



HAL
open science

OPTIMISATION DES TECHNIQUES DE MISE A LA TERRE DES ECRANS DES CABLES HAUTE ET TRES HAUTE TENSIONS

Hoang Vo van Huy

► **To cite this version:**

Hoang Vo van Huy. OPTIMISATION DES TECHNIQUES DE MISE A LA TERRE DES ECRANS DES CABLES HAUTE ET TRES HAUTE TENSIONS. Energie électrique. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 1999. Français. NNT: . tel-00783703

HAL Id: tel-00783703

<https://theses.hal.science/tel-00783703>

Submitted on 1 Feb 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



T529

THESE

présentée par

Hoang VO VAN HUY

Pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

(Arrêté ministériel du 30 mars 1992)

Spécialité : **Génie Electrique**

**OPTIMISATION DES TECHNIQUES DE MISE A LA TERRE
DES ECRANS DES CABLES HAUTE ET TRES HAUTE TENSIONS**

Soutenu le 9 novembre 1999 devant le Jury composé de :

Messieurs	R. FEUILLET	(Président du Jury)
	S. LAM DU	(Rapporteur)
	Y. SEGUI	(Rapporteur)
	R. MORET	(Directeur de thèse)
	T. TRAN-QUOC	(Co-directeur de thèse)
	E. DORISON	(Co-directeur de thèse)

Cette thèse est préparée :

* au groupe Enfouissement des Liaisons de Transport et Supraconductivité du Département CIMA, EDF, R&D , Centre des Renardières, 77818 MORET SUR LOING CEDEX.

* au Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, Unité de Recherche Mixte, ENSIEG, INPG, Rue de la Houille Blanche, 38402 SAINT MARTIN D'HERES

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée au sein du groupe Enfouissement des Liaisons de Transport et Supraconductivité (ELTS) de la Division Recherche et Développement d'Electricité de France (Département CIMA, Site des Renardières).

Je tiens à remercier profondément Monsieur Eric DORISON, Ingénieur - Chercheur, chef de projet à EDF pour les câbles 400 kV. Sa grande compétence et ses grandes connaissances ont beaucoup contribué à mener à bien cette étude. Qu'il veuille bien trouver ici l'expression de ma profonde gratitude, non seulement pour l'aide scientifique, mais également pour le soutien moral qu'il n'a cessé de me prodiguer.

J'adresse mes sincères remerciements à :

Monsieur René FEUILLET, Professeur de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant d'être président du jury.

Monsieur Yvan SEGUI, Directeur de recherche à CNRS Toulouse pour l'intérêt qu'il a manifesté en honorant le jury de sa présence et en acceptant d'être l'un des rapporteurs.

Monsieur LAM DU Son, Directeur adjoint de la Compagnie Electricité de Ho Chi Minh Ville (Electricité du Viêt-Nam), anciennement professeur de l'Ecole Polytechnique de Ho Chi Minh Ville, pour avoir assumé la tâche de rapporteur, membre du jury. Qu'il trouve ici l'expression de ma sincère amitié.

Monsieur Roger MORET, Professeur de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, Directeur de thèse, pour l'intérêt qu'il a toujours manifesté à l'égard de ce travail et pour avoir guidé mes premiers pas dans la recherche. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance et ma sincère amitié.

Monsieur TRAN-QUOC Tuan, Maître de Conférence de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, pour m'avoir fait bénéficier de sa grande compétence dans le domaine de la modélisation des régimes transitoires des réseaux électriques et pour les échanges fructueuses que nous avons eus lors de la rédaction de plusieurs publications. Qu'il veuille bien trouver ici mes meilleurs remerciements.

Monsieur Xavier BOURGEAT, Ingénieur - Chercheur à EDF pour les nombreuses discussions intéressantes sur mon sujet d'étude. Son aide continue tout au long de la période de ma thèse m'a été très utile. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Messieurs Michel PAYS et Frédéric BARON, chefs du Département CIMA pour m'avoir accueilli dans leur unité afin d'effectuer cette étude.

Messieurs Paul. PENSERINI et Christophe BOISSEAU, chefs du Groupe Enfouissement des Liaisons de Transport et Supraconductivité pour leur soutien permanent.

Je tiens aussi à remercier :

Monsieur NGUYEN KHAC Nhan, Conseiller d'EDF Direction Internationale, anciennement professeur de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, pour l'intérêt qu'il a toujours manifesté à l'égard de mes études et pour m'avoir aidé de ses conseils. Qu'il veuille bien trouver ici l'expression de ma profonde gratitude pour le soutien moral qu'il n'a cessé de me prodiguer.

Messieurs Gilles CABRIEL, Benoît BRESSAC, Dario SANTOS, Alain XEMARD, Ingénieurs - Chercheurs d'EDF (Site de Clamart) pour les nombreuses discussions dans le domaine de la modélisation transitoire d'EMTP.

Monsieur Alain SABOT, Ingénieur - Chercheur à la Division Recherche et Développement d'EDF (Site des Renardières) pour les discussions précieuses sur le domaine de la modélisation des effets de la foudre.

Monsieur Frédéric LESUR, Ingénieur Chercheur d'EDF (Site des Renardières) qui a bien voulu relire ce mémoire de thèse avec un oeil critique.

Messieurs Jean-Louis COULOMB, Marcel IVANES, Responsables de la formation doctorale, Jean-Pierre ROGNON, Directeur du laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, qui m'ont accueilli.

Mes remerciements vont aussi à toute ma famille et mes amis qui ont été la source d'encouragement pour que je puisse bien accomplir mon séjour en France.

Enfin, je ne terminerai pas cet avant-propos sans exprimer mes remerciements à l'ensemble des chercheurs, ingénieurs, techniciens et personnel administratif du laboratoire et tout particulièrement : Mesdames Marie-José FERREIRA, Martine MARTIN, Marie-Christine MOUILLOIX, Messieurs André DELOOF, Jacques RIVIERE, Jean-Marie DAVID, Thierry BRINCOURT, Vanessa REGAUDIE, Luc GOMBERT, Emmanuel WELSCH, Patrick LELONG, Lucien POTEL, Frédéric CHIODI, pour l'intérêt qu'ils ont manifesté pour ce travail et l'aide qu'ils m'ont apportée pour la résolution des problèmes quotidiens. Les discussions que nous avons eues m'ont laissé des souvenirs vivaces...

SOMMAIRE

Introduction.

Première partie - Généralités.

- Chapitre 1 : Généralités sur les liaisons souterraines HT et THT
Chapitre 2 : Connexions spéciales d'écran - Problématique du dimensionnement

Deuxième partie - Etude des contraintes à la fréquence industrielle.

- Chapitre 3 : Mise à la terre en un point
Chapitre 4 : Permutation des écrans
Chapitre 5 : Détermination des courants dans le réseau de terre d'une liaison.
Chapitre 6 : Liaisons souterraines doubles

Troisième partie - Etude des contraintes en régime transitoire.

- Chapitre 7 : Analyse de la propagation transitoire dans les câbles
Chapitre 8 : Mise à la terre en un point (siphons 225 kV)
Chapitre 9 : Permutation des écrans (siphons 225 kV)
Chapitre 10 : Liaisons souterraines doubles (siphons 400 kV)

Quatrième partie - Synthèse

- Chapitre 11 : Règles de dimensionnement

Conclusion

Annexes

- Annexe 1 : Liaisons à permutation d'écran en régime de défaut monophasé interne.*
Annexe 2 : Tensions entre écrans au niveau des permutations en cas de défaut monophasé interne
Annexe 3 : Equations régissant la répartition du courant de court-circuit en cas de défaut interne à la liaison souterraine
Annexe 4 : Effet de la diminution de la résistance des prises de terre aux extrémités de la liaison souterraine
Annexe 5 : Contraintes de tension et de courant dans une liaison mixte en cas de défaut sur un tronçon souterrain
Annexe 6 : Application de la méthode de calcul approché des surtensions à la fréquence industrielle.
Annexe 7 : Précisions sur les méthodes de calcul et présentation de résultats concernant les liaisons souterraines doubles .
Annexe 8 : Tensions entre écrans au niveau des permutations en cas de défaut monophasé interne pour les liaisons doubles.
Annexe 9 : Répartition du courant de foudre .
Annexe 10 : Surtensions transitoires dans les liaisons à permutation d'écran en fonction du mode de connexion des parafoudres de gaine.

INTRODUCTION

INTRODUCTION

En 1992, un protocole sur l'insertion des ouvrages de transport de l'électricité dans l'environnement a été signé par l'Etat et Electricité de France. Il conduit à augmenter sensiblement la part du souterrain dans le réseau de transport haute voire très haute tension.

Dans ce contexte, il est nécessaire d'améliorer le dimensionnement des liaisons en câbles isolés pour le transport de fortes puissances sur de grandes longueurs, afin notamment de diminuer significativement le surcoût du souterrain par rapport à l'aérien.

Au nombre des problèmes à résoudre, figure celui de la mise à la terre des écrans métalliques dont ces câbles sont pourvus.

La mise à la terre continue des écrans n'est pas envisageable car elle implique la circulation d'un courant induit dans les écrans qui limite la capacité de transport des câbles (celle-ci est liée aux pertes Joule que le câble et son environnement doivent dissiper de manière à ne pas provoquer d'échauffement excessif).

Les techniques dites de connexions spéciales d'écran (mise à la terre en un point et permutation) permettent d'annuler les courants de circulation dans les écrans mais elles conduisent à des montées en potentiel des écrans qu'il convient de limiter afin d'assurer la sécurité des personnes et la fiabilité des matériels (gaine des câbles et jonctions) à la fois en régime permanent, en régime de défaut et en régime transitoire c'est-à-dire vis-à-vis des surtensions liées aux manoeuvres des appareillages de coupure ou à la propagation de la foudre.

L'objectif de la thèse est la définition de spécifications permettant d'optimiser le dimensionnement des techniques de mise à la terre des écrans dites de connexions spéciales d'écran.

C'est-à-dire donner des règles de réalisation permettant de limiter les contraintes à des niveaux compatibles avec les tenues spécifiées des différents matériels, tout en minimisant le coût de mise en œuvre et d'exploitation.

Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de mener :

* une étude des contraintes à la fréquence industrielle, d'une part en régime permanent et d'autre part dans les régimes de défaut consécutifs soit à une avarie externe à la liaison souterraine soit à un claquage de câble.

* une étude des contraintes en régime transitoire.

Les progrès sensibles réalisés ces dernières années dans les méthodes de calcul des transitoires adaptées aux câbles isolés souterrains permettent de déterminer précisément les contraintes subies par les matériels.

Le premier chapitre présente brièvement la technologie des câbles isolés HT et THT et les caractéristiques principales des liaisons souterraines de transport d'énergie.

Le deuxième chapitre décrit les différentes techniques de mise à la terre des écrans des câbles et plus particulièrement les techniques de connexions spéciales d'écran (mise à la terre en un point et permutation d'écran). On explicite les contraintes sollicitant les différents matériels des liaisons souterraines (notamment la gaine des câbles), aussi bien en régime permanent qu'en régime de défaut et en dans les régimes transitoires.

Les 4 chapitres suivants sont consacrés au calcul des **contraintes à la fréquence industrielle**.

On explicite d'abord la méthode de calcul des contraintes en fonction des courants de phase et des courants dans le réseau de terre de la liaison souterraine.

Le chapitre 3 est consacré à la technique de mise à la terre en un point. On détermine la montée en potentiel des écrans par rapport au conducteur de terre en fonction des courants de phase et du courant dans le conducteur de terre.

Le chapitre 4 traite de la permutation des écrans. On explicite la distribution du potentiel dans les circuits d'écran en fonction des courants de phase et des courants dans les écrans. On en déduit les tensions entre écrans aux points de permutation qui ne sont fonction que des courants de phase.

La détermination des montées en potentiel des écrans par rapport à la terre nécessite la connaissance du courant circulant dans le conducteur de terre ou les écrans et des courants dérivés dans les prises de terre. Ces courants ne peuvent être déterminés sans prendre en compte l'environnement de la liaison souterraine. On conçoit bien que, dans le cas d'un défaut monophasé, le trajet suivi par le courant de retour du courant de court-circuit dépend de la résistance des prises de terre et des impédances présentés par le câble de garde éventuel des parties aériennes, le conducteur de terre ou les écrans des parties souterraines.

Le chapitre 5 présente une méthode permettant de déterminer les courants dans le réseau de terre en fonction de la constitution d'une liaison.

Le chapitre 6 s'intéresse au cas particulier des liaisons souterraines constituées par la mise en parallèle de 2 circuits.

On s'intéresse ensuite (chapitres 7 - 10) aux **contraintes dues aux régimes transitoires**.

Le chapitre 7 présente la technique de résolution des équations différentielles reliant les tensions et les courants dans les conducteurs dite de décomposition modale. Cette technique permet une interprétation physique des surtensions, reposant sur la propagation de modes indépendants. On établit les expressions de l'impédance caractéristique, de la fonction et de la vitesse de propagation des différents modes.

Le chapitre 8 et 9 étudient les contraintes transitoires sollicitant la liaison souterraine d'un siphon respectivement avec mise à la terre en un point et à permutation des écrans (on appelle siphon une liaison constituée d'une ligne aérienne dans laquelle est inséré un tronçon souterrain).

Le chapitre 10 concerne une étude transitoire sur les liaisons doubles.

Enfin, dans le dernier chapitre, on s'attache à dégager une **méthode d'optimisation du dimensionnement** des liaisons à connexions spéciales d'écran c'est-à-dire les dispositions constructives à prendre pour que les contraintes soient compatibles avec les tenues spécifiées pour les différents matériels.

GENERALITES

Chapitre 1

GENERALITES SUR LES LIAISONS SOUTERRAINES HT ET THT

1 - INTRODUCTION.....	3
2 - CABLES ISOLES HAUTE ET TRES HAUTE TENSIONS.....	3
2 - 1 - AME	4
2 - 2 - ENVELOPPE ISOLANTE.....	4
2 - 3 - ECRAN SEMI-CONDUCTEUR.....	4
2 - 4 - ECRAN MÉTALLIQUE	4
2 - 5 - GAINÉ DE PROTECTION.....	5
3 - LES MODES DE POSE.	5
4 - MODELISATION DES LIAISONS SOUTERRAINES.....	5
4 - 1 - IMPÉDANCES LINÉIQUES.....	7
4 - 2 - ADMITTANCES LINÉIQUES	7
4 - 3 - SIMPLIFICATIONS POUR LA FRÉQUENCE INDUSTRIELLE.....	8

1 - INTRODUCTION.

Dans ce chapitre, on décrit succinctement la technologie des câbles Haute et Très Haute Tension utilisés en France, puis on présente les modes de pose usuels et les différentes techniques de mise à la terre des écrans des câbles des liaisons souterraines Haute et Très Haute Tension.

On présente ensuite la modélisation adoptée pour permettre le calcul des tensions et des courants dans les écrans des câbles.

2 - CABLES ISOLES HAUTE ET TRES HAUTE TENSIONS.

En France, les câbles à isolant synthétique [1,2] représentent environ 50 % des câbles en service, et ils sont les seuls utilisés pour les installations nouvelles, en haute tension (63 et 90 kV) comme en très haute tension (225 et 400 kV).

Ce sont des câbles unipolaires, dont la structure typique, schématisée à la figure 1.1, comprend :

- une âme en aluminium ou en cuivre;
- un écran semi-conducteur sur âme;
- une enveloppe isolante en polyéthylène;
- un écran semi-conducteur sur isolant;
- un écran métallique (généralement un tube de plomb);
- une gaine de protection extérieure (en PVC ou en polyéthylène);

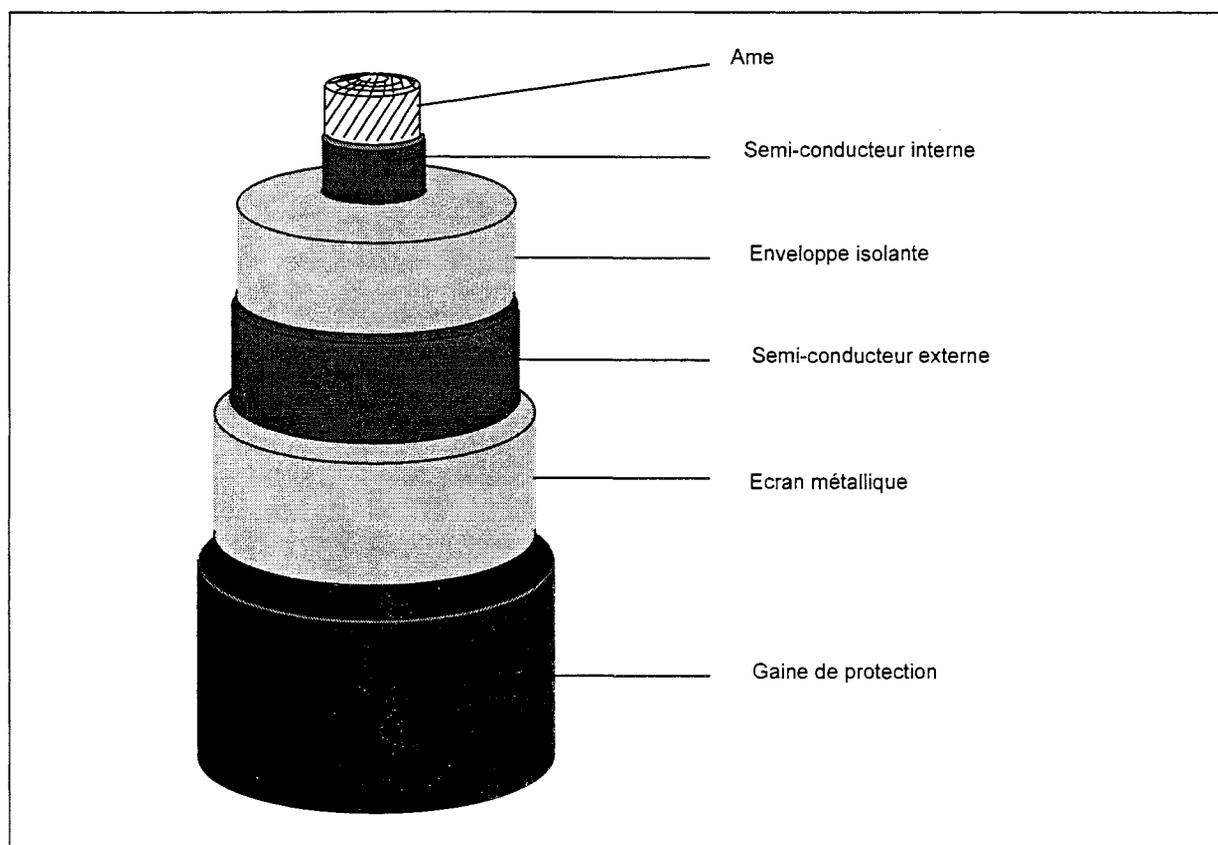


Figure 1.1 : Câble unipolaire à isolation synthétique - structure typique.

2 - 1 - AME

L'âme est en aluminium ou en cuivre.

Elle est généralement câblée, c'est-à-dire composée de plusieurs couches de fils concentriques disposés en hélice.

Les âmes de forte section (à partir de 1600 mm² en aluminium; et 1200 mm² en cuivre) sont segmentées afin de limiter les pertes par courants de Foucault, liées à l'effet de peau.

2 - 2 - ENVELOPPE ISOLANTE

L'enveloppe isolante est constituée d'un matériau synthétique extrudé [3] : polyéthylène basse densité (PEBD), polyéthylène haute densité (PEHD) ou polyéthylène réticulé (PR).

L'épaisseur de l'isolation dépend de la tension nominale du câble et du champ électrique admis au niveau des interfaces. Le champ électrique sur la face interne de l'enveloppe isolante est de l'ordre de 7 kV/mm en haute tension, 9 kV/mm en 225 kV et 14 kV/mm en 400 kV.

Elle est de l'ordre de 11 mm pour les câbles 63 kV, 14 mm pour les câbles 90 kV, 22 mm pour les câbles 225 kV et 27 mm pour les câbles 400 kV.

2 - 3 - ECRAN SEMI-CONDUCTEUR.

Les écrans semi-conducteurs servent à assurer une bonne interface entre l'isolant et l'âme ou l'écran métallique : ils préviennent les effets de pointe dus à des aspérités de l'âme ou de l'écran qui conduiraient à des élévations locales du champ électrique dans l'isolant.

Généralement extrudés en même temps que l'isolant, ils sont constitués d'un matériau isolant dans lequel sont incorporées des charges (notamment du noir de carbone) qui lui confèrent une faible résistivité électrique.

Leur épaisseur est comprise entre 1 et 2 mm.

2 - 4 - ECRAN METALLIQUE

L'écran métallique remplit plusieurs fonctions :

- * il contribue à l'évacuation du courant capacitif généré par le câble et, permet, en cas de claquage du câble, d'assurer le retour des courants de court-circuit.
- * c'est une protection de l'isolant vis-à-vis des chocs mécaniques qui peuvent survenir au cours des manipulations du câble.
- * enfin, il empêche toute pénétration d'eau au niveau de l'isolant; ce qui est essentiel car ses performances diélectriques sont très affectées par l'humidité.

Généralement, l'écran est une gaine de plomb pour les câbles 63, 90 et 225 kV.

Pour les câbles 400 kV, l'écran peut également être constitué d'une gaine de plomb.

Mais, on utilise plutôt une technologie associant une nappe de fils d'aluminium et une gaine de plomb, et on développe des écrans comprenant une nappe de fils d'aluminium ou de cuivre disposée sous une feuille d'aluminium soudée sur elle-même.

Ces technologies d'écran dites « mixtes » permettent de réduire sensiblement le poids total du câble.

Un ou des matelas de dilatation peuvent être mis en œuvre pour diminuer les contraintes mécaniques au niveau de l'écran résultant de la dilatation de l'enveloppe isolante.

Le dimensionnement de l'écran est directement lié à l'intensité du courant de court-circuit qu'il doit transiter :
 * 8 ou 10 kA en haute tension,
 * 31,5 kA en 225 kV,
 * 63 kA en 400 kV.

Les résistances des écrans sont de l'ordre de 0,2 Ohm/km en 225 kV et 0,1 Ohm/km en 400 kV.

Le tableau ci-dessous précise les épaisseurs des gaines de plomb généralement pratiquées.

Tension \ Section	240	400	630	800	1000	1200	1600	2000	2500
63	2,25	1,95	1,8	1,85	2,1	2,15	2,25		
90	3.25	2.9	2.6	2.4	2.25	2.35	2.2		
225			3.4	3.2	3.0	3.0	3.0		
400					5.6	5.4	5.2	4.9	4.7

Tableau 1.1 : Epaisseur (mm) de la gaine de plomb des câbles en fonction de la tension (kV) et de la section (mm²).

2 - 5 - GAINES DE PROTECTION

La gaine de protection, en matériau isolant synthétique extrudé, assure une protection de l'écran métallique vis-à-vis de la corrosion par les agents chimiques présents dans le sol.
 Les matériaux les plus utilisés sont le polychlorure de vinyle (PVC) et le polyéthylène (PE).

L'épaisseur varie entre 3 mm (pour les câbles 63 kV de petites sections) et 5 mm (pour les câbles 400 kV de fortes sections).

3 - LES MODES DE POSE.

Les câbles HT et THT, contrairement aux câbles MT, ne sont jamais posés directement en pleine terre.

En Haute Tension et en 225 kV, ils sont, le plus souvent, placés dans des caniveaux préfabriqués qui d'une part assurent une protection mécanique vis-à-vis des agressions externes, d'autre part contribuent à limiter les manifestations extérieures en cas de claquage d'un câble [4,5].

Dans certains cas, (passage de routes ou de voies ferrées, en centrale ...), ils sont posés dans des tuyaux en PVC enrobés de béton (pose en fourreaux)..

En 400 kV, on pratique essentiellement la pose en fourreaux, mais on envisage de développer la pose dans un enrobage de mortier maigre.

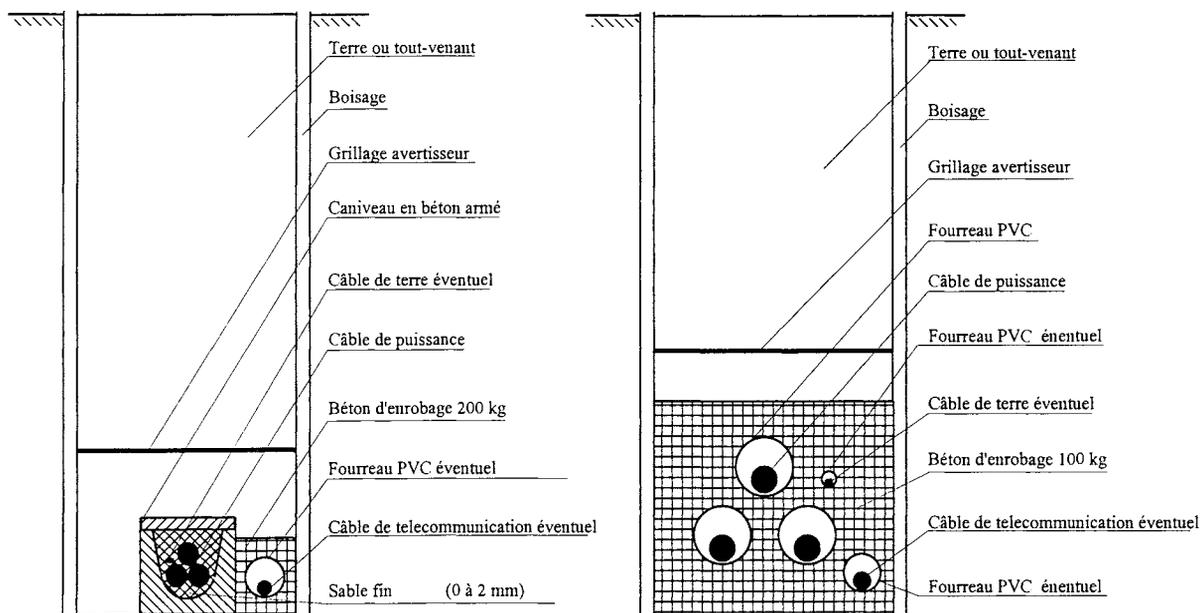
Les 3 câbles d'une liaison triphasée sont généralement posés en trèfle, mais on pratique également la pose en nappe (cf. figure 1.3).

4 - MODELISATION DES LIAISONS SOUTERRAINES.

La modélisation des liaisons souterraines a fait l'objet de nombreuses études [6-12].

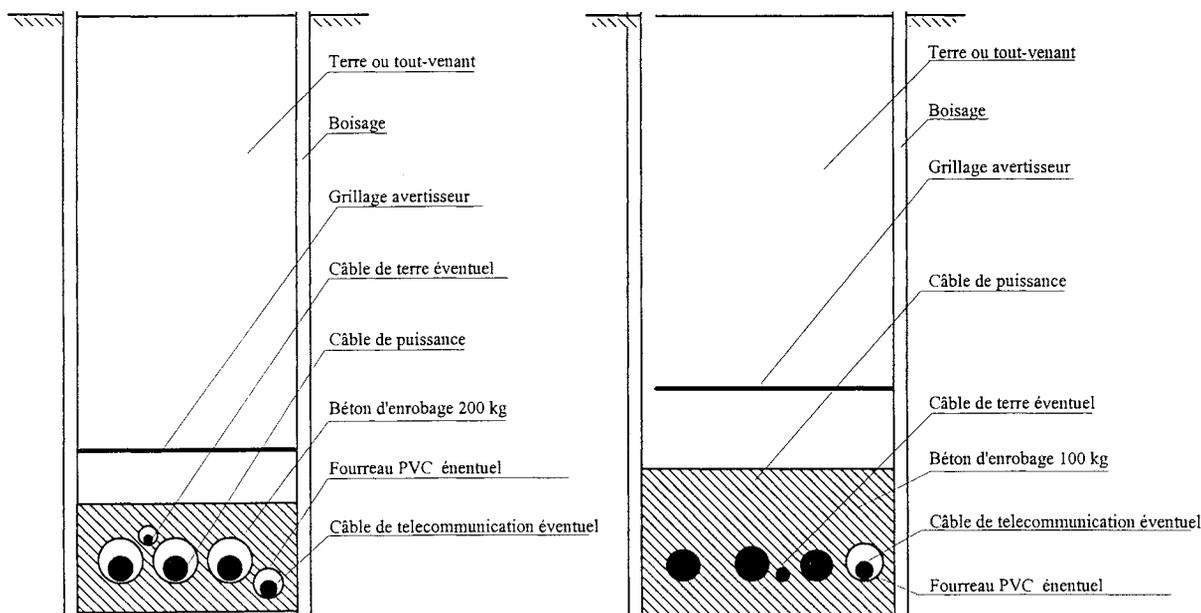
On se limite ici à une présentation du modèle généralement retenu pour les liaisons en câbles unipolaires, en supposant que tous les milieux ont une perméabilité magnétique égale à celle du vide μ_0 .

Le sol est assimilé à un conducteur d'impédance nulle, pris comme référence de potentiel.



Pose d'une liaison en caniveaux

Pose d'une liaison en trèfle en fourreaux



Pose d'une liaison en nappe en fourreaux

Pose d'une liaison en mortier maigre

Figure 1.2 : Principaux modes de pose des câbles HT et THT

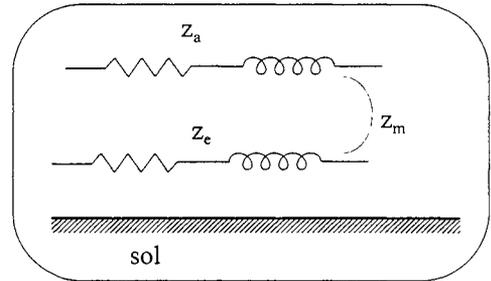
4 - 1 - IMPEDANCES LINEAIQUES.

On note z_a l'impédance propre de l'âme, z_e l'impédance propre de l'écran et z_m la mutuelle âme-écran. Ces impédances s'expriment à l'aide d'impédances élémentaires caractérisant la propagation des ondes dans les différents milieux :

$$z_a = z_1 + z_e - 2 z_4 \text{ avec : } z_1 = z_1 + z_2 + z_3$$

$$z_e = z_5 + z_6 + z_s$$

$$z_m = z_e - z_4$$



+ Impédance de l'âme

$$z_1 \approx \frac{1+j}{2\pi \cdot g_a \cdot r_1 \cdot \delta_a} \quad \text{avec } \delta_a = \sqrt{\frac{2}{g_a \cdot \omega \cdot \mu}}$$

+ Impédance liée au champ magnétique dans l'enveloppe isolante : $z_2 = j \frac{\omega \mu}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1}$

+ Impédances de la surface intérieure et extérieure de l'écran

$$z_3 \approx \frac{1+j}{2\pi \cdot g_e \cdot r_2 \cdot \delta_e} \quad z_5 \approx \frac{1+j}{2\pi \cdot g_e \cdot r_3 \cdot \delta_e} \quad \text{avec } \delta_e = \sqrt{\frac{2}{g_e \cdot \omega \cdot \mu}}$$

+ Impédance mutuelle entre les deux surfaces de l'écran : z_4 tend vers zéro à haute fréquence.

+ Impédance liée au champ magnétique dans la gaine de protection : $z_6 = j \frac{\omega \mu}{2\pi} \ln \frac{r_4}{r_3}$

+ Impédance du sol : $z_s = \frac{\omega \mu}{8} + j \frac{\omega \mu}{2\pi} \cdot \ln \frac{D}{r_4}$ avec : $D = \frac{2\sqrt{e}}{\gamma \sqrt{g_s \cdot \mu \cdot \omega}}$ et

L'impédance mutuelle entre deux câbles (entre les âmes, entre les écrans ou entre l'âme d'un câble et l'écran d'un autre) a pour expression :

$$z_s = \frac{\omega \mu}{8} + j \frac{\omega \mu}{2\pi} \cdot \ln \frac{D}{d_{ij}} \quad \text{avec : } d_{ij} \text{ distance entre les deux câbles}$$

4 - 2 - ADMITTANCES LINEAIQUES

Les admittances de l'enveloppe isolante et de la gaine des câbles s'expriment par :

$$y_1 = \frac{2\pi \cdot (g_2 + j\omega \epsilon_2)}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \approx j \frac{2\pi \cdot \omega \cdot \epsilon_2}{\ln \frac{r_2}{r_1}} ; \quad y_2 = \frac{2\pi \cdot (g_4 + j\omega \epsilon_4)}{\ln \frac{r_4}{r_3}} \approx j \frac{2\pi \cdot \omega \cdot \epsilon_4}{\ln \frac{r_4}{r_3}}$$

Avec :

- $\omega = 2\pi f$; f étant la fréquence.
- r_1 : rayon de l'âme
- r_2 : rayon intérieur de l'écran
- r_3 : rayon extérieur de l'écran
- r_4 : rayon du câble
- γ : constante de BESSEL = 1,7811
- g_a, g_e, g_s : conductivité électrique de l'âme, de l'écran, du sol
- g_2, g_4 : conductivité électrique de l'enveloppe isolante et de la gaine des câbles
- ϵ_2, ϵ_4 : permittivité diélectrique absolue de l'enveloppe isolante et de la gaine des câbles

4 - 3 - SIMPLIFICATIONS POUR LA FREQUENCE INDUSTRIELLE.

A la fréquence industrielle (50 ou 60 Hz), ces impédances peuvent s'écrire :

+ Impédance propre linéique de l'âme

$$Z_a = R_o + R_a + j \frac{\omega\mu}{2\pi} \left[\frac{1}{4} + \text{Ln} \left(\frac{D}{r_1} \right) \right] \approx R_o + R_a + j \frac{\omega\mu}{2\pi} \left[\frac{1}{4} + \text{Ln} \left(\frac{D}{r_1} \right) \right]$$

en introduisant : $R_o = \frac{\mu_r \omega}{8}$

+ Impédance mutuelle linéique âme/écran : $Z_m = R_o + j \frac{\omega\mu}{2\pi} \text{Ln} \left(\frac{D}{r_e} \right)$

+ Impédance propre linéique de l'écran : $Z_e = R_o + R_c + j \frac{\omega\mu}{2\pi} \text{Ln} \left(\frac{D}{r_e} \right)$

+ Impédance mutuelle linéique entre deux câbles : $Z_y = R_o + j \frac{\omega\mu}{2\pi} \text{Ln} \frac{D}{d_y}$

+ Impédance mutuelle linéique entre le câble central et un câble latéral : $Z_c = R_o + j \frac{\omega\mu}{2\pi} \text{Ln} \frac{D}{S}$

+ Impédance mutuelle linéique entre câbles latéraux : (trèfle) $Z_L = Z_c$

(nappe) $Z_L = R_o + j \frac{\omega\mu}{2\pi} \text{Ln} \frac{D}{2S}$

Avec :

- R_a : résistance en alternatif égale à la résistance en continu majorée des effets de peau et de proximité
- r_e : rayon moyen de l'écran
- R_c : résistance linéique de l'écran
- S : entraxe de 2 câbles adjacents

Caractéristiques techniques des câbles (valeurs typiques retenues dans les études).

	1600 mm ² Cu - 400 kV			1600 mm ² Cu - 225 kV		
r_1 (en m)	0,0248			0,0245		
r_2 (en m)	0,0580			0,0500		
r_3 (en m)	0,0632			0,0528		
r_4 (en m)	0,0680			0,0568		
r_e (en m)	0,0606			0,0514		
R_c (Ω/km)	0,1070			0,2370		
Z_e (Ω/km)	0,157 + j 0,606			0,286 + j 0,616		
Z_m (Ω/km)	0,050 + j 0,606			0,050 + j 0,616		
	S = 0,15 m S/re = 2,48	S = 0,30 m S/re = 4,95	S = 0,35 m S/re = 5,78	S = 0,15 m S/re = 2,92	S = 0,30 m S/re = 5,84	S = 0,35 m S/re = 6,81
Z_c (Ω/km)	0,05 + j 0,549	0,05 + j 0,505	0,05 + j 0,496	0,05 + j 0,549	0,05 + j 0,505	0,05 + j 0,496
Z_L (Ω/km)	0,05 + j 0,505	0,05 + j 0,462	0,05 + j 0,452	0,05 + j 0,505	0,05 + j 0,462	0,05 + j 0,452

Chapitre 2

LES DIFFERENTES TECHNIQUES DE MISE A LA TERRE DES ECRANS.

1 - INTRODUCTION.....	9
2 - GENERALITES.....	9
3 - LA MISE A LA TERRE EN UN POINT	9
3 - 1 - PRINCIPES.....	9
4 - 2 - AVANTAGE ET INCONVENIENT.	10
4 - 3 - MODALITÉS PRATIQUES.....	11
4 - LA PERMUTATION DES ECRANS.....	12
4 - 1 - PRINCIPE.	12
4 - 2 - AVANTAGES ET INCONVENIENTS.....	13
4 - 3 - MODALITÉS PRATIQUES.....	13

1 - INTRODUCTION.

Ce chapitre est consacré à une présentation des différentes techniques de mise à la terre des écrans des câbles utilisées dans les liaisons souterraines haute tension et très haute tension.

On décrit essentiellement les techniques de connexions spéciales d'écran : mise à la terre en un point et permutation d'écran [13,14].

On précise le principe de base de chacune de ces techniques, les avantages et les inconvénients, ainsi que les modalités pratiques de mise en œuvre et on indique les contraintes à prendre en compte dans le dimensionnement.

2 - GENERALITES.

Les courants alternatifs qui transitent dans les âmes des câbles induisent des tensions dans les écrans métalliques, qui dépendent notamment de l'écartement entre câbles (et donc du mode de pose).

Pour protéger le matériel et les personnes contre une montée en potentiel des écrans, on peut annuler ces tensions en assurant la mise à la terre des écrans aux extrémités et, éventuellement, en d'autres points de la liaison : c'est la mise à la terre continue ou mise à la terre en plusieurs points.

Cette solution est peu satisfaisante sur le plan économique, car elle entraîne la circulation de courants dans les écrans métalliques en régime permanent, et donc des pertes par effet Joule qui diminuent la capacité de transport.

Avec les techniques de connexions spéciales d'écran (mise à la terre en un point et permutation des écrans), il n'y a pas (ou pratiquement pas) circulation de courant dans les écrans des câbles en régime permanent.

Mais il se produit une montée en potentiel des écrans qui doit être limitée à des valeurs acceptables, aussi bien en régime permanent qu'en régime de défaut [15], et dans les régimes transitoires résultant de chocs de foudre ou de manoeuvres d'appareillages [16].

3 - LA MISE A LA TERRE EN UN POINT.

3 - 1 - PRINCIPES.

Les écrans sont liés ensemble et mis à la terre en un point seulement.

Les tensions induites dans les écrans se traduisent par des montées en potentiel des écrans.

Ceci impose la mise en œuvre de limiteurs de surtension pour protéger la gaine des câbles en régime transitoire.

Dans la cas de la mise à la terre à une extrémité :

- * les écrans sont liés ensemble à une extrémité de la liaison et reliés à la terre locale,
- * ils sont isolés à l'autre extrémité par l'intermédiaire des limiteurs de surtension,
- * un conducteur de terre est disposé parallèlement aux câbles.

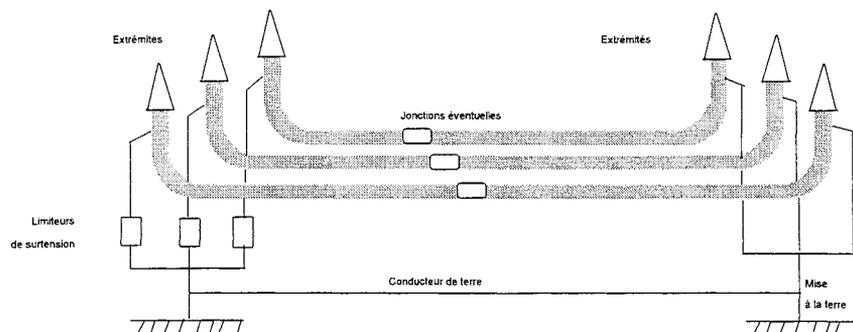


Figure 2.1 : Mise à la terre à une extrémité.

Les limiteurs de surtension (ou parafoudres) sont des résistances non linéaires (RNL) dont la caractéristique tension/courant a l'allure indiquée ci-dessous : en régime permanent, ils se comportent comme un circuit ouvert et, en régime transitoire, ils limitent la tension à une valeur donnée, appelée niveau de protection. Comme leur capacité de dissipation d'énergie est limitée, la tension qui leur est appliquée en régime de défaut doit être suffisamment faible pour que le courant qui les traverse soit modéré.

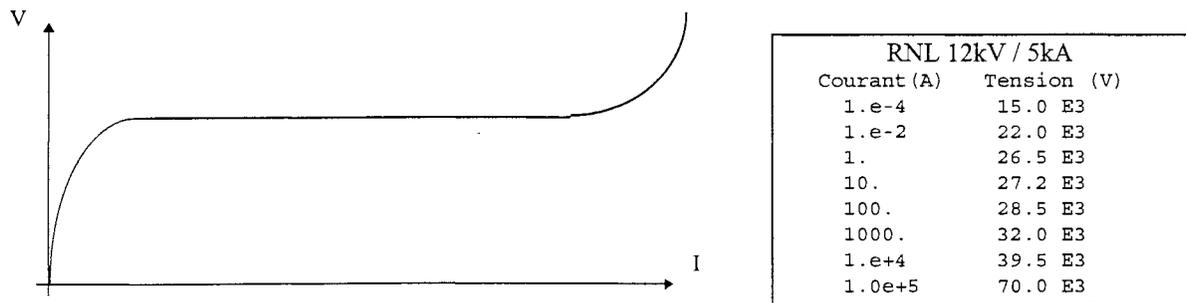


Figure 2.2 : Caractéristiques Volt - Ampère des parafoudres.

Dans la gamme la plus intéressante, jusqu'à 20 kA, la relation entre tension et courant peut être approximée par :

$$U_R(I) = 0,0025.I^3 - 0,099.I^2 + 1,64.I + 30,5$$

En régime de défaut, les écrans ne constituent donc pas un trajet de retour pour les courants homopolaires. C'est la raison pour laquelle on a recours à un conducteur de terre posé parallèlement à la liaison pour canaliser les courants homopolaires.

On pratique aussi la mise à la terre en un point intermédiaire : les écrans sont isolés aux deux extrémités de la liaison, grâce aux limiteurs de surtension d'écran. En un point intermédiaire de la liaison, des jonctions avec mise à la terre, permettent de lier ensemble les écrans dans un coffret de mise à la terre et de les relier au conducteur de terre posé parallèlement à la liaison.

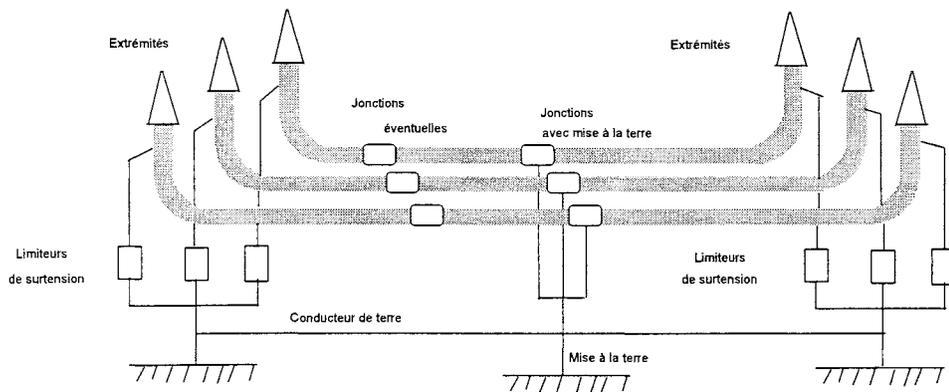


Figure 2.3 : Mise à la terre en un point intermédiaire.

On appelle section élémentaire un tronçon de liaison compris entre 2 mises à la terre, directe ou par l'intermédiaire de limiteurs de surtension.

En mise à la terre à une extrémité, la liaison comporte une seule section élémentaire.

En mise à la terre en un point intermédiaire, la liaison comprend 2 sections élémentaires.

4 - 2 - AVANTAGE ET INCONVENIENT.

Cette technique permet une utilisation optimale de la liaison du point de vue de la capacité de transport.

L'inconvénient majeur de la mise à la terre en un point est que la limitation de la montée en potentiel des écrans en régime de défaut, pour des raisons de sécurité et de fiabilité, entraîne une limitation de la longueur des liaisons réalisables (les tensions induites dans les écrans sont proportionnelles à la longueur de la section élémentaire).

4 - 3 - MODALITES PRATIQUES.

Installation des extrémités.

L'isolation des écrans au niveau d'une extrémité est schématisée à la figure 2.4.

Le limiteur de surtension de gaine est relié :

- * à l'embase de l'extrémité qui est au potentiel de l'écran du câble, par une connexion très courte.
- * au conducteur de terre, par un câble de liaison dont la longueur dépend de l'installation de l'extrémité (perchée dans un pylône ou sur une chaise, au sol).

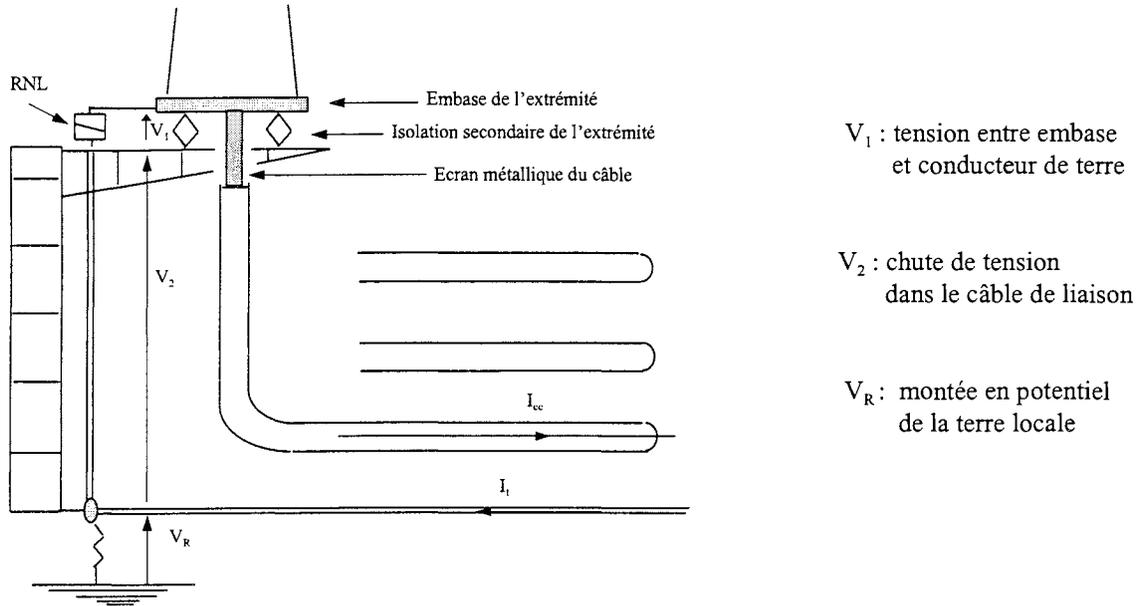


Figure 2.4 : Mise à la terre en un point - Installation

L'isolation secondaire de l'extrémité (entre embase et masse du pylône ou de la chaise) et les limiteurs de surtension sont sollicités par la tension V_1

La gaine des câbles est sollicitée par la tension : $V_1 + V_2 + V_R$

Dimensionner la mise à la terre consiste à jouer sur les différents paramètres conditionnant ces 3 tensions : V_1 , V_2 , V_R pour que les contraintes subies par l'isolation secondaire de l'extrémité et la gaine des câbles soient compatibles avec leur tenue.

Transpositions.

On a tout intérêt à réduire les tensions induites dans le conducteur de terre pour diminuer le courant de circulation qui cause des pertes Joule. C'est pour cette raison que l'on réalise :

- lorsque les câbles sont posés en trèfle, une transposition des câbles à chaque chambre de jonctions.
- lorsqu'ils sont en nappe, une transposition du conducteur de terre au milieu de chaque section élémentaire.

Caractéristiques des conducteurs de terre.

I _{cc} (kA)	63	40	31.5
Section (mm ²)	300	185	150
Diamètre (mm)	31	25.5	23
Résistance (Ohm/km)	0.0601	0.0991	0.1240
Réactance (Ohm/km)	0.7328	0.7480	0.7546

Tableau 2.1 : Caractéristiques des conducteurs de terre

4 - LA PERMUTATION DES ECRANS

4 - 1 - PRINCIPE.

Permutation continue.

La continuité électrique des écrans est interrompue à intervalles réguliers au moyen de jonctions à arrêts d'écran et des connexions sont réalisées entre les écrans afin que chacun des circuits d'écrans entoure successivement les trois conducteurs de phase (cf figure 2.5).

De cette manière, il est possible de réduire les tensions induites dans les circuits d'écrans (on compose des tensions déphasées de 120°) et corrélativement les courants de circulation qu'elles généreraient, voire de les annuler sous réserve que certaines conditions soient remplies (ce point est abordé au § 4-2).

Afin de protéger les arrêts d'écran vis-à-vis des transitoires électriques, on met en oeuvre des limiteurs de surtension aux points de permutation.

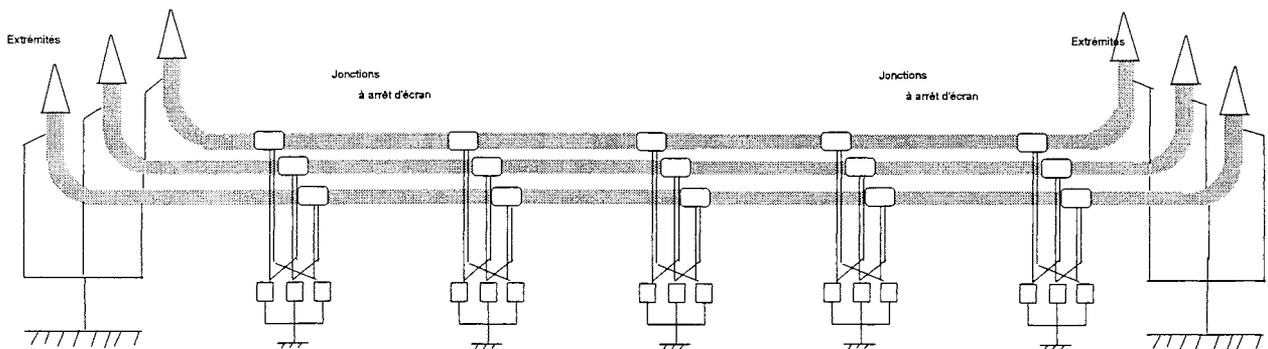


Figure 2.5 : Principe de la Permutation continue des écrans.

Section élémentaire et section ternaire.

On appelle section élémentaire un tronçon de liaison compris entre 2 points de permutation.

En référençant les sections élémentaires à partir d'une extrémité de la liaison, on appelle section ternaire la succession de 3 sections élémentaires référencées n , $n+1$, $n+2$.

Une liaison à permutation d'écrans est constituée d'une ou plusieurs sections ternaires.

Permutation ternaire.

La distribution du potentiel en régime permanent dans un circuit d'écran est donnée à la figure 2.6 dans le cas d'une pose des câbles en trèfle.

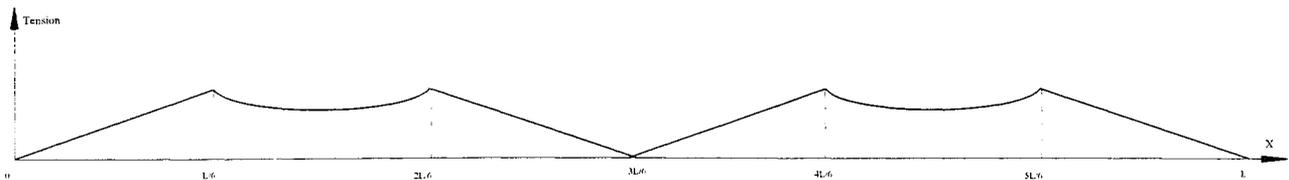


Figure 2.6 : Distribution du potentiel des écrans

Les tensions induites par les courants de phase dans les circuits d'écran d'une section ternaire sont nulles.

Il est donc possible de pratiquer une mise à la terre directe aux extrémités des sections ternaires.

On réalise alors une permutation ternaire des écrans, selon le schéma de la figure 2.7.

Lorsque les câbles sont posés en nappe, la compensation des tensions induites dans les circuits d'écran ne peut être obtenue que si les câbles sont transposés aux points de permutation

Quel que soit le mode de pose, on pratique une transposition des câbles, ce qui a pour effet de réduire les tensions induites dans d'éventuels conducteurs placés à proximité.

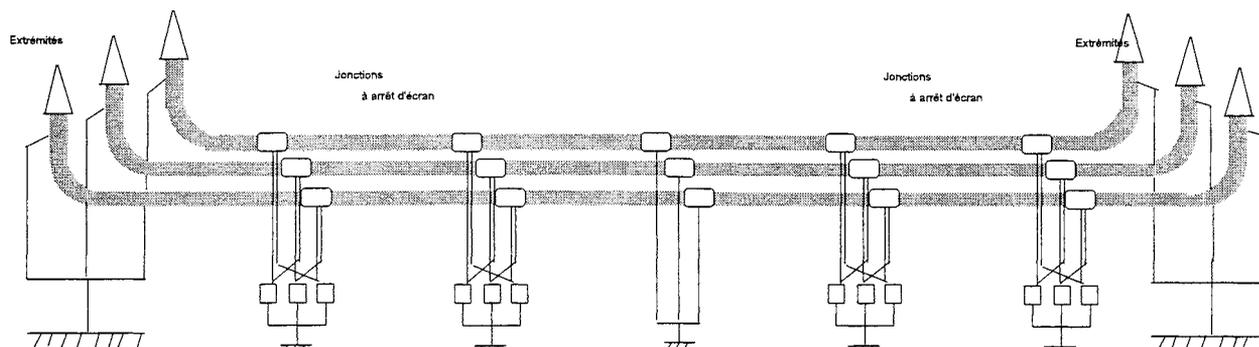


Figure 2.7 : Principe de la Permutation ternaire des écrans.

4 - 2 - AVANTAGES ET INCONVENIENTS.

Par rapport à la mise à la terre en un point, l'avantage de cette technique est que l'on s'affranchit de la limitation en longueur de liaison réalisable.

D'autre part, les écrans constituent un trajet de retour pour les courants de défaut homopolaires.

L'inconvénient est que la compensation des tensions induites suppose que la longueur des sections élémentaires et l'écartement entre câbles restent constants. Cette constance est rarement réalisée en pratique, pour des raisons diverses, telles que l'encombrement du sous-sol ou le passage de points singuliers (routes, ponts...). Toutefois, des variations, même assez importantes, ont des répercussions relativement faibles sur la réduction de capacité de transport.

Même en régime permanent, il peut y avoir circulation de courant dans les écrans, si un courant est « injecté » dans le réseau de terre par les tronçons de liaison de part et d'autre du tronçon souterrain.

4 - 3 - MODALITES PRATIQUES.

Les montées en potentiel des écrans par rapport à la terre entraînent des sollicitations de la gaine des câbles et du revêtement des jonctions.

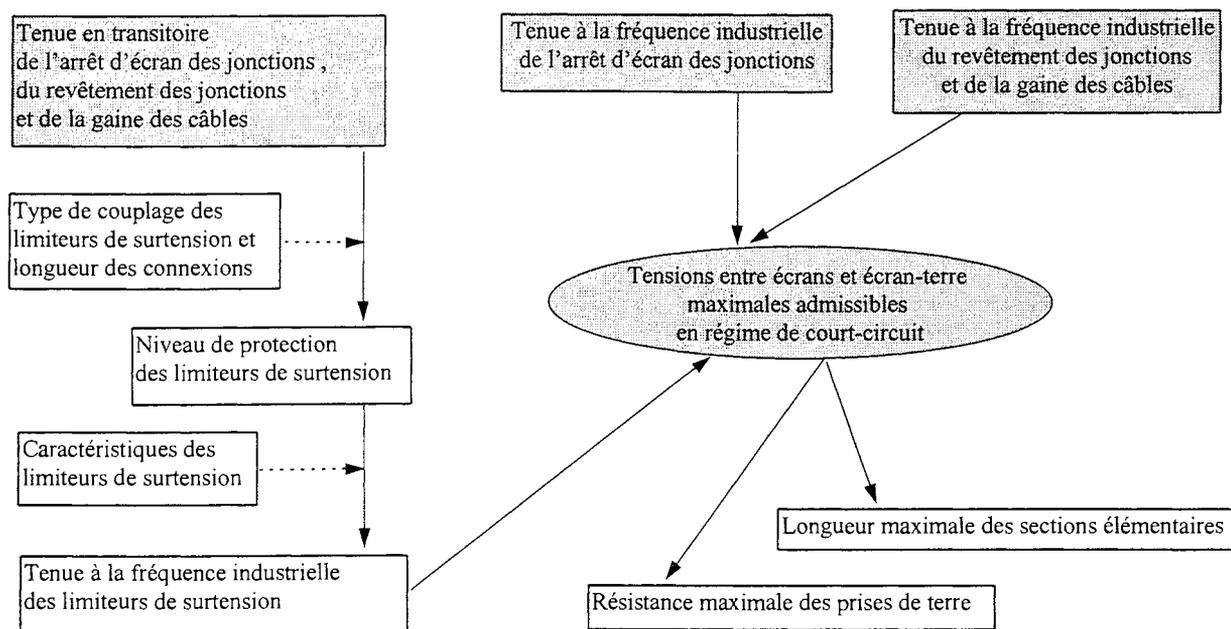
L'interruption de la continuité des écrans est réalisée au moyen de jonctions à arrêt d'écran : la tension entre écrans contraint l'arrêt d'écran.

Les limiteurs de surtension peuvent être connectés en étoile avec neutre mis à la terre ou isolé, ou bien en triangle.

Ils sont en général regroupés dans un coffret, des câbles de liaison assurant leur connexion aux écrans à l'intérieur des jonctions.

On peut considérer que le dimensionnement d'une permutation d'écran consiste à déterminer la longueur maximale des sections élémentaires et la résistance maximale des prises de terre aux extrémités des sections ternaires possibles, de manière à ce que les sollicitations des matériels dans les différents régimes de fonctionnement de la liaison soient compatibles avec les tenues spécifiées.

La démarche de dimensionnement (illustrée par le schéma ci-dessous) doit partir des contraintes en régime transitoire qui conditionnent le choix du limiteur de surtension à mettre en œuvre.



**ETUDE DES CONTRAINTES
A LA FREQUENCE INDUSTRIELLE**

Chapitre 3

LIAISONS A MISE A LA TERRE EN UN POINT

1 - INTRODUCTION.....	15
2 -TREFLE TRANSPOSE.....	16
2 - 1 - RÉGIMES PERMANENT ET COURT-CIRCUIT TRIPHASÉ.....	16
2 - 2 - RÉGIME DE COURT-CIRCUIT MONOPHASÉ EXTERNE.....	17
2 - 3 - RÉGIME DE COURT-CIRCUIT MONOPHASÉ INTERNE.	18
3 - NAPPE AVEC TRANSPOSITION DU CONDUCTEUR DE TERRE.	19
3 - 1 - RÉGIMES PERMANENT ET COURT-CIRCUIT TRIPHASÉ.....	19
3 - 2 - RÉGIME DE COURT-CIRCUIT MONOPHASÉ EXTERNE.....	20
3 - 3 - RÉGIME DE COURT-CIRCUIT MONOPHASÉ INTERNE.	21
4 - CONCLUSION.	22

1 - INTRODUCTION.

Ce chapitre s'intéresse aux montées en potentiel des écrans en régime permanent et en régime de défaut. On traite d'abord le cas de la pose des câbles en trèfle, puis celui de la pose en nappe.

Pour ce qui concerne les régimes de défaut, on s'est limité ici à 3 cas : défaut triphasé externe, défaut monophasé externe, défaut monophasé interne.

On entend par défaut externe, un défaut survenant sur le réseau en dehors de la liaison souterraine et on entend par court-circuit interne, le court-circuit dû à un claquage de câble.

On se limite à une présentation des résultats des études détaillées dans 2 documents cités en référence [17,18].

On montre que, en régime permanent et en régime de défaut triphasé, les tensions induites dans le conducteur de terre peuvent être annulées :

- par la transposition des câbles, dans le premier cas,
- par une transposition judicieuse du conducteur de terre, dans le second cas.

Si l'on fait l'hypothèse que les courants dans le réseau de terre sont négligeables, alors les montées en potentiel des écrans par rapport à la terre sont égales aux tensions induites par les courants de phase [19].

En régime de défaut monophasé, on ne peut négliger les courants dans le réseau de terre, le conducteur de terre transitant une partie du courant de retour du courant de court-circuit.

On détermine, dans ce chapitre, les montées en potentiel des écrans par rapport au conducteur de terre en fonction du courant de court-circuit et du courant dans le conducteur de terre.

Les montées en potentiel des écrans par rapport à la terre s'obtiendraient en ajoutant la montée en potentiel de la prise de terre due au courant écoulé à la terre. Ce calcul ne peut être effectué sans prendre en compte l'environnement de la liaison : le courant circulant dans le conducteur de terre et les courants écoulés à la terre par les prises de terre dépendent des réseaux de terre amont et aval de la liaison (cf chapitre 5).

Hypothèses.

Dans les régimes permanent et de court-circuit triphasé, les courants dans les âmes forment un système direct :

$$I_{a1} = I ; \quad I_{a2} = \alpha^2 \cdot I = \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot I \quad I_{a3} = \alpha \cdot I = \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot I$$

En court-circuit monophasé, les courants des phases saines sont négligés devant le courant de court-circuit.

Notations.

Z_e, Z_t : impédances propres linéiques de l'écran des câbles et du conducteur de terre.

Z_m : mutuelle linéique entre l'âme et l'écran d'un câble.

Z_c, Z_L : mutuelles linéiques entre 2 câbles adjacents et entre les 2 câbles latéraux (pour une pose en nappe).

Z_{it} : mutuelle linéique entre le conducteur de terre et le câble en position i .

r_e, r_t : rayons moyens de l'écran des câbles et du conducteur de terre.

R_e, R_t : résistances électriques de l'écran des câbles et du conducteur de terre (à 50 Hz)

L : longueur de la liaison.

S : entraxe des câbles.

S_{it} : distance entre le conducteur de terre et le câble en position i .

e_t : tension induite dans le conducteur de terre par le(s) courant(s) de phase.

E_i : chute de tension dans l'écran du câble i .

E_t : chute de tension dans le conducteur de terre.

V_{eti} : montée en potentiel de l'écran du câble i par rapport au conducteur de terre à l'extrémité isolée.

V_{et} : montée en potentiel de l'écran du câble en défaut par rapport au conducteur de terre à l'extrémité isolée.

μ, ω, D : perméabilité magnétique du vide, pulsation et profondeur du conducteur fictif de retour des courants.

2 - TREFLE TRANSPOSE.

2 - 1 - REGIMES PERMANENT ET COURT-CIRCUIT TRIPHASE.

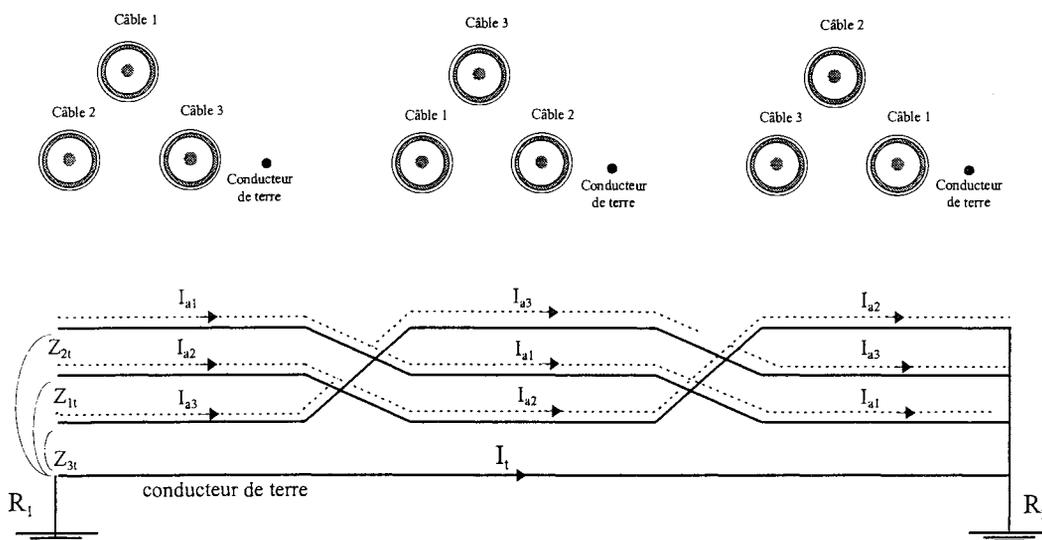


Figure 3.1 : Position des câbles en trèfle et répartition des courants.

