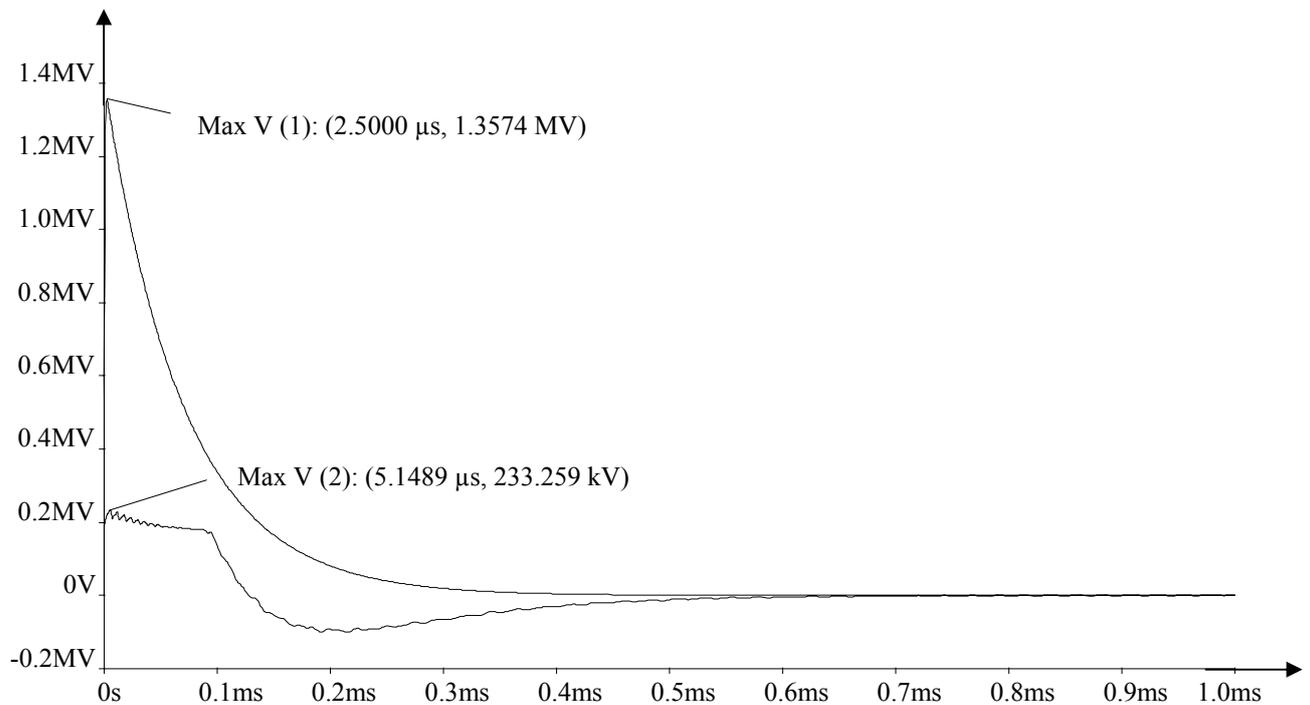


Fig. VI.10 : Tensions V(1) et V(2), avec un parafoudre à l'entrée HT (nœud 2) et neutre relié à la terre.

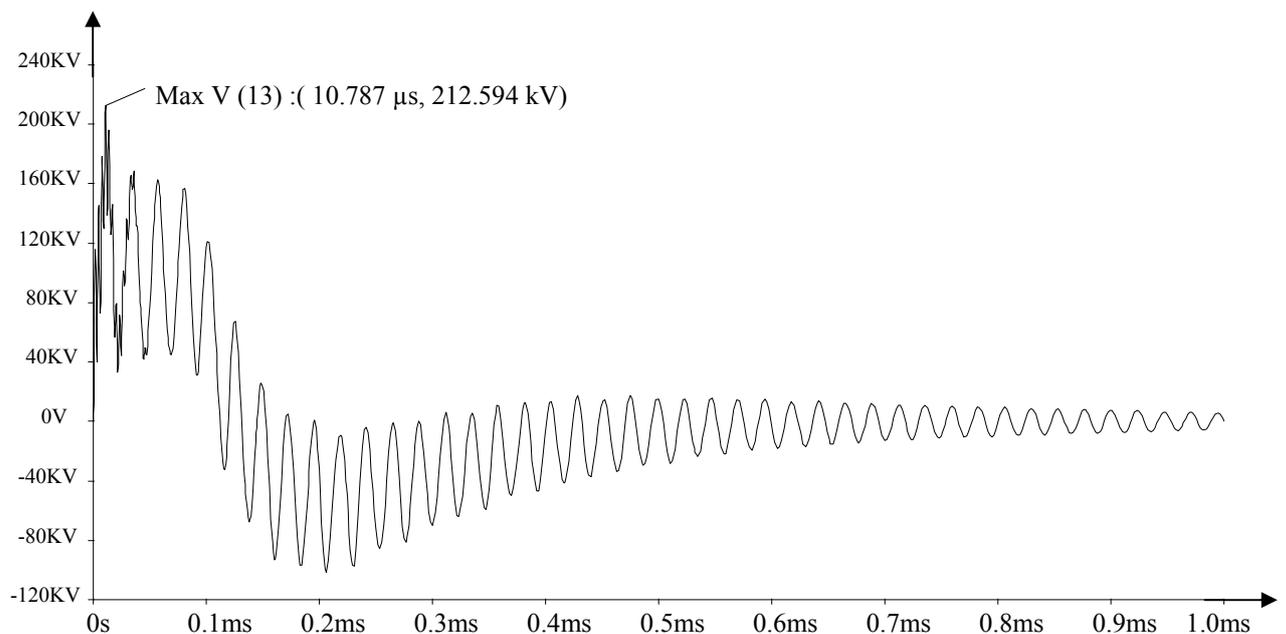
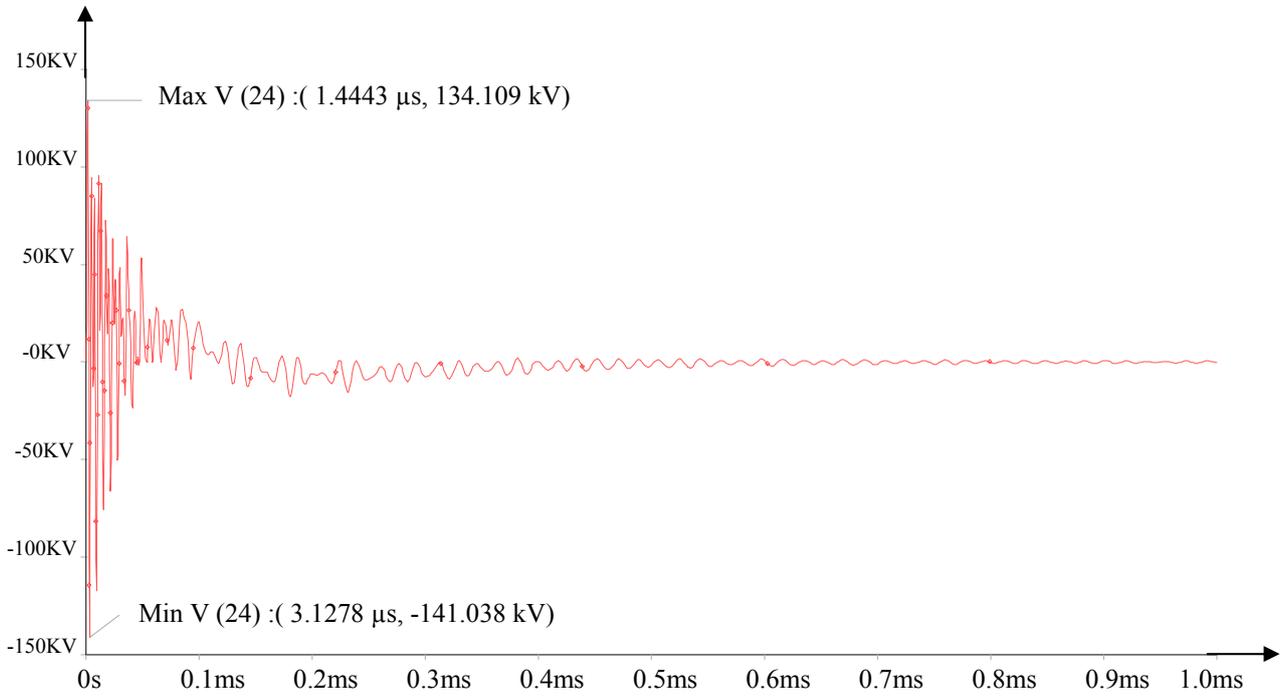


Fig. VI.11: Tension V(13) avec un parafoudre à l'entrée HT et neutre relié à la terre.