La tension induite par les courants de phase dans le conducteur de terre est nulle :

$$e_t = (Z_{1t} + Z_{2t} + Z_{3t}) \cdot \frac{L}{3} \cdot (I_{a1} + I_{a2} + I_{a3}) = 0$$

Ceci n'implique pas nécessairement que le courant dans le conducteur de terre soit nul.

C'est le cas si la liaison souterraine est insérée dans une ligne sans câble de garde.

La loi de Kirchoff en tension appliquée à la maille intéressant le conducteur de terre s'écrivant alors :

$$e_t + (Z_t \cdot L + R_1 + R_2) \cdot I_t = 0$$

Il n'en est pas de même si la liaison souterraine est insérée dans une ligne avec câble de garde.

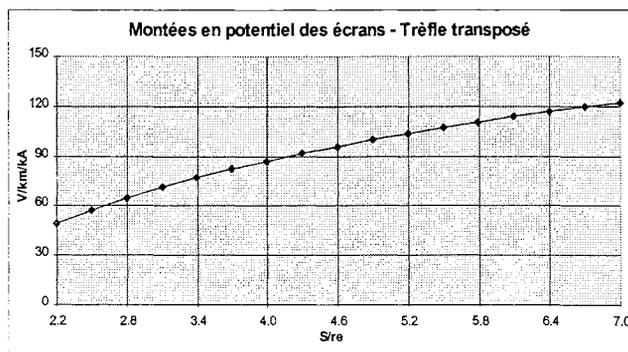
Les tensions induites dans le câble de garde ne se compensent pas car, en général, le câble de garde n'est pas équidistant des conducteurs de phase et les conducteurs de phase ne sont pas transposés. Il y a donc « injection » d'un courant dans le réseau de terre.

Néanmoins les tensions induites sont faibles et l'intensité de ce courant est limitée par les résistances des prises de terre, de sorte que, en première approximation, il peut être négligé.

Les montées en potentiel des écrans à leur extrémité isolée sont alors égales aux tensions induites dans les écrans par les courants de phase :

$$|E_1| = |E_2| = |E_3| = \frac{\mu\omega}{2\pi} L n \frac{S}{r_e} \cdot L \cdot I$$

Figure 3.2 : Tensions induites dans les écrans par les courants de phase.



2 - 2 - REGIME DE COURT-CIRCUIT MONOPHASE EXTERNE.

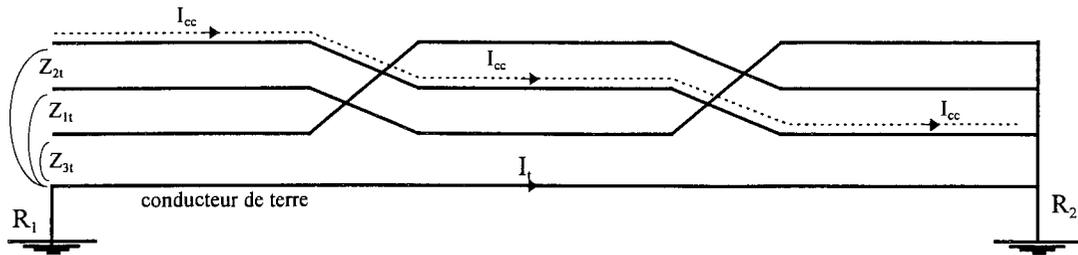


Figure 3.3 : Courant de défaut monophasé.

La tension induite dans le conducteur de terre n'est pas nulle. Il y a donc circulation de courant dans le conducteur de terre.

Les chutes de tension dans le conducteur de terre et dans les écrans sont :

$$E_t = (Z_i \cdot I_{cc} + Z_t \cdot I_t) \cdot L \quad E_1 = (Z_m \cdot I_{cc} + Z_i \cdot I_t) \cdot L \quad E_2 = E_3 = (Z_c \cdot I_{cc} + Z_i \cdot I_t) \cdot L$$

$$\text{où : } Z_i = \frac{Z_{1t} + Z_{2t} + Z_{3t}}{3} = \frac{\mu\omega}{8} + j \frac{\mu\omega}{2\pi} \text{Ln} \frac{D}{S'} \quad \text{avec : } S' = \sqrt[3]{S_{1t} \cdot S_{2t} \cdot S_{3t}}$$

Les montées en potentiel des écrans par rapport au conducteur de terre à leur extrémité isolée sont la résultante de la chute de tension dans le conducteur de terre et des chutes de tension dans les écrans :

$$V_{eti} = E_i - E_t$$

La montée en potentiel de l'écran par rapport au conducteur de terre pour la phase en défaut est :

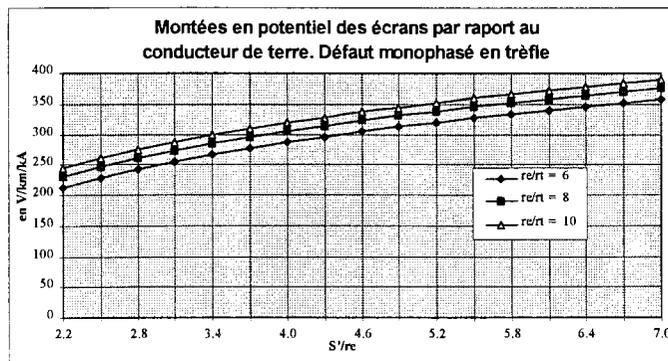
$$V_{et} = [(Z_m - Z_i) \cdot I_{cc} + (Z_i - Z_t) \cdot I_t] \cdot L$$

Si l'on fait l'approximation selon laquelle le courant dans le conducteur de terre est égal au courant de retour du courant de court-circuit :

$$I_t = -I_{cc}$$

alors :

$$E_1 = (Z_m - Z_i) \cdot L \cdot I_{cc} = j \frac{\omega\mu}{2\pi} \cdot \text{Ln} \frac{S'}{r_e} \cdot L \cdot I_{cc} \quad V_{et} = \left[R_t + j \frac{\mu\omega}{2\pi} \text{Ln} \frac{S'^2}{r_e \cdot r_t} \right] \cdot L \cdot I_{cc}$$


 Figure 3.4 : Tension écran - conducteur de terre maximale en supposant R_t négligeable.

2 - 3 - REGIME DE COURT-CIRCUIT MONOPHASE INTERNE.

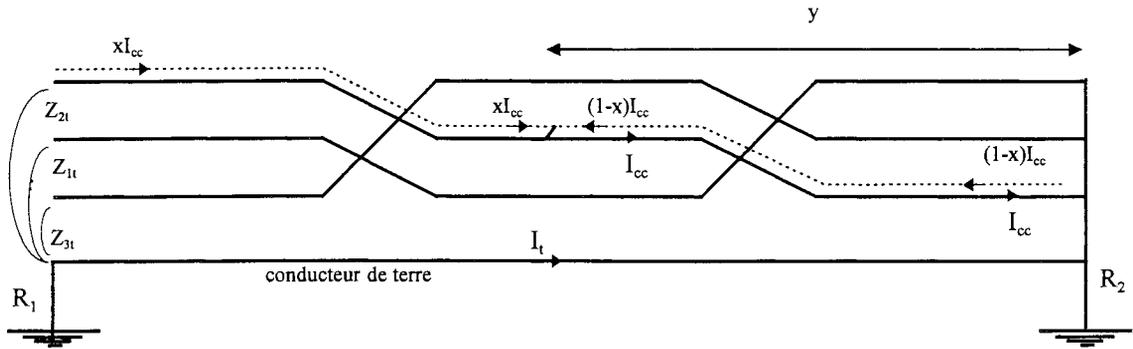


Figure 3.5 : Répartition des courants lors d'un défaut interne.

La chute de tension E_1 dans l'écran du câble en défaut, les chutes de tension E_2 et E_3 dans les écrans des câbles sains et la chute de tension E_t dans le conducteur de terre s'expriment par (en fonction de la position du défaut définie par y) :

$$E_1 = \left\{ \left[xZ_m + (Z_e - Z_m) \frac{y}{L} \right] I_{cc} + Z_t I_t \right\} \cdot L$$

$$E_2 = E_3 = (Z_e \cdot x \cdot I_{cc} + Z_t \cdot I_t) \cdot L$$

$$E_t = (Z_t \cdot x \cdot I_{cc} + Z_t \cdot I_t) \cdot L$$

Les montées en potentiel des écrans par rapport au conducteur de terre sont donc :

$$V_{et1} = \left\{ \left[(Z_m - Z_t) \cdot x + (Z_e - Z_m) \frac{y}{L} \right] I_{cc} + (Z_t - Z_t) \cdot I_t \right\} \cdot L$$

$$V_{et2} = V_{et3} = [-(Z_t - Z_e) \cdot x \cdot I_{cc} + (Z_t - Z_t) \cdot I_t] \cdot L$$

La montée en potentiel de l'écran de la phase en défaut est toujours supérieure à celle des phases saines.

Si l'on fait l'approximation selon laquelle le courant dans le conducteur de terre est égal au courant de retour du courant de court-circuit :

$$I_t \approx -x I_{cc}$$

alors :

$$V_{et1} = \left\{ \left[R_e \cdot \frac{y}{L} + x \cdot R_t \right] + j \cdot x \cdot (X_m - 2X_i + X_t) \right\} \cdot L \cdot I_{cc}$$

où R_j et X_j représentent les parties réelle et imaginaire d'une grandeur de même nom Z_j .

Il est clair que la tension maximale est obtenue lorsque $y = L$. On a alors :

$$V_{\max} = \left[(R_e + x \cdot R_t) + j \cdot \left(x \cdot \frac{\mu\omega}{2\pi} L n \frac{S^2}{r_e r_t} \right) \right] \cdot L \cdot I_{cc}$$

Le maximum maximum est atteint lorsque :

- * l'endroit du défaut est proche de l'extrémité de la liaison souterraine.
- * la totalité du courant de défaut arrive au niveau de l'extrémité isolée.
- * la totalité du courant de défaut revient par le conducteur de terre.

3 - NAPPE AVEC TRANSPOSITION DU CONDUCTEUR DE TERRE.

3 - 1 - REGIMES PERMANENT ET COURT-CIRCUIT TRIPHASE.

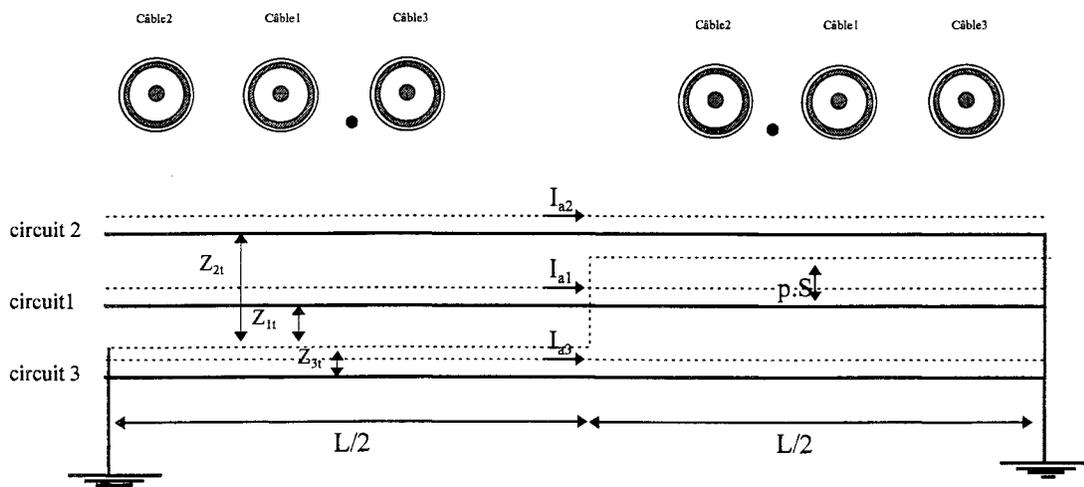


Figure 3.6 : Position des câbles en nappe et répartition des courants

La tension induite dans le conducteur de terre est :

$$e_t = \frac{L}{2} \cdot (Z_{1t} \cdot I_{a1} + Z_{2t} \cdot I_{a2} + Z_{3t} \cdot I_{a3}) + \frac{L}{2} \cdot (Z_{1t} \cdot I_{a1} + Z_{3t} \cdot I_{a2} + Z_{2t} \cdot I_{a3}) = \frac{L}{2} \cdot [2 \cdot Z_{1t} - (Z_{2t} + Z_{3t})] \cdot I_{a1}$$

$e_t = 0$ si la transposition du conducteur de terre est telle que : $Z_{1t} = \frac{Z_{2t} + Z_{3t}}{2}$

Ceci est réalisé si $p = \frac{\sqrt{2}}{2} \approx 0,7$ ce qui implique : $1 - p^2 = p^2$. En effet, alors :

$$2 \cdot Z_{1t} - Z_{2t} - Z_{3t} = j \frac{\omega \mu}{2\pi} \left[Ln \left(\frac{D}{p \cdot S} \right)^2 - Ln \frac{D}{S + p \cdot S} - Ln \frac{D}{S - p \cdot S} \right] = j \frac{\omega \mu}{2\pi} Ln \frac{1 - p^2}{p^2} = 0$$

Si l'on néglige le courant dans le conducteur de terre, les montées en potentiel des écrans à leur extrémité isolée sont alors égales aux tensions induites dans les écrans par les courants de phase :

$$E_1 = [Z_m \cdot I_{a1} + Z_c \cdot (I_{a2} + I_{a3})] \cdot L = (Z_m - Z_c) \cdot L \cdot I_{a1}$$

$$E_2 = [Z_m \cdot I_{a2} + Z_c \cdot I_{a1} + Z_L \cdot I_{a3}] \cdot L = (\alpha^2 \cdot Z_m + Z_c + \alpha \cdot Z_L) \cdot L \cdot I_{a1}$$

$$E_3 = [Z_m \cdot I_{a3} + Z_c \cdot I_{a1} + Z_L \cdot I_{a2}] \cdot L = (\alpha \cdot Z_m + Z_c + \alpha^2 \cdot Z_L) \cdot L \cdot I_{a1}$$

$$|E_1| = \frac{\mu \omega}{2\pi} Ln \frac{S}{r_e} \cdot L \cdot I$$

$$|E_2| = |E_3| = \frac{\mu \omega}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{4} Ln^2 \frac{S}{2r_e} + \frac{3}{4} Ln^2 \frac{2S}{r_e}} \cdot L \cdot I$$

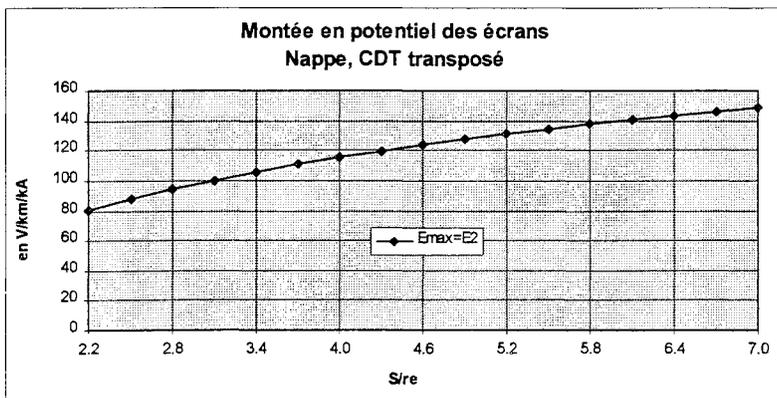


Figure 3.7 : Montée en potentiel maximale des écrans - câbles en nappe.

3 - 2 - REGIME DE COURT-CIRCUIT MONOPHASE EXTERNE.

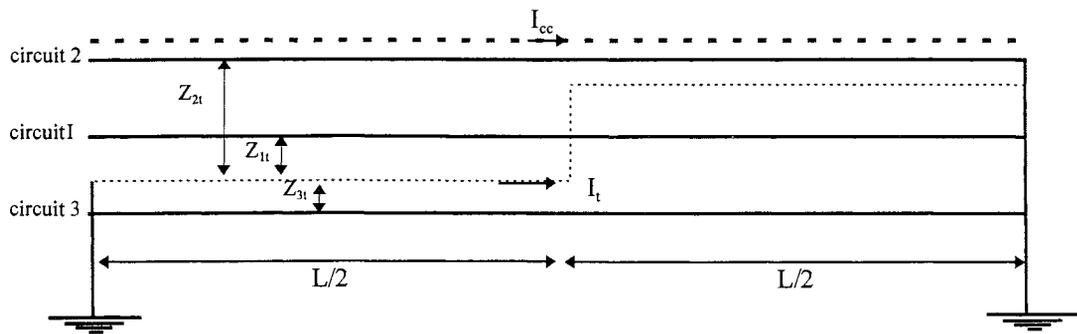


Figure 3.8 : Courant de défaut monophasé externe.

La chute de tension dans le conducteur de terre est :

$$E_t = (Z_j \cdot I_{cc} + Z_t \cdot I_t) \cdot L \quad \text{où : } Z_j = \frac{Z_{21} + Z_{31}}{2} = Z_{11} = \frac{\mu\omega}{8} + j \frac{\mu\omega}{2\pi} \text{Ln} \frac{D}{0,7.S}$$

Tableau 3.1 : Chutes de tension dans les écrans selon la phase en défaut

Phase en défaut	1 (milieu)	2 (latérale)	3 (latérale)
E ₁	$(Z_m \cdot I_{cc} + Z_{11} \cdot I_t) \cdot L$	$(Z_c \cdot I_{cc} + Z_{11} \cdot I_t) \cdot L$	$(Z_c \cdot I_{cc} + Z_{11} \cdot I_t) \cdot L$
E ₂	$(Z_c \cdot I_{cc} + Z_j \cdot I_t) \cdot L$	$(Z_m \cdot I_{cc} + Z_j \cdot I_t) \cdot L$	$(Z_l \cdot I_{cc} + Z_j \cdot I_t) \cdot L$
E ₃	$(Z_c \cdot I_{cc} + Z_j \cdot I_t) \cdot L$	$(Z_l \cdot I_{cc} + Z_j \cdot I_t) \cdot L$	$(Z_m \cdot I_{cc} + Z_j \cdot I_t) \cdot L$

On en déduit aisément les montées en potentiel des écrans par rapport au conducteur de terre.

La montée en potentiel de l'écran par rapport au conducteur de terre pour la phase en défaut est :

$$V_{et} = [(Z_m - Z_j) \cdot I_{cc} + (Z_j - Z_t) \cdot I_t] \cdot L$$

On retrouve une expression similaire au cas de la pose en trèfle.

La courbe ci-dessous est tracée en supposant R_i négligeable. S' = 0,7.S

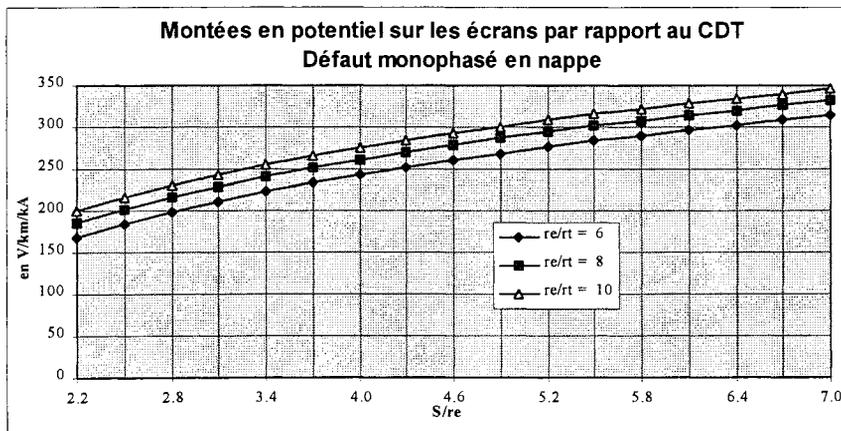


Figure 3.9 : Tension écran - conducteur de terre maximale en supposant R_i négligeable

3 - 3 - REGIME DE COURT-CIRCUIT MONOPHASE INTERNE.

- Court-circuit phase 1 : $I_{a1} = I_{cc}$; $I_2 = I_3 = 0$

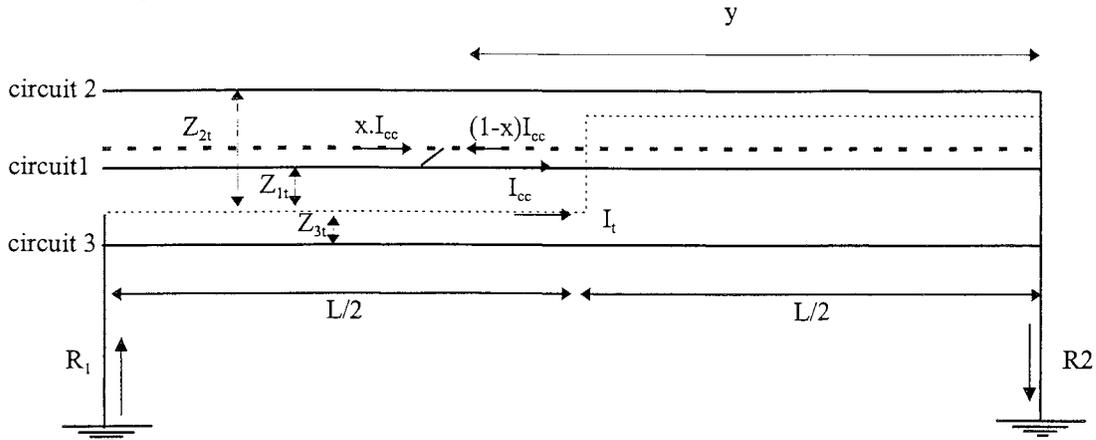


Figure 3.10 : Répartition des courants lors d'un défaut du câble central.

La chute de tension E_1 dans l'écran du câble en défaut, les chutes de tension E_2 et E_3 dans les écrans des câbles sains et la chute de tension E_t dans le conducteur de terre s'expriment par :

$$E_1 = \left\{ \left[xZ_m + (Z_c - Z_m) \frac{y}{L} \right] \cdot I_{cc} + Z_{1t} I_t \right\} \cdot L$$

$$E_2 = E_3 = (Z_c \cdot x \cdot I_{cc} + Z_j \cdot I_t) \cdot L$$

$$E_t = (Z_{1t} \cdot x \cdot I_{cc} + Z_t \cdot I_t) \cdot L$$

- Court-circuit phase 2 : $I_{a2} = I_{cc}$; $I_1 = I_3 = 0$

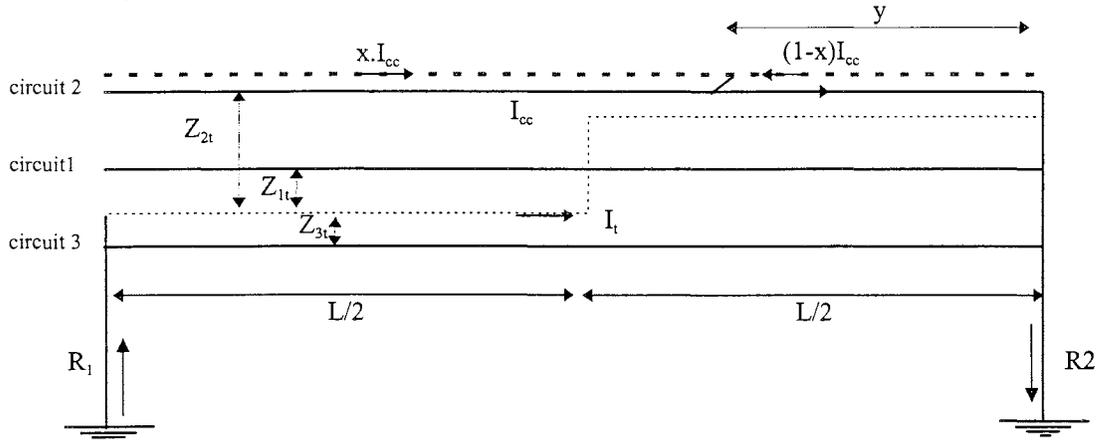


Figure 3.11 : Répartition des courants lors d'un défaut d'un câble latéral.

$$E_2 = \left\{ \left[xZ_m + (Z_c - Z_m) \frac{y}{L} \right] \cdot I_{cc} + Z_j \cdot I_t \right\} \cdot L$$

$$E_1 = (Z_c \cdot x \cdot I_{cc} + Z_{1t} \cdot I_t) \cdot L$$

$$E_3 = (Z_{1t} \cdot x \cdot I_{cc} + Z_j \cdot I_t) \cdot L$$

$$E_t = (Z_j \cdot x \cdot I_{cc} + Z_t \cdot I_t) \cdot L$$

Quelle que soit la phase en défaut, la montée en potentiel de l'écran de la phase en défaut par rapport au conducteur de terre est toujours supérieure à celle des phases saines. Elle a pour expression :

$$V_{cr} = \left\{ \left[x(Z_m - Z_{1t}) + (Z_c - Z_m) \frac{y}{L} \right] \cdot I_{cc} + (Z_{1t} - Z_t) \cdot I_t \right\} \cdot L$$

On retrouve une expression similaire au cas de la pose en trèfle.

4 - CONCLUSION.

En régime permanent et en régime de court-circuit triphasé, les montées en potentiel des écrans sont égales aux tensions entre écrans et conducteur de terre. Leur amplitude se calcule à l'aide des formules ci-dessous.

	Trèfle	Nappe
Régime Permanent I : intensité du courant de phase Court-circuit triphasé I : intensité du courant transitant dans la liaison.	$\frac{\omega\mu}{2\pi} \cdot Ln \frac{S}{r_e} \cdot L \cdot I$	$\frac{\omega\mu}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left(Ln \frac{S}{2r_e} \right)^2 + \frac{3}{4} \cdot \left(Ln \frac{2 \cdot S}{r_e} \right)^2} \cdot L \cdot I$

Tableau 3.2 : Contraintes des régimes triphasés

Pour le régime de défaut monophasé, le tableau ci-dessous précise les expressions de :

* la chute de tension E dans l'écran le plus sollicité,

* la tension maximale entre écran et conducteur de terre V_{et} ,

dans l'hypothèse où la fraction du courant de court-circuit arrivant côté écrans isolés (notée $x \cdot I_{cc}$) revient par le conducteur de terre.

Cette hypothèse conduit en général à majorer les surtensions entre écran et conducteur de terre (elles sont une fonction croissante du module du courant de retour et dépendent peu de sa phase).

Défaut Monophasé	E	Vet
externe	$j \cdot \frac{\omega\mu}{2\pi} \cdot Ln \frac{S'}{r_e} \cdot L \cdot x \cdot I_{cc}$	$\left[R_t + j \cdot \frac{\omega\mu}{2\pi} \cdot Ln \left(\frac{S'^2}{r_t r_e} \right) \right] \cdot L \cdot x \cdot I_{cc}$
interne	$\left[R_e + j \cdot x \cdot \frac{\omega\mu}{2\pi} \cdot Ln \frac{S'}{r_e} \right] \cdot L \cdot I_{cc}$	$\left[(R_e + x \cdot R_t) + j \cdot x \cdot \frac{\omega\mu}{2\pi} \cdot Ln \left(\frac{S'^2}{r_e r_t} \right) \right] \cdot L \cdot I_{cc}$
Avec $S' = \sqrt[3]{S_{11} \cdot S_{21} \cdot S_{31}}$ en trèfle et $S' = \frac{S}{\sqrt{2}}$ en nappe		

Tableau 3.3 : Contraintes des régimes de défaut monophasé

Chapitre 4

LIAISONS A PERMUTATION DES ECRANS

CONTRAINTES A LA FREQUENCE INDUSTRIELLE

1 - INTRODUCTION.....	23
2 - REGIMES PERMANENT ET COURT-CIRCUIT TRIPHASE EXTERNE	24
2 - 1 - DISTRIBUTION DU POTENTIEL DES ÉCRANS.....	24
2 - 2 - TENSIONS MAXIMALES APPARAISSANT SUR LES ÉCRANS.....	25
2 - 3 - TENSIONS MAXIMALES ENTRE ECRANS.....	25
3 - REGIME DE DEFAUT MONOPHASE EXTERNE.	26
3 - 1 - DISTRIBUTION DU POTENTIEL DANS LES ÉCRANS.....	26
3 - 2 - TENSION ENTRE ÉCRANS AUX POINTS DE PERMUTATION.	27
3 - 3 - CHUTE DE TENSION DANS LES ÉCRANS À LA TROISIÈME SECTION ÉLÉMENTAIRE.....	28
3 - 4 - CHUTE DE TENSION DANS LES ÉCRANS POUR UNE SECTION TERNAIRE.....	28
3 - 5 - INTERPRETATIONS.	28
4 - REGIME DE DEFAUT MONOPHASE INTERNE.	30
4 - 1 - PRINCIPES.....	30
4 - 2 - MISE EN ÉQUATIONS.....	30
4 - 3 - DÉTERMINATION DES COURANTS ET DE LA CHUTE DE TENSION DANS LES ÉCRANS.	31
4 - 4 - CHUTE DE TENSION DANS LES ÉCRANS.	32
4 - 5 - TENSIONS ENTRE ÉCRANS AU NIVEAU DES ARRÊTS D'ÉCRAN.	33
5 - CONCLUSION	34
TENSIONS MAXIMALES APPARAISSANT SUR LES ÉCRANS.	34
TENSIONS ENTRE ÉCRANS	34

1 - INTRODUCTION.

Ce chapitre précise la distribution du potentiel dans les écrans d'une liaison à permutation d'écrans en régime permanent et dans les différents régimes de défaut :

- défaut triphasé externe,
- défaut monophasé externe,
- défaut monophasé interne,

Comme pour le chapitre précédent, on se limite à une présentation des résultats des études, les calculs détaillés étant explicités dans 2 document cités en référence [17,18].

Pour le régime permanent et le régime de défaut triphasé, on détermine les montées en potentiel des écrans aux points de permutation, qui sont pratiquement égales aux tensions induites par les courants de phase. On explicite également les tensions entre écrans aux points de permutation.

Pour les régimes de défaut monophasé, on explicite les chutes de tension dans les circuits d'écran en fonction du courant de court-circuit et du courant dans les écrans.

Comme dans le cas des liaisons à mise à la terre en un point, les montées en potentiel des écrans par rapport à la terre ne peuvent être calculées sans prendre en compte l'environnement de la liaison.

Par contre, les tensions entre écrans peuvent être explicitées car elles sont indépendantes du trajet suivi par le courant de retour du courant de court-circuit.

Hypothèses et notations.

Dans les régimes permanent et de court-circuit triphasé, les courants dans les âmes forment un système direct :

$$I_{a1} = I; \quad I_{a2} = \alpha^2 \cdot I = \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot I \quad I_{a3} = \alpha \cdot I = \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot I$$

En court-circuit monophasé, les courants des phases saines sont négligés devant le courant de court-circuit.

On suppose que les longueurs des sections élémentaires de la liaison sont identiques entre elles, et égales à un tiers de la longueur de la section ternaire.

On note :

- Z_e : impédance propre linéique de l'écran des câbles
 Z_m : mutuelle linéique entre l'âme et l'écran d'un câble.
 Z_c, Z_L : mutuelles linéiques entre 2 câbles adjacents et entre les 2 câbles latéraux (pour une pose en nappe).
 r_e : rayon moyen de l'écran des câbles.
 R_e, R_t : résistances électriques de l'écran des câbles et du conducteur de terre (à 50 Hz)
- L : longueur de la liaison.
 ℓ : longueur des sections élémentaires
 S : entraxe des câbles.

pour chaque circuit d'écran i:

- $E(i,k)$ la chute de tension dans la k-ième section élémentaire,
- $E_i[k]$ la chute de tension dans les sections élémentaires 1 à k,
- $V_{ij}(k)$ la tension entre écrans i et j au point de permutation k
- E_i la montée en potentiel du circuit d'écran i aux points de permutation en régime triphasé.

μ, ω : perméabilité magnétique du vide et pulsation.

2 - REGIMES PERMANENT ET COURT-CIRCUIT TRIPHASE EXTERNE

2 - 1 - DISTRIBUTION DU POTENTIEL DES ECRANS

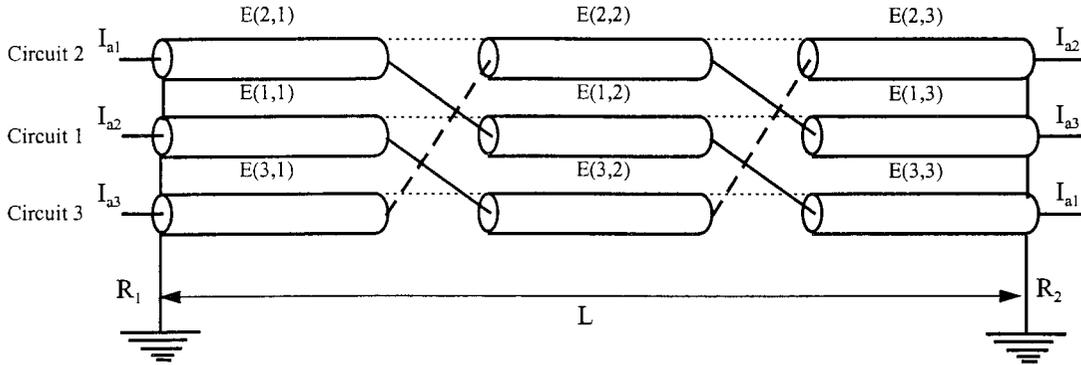


Figure 4.1 : Schéma de la liaison

Tensions induites dans les écrans dans chaque section élémentaire.

* pour le circuit d'écran 1 :

$$E(1,1) = [Z_m I_{a2} + Z_c (I_{a1} + I_{a3})] \ell = [Z_m - Z_c] \alpha^2 \cdot \ell I$$

$$E(1,2) = [Z_m I_{a1} + Z_c (I_{a2} + I_{a3})] \ell = [Z_m - Z_c] \cdot \ell I$$

$$E(1,3) = [Z_m I_{a3} + Z_c (I_{a1} + I_{a2})] \ell = [Z_m - Z_c] \cdot \alpha \ell I$$

$$E_1[1] = [Z_m - Z_c] \alpha^2 \cdot \ell I_{a1}$$

$$E_1[2] = [Z_m - Z_c] (1 + \alpha^2) \cdot \ell I_{a1}$$

$$E_1[3] = 0$$

* pour le circuit d'écran 2 :

$$E(2,1) = [Z_m I_{a1} + Z_c I_{a2} + Z_L I_{a3}] \ell = [Z_m + \alpha^2 Z_c + \alpha Z_L] \cdot \ell I$$

$$E(2,2) = [Z_m I_{a3} + Z_c I_{a1} + Z_L I_{a2}] \ell = [Z_m + \alpha^2 Z_c + \alpha Z_L] \alpha \cdot \ell I$$

$$E(2,3) = [Z_m I_{a2} + Z_c I_{a3} + Z_L I_{a1}] \ell = [Z_m + \alpha^2 Z_c + \alpha Z_L] \alpha^2 \cdot \ell I$$

$$E_2[1] = [Z_m + \alpha^2 Z_c + \alpha Z_L] \cdot \ell I$$

$$E_2[2] = [Z_m + \alpha^2 Z_c + \alpha Z_L] \cdot (1 + \alpha) \cdot \ell I$$

$$E_2[3] = 0$$

* pour le circuit d'écran 3 :

$$E(3,1) = [Z_m I_{a3} + Z_c I_{a2} + Z_L I_{a1}] \ell = [Z_m + \alpha Z_c + \alpha^2 Z_L] \cdot \alpha \cdot \ell I$$

$$E(3,2) = [Z_m I_{a2} + Z_c I_{a1} + Z_L I_{a3}] \ell = [Z_m + \alpha Z_c + \alpha^2 Z_L] \cdot \alpha^2 \cdot \ell I$$

$$E(3,3) = [Z_m I_{a1} + Z_c I_{a3} + Z_L I_{a2}] \ell = [Z_m + \alpha Z_c + \alpha^2 Z_L] \cdot \ell I$$

$$E_3[1] = [Z_m + \alpha Z_c + \alpha^2 Z_L] \cdot \alpha \ell I$$

$$E_3[2] = [Z_m + \alpha Z_c + \alpha^2 Z_L] \cdot (\alpha + \alpha^2) \cdot \ell I$$

$$E_3[3] = 0$$

Dans chaque circuit d'écran, la tension totale induite dans une section ternaire par les courants circulant dans les âmes est la somme des tensions induites dans chacune des 3 sections élémentaires.

Ces tensions induites sont égales en module et déphasées de 120°, de sorte que leur somme est nulle.

Il s'ensuit qu'il n'y a pas de circulation de courant dans les écrans .

$$I_{e1} = I_{e2} = I_{e3} = 0$$

La tension dans les circuits d'écran a l'allure indiquée ci-après.

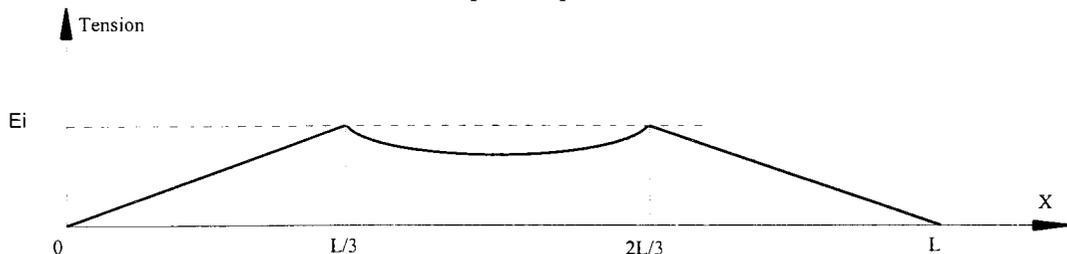


Figure 4.2 : Distribution du potentiel des écrans

2 - 2 - TENSIONS MAXIMALES APPARAISSANT SUR LES ECRANS.

Quel que soit le mode de pose : $E_1 = [Z_m - Z_c] \cdot \ell \cdot I = \frac{\mu\omega}{2\pi} L_n \frac{S}{r_c} \ell \cdot I$

En trèfle : $E_2 = E_3 = E_1$

En nappe, les montées en potentiel sur les circuits d'écran 2 et 3 sont supérieures ; elles ont pour expression :

$$E_2 = E_3 = \left[\left(Z_m - \frac{Z_c + Z_L}{2} \right)^2 + \frac{3}{4} (Z_c - Z_L)^2 \right] \cdot \ell \cdot I = \frac{\mu\omega}{2\pi} \sqrt{Ln^2 \frac{\sqrt{2}S}{r_c} + \frac{3}{4} Ln^2 2} \ell \cdot I$$

2 - 3 - TENSIONS MAXIMALES ENTRE ECRANS.

Au point de permutation 1 :

$$\begin{aligned} V_{12}(1) &= [(\alpha^2 - 1) \cdot Z_m - 2\alpha^2 \cdot Z_c - \alpha \cdot Z_L] \cdot \ell \cdot I \\ V_{23}(1) &= [(1 - \alpha) \cdot Z_m - (1 - \alpha) \cdot Z_L] \cdot \ell \cdot I = (Z_m - Z_L) \cdot (1 - \alpha) \cdot \ell \cdot I \\ V_{13}(1) &= [(\alpha^2 - \alpha) \cdot Z_m - 2\alpha^2 \cdot Z_c - Z_L] \cdot \ell \cdot I \end{aligned}$$

Au point de permutation 2 :

$$\begin{aligned} V_{12}(2) &= [(\alpha^2 - \alpha) \cdot Z_m + 2\alpha \cdot Z_c - (\alpha + \alpha^2) Z_L] \cdot \ell \cdot I = -\frac{1}{\alpha} \cdot V_{12}(1) \\ V_{23}(2) &= (Z_m - Z_L) \cdot (1 - \alpha^2) \cdot \ell \cdot I \\ V_{13}(2) &= [(1 - \alpha) \cdot Z_m + 2\alpha \cdot Z_c - (1 + \alpha) Z_L] \cdot \ell \cdot I = -\frac{1}{\alpha} \cdot V_{13}(1) \end{aligned}$$

Dans le cas d'une pose en nappe.

$$|V_{12}(1)| = |V_{12}(2)| = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\mu\omega}{2\pi} \sqrt{Ln^2 \left(\frac{S}{2r_c} \right) + 3Ln^2 \left(\frac{S \cdot \sqrt{2}}{r_c} \right)} \ell \times I$$

$$|V_{13}(1)| = |V_{13}(2)| = \frac{\mu\omega}{2\pi} \sqrt{3Ln^2 \frac{S}{r_c} + Ln^2 2} \ell \times I$$

$$|V_{23}(1)| = |V_{23}(2)| = \sqrt{3} \frac{\mu\omega}{2\pi} Ln \frac{2S}{r_c} \ell \times I$$

Cette dernière tension est la plus élevée des trois.

Dans le cas d'une pose en trèfle.

$$v = |V_{12}(1)| = |V_{23}(1)| = |V_{31}(1)| = |V_{12}(2)| = |V_{23}(2)| = |V_{31}(2)| = \sqrt{3} \frac{\mu\omega}{2\pi} Ln \frac{S}{r_c} \ell \times I$$

Ces maxima ne dépendent que du rapport S/re.

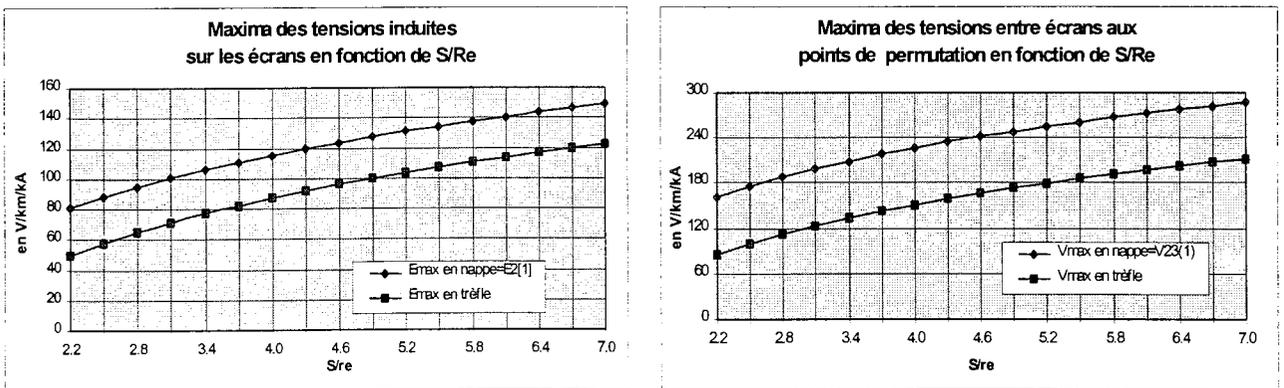


Figure 4.3 : Maxima des tensions induites et des tensions entre écrans en régimes permanent ou défaut triphasé

3 - REGIME DE DEFAUT MONOPHASE EXTERNE.

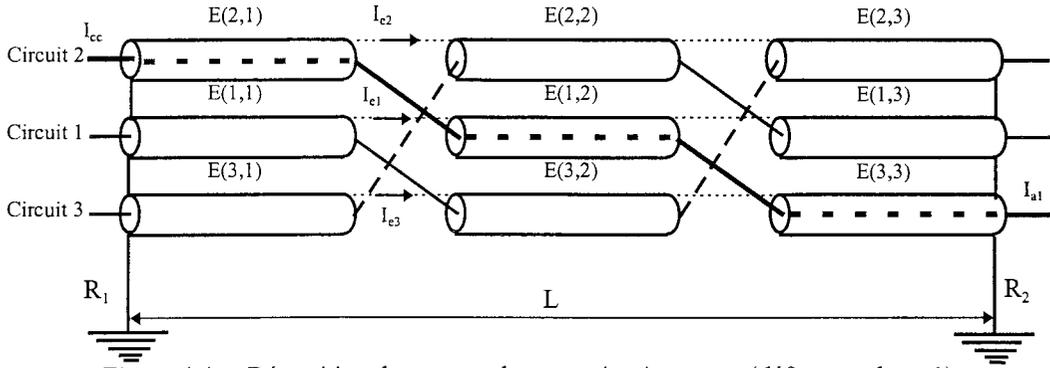


Figure 4.4 : Répartition du courant de court-circuit externe (défaut en phase 1)

3 - 1 - DISTRIBUTION DU POTENTIEL DANS LES ECRANS.

Dans le cas du défaut affectant la phase 1 :

Pour le circuit d'écran 1, on peut écrire :

$$\begin{aligned} E(1,1) &= [Z_c \cdot I_{cc} + Z_e \cdot I_{e1} + Z_c \cdot (I_{e2} + I_{e3})] \ell \\ E(1,2) &= [Z_m \cdot I_{cc} + Z_e \cdot I_{e1} + Z_c \cdot (I_{e2} + I_{e3})] \ell \\ E(1,3) &= [Z_c \cdot I_{cc} + Z_c \cdot I_{e1} + Z_c \cdot (I_{e2} + I_{e3})] \ell \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_1[1] &= [Z_c \cdot I_{cc} + Z_e \cdot I_{e1} + Z_c \cdot (I_{e2} + I_{e3})] \ell \\ E_1[2] &= [(Z_m + Z_c) \cdot I_{cc} + 2 Z_e \cdot I_{e1} + 2 Z_c \cdot (I_{e2} + I_{e3})] \ell \\ E_1[3] &= [(Z_m + 2Z_c) \cdot I_{cc} + 3Z_e \cdot I_{e1} + 3 Z_c \cdot (I_{e2} + I_{e3})] \ell \end{aligned}$$

De même, pour les écrans 2 et 3 :

$$\begin{aligned} E(2,1) &= [Z_m \cdot I_{cc} + Z_c \cdot I_{e1} + Z_e \cdot I_{e2} + Z_L \cdot I_{e3}] \ell \\ E(2,2) &= [Z_c \cdot I_{cc} + Z_c \cdot I_{e1} + Z_e \cdot I_{e2} + Z_L \cdot I_{e3}] \ell \\ E(2,3) &= [Z_L \cdot I_{cc} + Z_c \cdot I_{e1} + Z_e \cdot I_{e2} + Z_L \cdot I_{e3}] \ell \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_2[1] &= [Z_m \cdot I_{cc} + Z_c \cdot I_{e1} + Z_e \cdot I_{e2} + Z_L \cdot I_{e3}] \ell \\ E_2[2] &= [(Z_c + Z_m) \cdot I_{cc} + 2Z_c \cdot I_{e1} + 2 Z_e \cdot I_{e2} + 2 Z_L \cdot I_{e3}] \ell \\ E_2[3] &= [(Z_c + Z_m + Z_L) \cdot I_{cc} + 3 Z_c \cdot I_{e1} + 3 Z_e \cdot I_{e2} + 3 Z_L \cdot I_{e3}] \ell \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E(3,1) &= [Z_L \cdot I_{cc} + Z_c \cdot I_{e1} + Z_L \cdot I_{e2} + Z_e \cdot I_{e3}] \ell \\ E(3,2) &= [Z_c \cdot I_{cc} + Z_c \cdot I_{e1} + Z_L \cdot I_{e2} + Z_e \cdot I_{e3}] \ell \\ E(3,3) &= [Z_m \cdot I_{cc} + Z_c \cdot I_{e1} + Z_L \cdot I_{e2} + Z_e \cdot I_{e3}] \ell \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_3[1] &= [Z_L \cdot I_{cc} + Z_c \cdot I_{e1} + Z_L \cdot I_{e2} + Z_e \cdot I_{e3}] \ell \\ E_3[2] &= [(Z_L + Z_c) \cdot I_{cc} + 2Z_c \cdot I_{e1} + 2 Z_L \cdot I_{e2} + 2 Z_e \cdot I_{e3}] \ell \\ E_3[3] &= [(Z_L + Z_m + Z_c) \cdot I_{cc} + 3 Z_c \cdot I_{e1} + 3 Z_L \cdot I_{e2} + 3 Z_e \cdot I_{e3}] \ell \end{aligned}$$

La chute de tension pour la section ternaire étant la même dans les 3 circuits d'écran : $E_1[3] = E_2[3] = E_3[3]$

On en déduit :

$$I_{e2} = I_{e3} \quad [4-0]$$

$$(Z_e - Z_c) \cdot I_{e1} + (2Z_c - Z_e - Z_L) \cdot I_{e2} = \frac{1}{3} (Z_L - Z_c) \cdot I_{cc} \quad [4-1]$$

En introduisant la somme des courants dans les écrans

$$I_e = I_{e1} + I_{e2} + I_{e3}$$

on a :

$$I_{e1} = \left[1 - \frac{2(Z_c - Z_c)}{\Delta} \right] \cdot (I_e + I_{cc}) - \frac{I_{cc}}{3} \quad I_{e2} = I_{e3} = \frac{Z_e - Z_c}{\Delta} \cdot (I_e + I_{cc}) - \frac{I_{cc}}{3} \quad [4-2]$$

ou :

$$I_{e1} = \frac{I_e}{3} - \frac{2 \cdot (Z_c - Z_L)}{3 \cdot \Delta} \cdot (I_e + I_{cc}) \quad I_{e2} = I_{e3} = \frac{I_e}{3} + \frac{(Z_c - Z_L)}{3 \cdot \Delta} \cdot (I_e + I_{cc}) \quad [4-3]$$

$$\text{avec : } \Delta = 3Z_e - 4Z_c + Z_L$$

ou encore : $I_{ei} = a_i \cdot I_e + b'_i \cdot I_{cc}$

avec :

$$a_1 = \frac{1}{3} - \frac{2 \cdot (Z_c - Z_L)}{\Delta} \quad b'_1 = \frac{2 \cdot (Z_L - Z_c)}{3 \cdot \Delta} \quad a_2 = a_3 = \frac{1}{3} + \frac{(Z_c - Z_L)}{\Delta} \quad b'_2 = b'_3 = \frac{Z_c - Z_L}{3 \cdot \Delta}$$

Il est facile de montrer que ces relations sont toujours valables, quelle que soit la phase en défaut.

3 - 2 - TENSION ENTRE ECRANS AUX POINTS DE PERMUTATION.

Les tensions entre écrans peuvent s'exprimer relativement simplement en utilisant [4-0] et [4-1].
 Dans le cas d'un défaut en phase 1 :

$$V_{12}(1) = [(Z_c - Z_m) \cdot I_{cc} + (Z_e - Z_c) \cdot I_{e1} + (2Z_c - Z_e - Z_L) \cdot I_{e2}] \ell = \frac{1}{3} (2Z_c - 3Z_m + Z_L) \cdot \ell I_{cc}$$

$$V_{13}(1) = [(Z_c - Z_L) \cdot I_{cc} + (Z_e - Z_c) \cdot I_{e1} + (2Z_c - Z_e - Z_L) \cdot I_{e2}] \ell = \frac{2}{3} (Z_c - Z_L) \cdot \ell I_{cc}$$

$$V_{23}(1) = (Z_m - Z_L) \cdot \ell I_{cc}$$

$$V_{12}(2) = [2(Z_e - Z_c) \cdot I_{e1} + 2(2Z_c - Z_e - Z_L) \cdot I_{e2}] \ell = \frac{2}{3} (Z_L - Z_c) \cdot \ell I_{cc}$$

$$V_{13}(2) = [(Z_m - Z_L) \cdot I_{cc} + 2(Z_e - Z_c) \cdot I_{e1} + 2(2Z_c - Z_e - Z_L) \cdot I_{e2}] \ell = \frac{1}{3} (3Z_m - Z_L - 2Z_c) \cdot \ell I_{cc}$$

$$V_{23}(2) = (Z_m - Z_L) \cdot \ell I_{cc}$$

Pour des défauts en phase 2 ou en phase 3, on a des expressions similaires.

* défaut en phase 2 :

$$V_{12}(1) = \frac{2}{3} (Z_c - Z_L) \cdot \ell I_{cc} \quad V_{13}(1) = -\frac{1}{3} (3Z_m - 2Z_c - Z_L) \cdot \ell I_{cc} \quad V_{23}(1) = (Z_m - Z_L) \cdot \ell I_{cc}$$

$$V_{12}(2) = V_{13}(2) = -\frac{1}{3} (3Z_m - 4Z_c + Z_L) \cdot \ell I_{cc} \quad V_{23}(2) = 0$$

* défaut en phase 3 :

$$V_{12}(1) = V_{13}(1) = \frac{1}{3} (3Z_m - 4Z_c + Z_L) \cdot \ell I_{cc} \quad V_{23}(1) = 0$$

$$V_{12}(2) = \frac{1}{3} (3 \cdot Z_m - 2 \cdot Z_c - Z_L) \cdot \ell I_{cc} \quad V_{13}(2) = \frac{2}{3} (Z_L - Z_c) \cdot \ell I_{cc} \quad V_{23}(2) = (Z_L - Z_m) \cdot \ell I_{cc}$$

Dans le cas d'une disposition en trèfle, quelle que soit la phase en défaut :

$$V_{12}(1) = (Z_c - Z_m) \cdot \ell I_{cc} \quad V_{13}(1) = V_{12}(2) = 0 \quad V_{23}(1) = V_{13}(2) = V_{23}(2) = (Z_m - Z_c) \cdot \ell I_{cc}$$

$$|V_{\max_nappe}| = \frac{\mu\omega}{2\pi} Ln \frac{2S}{r_c} \ell \times I_{cc}$$

$$|V_{\max_trèfle}| = \frac{\mu\omega}{2\pi} Ln \frac{S}{r_c} \ell \times I_{cc}$$

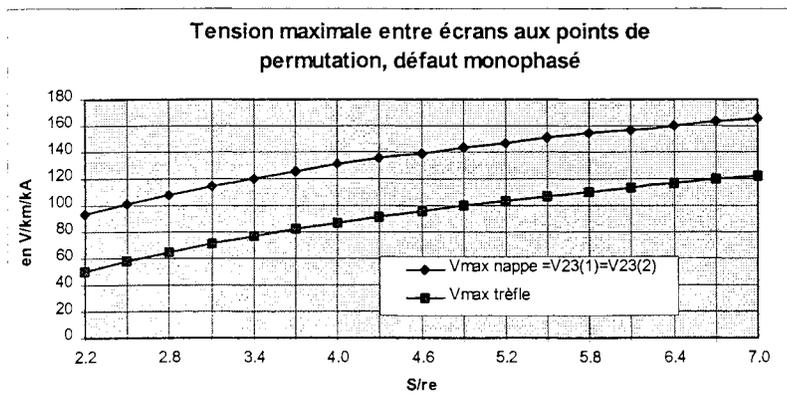


Figure 4.5 : Tension maximale entre écrans - défaut monophasé externe.

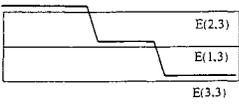
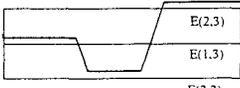
3 - 3 - CHUTE DE TENSION DANS LES ECRANS A LA TROISIEME SECTION ELEMENTAIRE.

En utilisant [4 - 2] dans les expressions des chutes de tension en fonction des courants dans les écrans, on montre que, d'une manière générale, la chute de tension dans l'écran du circuit i à la troisième section élémentaire peut s'écrire :

$$E(i,3) = \left\{ \left[Z_c - \frac{2 \cdot (Z_e - Z_c)^2}{\Delta} \right] \times (I_e + I_{cc}) + \left[-\frac{R_e}{3} + C_i \right] \times I_{cc} \right\} \times \ell$$

les coefficients Ci étant donnés au tableau 4.1 en fonction du défaut.

Tableau 4.1 : Coefficients Ci de la chute de tension dans l'écran

défaut	circuit 1	circuit 2	circuit 3
phase 1 	$\frac{Z_c - Z_m}{3}$	$\frac{2Z_L - Z_c - Z_m}{3}$	$\frac{2Z_m - Z_c - Z_L}{3}$
phase 2 	$\frac{2(Z_m - Z_c)}{3}$	$\frac{2Z_c - Z_m - Z_L}{3}$	$\frac{2Z_c - Z_m - Z_L}{3}$
phase 3 	$\frac{Z_c - Z_m}{3}$	$\frac{2Z_m - Z_c - Z_L}{3}$	$\frac{2Z_L - Z_c - Z_m}{3}$

3 - 4 - CHUTE DE TENSION DANS LES ECRANS POUR UNE SECTION TERNAIRE.

La chute de tension pour la section ternaire V_0 peut s'écrire :

$$V_0 = [Z'_m \cdot I_{cc} + Z'_p \cdot I_e] \cdot L$$

avec :

$$Z'_m = \frac{1}{3} \cdot \left[Z_m + 2 \cdot Z_c - 2 \cdot \frac{(Z_c - Z_e) \cdot (Z_L - Z_e)}{3(Z_c - Z_e) + (Z_L - Z_e)} \right]$$

$$Z'_p = \frac{1}{3} \cdot \left[Z_c + 2 \cdot Z_e - 2 \cdot \frac{(Z_c - Z_e) \cdot (Z_L - Z_e)}{3(Z_c - Z_e) + (Z_L - Z_e)} \right]$$

3 - 5 - INTERPRETATIONS.

Dans le cas de la pose en nappe, tout se passe comme si la dissymétrie des tensions induites dans le conducteur central et les conducteurs latéraux provoquait la circulation d'un courant entre le conducteur central et les conducteurs latéraux (cf relation [4 - 3]).

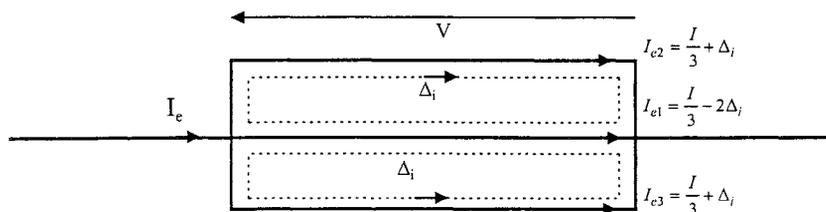


Figure 4.6 : Schéma équivalent pour la liaison souterraine en nappe

Dans le cas de la pose en trèfle, les courants des 3 circuits d'écran sont égaux. Les différents résultats obtenus précédemment s'interprètent aisément, en utilisant la décomposition en composantes symétriques.

On distingue :

- * un régime direct et un régime inverse, sans courant dans les écrans. Ces régimes induisent des tensions dans les circuits d'écran à l'origine des tensions entre écrans ; ces tensions sont nulles pour une section ternaire.
- * un régime homopolaire avec des courants dans les écrans égaux et opposés aux courants de phase. Ce régime induit une tension linéique identique dans les circuits d'écran .
- * un régime homopolaire écran avec des courants uniquement dans les écrans égaux à : $(I_{cc} + I_e) / 3$ (nuls lorsque tout le courant de retour transite par les écrans).

Les régimes homopolaires ne créent pas de tensions entre écrans. Ils provoquent une chute de tension linéique identique dans les circuits d'écran.

$$(Z_m + 2Z_c) \cdot \frac{I_{cc}}{3} + (Z_e + 2Z_c) \cdot \left(-\frac{I_{cc}}{3} + \frac{I_{cc} + I_e}{3}\right) = R_e \cdot \frac{I_e}{3} + \frac{Z_m + 2Z_c}{3} \cdot (I_{cc} + I_e) \approx -R_e \cdot \frac{I_{cc}}{3}$$

La courbe ci-dessous donne l'allure de la distribution du potentiel dans les écrans, en mettant en évidence les régimes homopolaires.

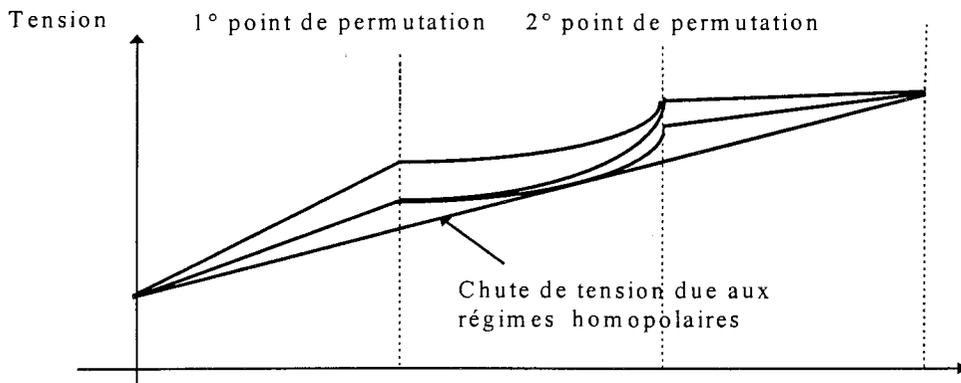


Figure 4.7 : Distribution du potentiel dans les écrans

Les potentiels des écrans au 2° point de permutation sont représentés ci-dessous.

E_i est la montée en potentiel du circuit d'écran i par rapport à la terre.

E'_i est la tension induite dans le circuit d'écran i par les composantes directes et inverses du courant de court-circuit.

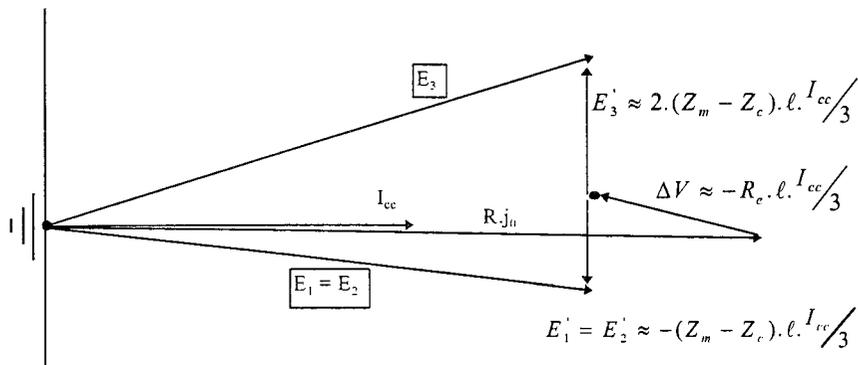


Figure 4.8 : Schéma vectoriel des tensions induites dans les écrans

Cette représentation est importante : elle montre que, lorsque les parafoudres sont connectés en étoile avec neutre à la terre, ils sont soumis à des tensions beaucoup plus importantes que lorsque le point neutre est isolé. Si le point neutre est à la terre, les parafoudres subissent les montées en potentiel des écrans (E_i) alors que si le point neutre est libre de monter en potentiel, ils ne subissent pas les contraintes homopolaires mais seulement celles des régimes direct et inverse (E'_i).

Compte tenu des ordres de grandeur de R_e et $(Z_m - Z_c)$, la montée en potentiel des écrans au point de permutation a une amplitude très proche de la montée en potentiel de la terre à la fin de la section ternaire.

4 - REGIME DE DEFAUT MONOPHASE INTERNE.

4 - 1 - PRINCIPES.

La situation est sensiblement différente selon la position du claquage de câble, c'est-à-dire selon le circuit d'écran et la section élémentaire affectés.

On établit tout d'abord un système d'équations reliant la chute de tension V_0 dans les écrans et les courants dans les circuits d'écran avec le courant I_c égal à la somme des trois courants d'écran « en amont » du défaut et le courant de court-circuit. Ce système a une forme générale avec des coefficients variant avec le cas considéré.

On peut en déduire :

- * la relation entre la chute de tension V_0 , le courant I_c et le courant de court-circuit, ce qui est essentiel pour la détermination du courant de court-circuit.
- * les courants dans les circuits d'écran en fonction du courant I_c et du courant de court-circuit, ce qui permet de déterminer les chutes de tension et les contraintes entre écrans au niveau des différents points de permutation.

On se limite ici à présenter les résultats des calculs (objets de l'annexe 1).

4 - 2 - MISE EN EQUATIONS.

En considérant chacun des circuits d'écran, on obtient 3 expressions de la chute de tension V_0 dans les circuits d'écran en fonction des courants dans les écrans et du courant de court-circuit.

L'introduction du courant I_c égal à la somme des courants dans les écrans « en amont » du défaut, conduit au système de 4 équations :

$$Z_c \cdot I_{e1} + Z_c \cdot I_{e2} + Z_c \cdot I_{e3} - \frac{V_0}{L} = -A' \cdot I_{cc} \quad [4-4]$$

$$Z_c \cdot I_{e1} + Z_e \cdot I_{e2} + Z_L \cdot I_{e3} - \frac{V_0}{L} = -B' \cdot I_{cc} \quad [4-5]$$

$$Z_c \cdot I_{e1} + Z_L \cdot I_{e2} + Z_e \cdot I_{e3} - \frac{V_0}{L} = -C' \cdot I_{cc} \quad [4-6]$$

$$I_{e1} + I_{e2} + I_{e3} = I_c \quad [4-7]$$

Les coefficients A' , B' et C' (annexe 1) traduisant les tensions induites par le courant de court-circuit. Ils font intervenir un coefficient β_i défini de la manière suivante :

- * la distance entre le défaut et l'extrémité de la section élémentaire affectée situé à droite est notée y .
- * la distance du défaut à l'extrémité droite de la section ternaire est : $\beta_i \cdot L$, où i est le numéro de la section élémentaire en défaut :

$$\beta_i = \left(\frac{y}{L} + \frac{3-i}{3} \right)$$

On peut déduire du système les relations suivantes :

$$(Z_e + 2Z_c) \cdot I_{e1} + (Z_c + Z_c + Z_L) \cdot I_{e2} + (Z_c + Z_c + Z_L) \cdot I_{e3} - 3 \frac{V_0}{L} = -(A' + B' + C') \cdot I_{cc} \quad [4-8]$$

$$2(Z_e - Z_c) \cdot I_{e1} + 2(2Z_c - Z_c - Z_L) \cdot (I_{e2} + I_{e3}) = (B' + C' - 2A') \cdot I_{cc} \quad [4-9]$$

$$(Z_L - Z_c) \cdot (I_{e2} - I_{e3}) = (C' - B') \cdot I_{cc} \quad [4-10]$$

En utilisant [4-7], on peut éliminer I_{e2} et I_{e3} dans [4-8] et [4-4], d'où l'on déduit V_0 et I_{e1} en fonction de I_c et I_{cc} . En utilisant [4-7], il est également possible d'éliminer I_{e1} dans [4-9], de manière à obtenir :

$$(-3Z_e + 4Z_c - Z_L) \cdot (I_{e2} + I_{e3}) = (B' + C' - 2A') \cdot I_{cc} - 2(Z_e - Z_c) \cdot I_c \quad [4-11]$$

De [4-10] et [4-11], on déduit facilement I_{e2} et I_{e3} en fonction de I_c et I_{cc} .