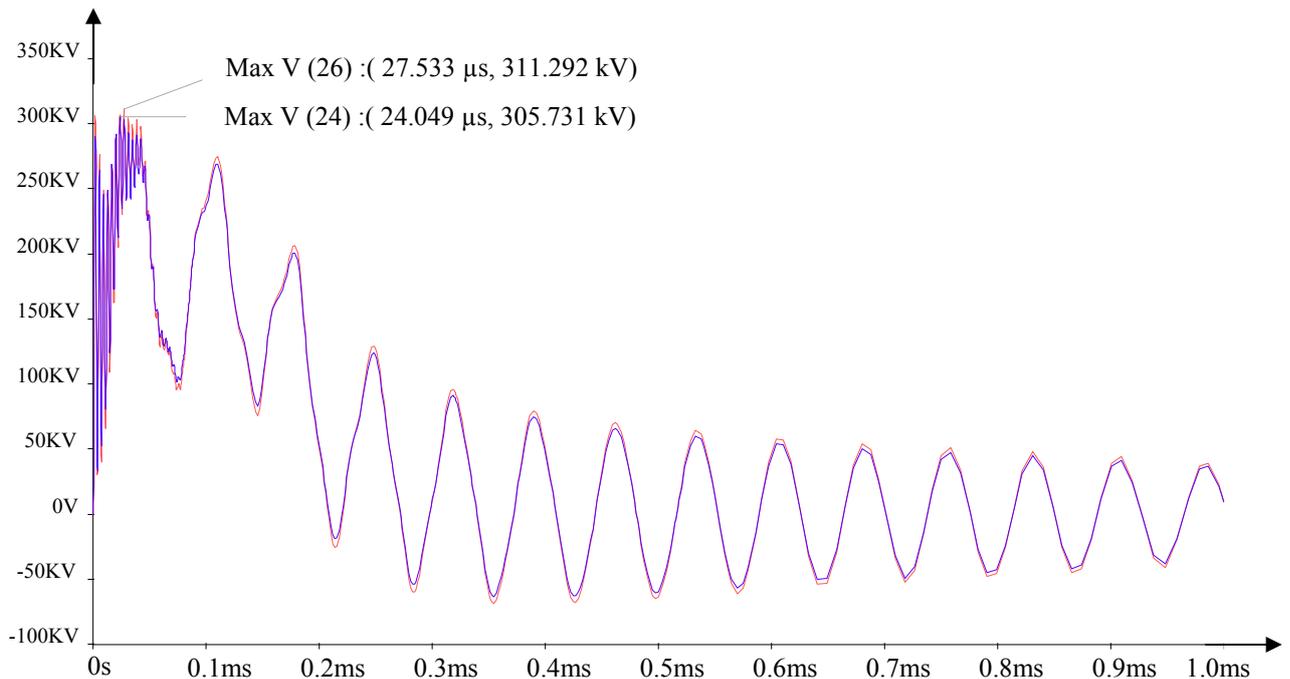
**Fig. VI.12 : Tension V(24) avec un parafoudre à l'entrée HT et neutre relié à la terre.**

Avec un parafoudre la tension passe de 352 kV (fig.3) à 134 kV (fig.12) sur l'enroulement de réglage. On devrait protéger particulièrement l'enroulement de réglage d'après les tensions de tenue des enroulements de transformateurs données dans le tableau VI (celle de l'enroulement de réglage est inférieure à 134 kV).

|                         |    |    |    |     |     |     |     |     |     |      |      |
|-------------------------|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|
| U <sub>nom</sub> (kV)   | 3  | 6  | 10 | 15  | 20  | 35  | 110 | 150 | 220 | 330  | 500  |
| U <sub>essai</sub> (kV) | 44 | 60 | 80 | 108 | 130 | 200 | 480 | 550 | 750 | 1050 | 1550 |
| U <sub>tenue</sub> (kV) | 45 | 65 | 85 | 110 | 135 | 205 | 470 | 525 | 705 | 975  | 1430 |

**Tableau VI : Tensions de tenue aux chocs des enroulements pour différentes tensions nominales.**

**VI. 1. 3. 2. Tensions aux différents nœuds de l'enroulement avec neutre isolé de la terre**



**Fig. VI.13: Tensions V(24) et V(26) à l'entrée et à la sortie de l'enroulement de réglage. Neutre isolé.**

Avec 311 kV (fig.13), l'enroulement de réglage nécessite une protection particulière.

#### VI. 1. 4. Sans enroulement de réglage, protection de l'enroulement HT activée

Un parafoudre est placé à l'entrée de l'enroulement HT.

##### VI. 1. 4. 1. Tensions aux différents nœuds de l'enroulement avec un parafoudre

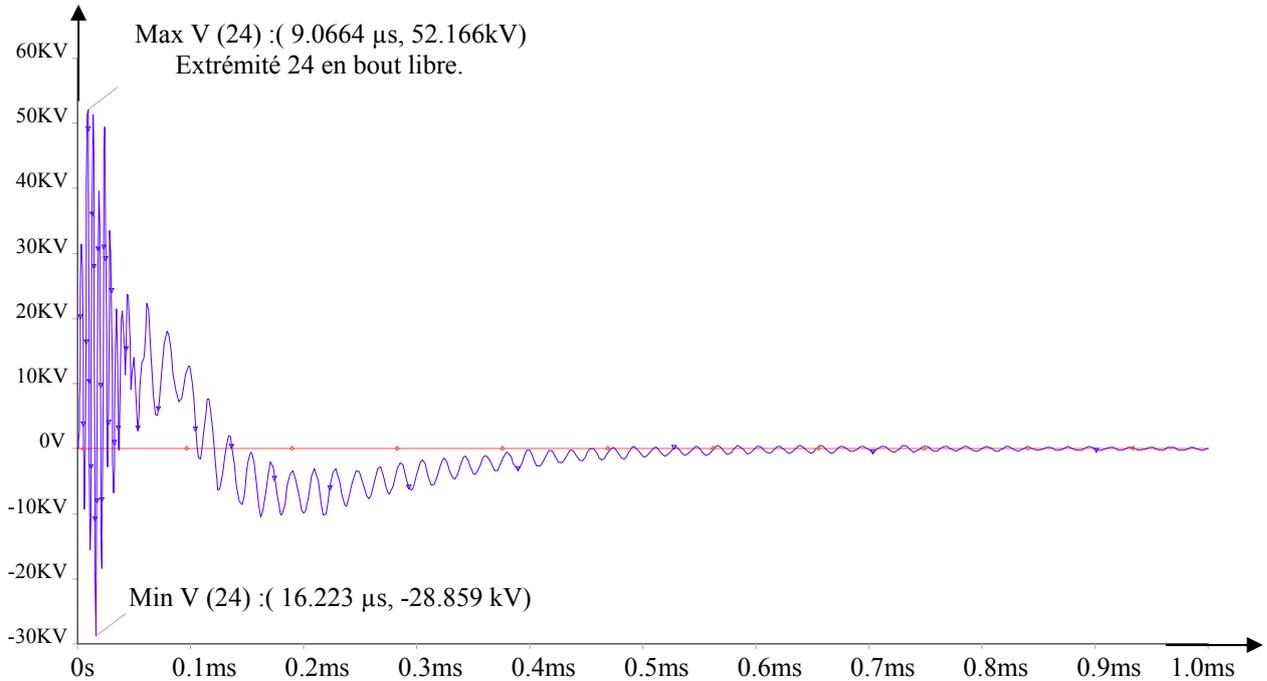


Fig. VI.14: Tensions V (24) et V(26) (nulle), avec un parafoudre à l'entrée HT; neutre relié à la terre.

Cette situation n'est pas dangereuse pour l'enroulement de réglage.