4 - 3 - DETERMINATION DES COURANTS ET DE LA CHUTE DE TENSION DANS LES ECRANS.

Tout se passe comme si l'on avait la superposition d'un régime de défaut externe avec un courant de court-circuit $x.I_{cc}$ et d'un régime dans lequel la totalité du courant de court-circuit I_{cc} est injectée au niveau du défaut (cf figure 4.9 ci après).

La chute de tension dans les écrans peut s'écrire :

$$V_o = \left[Z'_p \cdot I_e + (Z'_m \cdot x + \mu) \cdot I_{cc} \right] \cdot L$$

avec :

$$Z'_p = \frac{1}{3} \left[Z_e + 2Z_c - \frac{2(Z_e - Z_c)(Z_e - Z_L)}{3Z_e - 4Z_c + Z_L} \right] \quad Z'_m = \frac{1}{3} \left[Z_m + 2 \cdot Z_c - 2 \cdot \frac{(Z_e - Z_c) \cdot (Z_L - Z_c)}{3Z_e - 4Z_c + Z_L} \right]$$

$$\mu_2 = \left[\frac{\beta_1 \cdot (Z_e - Z_c) + q \cdot (Z_L - Z_c)}{3Z_e - 4Z_c + Z_L} \right] \cdot R_e$$

q	SE1	SE2	SE3
Circuit 1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$
Circuit 2	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	0
Circuit 3	$\frac{1}{3}$	0	0

Les courants dans les écrans peuvent se mettre sous la forme : $.I_{ei} = a_i \cdot I_e + (b'_i \cdot x + b''_i) \cdot I_{cc}$

Les coefficients a_i et b'_i sont ceux déterminés lors de l'étude du défaut externe (cf fin du § 3-1), qui sont rappelés ci-dessous :

$$a_1 = \frac{1}{3} - \frac{2 \cdot (Z_c - Z_L)}{\Delta} \quad b'_1 = \frac{2 \cdot (Z_L - Z_c)}{3 \cdot \Delta} \quad a_2 = a_3 = \frac{1}{3} + \frac{(Z_c - Z_L)}{\Delta} \quad b'_2 = b'_3 = \frac{Z_c - Z_L}{3 \cdot \Delta}$$

Les coefficients b'' sont explicités ci-dessous :

Tableau 4.2 : Coefficients b''_1, b''_2, b''_3

		SE1	SE2	SE3
défaut C1	b''_2		$\left[\frac{\beta_2}{\Delta} + \frac{2 \cdot (Z_L - Z_c)}{3 \cdot \Delta \cdot (Z_e - Z_L)} \right] \cdot R_e$	
	b''_3		$\left[\frac{\beta_2}{\Delta} + \frac{2 \cdot (Z_L - Z_c)}{3 \cdot \Delta \cdot (Z_e - Z_L)} \right] \cdot R_e + \frac{Z_m - Z_L}{3 \cdot (Z_e - Z_L)}$	
défaut C2	b''_1	$\frac{\beta_1}{\Delta} \cdot R_e + \left(\frac{1}{3} - \frac{R_e}{\Delta} \right)$	$\frac{\beta_2}{\Delta} \cdot R_e + \left(\frac{1}{3} - \frac{R_e}{\Delta} \right)$	$\frac{\beta_3}{\Delta} \cdot R_e$
défaut C3			$\frac{\beta_2}{\Delta} \cdot R_e$	
défaut C2	b''_3	$\frac{\beta_1 \cdot Z_x + \frac{2}{3} \cdot (Z_c - Z_L)}{\Delta \cdot (Z_e - Z_L)} \cdot R_e + \frac{Z_m - Z_L}{3 \cdot (Z_e - Z_L)}$	$\frac{\beta_2 \cdot Z_x + \frac{2}{3} \cdot (Z_c - Z_L)}{\Delta \cdot (Z_e - Z_L)} \cdot R_e$	$\frac{\beta_3 \cdot Z_x \cdot R_e}{\Delta \cdot (Z_e - Z_L)}$
défaut C3	b''_2		$\frac{\beta_2 \cdot Z_c \cdot R_e}{\Delta \cdot (Z_e - Z_L)} + \frac{Z_m - Z_L}{3 \cdot (Z_e - Z_L)}$	
		$\Delta = 3Z_e - 4Z_c + Z_L$	$Z_x = Z_c - 2Z_c + Z_L$	$b''_1 + b''_2 + b''_3 = 0$

4 - 4 - CHUTE DE TENSION DANS LES ECRANS.

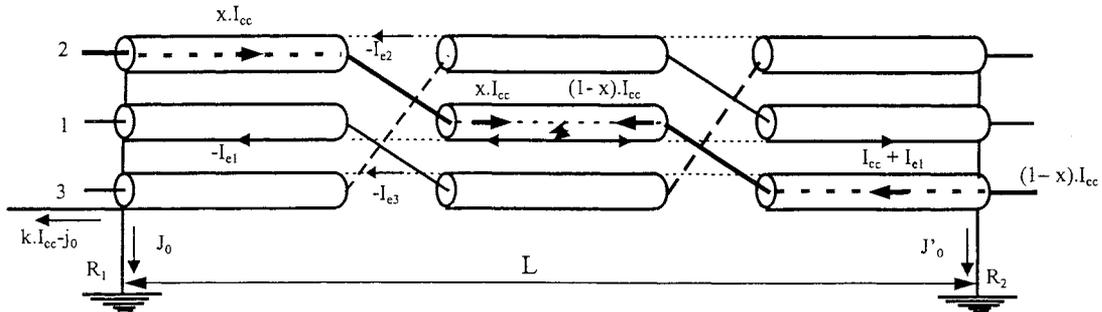


Figure 4.9 : Répartition du courant lors d'un défaut monophasé interne.
(en définissant k par : $I_e = -k.I_{cc}$)

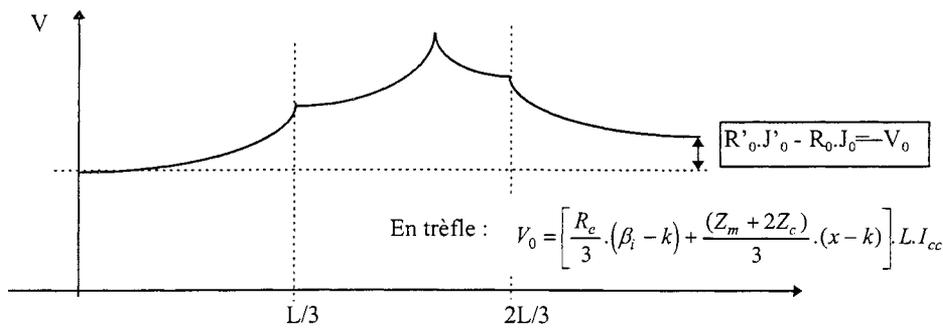


Figure 4.10 : Chute de tensions dans les écrans

Les chutes de tension dans les écrans, dans les différentes sections élémentaires, peuvent s'exprimer en fonction du courant de court-circuit et des courants dans les écrans que l'on a déterminés au paragraphe précédent. La chute de tension maximale dans les écrans à la troisième section élémentaire, obtenue sur l'écran du circuit en défaut, a toujours la forme :

$$e = A \cdot I_{cc} \times \ell + e_{ext}(x.I_{cc})$$

où e_{ext} est la chute de tension dans le circuit considéré pour un défaut externe.

Tableau 4.3 : Coefficient A de la chute de tension maximale dans les écrans

défaut au 2° point de permutation	dans la 2° section	dans la 3° section
	$\frac{7.R_c}{9} + \frac{R_c.(Z_c - Z_L)}{9.\Delta} + \frac{2}{3}(Z_m - Z_c)$	$\frac{7.R_c}{9} + \frac{R_c.(Z_c - Z_L)}{9.\Delta}$
	$\frac{7.R_c}{9} - 2.\frac{R_c.(Z_c - Z_L)}{9.\Delta} + \frac{2}{3}(Z_m - Z_c)$	$\frac{7.R_c}{9} - 2.\frac{R_c.(Z_c - Z_L)}{9.\Delta}$
	$\frac{7.R_c}{9} + \frac{R_c.(Z_c - Z_L)}{9.\Delta} + \frac{2}{3}(Z_m - Z_L)$	$\frac{7.R_c}{9} + \frac{R_c.(Z_c - Z_L)}{9.\Delta}$

Compte tenu des ordres de grandeur de R_c , $(Z_m - Z_c)$ et $(Z_m - Z_L)$, la montée en potentiel des écrans a une amplitude très proche de la montée en potentiel de la terre à la fin de la section ternaire, majorée du terme :

$$e \approx \frac{7}{9} R_c \cdot \ell \cdot I_{cc}$$

La montée en potentiel maximale se déduit de la relation en grisé dans le tableau pour $x < 2/3$, si on néglige le terme : $\frac{R_c.(Z_c - Z_L)}{9.\Delta}$.

4 - 5 - TENSIONS ENTRE ECRANS AU NIVEAU DES ARRETS D'ECRAN.

Ces tensions sont indépendantes du trajet suivi par le courant de retour du courant de défaut.

Ceci s'explique en considérant le système des tensions et des courants comme la superposition de 2 systèmes élémentaires :

* un système dans lequel les courants xI_{cc} et I_{cc} sont supposés nuls, le courant I_c transitant dans les écrans, les chutes de tension linéiques dans les 3 écrans sont égales : il ne se crée pas de tensions entre écrans

* un deuxième système dans lequel la somme des courants dans les écrans est supposée nulle, le « retour » du courant de court-circuit se faisant entièrement par « l'aval » de la liaison.

On trouve en Annexe 2 le tracé des tensions entre écrans au niveau des arrêts d'écran selon l'emplacement du défaut pour une pose en nappe et pour une pose en trèfle.

Les tensions maximales entre écrans aux points de permutation sont obtenues lorsque le défaut survient à l'une des extrémités de la 2° section élémentaire.

Tableau 4.4 : Tension entre écrans - défaut monophasé interne.

	Trèfle	Nappe
$x \leq 1/2$	$\left[-\frac{2}{3}R_c + (x - \frac{4}{3}) \cdot (Z_m - Z_c) \right] \cdot \ell \cdot I_{cc}$	$\left[-\frac{2}{3}R_c - (x - \frac{4}{3}) \cdot (Z_m - Z_L) \right] \cdot \ell \cdot I_{cc}$
$x \geq 1/2$	$\left[-\frac{2}{3}R_c - (x + \frac{1}{3}) \cdot (Z_m - Z_c) \right] \cdot \ell \cdot I_{cc}$	$\left[-\frac{2}{3}R_c - (x + \frac{1}{3}) \cdot (Z_m - Z_L) \right] \cdot \ell \cdot I_{cc}$
Maximum	$\left[-\frac{2}{3}R_c + \frac{4}{3}(Z_m - Z_c) \right] \cdot \ell \cdot I_{cc}$	$\left[-\frac{2}{3}R_c \pm \frac{4}{3}(Z_m - Z_L) \right] \cdot \ell \cdot I_{cc}$

Le maximum correspond à la tension entre l'écran du circuit en défaut et l'écran de l'un des circuits sains

- au niveau de la 1° permutation $V_{12}[1]$ (défaut circuit 1) ou $V_{23}[1]$ (défaut circuit 2)
 - pour un défaut survenant à l'extrémité « gauche » de la 2° section élémentaire.
 - lorsque le défaut est alimenté par le réseau « à gauche » de la liaison souterraine ($x=1$)
- au niveau de la 2° permutation (de manière symétrique) $V_{13}[2]$ (défaut circuit 1) ou $V_{23}[2]$ (défaut circuit 3)
 - pour un défaut survenant à l'extrémité « droite » de la 2° section élémentaire
 - lorsque le défaut est alimenté par le réseau « à droite » de la liaison souterraine ($x=0$)

La tension maximale qui peut être atteinte est en général inférieure à la tension entre écrans obtenue en régime de défaut triphasé, comme le montre la figure ci-dessous. L'exception porterait sur des siphons 225 kV lorsque le courant de court-circuit monophasé est voisin du courant de court-circuit triphasé.

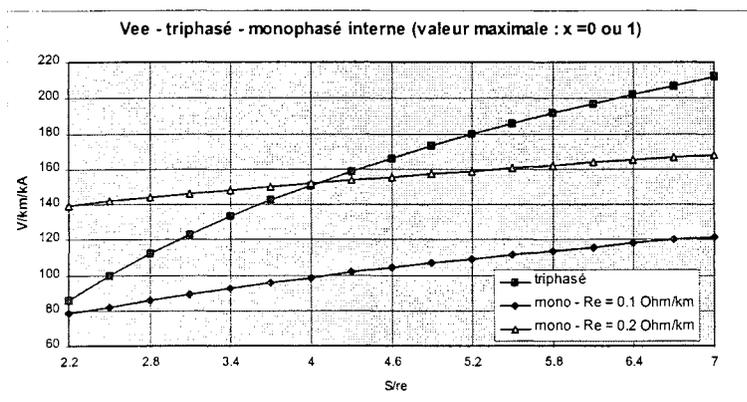


Figure 4.11 : Tensions entre écrans - défaut triphasé et monophasé interne

051 098029 6

5 - CONCLUSION

TENSIONS MAXIMALES APPARAISSANT SUR LES ECRANS.

	Trèfle	Nappe
Régime Permanent I : intensité du courant de phase.	$\frac{\omega\mu}{2\pi} \cdot L_n \frac{S}{r_e} \cdot \ell \cdot I$	$\frac{\mu\omega}{2\pi} \sqrt{Ln^2 \frac{\sqrt{2} S}{r_e} + \frac{3}{4} Ln^2 2} \cdot \ell \cdot I$
Défaut Triphasé I : intensité du courant de court-circuit dans la liaison		

Tableau 4.5 : Contraintes des régimes triphasés

Régime de défaut monophasé externe.

La montée en potentiel des écrans est de l'ordre de grandeur de la montée en potentiel de la terre à la fin de la section ternaire.

Régime de défaut monophasé interne.

Les montées en potentiel dépendent de la répartition du courant de court-circuit (paramètre x) et du courant de retour (paramètre k).

Les contraintes maximales surviennent lorsque le défaut se situe dans la section élémentaire centrale au niveau du 2° point de permutation.

La chute de tension maximale dans l'écran entre le défaut et les extrémités de la section ternaire a pour expression approchée :

$$e \approx \frac{7}{9} R_e \cdot \ell \cdot I_{cc}$$

TENSIONS ENTRE ECRANS

	Trèfle	Nappe
Régime Permanent I : intensité du courant de phase.	$\sqrt{3} \cdot \frac{\omega\mu}{2\pi} \cdot L_n \frac{S}{r_e} \cdot \ell \cdot I$	$\sqrt{3} \cdot \frac{\omega\mu}{2\pi} \cdot L_n \frac{2S}{r_e} \cdot \ell \cdot I$
Défaut Triphasé	$\sqrt{3} \cdot \frac{\omega\mu}{2\pi} \cdot L_n \frac{S}{r_e} \cdot \ell \cdot x \cdot I_{cc}$	$\sqrt{3} \cdot \frac{\omega\mu}{2\pi} \cdot L_n \frac{2S}{r_e} \cdot \ell \cdot x \cdot I_{cc}$
Défaut Monophasé externe	$\frac{\omega\mu}{2\pi} \cdot L_n \frac{S}{r_e} \cdot \ell \cdot x \cdot I_{cc}$	$\frac{\omega\mu}{2\pi} \cdot L_n \frac{2S}{r_e} \cdot \ell \cdot x \cdot I_{cc}$
Défaut Monophasé interne $x \leq \frac{1}{2}$	$\sqrt{\left(\frac{2}{3} \cdot R_e\right)^2 + \left(x - \frac{4}{3}\right) \cdot \frac{\mu\omega}{2\pi} L_n \frac{S}{r_e}} \cdot \ell \cdot I_{cc}$	$\sqrt{\left(\frac{2}{3} \cdot R_e\right)^2 + \left(x - \frac{4}{3}\right) \cdot \frac{\mu\omega}{2\pi} L_n \frac{2S}{r_e}} \cdot \ell \cdot I_{cc}$
$x \geq \frac{1}{2}$	$\sqrt{\left(\frac{2}{3} \cdot R_e\right)^2 + \left(x + \frac{1}{3}\right) \cdot \frac{\mu\omega}{2\pi} L_n \frac{S}{r_e}} \cdot \ell \cdot I_{cc}$	$\sqrt{\left(\frac{2}{3} \cdot R_e\right)^2 + \left(x + \frac{1}{3}\right) \cdot \frac{\mu\omega}{2\pi} L_n \frac{2S}{r_e}} \cdot \ell \cdot I_{cc}$

Tableau 4.6 : Contraintes des régimes triphasés et défauts monophasés

Les calculs détaillés montrent que les tensions entre écrans dues à des défauts triphasés ne sont pas systématiquement les plus sévères. Quand les câbles sont posés en trèfle jointif, ces tensions sont légèrement plus grandes lors d'un défaut monophasé interne des siphons 225 kV (cf. figure 4.10).

Chapitre 5

DETERMINATION DES COURANTS DANS LE RESEAU DE TERRE

D'UNE LIAISON

EN REGIME DE DEFAUT MONOPHASE

1 - GENERALITES.....	35
2 - SCHEMA EQUIVALENT POUR LA LIAISON SOUTERRAINE.....	35
3 - METHODE DE CALCUL.....	36
3 - 1 - PRINCIPE.....	36
3 - 2 - EXPRESSION DES COURANTS DANS LE CÂBLE DE GARDE.....	36
3 - 3 - CONSTRUCTION DU SYSTEME D'EQUATIONS A RESOUDRE.....	37
4 - ETUDES DE LIAISONS AERIENNES ET MIXTES.....	39
4 - 1 - GÉNÉRALITÉS.....	39
4 - 2 - LIAISON AÉRIENNE.....	39
4 - 2 - 1 - <i>Calcul exact</i>	39
4 - 2 - 2 - <i>Methode de calcul approchée</i>	40
4 - 3 - LIAISON MIXTE.....	43
4 - 3 - 1 - <i>Calcul exact pour le défaut sur une portée de la ligne aérienne</i>	43
4 - 3 - 2 - <i>Calcul exact pour le défaut sur un tronçon souterrain</i>	45
4 - 3 - 3 - <i>Calcul approché</i>	46
4 - 4 - CONCLUSION.....	48
5. CONCLUSION.....	48

1 - GENERALITES

On considère une liaison d'interconnexion, reliant deux postes.

Dans un premier temps, on suppose que cette liaison est entièrement constituée d'une ligne aérienne avec câble de garde. Ensuite, un ou plusieurs tronçons souterrains sont insérés dans cette liaison.

Lorsqu'un défaut survient sur la liaison, le courant de court-circuit se répartit dans le "réseau de terre" comportant les prises de terre, le câble de garde, les écrans des câbles ou le conducteur de terre (pour la liaison souterraine).

L'objet de ce chapitre est la détermination de la répartition du courant de retour.

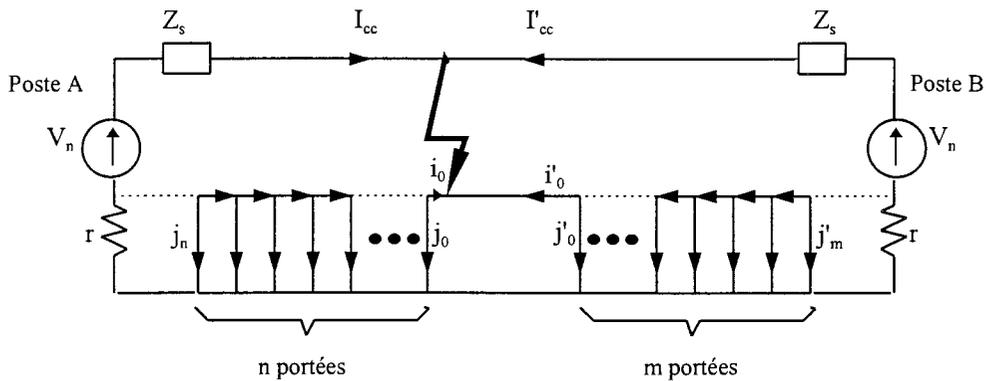


Figure 5.1 : Schéma d'étude

En arrivant au poste, les câbles de garde peuvent ou non être reliés à la terre du poste.

Au deuxième paragraphe, on montre que l'on peut adopter un modèle identique pour la partie aérienne et pour la partie souterraine (que ce soit en mise à la terre en un point ou avec permutation d'écran).

Dans le troisième paragraphe, on expose la méthode de calcul développée pour la détermination de la répartition du courant dans le "réseau de terre".

Le quatrième paragraphe est consacré à une étude plus détaillée, nous permettant d'évaluer les contraintes de courant, et donc de montée en potentiel, au voisinage du défaut par des formules approchées. On y trouve également, les résultats obtenus selon différents cas.

2 - SCHEMA EQUIVALENT POUR LA LIAISON SOUTERRAINE.

Dans le cas de la mise à la terre en un point, il est clair que le conducteur de terre joue le même rôle que le câble de garde de la ligne.

Dans le cas de la permutation des écrans, les écrans des câbles peuvent être assimilés à un conducteur unique, de sorte que la situation est identique au cas de la mise à la terre en un point, et au cas de la ligne aérienne.

- **Pose en trèfle.**

Les trois écrans sont équivalents à un conducteur unique ayant :

- une impédance mutuelle avec la phase en défaut : $Z'_m = \frac{Z_m + 2Z_c}{3}$

- une impédance propre $Z'_p = \frac{Z_e + 2Z_c}{3}$

Le courant dans chacun des écrans étant égal au tiers du courant total dans le conducteur fictif équivalent.

• **Pose en nappe.**

Les trois écrans sont équivalents à un conducteur unique ayant :

- une impédance mutuelle avec la phase en défaut :
$$Z'_m = \frac{1}{3} \left[Z_m + 2 \cdot Z_c - 2 \cdot \frac{(Z_c - Z_e) \cdot (Z_L - Z_c)}{3(Z_e - Z_c) + (Z_L - Z_c)} \right]$$

- une impédance propre
$$Z'_p = \frac{1}{3} \left[Z_c + 2 \cdot Z_c - 2 \cdot \frac{(Z_c - Z_e) \cdot (Z_L - Z_c)}{3(Z_e - Z_c) + (Z_L - Z_c)} \right]$$

Tout se passe comme si la dissymétrie des tensions induites dans le conducteur central et les conducteurs latéraux provoquait la circulation d'un courant entre le conducteur central et les conducteurs latéraux (cf chapitre 4).

3 - METHODE DE CALCUL.

3 - 1 - PRINCIPE.

On souhaite déterminer les courants de court-circuit et les courants dans le « conducteur de terre » (câble de garde d'une ligne aérienne, conducteur de terre d'une liaison souterraine à mise à la terre en un point, ou écrans des câbles pour une liaison à permutation d'écran) et dans les prises de terre.

On montre (§ 3-2) que, de chaque côté du défaut, on peut exprimer les courants dans les « conducteurs de terre » et dans les prises de terre en fonction du courant de court-circuit et du courant de retour au niveau du défaut. Ce qui permet de réduire le nombre d'inconnues à 4 : I_{cc} , I'_{cc} , i_0 , i'_0 .

Les 4 équations nécessaires sont fournies par l'application des lois de Kirchoff (§ 3-3).

3 - 2 - EXPRESSION DES COURANTS DANS LE CABLE DE GARDE

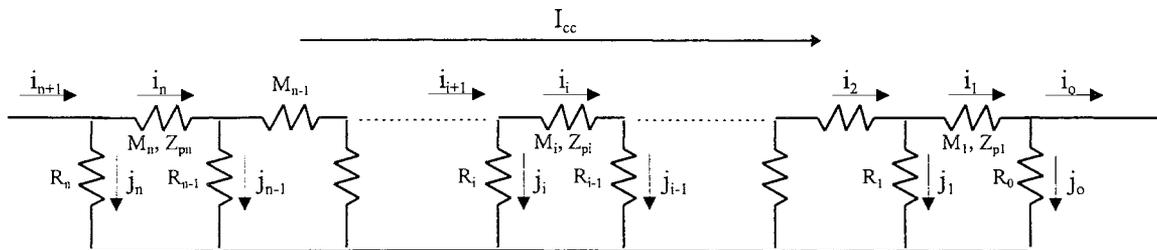


Figure 5.2 : Schéma d'étude pour chaque moitié du réseau

D'une manière générale, l'équation de la $i^{ème}$ maille s'écrit :

$$-R_i \cdot j_i + Z_{pi} \cdot i_i + M_i \cdot I_{cc} + R_{i-1} \cdot j_{i-1} = 0 \quad [5-1]$$

$$i_i + j_i = i_{i+1} \quad [5-2]$$

où : Z_{pi} est l'impédance propre du câble de garde, M_i est la mutuelle avec la phase et R_i la résistance de la prise de terre (pour la portée i).

On en déduit, en explicitant dans [5-1] les courants j_i à l'aide de [5-2] et en posant : $Z_i = R_i + Z_{pi} + R_{i-1}$

$$-R_i i_{i+1} + Z_i i_i - R_{i-1} i_{i-1} = -M_i I_{cc}$$

On montre par récurrence que :

$$i_i = A_i \cdot i_{i-1} + B_i I_{cc} \quad i = [1, n]$$

avec : $A_i = \frac{R_{i-1}}{Z_i - R_i A_{i+1}} \quad B_i = \frac{R_i B_{i+1} - M_i}{Z_i - R_i A_{i+1}} \quad i = [1, n-1] \quad A_n = \frac{R_{n-1}}{Z_n}$

et, selon qu'il y a liaison du câble de garde au poste ou non : $B_n = \frac{-(R_n + M_n)}{Z_n}$ ou $B_n = \frac{-M_n}{Z_n}$

On en déduit, également par récurrence :

$$i_i = C_i \cdot j_0 + D_i I_{cc} \quad i = [1, n]$$

avec : $C_i = A_i \cdot C_{i-1} \quad D_i = A_i \cdot D_{i-1} + B_i$ pour $i = [1, n] \quad C_0 = 1 ; D_0 = 0$

3 - 3 - CONSTRUCTION DU SYSTEME D'EQUATIONS A RESOUDRE.

Le système d'équations à résoudre s'obtient par application des lois de Kirchoff : la loi de Kirchoff en courant au point de défaut et la loi de Kirchoff en tension aux 3 mailles indiquées sur le schéma.

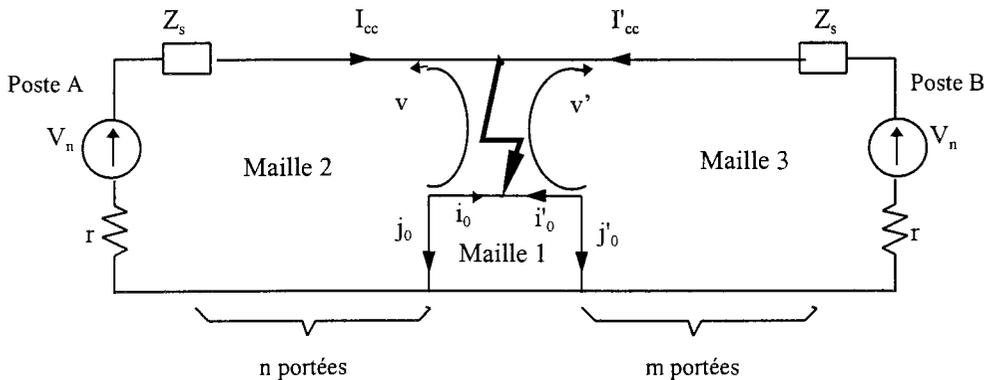


Figure 5.3 : Mailles de tension

Application de la loi de Kirchoff en courant au point de défaut : $i_0 + i'_0 + I'_{cc} + I_{cc} = 0$

Application de la loi de Kirchoff en tension à la maille 1.

Elle conduit à écrire en notant V_0 la tension entre les prises de terre aux extrémités de la portée en défaut :

$$R_{d0} j_0 = V_0 + R'_{d0} j'_0$$

Pour j_0 et j'_0 , on a les relations : $j_0 = (C_1 - 1) \cdot i_0 + D_1 \cdot I_{cc}$ et $j'_0 = (C'_1 - 1) \cdot i'_0 + D'_1 \cdot I'_{cc}$

L'expression de V_0 dépend du tronçon en défaut.

* pour une portée de ligne aérienne, on a simplement :

$$V_0 = - [Z_{p0} i'_0 + M_0 \cdot I'_{cc}]$$

en considérant un contournement d'isolateur au niveau du pylône situé à l'extrémité gauche de la portée en défaut.

* pour un tronçon souterrain à mise à la terre en un point, V_0 est la chute de tension dans le conducteur de terre. Quel que soit le mode de pose (nappe ou trèfle) on a toujours :

$$V_0 = Z_t \cdot i_0 + Z_i \cdot I_{cc}$$

* pour un tronçon souterrain à permutation d'écran, on peut exprimer V_0 en fonction de I_{cc} , I'_{cc} , i_0 .

En adaptant les notations, on déduit du chapitre précédent : $V_0 = \lambda \cdot i_0 + (\mu_1 + \mu_2) \cdot I_{cc} + \mu_2 \cdot I'_{cc}$

Nous avons limité l'étude aux défauts survenant sur le circuit d'écran n°1 dans les quatre positions spécifiques suivantes : à la fin de la section élémentaire 1, au début et à la fin de la section élémentaire 2, au début de la section élémentaire 3.

Application de la loi de Kirchoff en tension aux mailles 2 et 3.

Elle donne 2 relations entre V_n et I_{cc} , I'_{cc} , i_0 , i'_0 .

$$\begin{aligned} -V_n + (Z_s + Z_{LA}) \cdot I_{cc} + \sum_{i=1}^n M_i \cdot i_i - \sum_{i=1}^n Z_{pi} \cdot i_i - \sum_{i=1}^n M_i \cdot I_{cc} + \varepsilon \cdot (r \cdot I_{cc} + R_n \cdot j_n) + v &= 0 \\ -V'_n + (Z'_s + Z'_{LA}) \cdot I'_{cc} + \sum_{i=1}^n M'_i \cdot i'_i - \sum_{i=1}^n Z'_{pi} \cdot i'_i - \sum_{i=1}^n M'_i \cdot I'_{cc} + \varepsilon \cdot (r \cdot I'_{cc} + R'_m \cdot j'_m) + v' &= 0 \end{aligned}$$

avec les notations suivantes pour la partie gauche du réseau (et les mêmes notations avec "prime" pour la partie droite du réseau) :

- Z_{LA} : Impédance propre de la ligne entre la source et la portée en défaut
- Z_s : Impédance de la source
- ZL_0 : impédance propre de la portée de ligne en défaut.
- R_i : Résistance des prises de terre
- r : résistance de la source
- v : tension entre le conducteur de phase et la prise de terre à l'extrémité de la portée en défaut.
- ε : paramètre caractérisant la connexion du conducteur de terre au poste
(valant 1 s'il n'y a pas connexion au poste, et 0 s'il y a connexion).

* pour une portée de ligne aérienne, on a simplement :

$$v = 0 \qquad v' = ZL_0 \cdot I'_{cc} + M_0 \cdot i'_0 - Z_{p0} \cdot i'_0 - M_0 \cdot I'_{cc}$$

* pour un tronçon souterrain à mise à la terre en un point, les tensions v et v' peuvent se mettre sous la forme :

$$v = X_0 \cdot i_0 + X_1 \cdot I_{cc} + X_2 \cdot I'_{cc} \qquad v' = X'_0 \cdot i'_0 + X'_1 \cdot I_{cc} + X'_2 \cdot I'_{cc}$$

ainsi, dans le cas d'une pose en trèfle :

$$\begin{aligned} v &= Z_e \cdot (I_{cc} + I'_{cc}) - Z_m \cdot I'_{cc} + Z_t \cdot i_0 - Z_i \cdot i_0 - Z_i \cdot I_{cc} = (Z_i - Z_t) \cdot i_0 + (Z_e - Z_i) \cdot I_{cc} + R_e \cdot I'_{cc} \\ v' &= Z'_e \cdot (I_{cc} + I'_{cc}) - Z'_m \cdot (I_{cc} + I'_{cc}) - Z'_m \cdot I'_{cc} = R_e \cdot I_{cc} + (R_e + Z'_e - Z'_m) \cdot I'_{cc} \end{aligned}$$

$$X_0 = Z_i - Z_t \qquad X'_0 = 0 \qquad X_1 = Z_e - Z_i \qquad X'_1 = R_e \qquad X_2 = R_e \qquad X'_2 = R_e + Z'_e - Z'_m$$

* pour un tronçon souterrain à permutation d'écran, les tensions v et v' peuvent se mettre sous la forme :

$$v = X_0 \cdot i_0 + X_1 \cdot I_{cc} + X_2 \cdot I'_{cc} \qquad v' = X'_0 \cdot i'_0 + X'_1 \cdot I_{cc} + X'_2 \cdot I'_{cc}$$

Les différents coefficients X_i sont précisés à l'annexe 3, en fonction de la position du défaut.

4 - ETUDES DE LIAISONS AERIENNES ET MIXTES.

4 - 1 - GENERALITES.

La configuration étudiée est décrite à la figure 5.1 en tête de chapitre

On a considéré d'abord une liaison purement aérienne.

On a déterminé la répartition du courant dans les câbles de garde et les montées en potentiel des pylônes pour un défaut représentant un contournement d'isolateur au niveau du pylône.

Ensuite, on s'est intéressé à une liaison mixte, comportant une quarantaine de « portées » dont certaines sont constituées de tronçons souterrains.

Les résultats présentés plus loin dans ce paragraphe sont calculés pour une liaison 400 kV, avec les caractéristiques suivantes :

1 - Ligne aérienne : à conducteurs en faisceau quadruple de type Aster 570, équipée de 2 câbles de garde, l'un de type PHLOX 228, l'autre de type THYM 147 F (sur pylônes de type F44KD3 avec suspensions référencées 7Q4I2NI5). La longueur de chaque portée aérienne est égale à 500 m.

2 - Liaison souterraine : en câbles 1600 mm² Cu à permutation d'écran en trèfle jointif. La longueur de chaque tronçon souterrain est égale à 3000 m.

3 - Postes sources : résistance $r = 0,2 \Omega$ - impédance $Z_s = j 3,65 \Omega$

4 - Prises de terre : égales partout sauf celles aux extrémités de la liaison souterraine.

4 - 2 - LIAISON AERIENNE.

4 - 2 - 1 - Calcul exact.

On a déterminé le courant dans le câble de garde, en utilisant la méthode de calcul présentée au § 3, pour une liaison affectée par un défaut sur la portée centrale, avec 20 portées de part et d'autre.

Influence du mode de couplage du câble de garde au niveau du poste source.

Le mode de couplage du câble de garde au niveau d'un poste a une influence sensible sur les courants dans le câble de garde et dans les prises de terre entre le défaut et ce poste. Par contre, il est quasiment sans effet sur les courants dans le câble de garde et dans les prises de terre entre le défaut et l'autre poste.

Montées en potentiel des terres.

La montée en potentiel maximale est obtenue au niveau du défaut.

Intensité du courant de court-circuit.

L'intensité du courant de court-circuit dépend peu à la fois du type de couplage au poste et de la valeur des résistances des prises de terre. On peut l'approximer par la formule ci-dessous :

$$I_{cc} = \frac{V_n}{r + Z_s + \sum (Z_{lpa} - \frac{M^2}{Z_p})}$$

Où Z_{lpa} : impédance propre de la ligne aérienne pour une portée de 500 m.
 Z_p, M : impédance propre du câble de garde et mutuelle avec la phase d'une portée de 500 m.

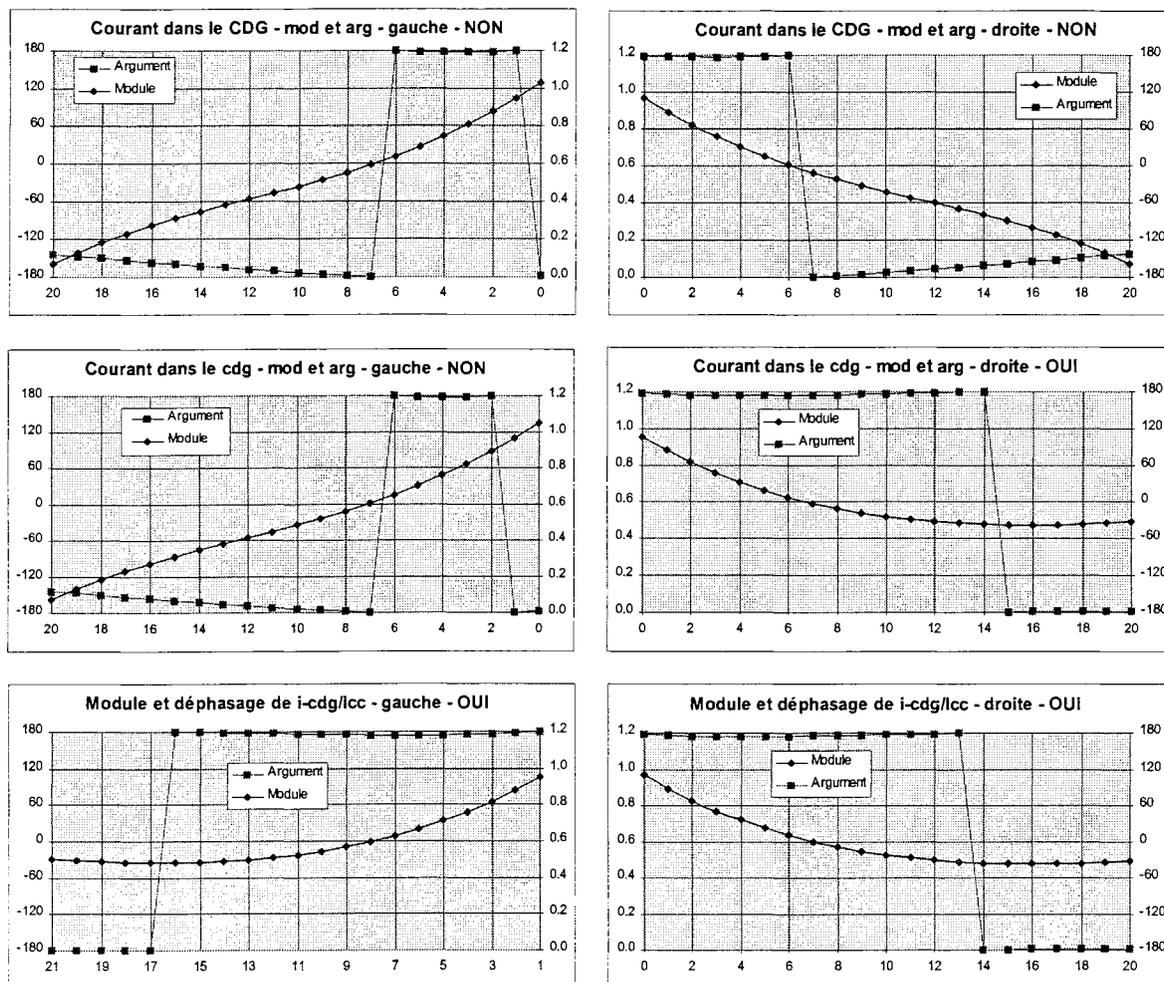


Figure 5.4 : Courant de retour dans le câble de garde d'un réseau aérien selon le mode de couplage aux postes sources (toutes les prises de terre sont de 10Ω)

4 - 2 - 2 - Methode de calcul approchée.

La répartition des courants dans le réseau de terre peut s'analyser en superposant 2 schémas :

- * un premier schéma dans lequel le courant de court-circuit s'écoule dans le réseau de terre passif.
- * un deuxième schéma dans lequel le réseau de terre est le siège de tensions induites par le courant de court-circuit.

Dans le cas où le câble de garde est relié aux postes sources, il est plus simple de considérer dans le premier schéma que le courant qui s'écoule dans la partie « gauche » (par exemple) du réseau de terre passif est diminué de :

$$-\frac{M}{Z_p} \cdot I_{cc}$$

Alors, dans le deuxième schéma, la circulation de ce courant dans le câble de garde provoque une chute de tension compensant les tensions induites, de sorte qu'il n'a pas de courant écoulé à la terre par les prises de terre.

Afin de vérifier cette analyse, on a calculé le courant écoulé dans le réseau de terre passif (en faisant $M_i = 0$ dans les équations) et on l'a soustrait au courant total après multiplication par $[1 - M/Z_p]$ dans le cas où le câble de garde est relié aux postes sources, de manière à déterminer le courant induit.

Les résultats des calculs présentés ci-dessous confirment l'analyse présentée ci-dessus.

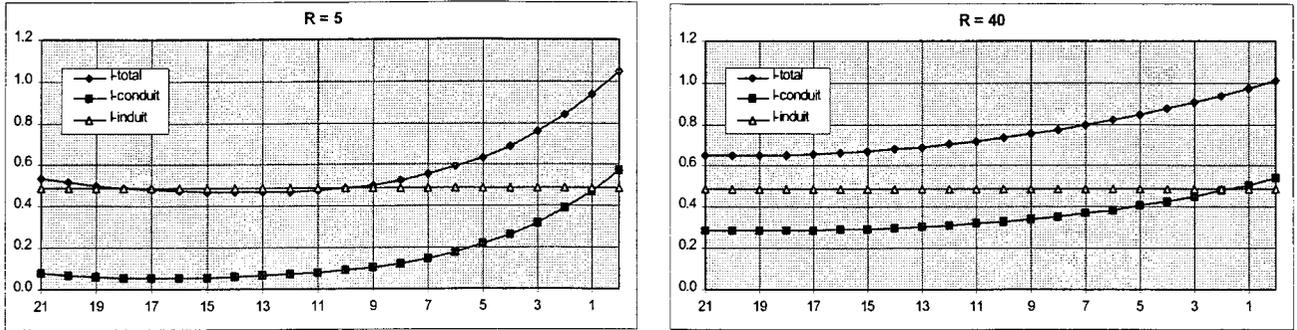


Figure 5.6 : Décomposition des courants de retour (réseau aérien avec câble de garde relié aux postes)

Si l'on s'intéresse à la répartition du courant dans le réseau de terre au voisinage du défaut, on constate, logiquement, que le mode de couplage du câble de garde a très peu d'influence lorsque la distance du défaut aux postes est grande.

D'une manière générale, la répartition du courant dans le réseau de terre peut être étudiée à l'aide des schémas de la page suivante.

On en déduit une méthode de calcul approchée permettant d'évaluer le courant j_0 dans la prise de terre au niveau du défaut (et donc la montée en potentiel de cette prise de terre) dans le cas d'une ligne aérienne affectée par un contournement d'isolateur, avec n portées saines à gauche du défaut et m portées saines à droite.

Cette méthode permet aussi d'évaluer le courant i_0 dans le câble de garde dans la portée à gauche du défaut. On peut en déduire la répartition du courant dans l'ensemble du réseau de terre, selon la méthode indiquée au § 3.

Dans cette méthode, intervient l'impédance équivalente de m portées calculée d'après la formule suivante :

$$Z(m) = Z_p + \frac{R \cdot Z(m-1)}{R + Z(m-1)} \quad \text{avec} \quad Z(1) = Z_p + R$$

$Z(m)$ tend rapidement vers une asymptote Z_{as} quand m croît. Z_{as} est la solution de l'équation :

$$Z_{as} = Z_p + \frac{R \cdot Z_{as}}{R + Z_{as}} \quad \text{où : } R \text{ et } Z_p \text{ sont la résistance des prises de terre et l'impédance propre du câble de garde pour une portée de 500 m.}$$

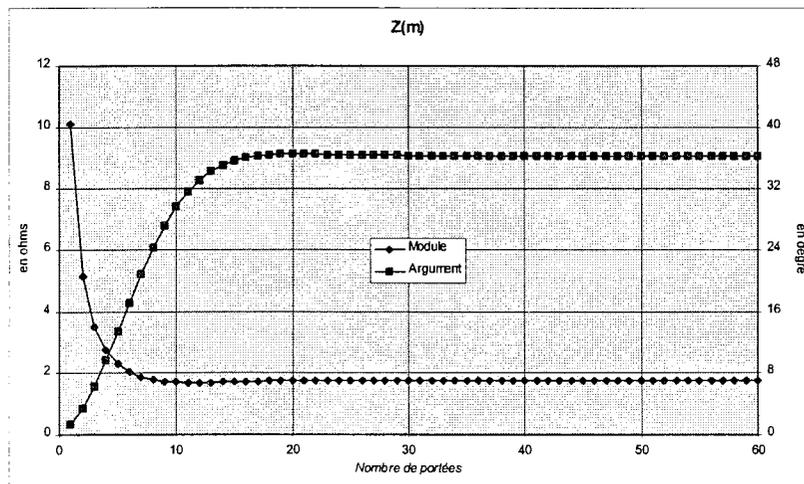
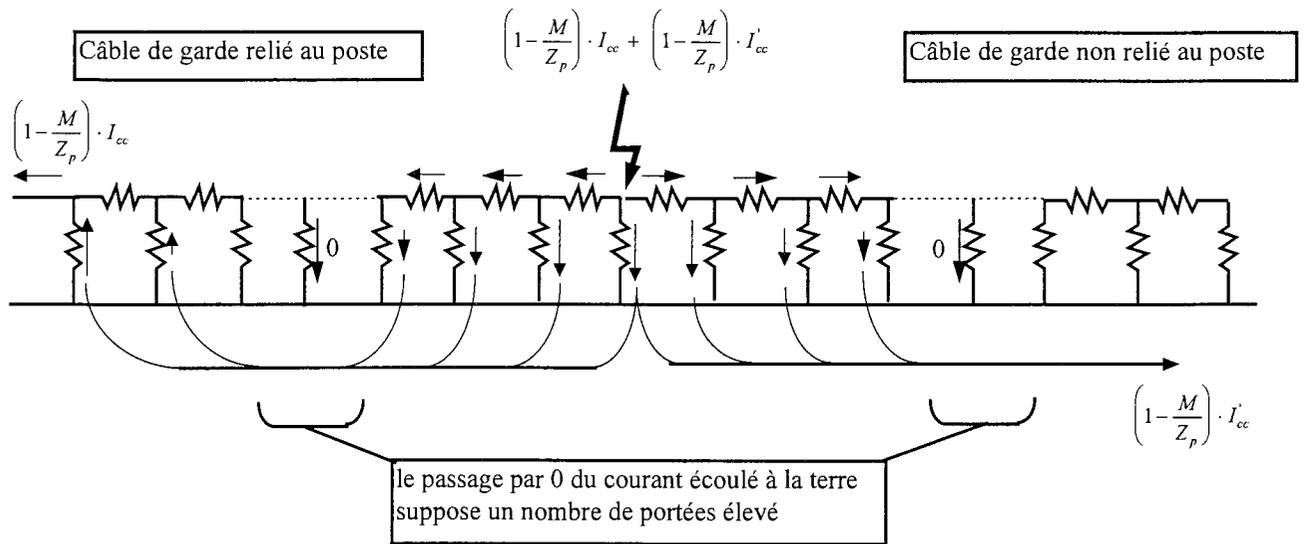


Figure 5.7 : Impédance équivalente de m portées aériennes.

courant conduit



courant induit

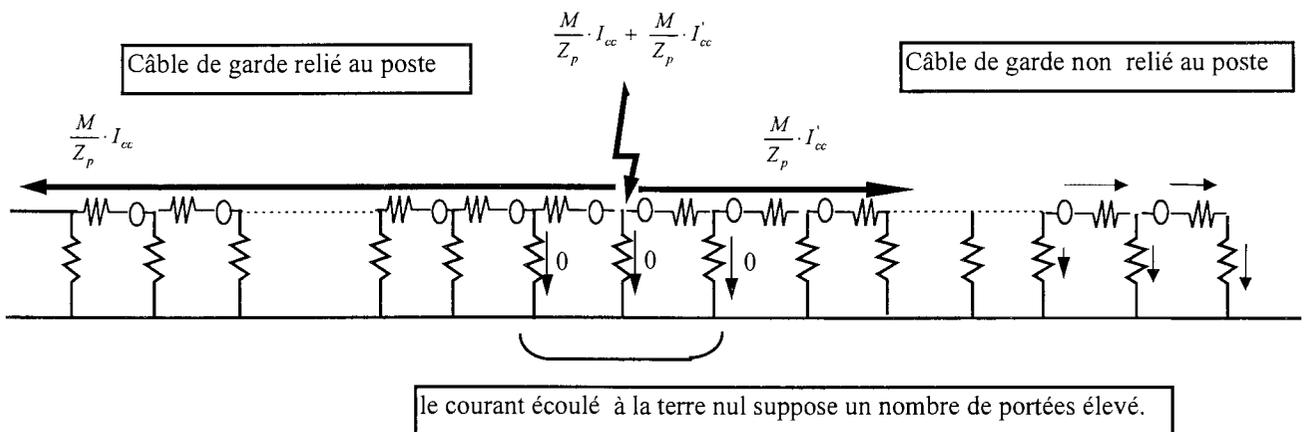


Figure 5.7 : Répartition des courants dans le réseau de terre

Le courant dans la prise de terre au niveau du défaut peut être approximé par :

$$j_0 = j_{o_cmd} = \frac{\frac{1}{R_0}}{\frac{1}{Z(n)} + \frac{1}{R_0} + \frac{1}{Z(m)}} \cdot \left(1 - \frac{M}{Z_p}\right) \cdot (I_{cc} + I'_{cc})$$

où $Z(m)$ est l'impédance équivalente de m portées

4 - 3 - LIAISON MIXTE.

Compte tenu des conclusions de l'étude de la liaison aérienne, on a étudié en détail le cas où le nombre de portées à droite et à gauche de la portée en défaut est égal à 20.

On a repris l'étude de la ligne aérienne du § 4 - 2

* en « remplaçant » certaines portées aériennes dans la partie gauche du réseau par une liaison souterraine.

* en supposant que le défaut survient sur une liaison souterraine et non sur une portée aérienne.

* en cumulant les deux modifications.

On ne "touche" pas les 20 portées aériennes (PA) à droite du réseau, on ne présente que des résultats sur la partie gauche du réseau.

Ensuite, on a étendu les conclusions au cas général où le nombre de portées à droite et à gauche de la portée en défaut est quelconque.

4 - 3 - 1 - Calcul exact pour le défaut sur une portée de la ligne aérienne.

4 - 3 - 1 - 1 - Généralités.

L'insertion d'une liaison souterraine se traduit par un schéma complémentaire.

Comme l'impédance propre équivalente du tronçon souterrain est voisine de l'impédance propre d'un câble de garde, l'insertion d'un tronçon souterrain modifie peu le courant conduit transitant dans le réseau de terre.

Par contre, l'impédance mutuelle avec le conducteur transitant le courant de court-circuit étant sensiblement plus grande, le courant induit est nettement modifié. En fait, il faut superposer au schéma précédent relatif au courant conduit, le schéma suivant :

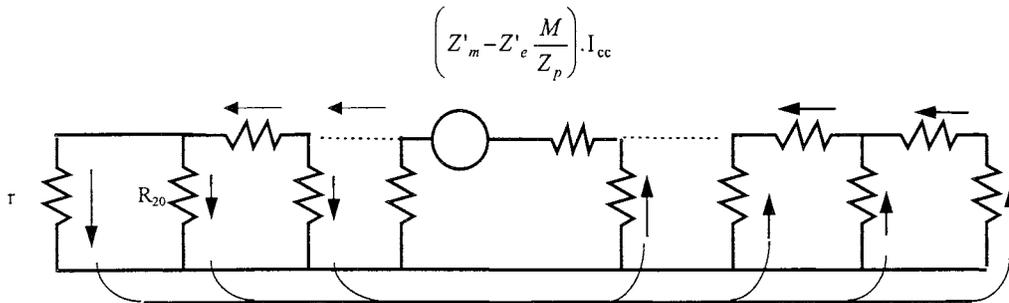


Figure 5.9 : Effet de l'insertion d'une liaison souterraine dans le réseau aérien

Le courant conduit au niveau du tronçon souterrain et des longueurs de câbles de garde adjacentes se trouve sensiblement augmenté. Il en résulte un courant total supérieur au niveau du tronçon souterrain et des longueurs de câbles de garde adjacentes.

4 - 3 - 1 - 2 - Effet de l'insertion d'un tronçon souterrain.

Les résultats obtenus montrent que :

- le courant de retour dans les écrans est plus élevé que dans le câble de garde.
- plus la liaison souterraine est proche du point de défaut, plus les contraintes électriques (courant et montée en potentiel) sont importantes.
- les contraintes critiques s'obtiennent quand le défaut tombe juste sur l'entrée de la liaison souterraine.
- la substitution d'une longueur aérienne par un tronçon souterrain de même longueur à proximité de la portée aérienne en défaut se traduit par une augmentation de l'ordre de 3 % de la montée en potentiel de la terre au niveau du défaut.
- le courant dans la partie droite du réseau ne bouge quasiment pas selon les différents cas.

4 - 3 - 1 - 3 - Influence des résistances de terre.

L'effet de la diminution de la résistance de l'une des prises de terre terminales dépend de la position par rapport au défaut (cf Annexe 4).

Par contre, la diminution simultanée de la résistance des 2 prises de terre terminales se traduit toujours par :

- * un accroissement du courant dans les écrans (inférieur à 10 pourcents).
- * une diminution de la chute de tension dans ces prises de terre.

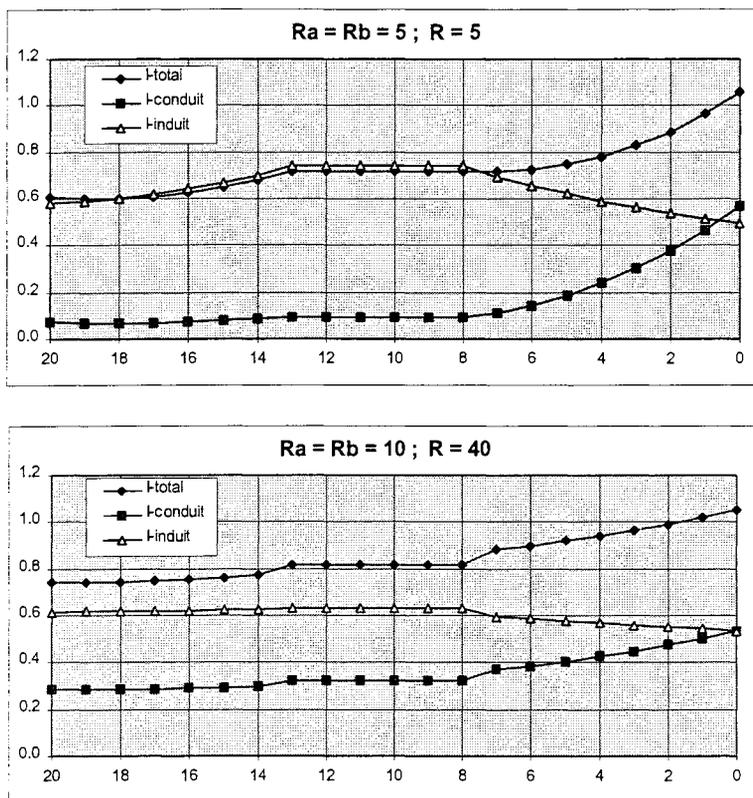


Figure 5.10 : Décomposition du courant de retour dans le câble de garde relié au poste (Ra, Rb : Résistances des prises de terre aux extrémités du tronçon souterrain. R : Résistance des prises de terre des pylônes)

Les courbes ci-dessus sont obtenues pour un réseau dont la partie gauche comporte 7 portées aériennes puis un tronçon souterrain à permutation d'écran de 3000 m et encore 7 autres portées aériennes.

4 - 3 - 1 - 4 - Influence de la longueur des sections élémentaires.

En remplaçant le tronçon souterrain de 3000 m avec trois sections élémentaires par deux tronçons souterrains de 1500 m, on constate que les montées en potentiel de terre et le courant dans les écrans ne changent pratiquement pas.

4 - 3 - 2 - Calcul exact pour le défaut sur un tronçon souterrain

Dans le présent paragraphe, on a repris les 2 configurations des paragraphes 4.2 et 4.3.1 mais en supposant cette fois que le défaut affecte un tronçon souterrain.

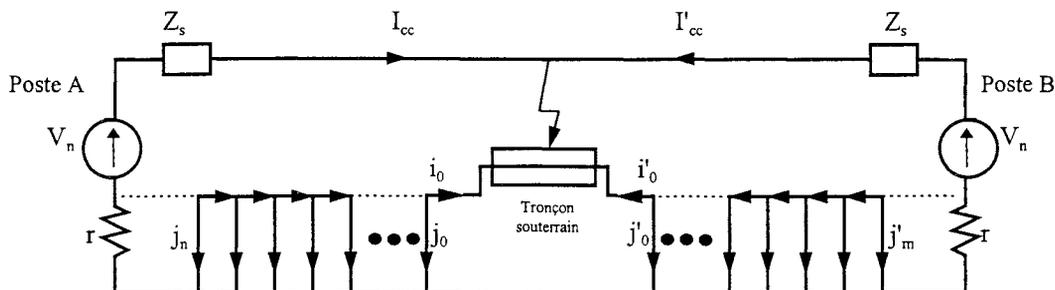


Figure 5.11 : Schéma d'étude

On distingue les deux configurations suivantes :

Interne : il y a 20 portées aériennes de chaque côté du tronçon souterrain en défaut.

DeuxLS : du côté droit du tronçon souterrain en défaut, il y a toujours 20 portées aériennes. Par contre, du côté gauche, il y a 14 portées aériennes et un deuxième tronçon souterrain qui se situe à la suite de celui en défaut.

Comme le tronçon souterrain en défaut comporte trois sections élémentaires, il y a 4 positions différentes du défaut : l'extrémité droite de la 1^{ère}, les deux extrémités de la 2^{ème}, et l'extrémité gauche de la 3^{ème}.

Avec deux modes de couplage du câble de garde aux postes sources, on a donc étudié 8 cas (cf annexe 5).

Lorsque le défaut affecte une liaison souterraine au lieu d'une portée de ligne aérienne, les courants de court-circuit, les courants de retour et les montées en potentiel des terres au voisinage du défaut sont relativement peu modifiés.

Tableau 5.1 : Variations en % par rapport au cas du défaut aérien

	I_{cc}	I'_{cc}	i_o	$V_o = j_o \cdot R_o$
Min	- 1,0	- 1,1	- 7,3	- 9,5
Max	- 4,3	+ 3,5	- 2,4	+ 1,4

L'effet de l'emplacement du défaut est négligeable car la différence des résultats entre deux positions différentes du défaut de même configuration est toujours inférieure à 5 %.

Les tensions entre écrans aux points de permutation de la liaison souterraine en défaut :

- elles décroissent de quelques % quand la résistance des prises de terre croît de 5 à 40 Ω .
- elles sont de 2 à 3% plus élevées dans le mode de couplage oui-oui
- elles sont de 7 à 10% plus importantes dans la structure **DeuxLS**

Les montées en potentiel des écrans au niveau des arrêts d'écran croissent quand la résistance des prises de terre croît. Le mode de couplage le plus contraignant dépend de la valeur de la résistance des prises de terre

Tableau 5.2 : Maxima des tensions entre écrans (V_{ee}) et de montées en potentiel des écrans (E) au niveau des arrêts d'écran - Pose en nappe.

prises de terre (Ω)	V_{ee} [kV]				E [kV]				
	5	10	20	40	5	10	20	40	
Interne	oui-oui	4.7	4.7	4.6	4.6	20.4	27.7	35.4	44.1
	non-non	4.6	4.5	4.5	4.4	19.4	26.7	37.1	54.5
Deux Liaisons	oui-oui	5.0	5.0	5.0	4.9	20.7	28.8	35.4	41.9
	non-non	4.9	4.8	4.8	4.6	19.8	28.7	39.9	57.0

4 - 3 - 3 - Calcul approché.

4 - 3 - 3 - 1 - Défaut externe à liaison souterraine (aérosouterrain).

Intensité du courant passant dans la prise de terre du pylône en défaut.

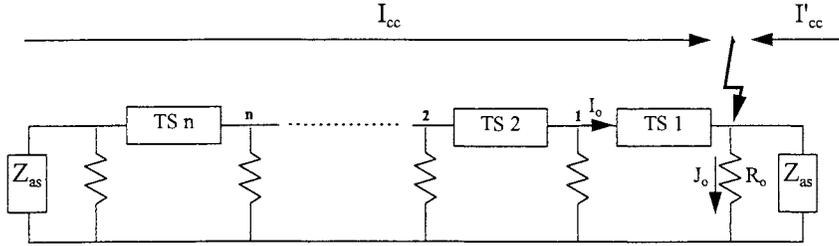


Figure 5.11 : Schéma d'étude

Le régime de défaut peut être interprété comme la superposition de 2 régimes :

- * un régime dans lequel les tensions $M.I_{cc}$ et $M.I'_{cc}$ sont annulées (conduction),
- * un régime dans lequel le courant injecté au niveau du défaut est annulé (induction).

Conduction :

$$j_{o_cond} = \frac{\frac{1}{R_0}}{\frac{1}{Z_{g_n}} + \frac{1}{R_0} + \frac{1}{Z_{as}}} \cdot \left[1 - \frac{M}{Z_p} \right] \cdot (I_{cc} + I'_{cc})$$

Z_{g_n} : Impédance entre le point de défaut et la source à gauche du réseau en tenant compte des n tronçons souterrains.

$$Z_{g_n} = Z'_c + R // Z_{g_n-1} \text{ avec } Z_{g_1} = Z'_c + R // Z_{as}$$

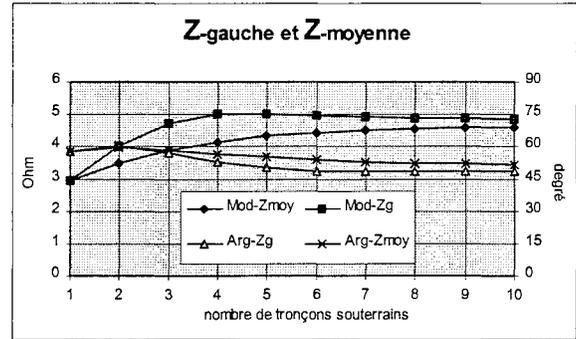


Figure 5.12 : Impédance équivalente

Induction :

Car on a n tronçons souterrains différents, le courant induit dans la prise de terre du pylône en défaut est la superposition de n courants induits créés par n tronçons :

$$j_{o_ind} = -\frac{Z_{as}}{R_0 + Z_{as}} \cdot \left(Z'_m - Z'_c \frac{M}{Z_p} \right) \cdot \left[\frac{1}{Z_{g_n} + R_0 // Z_{as}} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\prod_{j=1}^i R}{Z_{g_n-i} + R // Z_{d_i}} \right] \times I_{cc}$$

Z_{d_i} : Impédance entre le point i et la source droite du réseau (sans tenir compte la prise de terre de ce point)

Z_{g_n-i} : Impédance entre le point i et la source gauche du réseau (sans tenir compte la prise de terre de ce point)

$$Z_{d_i} = Z'_c + R // Z_{d_i-1} \text{ avec } Z_{d_1} = Z'_c + R_0 // Z_{as}$$

Comme les Z_{g_i} et les Z_{d_i} sont peu différentes, on désigne par : $Z_{moy} = \frac{Z_{g_1} + Z_{g_2} + \dots + Z_{g_n}}{n}$ la moyenne des impédances comme le montre dans la courbe ci-dessus, on en déduit :

$$j_{o_ind} = - \left[\chi_0 + \frac{R}{Z_{moy}^2 + 2 \cdot R \cdot Z_{moy}} \sum_{i=0}^{n-2} \left(\frac{R}{R + Z_{moy}} \right)^i \right] \times A \cdot I_{cc} \quad n \geq 2$$

$$\text{avec } \chi_0 = \frac{1}{Z_{g_n} + R_0 // Z_{as}} \quad A = \left[Z'_m - Z'_c \frac{M}{Z_p} \right] \cdot \frac{Z_{as}}{R_0 + Z_{as}}$$

Comme on sait calculer les courants de court-circuit, le courant dans la prise de terre au niveau du défaut, la détermination de ce courant est immédiate :

$$I_o = - \left[\frac{M}{Z_p} \cdot I_{cc} + \frac{R_o}{Z_{R-n}} \cdot j_{o_cond} + \frac{R_o + Z_{as}}{Z_{as}} \cdot j_{o_ind} \right]$$

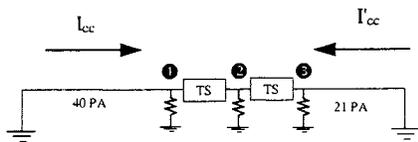
Tableau 5.3 : Comparaison des résultats entre le calcul approché et le calcul détaillé - défaut monophasé externe (Les tronçons souterrains sont à permutation des écrans et la partie droite du réseau comporte 21 portées aériennes)

	Ro = 10Ω						Ro = 5Ω					
	calcul approché		liaison du CDG au poste				calcul approché		liaison du CDG au poste			
	(kA)		Sans		Avec		(kA)		Sans		Avec	
	I _{cc}	Jo	% I _{cc}	% Jo	% I _{cc}	% Jo	I _{cc}	Jo	% I _{cc}	% Jo	% I _{cc}	% Jo
20 PA	29406	2509	5.2%	3.8%	1.8%	-0.4%	29406	4695	4.9%	3.5%	1.4%	-0.6%
14 + ITS	33242	2545	5.4%	0.7%	1.9%	-7.7%	33242	4711	5.3%	0.4%	1.8%	-1.4%
14 + 2TS	31638	2443	5.1%	5.9%	1.7%	2.2%	31638	4515	5.1%	6.3%	1.7%	2.7%
20 + ITS	28148	2392	4.8%	4.8%	1.4%	-0.5%	28148	4427	4.7%	4.4%	1.3%	-0.8%
20 + 2TS	26988	2334	4.5%	8.0%	1.2%	2.6%	26988	4310	4.5%	8.4%	1.1%	3.0%
20 + 3TS	25914	2242	4.3%	9.7%	1.0%	4.1%	25914	4133	4.4%	10.4%	1.0%	4.9%
40 + ITS	18630	2108	3.7%	4.7%	0.9%	-0.2%	18630	3902	3.6%	4.3%	0.8%	-0.5%
40 + 2TS	18113	2128	3.4%	7.0%	0.6%	2.1%	18113	3923	3.4%	7.2%	0.6%	2.3%
40 + 3TS	17623	2089	3.2%	8.1%	0.4%	3.1%	17623	3842	3.2%	8.6%	0.5%	3.6%
40 + 4TS	17157	2031	3.1%	8.7%	0.4%	3.6%	17157	3732	3.2%	9.3%	0.4%	4.2%
40 + 6TS	16714	1975	3.1%	9.0%	0.4%	3.7%	16714	3630	3.1%	9.6%	0.4%	4.4%

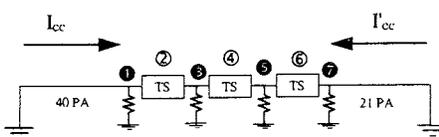
4 - 3 - 3- 2 - Défaut interne à liaison souterraine.

Influence de la position du défaut

Tableaux 5.4 : Répartition du courant de défaut (Ampères) selon les modes de couplage du câble de garde aux postes sources



	CDG non relié aux postes			CDG relié aux postes		
	I _{cc}	I' _{cc}	Jo	I _{cc}	I' _{cc}	Jo
①	18523	25135	1607	19074	26007	1690
②	17998	25825	1848	15836	27131	1939
③	17517	26853	1989	18007	28318	2085



	CDG non relié aux postes			CDG relié aux postes		
	I _{cc}	I' _{cc}	Jo	I _{cc}	I' _{cc}	Jo
①	18547	24202	1475	19105	25023	1552
②	18244	24419	1529	18787	25255	1598
③	18026	24877	1677	18573	26070	1774
④	17747	25426	1709	18262	26318	1770
⑤	17545	25874	1853	18052	27184	1923
⑥	17261	26495	1842	17749	27446	1907
⑦	17072	26902	1932	17546	28362	2026

① ② ③ ⑤ ⑦ : défauts externes (contournement d'une chaîne d'isolateur)
 ② ④ ⑥ : défauts internes au premier point de permutation.

On a étudié deux configurations ci-dessus avec les tronçons souterrains à permutation des écrans. On constate que :

- La montée en potentiel de la prise de terre des extrémités d'une liaison souterraine est maximale quand le défaut survient à l'extrémité la plus proche d'un poste.
- Les défauts survenant à l'intérieur de la liaison souterraine sont moins contraignants que le cas où le défaut est au niveau de l'aérosouterrain.

Par conséquent, les contraintes sont les plus sévères quand le défaut survient au premier tronçon de la liaison souterraine à l'extrémité la plus proche d'un poste.

Par conséquent, les contraintes sont les plus sévères quand le défaut survient au premier tronçon de la liaison souterraine à l'extrémité la plus proche d'un poste.

Le tableau ci-après donne la montée en potentiel de la terre au niveau du défaut en kV. Il montre également que, si la liaison souterraine insérée n'est pas très longue, cette montée en potentiel, lorsque le défaut survient au niveau du passage aérosouterrain peut être calculée comme si cette liaison souterraine est une portée aérienne !

Tableau 5.5 : Montée en potentiel de la terre et erreur commise en prenant la valeur approchée dans le cas d'une liaison purement aérienne

	CDG non relié aux postes		CDG relié aux postes	
	Tension (kV)	erreur (%)	Tension (kV)	erreur (%)
20 PA + 1PA + 21 PA (*)	23.7	-4.3%	24.8	0.3%
20 PA + 1TS + 21 PA	22.8	-8.5%	24.1	-3.0%
20 PA + 2TS + 21 PA	21.6	-14.6%	22.8	-8.8%
20 PA + 3TS + 21 PA	20.4	-21.2%	21.5	-15.0%
40 PA + 1PA + 21 PA (**)	19.7	-4.3%	20.5	0.0%
40 PA + 1TS + 21 PA	20.1	-1.9%	21.1	2.9%
40 PA + 2TS + 21 PA	19.9	-3.2%	20.9	1.6%
40 PA + 3TS + 21 PA	19.3	-6.2%	20.3	-1.3%
40 PA + 4TS + 21 PA	18.7	-9.9%	19.6	-4.6%
40 PA + 5TS + 21 PA	18.1	-13.2%	19.0	-7.8%
(*) Vp = 24,8 kV ; (**) Vp = 20,5 kV : résultats du calcul approché.				

4 - 4 - CONCLUSION

La comparaison des différents cas étudiés : ligne entièrement aérienne, liaisons mixtes avec défaut soit dans la partie aérienne soit dans la partie souterraine, montre que la montée en potentiel de la terre la plus proche du défaut varie peu avec la configuration étudiée : la présence d'un tronçon souterrain au voisinage du défaut provoque une variation de quelques pour-cent.

Par conséquent, pour estimer les contraintes en tension dans les écrans des câbles, on peut, en première approximation, retenir les valeurs calculées dans le cas d'une ligne purement aérienne.

L'étude assez large réalisée dans le cas d'une liaison de 20 km entre 2 postes montre que, dans le cas d'un défaut survenant au milieu de la liaison, la montée en potentiel des écrans dépasse généralement un peu 20 kV pour une valeur de la résistance des prises de terre de 10 Ohms. Une amélioration des prises de terre permet de réduire les montées en potentiel.

On trouvera en annexe 6 des applications pratiques de la méthode de calcul développée : on y détermine les montées en potentiel des prises de terre puis des écrans (à l'aide des formules des chapitres précédents) dans différentes configurations.

5. CONCLUSION

On a établi une première méthode de calcul permettant d'évaluer avec une bonne précision les montées en potentiel des prises de terre d'un tronçon souterrain inséré dans une liaison aérienne en cas de défaut monophasé : l'erreur est en général sensiblement inférieure à 10 %.

Une deuxième méthode beaucoup plus simple (permettant de se ramener au cas d'une ligne purement aérienne) donne des résultats moins précis mais néanmoins acceptables (surtout si le câble de garde est relié aux postes).

Pour évaluer les montées en potentiel des écrans, on commet (cf annexe 6) une erreur acceptable en faisant l'approximation selon laquelle le courant de retour dans les écrans ou le conducteur de terre est égal au courant de court-circuit transitant dans la liaison.

Une synthèse [20] de ces études a été présentée à la session 1999 des Journées Internationales des Câbles (JICABLE).

Chapitre 6

DEUX LIAISONS SOUTERRAINES

MISES EN PARALLELE.

1 - GENERALITES.....	49
2 - MISE A LA TERRE EN UN POINT - POSE EN TREFLE.....	50
2 - 1 - RÉGIMES PERMANENT ET COURT - CIRCUIT TRIPHASÉ :	50
2 - 2 - RÉGIME DE DÉFAUT MONOPHASÉ EXTERNE	51
2 - 3 - RÉGIME DE DÉFAUT MONOPHASÉ INTERNE.....	51
3 - MISE A LA TERRE EN UN POINT - POSE EN NAPPE	53
3 - 1 - RÉGIMES PERMANENT ET COURT-CIRCUIT TRIPHASÉ :	53
3 - 2 - RÉGIMES DE DÉFAUT MONOPHASÉ.....	54
4 - PERMUTATION DES ECRANS	55
4 - 1 - RÉGIMES PERMANENT ET COURT-CIRCUIT TRIPHASÉ.....	55
4 - 2 - RÉGIME DE DÉFAUT MONOPHASÉ EXTERNE	56
4 - 3 - RÉGIME DE DÉFAUT MONOPHASÉ INTERNE.....	57
5 - CONCLUSION	58

1 - GENERALITES

La capacité de transport des lignes aériennes 400 kV est généralement supérieure à celle des liaisons souterraines, même lorsque l'on utilise des câbles de très forte section. L'insertion d'une portion souterraine dans le réseau de transport 400 kV nécessite donc de disposer deux liaisons souterraines mises en parallèle en prolongement d'un circuit aérien.

Ce chapitre traite des surtensions sollicitant les écrans des câbles dans cette configuration. On a d'abord traité le cas de liaisons avec **mise à la terre en un point** (posées en trèfle et nappe) puis celui des liaisons à **permutation des écrans**.

En régime permanent et dans les régimes de défaut externe, les courants transitant dans la partie aérienne de la liaison se répartissent à égalité dans les 2 liaisons souterraines mises en parallèle.

Lorsque la distance entre celles-ci est grande, les effets de mutuelle entre les 2 liaisons sont faibles et les surtensions dans chaque liaison sont donc divisées par 2 par rapport au cas d'une liaison souterraine simple.

Ce niveau de surtension étant pris comme référence, on évalue les conséquences de l'effet de mutuelle pour des distances faibles entre les 2 liaisons souterraines en parallèle, par l'intermédiaire du coefficient :

$$r(\%) = 100 \cdot \frac{|e_d| - |e_s|/2}{|e_s|/2}$$

où :

- e_d est la contrainte effective observée dans chacune des 2 liaisons souterraines en parallèle.
- e_s est la contrainte que l'on observerait pour une liaison simple.

En régime de défaut interne sur l'une des 2 liaisons souterraines en parallèle, le courant de défaut ne se répartit pas également entre les 2 liaisons. Dans cette configuration, on évalue les variations des surtensions par rapport au cas où l'on aurait une seule liaison souterraine, pour des courants de défaut de part et d'autre du tronçon souterrain donnés.

Les câbles sont posés de manière parfaitement symétrique (ceci est illustré dans les figures qui suivent).

Par conséquent, les courants de phase, les courants dans les circuits d'écran, et dans les conducteurs de terre éventuels se répartissent également entre les deux liaisons, en régime permanent et dans les régimes de défaut triphasé et monophasé externe.

On garde les notations précédemment utilisées et on utilise les notations complémentaires suivantes :

$$* \quad z_{m1} = \frac{z_1 + z_2 + z_3}{3} \quad ; \quad z_{m2} = \frac{z_2 + z_3 + z_4}{3} \quad ; \quad z_{m3} = \frac{z_3 + z_4 + z_5}{3} \quad ; \quad z_{m4} = \frac{z_1 + z_3 + z_5}{3}$$

où z_1 à z_5 sont les mutuelles linéiques entre câbles de liaisons différentes, conformément au tableau ci-dessous.

	Entre câbles :	Distance entre câbles	
		TREFLE	NAPPE
z_1	3 et 3	$d - S$	$d - 2S$
z_2	1 et 3	$\sqrt{S^2 + d(d - S)}$	$d - S$
z_3	1 et 1 ; 2 et 3	d	d
z_4	1 et 2	$\sqrt{S^2 + d(d + S)}$	$d + S$
z_5	2 et 2	$d + S$	$d + 2S$

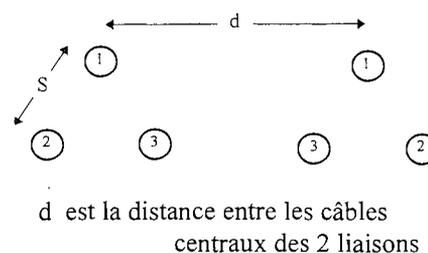


Figure 6.1 : Position des câbles d'une liaison souterraine double.

Les résultats donnés dans ce chapitre sont relatifs à des liaisons en câbles 1600 mm² cuivre 400 kV. On trouvera en annexe 7 les résultats pour les câbles 2500 mm² cuivre 400 kV.

2 - MISE A LA TERRE EN UN POINT - POSE EN TREFLE

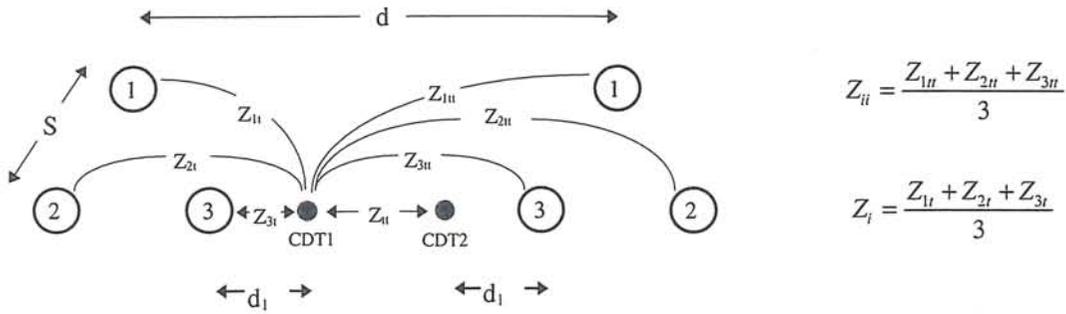


Figure 6.2 : Impédances mutuelles entre câbles posés en trèfle.

Dans ce qui suit on a fixé la distance entre conducteur de terre et câble intérieur $d_i = 0,15$ m

2 - 1 - REGIMES PERMANENT ET COURT - CIRCUIT TRIPHASE :

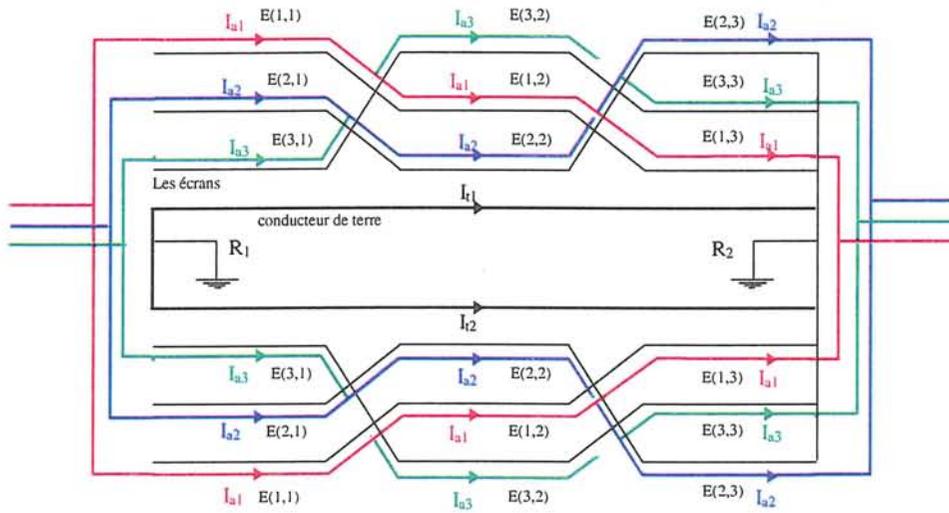


Figure 6.3 : Répartition des courants en régimes triphasés - câbles posés en trèfle.

La tension induite par les courants de phase dans les conducteurs de terre est nulle. Ce qui conduit à négliger le courant dans les conducteurs de terre. Les montées en potentiel des écrans à leur extrémité isolée sont alors égales aux tensions induites dans les écrans par les courants de phase :

$$E_i = [(Z_m - Z_c) + \varepsilon] L \cdot I_{ai} \quad \text{avec : } \varepsilon = \frac{(z_1 + z_5) - (z_2 + z_4)}{3}$$

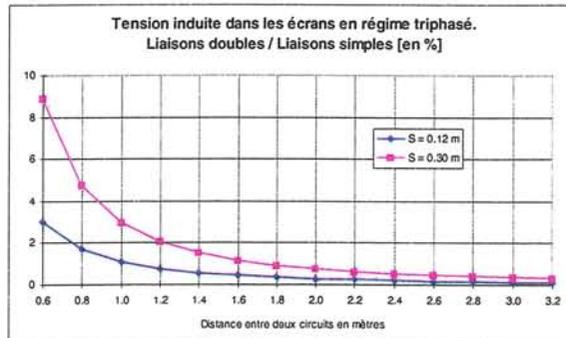


Figure 6.4 : Tension induite maximale dans les écrans comparée avec celle d'une liaison simple

2 - 2 - REGIME DE DEFAUT MONOPHASE EXTERNE

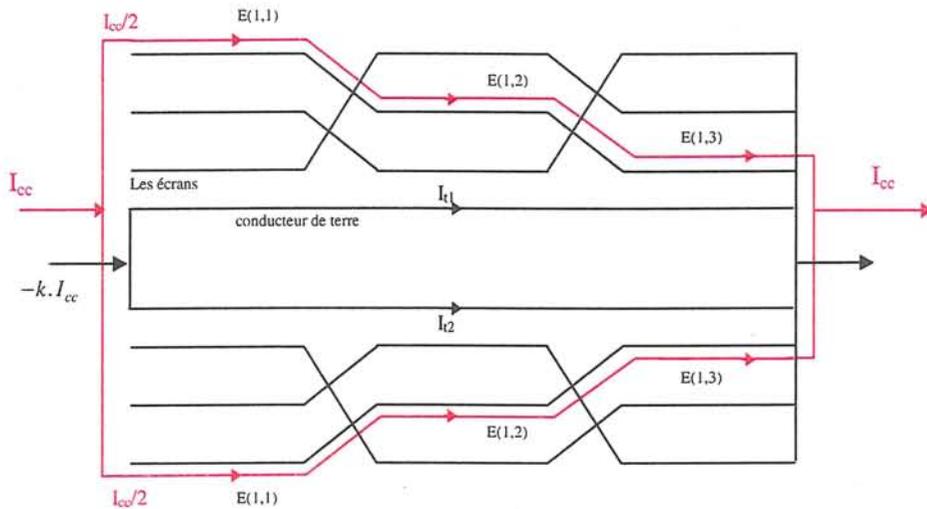


Figure 6.5 : Répartition des courants de défaut monophasé externe.

On fait l'approximation selon laquelle la somme des courants dans les conducteurs de terre est sensiblement égale au courant de retour du courant de court-circuit :

$$I_{11} + I_{12} = I_g \approx -I_{cc}$$

Alors la tension induite sur l'écran du circuit en défaut et la chute de tension sur le conducteur de terre sont :

$$E_1 = [(Z_m + z_{m4}) - (Z_i + Z_{ii})] \cdot L \cdot \frac{I_{cc}}{2}$$

$$V_0 = [(Z_i + Z_{ii}) - (Z_i + Z_{ii})] \cdot L \cdot \frac{I_{cc}}{2}$$

On en déduit la montée en potentiel par rapport au conducteur de terre :

$$V_1 = E_1 - V_0 = \frac{1}{2} [(Z_m + z_{m4}) - 2 \cdot (Z_i + Z_{ii}) + (Z_i + Z_{ii})] \cdot L \cdot I_{cc}$$

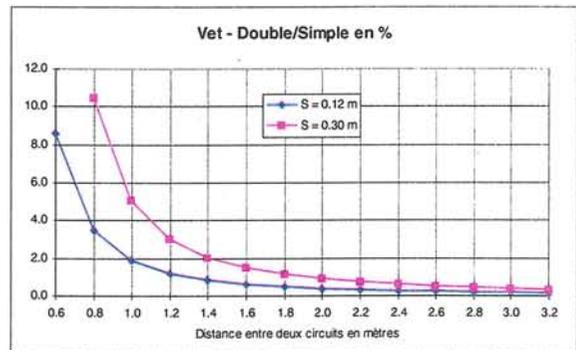
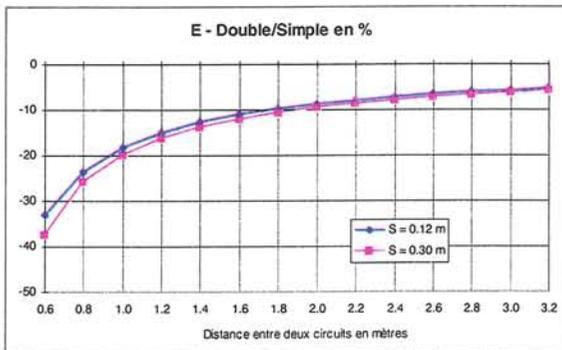


Figure 6.6 : Maxima de la tension induite dans les écrans et de la tension écrans - conducteur de terre comparés à ceux d'une liaison simple. Défaut monophasé externe. Pose en trèfle.

2 - 3 - REGIME DE DEFAUT MONOPHASE INTERNE

On note :

e_1, e_2 : Maxima de la chute de tension sur les écrans pour la liaison en défaut et pour la liaison saine.

V_0 : Chute de tension sur les conducteurs de terre.

k et x : Coefficients de courant dans les conducteurs de terre et dans les âmes.

$$\beta = \frac{y}{L} ; \quad Z_x = Z_a - Z_m$$

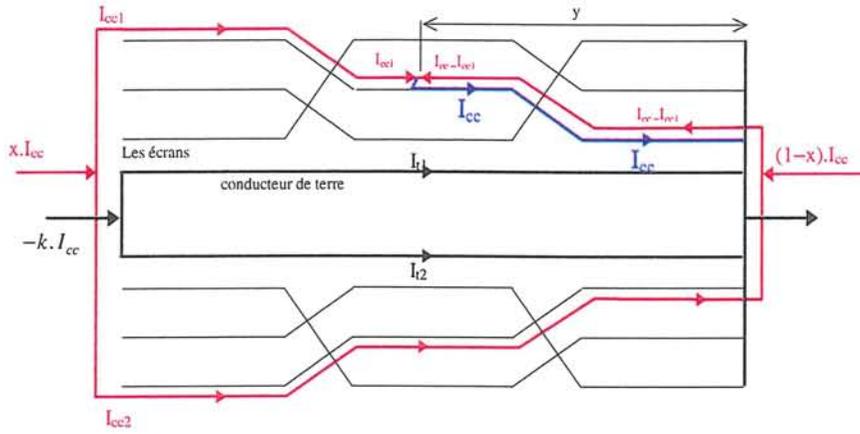


Figure 6.7 : Répartition des courants lors d'un défaut monophasé interne.

Le système d'équations à résoudre est explicité ci dessous :

$$\begin{pmatrix} Z_i & Z_{ii} & Z_i & Z_{ii} & 0 & 0 & -1 \\ Z_{ii} & Z_i & Z_{ii} & Z_i & 0 & 0 & -1 \\ Z_i - Z_{ii} & Z_{ii} - Z_i & Z_m - z_{m4} & z_{m4} - Z_m & 0 & 0 & 0 \\ Z_i & Z_{ii} & Z_m & z_{m4} & -1 & 0 & 0 \\ Z_{ii} & Z_i & z_{m4} & Z_m & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} I_{e1} \\ I_{e2} \\ I_{cc1} \\ I_{cc2} \\ e_1 \\ e_2 \\ V_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \beta \cdot Z_s \\ -\beta \cdot R_e \\ 0 \\ x \\ -k \end{pmatrix} \cdot I_{cc}$$

Les montées en potentiel des écrans par rapport au conducteur de terre sont calculées à partir des chutes de tension sur les écrans (e) et sur le conducteur de terre (V₀) : V_{et} = e - V₀.

$$e_1 = \left\{ -(Z_i + Z_{ii}) \cdot k + (Z_m + z_{m4}) \cdot x + [\alpha + 2 \cdot R_e] \cdot \beta \right\} \cdot L \cdot \frac{I_{cc}}{2}$$

$$V_{et1} = \left\{ -(Z_i + Z_{ii}) \cdot (k + x) + (Z_m + z_{m4}) \cdot x + (Z_i + Z_{ii}) \cdot k + [\alpha + 2 \cdot R_e] \cdot \beta \right\} \cdot L \cdot \frac{I_{cc}}{2}$$

avec :

$$\alpha = \frac{Z_s \cdot (Z_i - Z_{ii})}{\lambda'} + \frac{Z_s \cdot (Z_m - z_{m4})}{\lambda} ; \quad \lambda = \frac{(Z_m - z_{m4}) \cdot (Z_i - Z_{ii}) - (Z_i - Z_{ii})^2}{Z_i - Z_{ii}} ; \quad \lambda' = - \frac{(Z_m - z_{m4}) \cdot (Z_i - Z_{ii}) - (Z_i - Z_{ii})^2}{Z_i - Z_{ii}}$$

Les calculs détaillés (annexe 7) montrent que :

- La montée en potentiel des écrans de la liaison souterraine en défaut est supérieure à celle de la liaison souterraine saine.
- Elle est maximale lorsque le défaut est proche de l'aérosouterrain, côté écrans isolés.

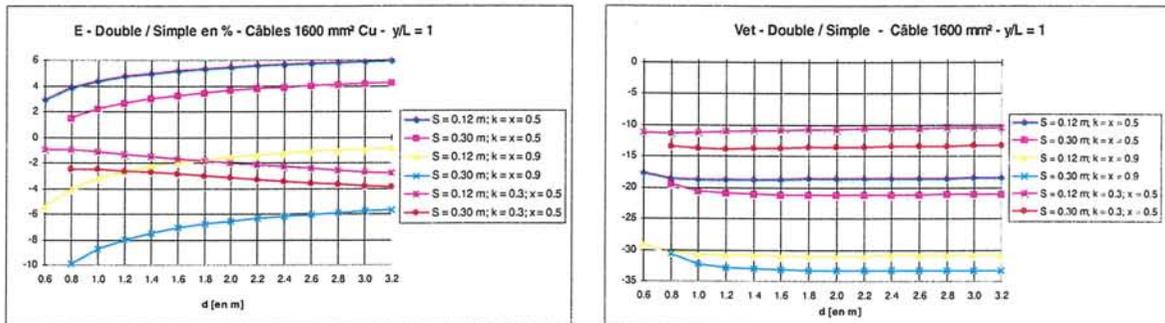


Figure 6.8 : Maxima de la montée en potentiel des écrans et de la tension écran - conducteur de terre comparés à ceux d'une liaison simple Défaut monophasé interne. Pose en trèfle.

3 - MISE A LA TERRE EN UN POINT - POSE EN NAPPE

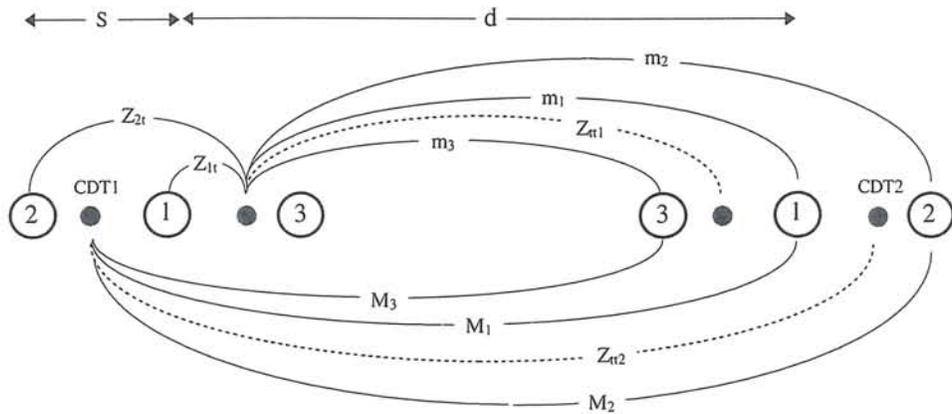


Figure 6.9 : Impédances mutuelles entre câbles posés en nappe.

$$Z_i = \frac{Z_{1i} + Z_{2i} + Z_{3i}}{3}; \quad Z_{ii} = \frac{Z_{1ii} + Z_{2ii} + Z_{3ii}}{3}; \quad Z_{ii} = \frac{Z_{ii1} + Z_{ii2}}{2}$$

3 - 1 - REGIMES PERMANENT ET COURT-CIRCUIT TRIPHASE :

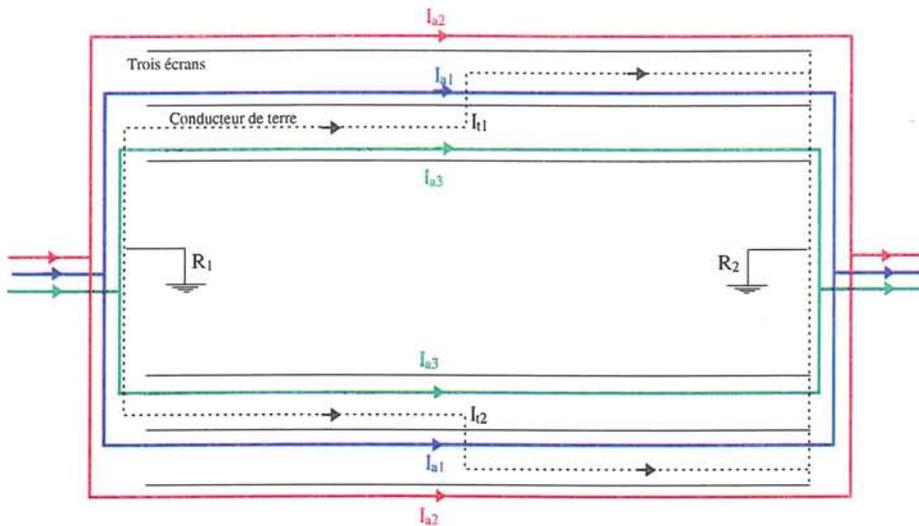


Figure 6.10 : Répartition des courants en régimes triphasés - câbles posés en nappe.

On montre que les courants dans les conducteurs de terre sont négligeables devant les courants de phase (cf annexe 7)

Pour les tensions induites sur les écrans, on retrouve les expressions habituelles dans le cas d'une seule liaison, avec l'ajout d'un terme fonction des mutuelles (z_1, z_2, z_3, z_4, z_5) venant de la présence de la deuxième liaison souterraine mise en parallèle.

$$\begin{aligned} E_1 &= [(Z_m - Z_c) + (z_3 + \alpha^2 \cdot z_4 + \alpha \cdot z_2)] \cdot L \cdot I_{a1} \\ E_2 &= [(\alpha^2 Z_m + Z_c + \alpha Z_L) + (z_4 + \alpha^2 \cdot z_5 + \alpha \cdot z_3)] \cdot L \cdot I_{a1} \\ E_3 &= [(\alpha Z_m + Z_c + \alpha^2 Z_L) + (z_2 + \alpha^2 \cdot z_3 + \alpha \cdot z_1)] \cdot L \cdot I_{a1} \end{aligned}$$

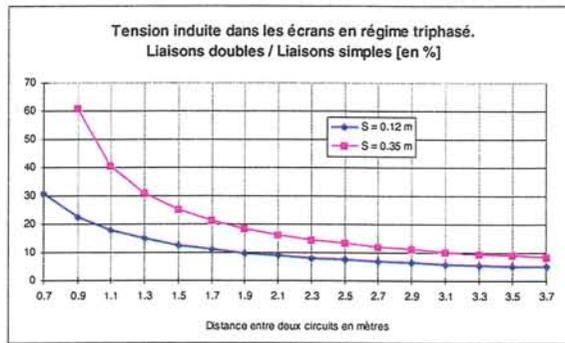


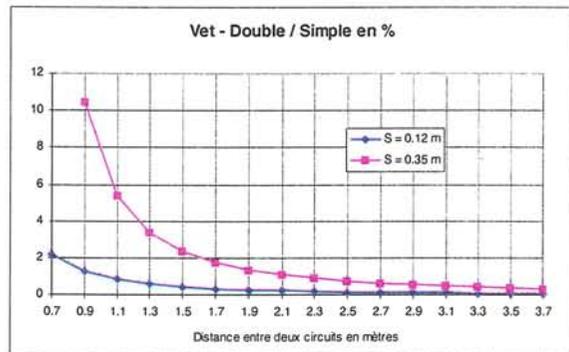
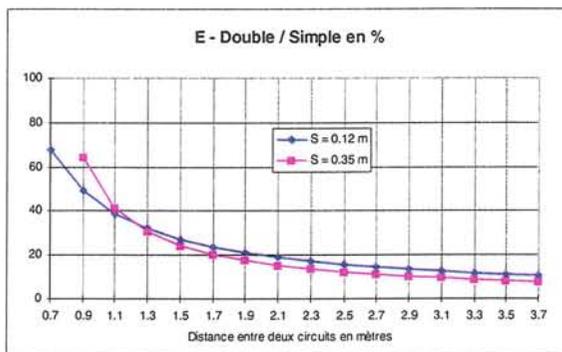
Figure 6.11 : Tension induite maximale dans les écrans comparée à celle d'une liaison simple. Régimes triphasés

3 - 2 - REGIMES DE DEFAUT MONOPHASE

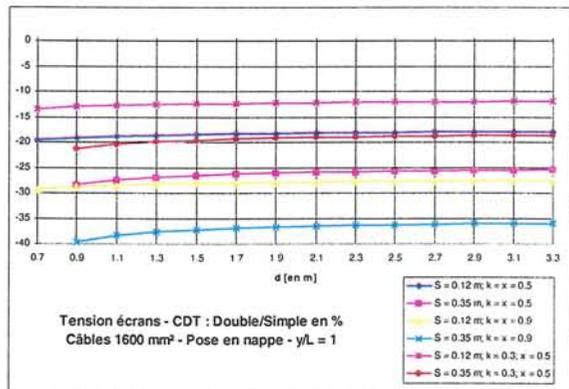
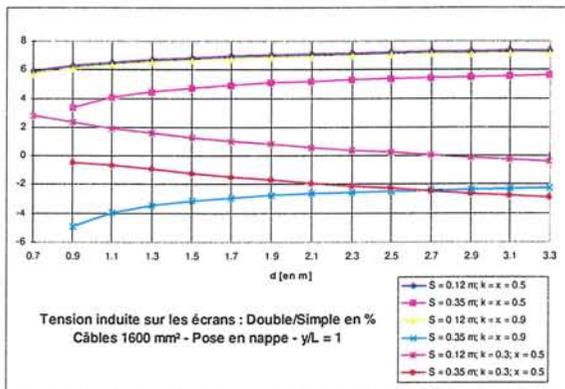
Les résultats sont identiques à ceux obtenus pour une pose en trèfle en remplaçant z_{m4} par A et Z_{ii} par B,

Tableau 6.1 : Coefficients A et B

Défaut au circuit n°	1	2	3
A	z_3	z_5	z_1
B	$\frac{m_1 + M_1}{2}$	$\frac{m_2 + M_2}{2}$	$\frac{m_3 + M_3}{2}$



a) défaut externe



b) défaut interne

Figure 6.12 : Maxima de la tension induite dans les écrans et de la tension écran - CDT comparés à ceux d'une liaison simple. Défaut à circuit n°3. Pose en nappe.

4 - PERMUTATION DES ECRANS

4 - 1 - REGIMES PERMANENT ET COURT-CIRCUIT TRIPHASE

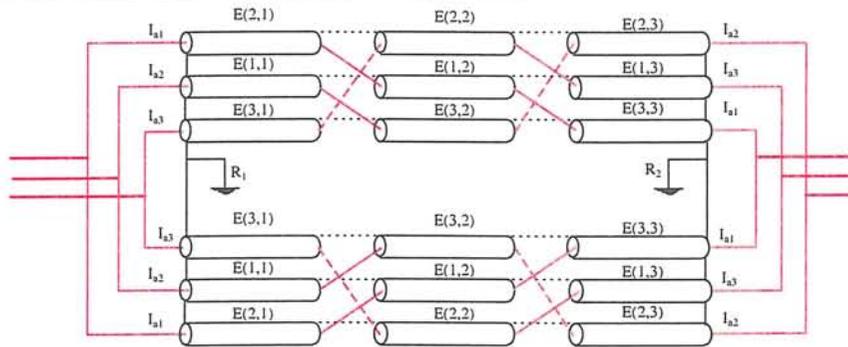


Figure 6.13 : Répartition des courants en régimes triphasés - câbles posés en trèfle.

Tensions induites sur les écrans dans chaque section élémentaire

* pour le circuit d'écran 1 :

$$\begin{aligned} E(1,1) &= [Z_m - Z_c].\alpha^2.l.I_{a1} && + [z_4 + \alpha^2 z_3 + \alpha z_2].l.I_{a1} \\ E(1,2) &= [Z_m - Z_c].l.I_{a1} && + [z_3 + \alpha^2 z_2 + \alpha z_4].l.I_{a1} \\ E(1,3) &= [Z_m - Z_c].\alpha.l.I_{a1} && + [z_2 + \alpha^2 z_4 + \alpha z_3].l.I_{a1} \end{aligned}$$

* pour le circuit d'écran 2 :

$$\begin{aligned} E(2,1) &= [Z_m + \alpha^2 Z_c + \alpha Z_L].l.I_{a1} && + [z_5 + \alpha^2 z_4 + \alpha z_3].l.I_{a1} \\ E(2,2) &= [Z_m + \alpha^2 Z_c + \alpha Z_L].\alpha.l.I_{a1} && + [z_4 + \alpha^2 z_3 + \alpha z_5].l.I_{a1} \\ E(2,3) &= [Z_m + \alpha^2 Z_c + \alpha Z_L].\alpha^2.l.I_{a1} && + [z_3 + \alpha^2 z_5 + \alpha z_4].l.I_{a1} \end{aligned}$$

* pour le circuit d'écran 3 :

$$\begin{aligned} E(3,1) &= [Z_m + \alpha Z_c + \alpha^2 Z_L].\alpha.l.I_{a1} && + [z_3 + \alpha^2 z_2 + \alpha z_1].l.I_{a1} \\ E(3,2) &= [Z_m + \alpha Z_c + \alpha^2 Z_L].\alpha^2.l.I_{a1} && + [z_2 + \alpha^2 z_1 + \alpha z_3].l.I_{a1} \\ E(3,3) &= [Z_m + \alpha Z_c + \alpha^2 Z_L].l.I_{a1} && + [z_1 + \alpha^2 z_3 + \alpha z_2].l.I_{a1} \end{aligned}$$

Dans chaque circuit d'écran, la tension totale induite dans une section ternaire est nulle. Il s'ensuit qu'il n'y a pas de circulation de courant dans les écrans.

$$I_{e1} = I_{e2} = I_{e3} = 0$$

On retrouve les expressions habituelles dans le cas d'une seule liaison, avec l'ajout d'un terme fonction des mutuelles (z_1, z_2, z_3, z_4, z_5) venant de la présence de la deuxième liaison souterraine mise en parallèle.

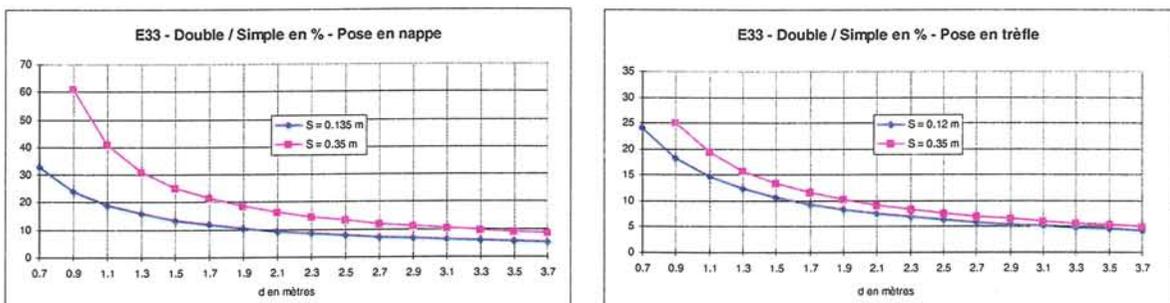


Figure 6.14 : Tension induite maximale dans les écrans à la 3° section élémentaire comparée à celle d'une liaison simple.

4 - 2 - REGIME DE DEFAUT MONOPHASE EXTERNE

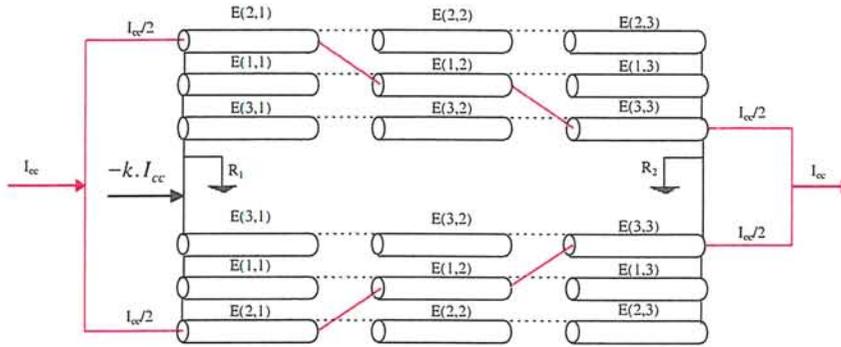
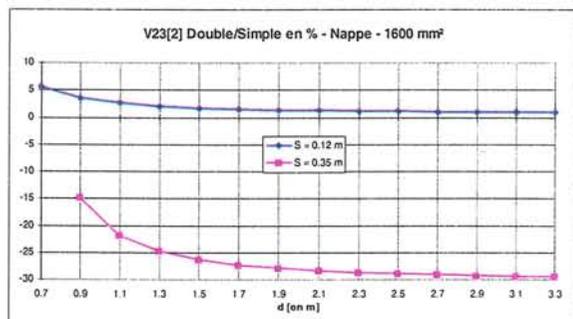
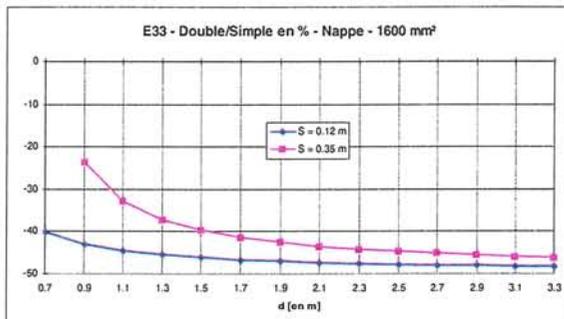


Figure 6.15 : Répartition des courants de défaut monophasé externe.

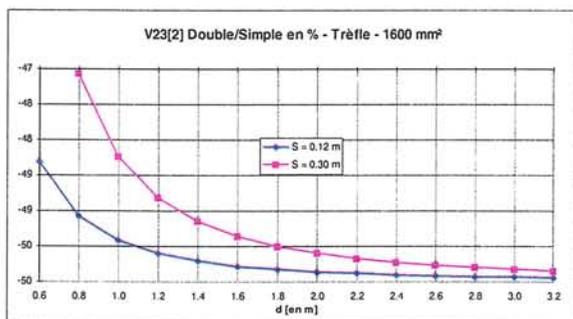
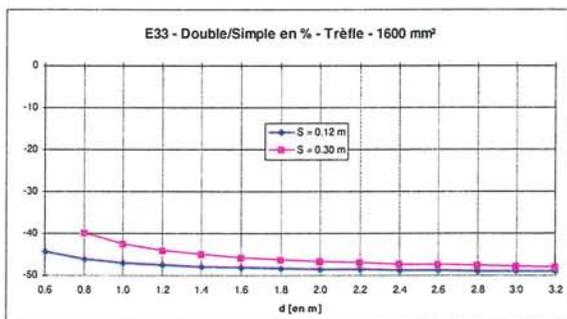
La mise en équations du problème est traitée en annexe 7. On présente ci-dessous :

- * la tension induite maximale dans les écrans à la dernière section élémentaire dans l'hypothèse où le courant de retour transitant dans les écrans est égal au courant de court-circuit transitant dans la phase en défaut.
- * la tension maximale entre écrans au 2° point de permutation qui est indépendante du trajet de retour du courant de court-circuit).

- $V_{\max_nappe} = V_{23}(1) = V_{23}(2)$
- $V_{\max_trèfle} = V_{23}(1) = V_{23}(2) = V_{12}(1) = V_{13}(2)$



a) Pose en nappe



a) Pose en trèfle

Figure 6.16 : Maxima des tensions induites sur les écrans à la 3° section élémentaire et des tensions entre écrans au 2° point de permutation comparés à ceux d'une liaison simple.

4 - 3 - REGIME DE DEFAUT MONOPHASE INTERNE

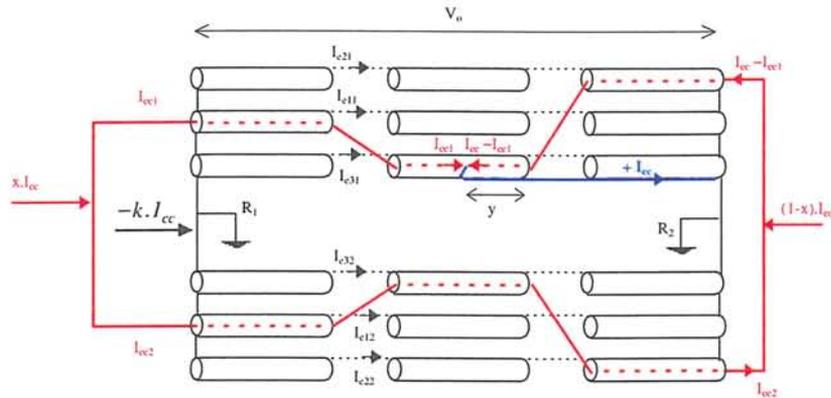


Figure 6.17 : Répartition des courants lors d'un défaut monophasé d'un câble.

Comme pour le défaut externe, la mise en équation est détaillée en annexe 7.

Pour la liaisons souterraine en défaut, lors d'un défaut à la fin 2° section élémentaire du circuit n°3 ($y = 0$ dans la figure 6.17 ci-dessus, on présente :

- * les chutes de tension maximales dans les écrans à la dernière section élémentaire dans l'hypothèse où le courant de retour transitant dans les écrans est égal au courant de court-circuit transitant dans la phase en défaut ($k = x$)
- * les tensions entre écrans au 2° point de permutation (qui sont indépendantes du trajet de retour du courant de court-circuit)

On constate que l'influence de la deuxième liaison souterraine sur les tensions entre écrans est faible.

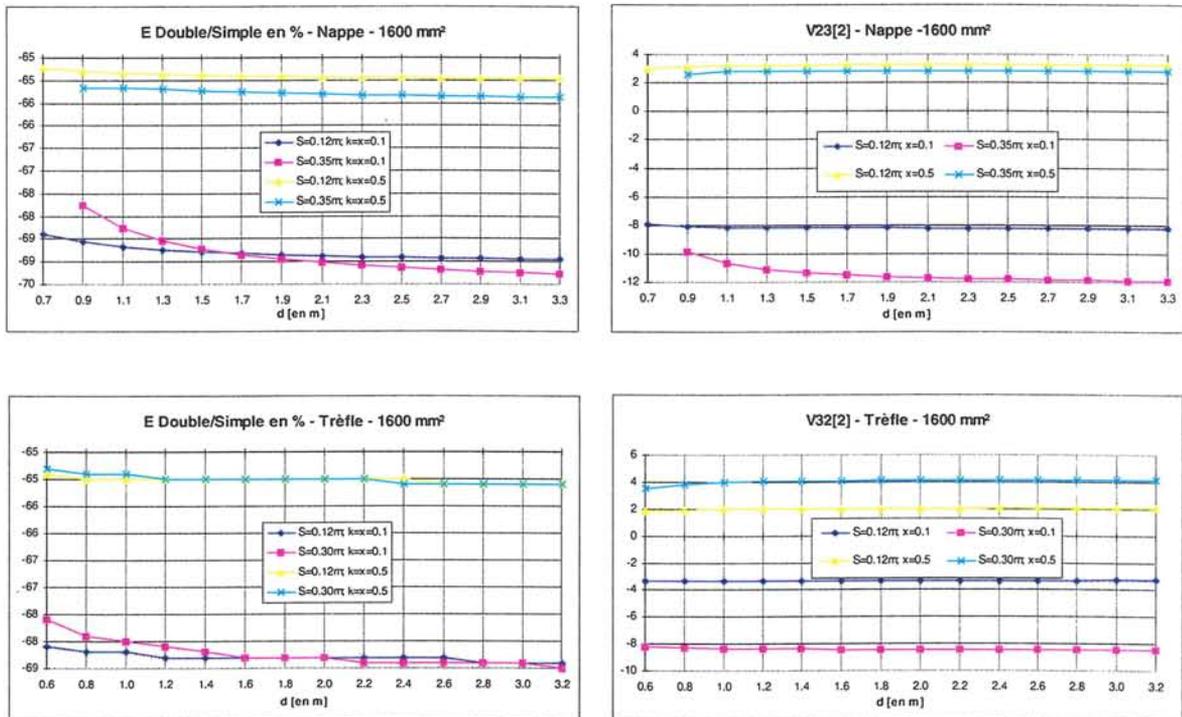


Figure 6.18 : Maxima de la tension induite sur l'écran à la 3° section élémentaire et de la tension entre écrans comparés à ceux d'une liaison simple. Pose en nappe et en trèfle.

5 - CONCLUSION

La présence d'une liaison en parallèle divise approximativement par 2 les contraintes dans les régimes de défaut triphasé et monophasé externe. Par contre, en régime de défaut monophasé interne, la réduction des contraintes est faible.

Ceci est illustré par les tableaux ci-dessous dans lesquels deux valeurs extrêmes dans une case correspondent aux valeurs pour des distances entre les deux liaisons souterraines vérifiant $d/S = 3$ et 12.

Mise à la terre en un point.

Tableau 6.2 : Maxima de la chute de tension sur les écrans et de la tension écran / conducteur de terre (Volts) pour différents types de défaut et selon le mode de pose.

défaut	Trèfle (S = 0.3m)				Nappe (S = 0.35m)			
	E		V _{et}		E		V _{et}	
	E	V _{et}	E	V _{et}	E	V _{et}	E	V _{et}
3φ	100	100	137	137	52 - 50	52 - 50	99 - 73	99 - 73
1φ externe	100	315	88	292	39 - 48	176 - 166	64 - 47	162 - 153
1φ interne ^(**)								
x = k = 1	147	351	139	330	132	240	138	227
x = k = 0,5	119	207	117	198	122	168	124	162

^(*) défauts d'origine externe.
^(**) défaut monophasé interne à l'aérosouterrain côté écrans isolés (gauche). k, x étant les coefficients définis dans ce chapitre.

Permutation d'écrans.

Tableau 6.3 : Maxima des chutes de tension dans les écrans à la 3° section élémentaire et de la tension entre écrans au 2° point de permutation d'écrans (Volts) pour différents types de défaut et selon le mode de pose.

défaut	Trèfle (S = 0.3m)				Nappe (S = 0.35m)			
	E(33)		V _{ee}		E(33)		V _{ee}	
	E(33)	V _{ee}	E(33)	V _{ee}	E(33)	V _{ee}	E(33)	V _{ee}
3φ	100	174	137	266	61 - 52	90 - 87	99 - 73	149 - 134
1φ externe	76	100	95	154	44 - 39	52 - 50	65 - 50	87 - 77
1φ interne ^(**)								
x = k = 0,1	109	143	139	203	97	131	118	180
x = k = 0,5	120	110	162	147	87	115	100	151

^(*) défauts d'origine externe.
^(**) défaut monophasé interne au circuit n°3 - fin section élémentaire 2° - k, x étant les coefficients définis dans ce chapitre

**ETUDE DES CONTRAINTES
EN REGIME TRANSITOIRE**

Chapitre 7

ANALYSE DE LA PROPAGATION TRANSITOIRE DANS LES CABLES.

1 - INTRODUCTION.....	59
2 - EQUATIONS DE PROPAGATION.	59
3 - DECOMPOSITION MODALE.....	59
4 - CARACTERISTIQUES DES MODES DE PROPAGATION.....	60
4 - 1 - MATRICE DE TRANSFORMATION DES COURANTS.....	60
4 - 2 - CONSTANTES DE PROPAGATION DES MODES	61
4 - 3 - IMPÉDANCES CARACTÉRISTIQUES DES MODES	61
4 - 4 - COMPARAISON AVEC LES RESULTATS D'EMTP.....	62
4 - 3 - CALCUL APPROCHÉ.....	63
5 - INTERPRETATION DES MODES.....	65
6 - CAS DES LIAISONS SOUTERRAINES A MISE A LA TERRE EN UN POINT.....	66
7 - CONCLUSION.....	68

1 - INTRODUCTION

Ce chapitre a pour but d'analyser la propagation des ondes dans les câbles.

On étudie tout d'abord les liaisons à permutation des écrans.

On rappelle les équations de propagation de la tension et du courant dans le domaine fréquentiel puis on présente brièvement la décomposition modale [21-25] facilitant la résolution de ces équations différentielles.

On démontre la cohérence entre les résultats théoriques et ceux obtenus avec le logiciel EMTP (pour la détermination des impédances caractéristiques, des fonctions de propagation et des vitesses de propagation des modes), et on présente une interprétation physique des modes.

Pour les études en régime transitoire, on a utilisé ce code de calcul [26] qui a fait l'objet de nombreux développements [27-31] et pour lequel des validations expérimentales ont été réalisées [32- 33].

Il est à noter que ce code prend en compte la variation des paramètres des câbles avec la fréquence qui est [34 - 39] beaucoup plus grande que celle des lignes aériennes.

Enfin, un paragraphe traite le cas de mise à la terre en un point en soulignant l'influence de la présence du conducteur de terre.

2 - EQUATIONS DE PROPAGATION.

On rappelle ci-dessous les deux relations matricielles, bien connues reliant les tensions et les courants des différents conducteurs :

$$\begin{cases} -\frac{\partial V}{\partial z} = Z.I \\ \frac{\partial I}{\partial z} = Y.V \end{cases} \quad \text{avec} \quad V = \begin{bmatrix} V_{a1} \\ V_{a2} \\ V_{a3} \\ V_{e1} \\ V_{e2} \\ V_{e3} \end{bmatrix} \quad I = \begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{a2} \\ I_{a3} \\ I_{e1} \\ I_{e2} \\ I_{e3} \end{bmatrix}$$

Z et Y sont des matrices carrées d'ordres (6x6) appelées, respectivement, matrices impédance et admittance :

$$Z = \left[\begin{array}{c|c} Z_i + Z_e - 2Z_4 & Z_e - Z_4 \\ \hline Z_e - Z_4 & Z_e \end{array} \right] \quad Y = \left[\begin{array}{c|c} Y_1 & -Y_1 \\ \hline -Y_1 & Y_1 + Y_2 \end{array} \right]$$

$$Z_i = \begin{bmatrix} z_{i1} & 0 & 0 \\ 0 & z_{i2} & 0 \\ 0 & 0 & z_{i3} \end{bmatrix}; \quad Z_e = \begin{bmatrix} z_{e1} & z_{12} & z_{13} \\ z_{12} & z_{e2} & z_{23} \\ z_{13} & z_{23} & z_{e3} \end{bmatrix}; \quad Z_4 = \begin{bmatrix} z_4 & 0 & 0 \\ 0 & z_4 & 0 \\ 0 & 0 & z_4 \end{bmatrix}; \quad Y_1 = \begin{bmatrix} y_1 & 0 & 0 \\ 0 & y_1 & 0 \\ 0 & 0 & y_1 \end{bmatrix}; \quad Y_2 = \begin{bmatrix} y_2 & 0 & 0 \\ 0 & y_2 & 0 \\ 0 & 0 & y_2 \end{bmatrix}$$

z_{ii}, z_{ei} : impédance propre du contour Ame - Ecran et Ecran - Sol du câble en position i.

z_{ij} : impédance mutuelle entre deux câbles.

z_4 : impédance mutuelle entre les deux surfaces de l'écran (tend vers zéro à haute fréquence).

y_1, y_2 : admittances respectivement de l'enveloppe isolante et de la gaine des câbles.

3 - DECOMPOSITION MODALE.

On introduit les tensions et les courants de mode, définis par :

$$V_m = T_v^{-1}.V \quad \text{où } T_v \text{ diagonalise le produit } Z.Y \quad I_m = T_i^{-1}.I \quad \text{où } T_i \text{ diagonalise le produit } Y.Z$$

D'où les 2 relations

$$-\frac{\partial^2 V_m}{\partial z^2} = (T_v^{-1} Z.Y T_v).V_m = \Gamma_v^2.V_m \quad -\frac{\partial^2 I_m}{\partial z^2} = (T_i^{-1} Y.Z T_i).I_m = \Gamma_i^2.I_m$$

$$\text{On montre [21] : } \Gamma_v^2 = \Gamma_i^2 = \Gamma^2 \qquad T_v = (T_i^{-1})'$$

En introduisant les matrices Z_m et Y_m qui sont des matrices diagonales,

$$Z_m = T_v^{-1} \cdot Z \cdot T_i \qquad Y_m = T_i^{-1} \cdot Y \cdot T_v$$

et en notant V_{mk} , I_{mk} , Z_{mk} , Y_{mk} , et γ_k^2 , le $k^{\text{ième}}$ élément des matrices V_m , I_m , Z_m , Y_m , et Γ^2 , on a les équations scalaires suivantes :

$$\begin{aligned} -\frac{\partial V_{mk}}{\partial z} &= Z_{mk} \cdot I_{mk} & ; & & -\frac{\partial I_{mk}}{\partial z} &= Y_{mk} \cdot V_{mk} & ; & & \gamma_k &= \sqrt{Z_{mk} \cdot Y_{mk}} \\ -\frac{\partial^2 V_{mk}}{\partial z^2} &= \gamma_k^2 \cdot V_{mk} & ; & & -\frac{\partial^2 I_{mk}}{\partial z^2} &= \gamma_k^2 \cdot I_{mk} \end{aligned}$$

Ces relations montrent que les modes se propagent indépendamment les uns des autres.

La propagation d'un mode est caractérisée par une impédance caractéristique et une fonction de propagation.

* l'impédance caractéristique du mode k est définie par
$$Z_{cmk} = \frac{Z_{mk}}{\gamma_k} = \sqrt{\frac{Z_{mk}}{Y_{mk}}}$$

et son inverse est appelée admittance caractéristique de mode, noté Y_{cmk}

* la fonction de propagation du mode k est définie par $Ap_k = e^{-\gamma_k \cdot l}$

où $\gamma_k(\omega) = \alpha_k(\omega) + j\beta_k(\omega)$ est la constante de propagation du mode k.

et la quantité $v_k(\omega) = \frac{\omega}{\beta_k(\omega)}$ représente la vitesse de propagation du mode k.

4 - CARACTERISTIQUES DES MODES DE PROPAGATION.

4 - 1 - MATRICE DE TRANSFORMATION DES COURANTS

La matrice de transformation des courants diagonalise le produit Y.Z

On a :

$$Y \cdot Z = \begin{bmatrix} Y_1 \cdot (Z_i - Z_4) & -Y_1 \cdot Z_4 \\ -Y_1 \cdot (Z_i - Z_4) + Y_2 \cdot (Z_e - Z_4) & Y_2 \cdot Z_e + Y_1 \cdot Z_4 \end{bmatrix}$$

* si $Z_4 = 0$, alors la matrice Q_0 définie ci-dessous diagonalise le produit Y.Z.

$$Q_0 = \begin{bmatrix} I & 0 \\ -I & C \end{bmatrix}$$

I étant la matrice identité et C la matrice de CONCORDIA

$$C = \begin{bmatrix} \gamma_{\sqrt{5}} & \frac{2}{\gamma_{\sqrt{6}}} & 0 \\ \gamma_{\sqrt{5}} & -\gamma_{\sqrt{6}} & \gamma_{\sqrt{2}} \\ \gamma_{\sqrt{5}} & -\gamma_{\sqrt{6}} & -\gamma_{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

* si Z_4 n'est pas nul mais néanmoins petite, une bonne approximation de la matrice diagonalisant $Y.Z$ est

$$Q = \begin{bmatrix} C & 0 \\ -C & C \end{bmatrix}$$

dans ce cas :

$$Q^{-1}Y.ZQ = \begin{bmatrix} C^{-1} Y_1.Z_i C & -C^{-1} Y_1.Z_4 C \\ -C^{-1} Y_2.Z_4 C & C^{-1} Y_2.Z_e C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1.Z_i & -Y_1.Z_4 \\ -Y_2.Z_4 & Y_2.Z_e \end{bmatrix} = \Gamma^2$$

les deux matrices $Y_1.Z_4$ et $Y_2.Z_4$ étant des matrices diagonales dont les termes diagonaux tendent vers zéro quand z_4 tend vers zéro.

4 - 2 - CONSTANTES DE PROPAGATION DES MODES

On obtient :

$$\Gamma^2 = \begin{bmatrix} y_1.z_i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & y_1.z_i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & y_1.z_i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & y_2.(z_e + 2.z_m) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & y_2.(z_e - z_m) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & y_2.(z_e - z_m) \end{bmatrix}$$

qui donne les constantes de propagation des modes. On constate bien que les trois modes coaxiaux se propagent avec les mêmes caractéristiques. Il en est de même pour les deux modes interfil et bifilaire écran.