##### VI. 1. 4. 2. Tensions aux différents nœuds de l'enroulement avec neutre isolé de la terre

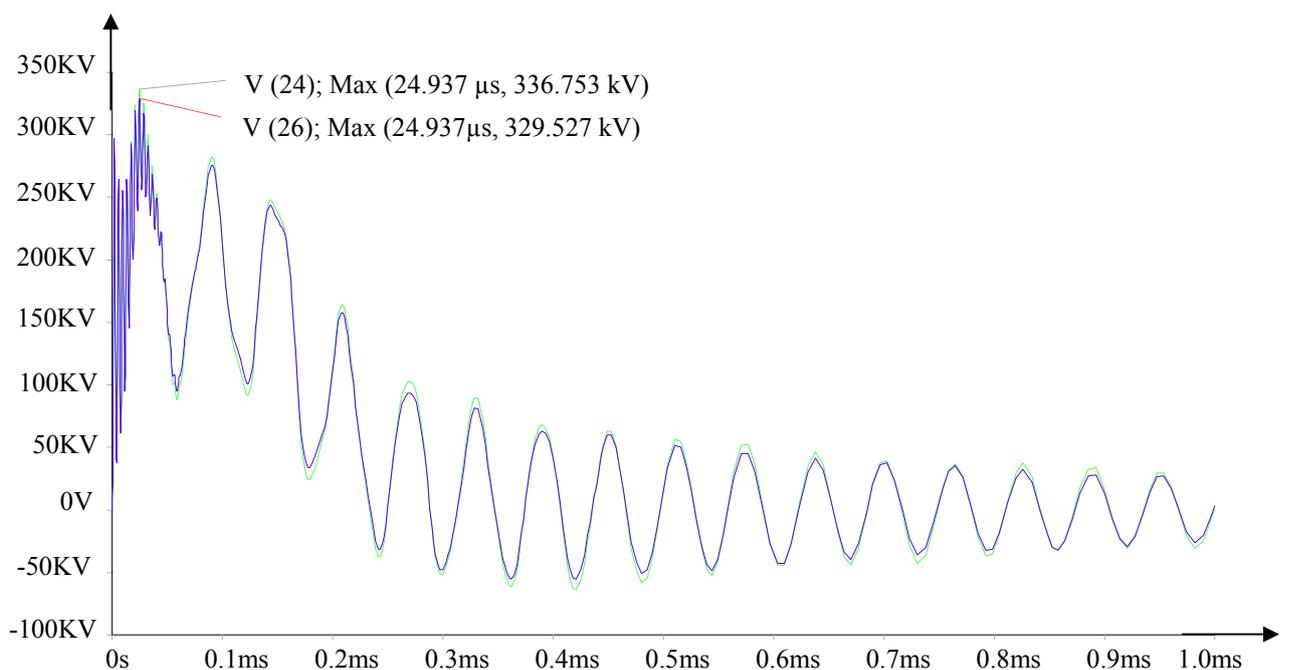


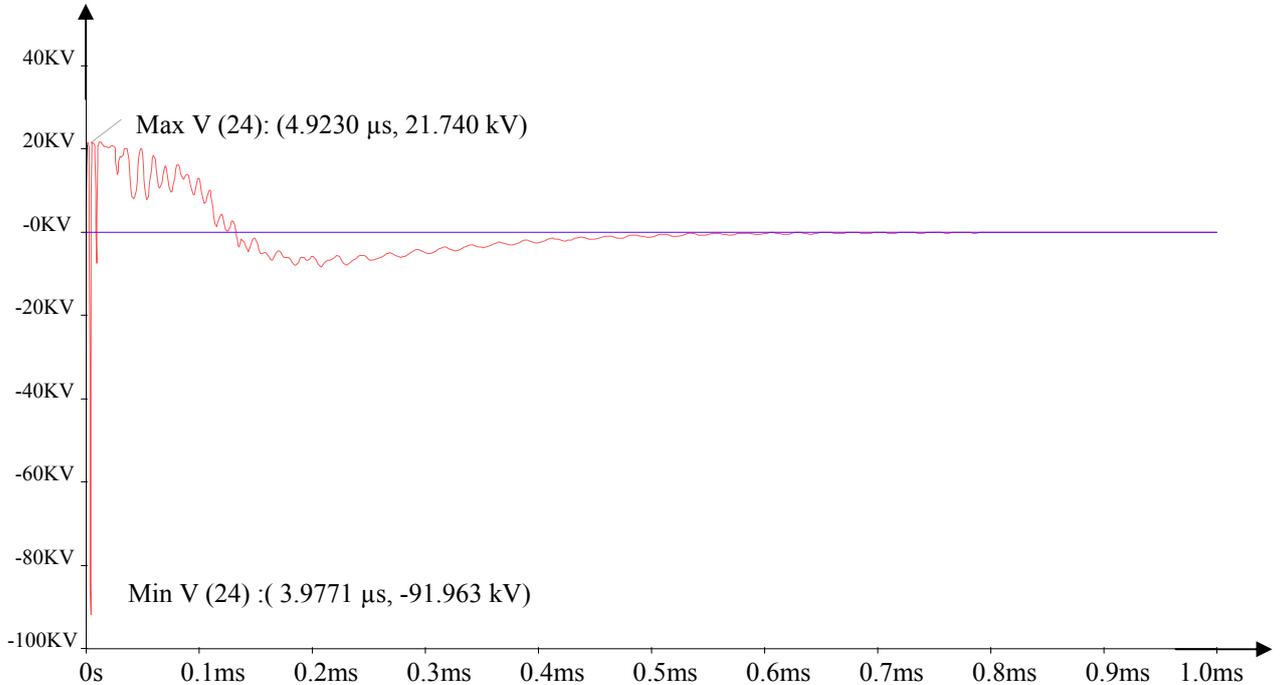
Fig.VI.15: Tensions V (24) et V(26), avec un parafoudre à l'entrée HT; neutre isolé de la terre.

Lorsque le neutre est isolé, seule la contrainte transversale reste dangereuse malgré l'installation d'un parafoudre à l'entrée HT du transformateur.

**VI. 1. 5. Avec enroulement de réglage, protections activées.**

Un parafoudre est placé à l'entrée de l'enroulement HT. On ajoute un deuxième parafoudre à l'entrée de l'enroulement de réglage.

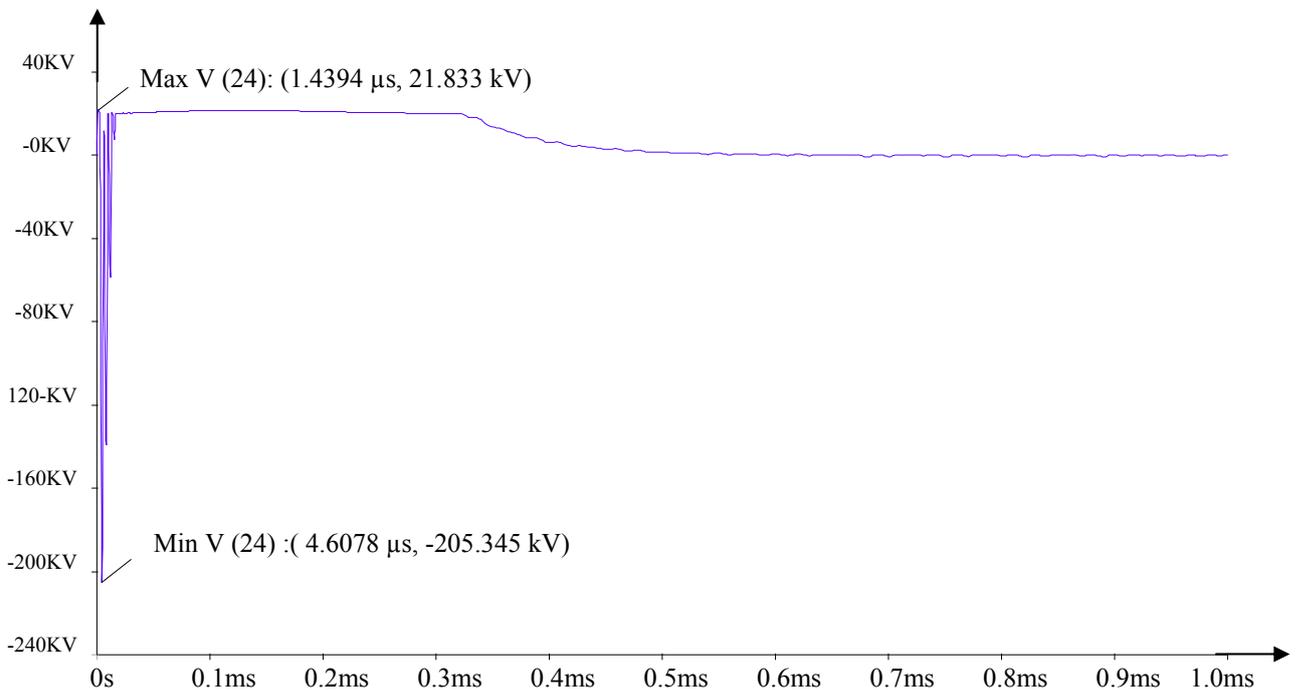
**VI. 1. 5. 1. Tensions aux différents nœuds de l'enroulement avec neutre mis à la terre**



**Fig.VI.16: Tension V (24), avec deux parafoudres; neutre relié à la terre.**

Avec un parafoudre à l'entrée de l'enroulement de réglage, il ne subsiste aucune contrainte de tension dangereuse sur ce dernier lorsqu'il est utilisé, dans le cas où le neutre est mis à la terre.

**VI. 1. 5. 2. Tensions aux différents nœuds de l'enroulement avec neutre isolé de la terre**



**Fig. VI.17 : Tension V (24), avec deux parafoudres; neutre isolé de la terre.**

## VI. 2. Résultats de la simulation pour l' autotransformateur

Le neutre est toujours relié à la terre.

### VI. 2. 1. Onde de tension du côté HT

#### VI. 2. 1. 1. Protections désactivées, enroulement de réglage inséré

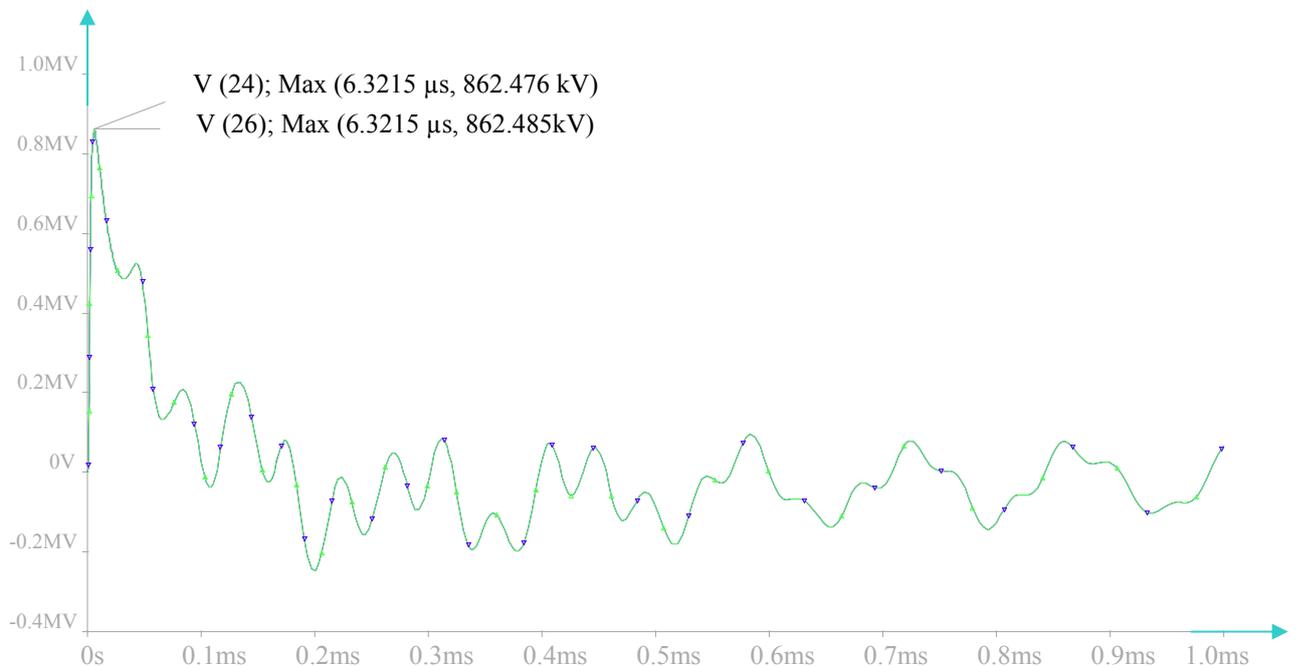


Fig. VI.18 : Tensions V (24), V(26), à l'entrée et à la sortie de l'enroulement de réglage.

V (24) et V(26) sont pratiquement confondues. Le gradient de tension est donc pratiquement nul le long de l'enroulement de réglage quand il est inséré. La contrainte transversale est sévère (862 kV à la fig.18).