4 - 3 - IMPEDANCES CARACTERISTIQUES DES MODES

De $T_v = (T_i^{-1})'$ avec $T_i = Q = \begin{bmatrix} C & 0 \\ -C & C \end{bmatrix}$ on déduit $T_v^{-1} = \begin{bmatrix} C^{-1} & -C^{-1} \\ 0 & C^{-1} \end{bmatrix}$

D'où la matrice des impédances des modes :

$$Z_m = T_v^{-1}.Z.T_i = \begin{bmatrix} C^{-1} Z_i C & -C^{-1} Z_4 C \\ -C^{-1} Z_4 C & C^{-1} Z_e C \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} z_i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & z_i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & z_i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & z_e + 2.z_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & z_e - z_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & z_e - z_m \end{bmatrix}$$

4 - 4 - COMPARAISON AVEC LES RESULTATS D'EMTP

A partir des matrices Q_0 ou Q , après normalisation des vecteurs propres, puis permutation des colonnes et des lignes, on obtient des matrices qui sont tout à fait cohérentes avec celles données par EMTP comme le montre ci-dessous :

$$Q_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & \gamma_{\sqrt{3}} & \gamma_{\sqrt{6}} & 0 \\ 0 & -1 & 0 & \gamma_{\sqrt{3}} & -\gamma_{\sqrt{6}} & \gamma_{\sqrt{2}} \\ 0 & 0 & -1 & \gamma_{\sqrt{3}} & -\gamma_{\sqrt{6}} & -\gamma_{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \gamma_{\sqrt{2}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_{\sqrt{2}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_{\sqrt{2}} & 0 & 0 & 0 \\ -\gamma_{\sqrt{2}} & 0 & 0 & \gamma_{\sqrt{3}} & \gamma_{\sqrt{6}} & 0 \\ 0 & -\gamma_{\sqrt{2}} & 0 & \gamma_{\sqrt{3}} & -\gamma_{\sqrt{6}} & \gamma_{\sqrt{2}} \\ 0 & 0 & -\gamma_{\sqrt{2}} & \gamma_{\sqrt{3}} & -\gamma_{\sqrt{6}} & -\gamma_{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \gamma_{\sqrt{2}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\gamma_{\sqrt{2}} & \gamma_{\sqrt{3}} & 0 & -\gamma_{\sqrt{6}} & 0 & -\gamma_{\sqrt{2}} \\ 0 & 0 & \gamma_{\sqrt{2}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_{\sqrt{3}} & -\gamma_{\sqrt{2}} & \gamma_{\sqrt{6}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma_{\sqrt{2}} & 0 \\ 0 & \gamma_{\sqrt{3}} & 0 & -\gamma_{\sqrt{6}} & -\gamma_{\sqrt{2}} & \gamma_{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Matrices T_i d'EMTP à f = 1MHz :

	1	2	3	4	5	6
1 Âme_1	0.707107E+00	-0.329900E-09	0.250511E-16	0.247785E-08	0.256246E-16	0.435889E-08
2 Ecran_1	-0.707107E+00	0.578536E+00	-0.126782E-07	-0.406567E+00	-0.130031E-07	-0.707107E+00
3 Âme_2	0.000000E+00	-0.329330E-09	0.707107E+00	-0.497298E-08	0.250589E-16	-0.264837E-12
4 Ecran_2	-0.126769E-07	0.574972E+00	-0.707107E+00	0.818173E+00	-0.126756E-07	0.240963E-12
5 Âme_3	0.000000E+00	-0.329900E-09	0.000000E+00	0.247762E-08	0.707107E+00	-0.435889E-08
6 Ecran_3	-0.130025E-07	0.578536E+00	-0.126756E-07	-0.406567E+00	-0.707107E+00	0.707107E+00

$$Q = \begin{bmatrix} \gamma_{\sqrt{3}} & \gamma_{\sqrt{6}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \gamma_{\sqrt{3}} & -\gamma_{\sqrt{6}} & \gamma_{\sqrt{2}} & 0 & 0 & 0 \\ \gamma_{\sqrt{3}} & -\gamma_{\sqrt{6}} & -\gamma_{\sqrt{2}} & 0 & 0 & 0 \\ -\gamma_{\sqrt{3}} & -\gamma_{\sqrt{6}} & 0 & \gamma_{\sqrt{3}} & \gamma_{\sqrt{6}} & 0 \\ -\gamma_{\sqrt{3}} & \gamma_{\sqrt{6}} & -\gamma_{\sqrt{2}} & \gamma_{\sqrt{3}} & -\gamma_{\sqrt{6}} & \gamma_{\sqrt{2}} \\ -\gamma_{\sqrt{3}} & \gamma_{\sqrt{6}} & \gamma_{\sqrt{2}} & \gamma_{\sqrt{3}} & -\gamma_{\sqrt{6}} & -\gamma_{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \gamma_{\sqrt{6}} & \gamma_{\sqrt{3}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \gamma_{\sqrt{6}} & -\gamma_{\sqrt{3}} & \gamma_{\sqrt{2}} & 0 & 0 & 0 \\ \gamma_{\sqrt{6}} & -\gamma_{\sqrt{3}} & -\gamma_{\sqrt{2}} & 0 & 0 & 0 \\ -\gamma_{\sqrt{6}} & -\gamma_{\sqrt{3}} & 0 & \gamma_{\sqrt{3}} & \gamma_{\sqrt{6}} & 0 \\ -\gamma_{\sqrt{6}} & \gamma_{\sqrt{3}} & -\gamma_{\sqrt{2}} & \gamma_{\sqrt{3}} & -\gamma_{\sqrt{6}} & \gamma_{\sqrt{2}} \\ -\gamma_{\sqrt{6}} & \gamma_{\sqrt{3}} & \gamma_{\sqrt{2}} & \gamma_{\sqrt{3}} & -\gamma_{\sqrt{6}} & -\gamma_{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \gamma_{\sqrt{2}} & 0 & \gamma_{\sqrt{6}} & 0 & -\gamma_{\sqrt{2}} & 0 \\ -\gamma_{\sqrt{2}} & \gamma_{\sqrt{3}} & -\gamma_{\sqrt{6}} & -\gamma_{\sqrt{6}} & \gamma_{\sqrt{2}} & -\gamma_{\sqrt{2}} \\ -\gamma_{\sqrt{3}} & 0 & \gamma_{\sqrt{6}} & 0 & 0 & 0 \\ -\gamma_{\sqrt{3}} & \gamma_{\sqrt{3}} & -\gamma_{\sqrt{6}} & \gamma_{\sqrt{6}} & 0 & 0 \\ \gamma_{\sqrt{2}} & 0 & \gamma_{\sqrt{6}} & 0 & \gamma_{\sqrt{2}} & 0 \\ -\gamma_{\sqrt{2}} & \gamma_{\sqrt{3}} & -\gamma_{\sqrt{6}} & \gamma_{\sqrt{6}} & -\gamma_{\sqrt{2}} & \gamma_{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Matrices T_i d'EMTP à f= 1kHz

	1	2	3	4	5	6
1 Âme_1	0.290815E+00	0.453674E-04	0.408508E+00	0.657474E-03	-0.504090E+00	0.117738E-02
2 Ecran_1	-0.286231E+00	0.577496E+00	-0.408195E+00	-0.408040E+00	0.495877E+00	-0.707106E+00
3 Âme_2	-0.582072E+00	0.452148E-04	0.408198E+00	0.131858E-02	0.984984E-11	0.248651E-15
4 Ecran_2	0.572877E+00	0.577058E+00	-0.407886E+00	0.816703E+00	0.961857E-11	0.971999E-13
5 Âme_3	0.290815E+00	0.453674E-04	0.408508E+00	0.657474E-03	0.504090E+00	0.117738E-02
6 Ecran_3	-0.286231E+00	0.577496E+00	-0.408195E+00	-0.408040E+00	-0.495877E+00	0.707106E+00

(On rappelle : $\gamma_{\sqrt{3}} = 0.577$ et $\gamma_{\sqrt{6}} = 0.408$)

Pour le mode k,

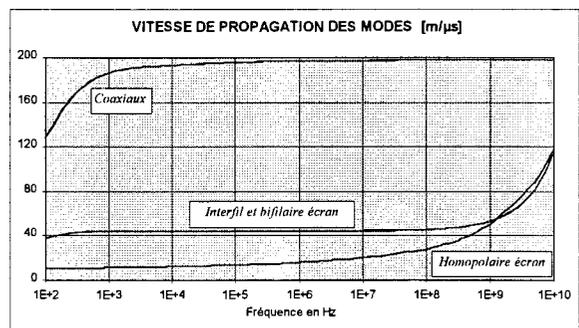
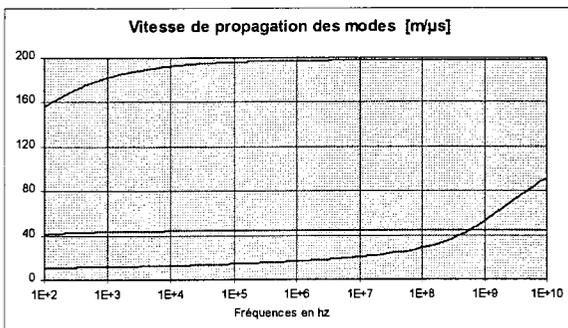
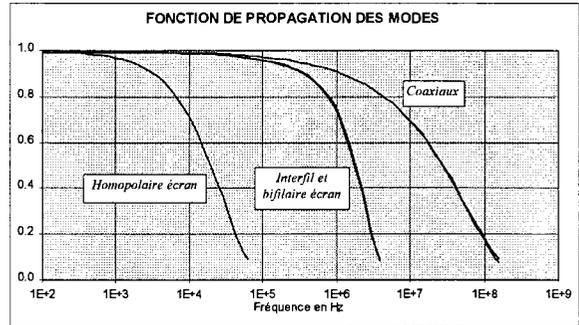
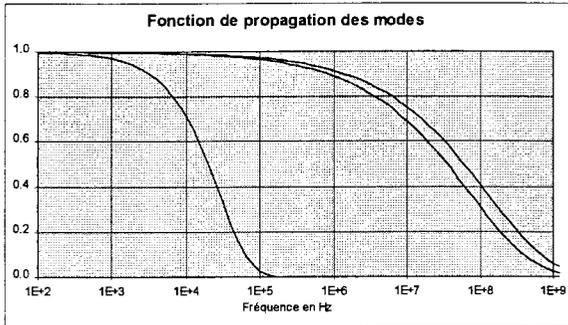
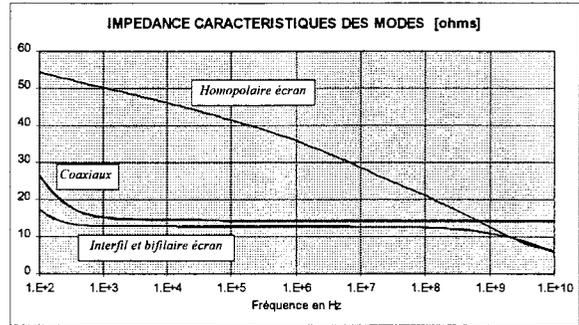
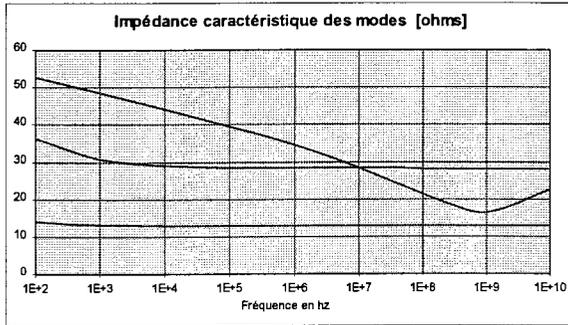
- l'impédance caractéristique
- la fonction de propagation
- la vitesse de propagation

$$Z_{car_k} = \frac{Z_{mk}}{\gamma_k}$$

$$|Ap_k| = |e^{-\gamma_k \cdot l}|$$

$$v_k(\omega) = \frac{\omega}{\beta_k(\omega)}$$

Ci après, on présente les résultats obtenus par ces formules (gauche) comparant à ceux d'EMTP (droite).



4 - 3 - CALCUL APPROCHE

Dans ce paragraphe, on établit des formules simples des impédances caractéristiques et des vitesses de propagation des modes qui donnent une bonne approximation en haute fréquence (1MHz).

En négligeant :

- * les impédances de surface de l'âme et de l'écran devant celle liée au champ magnétique dans l'enveloppe isolante.
- * l'impédance de la surface extérieure de l'écran devant celle liée au champ magnétique dans la gaine de protection des câbles et celle du sol.

On a alors :

$$z_i = z_1 + z_2 + z_3 \approx z_2 = j \frac{\omega \mu}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

$$z_e = z_5 + z_6 + z_8 \approx z_6 + z_8 = \frac{\omega \mu}{8} + j \frac{\omega \mu}{2\pi} \cdot \ln \frac{D}{r_3}$$

* Pour le mode coaxial :

$$Z_{C_{\text{coaxial}}} = \frac{z_i}{\gamma_1} = \frac{z_i}{\sqrt{z_i \cdot y_1}} \approx \sqrt{\frac{z_i}{y_1}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon_2}} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} = 28 \text{ Ohms}$$

$$\gamma_{\text{coaxial}} = \sqrt{y_1 \cdot z_i} \approx j\omega \cdot \sqrt{\mu \cdot \epsilon_2} = \alpha(\omega) + j\beta(\omega) \rightarrow v_{\text{coaxial}} = \frac{\omega}{\beta(\omega)} = \frac{1}{\sqrt{\mu \cdot \epsilon_2}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{r2}}} = 198 \text{ m}/\mu\text{s}$$

c étant la vitesse de la lumière

On note pour l'impédance du mode coaxial entre notre modèle et celui d'EMTP un rapport de 2, qui s'explique par la répartition de l'impédance au niveau de l'âme et au niveau de l'écran, introduite par EMTP.

* De la même manière pour le mode interfil - bifilaire :

$$Z_{C_{\text{interfil-bifilaire}}} \approx \sqrt{\frac{z_e - z_m}{y_2}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon_4}} \cdot \sqrt{\ln \frac{S}{r_3} \cdot \ln \frac{r_4}{r_3}} = 13 \text{ Ohms}$$

$$\gamma_{\text{interfil-bifilaire}} = \sqrt{y_2 \cdot (z_e - z_m)} \approx j\omega \cdot \sqrt{\mu \cdot \epsilon_4} \cdot \sqrt{\frac{\ln(S/r_3)}{\ln(r_4/r_3)}} \rightarrow v_{\text{interfil-bifilaire}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{r4}}} \cdot \sqrt{\frac{\ln(r_4/r_3)}{\ln(S/r_3)}} = 44 \text{ m}/\mu\text{s}$$

* Pour le mode homopolaire

$$z_e + 2 \cdot z_m = 3 \cdot \frac{\omega \mu}{8} + j \frac{\omega \mu}{2\pi} \left[\ln \frac{D}{r_3} + 2 \cdot \ln \frac{D}{S} \right] = 3 \cdot \frac{\omega \mu}{8} + j \frac{\omega \mu}{2\pi} \cdot \ln \frac{D^3}{S^2 \cdot r_3}$$

$$y_2 \cdot (z_e + 2 \cdot z_m) = -\omega^2 \cdot \epsilon_4 \cdot \mu \cdot \frac{\ln(D^3/S^2 \cdot r_3)}{\ln(r_4/r_3)} * \left[1 - j \frac{3\pi}{4} \cdot \frac{1}{\ln(D^3/S^2 \cdot r_3)} \right]$$

$$\frac{z_e + 2 \cdot z_m}{y_2} = \frac{\mu}{\epsilon_4} \cdot \frac{1}{4\pi^2} \cdot \ln \frac{D^3}{S^2 \cdot r_3} \cdot \ln \frac{r_4}{r_3} * \left[1 - j \frac{3\pi}{4} \cdot \frac{1}{\ln(D^3/S^2 \cdot r_3)} \right]$$

A haute fréquence, $\frac{3\pi}{4} \cdot \frac{1}{\ln(D^3/S^2 \cdot r_3)} \ll 1$. D'où :

$$Z_{C_{\text{homopolaire}}} = \sqrt{\frac{z_e + 2 \cdot z_m}{y_2}} \approx \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon_4}} \cdot \sqrt{\ln \frac{D^3}{S^2 \cdot r_3} \cdot \ln \frac{r_4}{r_3}} = 34 \text{ Ohms}$$

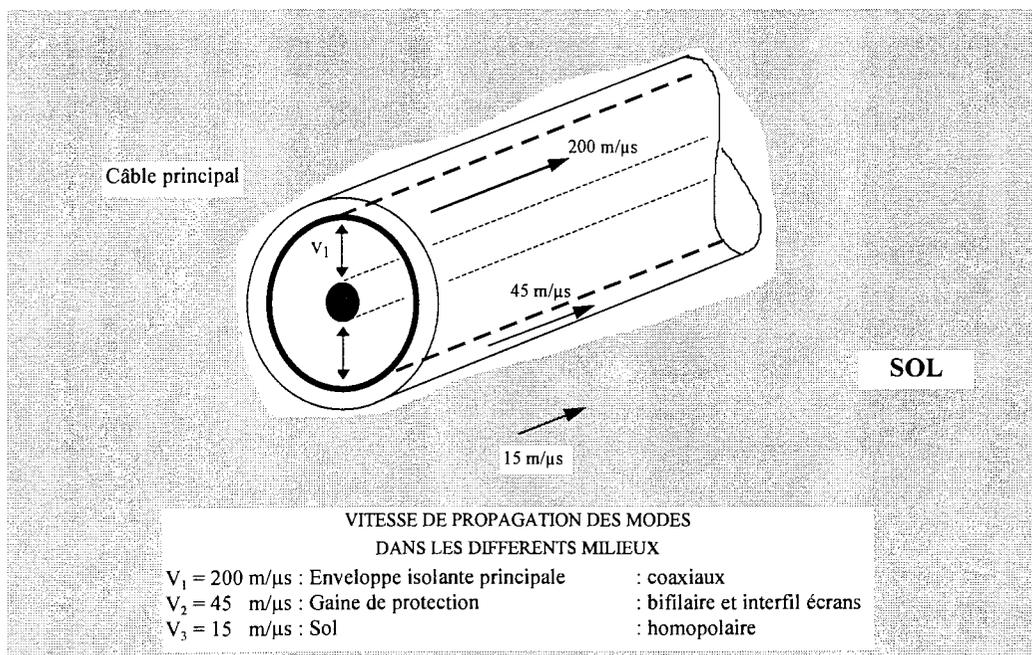
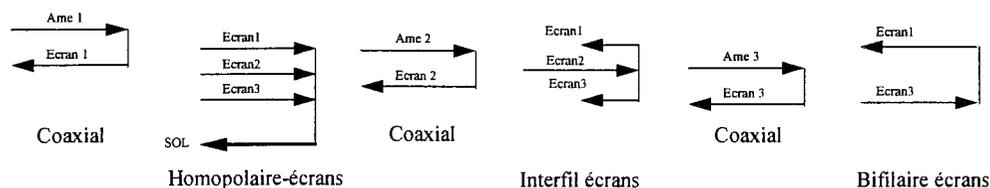
$$\gamma_{\text{homopolaire}} = \sqrt{y_2 \cdot (z_e + 2 \cdot z_m)} \approx j\omega \cdot \sqrt{\mu \cdot \epsilon_4} \cdot \sqrt{\frac{\ln(D^3/S^2 \cdot r_3)}{\ln(r_4/r_3)}} \rightarrow v_{\text{homopolaire}} \approx \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{r4}}} \cdot \sqrt{\frac{\ln(r_4/r_3)}{\ln(D^3/S^2 \cdot r_3)}} = 17 \text{ m}/\mu\text{s}$$

5 - INTERPRETATION DES MODES.

A haute fréquence, le nombre de modes est celui de conducteurs dans la liaison souterraine étudiée.

Pour une liaison à permutation des écrans (six conducteurs), il existe donc 6 modes de propagation comme le montre la figure ci-dessous qui en déduit de la matrice de transformation de courants. Trois modes coaxiaux concernant entre âmes et écrans. Le mode homopolaire fait intervenir le sol et les deux modes interfil et bifilaire écran mettent en jeu les écrans.

	1	2	3	4	5	6
1 Âme_1	0.707107E+00	-0.329900E-09	0.250511E-16	0.247785E-08	0.256246E-16	0.435889E-08
2 Ecran_1	-0.707107E+00	0.578536E+00	-0.126782E-07	-0.406567E+00	-0.130031E-07	-0.707107E+00
3 Âme_2	0.000000E+00	-0.329330E-09	0.707107E+00	-0.497298E-08	0.250589E-16	-0.264837E-12
4 Ecran_2	-0.126769E-07	0.574972E+00	-0.707107E+00	0.818173E+00	-0.126756E-07	0.240963E-12
5 Âme_3	0.000000E+00	-0.329900E-09	0.000000E+00	0.247762E-08	0.707107E+00	-0.435889E-08
6 Ecran_3	-0.130025E-07	0.578536E+00	-0.126756E-07	-0.406567E+00	-0.707107E+00	0.707107E+00



6 - CAS DES LIAISONS SOUTERRAINES A MISE A LA TERRE EN UN POINT.

Le câble de terre constitue un conducteur supplémentaire qui augmente la dimension du problème. Il suffit d'ajouter dans l'ensemble des équations télégraphistes deux équations, pour la tension V_1 et le courant I_1 dans le câble de terre. Voici donc les matrices admittance et impédance du système.

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 & 0 & 0 & -y_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & y_1 & 0 & 0 & -y_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & y_1 & 0 & 0 & -y_1 & 0 \\ -y_1 & 0 & 0 & y_1 + y_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -y_1 & 0 & 0 & y_1 + y_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -y_1 & 0 & 0 & y_1 + y_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & y_g \end{bmatrix} \quad Z = \begin{bmatrix} z_i + z_e - 2z_4 & z_m & z_m & z_e - z_4 & z_m & z_m & z_{g1} \\ z_m & z_i + z_e - 2z_4 & z_m & z_m & z_e - z_4 & z_m & z_{g2} \\ z_m & z_m & z_i + z_e - 2z_4 & z_m & z_m & z_e - z_4 & z_{g3} \\ z_e - z_4 & z_m & z_m & z_e & z_m & z_m & z_{g1} \\ z_m & z_e - z_4 & z_m & z_m & z_e & z_m & z_{g2} \\ z_m & z_m & z_e - z_4 & z_m & z_m & z_e & z_{g3} \\ z_{g1} & z_{g2} & z_{g3} & z_{g1} & z_{g2} & z_{g3} & z_{gg} \end{bmatrix}$$

$$Y.Z = \begin{bmatrix} y_1.(z_i - z_4) & 0 & 0 & -y_1.z_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & y_1.(z_i - z_4) & 0 & 0 & -y_1.z_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & y_1.(z_i - z_4) & 0 & 0 & -y_1.z_4 & 0 \\ -y_1.(z_i - z_4) + y_2.(z_e - z_4) & y_2.z_m & y_2.z_m & y_1.z_4 + y_2.z_e & y_2.z_m & y_2.z_m & y_2.z_{g1} \\ y_2.z_m & -y_1.(z_i - z_4) + y_2.(z_e - z_4) & y_2.z_m & y_2.z_m & y_1.z_4 + y_2.z_e & y_2.z_m & y_2.z_{g2} \\ y_2.z_m & y_2.z_m & -y_1.(z_i - z_4) + y_2.(z_e - z_4) & y_2.z_m & y_2.z_m & y_1.z_4 + y_2.z_e & y_2.z_{g3} \\ y_g.z_{g1} & y_g.z_{g2} & y_g.z_{g3} & y_g.z_{g1} & y_g.z_{g2} & y_g.z_{g3} & y_g.z_{gg} \end{bmatrix}$$

z_{gi} : Mutuelles entre le conducteur de terre et le câble en position i .

z_{gg} : Impédance propre du conducteur de terre.

y_g : Admittance de la gaine du conducteur de terre.

On n'arrive pas à déterminer d'une manière simple la matrice diagonalisant le produit $Y.Z$, mais on constate que les modes essentiels ne sont pas très différents par rapport au cas précédent (6 conducteurs).

On démontre facilement que les trois vecteurs T_1, T_2, T_3 ci-dessous correspondent à des vecteurs propres de trois modes coaxiaux. T_4 est le vecteur propre du mode interfil - bifilaire (si $x + y + z = 1$). T_5 est le vecteur propre du mode homopolaire avec $x = y = z = 1$ et $t \approx \frac{y_g.(z_{g1} + z_{g2} + z_{g3})}{y_2.(z_e + 2.z_m)}$.

$$T_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} ; \quad T_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} ; \quad T_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} ; \quad T_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ x \\ y \\ z \\ 0 \end{bmatrix} ; \quad T_5 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ t \end{bmatrix}$$

On vérifie : $Y.Z.T_1 = y_1.z_i.T_1 \rightarrow y_1.z_i$ est la valeur propre du mode coaxial.
 $Y.Z.T_2 = y_2.(z_e - z_m).T_2 \rightarrow y_2.(z_e - z_m)$ est la valeur propre du mode interfil - bifilaire.
 $Y.Z.T_3 = y_2.(z_e + 2.z_m).T_3 \rightarrow y_2.(z_e + 2.z_m)$ est la valeur propre du mode homopolaire.

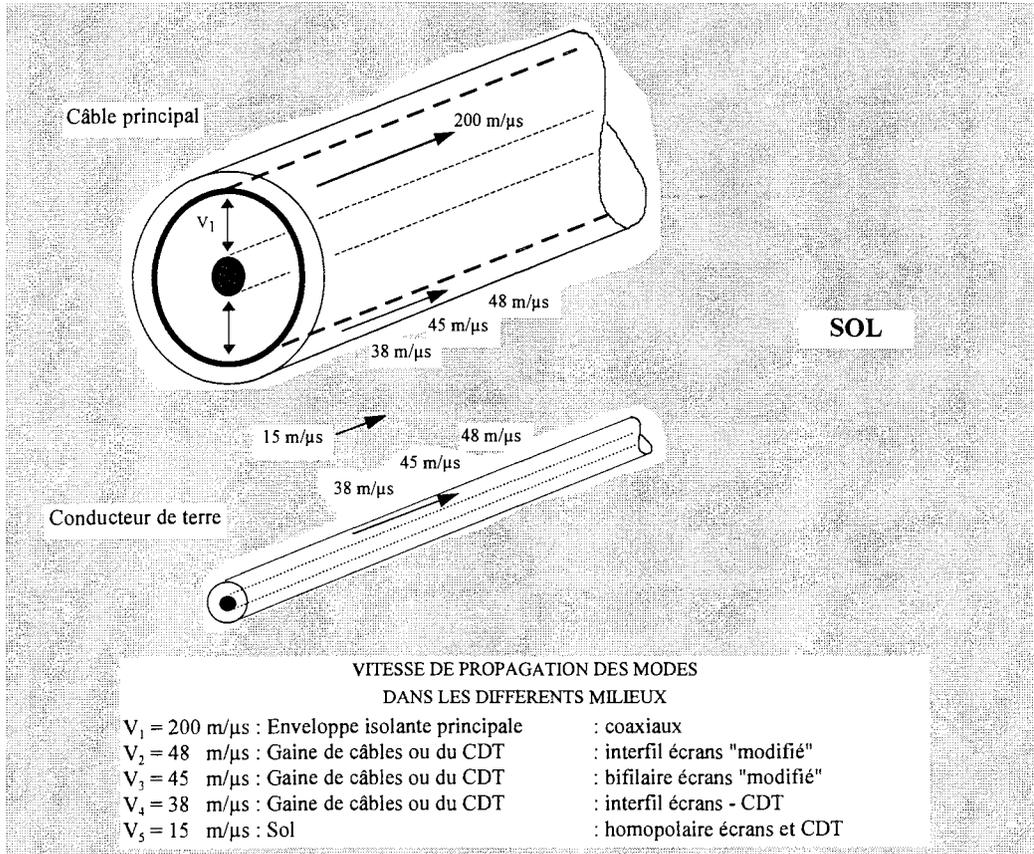
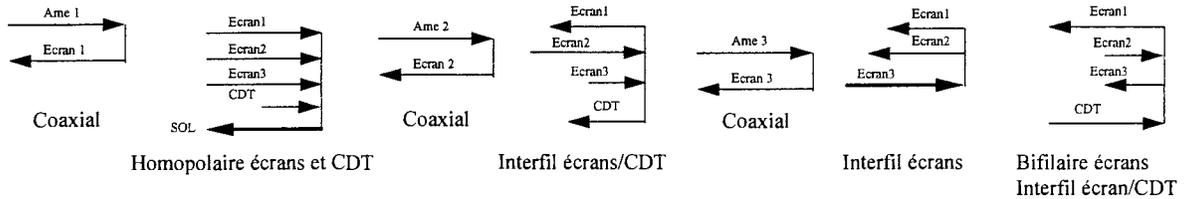
D'où, de la même démarche, on obtient les mêmes formules approchées pour les impédances caractéristiques et pour les vitesses de propagation des modes que celles du cas précédent (6 conducteurs).

Interprétation des modes.

La matrice de transformation des courants d'une liaison souterraine à mise à la terre en un point (7 conducteurs) donnée par EMTP à la fréquence $f = 1\text{MHZ}$ est présentée ci-dessous.

On retrouve les six modes du cas précédent légèrement modifiés et un mode supplémentaire du fait de la présence du conducteur de terre : mode interfil écran - CDT.

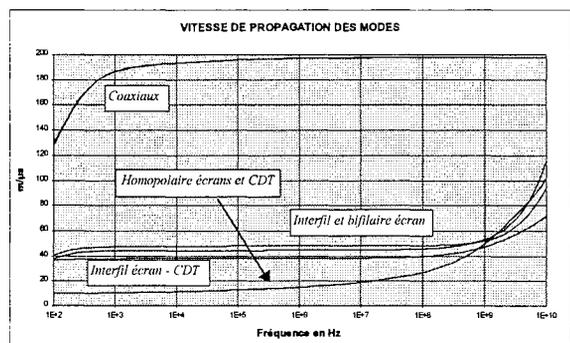
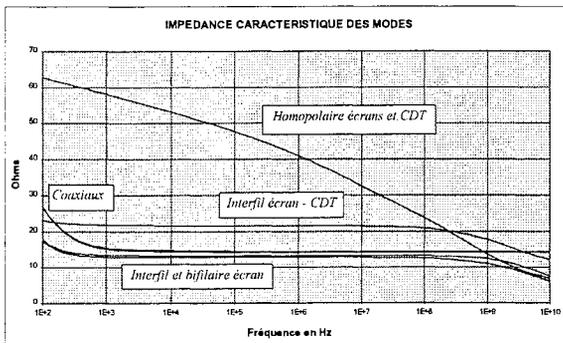
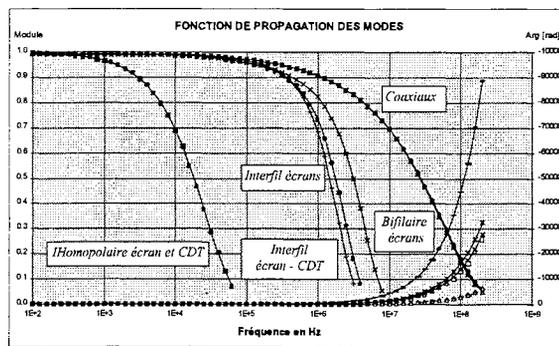
	1	2	3	4	5	6	7
1 Âme_1	0.707107E+00	-0.271456E-09	0.279920E-16	0.412394E-08	0.278745E-16	0.180382E-08	0.309234E-08
2 Ecran_1	-0.707107E+00	0.546393E+00	-0.125115E-07	-0.575594E+00	-0.128980E-07	-0.294981E+00	-0.695498E+00
3 Âme_2	0.000000E+00	-0.275836E-09	0.707107E+00	-0.489855E-08	0.158076E-16	0.321424E-08	-0.843932E-09
4 Ecran_2	-0.125115E-07	0.559088E+00	-0.707107E+00	0.679528E+00	-0.987603E-08	-0.524302E+00	0.190895E+00
5 Âme_3	0.000000E+00	-0.274458E-09	0.000000E+00	-0.181396E-08	0.707107E+00	-0.490029E-08	0.714551E-09
6 Ecran_3	-0.128980E-07	0.556351E+00	-0.987603E-08	0.250422E+00	-0.707107E+00	0.798591E+00	-0.161542E+00
7 CDT	-0.330826E-09	0.281689E+00	-0.847531E-08	-0.379766E+00	-0.543194E-08	0.185636E-01	0.673606E+00



La matrice de transformation des tensions est la suivante :

	1	2	3	4	5	6	7
Ame_1	1.4142	0.5094	-0.0000	-0.5086	-0.0000	-0.2949	-0.4916
Ecran_1	0.0000	0.5094	-0.0000	-0.5086	-0.0000	-0.2949	-0.4916
Ame_2	-0.0000	0.5213	1.4142	0.6004	-0.0000	-0.5241	0.1349
Ecran_2	-0.0000	0.5213	0.0000	0.6004	-0.0000	-0.5241	0.1349
Ame_3	-0.0000	0.5187	-0.0000	0.2213	1.4142	0.7983	-0.1142
Ecran_3	-0.0000	0.5187	-0.0000	0.2213	0.0000	0.7983	-0.1142
CDT	-0.0000	0.5027	-0.0000	-0.6422	-0.0000	0.0355	0.9113

Les impédances caractéristiques, les fonctions de propagation et les vitesses de propagation des modes en fonction de la fréquence obtenus par EMTP font l'objet des figures ci-dessous.



7 - CONCLUSION.

L'analyse de modes nous permet d'établir des formules relativement simples des impédances caractéristiques et des vitesses de propagation avec une bonne approximation.

Dans le cas des liaisons à mise à la terre en un point, la présence du conducteur de terre modifie un peu le comportement du système des câbles, mais on retrouve les modes essentiels (coaxiaux, interfil - bifilaire écrans et homopolaire des écrans) du cas des liaisons à permutation des écrans.

Chapitre 8

MISE A LA TERRE EN UN POINT CONTRAINTES EN REGIME TRANSITOIRE

1 - INTRODUCTION.....	69
2 - FOUDDROIEMENT DU CABLE DE GARDE (CDG).....	70
3 - FOUDDROIEMENT DU CONDUCTEUR DE PHASE (CDP).....	73
4 - ETUDE DE SENSIBILITE DE DIFFERENTS PARAMETRES.	76
4 - 1 - CONFIGURATION DES EXTRÉMITÉS DES CÂBLES.	76
4 - 2 - RÉSISTANCE DES PRISES DE TERRE, NIVEAU DE PROTECTION ET POSITION DU POINT D'IMPACT.	77
4 - 3 - LONGUEUR DU SIPHON ET DES CÂBLES DE CONNEXION ÉCRAN - PARAFODRE.	78
4 - 4 - ECLATEURS ET SOURCE 50 HZ.....	78
5 - EVALUATION DE LA TENSION ENTRE ECRAN ET CONDUCTEUR DE TERRE.....	79
6 - CONCLUSION.	80

1 - INTRODUCTION.

Ce chapitre est consacré à l'analyse des contraintes en régime transitoire d'un siphon 225 kV avec mise à la terre en un point.

La ligne aérienne est du type 1 ASTER 570 mm². Elle est considérée, des deux côtés du siphon, suffisamment longue pour éliminer l'influence de ses extrémités lointaines sur le phénomène transitoire dans le siphon.

Dans cette étude, elle est de 75 km de chaque côté, ce qui correspond à un temps de propagation de l'onde d'environ 0,4 ms. Un temps de 0,3 ms a été choisi pour la simulation des transitoires.

Les portées proches du tronçon souterrain sont équipées de câbles de garde (2 Phlox 147).

La partie souterraine est constituée de câbles à âme en cuivre de section 1600 mm² posés en trèfle. Un conducteur de terre de cuivre de section 150mm² est posé en parallèle.

L'isolation principale des câbles est protégée par des parafoudres de type ZnO-520 kV. Ils sont branchés en étoile, directement à l'entrée du siphon entre les extrémités des câbles et le conducteur de terre.

Pour protéger la gaine des câbles contre les surtensions, on utilise des parafoudres qui sont des résistances non linéaires (RNL - sans éclateur associé). Ils sont branchés, en étoile, à l'entrée du siphon entre les écrans des câbles et le conducteur de terre. Les câbles de connexion entre les écrans et les parafoudres sont modélisés par des inductances localisées [32].

Les chocs de foudre considérés sont des chocs de courant, pleins de durée 1,2/50 μ s. Ils sont appliqués sur la ligne toujours du côté du siphon où les écrans sont isolés (cf. figure 8.1), ce qui est le cas le plus contraignant pour la gaine des câbles. Le point d'impact est situé à 100 m de la jonction aérosouterraine.

On a supposé que les coups de foudre de grande amplitude (jusqu'à 100 kA) frappent les câbles de garde alors que ceux de faible amplitude (jusqu'à 10 kA) peuvent tomber sur les conducteurs de phase.

Les 2 paragraphes qui suivent traitent du foudroiement du câble de garde puis du foudroiement d'un conducteur de phase en fixant :

* la longueur du siphon à 1200 m.

* les résistances des prises de terre à 20 Ohms (réseau aérien) et 10 Ohms (extrémités du siphon)

* le type de RNL : tension nominale de 10 kV (la caractéristique courant - tension est déduite par homothétie de celle des unités 12 kV / 5 kA donnée au chapitre 2).

* la longueur des câbles de connexion entre les écrans et les parafoudres à 2 m

Puis, on présente une étude de sensibilité sur différents paramètres tels que

- la configuration des extrémités de câbles,
- la résistance des prises de terre,
- la tension nominale des RNL,
- la position du point d'impact de la foudre dans le cas du foudroiement d'un câble de garde,
- la longueur du siphon et la longueur des câbles de connexion Ecran - Parafoudre,
- la présence de la source 50 Hz et des éclateurs sur le réseau aérien.

Enfin, on a établi des formules relativement simples permettant d'évaluer le courant dans les parafoudres de gaine et donc, les surtensions de gaine avec une assez bonne approximation.

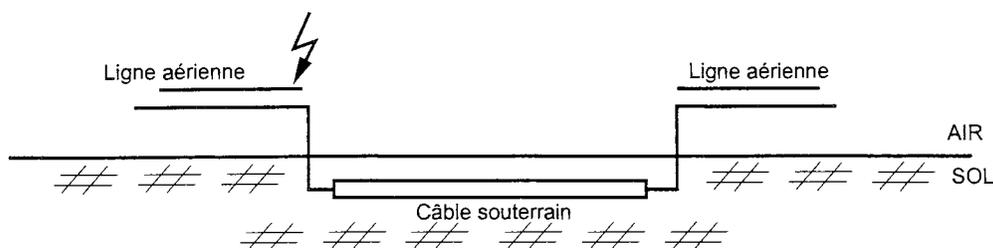


Figure 8.1 Schéma du siphon

2 - FOUROIEMENT DU CABLE DE GARDE (CDG).

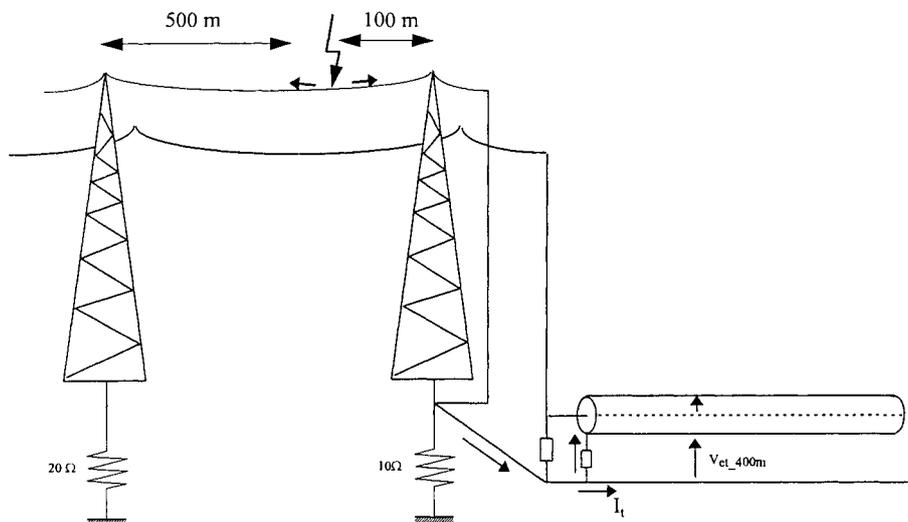


Figure 8.2 : Schéma simplifié d'une jonction aérosouterraine.

Les figures qui suivent donnent l'allure de la montée en potentiel des écrans, de la tension entre câble de terre et écrans, des courants dans le conducteur de terre et dans les écrans en fonction du temps (*les écrans étant soumis à des contraintes similaires, on s'est limité à donner des résultats pour un seul*) à l'entrée du siphon (le passage aérosouterrain), à 400 m et à 800 m par rapport à l'entrée.

Ces courbes peuvent s'interpréter à l'aide de la théorie de la propagation des ondes :

- * une onde de type homopolaire se propage dans le sol, avec une vitesse faible ($15 \text{ m}/\mu\text{s}$) et une atténuation forte ; elle est bien visible sur les figures 8.3 et 8.5.
- * des ondes de type bifilaire et interfil se propagent dans les gaines des câbles et le revêtement du conducteur de terre, avec des vitesses supérieures (38 et $48 \text{ m}/\mu\text{s}$) et une faible atténuation (cf figure 8.4).
- * enfin, des ondes de type coaxial se propagent dans les enveloppes isolantes des câbles, à grande vitesse ($200 \text{ m}/\mu\text{s}$), pratiquement sans atténuation (cf. figure 8.6)

Les ondes donnent lieu à de multiples réflexions aux extrémités de la liaison, comme on le montre sur les différentes courbes.

On peut noter que la tension entre écrans et conducteur de terre correspond à la tension résiduelle des parafoudres de gaine, avec des oscillations dues à l'inductance des câbles de liaison.

Environ $80 \mu\text{s}$ après l'impact de la foudre, cette tension s'inverse lorsque le parafoudre se « désamorçage » et elle tend à se stabiliser à environ 20 kV , le courant dans les écrans étant alors très faible.

Remarque : les parafoudres de phase ne s'amorcent pas.

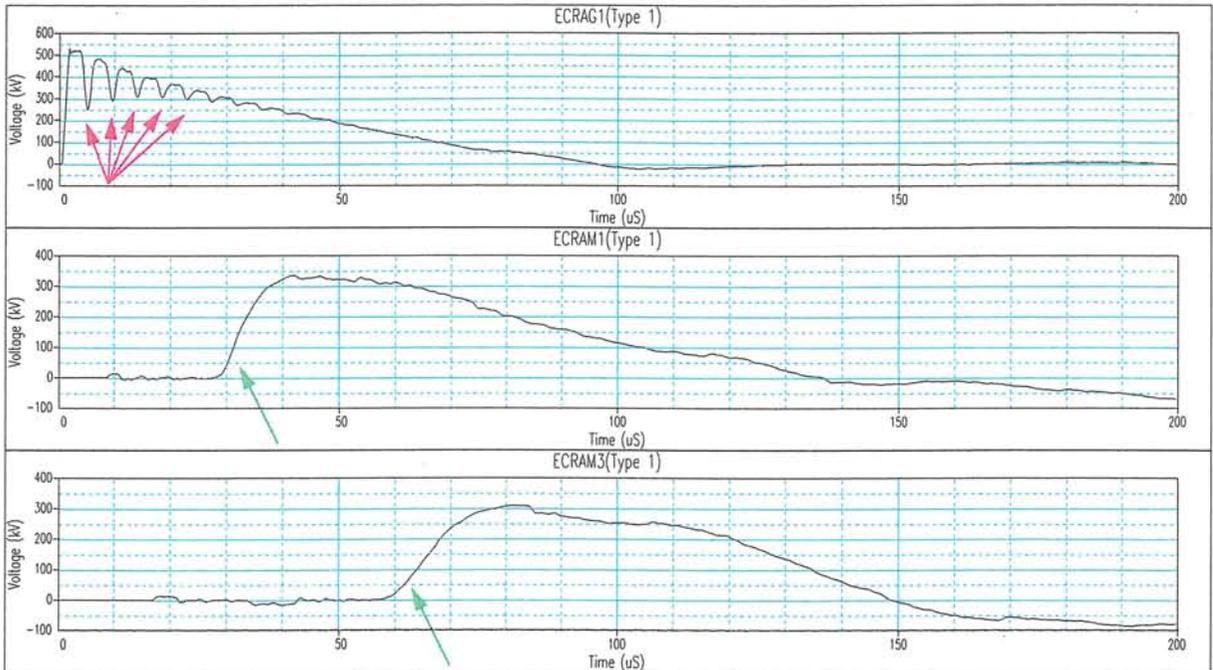


Figure 8.3 Montée en potentiel de l'écran. Foudroiement du câble de garde

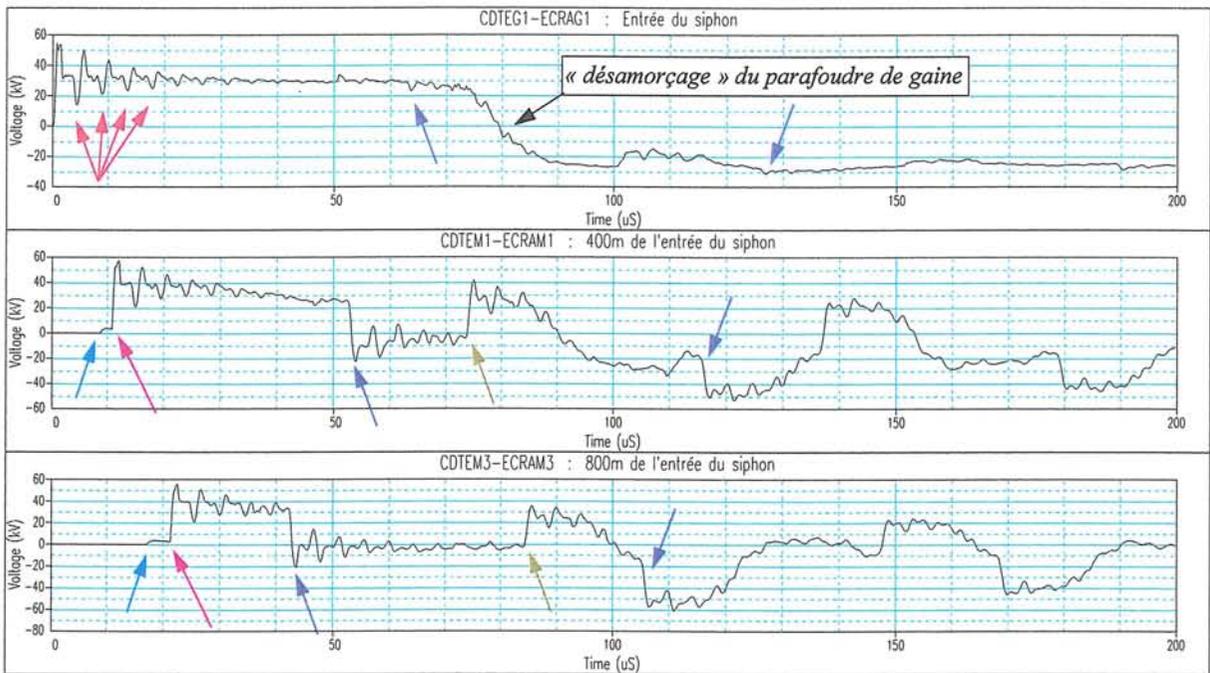


Figure 8.4 Tension câble de terre - écran. Foudroiement du câble de garde

- | | | | |
|--|--|--|--|
| | Propagation de l'onde $15\text{m}/\mu\text{s}$ | | Réflexion à l'extrémité droite de l'onde $38\text{m}/\mu\text{s}$ |
| | Propagation de l'onde $38\text{m}/\mu\text{s}$ | | Réflexion à l'extrémité gauche de l'onde $38\text{m}/\mu\text{s}$ |
| | Propagation de l'onde $48\text{m}/\mu\text{s}$ | | Réflexion du 2 ^{ème} pylône à gauche sur CDG de l'onde de $300\text{m}/\mu\text{s}$ |

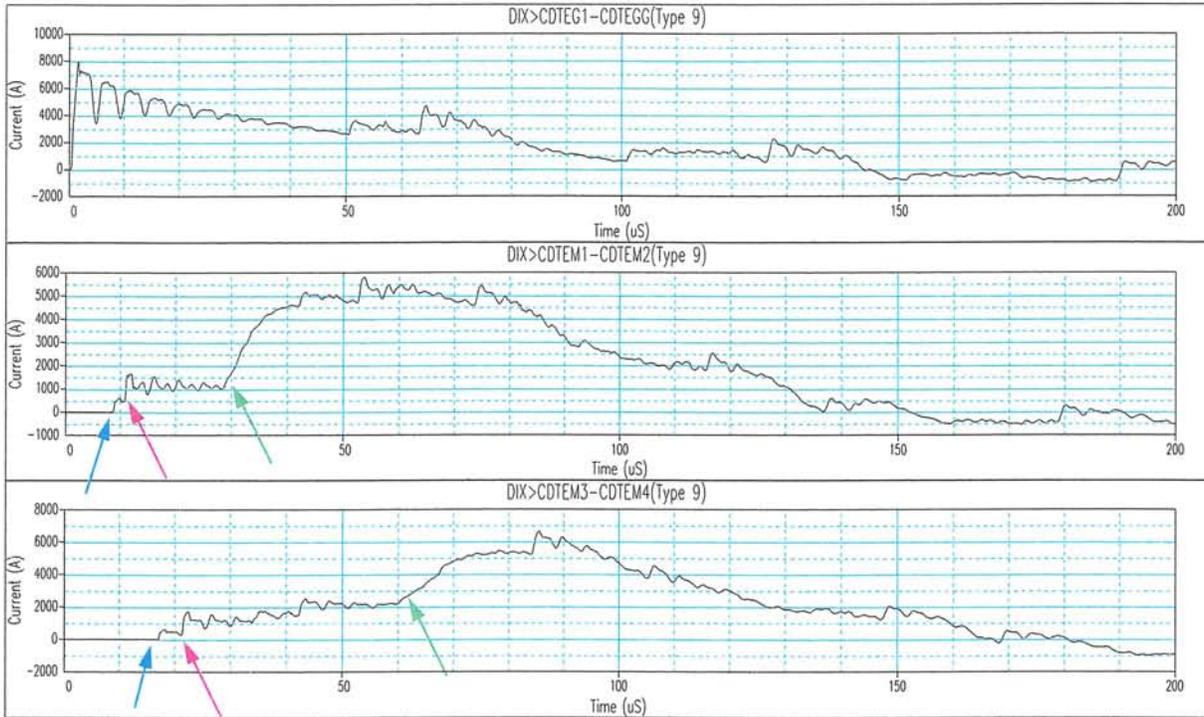


Figure 8.5 Courant dans le conducteur de terre. Foudroiement du câble de garde

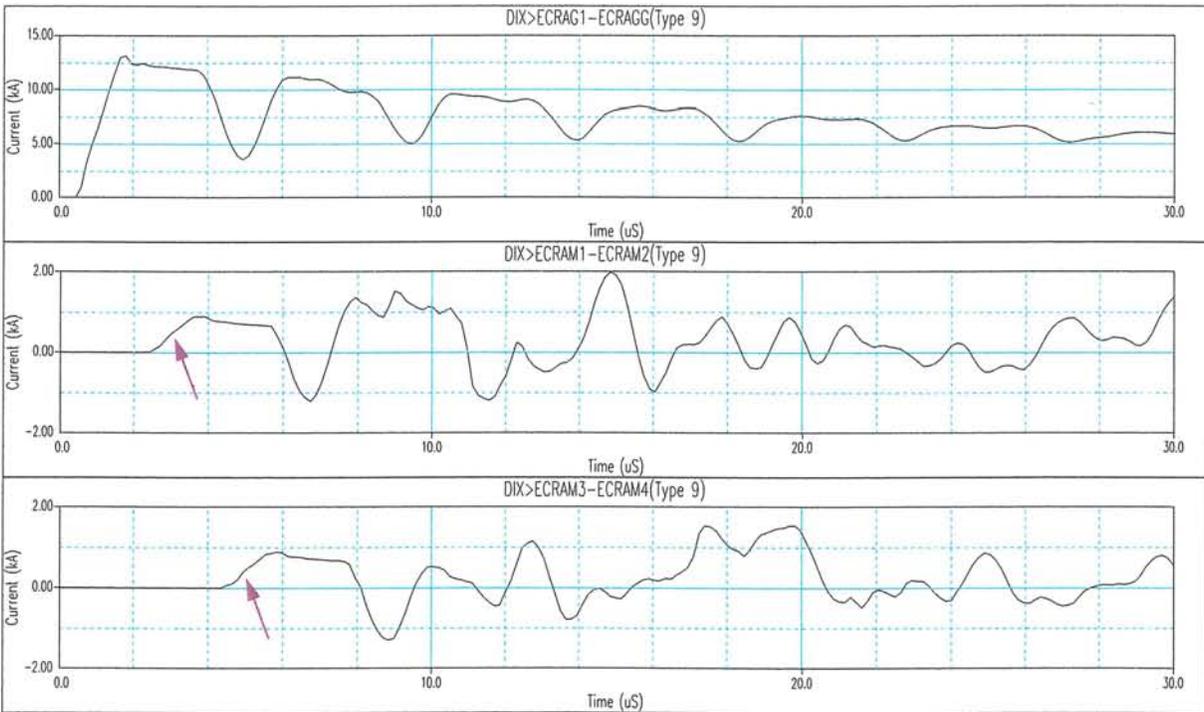


Figure 8.6 Courant dans l'écran. Foudroiement du câble de garde

- Propagation de l'onde 15m/µs
 - Propagation de l'onde 38m/µs
- Propagation de l'onde 48/µs
 - Propagation de l'onde 200/µs

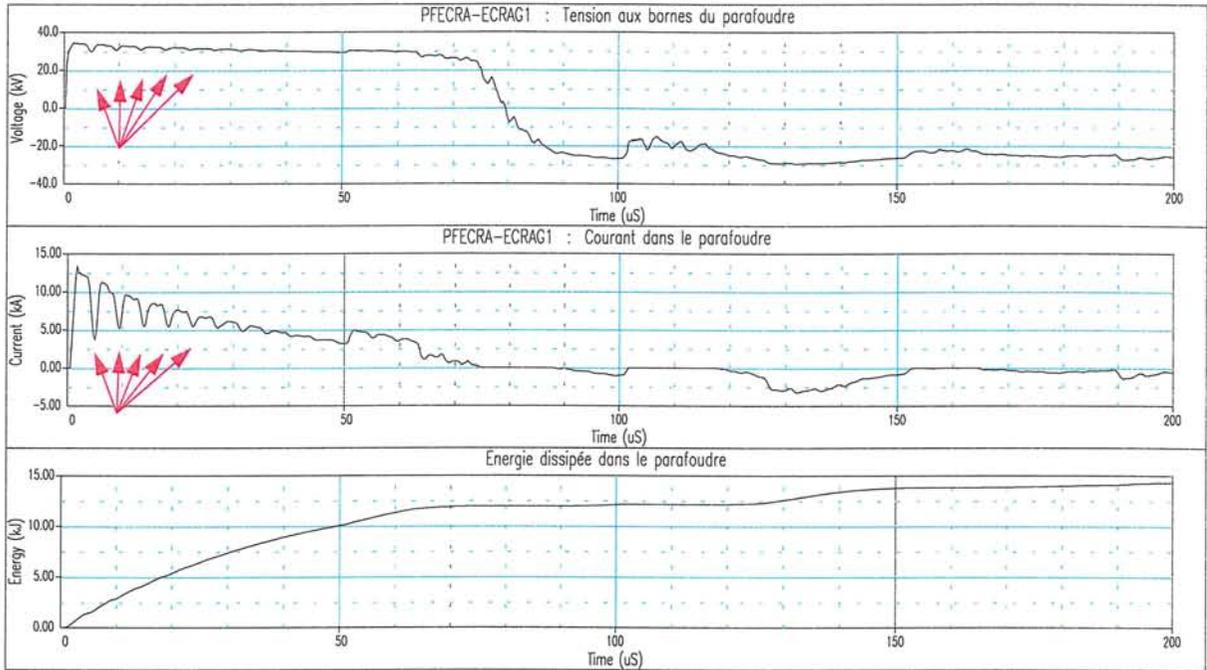


Figure 8.7 Parafoudres de gaine. Foudroiement du câble de garde

La figure ci-dessus donne l'évolution de la tension, du courant et de l'énergie dans les parafoudres de protection de gaine.

On constate que l'onde incidente venant du point d'impact de la foudre arrive à la prise de terre du pylône ($0,4 \mu\text{s}$ par rapport à l'instant initial), qui monte en potentiel, et très vite, cette montée en potentiel provoque l'amorçage des parafoudres de gaine. Comme ils sont des résistances non-linéaires, la tension à leurs bornes reste constante pendant la durée où ils conduisent. L'énergie dissipée dans ces parafoudres augmente en fonction du temps et atteint des valeurs assez importantes (14 kJ) pour des prises de terre aux extrémités de 10 Ω .

3 - FOUROIEMENT DU CONDUCTEUR DE PHASE (CDP).

Sur le schéma simplifié du paragraphe précédent (cf. figure 8.2), le point d'impact de la foudre se déplace maintenant du câble de garde au conducteur de phase qui se trouve juste en dessous.

Les différentes ondes qui se propagent sont mises en évidence sur les courbes donnant l'allure des montées en potentiel de l'écran, de la tension entre écran et conducteur de terre, et du courant dans l'écran. (*on présente les contraintes seulement sur la phase sollicitée car elles sont les plus contraignantes*).

Le parafoudre de la phase sollicitée ne s'est amorcé qu'après l'arrivée de l'onde réfléchiée à l'extrémité droite du siphon. Cependant, le courant et l'énergie dissipée restent à des valeurs négligeables.

Aucun amorçage dans les parafoudres des phases saines n'est enregistré.

En ce qui concerne les parafoudres de gaine, celui de la phase sollicitée s'est amorcé tout de suite dès que l'onde incidente est arrivée à l'entrée du siphon. Par contre, ceux de phases saines ne s'amorcent pas.

Il est intéressant de noter (cf figure 8.10) que le courant dans l'écran a une composante prépondérante due à la propagation coaxiale dans l'enveloppe isolante, composante correspondant au « retour » du courant injecté dans l'âme au niveau de l'aérosoterrain.

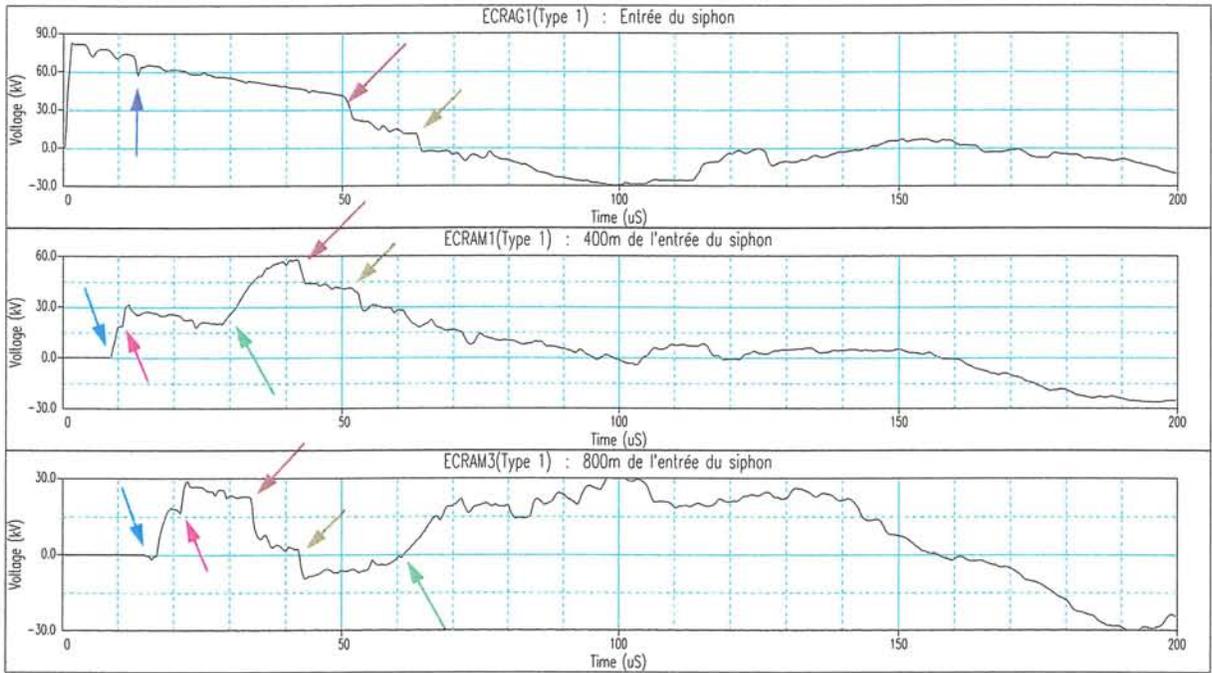


Figure 8.8 Montée en potentiel de l'écran. Foudroiement du câble de phase

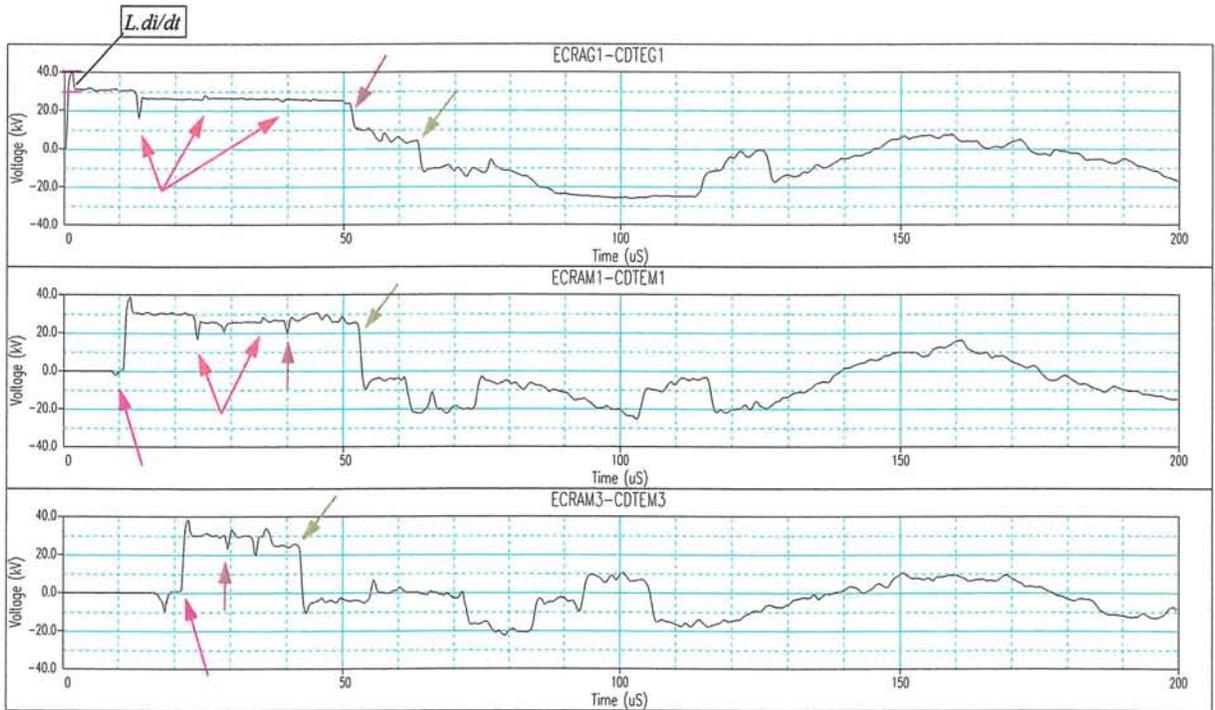


Figure 8.9 Tension Ecran - CDT. Foudroiement du câble de phase

- | | | | |
|--|------------------------------|--|--|
| | Propagation de l'onde 15m/µs | | Réflexion de l'onde 200m/µs |
| | Propagation de l'onde 38m/µs | | Réflexion à l'extrémité droite de l'onde 200m/µs |
| | Propagation de l'onde 48m/µs | | Réflexion à l'extrémité droite de l'onde 38m/µs |
| | | | Réflexion à l'extrémité droite de l'onde 48m/µs |

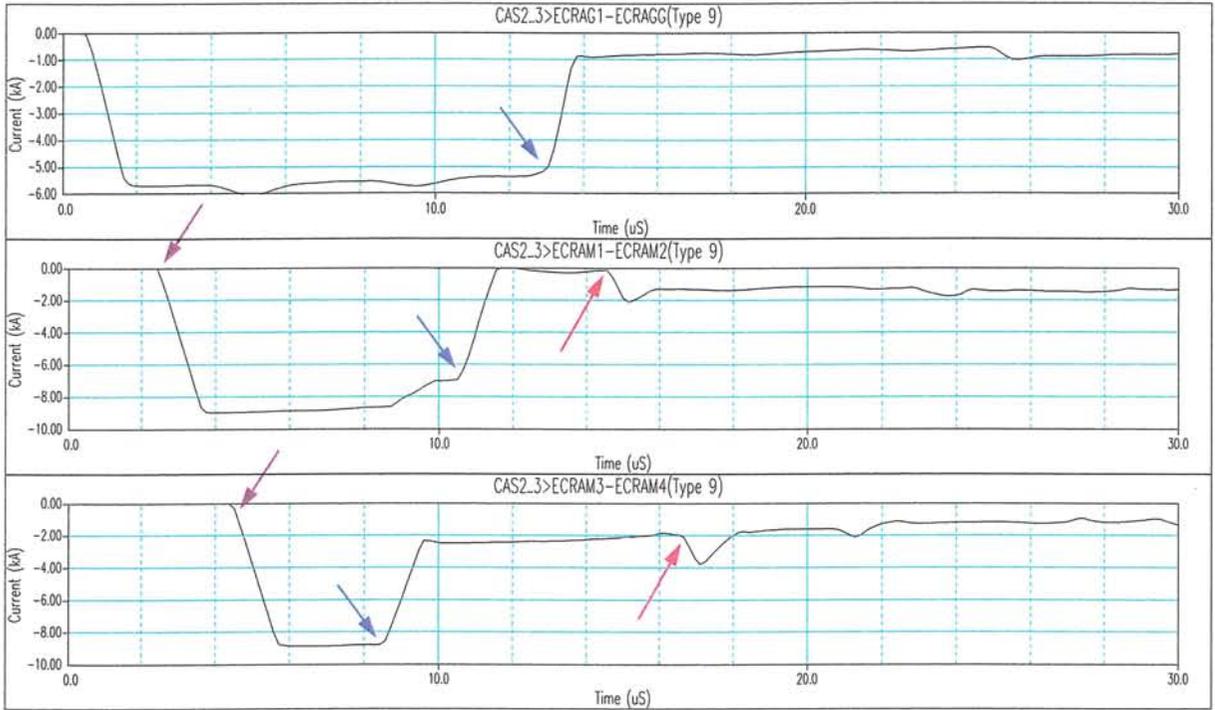


Figure 8.10 Courant dans l'écran. Foudroiement du câble de phase

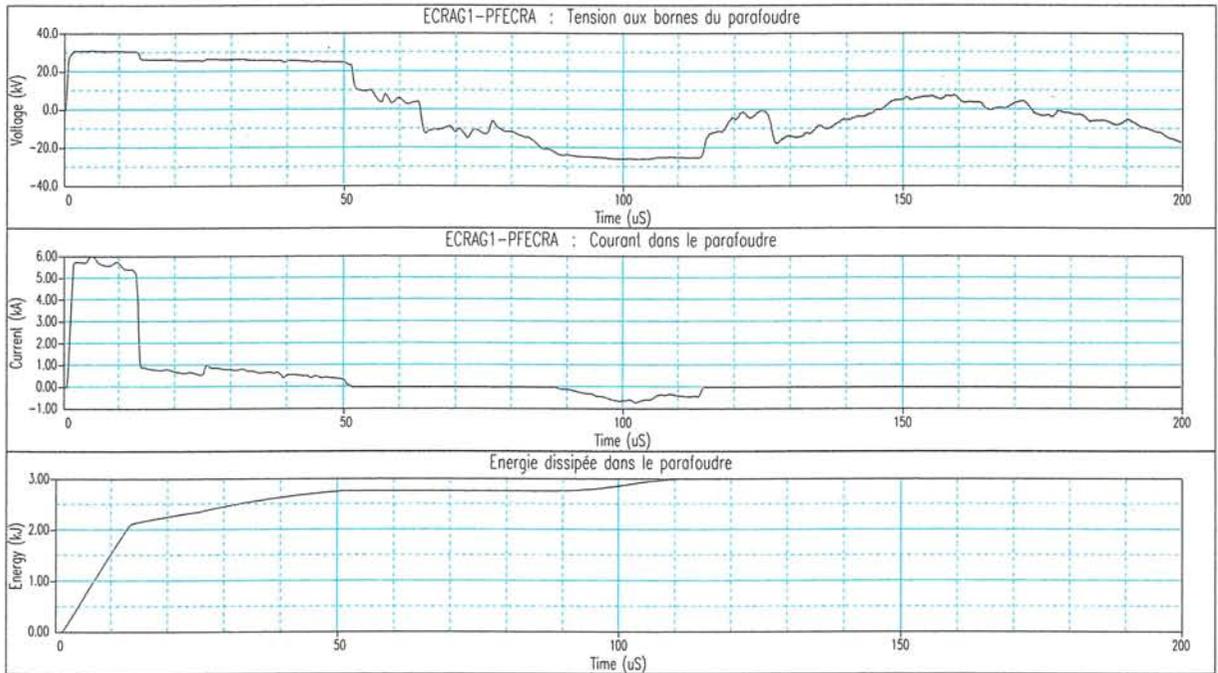


Figure 8.11 Parafoudre de gaine : Tension, courant et énergie dissipée. Foudroiement du câble de phase.