#### VI. 2. 1. 2. Protections désactivées, enroulement de réglage non inséré

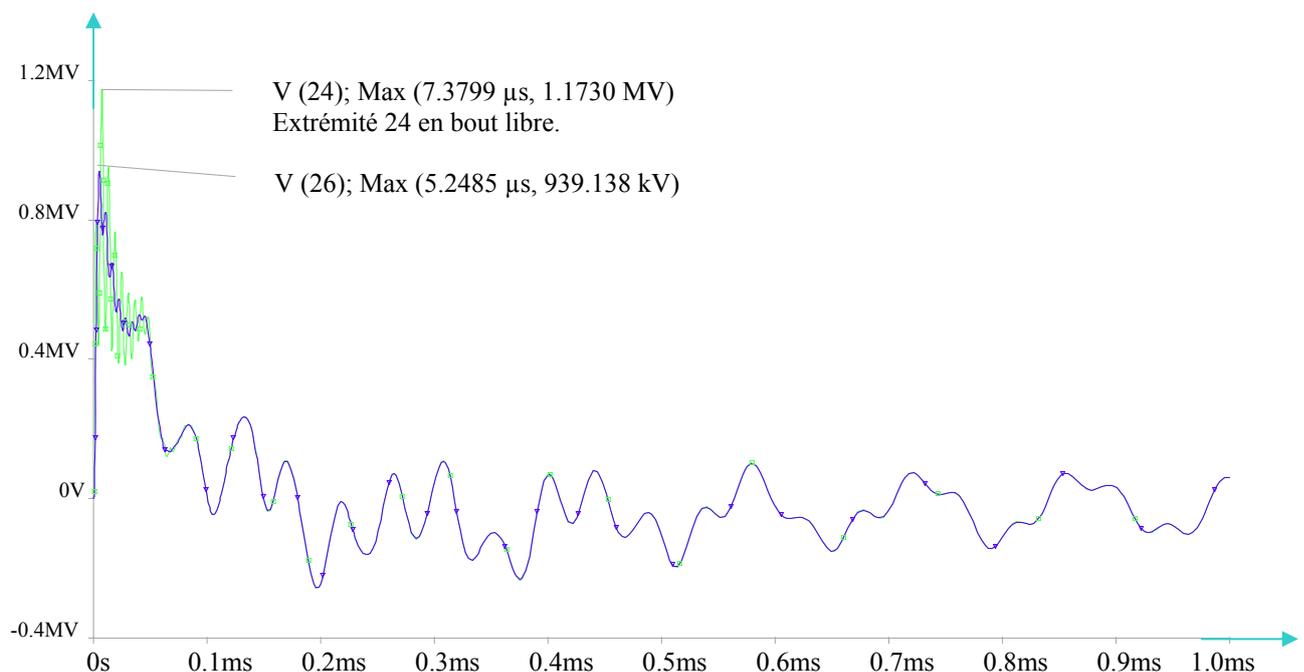


Fig.VI.19: Tension V(24) et V(26) aux extrémités de l'enroulement de réglage. Entrée (24) en bout libre.

L'entrée 24 de l'enroulement de réglage, en bout libre, voit sa tension, aux premiers instants, plus grande que son extrémité 26. Là aussi sans doute une situation liée à la réflexion d'ondes.

### VI. 2. 1. 3. Protections activées, enroulement de réglage inséré

Un seul parafoudre est placé à l'entrée de l'enroulement HT.

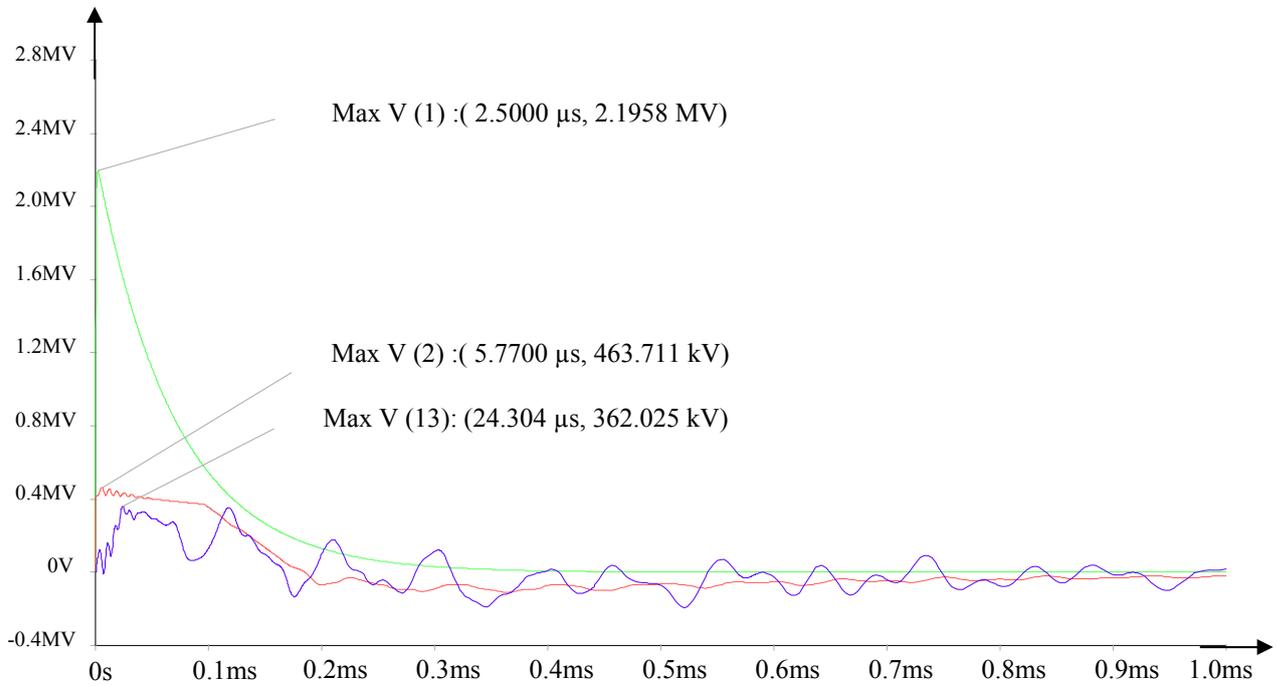


Fig. VI.20: Tensions V(1) V(2) et V(13) avec un parafoudre à l'entrée HT.

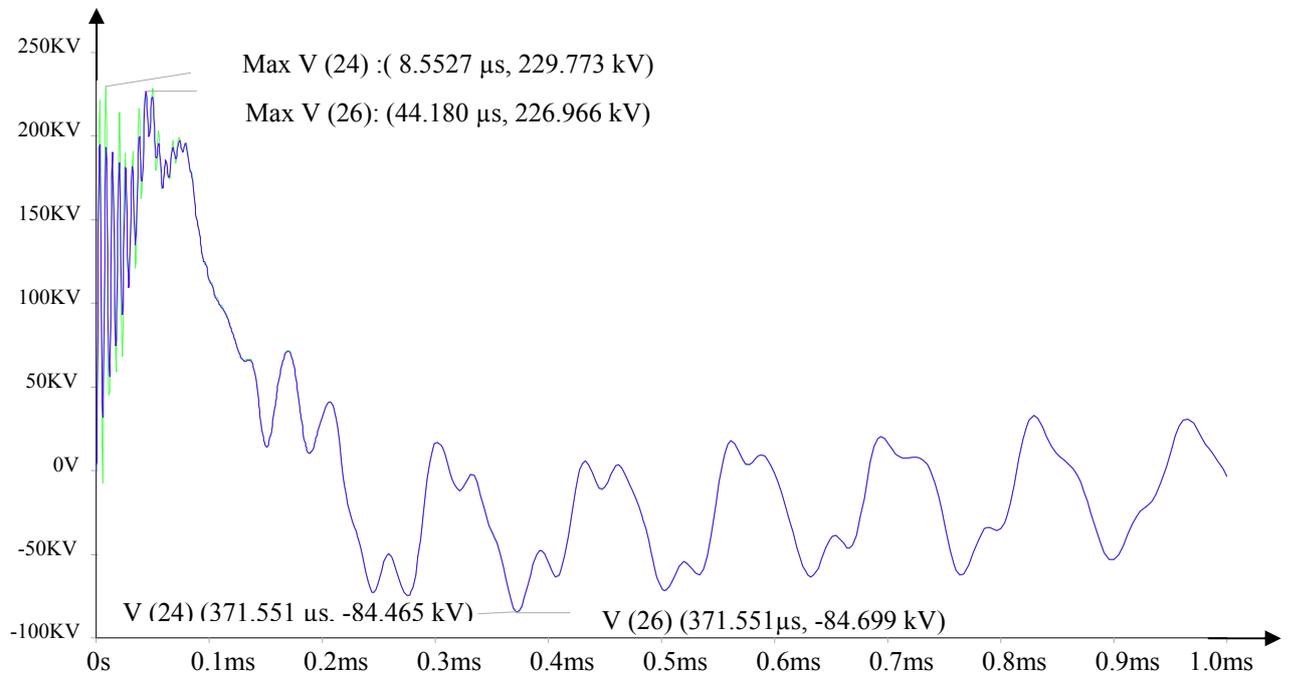


Fig. VI.21: Tensions V(24) et V(26) avec un parafoudre à l'entrée HT.

La surtension (229 kV) dépasse la tension de tenue de l'enroulement de réglage (135 kV): il faut le protéger particulièrement.

### VI. 2. 1. 4. Protections activées, enroulement de réglage non inséré

Un seul parafoudre est placé à l'entrée de l'enroulement HT.

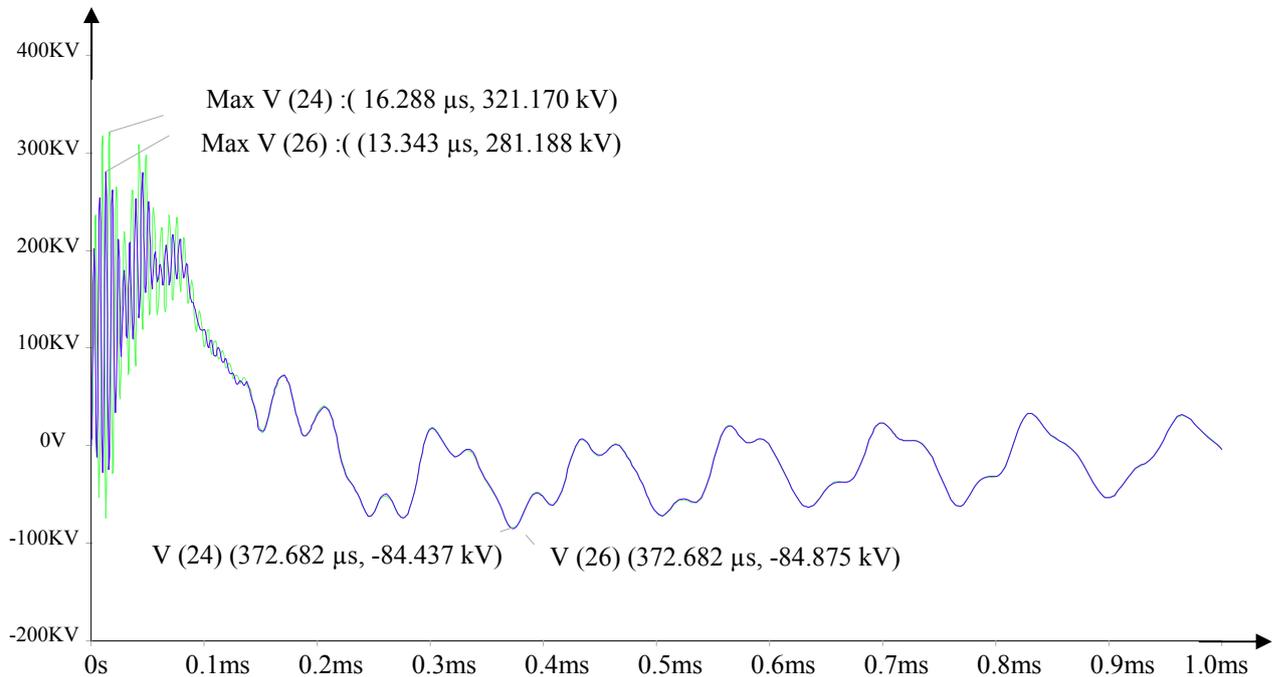


Fig. VI.22: Tensions V(24) et V(26) avec un parafoudre à l'entrée HT, enrl. de réglage non inséré.

La surtension est plus importante sur l'enroulement de réglage (321 kV, fig.22) que dans le cas précédent (229 kV, fig.21). Il faut une protection au voisinage immédiat de l'enroulement.

### VI. 2. 1. 5. Protections activées avec 2 parafoudres, enroulement de réglage inséré

On ajoute un deuxième parafoudre à proximité de l'enroulement de réglage.

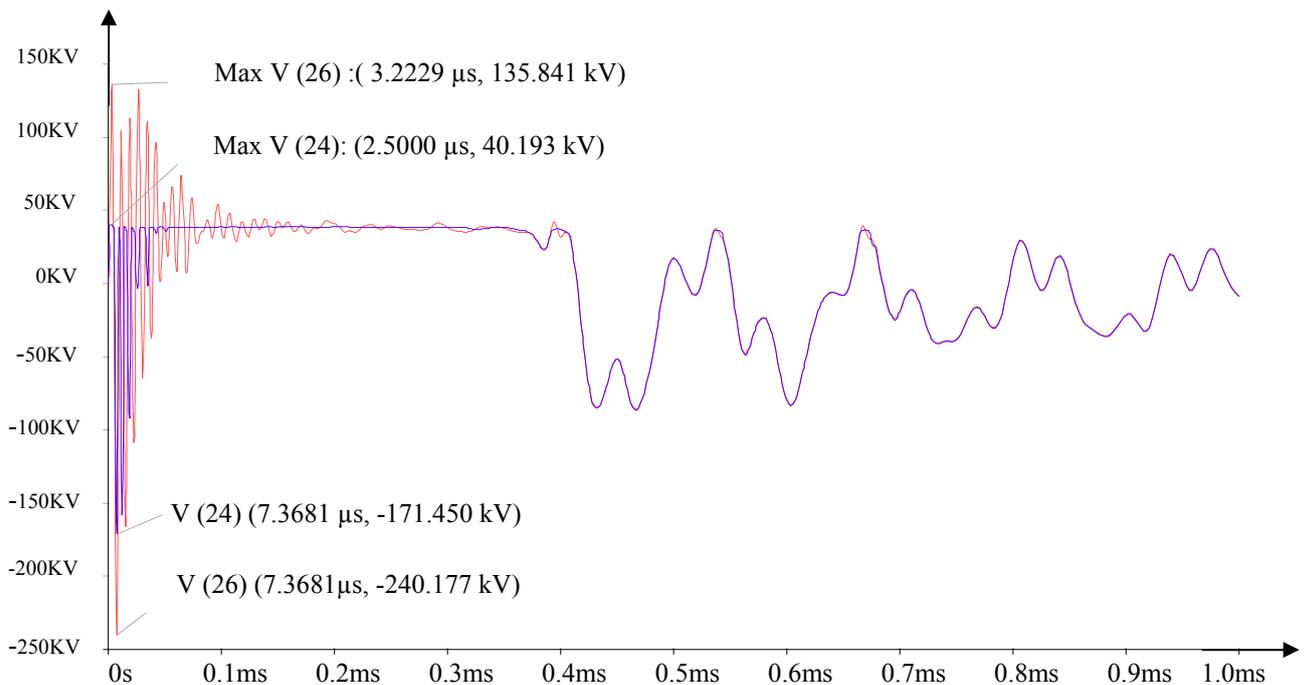


Fig. VI.23 : Tensions V(24) et V(26) en utilisant deux parafoudres ; enrl. de réglage inséré.

### VI. 2. 1. 5. Protections activées avec 2 parafoudres, enroulement de réglage non inséré

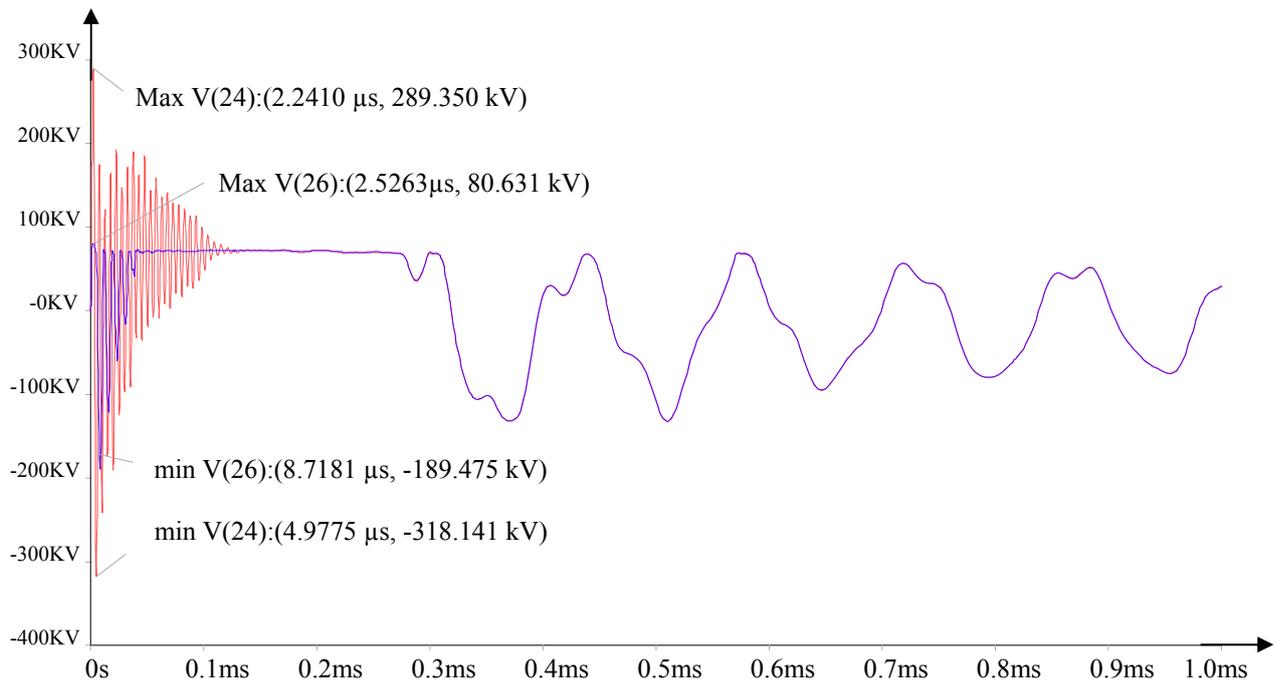


Fig.VI.24: Tensions V(24) et V(26) avec deux parafoudres ; enrl. de réglage non inséré.