→ Propagation de l'onde 200m/µs

→ Réflexion à l'extrémité gauche de l'onde 200m/µs
 → Réflexion à l'extrémité droite de l'onde 200m/µs

4 - ETUDE DE SENSIBILITE DE DIFFERENTS PARAMETRES.

4 - 1 - INFLUENCE DE LA CONFIGURATION DES EXTREMITES DES CABLES.

Dans la modélisation des deux précédents paragraphes, les extrémités de câbles sont placées au niveau du sol, le conducteur de terre est relié à la prise de terre du pylône au niveau du passage aéro-souterrain, et les câbles de garde sont prolongés jusqu'au pied de ce pylône (cf. figure 8.2).

Pour le réseau 225 kV, on peut mettre les extrémités sur une plate-forme fixée sur le pylône pour éviter l'encombrement de leur installation au sol. Dans ce cas, les câbles et le conducteur de terre sont montés sur la plate-forme (cf. figure 8.12).

Les contraintes au long de la liaison souterraine ne sont pas très différentes entre ces deux configurations comme le montre le tableau ci-dessous.

Tableau 8.1 : Influence de la configuration des extrémités

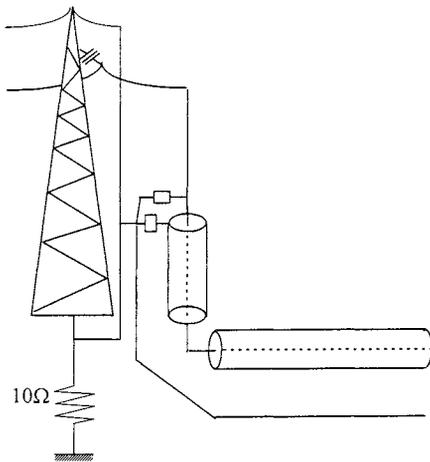


Figure 8.12 Extrémités sur plate-forme.

Foudroiement		CDG		CDP	
Extrémités		sol	plat-f.	sol	plat-f.
V_pdt (kV)		572	583	51	55
V_écran (kV)	(*)		706		130
	0 m	531	609	87	102
	400 m	336	337	58	58
	800 m	310	310	31	32
V_écran-CDT (kV)	(*)		68		40
	0 m	57	86	41	44
	400 m	57	82	39	41
	800 m	60	80	39	39
Parafoudre de gaine (kV, kA et kJ)	Tension	34	36	31	31
	Courant	13	18	6	6
	Energie	14	14	3	3
V / terre locale (kV)	CDT		124		19
	Ecran		201		57

(*) : niveau de la plate-forme
 0 m, 400 m, 800 m : distances par rapport à l'entrée du siphon.

Dans toutes les configurations étudiées, on peut formuler les remarques suivantes :

Les tensions entre écran et conducteur de terre atteignent des valeurs inquiétantes dans le cas du foudroiement du câble de garde.

Les surtensions des écrans et du conducteur de terre par rapport à la terre locale sont élevées quand les extrémités sont placées sur la plate-forme en cas de foudroiement du câble de garde. On verra dans le paragraphe suivant l'évolution de ces tensions en fonction de la résistance des prises de terre aux extrémités du siphon.

Les énergies dissipées dans les parafoudres de gaine sont faibles dans les cas du foudroiement d'un conducteur de phase.

Dans le cas du foudroiement du câble de garde, au long de la liaison souterraine, les maxima des montées en potentiel de l'écran ou du conducteur de terre par rapport au sol infini sont dus à la propagation du mode homopolaire, donc il n'y a pas des surtensions par rapport à la terre locale.

4 - 2 - INFLUENCE DE LA RESISTANCE DES PRISES DE TERRE, DU NIVEAU DE PROTECTION ET DE LA POSITION DU POINT D'IMPACT DE LA FOUDRE.

Ce paragraphe traite l'influence des trois paramètres suivants par rapport aux configurations de référence (R = 10 Ohms, Vas parafoudres = 10 kV, foudroiement de la dernière portée aérienne) :

- * Résistance des prises de terre aux extrémités du siphon : 1 - 5 Ohms
- * Tension assignée des parafoudres de gaine (niveau de protection) : 12 - 15 kV
- * Position du point d'impact de la foudre : deuxième portée aérienne à partir de l'entrée du siphon

Le tableau ci-dessous résume les résultats en notant :

- Vterre : Montée en potentiel de la terre locale (prise de terre à l'extrémité gauche du siphon)
 - Ve0 et Ve1 : Montée en potentiel des écrans au niveau de la plate-forme et du sol.
 - Vet0, Vet1 : Tension entre écrans - conducteur de terre au niveau de la plate-forme et du sol
 - V, I, Wpf : Tension, courant et énergie dissipée dans les parafoudres de gaine.
 - Vcdt/tcl, Ve/tlc : Montée en potentiel du conducteur de terre ou des écrans par rapport à la terre locale.
- Les tensions sont en kV, les courants en kA et les énergies en kJ.

La résistance des prises de terre du réseau n'a pas d'influence sensible sur les contraintes dans le siphon : quand toutes les prises de terre ont une résistance de 10 Ohms, on constate à quelques % près les mêmes contraintes par rapport au cas où elles ont une résistance de 20 Ohms. Par contre, la résistance des prises de terre aux extrémités du siphon a une certaine influence comme le montre le tableau ci-dessous.

Lorsque les extrémités sont placées sur une plate-forme, pour un foudroiement du câble de garde, les tensions entre le conducteur de terre ou les écrans de câbles par rapport à la terre locale atteignent des valeurs très élevées surtout quand la résistance des prises de terre aux extrémités du siphon est faible (on obtient un minimum lorsque cette résistance est environ de 6 ~7 Ohms).

Tableau 8.2 : Sensibilité des différents paramètres

	Extrémités placées au sol						Extrémités placées sur une plate-forme					
	Prises de terre			Vas parafoudres		2 ^{ème} portée	Prises de terre			Vas parafoudres		2 ^{ème} portée
	1 Ω	5 Ω	10 Ω	12 kV	15 kV		1 Ω	5 Ω	10 Ω	12 kV	15 kV	
Foudroiement du câble de garde												
Vterre	98	372	572	574	578	178	104	389	583	585	589	178
Ve0							610	657	706	702	696	153
Ve1	69	336	531	527	521	149	392	508	609	605	598	151
Vet0							64	66	68	74	83	50
Vet1	34	45	57	62	70	44	88	82	86	92	102	50
Vpf	28	32	34	41	51	29	35	35	36	43	54	30
lpf	2	8.6	13	13	13	3.3	13.6	16	18	18	18	4.1
Wpf	1	8	14	16	19	6.4	2.3	8.14	14	16	20	6.4
Vcdt/tlc							263	175	124	124	124	53
Ve/tlc							311	189	201	207	216	44
Foudroiement du câble de phase												
Vterre	8	31	51	49	47		9	35	55	53	51	
Ve0							127	129	130	135	140	
Ve1	52	71	87	92	98		87	94	102	106	112	
Vet0							41	40	40	48	56	
Vet1	44	42	41	47	55		47	45	44	44	53	
Vpf	32	31	31	37	46		32	32	31	37	46	
lpf	7.4	6.6	6	6	5		8	7	6	6	6	
Wpf	4	4	3	3	3		4	4	3	3	3	
Vcdt/tlc							35	26	19	18	17	
Ve/tlc							81	68	57	63	71	

En ce qui concerne la position du point d'impact de la foudre, les contraintes diminuent sensiblement quand le point d'impact s'éloigne du passage aérosouterrain. Le courant de foudre arrivant au niveau de l'aérosouterrain étant réduit du fait de l'écoulement à la terre par les pylônes en amont de l'aérosouterrain.

Ce paramètre nous amène à une remarque très intéressante : si on arrive à "éloigner" le point d'impact de la foudre de la jonction ligne - câble, les contraintes transitoires, particulièrement les surtensions de gaine, diminuent sensiblement. Dans la pratique, le phénomène de foudre a une nature tout à fait aléatoire et "incontrôlable". Cependant, si on réalise une hauteur supérieure pour la deuxième portée aérienne, ou bien, on ajoute des paratonnerres sur ces pylônes, on a tendance à attirer les coups de foudres vers cette zone "favorable".

4 - 3 - INFLUENCE DE LA LONGUEUR DU SIPHON ET CELLE DES CABLES DE CONNEXION ECRAN - PARAFONDRE.

Tableau 8.3 : Influence de la longueur du siphon et des connexions écran - parafoudre.
(les extrémités des câbles sont placées au sol)

	Foudroiment du câble de garde					Foudroiment du câble de phase				
	Câbles de connexion E-P			Longueur du siphon		Câbles de connexion E-P			Longueur du siphon	
	2 m	4 m	8 m	600 m	2400 m	2 m	4 m	8 m	600 m	2400 m
Vet (kV)	57	87	139	57	57	41	54	79	41	41
Vpf (kV)	34	34	34	34	34	31	31	31	31	31
Ipf (kA)	13	13	13	13	13	6	6	6	6	6
Wpf (kJ)	14	14	14	13	13	3	3	3	1.7	5

4 - 4 - INFLUENCE DES ECLATEURS ET DE LA SOURCE 50 HZ

L'amorçage des éclateurs au dernier pylône en cas de foudroiment du câble de garde entraîne la propagation d'ondes dans les conducteurs de phase. En arrivant aux extrémités de la liaison souterraine, elles produisent une brusque variation des courants dans les âmes et dans les écrans des câbles. Il en résulte une surtension entre écrans et conducteur de terre du fait de l'inductance des câbles de connexion écrans - parafoudres.

La présence de la source 50 Hz accélère l'amorçage des éclateurs.

En revanche, la tension maximale entre écrans - conducteur de terre ne dépend pas de ces deux facteurs comme le montrent les courbes ci-dessous.

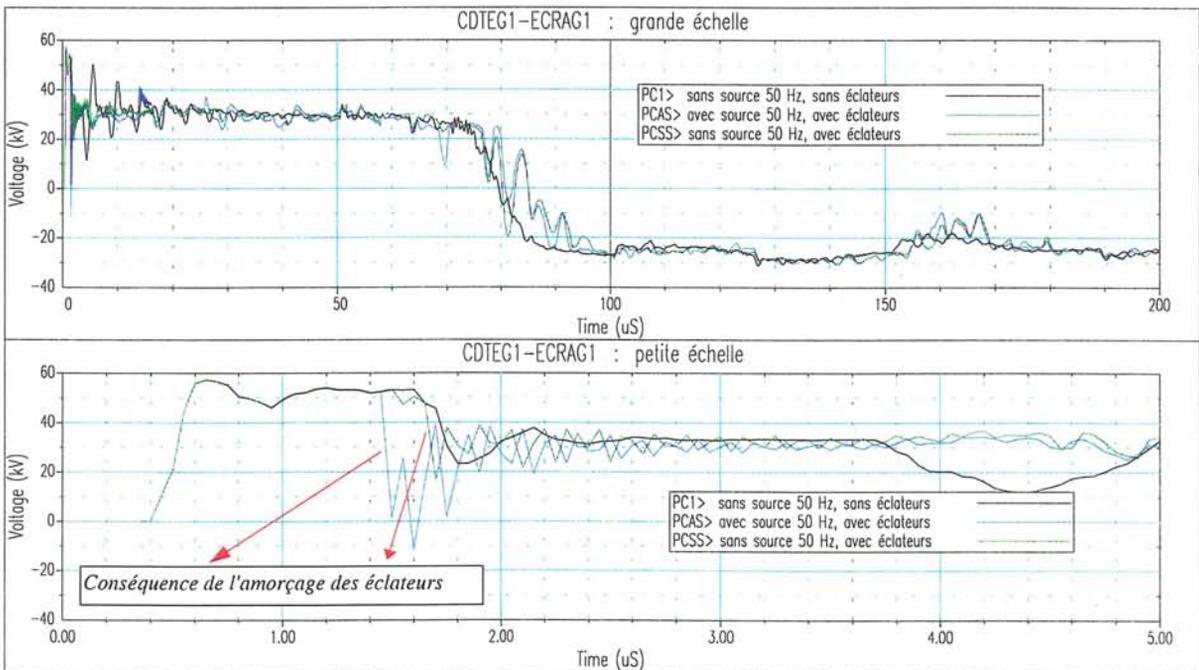


Figure 8.13 Tension écrans - CDT en tenant compte la présence de la source 50 Hz et des éclateurs

5 - EVALUATION DE LA TENSION ENTRE ECRAN ET CONDUCTEUR DE TERRE - EXTREMITES DES CABLES PLACEES AU SOL.

Comme l'instant auquel les surtensions atteignent leur valeur maximale correspond au temps de front de l'onde de foudre (1,2 μs) la tension entre écran et conducteur de terre peut être approximée par :

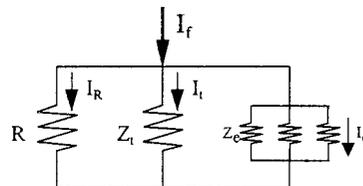
$$V_{et} = U_R(I_{max}) + L \cdot \ell \cdot \frac{I_{max}}{1,2} \quad [1]$$

$U_R(I)$ étant la tension résiduelle pour le courant I, L et ℓ l'inductance linéique et la longueur du câble de liaison.

Foudroiement du câble de garde.

A partir du schéma simplifié du §2, on peut écrire :

$$I_e = \frac{R \cdot Z_t}{Z_e \cdot Z_t + R \cdot (Z_e + 3 \cdot Z_t)} \cdot I_f \quad [2]$$



- Où : I_f : Courant au point d'impact vers la droite.
- R : résistance de la prise de terre à l'extrémité du siphon.
- Z_t, Z_e : Impédances apparentes du conducteur de terre et de l'écran des câbles.

Si le point d'impact se situe à proximité du pylône droit de la portée foudroyée, le courant I_f tend vers la valeur du courant de foudre (~100kA) :

- * le courant de foudre se répartit également de part et d'autre du point d'impact.
- * à une échelle de temps correspondant aux temps de transit des ondes dans le pylône et le câble de descente du câble de garde, l'aérosouterrain se comporte pratiquement comme un court-circuit car la résistance de la prise de terre est faible ; il provoque donc un quasi-doublement du courant incident. (cf. annexe 9)

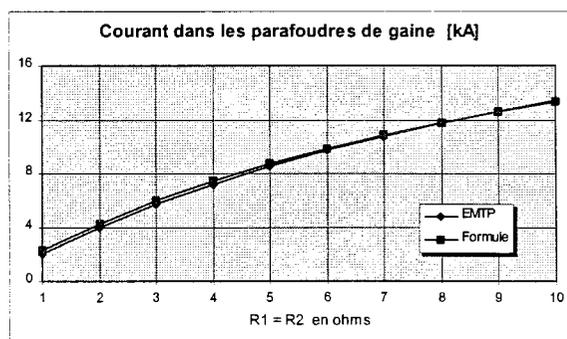
En régime homopolaire, d'après les expressions des matrices de transformation modale en courant et en tension données au chapitre 7, les courants et les tensions ont la forme donnée ci-contre.

$$I \approx \begin{bmatrix} 0 \\ 0,56 \\ 0 \\ 0,56 \\ 0 \\ 0,56 \\ 0,28 \end{bmatrix} \cdot i_m \quad V \approx \begin{bmatrix} 0,5 \\ 0,5 \\ 0,5 \\ 0,5 \\ 0,5 \\ 0,5 \\ 0,5 \end{bmatrix} \cdot v_m$$

Par conséquent, les impédances apparentes des écrans et du conducteur de terre peuvent être déduites de l'impédance homopolaire :

$$Z_e \approx \frac{Z_{ct}}{2} \approx \frac{0,5}{0,56} \cdot Z_{cmh} \approx Z_{cmh}$$

L'impédance apparente de l'écran étant de l'ordre de 40Ohms et celle du conducteur de terre de 80 Ohms (pour des fréquences de l'ordre du MHz), on obtient une bonne approximation comme le montre la figure ci-contre.



Foudroiement du câble de phase.

On peut en première approximation considérer que le courant dans les écrans est le courant « de retour » du courant injecté dans l'âme. Celui-ci est la composante transmise de l'onde incidente. En considérant des impédances caractéristiques de 300 Ohms et de 30 Ohms pour la ligne et pour le câble, on a : $I = 9$ kA.

En fait, cette approximation conduit à des erreurs sensiblement supérieures à celles obtenues en considérant un courant de 7 kA, beaucoup plus proche de la réalité.

	$\ell = 2\text{m} ; V_{pf} = 10\text{ kV}$			$V_{pf} = 10\text{ kV} ; R = 10\Omega$			$\ell = 2\text{m} ; R = 10\Omega$	
	$R = 1\Omega$	$R = 5\Omega$	$R = 10\Omega$	$\ell = 4\text{m}$	$\ell = 6\text{m}$	$\ell = 10\text{m}$	$V_{pf} = 12$	$V_{pf} = 15$
Foudroïement du câble de garde								
I_{exact} (kA)	2	8.6	13	13.16	12.86	12.44	13	13
$V_{\text{et_exact}}$ (kV)	34.0	45.5	57.2	87.0	110.5	167.6	62.37	70.03
$U_R(I_{(2)}) + L \cdot \ell * \frac{I_{(2)}}{1,2}$	31.4	45.4	54.5	80.9	109.6	171.2	60.88	71.12
	-7.8%	-0.1%	-4.8%	-7.0%	-0.8%	2.1%	-2.40%	1.55%
Foudroïement du câble de phase.								
I_{exact} (kA)	7.36	6.6	6	6				
$V_{\text{et_exact}}$ (kV)	44	42	41	53.8	67	89	46.63	55.35
$U_R(7) + L \cdot \ell * \frac{7}{1,2}$	41.9			55.8	70.8	103.2	48.56	58.04
	-5.63%	-1.18%	2.20%	3.71%	5.74%	15.91%	4.14%	4.86%

6 - CONCLUSION.

Les surtensions transitoires dépendent du niveau de protection des limiteurs de surtension de gaines et de la longueur du câble de connexion : des formules de calcul approché ont été établies au paragraphe 5. En revanche, elles ne dépendent pas de la longueur du siphon.

On précise ci-dessous les surtensions sollicitant les gaines de câble dans la configuration typique caractérisée par des parafoudres 10 de kV, des résistances de terre de 10 Ohms, et des connexions écran - parafoudre de 2 m.

Pour cette configuration, les surtensions sont moins élevées dans le cas du foudroïement d'un conducteur de phase que dans le cas d'un foudroïement du câble de garde et, dans tous les cas, l'énergie dissipée dans les parafoudres ne dépasse pas la limite admissible.

Dans le cas du foudroïement d'un conducteur de phase, les surtensions dépendent peu de la configuration des extrémités et de la résistance des prises de terre.

Dans le cas du foudroïement du câble de garde :

* l'influence de la position du point d'impact de la foudre est très sensible : les surtensions de gaine diminuent de 25% si le point d'impact se déplace de la 1^{ère} à la 2^{ème} portée aérienne par rapport à la jonction ligne - câble.

* quand les extrémités des câbles sont sur une plate-forme, on peut obtenir des surtensions très élevées entre le conducteur de terre ou les écrans de câbles par rapport à la terre locale. La résistance des prises de terre ayant dans ce cas une influence faible, on ne dispose pas de solution pour garantir l'intégrité des matériels en cas de foudroïement du câble de garde sur la portée joutant l'aérosouterrain.

* lorsque les extrémités sont au sol, une amélioration des prises de terre est très favorable. On peut alors utiliser un parafoudre 12 kV avec des prises de terre inférieures à 5 Ohms, comme le montre le tableau ci-dessous.

Configuration	typique : parafoudre 10 kV - R=10 Ω		possible : parafoudre 12 kV - R = 5 Ω
	sol	plate-forme	
Installation des extrémités	sol	plate-forme	sol
foudroïement conducteur de phase	41	44	48
foudroïement câble de garde - 2° portée	44	50	43
foudroïement câble de garde - 1° portée	57	> 80	51

Dans le cas d'un foudroïement sur le sommet de l'avant-dernier pylône (PYL2°), la tension écran-conducteur de terre peut atteindre des valeurs très élevées (67 kV pour la configuration typique).

Chapitre 9

PERMUTATION DES ECRANS

CONTRAINTES EN REGIME TRANSITOIRE

1 - INTRODUCTION.....	81
2 - FOUROIEMENT DU CONDUCTEUR DE PHASE (CDP).....	82
3 - FOUROIEMENT DU CABLE DE GARDE (CDG).....	88
4 - ETUDE DE SENSIBILITE DE DIFFERENTS PARAMETRES.	91
5 - EVALUATION DE LA SURTENSION DE GAINÉ AU 1 ^{ER} POINT DE PERMUTATION.	92
5 - 1 - COURANT DANS LES ÉCRANS AU 1 ^{ER} POINT DE PERMUTATION.	92
5 - 2 - SURTENSION DE GAINÉ AU 1 ^{ER} POINT DE PERMUTATION D'ÉCRANS.	93
6 - CONCLUSION.	94

1 - INTRODUCTION.

L'étude porte sur un siphon 225 kV dont la partie souterraine utilise la technique de permutation des écrans. Les paramètres invariants par rapport au chapitre précédent sont :

- la partie aérienne du réseau,
- la protection de l'isolation principale des câbles,
- l'amplitude des coups de foudre.

La partie souterraine est réalisée en câbles 1600 mm² cuivre, posés en trèfle. Les longueurs des sections élémentaires sont égales.

Pour protéger les jonctions à arrêt d'écran contre des surtensions, on utilise des parafoudres qui sont des résistances non linéaires (RNL - sans éclateur associé). Ils sont montés soit en étoile (neutre mis à la terre ou isolé), soit en triangle. Les câbles de connexion écrans - parafoudres sont des câbles coaxiaux modélisés comme les câbles principaux.

Les 2 paragraphes qui suivent traitent du foudroiement du conducteur de phase (CDP) puis du foudroiement du câble de garde (CDG) pour la configuration typique suivante :

- * la longueur des sections élémentaires est de 1000 m, celle des câbles de liaison écran - parafoudre est de 10 m.
- * les résistances des prises de terre (extrémités du siphon ou neutres des parafoudres de gaine) ont une valeur de 10 Ω.
- * les RNL ont une tension nominale de 12 kV quand elles sont montées en étoile et 24 kV pour le montage en triangle (la caractéristique courant - tension est déduite par homothétie des unités 12 kV / 5kA.
- * le point d'impact de la foudre est situé à 100 m de la jonction ligne - câble à gauche du siphon.
- * les extrémités des câbles sont placées au niveau du sol.

On donne essentiellement les résultats détaillés pour le cas de montage des limiteurs de surtension de gaine en étoile à neutre mis à la terre. Les deux autres types de montage (étoile neutre isolé et triangle) pour lesquels l'allure des contraintes reste similaire, sont présentés dans l'annexe 10.

Ensuite, une étude de sensibilité des paramètres est abordée.

Enfin, on établit des formules relativement simples permettant d'évaluer les surtension de gaine au 1^{er} point de permutation d'écrans avec une approximation tout à fait acceptable.

Les termes A, B, C (cf. figure 9.1) font référence à la position des câbles, et n'ont pas de signification électrique. Par exemple, le premier arrêt d'écran de la position A se trouve sur le câble sur lequel la foudre est injectée, et l'arrêt d'écran suivant de ce câble est désigné par la position B.....

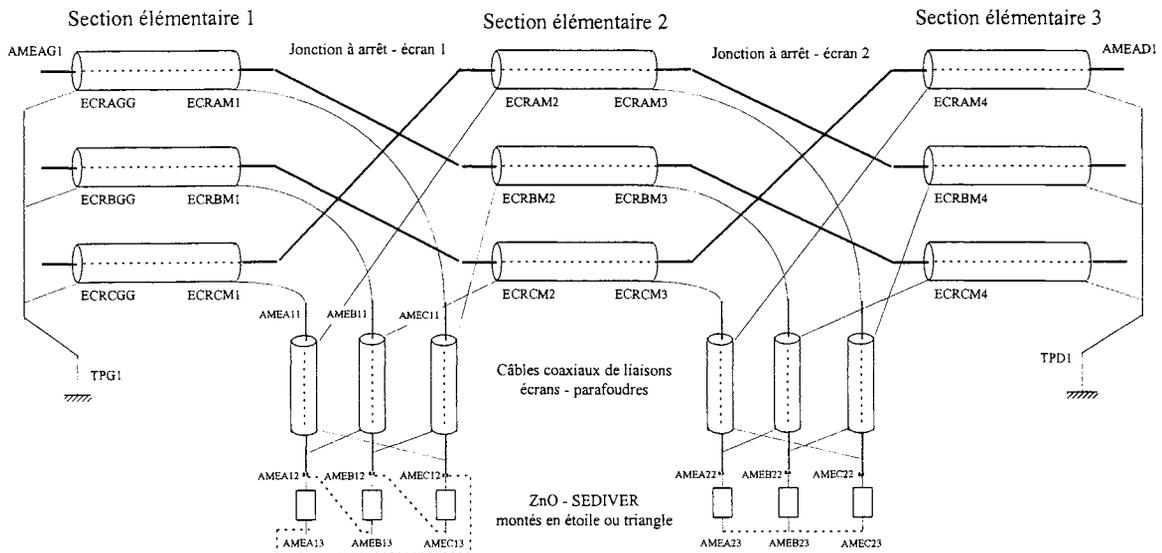


Figure 9.1 Principe de la permutation des écrans et de la connexion des écrans - parafoudres

2 - FOUROIEMENT D'UN CONDUCTEUR DE PHASE (CDP).

La figure 9.2 ci-dessous décrit le principe de la propagation des ondes dans les câbles. Aux jonctions à arrêt d'écran, l'onde qui se propage dans l'enveloppe isolante principale se décompose en trois éléments.

- le premier continue à se propager dans le même milieu avec la même vitesse ($200 \text{ m}/\mu\text{s}$),
- le deuxième, réflexion, se propage dans la gaine de protection des écrans du même circuit d'écran à $45 \text{ m}/\mu\text{s}$,
- et le troisième, transmission, se propage aussi dans la gaine mais de l'autre circuit d'écran à $45 \text{ m}/\mu\text{s}$.

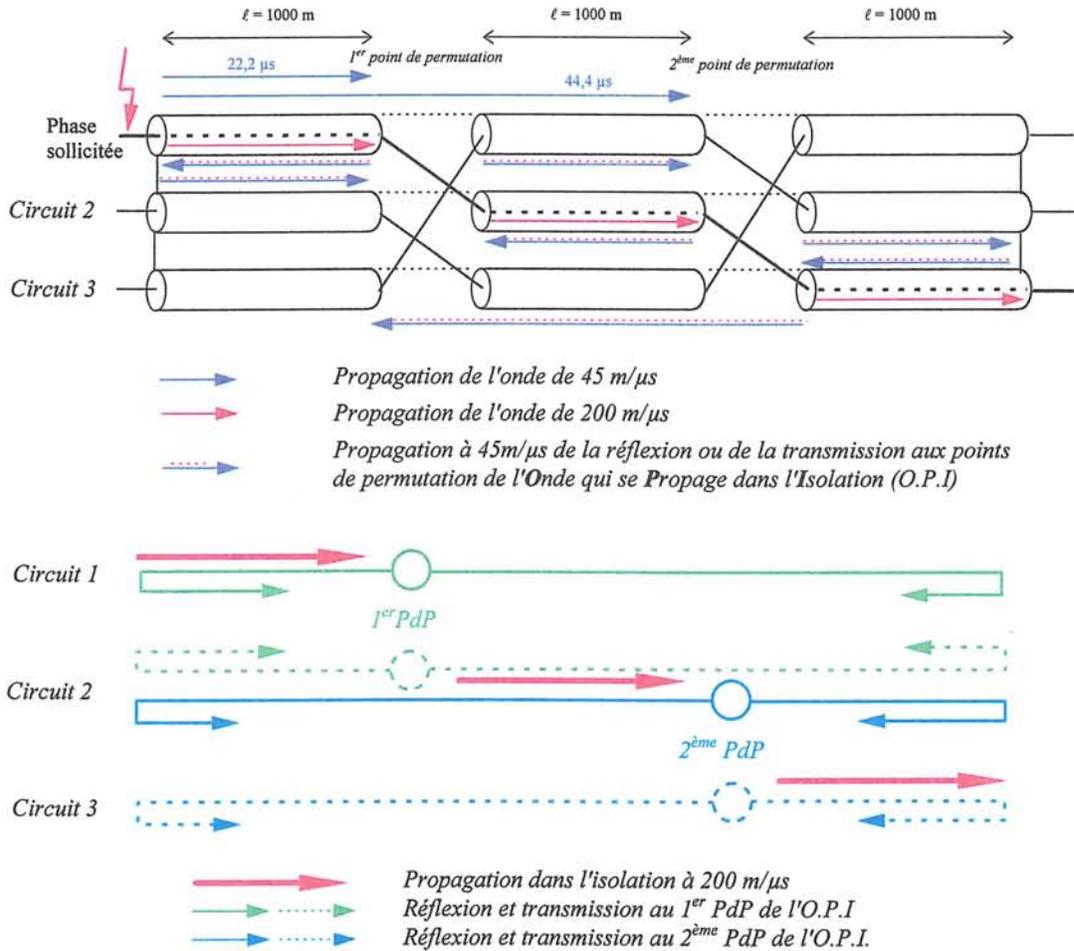
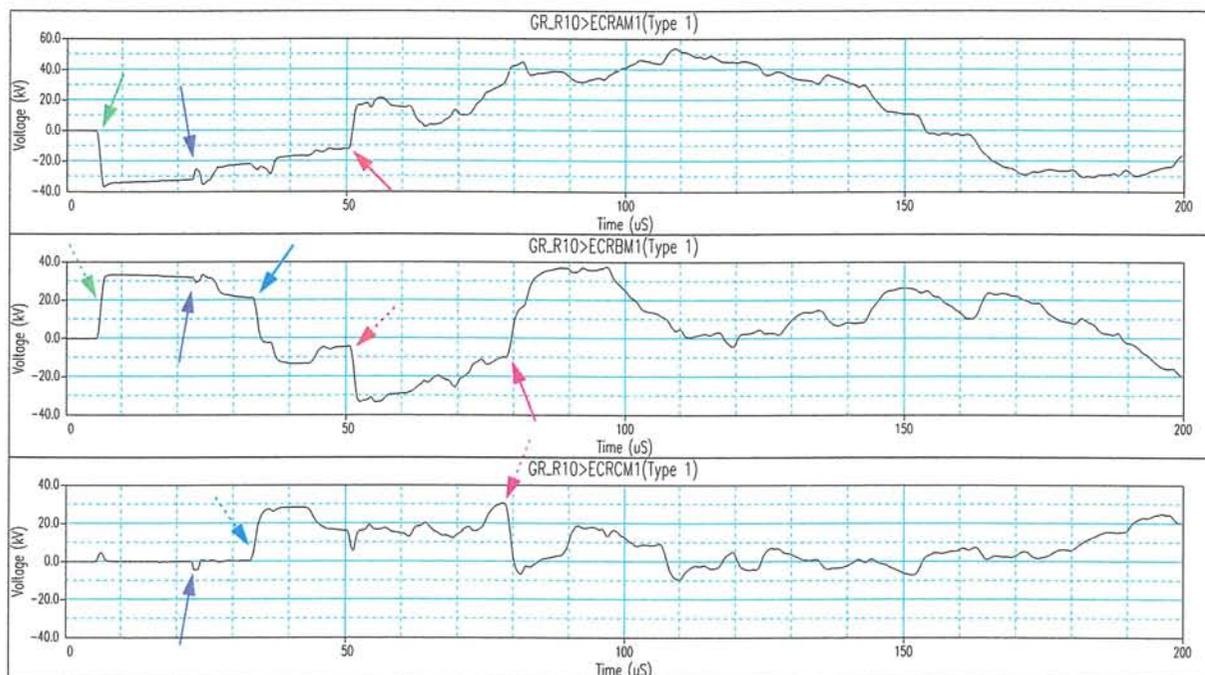


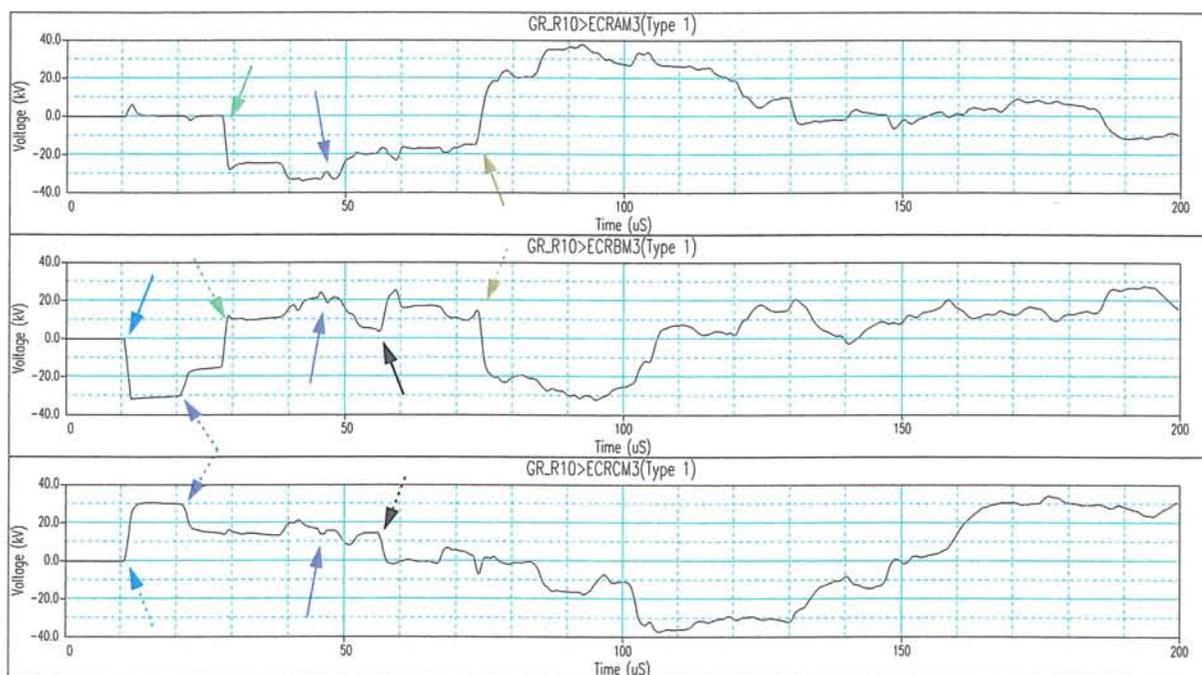
Figure 9.2 Principe de propagation des ondes dans les câbles

Les figures 9.3 et 9.4 dans les pages suivantes présentent les montées en potentiel des écrans par rapport au sol infini et par rapport aux prises de terre des parafoudres (considérés comme la terre locale) aux différents points de permutation des écrans. L'interprétation des courbes se fait à l'aide de l'analyse citée ci-dessus. Les tensions entre écrans aux points de permutation des écrans sont données sur la figure 9.5.

Remarque : En ce qui concerne les parafoudres de phase, seuls deux parafoudres (aux extrémités du siphon) de la phase sollicitée se sont amorcés. Ces amorçages n'ont lieu qu'après l'arrivée de l'onde réfléchie de l'autre extrémité du siphon. Cependant, le courant et l'énergie dissipée restent à des valeurs négligeables. Aucun amorçage dans les parafoudres des phases saines n'est enregistré.



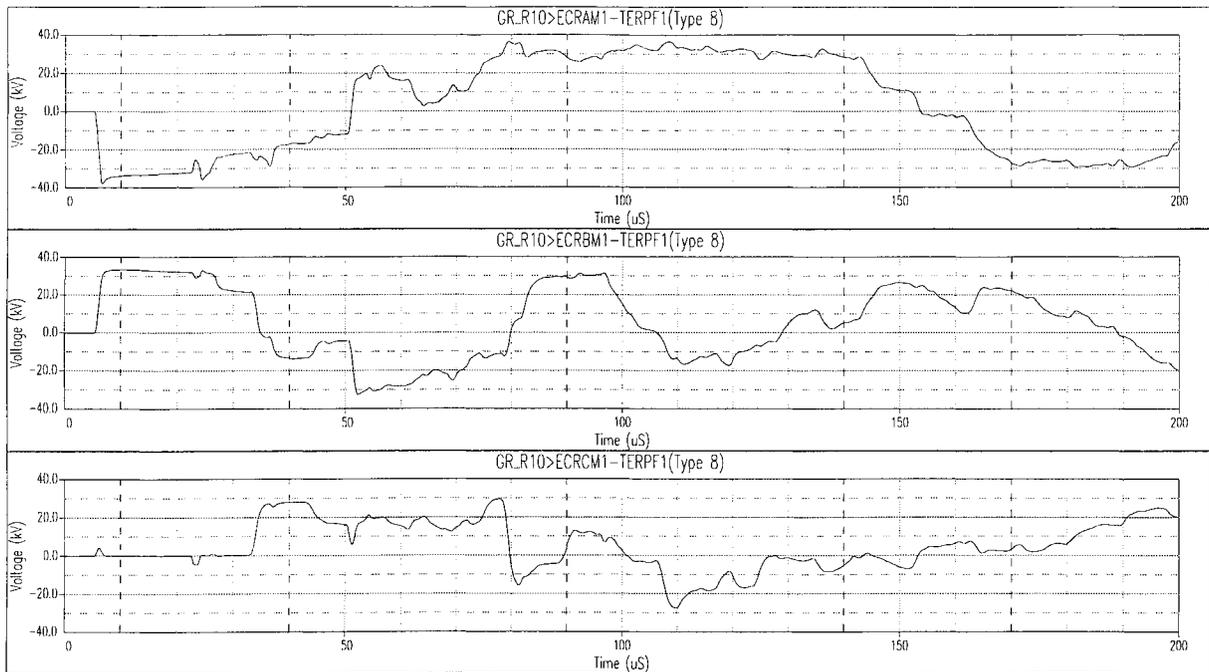
a) à la 1^{ère} jonction à arrêt d'écran



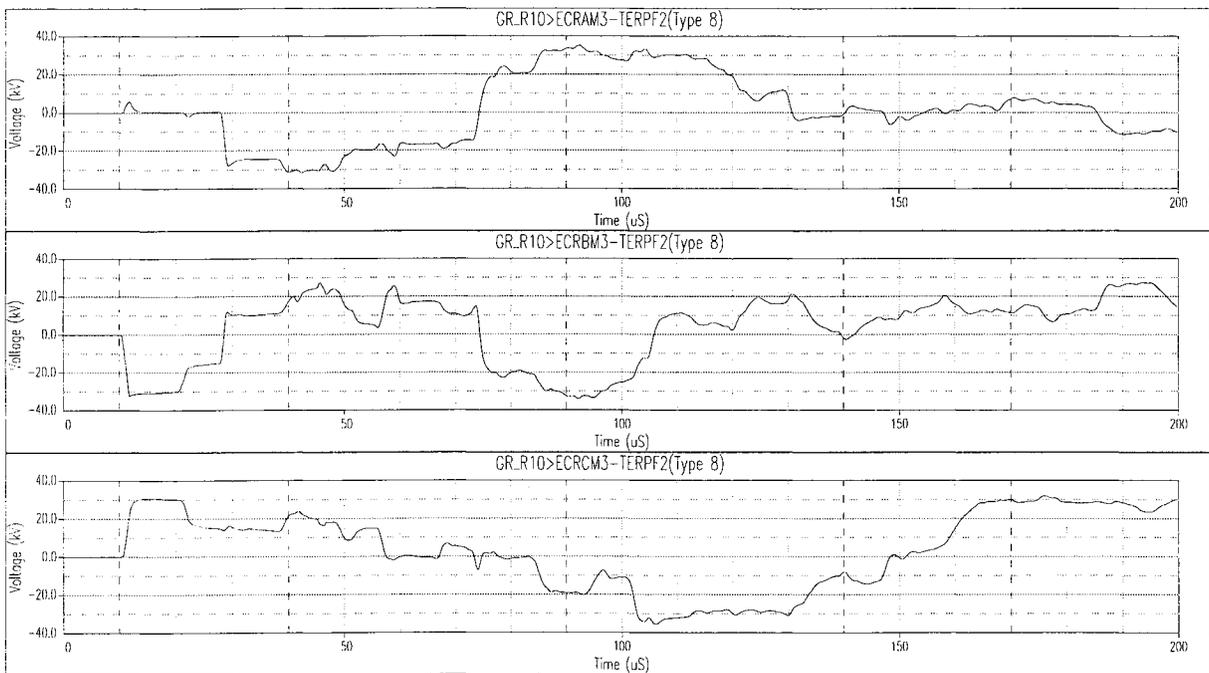
b) à la 2^{ème} jonction à arrêt d'écran

Figure 9.3 Montée en potentiel des écrans / sol infini.
(Parafoudres de gaine montés en étoile - neutre à la terre. Foudroiement d'un conducteur de phase)

- Propagation de l'onde 45m/µs
- Réflexion et transmission au 1^{er} PdP de l'O.P.I.
- Réflexion et transmission au 2^{ème} PdP de l'O.P.I.
- Réflexion à l'extrémité gauche de la réflexion et transmission au 1^{er} PdP de l'O.P.I.
- Réflexion à l'extrémité gauche de la réflexion et transmission au 2^{ème} PdP de l'O.P.I.
- Réflexion à l'extrémité droite de la réflexion et transmission au 1^{er} PdP de l'O.P.I.
- Réflexion à l'extrémité droite de la réflexion et transmission au 2^{ème} PdP de l'O.P.I.
- Réflexion à l'extrémité droite de l'onde 200m/µs

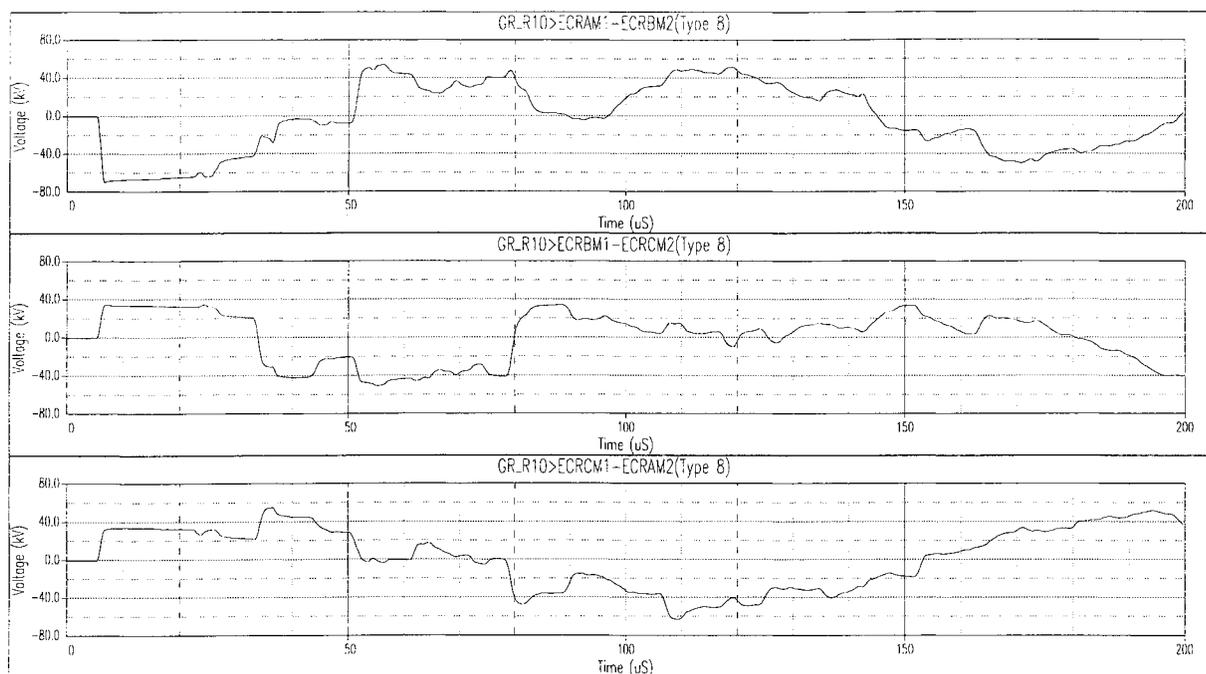


a) à la 1^{ère} jonction à arrêt d'écran

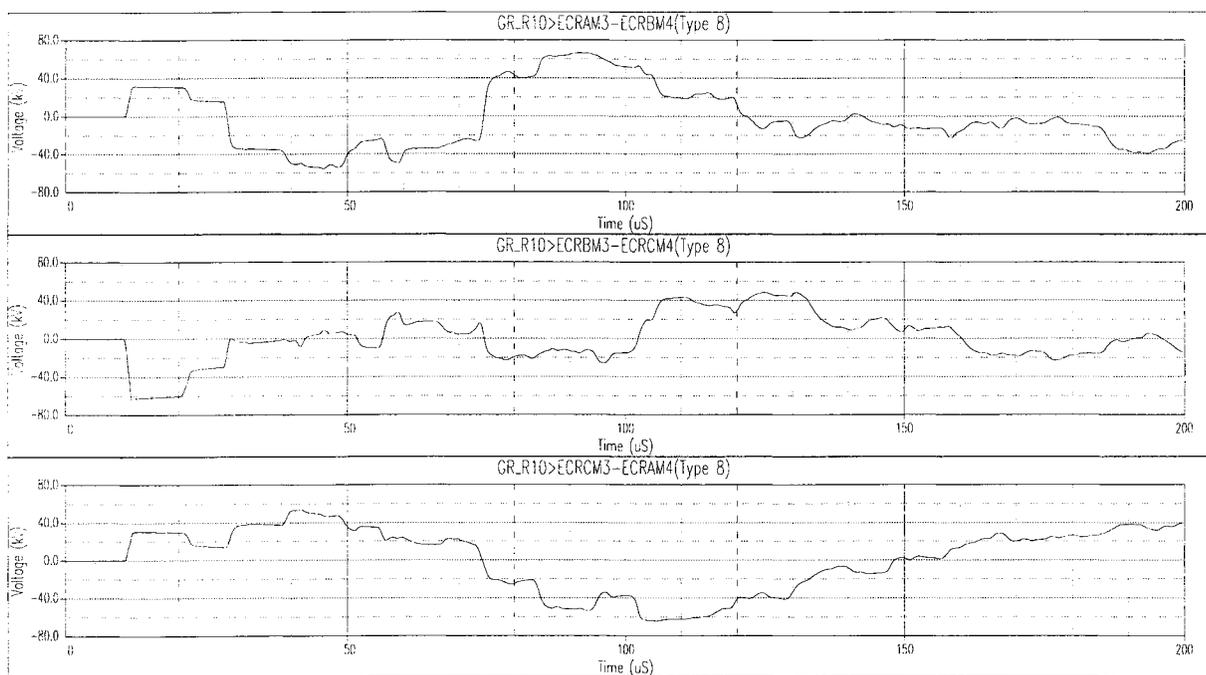


b) à la 2^{ème} jonction à arrêt d'écran

Figure 9.4 Montée en potentiel des écrans / prise de terre des parafoudres de gaine (terre locale)
(Parafoudres de gaine montés en étoile - neutre à la terre. Foudroiement d'un conducteur de phase)



a) à la 1^{ère} jonction à arrêt d'écran



b) à la 2^{ème} jonction à arrêt d'écran

Figure 9.5 Tension Arrêt - Ecran.

(Parafoudres de gaine montés en étoile - neutre à la terre. Foudroiement d'un conducteur de phase)

Le maximum des tensions entre écrans est enregistré au premier point de permutation (le point le plus proche du point d'impact de la foudre) de la phase sollicitée dès l'arrivée de l'onde qui se propage dans l'isolation. C'est la raison pour laquelle dans la suite on ne présente que des résultats obtenus sur les parafoudres de gaine à la 1^{ère} jonction à arrêt d'écran.

Il est clair que cette tension maximale sollicite un seul parafoudre s'ils sont montés en triangle (cf. figure 9.6 c) et deux parafoudres s'ils sont en étoile (cf. figure 9.6 a & b). Dans ce dernier cas, les tensions, donc les courants, sont opposés dans les deux parafoudres concernés à cet instant.

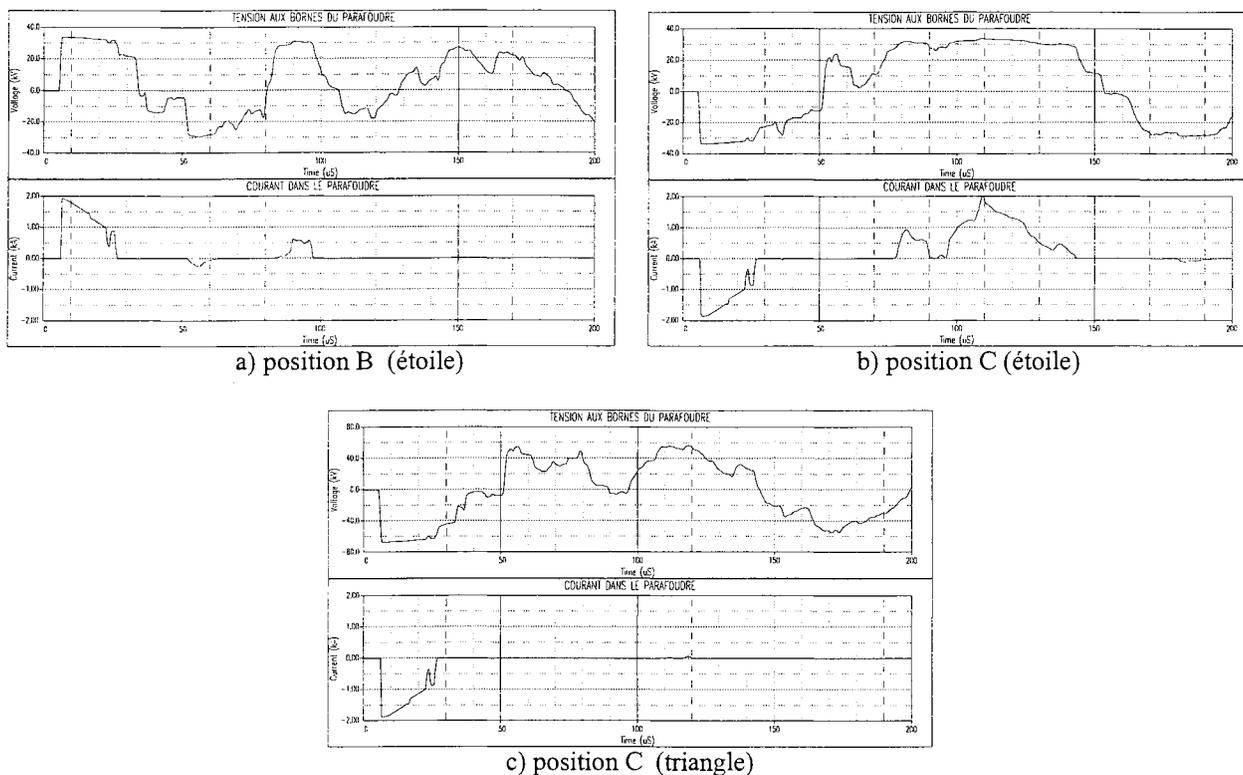


Figure 9.6 Parafoudres de gaine à la 1^{ère} jonction à arrêt d'écran. Foudroiement d'un conducteur de phase

Les surtensions sollicitant vraiment la gaine sont les montées en potentiel des écrans par rapport à la terre locale (prises de terre des parafoudres de gaine). Les maxima sont atteints au 1^{er} point de permutation de la phase sollicitée (cf. figure 9.4). Quand les parafoudres de gaine sont montés en étoile à neutre isolé ou en triangle, les montées en potentiel des écrans par rapport au sol infini sont parfaitement superposées comme le rappelle la figure 9.7a ci-après. Les contraintes maximales affectent la 1^{ère} jonction à arrêt d'écran de la phase sollicitée, dès l'arrivée de l'onde qui se propage dans l'isolation à 200 m/µs (cf. figure 9.7 b).

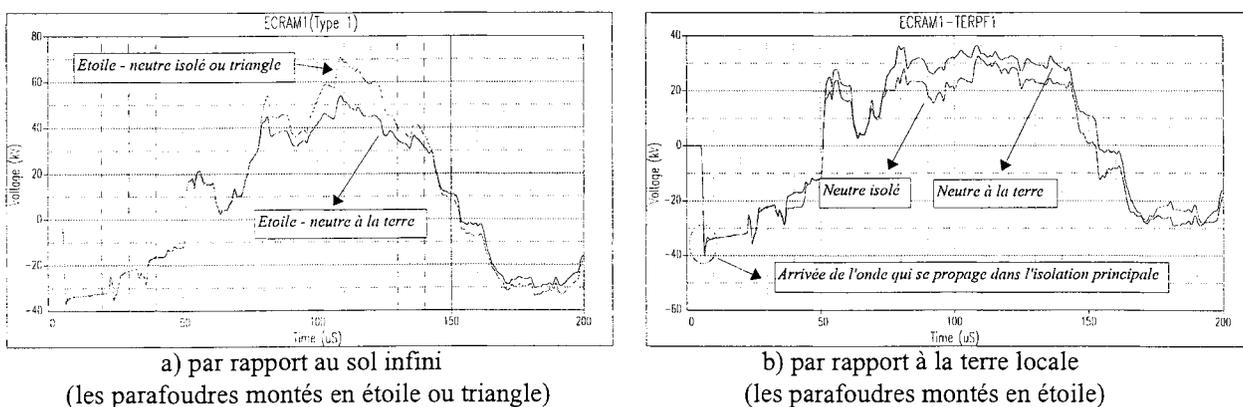
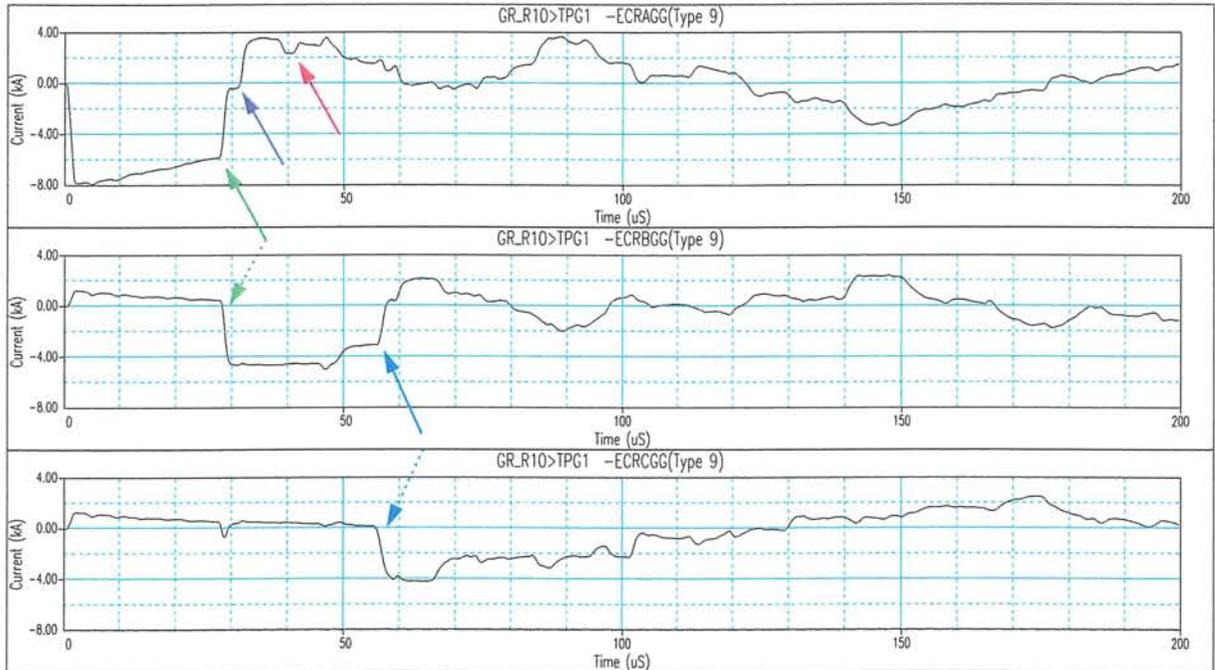
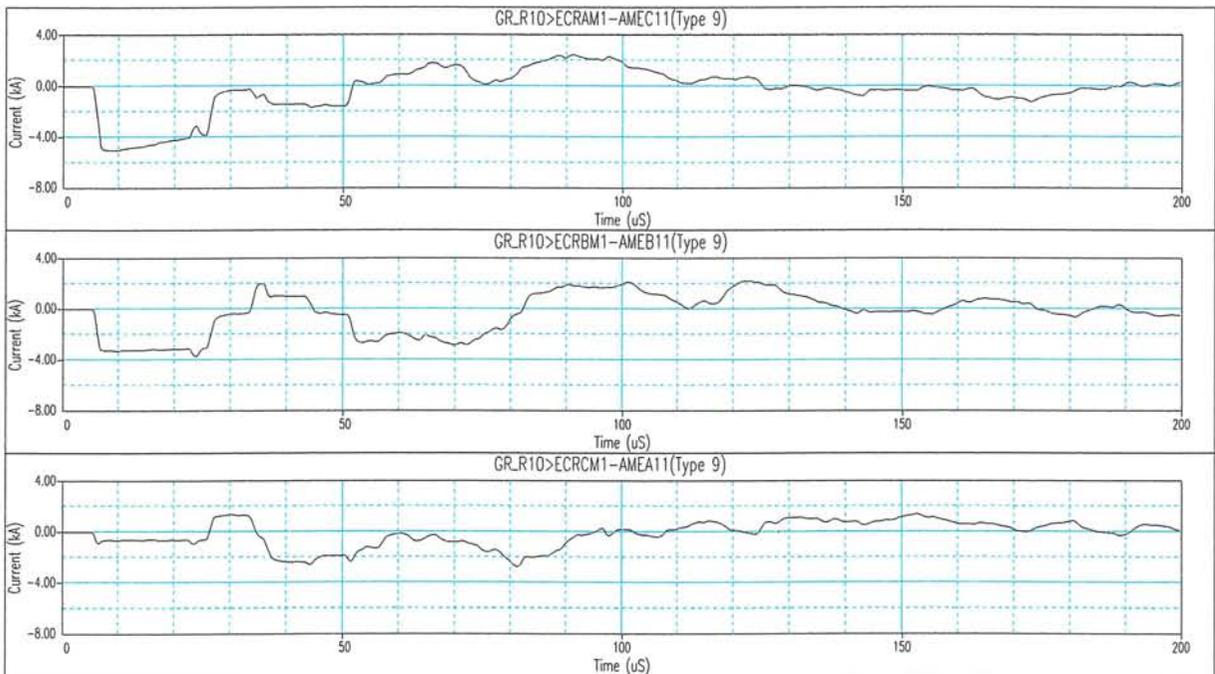


Figure 9.7 Montée en potentiel maximale de l'écran. Foudroiement d'un conducteur de phase



a) à l'entrée du siphon.



b) à la 1^{ère} jonction à arrêt d'écran.

Figure 9.8 Courant dans les écrans
(Parafoudres de gaine montés en étoile - neutre à la terre. Foudroiement d'un conducteur de phase)

- Réflexion à l'extrémité droite de l'onde qui se propage entièrement dans l'isolation
- Transmission au 1^{er} PdP de l'O.P.I provenance de l'extrémité droite : $25 + 22.2 = 47.2 \mu s$
- Réflexion et transmission au 1^{er} PdP de l'O.P.I.
- Réflexion et transmission au 2^{ème} PdP de l'O.P.I

* Les contraintes les plus sévères, présentées dans le tableau ci-contre, sont obtenues à la 1^{ère} jonction à arrêt d'écran (JAE) de la phase sollicitée.

* Les montées en potentiel des écrans par rapport à la terre de référence (Ve) dépendent du mode de couplage des parafoudres de gaine. Elles sont plus grandes pour les couplages en étoile neutre isolé et en triangle.

* Par contre, les montées en potentiel des écrans par rapport à la terre locale (Vg), qui sollicitent les gaines des câbles sont voisines (elles sont légèrement supérieures quand les parafoudres de gaine sont montés en étoile à neutre isolé ou en triangle).

* Quel que soit le mode de couplage, l'énergie dissipée dans les parafoudres ne dépasse pas la limite des constructeurs et la tension aux arrêts d'écran (Vae) est bien inférieure à la tenue normalisée de 100 kV crête.

Parafoudres de gaine		Y_terre	Y_isolé	Δ
V_pf. de gaine (kV)	Position A	29.3	32.5	65.0
	Position B	33.8	33.7	51.7
	Position C	33.9	33.7	67.5
I_pf. de gaine (kA)	Position A	0.22	1.2	1.20
	Position B	1.97	1.92	0.00
	Position C	2.03	1.92	1.92
W_pf. de gaine (kJ)	Position A	0.02	0.165	0.33
	Position B	1.06	0.884	0.00
	Position C	2.60	1.05	1.77
Ve	Position A	54.1	70.7	
Vae	Position A	72.1	72.1	
Vg	Position A	39.1	41.6	
Ie (entrée du siphon)		7.93		
Ie (1 ^{ère} JAE)		5.04		

Tableau 9.1 : Contraintes pour le foudroiement d'un conducteur de phase

3 - FOUROIEMENT DU CABLE DE GARDE (CDG).

Les trois phases sont soumises à des contraintes similaires. On se limite donc à présenter des résultats sur une seule phase : montées en potentiel des écrans (cf. figure 9.9 & 9.10), courants dans les écrans (cf. figure 9.11), tension, courant et énergie dissipée dans les parafoudres de gaines (cf. figure 9.12).

Les tensions au niveau des arrêts d'écran sont faibles car les contraintes dans les trois écrans sont similaires. Les parafoudres de phase ne s'amorcent pas. Les parafoudres de gaine ne s'amorcent que s'ils sont montés en étoile avec neutre à la terre.

La propagation de la composante homopolaire est prépondérante mais avec une forte atténuation (cf. figures 9.9 & 9.11). Les contraintes (tensions, courants) au 2^{ème} point de permutation sont donc inférieures à celles au premier point (tableau ci-contre). Ces résultats sont tirés de trois positions spécifiques : entrée du siphon (*), 1^{ère} et 2^{ème} jonctions à arrêt d'écran (JAE).

Les montées en potentiel des écrans aux points de permutation d'écran dépendent du mode de couplage des parafoudres de gaine. Les surtensions sollicitant la gaine des câbles, c'est-à-dire les montées en potentiel des écrans par rapport à la terre locale, sont plus grandes dans le couplage en étoile neutre à la terre et peuvent dépasser la tenue normalisée de 50 kV crête.

Quel que soit le mode de couplage, l'énergie dissipée dans les parafoudres de gaine ne dépasse pas la limite admissible et la tension aux arrêts d'écran est bien inférieure à la tenue normalisée de 100 kV crête.