### VI. 2. 2. Onde de tension du côté MT

#### VI. 2. 2. 1. Protections désactivées, enroulement de réglage inséré.

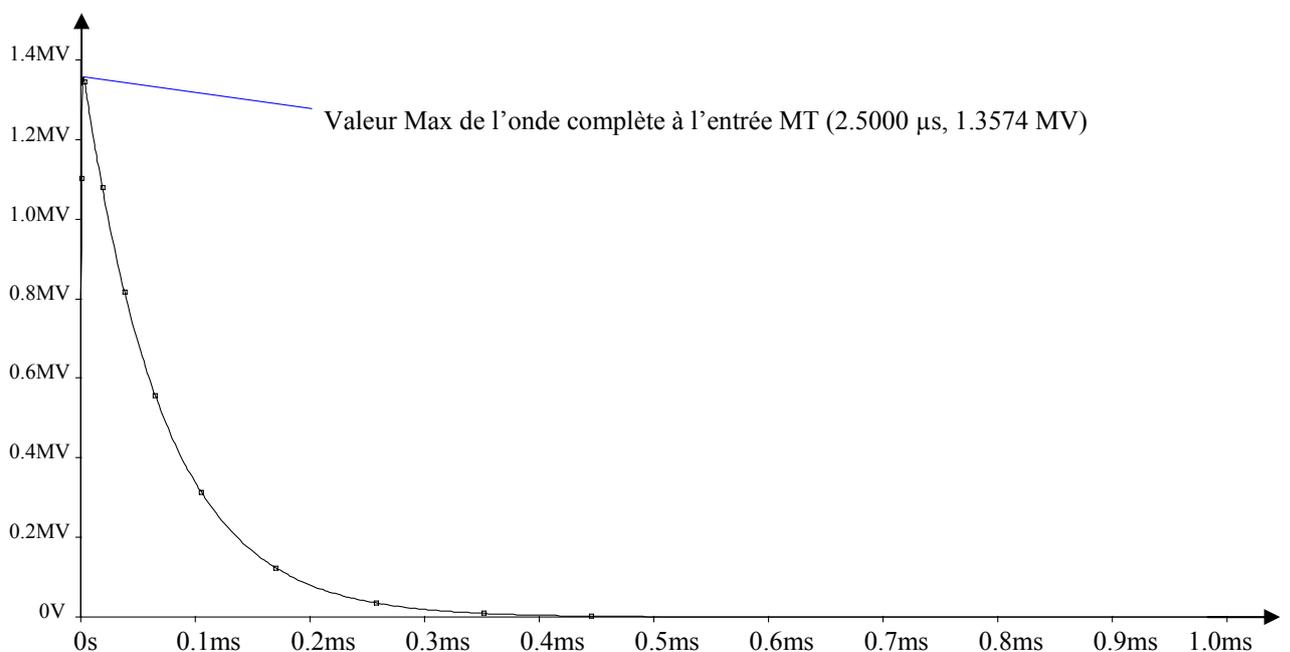
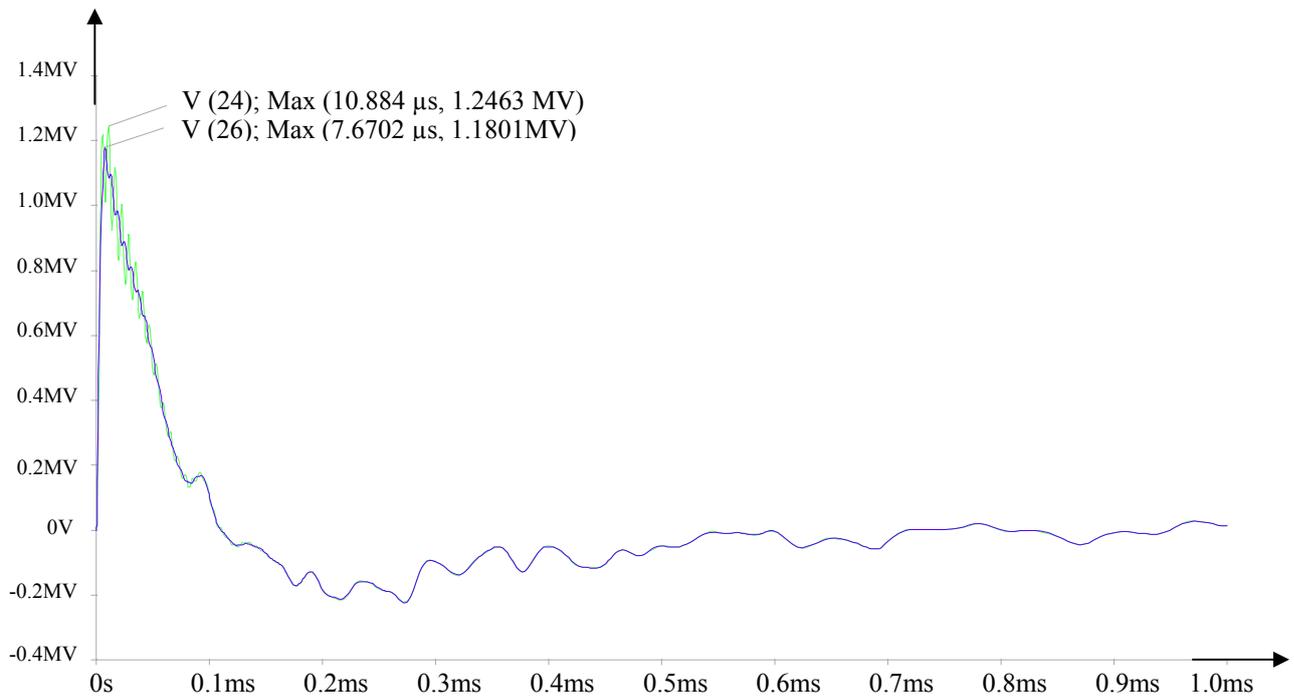


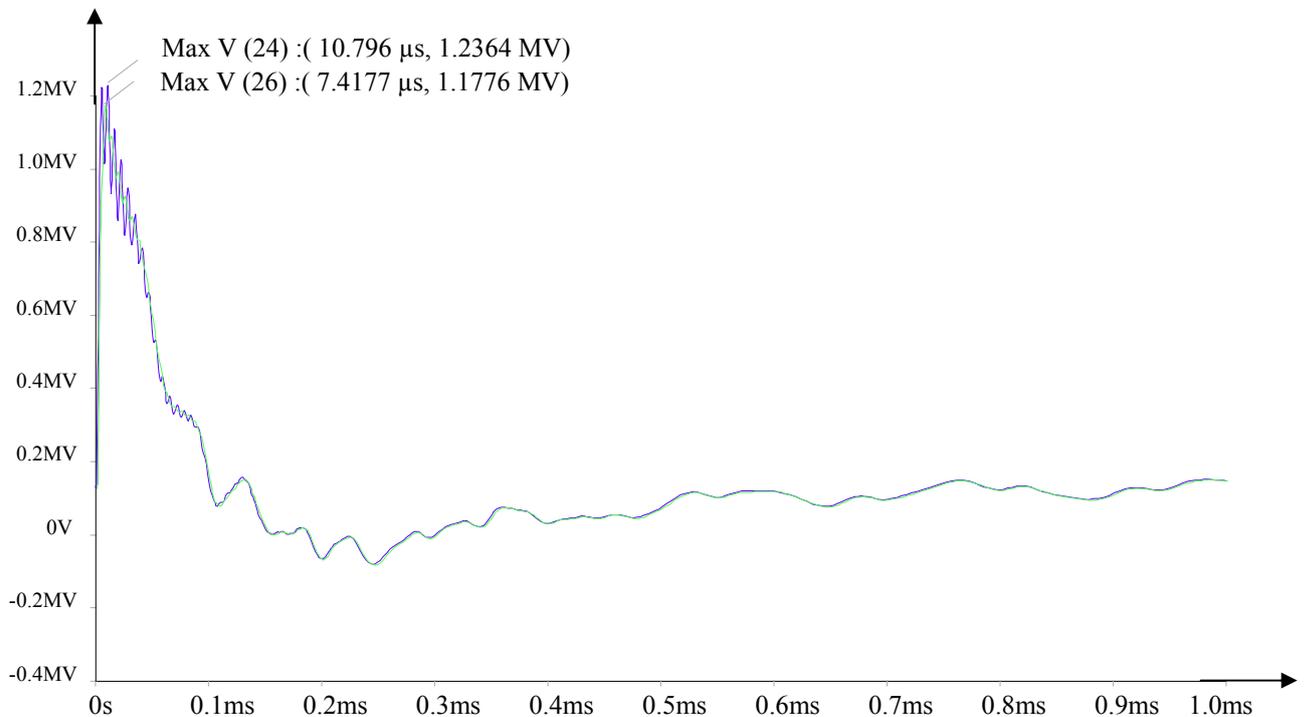
Fig.VI.25: Onde de tension arrivant à l'entrée MT de l'autotransformateur.



**Fig.VI.26:** Tension V(24) et V(26) à l'entrée et à la sortie de l'enroulement de réglage inséré.

Un peu atténuée, pour les 2 cas, l'onde de tension arrive de plein fouet sur l'enroulement de réglage, ce qui est normal d'après le schéma équivalent utilisé, puisque les nœuds 27 et 24 ne sont séparés que par une faible résistance.