Parafoudre de gaine		Y_terre	Y_isolé / Δ
Ve (kV)	(*)	576	576
	1 ^{ère} JAE	197	320
	2 ^{ème} JAE	106	265
Vae (kV)	1 ^{ère} JAE	5.11	5.11
	2 ^{ème} JAE	3.21	3.12
Ie (kA)	(*)	15.3	15.3
	1 ^{ère} JAE	9.45	6.90
	2 ^{ème} JAE	4.52	5.45
V_pf (kV)	1 ^{ère} JAE	36.8	pas d'amorçage
I_pf. (kA)		5.32	
W_pf (kJ)		10.7	
V_pf (kV)	2 ^{ème} JAE	34.4	
I_pf. (kA)		2.38	
W_pf (kJ)		3.10	
Vg (kV)	1 ^{ère} JAE	54.4	25
	2 ^{ème} JAE	39.1	25

Tableau 9.2 : Contraintes pour le foudroiement du câble de garde

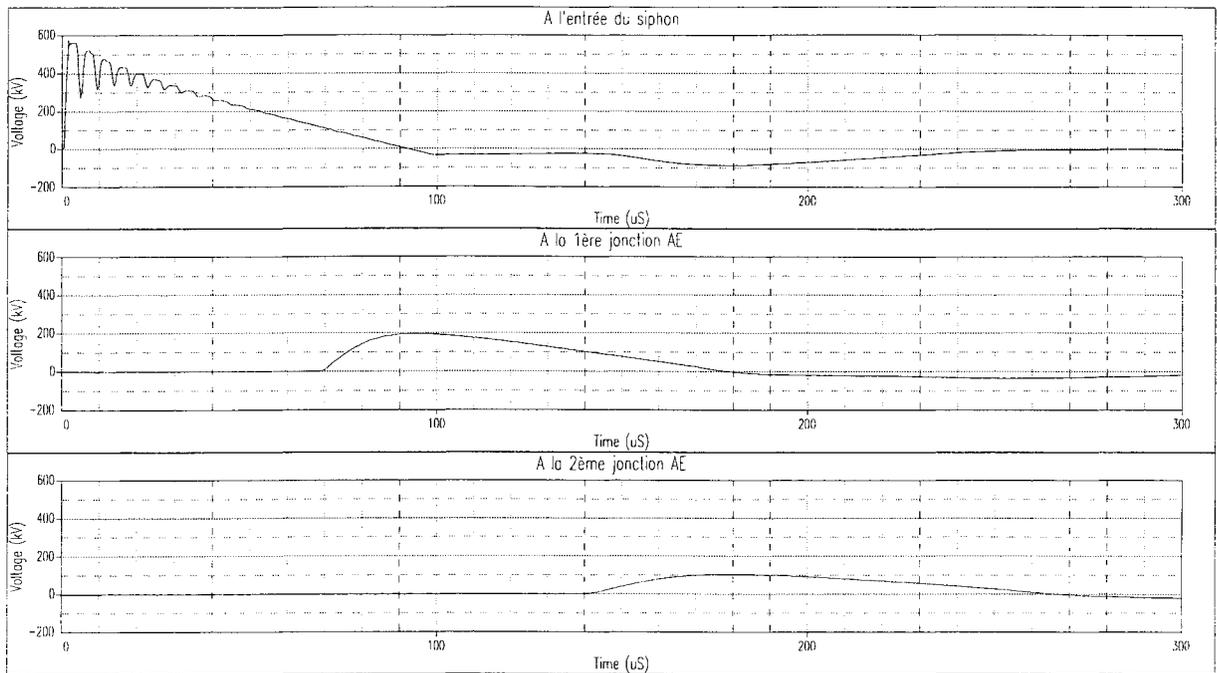


Figure 9.9 Montée en potentiel des écrans / sol infini.
(Parafoudres de gaine montés en étoile - neutre à la terre. Foudroiement du câble de garde)

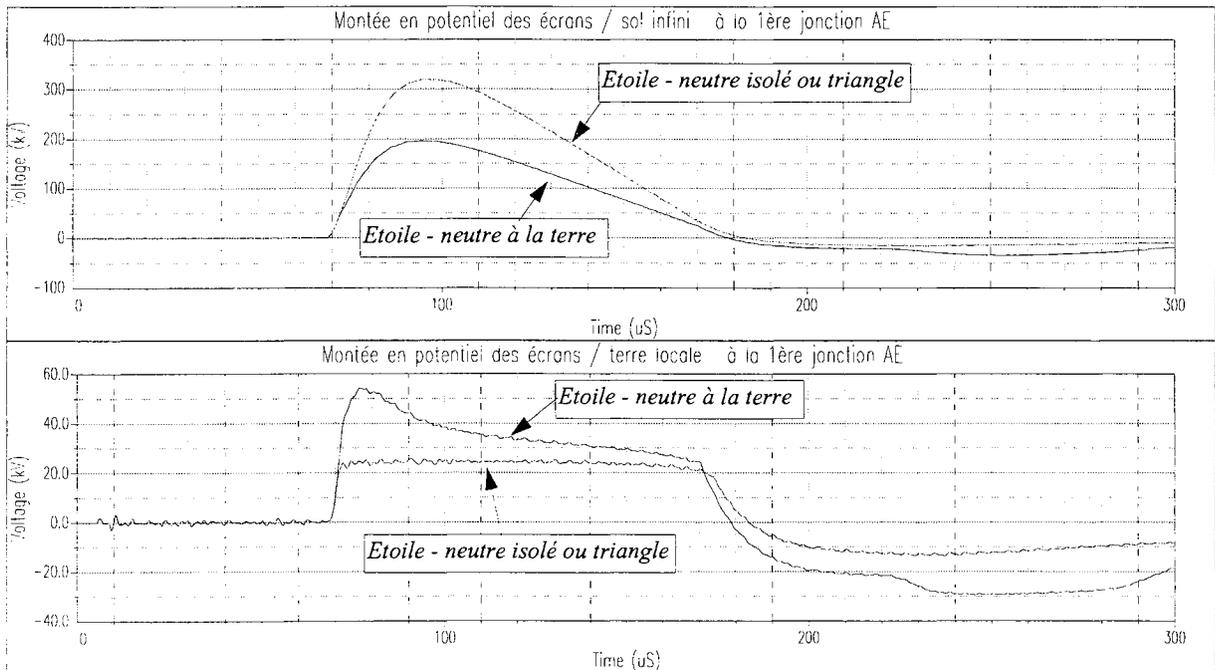


Figure 9.10 Montée en potentiel maximale des écrans aux jonctions à arrêt d'écran
en fonction du mode de couplage des parafoudres de gaine. Foudroiement du câble de garde

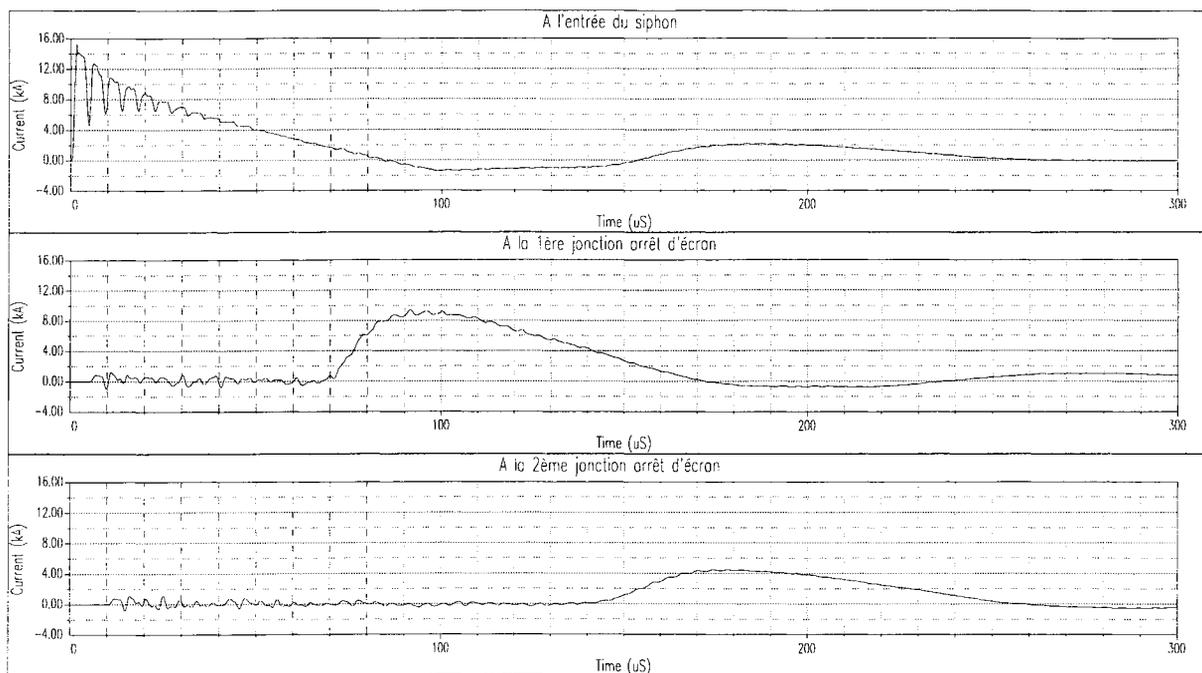


Figure 9.11 Courant dans les écrans.
 (Parafoudres de gaine montés en étoile - neutre à la terre. Foudroiement du câble de garde)

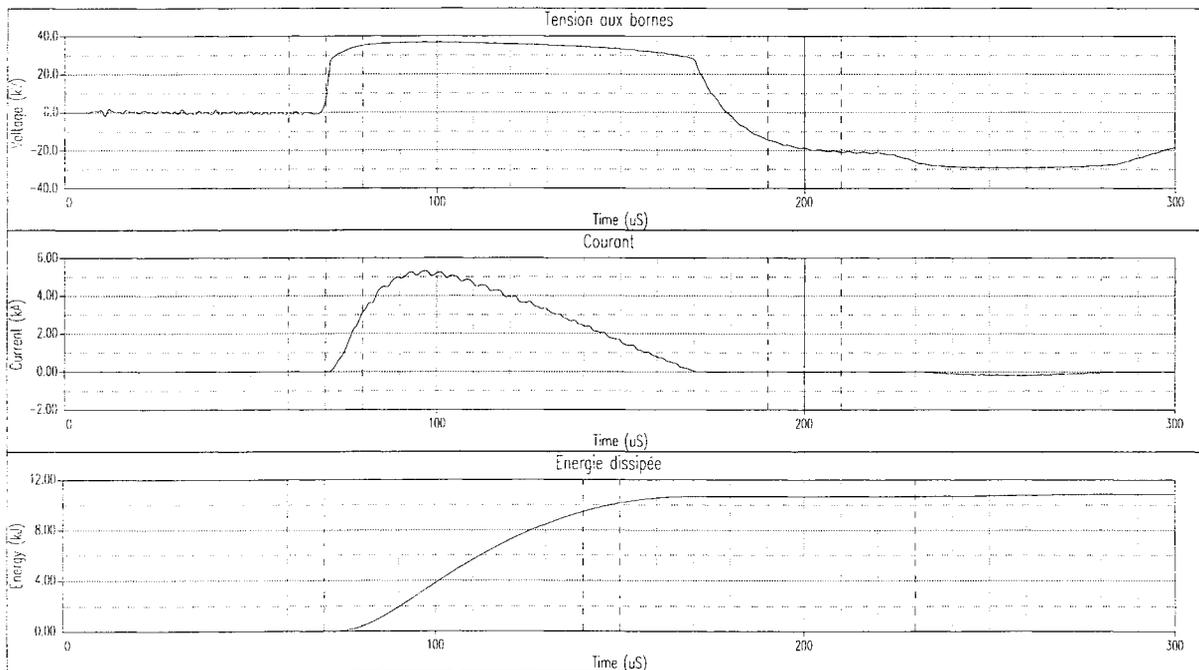


Figure 9.12 Parafoudres de gaine à la 1^{ère} jonction à arrêt d'écran
 (Parafoudres de gaine montés en étoile - neutre à la terre. Foudroiement du câble de garde)

4 - ETUDE DE SENSIBILITE DE DIFFERENTS PARAMETRES.

Lors de l'étude des deux paragraphes précédents, on a obtenu des conclusions intéressantes sur le mode de couplage des parafoudres de gaine selon le type de foudroiement (du conducteur de phase ou du câble de garde). On rappelle ici deux points essentiels :

a) pour le **foudroiement du conducteur de phase (CDP)**, les modes de couplage les plus sensibles (les contraintes les plus sévères) sont ceux en **étoile neutre isolé ou en triangle**. Pour ces modes de couplage des limiteurs de surtension, les contraintes sont aussi plus grandes que celles résultant d'un foudroiement du câble de garde.

b) pour le **foudroiement du câble de garde (CDG)**, les contraintes les plus élevées sont enregistrées avec le couplage **étoile neutre à la terre**. Pour ce mode de couplage des limiteurs de surtension, elles sont plus contraignantes que celles dues au foudroiement du conducteur de phase.

C'est la raison pour laquelle on étudie dans ce paragraphe l'influence de différents paramètres tel que

- la longueur des sections élémentaires
- le niveau de protection des limiteurs de surtension de gaine
- la longueur des câbles de connexions écrans - parafoudres

seulement pour ces deux configurations comme le montre le tableau ci - dessous (pour chaque variante, les autres paramètres prennent les valeurs de la configuration typique).

Tableau 9.3 : Sensibilité des différents paramètres

Paramètres		Section élémentaire			Niveau protection		Connexions E - P	
Configuration / Variantes		500 m	1000 m	2000 m	6 kV	15 kV	6 m	14 m
CDP Y_isolé ou Δ	Vg (kV)	42	41.6	41	27	46	38	43.7
	Vpf. de gaine (kV)	34	33.7	33	18	40	33.7	33.9
	lpf. de gaine (kV)	2	1.92	1.7	5	0.8	1.87	2.03
	Wpf. de gaine (kV)	4.9	5.04	5.1	6.8	4.4	5.06	5.03
CDG Y_terre	Vg (kV)	70	54.4	45	39	62	46.7	61.8
	Vpf. de gaine (kV)	37	36.8	36	18.5	46	36.8	36.8
	lpf. de gaine (kV)	6.2	5.32	4.3	5.7	5.2	5.34	5.31
	Wpf. de gaine (kV)	11.2	9.45	7.4	9.6	9.4	9.47	9.43

Les résultats de ce tableau montrent que :

- la surtension maximale sollicitant la gaine est très sensible à tous les paramètres étudiés dans le cas d'une connexion en étoile avec neutre à la terre.
- par contre, quand les parafoudres de gaine sont montés en étoile à neutre isolé ou en triangle, elle ne dépend pas de la longueur du siphon.
- on peut retenir des parafoudres de tension 15 kV (étoile) ou 30 kV (triangle).

Deux études supplémentaires, dont l'une sur une liaison comportant 2 sections ternaires de 3000 m en série et l'autre sur l'influence des éclateurs installés sur le réseau aérien, ont été également effectuées.

* La première montre que les contraintes les plus importantes sont enregistrées au point de permutation d'écrans le plus proche du point d'impact de la foudre et on obtient les mêmes résultats que ceux du cas d'un seul tronçon souterrain de 3000 m présentés dans ce paragraphe.

* La deuxième porte seulement dans le cas du foudroiement du câble de garde (car les éclateurs ne se sont pas amorcés dans l'autre cas de foudroiement). La contrainte la plus modifiée est la tension entre écrans aux jonctions à arrêt d'écran. Cependant, pour ce type de foudroiement, cette variable est négligeable devant la tenue normalisée des matériels. Les autres résultats restent à quelque pourcents près.

5 - EVALUATION DE LA SURTENSION DE GAINÉ AU 1^{ER} POINT DE PERMUTATION.

5 - 1 - COURANT DANS LES ECRANS AU 1^{ER} POINT DE PERMUTATION.

En régime homopolaire, les courants et les tensions sont de la forme (d'après les expressions des matrices de transformation modale en courant et en tension données au chapitre 7):

$$I \approx \begin{bmatrix} 0 \\ 0,57 \\ 0 \\ 0,57 \\ 0 \\ 0,57 \end{bmatrix} \cdot i_m \qquad V \approx \begin{bmatrix} 0,57 \\ 0,57 \\ 0,57 \\ 0,57 \\ 0,57 \\ 0,57 \end{bmatrix} \cdot v_m$$

Par conséquent, les impédances apparentes des écrans et du conducteur de terre peuvent être déduites de l'impédance homopolaire :

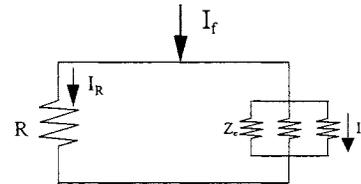
$$Z_e = \frac{0,57}{0,57} \cdot Z_{cmh} = Z_{cmh}$$

Foudroiemnt du câble de garde.

A partir du schéma simplifié ci-contre déduit de la figure 9.1 au niveau de l'entrée du siphon, on peut écrire :

$$I_e = \frac{R}{Z_e + 3.R} \cdot I_f$$

Où : R : résistance de la prise de terre à l'extrémité du siphon.
 Z_e : Impédance apparente de l'écran des câbles.
 I_f : Courant au point d'impact vers la droite.



L'impédance apparente de l'écran étant de l'ordre de 40Ω et pour une prise de terre de 10 Ω, on obtient un courant dans l'écran (à l'entrée du siphon) de l'ordre de 14 kA avec un courant de foudre de l'ordre de 100 kA .

Le courant dans les écrans au 1^{er} point de permutation d'écrans est donné par :

$$I_e' = e^{-\gamma \cdot L_{SE}} \cdot I_e$$

Avec L_{SE} : longueur d'une section élémentaire,
 γ : constante de propagation du mode homopolaire de l'ordre de 0.4 (cf. chapitre 7).

Le courant dans les parafoudres de gainé étant égal à la moitié de celui dans les écrans $\rightarrow I_e/2$.

Foudroiemnt du câble de phase.

On peut en première approximation considérer que le courant dans les écrans est le courant « de retour » du courant injecté dans l'âme. Celui-ci est la composante transmise de l'onde incidente. En considérant une impédance caractéristique de 300 Ohms pour la ligne et de 30 Ohms pour le câble, $I = 9$ kA.

Au 1^{er} point de permutation d'écrans, la moitié de ce courant parcourt dans le câble coaxial de connexion écran - parafoudre. Et donc on obtient un courant dans les parafoudres étant égale à un quart du courant injecté dans l'âme (9/4 kA).

5 - 2 - SURTENSION DE GAINÉ AU 1^{ER} POINT DE PERMUTATION D'ÉCRANS.

On rappelle la formule permettant d'évaluer la surtension de gainé proposée au chapitre 8 (§5), également suggérée par d'autres auteurs sous des formes similaires pour le cas de la permutation d'écran [40 - 41] :

$$V_g = U_R(I) + L \cdot \ell \cdot \frac{I_{max}}{1,2}$$

- où $U_R(I)$: Tension résiduelle des parafoudres de gainé pour le courant I.
- L : Inductance des câbles coaxiaux de liaison écrans - parafoudres (~ 0,24 µH/m)
- ℓ : Longueur des câbles coaxiaux de liaison écrans - parafoudres

Selon les cas différents de foudroisement, elle devient :

Foudroisement du câble de garde : $V_g = U_R \left(\frac{I'_e}{2} \right) + L \cdot \ell \cdot \frac{I'_e}{1,2}$

Foudroisement du câble de phase : $V_g = U_R \left(\frac{I_{injecté}}{4} \right) + L \cdot \ell \cdot \frac{I_{injecté}}{1,2}$

Le tableau ci-dessous présente des calculs de surtensions de gainé selon plusieurs configurations grâce à ces deux formules. La colonne colorée représente du cas référence (longueur de la section élémentaire 1000m, tension assignée des parafoudres de gainé 12 kV et les câbles de connexion écrans - parafoudres 10 m)
Les résultats de calcul obtenus montrent une bonne approximation.

Tableau 9.4 : Erreur commise en approximant les surtensions à l'aide des formules.

		Section élémentaire			Vas parafoudres		Connexion E-P	
		500 m	1000 m	2000 m	6 kV	15 kV	6 m	14 m
CDG	Vg exacte	70	54	45	39	62	47	62
	$U_R(I'_e/2) + L \cdot \ell \cdot \frac{I'_e}{1,2}$	60	55	47	37	64	47	63
		-13.8%	1.2%	6%	-4.6%	2.6%	1.6%	1.1%
CDP	Vg exacte	42	42	41	27	46	38	44
	$U_R(2,25) + L \cdot \ell \cdot \frac{4,5}{1,2}$	43	43	43	26	51	39	46
		1.7%	2.6%	5.2%	-3.8%	11.3%	2.8%	5.8%

A partir des relations permettant d'évaluer les surtensions de gainé, on peut également déterminer en fonction de la longueur des sections élémentaires, la longueur maximale possible des câbles de connexion écrans - parafoudres pour ne pas dépasser la tenue de gainé 50 kV crête dans les cas de foudroisement du câble de garde.

$$\ell_{max} = \frac{50 - U_R \left(\frac{I'_e}{2} \right)}{L \cdot I'_e} \cdot 1,2$$

Parafoudres de gainé	Section élémentaire [m]	Connexion E - P [m]
$V_{as} = 12 \text{ kV}$	800	6.6
	1000	7.3
	1200	8.1
	1500	9.5
	2000	12.1
$V_{as} = 15 \text{ kV}$	2000	5.3

Les valeurs trouvées ici sont en bon accord avec celles résultant d'un calcul précis indiquées dans la conclusion.

6 - CONCLUSION.

En cas de foudroisement de la partie aérienne du siphon, les jonctions à arrêt d'écran et la gaine des câbles au niveau des permutations d'écran sont soumises à des surtensions transitoires. Les contraintes les plus sévères sont enregistrées au 1^{er} point de permutation de la liaisons souterraine (le point le plus proche du point d'impact de la foudre).

Les surtensions sollicitant la gaine des câbles et le revêtement des jonctions sont les montées en potentiel des écrans par rapport à la terre locale.

Dans le cas du **foudroisement du conducteur de phase** la surtension maximale est atteinte dès l'arrivée de l'onde qui se propage dans l'isolation. Elle dépend peu de la résistance des prises de terre, du mode de couplage des parafoudres et de la longueur des sections élémentaires.

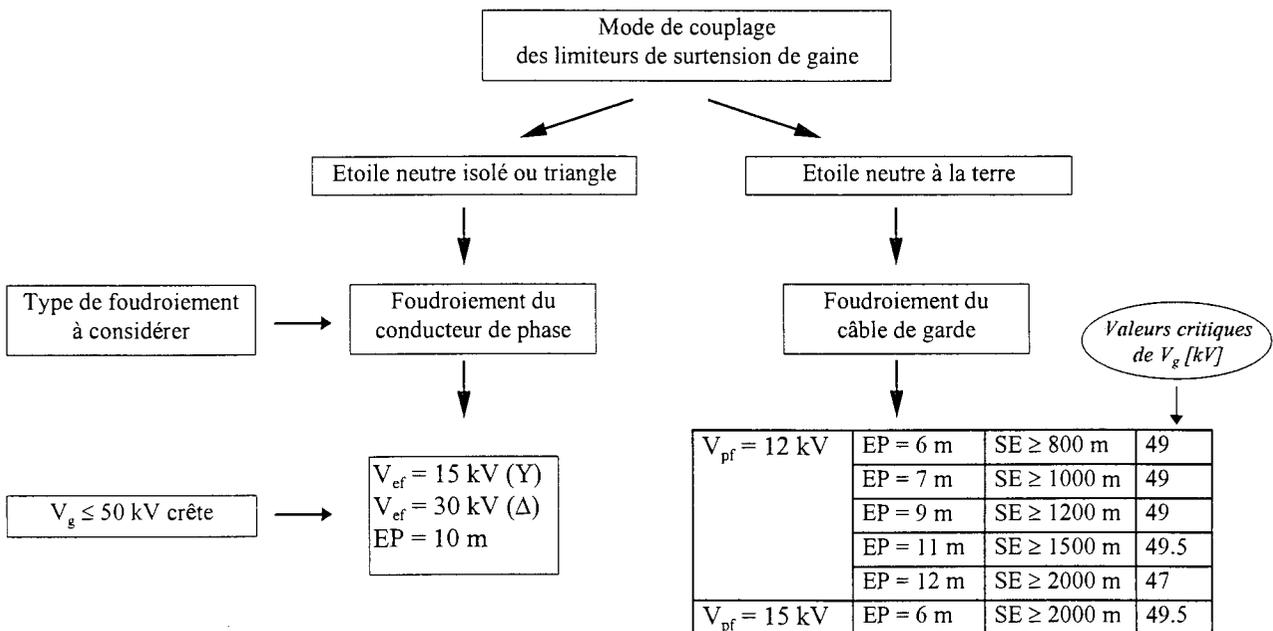
Dans le cas du **foudroisement du câble de garde**, la surtension est liée à la propagation dans le sol de l'onde homopolaire. Comme cette propagation se fait avec une forte atténuation, la surtension sollicitant la gaine diminue lorsque la longueur des sections élémentaires augmente. Autrement dit, on risque d'avoir des surtensions assez élevées quand les sections élémentaires sont courtes.

Dans la configuration typique, pour les couplages **étoile neutre isolé ou triangle**, les contraintes les plus sévères sont obtenues dans le cas du **foudroisement d'un conducteur de phase**, alors que, pour le couplage **étoile neutre à la terre**, les contraintes les plus sévères sont obtenues dans le cas du **foudroisement du câble de garde**. Dans tous les cas, l'énergie dissipée dans les parafoudres demeure à un niveau modéré.

Dans le cas du foudroisement du câble de garde, les surtensions entre écrans sont très faibles; dans le cas du foudroisement d'un câble de phase, elles sont inférieures à 2 fois la surtension sollicitant le revêtement des jonctions, quel que soit le mode de connexion des limiteurs de surtension.

Ces conclusions sont valables, quelle que soit la position du point d'impact de la foudre.

Les formules simples établies dans le paragraphe §5 donnent une assez bonne approximation des surtensions.



- où :
- V_g : Surtension maximale sollicitant la gaine des câbles
 - V_{pf} : Tension assignée des parafoudres de gaine (niveau de protection)
 - SE : Longueur des sections élémentaires
 - EP : Longueur des connexions écrans - parafoudres de gaine.

Chapitre 10

CONTRAINTES TRANSITOIRES DANS LES LIAISON DOUBLES 400 KV

1 - INTRODUCTION.....	95
2 - MISE A LA TERRE EN UN POINT.....	96
3 - PERMUTATION DES ECRANS	98
4- CONCLUSIONS	100

1 - INTRODUCTION

Pour compléter l'étude des régimes transitoires des liaisons souterraines à connexions spéciales d'écran, ce chapitre est consacré à une étude des liaisons souterraines doubles.

Ces liaisons doubles sont nécessaires au transit des très fortes puissances du réseau 400 kV. Par conséquent, on s'intéresse dans ce chapitre aux siphons 400 kV, utilisant la technique de la mise à la terre en un point ou de permutation des écrans. Les caractéristiques de la *configuration typique* retenue sont les suivantes :

Caractéristiques communes

- * la partie aérienne du réseau est du type 4 ASTER 570 mm², équipé 2 câbles de garde (2 Phlox 147). Elle est de 75 km de chaque côté du siphon et des éclateurs 1290 kV sont installés sur les chaînes d'isolateur.

- * la partie souterraine est constitué de 2 circuits de câbles à âme en cuivre de section 1600 m² posé en trèfle. Les deux circuits sont posés dans le sol d'une manière parfaitement symétrique (cf chapitre 6). Ce qui permet d'étudier les contraintes affectant les liaisons souterraines pour un seul circuit.

- * l'isolation principale des câbles est protégée par des parafoudres de type ZNO-850 kV montés en étoile aux extrémités du siphon.

- * la résistance des prises de terre est égale à 20 ohms (réseau), et 10 ohms (extrémités du siphon ou neutres des parafoudres de gaine).

- * les extrémités des câbles sont placées au sol. La dernière portée aérienne, avant le passage aérosouterrain est raccourcie à 50 m (cf. figure ci-dessous).

- * le point d'impact de la foudre est situé à la 1^{ère} portée aérienne (30m de la jonction ligne - câble) à gauche du siphon. L'amplitude des coups de foudres est considérée comme dans les chapitres précédents.

Paramètres différents

- * la tension assignée des limiteurs de surtension est de 10 kV pour la mise à la terre en un point, ils ont montés en étoile neutre à la terre. Alors qu'ils sont de 12 kV (étoile) ou 24 kV (triangle) pour la permutation des écrans.

- * la longueur du siphon est de 1200 m pour la mise à la terre en un point et 3000 m pour la permutation d'écran.

- * les câbles de connexion écran - parafoudres ont une longueur de 2 m pour la mise à la terre en un point et de 10 m pour la permutation d'écran.

Dans chaque paragraphe, les résultats sont comparés avec ceux obtenus pour les liaisons seules 225 kV étudiées dans les deux derniers chapitres. Ensuite, une étude de sensibilité des paramètres tels que : la longueur des connexion écrans - parafoudres et du siphon, la résistance des prises de terre, le niveau de protection des limiteurs de surtension, la position du point d'impact de la foudres, a été traitée pour la configuration considérée la plus défavorable.

Enfin, une conclusion générale est présentée.

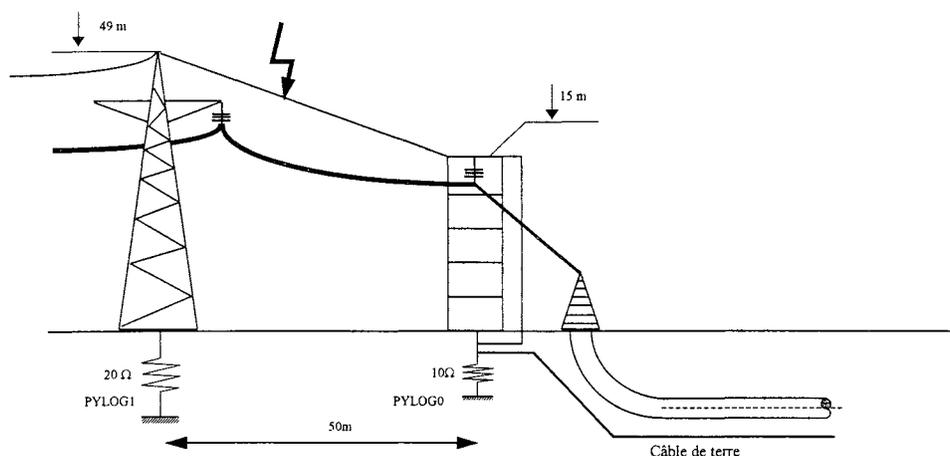


Figure 10.1 Passage aéro-souterrain d'un siphon 400 kV avec MALT1

2 - MISE A LA TERRE EN UN POINT

L'allure des contraintes n'est pas sensiblement modifiée par rapport au cas des liaisons seules 225 kV étudié dans le chapitre 8. Le tableau ci-dessous donne les contraintes maximales à l'entrée du siphon : montée en potentiel de la terre locale (V_{terre}) et de l'écran ($V_{\text{écran}}$), tension entre écran et le conducteur de terre (V_{et}), courant (I_{pf}) et énergie dissipée (W_{pf}) dans les parafoudres de gaine.

Dans le cas du foudroiement du câble de phase (CDP), les éclateurs ne s'amorcent pas. La présence de la deuxième liaison souterraine diminue les contraintes.

Dans le cas du foudroiement du câble de garde (CDG), les éclateurs s'amorcent. Les ondes à travers des éclateurs du pylône 1 (PYLOG1) se propageant dans les conducteurs de phase vers le siphon. Le retour des courants injectés dans les âmes à travers les parafoudres de gaine et les câbles de connexion écrans - parafoudres provoque des surtensions élevées sollicitant la gaine des câbles (cf. fig 10.2)

	CDP		CDG	
	225 kV seule	400 kV double	225 kV seule	400 kV double
V_{terre}	51	33	572	345
$V_{\text{écran}}$	87	64	531	322
V_{et}	41	33	57	57
V_{pf}	31	29	34	31
I_{pf}	6	2.4	13	5
W_{pf}	3	2.6	14	7

Les contraintes dans ce dernier cas sont plus sévères. On le choisit donc pour une étude de sensibilité des paramètres telles que :

- la longueur des câbles de connexions écran - parafoudre,
- la résistance des prises de terre aux extrémités du siphon,
- la tension assignée des limiteurs de surtension,
- et la position du point d'impact de la foudre (50m et 150 m correspondent au sommet du pylône 1 et à la 2^{ème} portée aérienne respectivement).

Pour chaque variante, les autres paramètres sont ceux de la configuration typique. Le tableau suivant résume les résultats obtenus.

	Connexion E-P			Prise de terre		Niveau protection		Point d'impact	
	2m	4m	8m	1 Ω	5 Ω	12 kV	15 kV	50m	150m
V_{et}	57	69.6	87.9	51.8	52.1	62.4	71.1	92.2	45.6
V_{pf}	31	30.4	30.4	28.4	30.0	36.4	45.3	31.5	31.2
I_{pf}	5	5.0	4.9	2.1	4.2	4.9	4.6	6.8	6.3
W_{pf}	7	7.2	7.2	1.3	5.0	8.5	10.2	6.5	5.8

On constate une certaine cohérence par rapport à l'étude des liaisons seules 225 kV effectuée précédemment :

* plus les câbles de connexion écrans - parafoudres sont longues plus la tension entre écran et conducteur de terre est élevée. De même cette tension croît avec la tension assignée des limiteurs de surtension.

* en revanche, la résistance des prises de terre et la position du point d'impact de la foudre ne présentent pas des effets similaires. La variation brusque des courants dans les âmes et dans les écrans des câbles provenant de l'amorçage des éclateurs, joue le rôle décisif. Il en résulte une surtension entre écran et conducteur de terre, du fait de l'inductance des câbles de connexion écrans - parafoudres comme le montrent les figures 10.2, 10.3 dans la page suivante.

Remarque : comme dans l'étude des liaisons seules, les contraintes diminuent sensiblement quand le point d'impact de la foudre se déplace de la 1^{ère} à la 2^{ème} portée aérienne (150m) par rapport à la jonction ligne - câble, le courant de foudre arrivant au niveau de l'aérosouterrain étant réduit du fait de l'écoulement à la terre par les pylônes en amont de l'aérosouterrain. Si le point d'impact se situe au 1^{er} pylône (50m par rapport à l'aérosouterrain), la surtension écran - conducteur de terre atteint 92 kV.

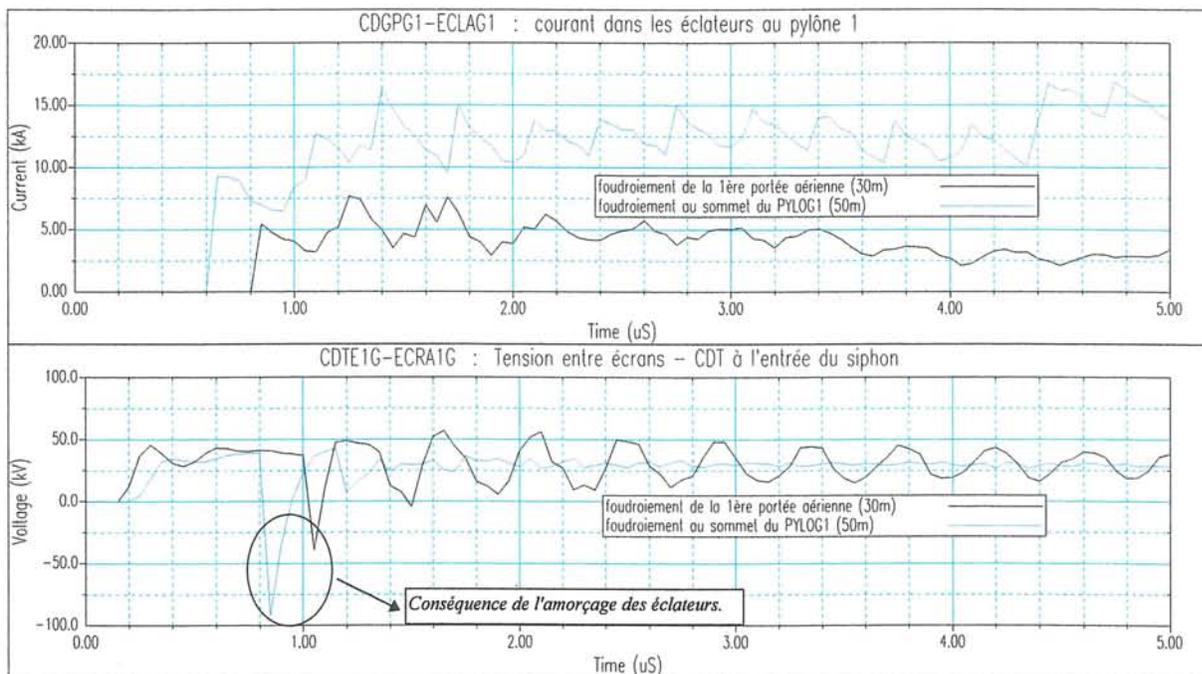


Figure 10.2 Courant dans les éclateurs du pylône 1 et tension entre écran - conducteur de terre selon différentes positions du point d'impact de la foudre.

Dans les deux cas, les éclateurs installés au pylône 1 s'amorcent. Cependant, il est clair que quand la foudre tombe sur la dernière portée aérienne (configuration typique), on obtient des courants dans les éclateurs inférieurs au cas du foudroiement directement sur le sommet du pylône. Cela se traduit par une grande différence de la tension entre écrans et conducteur de terre.

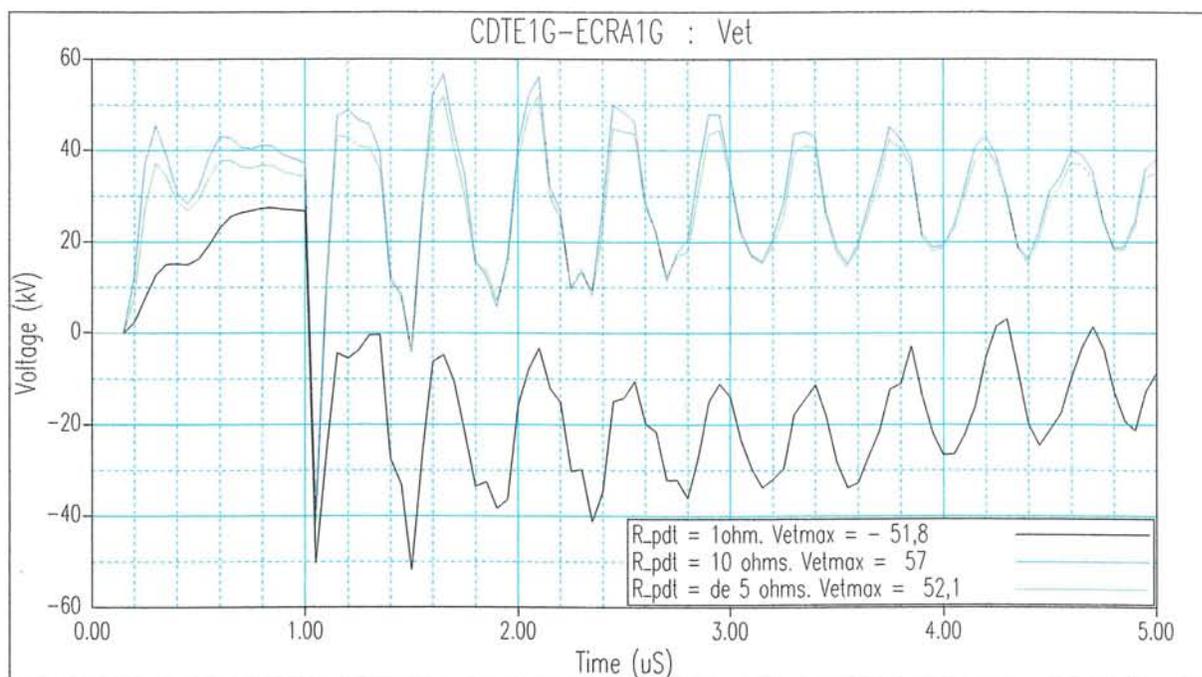


Figure 10.3 Tension Ecran - CDT selon les différentes résistances des prises de terre.

Les valeurs maximales de la tension entre écrans - conducteur de terre sont enregistrées après la première réflexion dans la boucle "conducteurs de phase - câble de garde" de la 1^{ère} portée aérienne. Elles ne sont pas sensibles à la résistance des prises de terre

3 - PERMUTATION DES ECRANS

Foudroiemnt du CDP.

Les éclateurs ne s'amorcent pas.

L'analyse des contraintes transitoires affectant les liaisons souterraines est donc similaire par rapport au cas des liaisons seules 225 kV.

On se limite à donner ici seulement des résultats en valeur maximale dans l'ordre de phases A, B, C, à la 1^{ère} jonctions à arrêt d'écran (JAE)

Concernant les parafoudres de phase, seul celui de la phase sollicitée s'amorce mais l'énergie dissipée est négligeable. Les parafoudres de gaine ne s'amorcent que quand ils sont montés en étoile neutre à la terre. Les surtensions sollicitant la gaine (Vg) sont voisines, elles sont légèrement supérieures quand les parafoudres de gaine sont montés en étoile neutre à la terre.

Foudroiemnt du CDG.

Les trois phases sont soumises à des contraintes similaires et la propagation de la composante homopolaire avec une forte atténuation est prépondérante.

On se limite donc à donner des résultats pour une seule phase, à l'entrée du siphon (*) et à la 1^{ère} jonctions à arrêt d'écran (JAE).

Les parafoudres de phase ne s'amorcent pas. En revanche, les éclateurs se mettent en fonctionnement. Ce qui conduit à des tensions entre écrans au niveau des arrêts d'écran (Vae) plus élevées. Cependant ces valeurs sont encore loin de la tenue normalisée des matériels. Les parafoudres de gaine s'amorcent dans tous les cas et la surtension maximale sollicitant la gaine des câbles (Vg) est atteinte pour le montage étoile neutre à la terre.

D'une manière générale, par rapport au cas des liaisons seules 225 kV, les contraintes sont en général diminuées (à l'exception des tensions entre écrans pour le foudroiemnt du câble de garde).

La surtension maximale sollicitant la gaine des câbles (Vg) est atteinte quand les parafoudres de gaine sont montés en étoile avec neutre à la terre et dans le cas d'un foudroiemnt du câble de garde.

Dans ce contexte, on propose une étude de sensibilité des paramètres dont les résultats sont résumés dans le tableau suivant (pour chaque variante, les autres paramètres sont ceux de la configuration typique).

Tableau 10.3 : Foudroiemnt du CDP - liaisons simple et double

		Liaisons seules 225 kV			Liaisons doubles 400 kV		
Parafoudres de gaine		Y_terre	Y_isolé	Δ	Y_terre	Y_isolé	Δ
V_parafoudre de gaine (kV)	A	29.3	32.5	65.0	25.1	25.9	51.8
	B	33.8	33.7	51.7	28.6	26.7	49.3
	C	33.9	33.7	67.5	29.6	26.7	53.4
I_parafoudre de gaine (kA)	A	0.22	1.2	1.20	0.00	pas d'amorçage	
	B	1.97	1.92	0.00	0.11		
	C	2.03	1.92	1.92	0.28		
W_parafoudre de gaine (kJ)	A	0.02	0.165	0.33	0.00		
	B	1.06	0.884	0.00	0.03		
	C	2.60	1.05	1.77	0.11		
Ve (kV)	A	54.1	70.7		33.6	35.9	
Vae (kV)	A	72.1	72.1		53.5	53.7	
Vg (kV)	A	39.1	41.6		30.2	28.5	
Ie à l'entrée du siphon (kA)		7.93			3.9		
Ie à la 1 ^{ère} JAE (kA)		5.04			2.7		

Tableau 10.4 : Foudroiemnt du CDG - liaisons simple et double

		Liaisons seules 225 kV		Liaisons doubles 400 kV	
Parafoudre de gaine		Y_terre	Y_isolé / Δ	Y_terre	Y_isolé / Δ
Ve (kV)	(*)	576	576	347	347
	1 ^{ère} JAE	197	320	147	196
Vae (kV)	1 ^{ère} JAE	5.11	5.11	25.8	25.8
Ie (kA)	(*)	15.3	15.3	5.9	5.9
	1 ^{ère} JAE	9.45	6.90	3.87	3.3
V_pf (kV)	1 ^{ère} JAE	36.8	pas	35.4	pas
I_pf (kA)		5.32	d'amor-	3.5	d'amor-
W_pf (kJ)		10.7	-çage	5.9	-çage
Vg (kV)	1 ^{ère} JAE	54.4	25	38.5	24.3

Tableau 10.5 : Influence des différents paramètres

Paramètres	Section élémentaire			Niveau protection		Connexions E - P		Impact
	500 m	1000 m	2000 m	15 kV	18 kV	6 m	14 m	50 m
Vg (kV)	43.0	38.5	34.7	46.3	53.9	36.2	40.4	40.4
Vpf. de gaine (kV)	35.8	35.4	34.2	44.1	52.7	35.4	35.5	35.5
lpf. de gaine (kV)	3.9	3.5	2.3	3.3	3.1	3.5	3.5	3.6
Wpf. de gaine (kV)	6.2	5.9	4.2	6.8	7.5	5.9	5.9	4.9

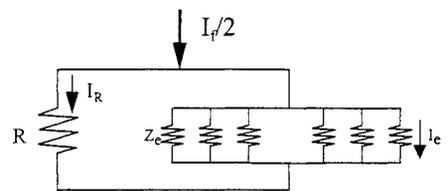
Dans tous les cas traités, la surtension sollicitant la gaine des câbles ne dépasse pas la spécification de la tenue des matériels qui est normalisée aujourd'hui à 62.5 kV crête, et l'énergie dissipée dans les parafoudres ne dépassent pas la limite des constructeurs qui est de l'ordre de 1kJ / kV.

Ci-après, on s'intéresse à établir des formules simples permettant évaluer la surtension de gaine au 1^{er} point de permutation des écrans. Comme les éclateurs installés au pylône 1 s'amorcent, on ne peut pas calculer les coefficient de réflexion et de transmission, cependant, en première approximation, on considère que le courant de foudre se répartit également de part et d'autre du point d'impact.

A partir du schéma simplifié au niveau de l'entrée du siphon, on peut écrire :

$$I_e = \frac{R}{Z_c + 6.R} \cdot \left(\frac{I_f}{2} \right)$$

- Où :
- R : Résistance de la prise de terre à l'extrémité du siphon.
 - Z_c : Impédance apparente de l'écran des câbles.
 - I_f/2 : Courant au point d'impact vers la droite .



L'impédance apparente de l'écran étant de l'ordre de 40Ω et pour une prise de terre de 10 Ω, on obtient un courant dans l'écran (à l'entrée du siphon) de l'ordre de 5 kA avec un courant de foudre de l'ordre de 100 kA .

Le courant dans les écrans au 1^{er} point de permutation d'écrans est donné par :

$$I'_e = e^{-\gamma \cdot L_{SE}} \cdot I_e$$

- Avec
- L_{SE} : longueur d'une section élémentaire,
 - γ : constante de propagation du mode homopolaire de l'ordre de 0.4 (cf. chapitre 7).

Le courant dans les parafoudres de gaine étant égale à la moitié de celui dans les écrans → I'e/2.

La surtension maximale sollicitant la gaine des câble au 1^{er} point de permutation des écrans s'écrit donc :

$$V_g = U_R \left(\frac{I'_e}{2} \right) + L \cdot \ell \cdot \frac{I'_e}{1,2}$$

- où
- U_R(I'e/2) : Tension résiduelle des parafoudres de gaine pour le courant I'e/2.
 - L : Inductance des câbles coaxiaux de liaison écrans - parafoudres (~ 0,24 μH/m)
 - ℓ : Longueur des câbles coaxiaux de liaison écrans - parafoudres

Tableau 10.6 : Erreur commise en approximant les surtensions de gaine

Paramètres	Section élémentaire			Niveau protection		Connexions E - P	
	500 m	1000 m	2000 m	15 kV	18 kV	6 m	14 m
Vg exact	43.0	38.5	34.7	46.3	53.9	36.2	40.4
$U_R(I'_e/2) + L \cdot \ell \cdot \frac{I'_e}{1,2}$	41.61	39.64	36.67	47.88	56.11	36.96	42.32
	-3.24%	2.97%	5.68%	3.41%	4.10%	2.10%	4.76%

Les résultats montrent une assez bonne précision.

4- CONCLUSIONS

Comparaison avec les liaisons simples 225 kV.

Les liaisons doubles présentent un meilleur comportement vis à vis des contraintes transitoires que les liaisons simples :

* dans le cas du foudroiement du conducteur de phase, les éclateurs ne s'amorcent pas, on obtient des résultats similaires avec une sensible diminution des contraintes.

* dans le cas du foudroiement du câble de garde les surtensions de gaine sont sensiblement réduites pour les liaisons à permutation d'écran avec connexion des parafoudres en étoile à neutre à la terre ; dans les autres cas, elles sont comparables.

Foudroiement le plus contraignant.

Dans le cas de la mise à la terre en un point, le foudroiement du câble de garde est le plus défavorable pour la configuration typique.

En ce qui concerne la permutation des écrans, quand les parafoudres de gaine sont montés en étoile à neutre isolé ou en triangle, ils ne s'amorcent pas : les contraintes sont faibles pour les deux types de foudroiement. Quand le neutre est à la terre, le foudroiement du câble de garde est plus contraignant que le foudroiement d'un conducteur de phase.

Influence de la position du point d'impact de la foudre.

Quand le point d'impact de la foudre se situe au niveau du pylône 1 (à 50 m en amont de l'aérosouterrain), la propagation des ondes provenant de l'amorçage des éclateurs produit des montées en potentiel très sévères dans les liaisons souterraines utilisant la technique de mise à la terre en un point, mais pas dans le cas des liaisons à permutation d'écran. Dans celles-ci, on a une augmentation sensible des surtensions entre écrans, qui, toutefois, demeurent nettement inférieures à la tenue des arrêts d'écran.

Les deux tableaux suivants précisent la surtension maximale sollicitant la gaine des câbles selon la technique de mise à la terre des écrans en fonction de la localisation du point d'impact de la foudre sur le câble de garde pour différentes valeurs de la tension assignée des parafoudres, de la résistance de la prise de terre ou de la longueur des connexions écran - parafoudres.

point d'impact de la foudre	Configurations		Vet
	V_pf (kV)	R (Ohms)	(kV)
pylône 1	10	10	92
1 ^{ère} portée aérienne	10	10	57
	12	10	62,4
	15	4	62,5

point d'impact de la foudre	Configurations		Vg
	V_pf (kV)	Câbles EP	(kV)
pylône 1	12	10 m	40
1 ^{ère} portée aérienne	18	14 m	58
	12	10 m	38

(*) les contraintes diminuent avec la longueur de la section

Mise à la terre en un point.

Les surtensions de gaine sont très élevées dans le cas où la foudre tombe directement sur le 1^o pylône en amont de l'aérosouterrain. Si le point d'impact se situe sur la 1^o portée aérienne, on peut obtenir des contraintes acceptables avec un parafoudre de tension 12 kV, voire 15 kV sous réserve de diminuer la résistance de terre à une valeur inférieure à 4 Ohms.

Permutation des écrans.

Si l'on retient un parafoudre de tension assignée 15 kV en étoile (neutre isolé ou à la terre) ou 30 kV en triangle, les contraintes sont nettement inférieures, dans tous les cas, aux tenues des matériels.

On peut même envisager d'utiliser des parafoudres de tension assignée supérieure.

SYNTHESE

Chapitre 11

REGLES DE DIMENSIONNEMENT

1 - INTRODUCTION.....	101
2 - GENERALITES.....	101
2 - 1 - CHOIX DU PARAFONDRE.....	101
2 - 2 - DÉTERMINATION DE LA LONGUEUR DES SECTIONS ÉLÉMENTAIRES EN FONCTION DES CONTRAINTES DU RÉGIME DE DÉFAUT TRIPHASÉ.....	102
2 - 3 - DÉTERMINATION DE LA LONGUEUR DES SECTIONS ÉLÉMENTAIRES EN FONCTION DES CONTRAINTES DU RÉGIME DE DÉFAUT MONOPHASÉ EXTERNE.....	102
2 - 4 - PRISE EN COMPTE DES CONTRAINTES DU RÉGIME DE DÉFAUT MONOPHASÉ INTERNE.....	103
3 - DIMENSIONNEMENT DE LA MISE A LA TERRE EN UN POINT.....	103
3 - 1 - CHOIX DU PARAFONDRE.....	103
3 - 2 - DÉTERMINATION DE LA LONGUEUR DES SECTIONS ÉLÉMENTAIRES EN FONCTION DES CONTRAINTES DU RÉGIME DE DÉFAUT TRIPHASÉ.....	104
3 - 3 - PRISE EN COMPTE DES CONTRAINTES DU RÉGIME DE DÉFAUT MONOPHASÉ.....	104
4 - DIMENSIONNEMENT DE LA PERMUTATION D'ECRAN.....	105
4 - 1 - CHOIX DU PARAFONDRE.....	105
4 - 2 - DÉTERMINATION DE LA LONGUEUR DES SECTIONS ÉLÉMENTAIRES EN FONCTION DES CONTRAINTES DU RÉGIME DE DÉFAUT TRIPHASE.....	105
4 - 3 - PRISE EN COMPTE DES CONTRAINTES DU RÉGIME DE DÉFAUT MONOPHASÉ.....	106
5 - LIAISONS DOUBLES.....	106
6 - APPLICATION.....	107
6 - 1 - LIAISONS À MISE À LA TERRE EN UN POINT.....	107
6 - 2 - LIAISONS A PERMUTATION DES ÉCRANS.....	109
7 - CONCLUSION	110

1 - INTRODUCTION

L'objectif de ce chapitre est de synthétiser les études menées sur les surtensions de gaine sollicitant les liaisons à connexions spéciales d'écran à la fois à la fréquence industrielle et en régime transitoire, pour en dégager des règles de dimensionnement.

La détermination précise des contraintes nécessite d'une part une description fine des liaisons et de leur environnement et d'autre part l'utilisation de logiciels parfois difficiles à maîtriser.

Par contre, on peut dégager des méthodes de calcul approché facilement accessibles aux maîtres d'oeuvres et donnant une précision généralement suffisante, au moins au stade de l'avant projet.

On présente succinctement la problématique générale de la conception des connexions spéciales d'écran, puis on explicite les règles de dimensionnement faisant appel à des formules de calcul approché pour le cas de la mise à la terre en un point et celui de la permutation d'écran. Enfin, on donne un exemple d'application.

2 - GENERALITES

La démarche à suivre pour dimensionner une liaison à connexions spéciales d'écran comprend 3 étapes :

- * la première consiste à choisir le type de parafoudre à mettre en œuvre pour protéger les matériels vis-à-vis des contraintes transitoires
- * la seconde porte sur la détermination de la longueur maximale possible des sections élémentaires en fonction des contraintes en défaut triphasé.
- * la dernière étape concerne la prise en compte des contraintes en défaut monophasé qui peut éventuellement amener à diminuer la longueur maximale possible des sections élémentaires.

2 - 1 - CHOIX DU PARAFOUDRE

Le niveau de protection assuré par le parafoudre est d'autant meilleur que sa tension assignée est faible. Par contre, sa tenue aux contraintes à 50 Hz est d'autant plus élevée que sa tension assignée est grande.

On a en général intérêt à retenir le parafoudre ayant la plus forte tension assignée possible, compatible avec les tenues au choc de la gaine des câbles et des isolations secondaires des matériels de raccordement (revêtement des jonctions, isolation de l'embase des extrémités en mise à la terre en un point et arrêt d'écran des jonctions en permutation d'écran) [42 - 43].

Les surtensions affectant les matériels doivent être estimées dans le cas du foudroiement du câble de garde (avec un courant de foudre typique de 100 kA) et dans le cas du foudroiement d'un conducteur de phase (avec un courant de foudre typique de 10 kA) de la ligne aérienne à laquelle la liaison souterraine est connectée.

Elles peuvent être évaluées à l'aide de formules relativement simples en fonction de la tension assignée du parafoudre et de la longueur des câbles de liaison assurant la connexion du parafoudre.

La longueur des câbles de liaison doit évidemment être la plus courte possible. Les longueurs des câbles de liaison en général retenues sur la base de considérations pratiques d'installation sont de 2m en mise à la terre en un point et 10 m en permutation d'écrans.

Les contraintes liées au foudroiement du câble de garde dépendent de la résistance de la prise de terre de l'aérosouterrain et, dans certains cas, pour la permutation d'écran, de la longueur de la section élémentaire.

La résistance de la prise de terre de l'aérosouterrain dépend du type de prise de terre réalisé et on dispose d'une certaine latitude sur les résistances qui peuvent être obtenues.

Pour ce qui est du deuxième point, il faut noter que les surtensions décroissent lorsque la longueur de le section élémentaire croît. On pourra donc supposer initialement une longueur « raisonnable » de 1000 m.

Cette étape du dimensionnement aboutit donc à la sélection de plusieurs couples tension assignée du parafoudre - résistance de terre.

ASYMETRIE DU COURANT DE COURT-CIRCUIT

Dans la prise en compte des contraintes à la fréquence industrielle, il convient d'intégrer l'asymétrie du courant de court-circuit.

Celle-ci peut sensiblement accroître l'énergie que le parafoudre doit dissiper.

En régime de défaut triphasé les tensions sollicitant les parafoudres sont des tensions induites dans les écrans par les courants de phase. L'effet de l'asymétrie peut alors être négligé.

Par contre, en régime de défaut monophasé la composante homopolaire du courant de court-circuit qui revient par les écrans ou le conducteur de terre n'est pas "filtrée" par un couplage inductif. Il faut donc tenir compte de l'asymétrie des tensions sollicitant les parafoudres.

On a une relation entre la tension établie tolérable et la tension assignée de la forme : $k \cdot U_{as} = \chi \cdot V$
où χ est le coefficient d'asymétrie

En première approximation, on peut considérer que pour une asymétrie maximale, caractérisée par un coefficient d'asymétrie de 2, et pour une caractéristique tension-courant telle que celle donnée au chapitre 2, le facteur k peut être pris égal à 1,5 [44]

2 - 2 - DETERMINATION DE LA LONGUEUR DES SECTIONS ELEMENTAIRES EN FONCTION DES CONTRAINTES DU REGIME DE DEFAUT TRIPHASE.

Il est aisé de déterminer la longueur maximale des sections élémentaires en fonction de la tenue des matériels à la fréquence industrielle puisque, dans ce régime, les surtensions qui les sollicitent sont proportionnelles à la longueur des sections élémentaires, le coefficient de proportionnalité dépendant essentiellement du mode de pose, selon des formules de calcul simples établies dans les chapitres 3 et 4 pour les deux techniques de connexions spéciales d'écran.

2 - 3 - DETERMINATION DE LA LONGUEUR DES SECTIONS ELEMENTAIRES EN FONCTION DES CONTRAINTES DU REGIME DE DEFAUT MONOPHASE EXTERNE.

Quel que soit le type de connexion spéciale d'écran pratiqué, la montée en potentiel des écrans doit être limitée à une valeur au plus égale à la tenue de la gaine des câbles.

Cette montée en potentiel dépend essentiellement du courant de défaut monophasé maximal survenant pour des défauts au niveau des aérosouterrains (et également de la résistance des prises de terre).

On a établi au chapitre 5 une formule de calcul de la montée en potentiel de la prise de terre d'un aérosouterrain pour un siphon inséré à plusieurs kilomètres des postes :

$$V_p \approx \frac{Z_{as}}{2 + \frac{Z_{as}}{R_0}} \cdot \left(1 - \frac{M}{Z_p}\right) \cdot (I_{cc} + I'_{cc})$$

où Z_{as} est l'impédance d'un nombre infini de portées aériennes.
 Z_{as} peut être déterminée à l'aide de la formule suivante [45]:

$$Z_{as} = \sqrt{R \cdot z_p} \cdot e^{j\frac{\theta}{2}} + \frac{z_p}{2} \cdot e^{j\theta}$$

où R est la résistance des prises de terre, z_p est le module de l'impédance propre du câble de garde pour une portée et θ son argument.

Compte tenu des ordres de grandeur typiques des différents paramètres, une simplification supplémentaire est possible, lorsque la résistance des prises de terre est grande devant Z_{as} qui est de l'ordre 2 Ohms :

$$V_p \approx \frac{I_{cc1}}{2} \quad \text{où } I_{cc1} \text{ est le courant de défaut monophasé total.}$$

En théorie, ceci entraîne une condition sur la faisabilité même de la liaison.

En pratique il n'en est rien dès lors que la liaison se situe à plus de quelques kilomètres des postes, du fait de la rapide décroissance du courant de court-circuit avec la distance au poste.

La figure ci-dessous donne le courant de défaut monophasé au niveau d'un aérosouterrain en fonction de la distance au poste en amont, pour une intensité du courant de court-circuit au poste de 63 kA.

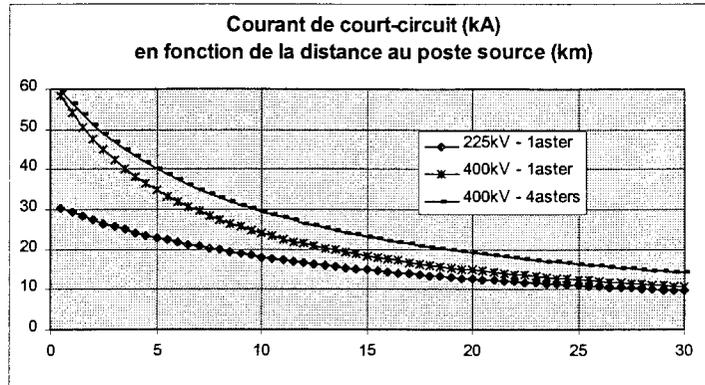


Figure 11.1 Décroissance du courant de court-circuit avec la distance au poste

Dans le cas de la mise à la terre en un point, les surtensions écran - conducteur de terre doivent aussi être limitées en fonction des tenues de l'isolation secondaire des extrémités et des parafoudres. Ces surtensions se calculent à l'aide de formules assez simples.

On constatera généralement que ce sont ces surtensions qui conditionnent la longueur maximale possible de la section élémentaire (les contraintes du régime triphasé s'avérant moins sévères).

2 - 4 - PRISE EN COMPTE DES CONTRAINTES DU RÉGIME DE DÉFAUT MONOPHASE INTERNE.

On peut adopter 3 points de vue différents :

- * tolérer des dégradations des matériels au voisinage du défaut et ne pas imposer de limitations des contraintes,
- * s'imposer de ne pas dépasser le niveau de tenue de la gaine des câbles,
- * refuser la destruction des parafoudres.

Limiter les montées en potentiel des écrans en fonction de la tenue de la gaine, comme pour le défaut externe introduit une limitation de la longueur de la section élémentaire.

En mise à la terre en un point, les surtensions écran - conducteur de terre peuvent dans certains cas introduire une limitation supplémentaire.

3 - DIMENSIONNEMENT DE LA MISE A LA TERRE EN UN POINT.

La gaine des câbles subit les montées en potentiel des écrans. L'isolation secondaire des extrémités et les parafoudres subissent les surtensions entre écrans et conducteur de terre.

3 - 1 - CHOIX DU PARAFOUDRE

$$U_R(I) \cdot \frac{U_{as}}{12} + L \cdot \ell \cdot \frac{I}{1,2} \leq U_g$$

Tension résiduelle pour le courant I

 $U_R(I) = 0,0025 \cdot I^3 - 0,099 \cdot I^2 + 1,64 \cdot I + 30,5 \text{ [kV]}$

Inductance du câble de liaison (0.9 μH/m)

Longueur du câble de liaison (m)

U_{as} : Tension assignée du parafoudre [kV]

Tenue au choc de la gaine et de l'isolation secondaire de l'extrémité [kV]

foudroiement câble de garde $I = \frac{R \cdot Z_t}{Z_c \cdot Z_t + R \cdot (Z_c + 3 \cdot Z_t)} * I_f$ avec $I_f = 100 \text{ kA}$ R : résistance de la prise de terre des aérosouterrains. $Z_c = 40 \Omega$: impédance caractéristique de l'écran; $Z_t = 80 \Omega$ (conducteur de terre)	foudroiement câble de phase : $I = 0,7 \cdot I_f$ avec $I_f = 10 \text{ kA}$
--	---

3 - 2 - DETERMINATION DE LA LONGUEUR DES SECTIONS ELEMENTAIRES EN FONCTION DES CONTRAINTES DU REGIME DE DEFAUT TRIPHASE.

$$\text{Min} (V_{is} ; 1,5.U_{as} ; V_g) \geq T_1 \cdot I_{cc3} \cdot \ell$$

T1	
Trèfle	Nappe
$\frac{\omega\mu}{2\pi} \cdot Ln \frac{S}{r_e}$	$\frac{\omega\mu}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left(Ln \frac{S}{2r_e} \right)^2 + \frac{3}{4} \cdot \left(Ln \frac{2S}{r_e} \right)^2}$

V_{is} étant la tenue de l'isolation secondaire des parafoudres

I_{cc3} étant le courant de court-circuit maximal traversant la liaison pour un défaut au niveau de l'un des aérosouterrains

3 - 3 - PRISE EN COMPTE DES CONTRAINTES DU REGIME DE DEFAUT MONOPHASE .