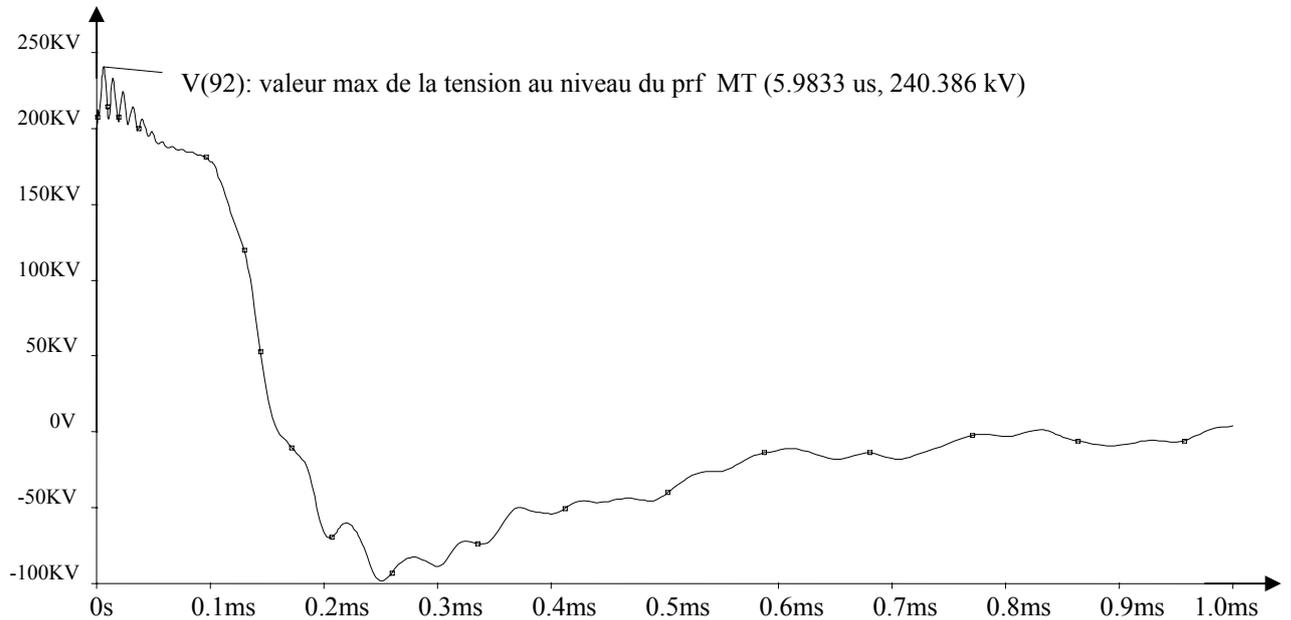
### VI. 2. 2. 2. Protections désactivées, enroulement de réglage non inséré.



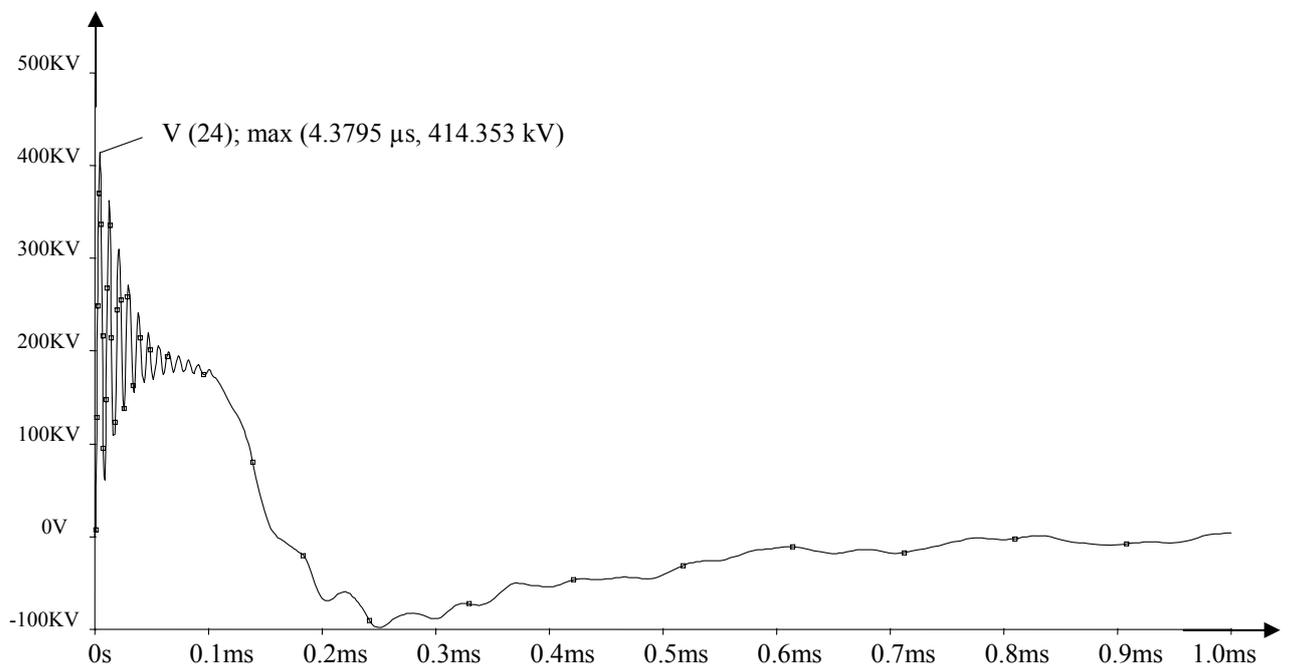
**Fig.VI.27:** Tension V(24) et V(26) aux extrémités de l'enroulement de réglage.

### VI. 2. 2. 3. Protections activées, enroulement de réglage inséré.

Un parafoudre est placé à l'entrée MT.



**Fig.VI.28: Tension au niveau du parafoudre à l'entrée de l'enroulement MT.**

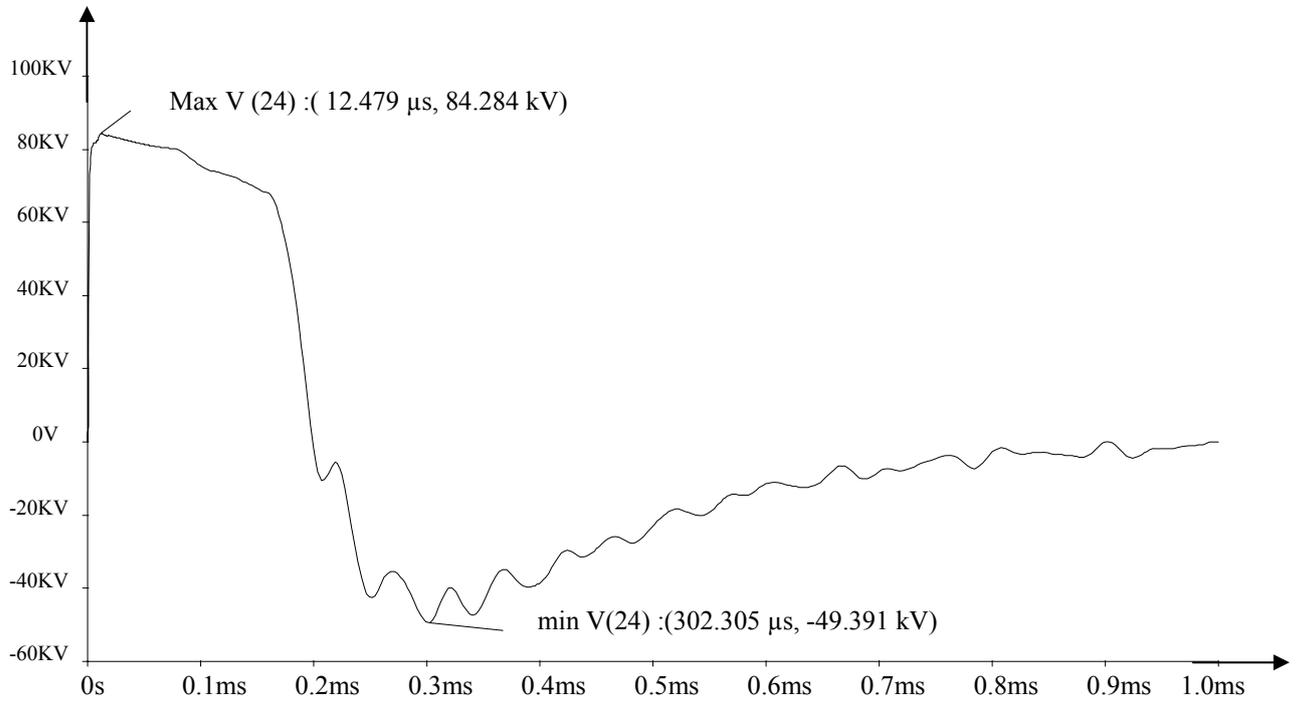


**Fig.VI.29: Tension V(24) à l'entrée de l'enroulement de réglage inséré**

La valeur maximale de la tension écrêtée au niveau du parafoudre 110 kV, est de 240 kV. Elle est oscillatoire amortie à l'entrée MT et à l'entrée de l'enroulement de réglage autour de la valeur 200 kV aux premiers instants. Ces oscillations ont des valeurs crêtes qui dépassent la tension de tenue de l'enroulement de réglage.

**VI. 2. 2. 4. Protections activées, enroulement de réglage inséré.**

Utilisation de deux parafoudres : un deuxième parafoudre est installé à l'entrée de l'enroulement de réglage.



**Fig.VI. 30: Tension V(24) à l'entrée de l'enroulement de réglage inséré**

La surtension de 84 kV est inférieure à la tension de tenue de l'enroulement de réglage (tableau VI).

## CONCLUSION

La perte d'alimentation électrique est toujours gênante, mais peut devenir très pénalisante. Elle peut même être catastrophique dans certains cas, et même mettre en danger la vie de personnes.

De nos jours, la plus grande disponibilité de l'énergie électrique est demandée pour différentes raisons, soit purement économiques (recherche de productivité maximale), soit pour des impératifs de sécurité, ou tout simplement de confort dans les utilisations domestiques. Il est donc bien évident que dans ce contexte savoir supprimer, ou tout au moins réduire très fortement, les risques et donc les conséquences des surtensions, devient une référence professionnelle.

Pour toutes ces raisons, il faut :

- estimer les surtensions (d'origine atmosphérique, de manoeuvre ou à fréquence industrielle) qui peuvent apparaître sur le réseau électrique.
- connaître les caractéristiques des matériels installés et plus particulièrement leur tenue aux ondes de choc,
- choisir les protections en tenant compte des deux points précédents mais aussi du schéma des liaisons à la terre du réseau électrique. Mais cette «approche théorique» doit être complétée d'un savoir-faire de praticien sachant que, par exemple, le non respect de quelques règles élémentaires rend parfaitement inefficaces des parafoudres, même bien choisis.

Dans ce travail, on a essayé d'aborder les principaux aspects de la foudre, sur les plans qualitatif et quantitatif, ses effets sur les installations électriques, les moyens de protection, en mettant en avant le transformateur.

L'application au transformateur HT, est un cas particulier d'étude. L'idée qui consiste à étudier la surtension le « long » de l'enroulement, suppose, particulièrement pour le phénomène hautes fréquences, que le début et la fin de l'enroulement sont géométriquement éloignés l'un de l'autre. Le modèle utilisé convient à un enroulement continu. Cette situation est réelle dans le cas des transformateurs HT où le bobinage est en galettes, placées l'une à côté de l'autre le long du noyau, ou encore en hélice continue, pour répondre à un problème d'isolement.

Ces considérations justifient partiellement le choix du modèle physique de l'enroulement qui ressemble à un « ressort » avec deux extrémités. Cependant, il ne faut pas croire que le modèle adopté pour cette étude répond avec rigueur au problème des surtensions dans le transformateur. Il est à noter que la géométrie complexe du transformateur, son caractère tridimensionnel, posent beaucoup de difficultés pour appréhender les surtensions auxquelles sont soumis ses enroulements.

Du phénomène haute fréquence, on retiendra que le type de schéma équivalent va changer selon la fréquence : l'inductance propre de l'enroulement dans le modèle, résulte de l'inductance de fuites de l'enroulement réel. En HF le noyau de fer n'influe plus sur la mesure de l'impédance. L'effet des capacités est prépondérant

A propos de l'enroulement de réglage, le vocabulaire enroulement inséré ou non utilisé ainsi que non inséré ou non utilisé ne doit pas être compris par enroulement concerné et non concerné par la surtension. Bien au contraire lorsque l'enroulement n'est pas utilisé partiellement ou entièrement, c'est là qu'il est soumis à des contraintes sévères.

Des résultats de la simulation, on observe :

- des oscillations de tension aux différents points le long de l'enroulement.

- Les amplitudes de la tension aux premiers instants, sont plus importantes au début qu'à la fin de l'enroulement dans le cas d'un neutre relié à la terre.
- dans le cas d'un neutre isolé de la terre, ces amplitudes prennent globalement les mêmes valeurs.

Ces deux derniers résultats font penser aux répartitions initiales respectives de tension, le long de l'enroulement.

Lorsque l'enroulement de réglage est utilisé et que le neutre est mis à la terre, les contraintes longitudinale et transversale ne sont pas dangereuses pour l'enroulement. La présence d'un seul parafoudre à l'entrée de l'enroulement HT peut assurer une protection efficace du transformateur.

Dans le cas où, l'enroulement de réglage est en bout libre, il est soumis à des contraintes assez sévères même avec un parafoudre à l'entrée HT. Ces contraintes sont plus importantes dans le cas du neutre relié à la terre. C'est dire que l'enroulement de réglage sort de la zone de protection du parafoudre. L'implantation d'un deuxième parafoudre à l'entrée de l'enroulement de réglage est souhaitable.

Des résultats analogues sont observés dans le cas de l'autotransformateur. On arrive à la conclusion que, l'enroulement de réglage exige une protection particulière, en plus de la protection de l'enroulement HT et MT. L'implantation de parafoudres aux extrémités de l'enroulement de réglage est vivement recommandée.

Dans la protection par parafoudres, plus la distance séparant le parafoudre et l'équipement est courte, meilleure est la protection. Il est donc logique d'en conclure que pour une protection maximale, le parafoudre doit être installé près de l'équipement à protéger, voire directement intégré à celui-ci. Ceci est possible grâce aux nouvelles technologies d'isolations.

Les avantages d'une protection contre les surtensions réalisée par un parafoudre intégré sont indéniables: non seulement la protection est plus performante et plus efficace (plus particulièrement en cas de transitoires rapides), mais elle présente aussi un intérêt économique grâce au gain d'espace, à la réduction des coûts d'installation... ce type d'intégration a déjà été réalisé avec succès dans le cas de transformateurs ; le parafoudre est alors immergé dans l'huile de la cuve. A la rigueur, dans l'avenir l'isolation elle-même pourrait être dotée des propriétés d'un parafoudre.

La tendance à considérer le phénomène de foudre dès la conception des installations, en faisant appel à la coordination des isolements, ne peut que contribuer à une meilleure qualité de l'énergie électrique.

## ***Bibliographie***

- [1] :M. KOSTENKO et L. PIOTROVSKI; Machines électriques, Tome I, éditions : MIR. Moscou 1976.
- [2]:A.IVANOV SMOLENSKI, « Machines électriques ». Volume II. Edition Mir. Moscou 1980.
- [3] : REAL-PAUL BOUCHART et GUY OLIVIER ; « Electrotechnique », éditions de l'Ecole Polytechnique De Montréal, 1996.
- [5] : CHRISTOPHE SERAUDIE, « Surtensions et parafoudres en BT, coordination de l'isolement en BT. » Cahier technique MERLIN GERIN N° 179. Septembre 1995.
- [6] : BENOÎT DE METZ-NOBLAT, « La foudre et les installations électriques HT » Cahier technique MERLIN GERIN N° 168. Juillet 1993.
- [7] : C. GARY, “Technique de la haute tension”. Cours SUPELEC 1984.
- [8] : BOYER, NORBERT et PHILIPPE, « Construction du materiel électrique ». Tome 2. 2ème édition. Chez Capitelle (Gard). Janvier 81.
- [9] : D.FULCHIRON, « Surtension et coordination de l'isolement». Cahier technique MERLIN GERIN N° 151. Décembre 1992.
- [10] : ALAIN SCHMITT THIERRY DE FLANDRE, “Origines et effets des surtensions”, 1<sup>ère</sup> partie. Les Cahiers De L'Ingénierie. EDF INDUSTRIE. Mars 1994.
- [11] : AFFOLTER JEAN FRANCOIS, « Haute tension ». Cours de l'Ecole d'Ingénieurs du Canton de Vaud. Octobre 2000.
- [12] : A. FOUILLE, « Electrotechnique à l'usage des ingénieurs, machines à courants alternatifs, tome 2, édition DUNOD, 1980.
- [13] : FRANCIS MILSANT ; « Cours d'électrotechniques », éditions : ELLIPSES, Copyright 1992.
- [14] : J. CHATELAIN, “Machines électriques”, volume X. Editions GEORGI, PPUR 1983.
- [15] : D.FULCHIRON, « Protection des transformateurs de postes MT/BT ». Cahier technique MERLIN GERIN N° 192. Avril 1998.

- [16] : BERNARD HOCHART ; « Transformateur de puissance », 2<sup>ème</sup> édition, éditions : Tec et Doc, LAVOISIER, 1988.
- [17] : BENOÎT DE METZ-NOBLAT, « Les calculs sur les réseaux électriques BT et HT » Cahier technique Schneider Electric N° 213. Decembre 2004.
- [18] : F.MACIELA, " Parafoudres"; Techniques de l'ingénieur, traité Génie électrique D 4755. Année 2002.
- [19] FRANCIS MILSANT, « Transformateurs et réseaux électriques ». BERTI édition 1993.
- [20] : WALTER SCHMIDT, FELIX GREUTER, « Nouvelle approche pour la protection contre les surtensions »,Revue ABB 1/2002, edition ABB Switzerland Ltd.
- [21] : Guide de conception des réseaux électriques industriels 6 883 427/A, Schneider Electric.
- [22] : Groupe Gérard Solignac ; Guide de l'ingénierie électrique, éditions : Tec et Doc LAVOISIER 1985.
- [23] : ALAIN ROUSSEAU et ISABELLE HENNEBIQUE, « Parafoudres ». Technique de l'ingénieur, traité Génie électrique. 1989.
- [24] : GUY-GERARD CHAMPIOT ; « Les perturbations électriques et électromagnétiques », éditions : COPYRIGHT 1991.
- [25]: A. PICHON ; « Calcul et construction des machines électriques : Transformateur » ; Université de Paris, Division Electricité et Electronique 1965.
- [26] : M. AGUET et J.J.MORF ; « Traité d'électricité, d'électronique et d'électrotechnique » ; publié sous la direction de JACQUES NEIRYNCK ; éditions DUNOD 1987.
- [27] : A.GUILBERT, « Circuits magnétiques à courant alternatif », éditions EYROLLES, 1973.
- [28]: A.E. GUILÉ W. PATERSON, "Electrical Power Systems" .Volume I. Pergamon International Library.
- [29]: ALAIN SCHMITT THIERRY DE FLANDRE, «Diagnostic des surtensions et remèdes », 2ème partie. Les Cahiers De L'Ingénierie. EDF INDUSTRIE. Mars 1994.
- [30] : BERNARD LACROIX ROLAND CALVAS, « Les schémas de liaisons à la terre dans le monde et évolutions. Cahier technique MERLIN GERIN N° 173.Septembre 1998.
- [31]: MARTIN J. HEATHCOTE, Ceng, FIEE, The J and P Transformer Book“.Twelfth edition 1998, Newnes. Great Britain.

[32]: P.ESCANE ET J.M.ESCANE. "Réseaux électriques linéaires à constantes réparties" Techniques de l'ingénieur, traité Génie électrique D 1100. Année 2002.

[33]: P.FERRACCHI, "La qualité de l'énergie électrique" Cahier technique SCHNEIDER ELECTRIC N° 199. Octobre 2001.

[34]: A. SABOT et J. MICHAUD, "Choix et coordination de l'isolement" Techniques de l'ingénieur, traité Génie électrique D 4750. Année 2002.

[35] : Ahmad Ahmad, « Contribution à la modélisation des transformateurs de puissance et de leur comportement en haute fréquence », thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, février 1992.

[36]: MICHEL GRACIER et JOSEPH PINEL, protection contre les perturbations, origine des perturbations, techniques de l'ingénieur, traité génie électrique D 4172, an 2002.

[37]: B. HELLER et A. VEVERKA, " Les phénomènes de choc dans les machines électriques ", Ed. Dunod, Paris, 1963.

[38]: VALENTIN CRASTAN, « Les réseaux d'énergie électriques », tomes 1 et 2, édition LAVOISIER, février 2007.