Le tableau de la page suivante donne pour les différents régimes de défaut les expressions des montées en potentiel des écrans E et des surtensions maximales entre écrans et conducteur de terre V_{et} dans le cas d'une liaison à mise à la terre à une extrémité.

Dans ce tableau, V_p désigne la montée en potentiel de la prise de terre de l'aérosouterrain côté écrans mis à la terre dans le 2° cas et côté écrans isolés dans les 2 autres cas.

Dans la pratique, on pourra adopter une valeur unique, celle correspondant à la montée en potentiel de la prise de terre de l'aérosouterrain pour lequel le courant de court-circuit total est le plus élevé, pour un défaut à son niveau.

Pour assurer la pérennité des matériels en cas de défaut, on doit remplir les conditions suivantes.

$$\text{Min} (V_{is} ; 1,5.U_{as}) \geq \chi \cdot V_{et} \qquad V_g \geq E$$

	E	V_{et}
Défaut externe au niveau de l'aérosouterrain côté écrans isolés	$\sqrt{[V_p - R_t I'_{cc} \ell]^2 + [Z_1 I'_{cc} \ell]^2}$	$\sqrt{R_t^2 + Z_1^2 \cdot \ell \cdot I'_{cc}}$
Défaut externe au niveau de l'aérosouterrain côté écrans mis à la terre	$\sqrt{V_p^2 + [Z_1 I'_{cc} \ell]^2}$	$\sqrt{R_t^2 + Z_1^2 \cdot \ell \cdot I_{cc}}$
Défaut interne (au niveau de l'aérosouterrain du côté où les écrans sont isolés)	$\sqrt{[V_p + R_c (I_{cc} + I'_{cc}) \ell]^2 + [Z_1 I'_{cc} \ell]^2}$	$\sqrt{(R_e + x \cdot R_t)^2 + (x \cdot Z_1)^2 \cdot \ell \cdot (I_{cc} + I'_{cc})}$ avec : $x = \frac{I_{cc}}{I_{cc} + I'_{cc}}$

Dans le cas d'une liaison à mise à la terre en un point milieu, il convient de prendre en compte les contraintes pour chacune des 2 sections élémentaires, ce qui revient, en pratique, à échanger I_{cc} et I'_{cc} dans les formules.

4 - DIMENSIONNEMENT DE LA PERMUTATION D'ECRAN.

La gaine des câbles et le revêtement des jonctions subissent les montées en potentiel des écrans.
Les arrêts d'écran des jonctions subissent les surtensions entre écrans.

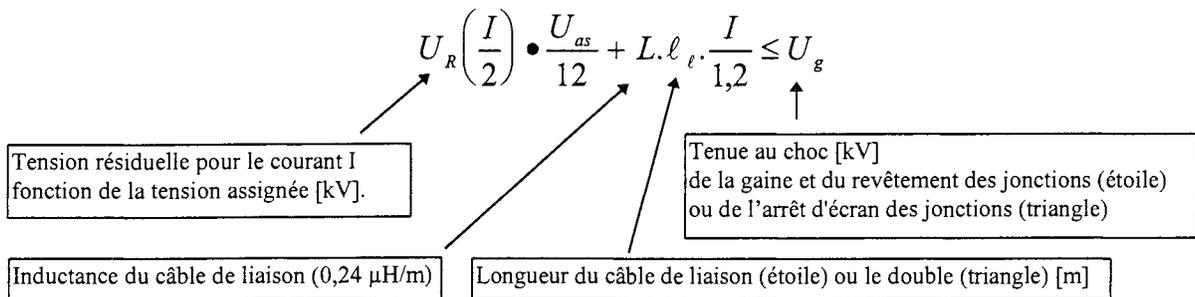
Les parafoudres subissent les montées en potentiel des écrans dans le cas d'une connexion en étoile à la terre, alors que, pour une connexion en étoile à neutre isolé ou en triangle, ils subissent les surtensions entre écrans.

Pour le choix du limiteur de surtension, on procède comme pour la mise à la terre en un point, en utilisant une relation similaire. Il est à noter que :

* si les parafoudres sont connectés en étoile avec neutre à la terre, c'est le foudroisement du câble de garde qui doit être considéré. Les contraintes diminuent lorsque la longueur des sections élémentaires augmente et lorsque la résistance des prises de terre diminue.

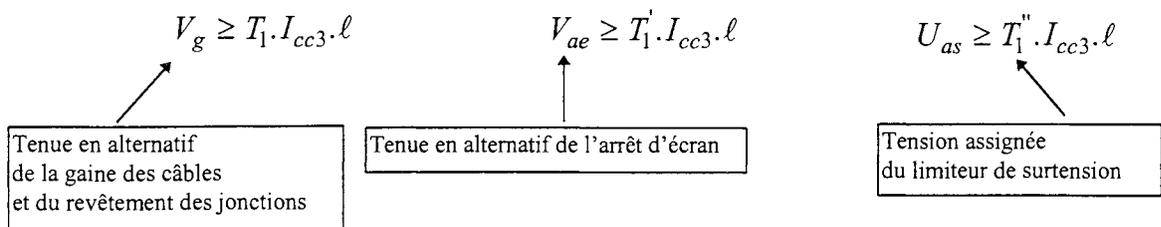
* s'ils sont en étoile à neutre isolé ou en triangle c'est le foudroisement d'un conducteur de phase qui doit être considéré. Les contraintes sont pratiquement indépendantes de la longueur des sections élémentaires et de la résistance des prises de terre.

4 - 1 - CHOIX DU PARAFOUDRE



étoile à la terre	étoile isolée ou triangle
foudroisement câble de garde $I = e^{-r \cdot \ell} * \frac{R}{Z_e + 3 \cdot R} * I_f$ avec $I_f = 100$ kA R : résistance de la prise de terre des aérosouterrains $Z_e = 40 \Omega$: impédance caractéristique de l'écran	foudroisement du câble de phase : $I = 0,45 \cdot I_f$ avec $I_f = 10$ kA

4 - 2 - DETERMINATION DE LA LONGUEUR DES SECTIONS ELEMENTAIRES EN FONCTION DES CONTRAINTES DU REGIME DE DEFAUT TRIPHASE.



	T_1	T'_1
Trèfle	$\frac{\omega \mu}{2\pi} \cdot Ln \frac{S}{r_e}$	$\sqrt{3} \cdot T_1$
Nappe	$\frac{\omega \mu}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{4} \left(Ln \frac{2S}{r_e} \right)^2 + \frac{3}{4} \cdot (Ln2)^2}$	$\sqrt{3} \cdot \frac{\omega \mu}{2\pi} \cdot Ln \frac{2S}{r_e}$

	T''_1
étoile à la terre	T_1
étoile isolée	$1,2 \cdot T_1$ (*)
triangle	T'_1

I_{cc3} courant de court-circuit maximal traversant la liaison pour un défaut au niveau d'un aérosouterrain.

(*) le coefficient 1,2 est introduit pour tenir compte de la dispersion des caractéristiques des parafoudres [46]

4 - 3 - PRISE EN COMPTE DES CONTRAINTES DU REGIME DE DEFAUT MONOPHASE.

La seule limitation à introduire porte sur la montée en potentiel des écrans qui ne doit pas dépasser la tenue de la gaine des câbles lorsque les parafoudres sont connectés en étoile à neutre isolé ou en triangle.

S'ils sont connectés en étoile avec neutre à la terre, la montée en potentiel des écrans doit aussi être limitée en fonction de leur tenue à la fréquence industrielle, ce qui s'avère en général plus contraignant.

En régime de défaut interne, la montée en potentiel des écrans est une fonction croissante de la longueur de la section élémentaire.

L'exigence d'éviter des dégradations des matériels dans ce type de défaut introduit donc une limitation supplémentaire de la longueur des sections élémentaires.

externe : $V_x \geq V_p$ interne : $V'_x \geq V_p + \frac{7}{9} \cdot R_e \cdot (I_{cc} + I'_{cc}) \cdot \ell$

V_p : montée en potentiel maximale de la prise de terre des aérosouterrains

R_e : résistance linéique de l'écran des câbles

étoile à la terre	étoile isolée ou triangle
$V_x = \text{Min} \left(V_g ; \frac{1,5 \cdot U_{as}}{\chi} \right)$	$V_x = V_g$

$V'_x = V_g$
sauf en étoile à la terre si la destruction du parafoudre non admise sur défaut interne alors $V'_x = V_g$

5 - LIAISONS DOUBLES.

Les contraintes en régime transitoire sont inférieures à celles obtenues dans le cas d'une liaison simple.

Pour ce qui est des contraintes à la fréquence industrielle, la distance entre les 2 liaisons mises en parallèle est évidemment un paramètre déterminant puisqu'elle conditionne fortement le niveau des influences mutuelles.

Pour les régimes de défaut externe, dès que l'espacement entre liaisons est supérieur à 2 mètres, on pourra négliger les effets de mutuelles entre liaisons.

On adoptera alors les expressions des contraintes établies pour une liaison seule, en gardant à l'esprit que, dans ces régimes, les courants de phase et les courants dans le câble de garde de la ligne aérienne se répartissent à part égale entre les 2 liaisons.

Ainsi, par exemple, si le courant de défaut triphasé transité par la ligne est de 63 kA, chacune des 2 liaisons ne sera sollicitée que par un courant de défaut de 31,5 kA.

Par contre, en régime de défaut interne sur l'une des 2 liaisons, le fait d'avoir une liaison double ne diminue pas les contraintes.

6 - APPLICATION

Dans ce paragraphe, on se propose d'étudier la faisabilité de liaisons 225 et 400 kV à connexions spéciales d'écran, de type siphon.

On retient comme niveaux de tenue des matériels ceux spécifiés par EDF en choc et à la fréquence industrielle donnés au tableau 11.1.

Réseau		Gaine - revêtement - embase	arrêt d'écran
225 kV	choc	50 kVc	100 kVc
	fréquence industrielle	20 kV	12 kV
400 kV	choc	62,5 kVc	125 kVc
	fréquence industrielle	20 kV	40 kV

Tableau 11.1 : Tenues spécifiées

6 - 1 - LIAISONS A MISE A LA TERRE EN UN POINT.

En 225 kV, les contraintes obtenues lors du foudroiement du câble de garde sont acceptables avec un parafoudre 15 kV à condition que la résistance de la prise de terre soit inférieure à 2 Ohms. Mais les contraintes liées au foudroiement d'un conducteur de phase s'avèrent 10 % supérieures à la limite tolérable. Pour se ramener à un niveau de contrainte acceptable, il est nécessaire de réduire la longueur des câbles de liaison à 0,5 m.

225 kV	400 kV
12 kV - $R \leq 5$ Ohms - $\ell = 2$ m	12 kV - $R \leq 10$ Ohms
15 kV - $R \leq 2$ Ohms - $\ell = 0,5$ m	15 kV - $R \leq 4$ Ohms

En régime de défaut triphasé, les contraintes sont proportionnelles à la longueur de la section élémentaire (le coefficient de proportionnalité dépendant du mode de pose des câbles).

La longueur maximale possible est en général supérieure à 3 000 m (et même 6 000 m dans le cas d'une pose des câbles en trèfle jointif) en considérant un courant de court-circuit maximal de 31,5 kA.

En régime de défaut monophasé externe, les surtensions entre écrans et conducteur de terre conditionnent la longueur maximale possible de la section élémentaire (elles ne mettent pas en cause la faisabilité de la liaison).

La figure 11.2 donne la longueur maximale possible de la section élémentaire en fonction de deux paramètres caractéristiques (dans la plage de variation typique de ces 2 paramètres) pour un courant de court-circuit partiel (*) de 10 kA (la longueur maximale est inversement proportionnelle à ce courant) dans l'hypothèse où le parafoudre n'est pas limitant.

Cette hypothèse est vérifiée pour un parafoudre 15 kV mais ne l'est pas pour un parafoudre 12 kV (on doit alors réduire la longueur de 10 %).

(*) Le courant de court-circuit à prendre en compte est le plus grand des courants de court-circuit arrivant aux extrémités de la liaison.

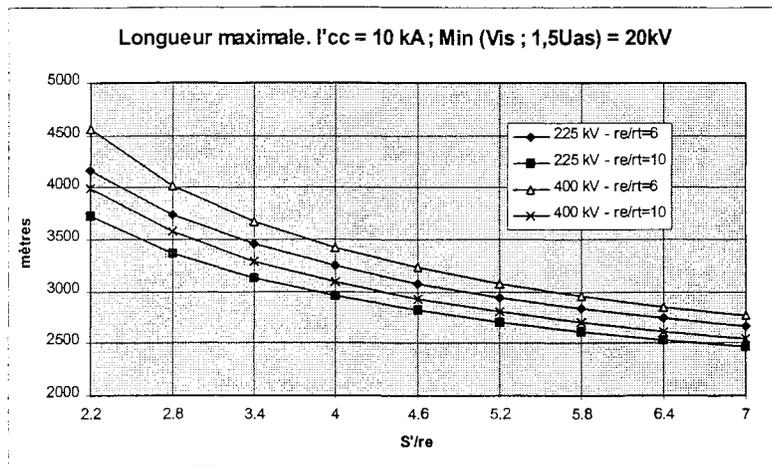


Figure 11.2 Contraintes en régime de défaut monophasé externe - Liaisons à mise à la terre en un point

Les montées en potentiel des écrans sont contraignantes : le courant de court-circuit au niveau du défaut doit être limité à 40 kA environ pour garantir la pérennité de la gaine des câbles.

Pour le réseau 225 kV, il n'y a donc aucun problème. Pour le réseau 400 kV, dans la pratique il en est de même. En effet, un courant de défaut de 40 kA ne peut être atteint que pour un siphon localisé à moins de 5 km d'un poste 63 kA. De plus, une diminution de la résistance des prises de terre permet de réduire les montées en potentiel (on peut, en deuxième approximation utiliser une expression encore relativement simple des montées en potentiel en fonction du courant de défaut)

En régime de défaut monophasé interne :

- * les surtensions entre écrans et conducteur de terre ne sont pas systématiquement supérieures à celles obtenues en défaut monophasé externe.
- * les montées en potentiel des écrans sont toujours supérieures à celles obtenues en défaut monophasé externe.

A titre d'illustration, dans le premier des 2 tableaux qui suivent, on donne le courant de défaut monophasé acceptable pour des liaisons 225 et 400 kV en câbles 1600 mm² Cu lorsque la longueur des sections élémentaires est de 1000 m, selon les contraintes acceptées pour le défaut externe et le défaut interne.

Dans le second, on explicite les longueurs maximales des sections élémentaires possibles pour 2 répartitions extrêmes du courant de défaut monophasé.

Tableau 11.2 : Courant de défaut monophasé total acceptable pour une liaison en câbles 1600 mm ² Cu parafoudres 15 kV - section élémentaire de 1000 m selon la contrainte de défaut considérée			
		225 kV jointif	400 kV - entraxe 30 cm
défaut monophasé externe	surtension écran-CDT	37 - 74 kA	27 - 54 kA
	montée en potentiel	40 kA	40 kA
défaut monophasé interne	surtension écran-CDT	25 - 35 kA	22 - 42 kA
	montée en potentiel	29 kA	33 kA

pour les surtensions, les 2 valeurs correspondent respectivement au cas où l'alimentation du défaut est unilatérale et au cas où le défaut est alimenté à parts égales des 2 côtés

Tableau 11.3 : Longueur maximale de la section élémentaire en fonction des contraintes pour une liaison en câbles 1600 mm ² Cu - parafoudres 15 kV					
		225 kV jointif		400 kV - entraxe 30 cm	
		30 kA / 0	15 kA / 15 kA	30 kA / 0	15 kA / 15 kA
défaut monophasé externe	surtension écran-CDT	1300 m	2600 m	1800 m	2000 m
	montée en potentiel	∞	17 km	4000 m	8000 m
défaut monophasé interne	surtension écran-CDT	850 m	1200 m	850 m	1600 m
	montée en potentiel	800 m	800 m	1200 m	1600 m

6 - 2 - LIAISONS A PERMUTATION DES ECRANS.

Le tableau ci-dessous indique les tensions assignées possibles des parafoudres, selon le mode de connexion, et les éventuelles contraintes sur la longueur des sections élémentaires.

Réseau	225 kV	400 kV
Etoile à la terre (R terre = 10 Ohms)	12 kV - L ≥ 1400 m 15 kV - L ≥ 2700 m	15 kV - L ≥ 1000 m
Etoile isolée ou triangle	15 kV	15 kV

En régime de défaut triphasé, les contraintes à la fréquence industrielle sont proportionnelles à la longueur des sections élémentaires (le coefficient de proportionnalité dépendant du mode de pose des câbles).

Les longueurs maximales possibles sont en général supérieures à 2 000 m (et même 4 000 m dans le cas d'une pose des câbles en trèfle jointif) en considérant un courant de court-circuit maximal de 31,5 kA.

En régime de défaut monophasé externe, les montées en potentiel des écrans sont indépendantes de la longueur des sections élémentaires, et en première approximation ne dépendent que du courant de défaut. Le courant de court-circuit au niveau du défaut doit être limité à 40 kA pour garantir la pérennité de la gaine des câbles et du revêtement des jonctions, ce qui ne pose pas vraiment de problème comme on l'a vu pour le cas de la mise à la terre en un point.

Pour garantir la tenue des parafoudres, uniquement dans le cas d'une connexion en étoile à la terre, le courant limite est très inférieur (fonction de la tension assignée du parafoudre).

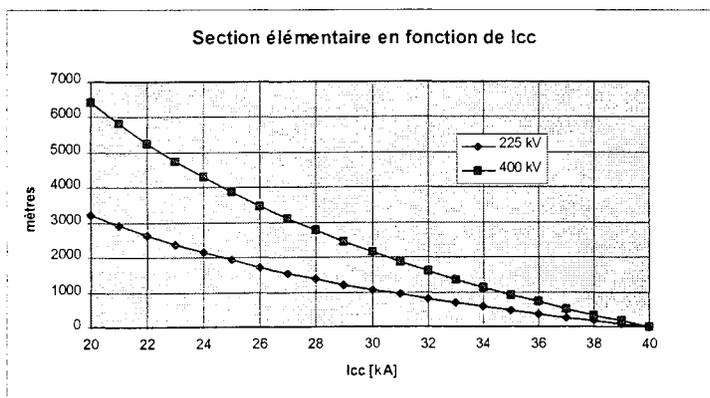
Courant de défaut maximal parafoudres en étoile à la terre	
parafoudres 12 kV	18 kA
parafoudres 15 kV	22,5 kA

Les contraintes du défaut monophasé externe ne sont pas dimensionnantes, sauf dans le cas d'une mise à la terre du neutre des parafoudres et pour des courants de défaut élevés.

Pour la prise en compte des montées en potentiel des écrans en régime de défaut monophasé interne :

* s'imposer de ne pas dépasser les niveaux de tenue de la gaine des câbles et du revêtement des jonctions, ce qui conduit aux longueurs maximales possibles présentées ci-dessous (la différence 225 kV / 400 kV traduit l'influence de la résistance de l'écran)

* dans le cas d'une connexion des parafoudres en étoile à la terre, ne pas accepter la destruction des parafoudres implique une réduction du courant de défaut maximal (cf tableau ci-dessous)



Courant de défaut maximal parafoudres en étoile à la terre	
Réseau 225 kV parafoudres 12 ou 15 kV	11 kA
Réseau 400 kV parafoudres 15 kV	18,5 kA

Figure 11.3 : Contraintes en régime de défaut monophasé externe - Liaisons à permutation d'écrans.

Les contraintes du défaut monophasé interne ne sont pas dimensionnantes, sauf dans le cas d'une mise à la terre du neutre des parafoudres lorsque l'on ne tolère pas leur destruction en cas de défaut.

7 - CONCLUSION

MISE A LA TERRE EN UN POINT

Il est possible :

- * de réaliser des siphons même avec des courants de défaut monophasé élevés,
avec des longueurs de section élémentaire en général supérieures à 1000 m,
 - * en garantissant la pérennité de la gaine et du revêtement des jonctions,
 - * en limitant le risque de destruction d'un parafoudre sur défaut interne à la liaison.
- On peut retenir un modèle unique de parafoudre pour les réseaux 225 et 400 kV : de tension assignée 15 kV, à condition de réaliser des prises de terre de résistance inférieure à 4 Ohms et à condition de réduire la longueur des câbles de liaison à 50 cm en 225 kV.

PERMUTATION D'ECRAN

En adoptant une connexion des parafoudres en étoile avec neutre isolé, il est possible :

- * de réaliser des siphons même avec des courants de défaut monophasé élevés,
avec des longueurs de section élémentaire en général supérieures à 2000 m,
- * en garantissant la pérennité de la gaine et du revêtement des jonctions,
- * en limitant le risque de destruction d'un parafoudre sur défaut interne à la liaison.

Il est possible de retenir un modèle unique de parafoudre pour les réseaux 225 et 400 kV : de tension assignée 15 kV

CONCLUSION

CONCLUSION

La volonté d'améliorer l'insertion du réseau électrique dans l'environnement se traduit par un recours plus large aux câbles souterrains de transport d'énergie : l'enfouissement du réseau moyenne tension est déjà largement engagé.

En haute et très haute tension, l'option souterraine est pénalisée par un surcoût élevé, par rapport aux lignes aériennes : pour les liaisons 400 kV à 2 circuits transitant chacun une puissance de 2000 MVA, le coût d'investissement est multiplié par un facteur de l'ordre de 20.

Pour réduire le coût des liaisons souterraines haute et très haute tension, des évolutions technologiques des câbles (optimisation de la structure de l'âme de manière à réduire les pertes par effet de peau, généralisation du polyéthylène réticulé comme matériau d'isolation, réduction de l'épaisseur d'isolant), de leurs matériels de raccordement (généralisation de la préfabrication) et, aussi, de leurs conditions d'installation (utilisation de remblais contrôlés, mécanisation de la pose) ont été apportées ou sont en cours de développement.

L'optimisation des techniques de mise à la terre des écrans des câbles d'énergie constitue également un gisement d'économies.

Les techniques dites de connexions spéciales d'écran (mise à la terre en un point et permutation d'écran) qui sont mieux adaptées au transport de fortes puissances que la technique de mise à la terre continue, ne sont pas d'une mise en oeuvre aisée.

En particulier, le choix des limiteurs de surtension nécessaires à la protection de la gaine des câbles vis-à-vis des contraintes électriques transitoires suppose une évaluation relativement précise des surtensions susceptibles d'affecter les liaisons en régime transitoire, mais aussi, en régime permanent et dans les différents régimes de défaut.

Pour ce qui concerne les contraintes à la fréquence industrielle, l'apport de cette thèse est double.

D'une part, il réside dans l'élaboration de formules de calcul des surtensions en régime de défaut monophasé (notamment dans le cas d'un claquage de câble) en fonction du trajet suivi par le courant de retour du courant de court-circuit

D'autre part, il porte sur le calcul de la répartition de ce courant de retour dans le réseau de terre.

En formulant quelques hypothèses simplificatrices, on établit des expressions relativement simples des contraintes appliquées aux matériels en fonction des caractéristiques des liaisons souterraines (type de câble, mode de pose) et du réseau amont et aval.

Les contraintes transitoires sollicitant la partie souterraine d'un siphon déterminées à l'aide du logiciel EMTP (ElectroMagnetic Transients Program) sont analysées : en particulier, les différents modes de propagation des ondes sont mis en évidence.

Des formules de calcul approché des surtensions sont élaborées, prenant en compte la tension assignée des limiteurs de surtension et leur mode de couplage .

Une synthèse des études à la fréquence industrielle et en régime transitoire est proposée dans le dernier chapitre. Elle permet de dégager des règles de dimensionnement des connexions spéciales d'écran relativement simples, y compris pour des circuits comportant 2 liaisons souterraines mises en parallèle.

Il est intéressant de noter que, en adoptant quelques dispositions constructives pour que les contraintes subies par les matériels soient compatibles avec leurs tenues spécifiées, il est possible de réaliser des liaisons souterraines de très grandes longueurs en utilisant la technique de permutation d'écran

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Câbles souterrains
Techniques de l'ingénieur D641-2
- [2] Câbles isolés moyenne, haute et très haute tensions
P. ARGAUT, P.M. DEJEAN, E. DORISON et E.SIMEON
RGE N° 11/92
- [3] Les matériaux, facteurs clés de l'évolution des matériels électrotechniques
F. DUCHATEAU et M. PAYS
RGE N° 11/92
- [4] Directives techniques du service du transport - Liaisons souterraines
Document EDF - DPT - CERT
- [5] Perspectives d'évolution technique des câbles et de leur méthode de pose
M. PAYS
RGE N°4/94
- [6] The electromagnetic theory of coaxial transmission lines and cylindrical shields
S.A. SCHELKUNOFF
Bell system technical journal N° 13 (1934)
- [7] Sur le champs produit par un conducteur simple infiniment long parcouru par un courant alternatif.
POLLACZEK
RGE N° 5/31
- [8] Theorie du cable coaxial
F. POLLACZEK
Journal de Physique N°7 (1947)
- [9] Transient analysis of underground power transmission systems
L.M. WEDPOHL and D.J. WILCOX
Proc. IEE, Vol 120, N° 2, February 1973
- [10] Modélisation des câbles isolés de transport d'énergie
P. ARGAUT, E. DORISON, C. KARIM, et alii
JICABLE 91
- [11] Une modélisation fine des câbles en régimes harmoniques ou transitoires par la transformée de Laplace inverse.
P. JOHANNET
JICABLE 91
- [12] Modélisation électrique des câbles souterrains de transport d'énergie
K. FERKAL
Thèse de Doctorat de l'Université PARIS 6 (1994)

-
- [13] Analyse des procédés permettant de supprimer les pertes dans les gaines métalliques de câbles unipolaires à courant alternatif
M. FALLOU
RGE N°6/65
- [14] Riduzione delle perdite nelle guaine metalliche dei cavi unipolari mediante trasposizione incrociata
G. BAZZI
L'ELETTROTECNICA Volume 48 N°4 - JAvril1971
- [15] Etude des réseaux de câbles à connexion spéciale des gaines.
A.S. BROOKES
ELECTRA N°28 - Mai 1973
- [16] Etude des réseaux de câbles à connexion spéciale des gaines.
D.J. SKIPPER
ELECTRA N°47 - Juillet 1976
- [17] Calcul des courants et tensions dans les écrans des câbles isolés HT et THT en régime permanent et en régime de défaut externe.
E. DORISON - H. VO VAN HUY
Note EDF - DER HM-62/97/159/A - Juin 1997
- [18] Calcul des courants et tensions dans les écrans des câbles isolés HT et THT en régime de défaut interne.
E. DORISON - H. VO VAN HUY
Note EDF - DER HM-62/98/004/A - Janvier 1998
- [19] Sheath overvoltages in High-voltage cables resulting from special sheath bonding connections
E. H. BALL , E. OCCHINI, G.LUONI.
IEEE Trans. Vol PAS 81, no. 10, Octobre 1965.
- [20] Sheath overvoltages affecting specially bonded undergrounding links during single-phase faults.
VO VAN HUY H., DORISON E.
Fifth International Conference on Insulated Power Cables. JICABLE - 1999.
- [21] Réponse transitoire des câbles 1 partie; Etude des modes de propagation
P. NOUALY et G. LE ROY
EDF Bulletin de la DER N°1 (1975)
- [22] Les phénomènes de propagation - généralités sur l'analyse modale
P. JOHANNET
Note EDF - DER HM-70/94/108
- [23] Surtensions de manoeuvre dans les réseaux HT et THT - Principales méthodes de calcul des régimes transitoires dans les réseaux THT.
J.C. SABONNADIÈRE, P. AURIOL
RGE, T.82, n° 11, Novembre 1973.
- [24] Efficient inverse Laplace transform algorithm for transient voltage calculation.
A. AHMAD, P. JOHANNET, P.AURIOL
IEE Proc. C, Vol. 139, n°2, Mars 1992.
- [25] Wave propagation in non homogeneous multiconductor systems using the concept of natural modes.
L. M. WEDEPOHL.
Proc. IEE, Vol 113, no. 4, Avril 1966.
- [26] EMTP Theory book.
H.W. DOMMEL
Vancouver, Canada, May 1992.
-

- [27] Digital computer solution of electromagnetic transients in single and multiphase networks.
H. W. DOMMEL
IEEE Trans. Vol. PAS 88, n° 4, April 1969.
- [28] Accurate modelling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations.
J.R. MARTI
IEEE Trans. Vol. PAS 101, n° 1, January 1982.
- [29] Propagation of travelling waves on transmission lines frequency dependent parameters.
J. K. SNELSON
IEEE. Trans. Vol. PAS 91, Janvier/Fevrier 1972.
- [30] Contribution to the theory of calculation of EMT on transmission line with frequency dependant parameters.
A. SEMLYEN
IEEE Trans. Vol. PAS 100, n° 2, February 1981.
- [31] Transient phenomena in crossbonded cable systems: analytical results.
D. J. WILCOX, K. J. LAWLER.
Proc IEE, Vol 125, no.10, Octobre 1978.
- [32] Régimes électriques transitoires des liaisons souterraines.
N. QAKO
Thèse de Doctorat de l'INPG, Novembre 1996
- [33] Régimes transitoires des liaisons souterraines.
X. BOURGEAT, E. DORISON, N. QAKO
REE Série spécialisée Câbles d'énergie et science des isolants - Volume 2 Décembre 1997
- [34] Numerical Modelling of frequency-dependent transmission-lines parameters in an Electromagnetic Transients Program.
W. S. MEYER, H. W. DOMMEL
IEEE Trans. Vol. PAS 93, n° 1, Sept-October 1974.
- [35] Simulation of transients in underground cables with frequency-dependent modal transformation matrices.
L. MARTI
IEEE Trans. Vol. 3, n° 3, July 1988.
- [36] Low-Order approximation of transmission line parameters for frequency-dependant models.
L. MARTI
IEEE Trans. Vol. PAS-102, n° 11, November 1983.
- [37] Accurate modeling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations.
J. R. Marti
IEEE Trans. Vol PAS-101, no 1, Janvier 1982.
- [38] Computation of power-system transients.
J. P. BICKFORD, N. MULLINEUX, J. R. REED.
IEE Monograph Series 18, England 1980.
- [39] Simulation of electromagnetic transient in underground cables with frequency-dependent modal transformation matrices.
L. MARTI.
Ph.D Thesis, Vancouver, Canada, Nov 1986.

-
- [40] Surtensions de gaine dans les câbles souterrains à haute tension.
L.MARTI, T. E. GRAINGER, A.S. MORCHED.
Ontario-Hydro Canada. Rapport CIGRE 1996.
- [41] Sheath overvoltages due to faults on an EHV cable.
A. AMETANI - C.T. WAN
Proceedings IPST 96 International Conference on Power Systems transients.
Lisbonne - Portugal - Septembre 1995.
- [42] Permutation ternaire des écrans et mise au point d'une jonction de câble HT au PRC
permettant d'utiliser des limiteurs à oxyde de zinc.
P. P. LEUFKENS, B. H. M. WEGBRANS.
CIGRE 1988.
- [43] Application of metal oxide ceramics for surge protection of sheath
and joint insulation of cross-bonded cables.
K. G. RINGLER M. B. ETEIBA.
Ontario Hydro, Research division, Rapport no. 85-195-K, Septembre 1985.
- [44] Liaisons souterraines avec MALT en un point - Estimation de l'asymétrie des tensions
aux bornes des parafoudres à partir de l'asymétrie du courant de court-circuit.
X. BOURGEAT
Note EDF - DER HM-62/98/109
- [45] Prises de terre des lignes et des postes des réseaux de 3^e catégorie. Calcul de leur montée en potentiel
lors des défauts. Applications.
J.P. URBAIN et Alii.
Document EDF - DPT - Décembre 1987.
- [46] Guide pour la protection des liaisons à connexions spéciales d'écran contre les surtensions d'écran.
ELECTRA N° 128.

**OPTIMISATION DES TECHNIQUES DE MISE A LA TERRE
DES ECRANS DES CABLES HAUTE ET TRES HAUTE TENSIONS**

ANNEXES

Annexe 1
Liaisons à permutation d'écran.
Régime de défaut monophasé interne.
Chutes de tension dans les différentes sections élémentaires
Tensions entre écrans au niveau des permutations.

En considérant chacun des circuits d'écran, on obtient 3 expressions de la chute de tension V_0 dans les circuits d'écran en fonction des courants dans les écrans et du courant de court-circuit.

En introduisant la somme des courants dans les écrans « en amont » du défaut I'1, on obtient ainsi un système de 4 équations, reliant les courants dans les écrans, la chute de tension dans les écrans et le courant I'1 au courant de court-circuit.

$$Z_e \cdot I_{e1} + Z_c \cdot I_{e2} + Z_c \cdot I_{e3} - \frac{V_0}{L} = -A' \cdot I_{cc} \quad [1]$$

$$Z_c \cdot I_{e1} + Z_c \cdot I_{e2} + Z_L \cdot I_{e3} - \frac{V_0}{L} = -B' \cdot I_{cc} \quad [2]$$

$$Z_c \cdot I_{e1} + Z_L \cdot I_{e2} + Z_e \cdot I_{e3} - \frac{V_0}{L} = -C' \cdot I_{cc} \quad [3]$$

$$I_{e1} + I_{e2} + I_{e3} = I_c \quad [4]$$

La mise en équations est effectuée ci-après dans 3 des 9 cas envisageables (en fonction de la position du défaut).

On donne ensuite les expressions des coefficients A', B', C' pour les 9 cas envisageables.

Puis, on précise la démarche suivie pour obtenir les expressions de la chute de tension dans les écrans et des courants dans les écrans et on indique la méthode utilisée pour déterminer la chute de tension dans le circuit d'écran en défaut dans la 3^o section élémentaire, en fonction du circuit en défaut et de la position du défaut.

Enfin, on établit les expressions des tensions entre écrans.

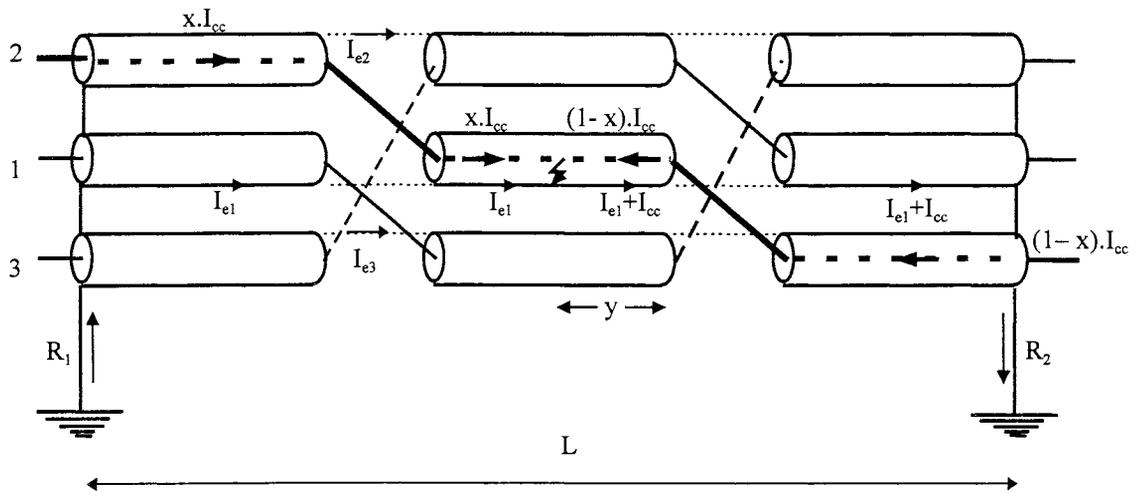
1 - Mise en équations.

La distance entre le défaut et l'extrémité de la section élémentaire affectée située à droite est notée y.

La distance du défaut à l'extrémité droite de la section ternaire est : $\beta_i \cdot L$, où i est le numéro de la section élémentaire en défaut :

$$\beta_i = \left(\frac{y}{L} + \frac{3-i}{3} \right)$$

On pose : $\alpha = \left(\frac{x}{3} - \frac{y}{L} \right)$

Défaut au circuit 1 (2° section élémentaire)

$$V_{e1} = [Z_e \cdot I_{e1} + \beta_2 \cdot Z_e I_{cc} + Z_c \cdot (I_{e2} + I_{e3}) + A \cdot I_{cc}] \cdot L$$

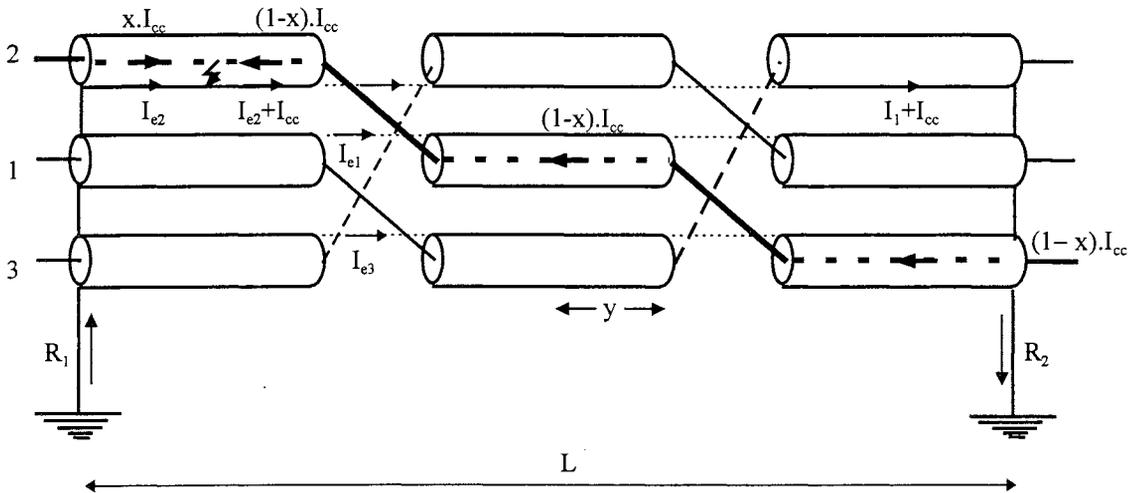
$$A = \alpha \cdot Z_m + \left(\frac{2x}{3} - \frac{1}{3}\right) \cdot Z_c$$

$$V_{e2} = [Z_c \cdot I_{e1} + \beta_2 \cdot Z_c I_{cc} + Z_e \cdot I_{e2} + Z_L \cdot I_{e3} + B \cdot I_{cc}] \cdot L$$

$$B = \alpha \cdot Z_c + \frac{x-1}{3} \cdot (Z_m + Z_L) + \frac{Z_m}{3}$$

$$V_{e3} = [Z_c \cdot I_{e1} + \beta_2 \cdot Z_c I_{cc} + Z_L \cdot I_{e2} + Z_e \cdot I_{e3} + C \cdot I_{cc}] \cdot L$$

$$C = \alpha \cdot Z_c + \frac{x-1}{3} \cdot (Z_m + Z_L) + \frac{Z_L}{3}$$

Défaut au circuit 2 (1° section élémentaire)

$$V_{e1} = [Z_c I_{e2} + \beta_1 \cdot Z_c I_{cc} + Z_e I_{e1} + Z_c I_{e3} + A I_{cc}] \cdot L$$

$$A = \alpha \cdot Z_c + \frac{x-1}{3} \cdot (Z_m + Z_c)$$

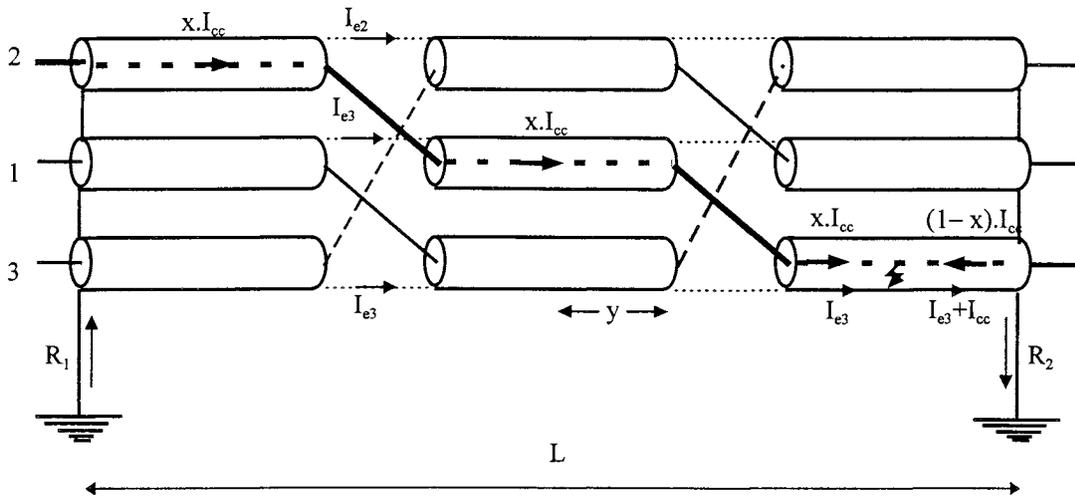
$$V_{e2} = [Z_e I_{e2} + \beta_1 \cdot Z_e I_{cc} + Z_c I_{e1} + Z_L I_{e3} + B I_{cc}] \cdot L$$

$$B = \alpha \cdot Z_m + \frac{x-1}{3} \cdot (Z_c + Z_L)$$

$$V_{e3} = [Z_L I_{e2} + \beta_1 \cdot Z_L I_{cc} + Z_c I_{e1} + Z_e I_{e3} + C I_{cc}] \cdot L$$

$$C = \alpha \cdot Z_L + \frac{x-1}{3} \cdot (Z_m + Z_c)$$

Défaut au circuit 3 (3° section élémentaire)



$$V_{e1} = [Z_c I_{e3} + \beta_3 \cdot Z_c I_{cc} + Z_e I_{e1} + Z_c I_{e2} + A I_{cc}] \cdot L$$

$$V_{e2} = [Z_L I_{e3} + \beta_3 \cdot Z_L I_{cc} + Z_c I_{e1} + Z_e I_{e2} + B I_{cc}] \cdot L$$

$$V_{e3} = [Z_e I_{e3} + \beta_3 \cdot Z_e I_{cc} + Z_c I_{e1} + Z_L I_{e2} + C I_{cc}] \cdot L$$

$$A = \alpha \cdot Z_c + \frac{x-1}{3} \cdot (Z_m + Z_c) + \frac{Z_c}{3} + \frac{Z_m}{3}$$

$$B = \alpha \cdot Z_L + \frac{x-1}{3} \cdot (Z_m + Z_c) + \frac{Z_m}{3} + \frac{Z_c}{3}$$

$$C = \alpha \cdot Z_m + \frac{x-1}{3} \cdot (Z_c + Z_L) + \frac{Z_L}{3} + \frac{Z_c}{3}$$

2 - Coefficients A', B', C'

Tableau A1 - 1 : Coefficients A', B', C'

		Section élémentaire 1	Section élémentaire 2	Section élémentaire 3
Défaut circuit n°1	A'	$\beta_1 R_e + Z'_0 + \frac{2(Z_m - Z_c)}{3}$	$\beta_2 R_e + Z'_0 + \frac{Z_m - Z_c}{3}$	$\beta_3 R_e + Z'_0$
	B'	$Z_0 + \frac{2Z_c - Z_m - Z_L}{3}$	$Z_0 + \frac{Z_c - Z_L}{3}$	Z_0
	C'	= B'	$Z_0 + \frac{Z_c - Z_m}{3}$	= B'
Défaut circuit n°2	A'	$Z'_0 + \frac{Z_c - Z_m}{3}$	$Z'_0 + \frac{Z_c - Z_m}{3}$	Z'_0
	B'	$\beta_1 R_e + Z_0 + \frac{2Z_m - Z_c - Z_L}{3}$	$\beta_2 R_e + Z_0 + \frac{Z_m - Z_c}{3}$	$\beta_3 R_e + Z_0$
	C'	$Z_0 + \frac{2Z_L - Z_m - Z_c}{3}$	$Z_0 + \frac{Z_L - Z_c}{3}$	Z_0
Défaut circuit n°3	A'	= A' circuit n°2	Z'_0	= A' circuit n°2
	B'	= C' circuit n°2	$Z_0 + \frac{Z_L - Z_m}{3}$	= C' circuit n°2
	C'	= B' circuit n°2	$\beta_2 R_e + Z_0 + \frac{Z_m - Z_L}{3}$	= B' circuit n°2
		$Z_0 = \frac{x}{3}(Z_m + Z_c + Z_L) \quad Z'_0 = \frac{x}{3}(Z_m + 2Z_c)$		

3 - Résolution du système d'équations.

On peut déduire du système les relations suivantes :

$$(Z_e + 2Z_c).I_{e1} + (Z_e + Z_c + Z_L).I_{e2} + (Z_e + Z_c + Z_L).I_{e3} - 3\frac{V_0}{L} = -(A' + B' + C').I_{cc} \quad [5]$$

$$2(Z_e - Z_c).I_{e1} + 2(2Z_c - Z_e - Z_L).(I_{e2} + I_{e3}) = (B' + C' - 2A').I_{cc} \quad [6]$$

$$(Z_L - Z_e).(I_{e2} - I_{e3}) = (C' - B').I_{cc} \quad [7]$$

En utilisant [4], on peut éliminer I_{e2} et I_{e3} dans [5] et [1], d'où l'on déduit V_0 et I_{e1} en fonction de I_e et I_{cc} . En utilisant [4], il est également possible d'éliminer I_{e1} dans [6], de manière à obtenir :

$$(-3Z_e + 4Z_c - Z_L).(I_{e2} + I_{e3}) = (B' + C' - 2A').I_{cc} - 2(Z_e - Z_c).I_e \quad [8]$$

De [7] et [8], on déduit facilement I_{e2} et I_{e3} en fonction de I_e et I_{cc} .

Tableau A1 - 2 : Résolution des 2 sous-systèmes d'équations par la méthode des déterminants

$V_0/L = \lambda \cdot I_e + \mu \cdot I_{cc}$	$I_{ei} = a_i \cdot I_e + b_i \cdot I_{cc}$
$\lambda = \frac{(Z_e - Z_c)(Z_e + Z_c + Z_L) - Z_c(Z_e - Z_L)}{3Z_e + Z_L - 4Z_c}$	
$\mu = \frac{(Z_e - Z_c)(A'_i + B'_i + C'_i) + (Z_L - Z_e) \cdot A'_i}{3Z_e + Z_L - 4Z_c}$	
$a_1 = \frac{Z_e - 2Z_c + Z_L}{3Z_e - 4Z_c + Z_L}$	$a_2 = a_3 = \frac{Z_e - Z_c}{3Z_e - 4Z_c + Z_L}$
	$b_1 = \frac{B'_i + C'_i - 2A'_i}{3Z_e - 4Z_c + Z_L}$
	$b_2 = \frac{1}{\Delta_2} \cdot [(Z_e - Z_c)(A'_i + C'_i - 2B'_i) + (Z_c - Z_L) \cdot (A'_i - C'_i)]$
	$b_3 = \frac{1}{\Delta_2} \cdot [(Z_e - Z_c)(A'_i + B'_i - 2C'_i) + (Z_c - Z_L)(A'_i - B'_i)]$
	$\Delta_2 = (Z_e - Z_L) \cdot (3Z_e - 4Z_c + Z_L)$

En explicitant les coefficients A' , B' , C' , des calculs laborieux conduisent aux résultats donnés dans le chapitre 4. Dans ces calculs, il est intéressant de faire apparaître $B'-A'$ et $C'-A'$.

Tableau A1 - 3 : $B'-A'$ et $C'-A'$

défait		Section élémentaire 1	Section élémentaire 2	Section élémentaire 3
circuit n°1	$B'-A'$	$\frac{x}{3}(Z_L - Z_c) + \frac{4Z_c - 3Z_m - Z_L}{3} - \beta_1 \cdot R_e$	$\frac{x}{3}(Z_L - Z_c) + \frac{2Z_c - Z_m - Z_L}{3} - \beta_2 \cdot R_e$	$\frac{x}{3}(Z_L - Z_c) - \beta_3 \cdot R_e$
	$C'-A'$		$\frac{x}{3}(Z_L - Z_c) + \frac{2}{3} \cdot (Z_c - Z_m) - \beta_2 \cdot R_e$	
circuit n°2	$B'-A'$	$\frac{x}{3}(Z_L - Z_c) + \frac{3Z_m - 2Z_c - Z_L}{3} + \beta_1 \cdot R_e$	$\frac{x}{3} \cdot (Z_L - Z_c) + \frac{2}{3} \cdot (Z_m - Z_c) + \beta_2 \cdot R_e$	$\frac{x}{3} \cdot (Z_L - Z_c) + \beta_3 \cdot R_e$
	$C'-A'$	$\frac{x}{3} \cdot (Z_L - Z_c) + \frac{2}{3} \cdot (Z_L - Z_c)$	$\frac{x}{3}(Z_L - Z_c) + \frac{Z_m - 2Z_c + Z_L}{3}$	$\frac{x}{3}(Z_L - Z_c)$
circuit n°3	$B'-A'$	= $C'-A'$ circuit 2	$\frac{x}{3} \cdot (Z_L - Z_c) + \frac{1}{3} \cdot (Z_L - Z_m)$	= $C'-A'$ circuit 2
	$C'-A'$	= $B'-A'$ circuit 2	$\frac{x}{3} \cdot (Z_L - Z_c) + \frac{1}{3} \cdot (Z_m - Z_L) + \beta_2 \cdot R_e$	= $B'-A'$ circuit 2

Dans le cas de la pose en trèfle, il suffit de faire $Z_L = Z_c$. On obtient alors les résultats suivants :

Tableau A1 - 4 : Chute de tension et courant dans les écrans dans le cas de pose en trèfle

$V_o / L = \lambda \cdot I_e + \mu \cdot I_{cc} ; I_{s1} = a_s \cdot I_e + b_{s1} \cdot I_{cc} ; I_{s2} = a_s \cdot I_e + b_{s2} \cdot I_{cc}$	
$\lambda = \frac{Z_e + 2Z_c}{3}$	$\mu = \frac{\beta_i R_e + x(Z_m + 2Z_c)}{3}$
$a_d = a_{s1} = a_{s2} = \frac{1}{3}$ $b_d = -(b_{s1} + b_{s2})$	$b_{s1} = \frac{\beta_i R_e}{3(Z_e - Z_c)}$
SE1 et SE3	SE2
$b_{s2} = b_{s1}$	$b_{s2} = \frac{\beta_i R_e + (Z_m - Z_c)}{3(Z_e - Z_c)}$
I_{s1}, I_{s2} : Courants dans les écrans des phases saines	

4 - Chute de tension dans l'écran d'un circuit en défaut

La démarche suivie pour déterminer la chute de tension dans l'écran d'un circuit en défaut est la suivante :

1 - On exprime la chute de tension en fonction des courants dans les écrans et du courant de court-circuit .

e_{i3} pour un défaut au circuit i survenant au tout début de la 3^o section élémentaire.

$$e_{i3} = [Z_e I_{e1} + Z_c I_{e2} + Z_c I_{e3} + (Z_e - Z_m \cdot (1-x)) \cdot I_{cc}] \cdot \ell$$

$$e_{23} = [Z_c I_{e1} + Z_e I_{e2} + Z_L I_{e3} + (Z_e - Z_m \cdot (1-x)) \cdot I_{cc}] \cdot \ell$$

$$e_{33} = [Z_c I_{e1} + Z_L I_{e2} + Z_e I_{e3} + (Z_e - Z_m \cdot (1-x)) \cdot I_{cc}] \cdot \ell$$

e_{i3} pour un défaut au circuit i survenant à la fin de la 3^o section élémentaire.

$$e_{i3} = [Z_e I_{e1} + Z_c I_{e2} + Z_c I_{e3} + (Z_e - Z_c \cdot (1-x)) \cdot I_{cc}] \cdot \ell$$

$$e_{23} = [Z_c I_{e1} + Z_e I_{e2} + Z_L I_{e3} + (Z_e - Z_c \cdot (1-x)) \cdot I_{cc}] \cdot \ell$$

$$e_{33} = [Z_c I_{e1} + Z_L I_{e2} + Z_e I_{e3} + (Z_e - Z_L \cdot (1-x)) \cdot I_{cc}] \cdot \ell$$

2 - On élimine le courant dans l'écran du circuit en défaut en l'exprimant en fonction du courant I_e (somme des courants dans les 3 écrans) et des courants dans les circuits sains.

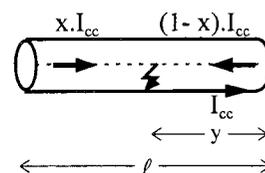
3 - On exprime ces derniers en fonction de I_e et I_{cc} .

5 - Tensions entre écrans.

Chute de tension créée par le courant de court-circuit sur la section élémentaire affectée :

$$e = \left[\left(\frac{1}{3} - \frac{y}{L} \right) \cdot Z_m \cdot x + \frac{y}{L} (Z_e + (x-1) \cdot Z_m) \right] \cdot L \cdot I_{cc}$$

$$e = \left[x \cdot Z_m + \frac{y}{\ell} R_e \right] \cdot \ell \cdot I_{cc} = Z_x \cdot \ell \cdot I_{cc}$$



Défaut au circuit n°1, SE1

$$\begin{aligned} e_{11} &= [Z_e I_{e1} + Z_c I_{e2} + Z_c I_{e3} + Z_x I_{cc}] \cdot \ell \\ e_{21} &= [Z_c I_{e1} + Z_e I_{e2} + Z_L I_{e3} + x Z_c I_{cc}] \cdot \ell \\ e_{31} &= [Z_c I_{e1} + Z_L I_{e2} + Z_e I_{e3} + x Z_c I_{cc}] \cdot \ell \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{12}(1) &= (e_{11} - e_{21}) &= [(B' - A') + (Z_x - x Z_c)] \cdot \ell \cdot I_{cc} \\ V_{13}(1) &= (e_{11} - e_{31}) &= [(C' - A') + (Z_x - x Z_c)] \cdot \ell \cdot I_{cc} \\ V_{23}(1) &= (e_{21} - e_{31}) &= (C' - B') \cdot \ell \cdot I_{cc} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} e_{12} &= \{Z_e I_{e1} + Z_c I_{e2} + Z_c I_{e3} + [Z_e + (x-1)Z_c]\} \cdot \ell \\ e_{22} &= \{Z_c I_{e1} + Z_e I_{e2} + Z_L I_{e3} + [Z_c + (x-1)Z_L] \cdot I_{cc}\} \cdot \ell \\ e_{32} &= \{Z_c I_{e1} + Z_L I_{e2} + Z_e I_{e3} + [Z_c + (x-1)Z_m] \cdot I_{cc}\} \cdot \ell \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{12}(2) &= V_{12}(1) + (e_{12} - e_{22}) &= [2.(B' - A') + Z_x + Z_e - 2Z_c - (x-1)Z_L] \cdot \ell \cdot I_{cc} \\ V_{13}(2) &= V_{13}(1) + (e_{12} - e_{32}) &= [2.(C' - A') + Z_x + Z_e - 2Z_c - (x-1)Z_m] \cdot \ell \cdot I_{cc} \\ V_{23}(2) &= V_{23}(1) + (e_{22} - e_{32}) &= [2.(C' - B') + (x-1)(Z_L - Z_m)] \cdot \ell \cdot I_{cc} \end{aligned}$$

Défaut au circuit n°1, SE2

$$\begin{aligned} e_{11} &= [Z_e I_{e1} + Z_c I_{e2} + Z_c I_{e3} + x Z_c I_{cc}] \cdot \ell \\ e_{21} &= [Z_c I_{e1} + Z_e I_{e2} + Z_L I_{e3} + x Z_m I_{cc}] \cdot \ell \\ e_{31} &= [Z_c I_{e1} + Z_L I_{e2} + Z_e I_{e3} + x Z_L I_{cc}] \cdot \ell \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{12}(1) &= (e_{11} - e_{21}) &= [(B' - A') + x.(Z_c - Z_m)] \cdot \ell \cdot I_{cc} \\ V_{13}(1) &= (e_{11} - e_{31}) &= [(C' - A') + x.(Z_c - Z_L)] \cdot \ell \cdot I_{cc} \\ V_{23}(1) &= (e_{21} - e_{31}) &= [(C' - B') + x.(Z_m - Z_L)] \cdot \ell \cdot I_{cc} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} e_{12} &= [Z_e I_{e1} + Z_c I_{e2} + Z_c I_{e3} + Z_x I_{cc}] \cdot \ell \\ e_{22} &= [Z_c I_{e1} + Z_e I_{e2} + Z_L I_{e3} + x Z_c I_{cc}] \cdot \ell \\ e_{32} &= [Z_c I_{e1} + Z_L I_{e2} + Z_e I_{e3} + x Z_c I_{cc}] \cdot \ell \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{12}(2) &= V_{12}(1) + (e_{12} - e_{22}) &= [2.(B' - A') + (Z_x - x Z_m)] \cdot \ell \cdot I_{cc} \\ V_{13}(2) &= V_{13}(1) + (e_{12} - e_{32}) &= [2.(C' - A') + (Z_x - x Z_L)] \cdot \ell \cdot I_{cc} \\ V_{23}(2) &= V_{23}(1) + (e_{22} - e_{32}) &= [2.(C' - B') + x.(Z_m - Z_L)] \cdot \ell \cdot I_{cc} \end{aligned}$$

Défaut au circuit n°1, SE3

$$\begin{aligned} e_{11} &= [Z_e I_{e1} + Z_c I_{e2} + Z_c I_{e3} + x Z_c I_{cc}] \cdot \ell \\ e_{21} &= [Z_c I_{e1} + Z_e I_{e2} + Z_L I_{e3} + x Z_L I_{cc}] \cdot \ell \\ e_{31} &= [Z_c I_{e1} + Z_L I_{e2} + Z_e I_{e3} + x Z_m I_{cc}] \cdot \ell \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{12}(1) &= (e_{11} - e_{21}) &= [(B' - A') + x.(Z_c - Z_L)] \cdot \ell \cdot I_{cc} \\ V_{13}(1) &= (e_{11} - e_{31}) &= [(C' - A') + x.(Z_c - Z_m)] \cdot \ell \cdot I_{cc} \\ V_{23}(1) &= (e_{21} - e_{31}) &= [(C' - B') + x.(Z_L - Z_m)] \cdot \ell \cdot I_{cc} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} e_{12} &= [Z_e I_{e1} + Z_c I_{e2} + Z_c I_{e3} + x Z_c I_{cc}] \cdot \ell \\ e_{22} &= [Z_c I_{e1} + Z_e I_{e2} + Z_L I_{e3} + x Z_m I_{cc}] \cdot \ell \\ e_{32} &= [Z_c I_{e1} + Z_L I_{e2} + Z_e I_{e3} + x Z_L I_{cc}] \cdot \ell \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{12}(2) &= V_{12}(1) + (e_{12} - e_{22}) &= [2.(B' - A') + x.(2Z_c - Z_m - Z_L)] \cdot \ell \cdot I_{cc} \\ V_{13}(2) &= V_{13}(1) + (e_{12} - e_{32}) &= [2.(C' - A') + x.(2Z_c - Z_m - Z_L)] \cdot \ell \cdot I_{cc} \\ V_{23}(2) &= V_{23}(1) + (e_{22} - e_{32}) &= [2.(C' - B')] \cdot \ell \cdot I_{cc} \end{aligned}$$

Défaut au circuit n°2, SE1

$$\begin{aligned} e_{11} &= [Z_e I_{e1} + Z_c I_{e2} + Z_c I_{e3} + x \cdot Z_c \cdot I_{cc}] \cdot \ell \\ e_{21} &= [Z_c I_{e1} + Z_e I_{e2} + Z_L I_{e3} + Z_x \cdot I_{cc}] \cdot \ell \\ e_{31} &= [Z_c I_{e1} + Z_L I_{e2} + Z_e I_{e3} + x \cdot Z_L \cdot I_{cc}] \cdot \ell \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{12}(1) &= (e_{11} - e_{21}) &= [(B' - A') + x \cdot Z_c - Z_x] \cdot \ell \cdot I_{cc} \\ V_{13}(1) &= (e_{11} - e_{31}) &= [(C' - A') + x \cdot (Z_c - Z_L)] \cdot \ell \cdot I_{cc} \\ V_{23}(1) &= (e_{21} - e_{31}) &= [(C' - B') + (Z_x - x \cdot Z_L)] \cdot \ell \cdot I_{cc} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} e_{12} &= \{Z_e I_{e1} + Z_c I_{e2} + Z_c I_{e3} + [Z_c + (x-1) \cdot Z_m] \cdot I_{cc}\} \cdot \ell \\ e_{22} &= \{Z_c I_{e1} + Z_e I_{e2} + Z_L I_{e3} + [Z_e + (x-1) \cdot Z_c] \cdot I_{cc}\} \cdot \ell \\ e_{32} &= \{Z_c I_{e1} + Z_L I_{e2} + Z_e I_{e3} + [Z_L + (x-1) \cdot Z_c] \cdot I_{cc}\} \cdot \ell \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{12}(2) &= V_{12}(1) + (e_{12} - e_{22}) &= [2 \cdot (B' - A') - Z_x + 2Z_c - Z_e + (x-1) \cdot Z_m] \cdot \ell \cdot I_{cc} \\ V_{13}(2) &= V_{13}(1) + (e_{12} - e_{32}) &= [2 \cdot (C' - A') + (x+1) \cdot (Z_c - Z_L) + (x-1) \cdot (Z_m - Z_c)] \cdot \ell \cdot I_{cc} \\ V_{23}(2) &= V_{23}(1) + (e_{22} - e_{32}) &= [2 \cdot (C' - B') + Z_x - Z_e - (x-1) \cdot Z_L] \cdot \ell \cdot I_{cc} \end{aligned}$$

Défaut au circuit n°2, SE2

$$\begin{aligned} e_{11} &= [Z_e I_{e1} + Z_c I_{e2} + Z_c I_{e3} + x \cdot Z_c \cdot I_{cc}] \cdot \ell \\ e_{21} &= [Z_c I_{e1} + Z_e I_{e2} + Z_L I_{e3} + x \cdot Z_L \cdot I_{cc}] \cdot \ell \\ e_{31} &= [Z_c I_{e1} + Z_L I_{e2} + Z_e I_{e3} + x \cdot Z_m \cdot I_{cc}] \cdot \ell \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{12}(1) &= (e_{11} - e_{21}) &= [(B' - A') + x \cdot (Z_c - Z_L)] \cdot \ell \cdot I_{cc} \\ V_{13}(1) &= (e_{11} - e_{31}) &= [(C' - A') + x \cdot (Z_c - Z_m)] \cdot \ell \cdot I_{cc} \\ V_{23}(1) &= (e_{21} - e_{31}) &= [(C' - B') + x \cdot (Z_L - Z_m)] \cdot \ell \cdot I_{cc} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} e_{12} &= [Z_e I_{e1} + Z_c I_{e2} + Z_c I_{e3} + x \cdot Z_c \cdot I_{cc}] \cdot \ell \\ e_{22} &= [Z_c I_{e1} + Z_e I_{e2} + Z_L I_{e3} + Z_x \cdot I_{cc}] \cdot \ell \\ e_{32} &= [Z_c I_{e1} + Z_L I_{e2} + Z_e I_{e3} + x \cdot Z_L \cdot I_{cc}] \cdot \ell \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{12}(2) &= V_{12}(1) + (e_{12} - e_{22}) &= [2 \cdot (B' - A') + x \cdot (2Z_c - Z_L) - Z_x] \cdot \ell \cdot I_{cc} \\ V_{13}(2) &= V_{13}(1) + (e_{12} - e_{32}) &= [2 \cdot (C' - A') + x \cdot (2Z_c - Z_m - Z_L)] \cdot \ell \cdot I_{cc} \\ V_{23}(2) &= V_{23}(1) + (e_{22} - e_{32}) &= [2 \cdot (C' - B') + Z_x - x \cdot Z_m] \cdot \ell \cdot I_{cc} \end{aligned}$$

Défaut au circuit n°2, SE3

$$\begin{aligned} e_{11} &= [Z_e I_{e1} + Z_c I_{e2} + Z_c I_{e3} + x \cdot Z_m \cdot I_{cc}] \cdot \ell \\ e_{21} &= [Z_c I_{e1} + Z_e I_{e2} + Z_L I_{e3} + x \cdot Z_c \cdot I_{cc}] \cdot \ell \\ e_{31} &= [Z_c I_{e1} + Z_L I_{e2} + Z_e I_{e3} + x \cdot Z_c \cdot I_{cc}] \cdot \ell \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{12}(1) &= (e_{11} - e_{21}) &= [(B' - A') + x \cdot (Z_m - Z_c)] \cdot \ell \cdot I_{cc} \\ V_{13}(1) &= (e_{11} - e_{31}) &= [(C' - A') + x \cdot (Z_m - Z_c)] \cdot \ell \cdot I_{cc} \\ V_{23}(1) &= (e_{21} - e_{31}) &= [(C' - B')] \cdot \ell \cdot I_{cc} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} e_{12} &= [Z_e I_{e1} + Z_c I_{e2} + Z_c I_{e3} + x \cdot Z_c \cdot I_{cc}] \cdot \ell \\ e_{22} &= [Z_c I_{e1} + Z_e I_{e2} + Z_L I_{e3} + x \cdot Z_L \cdot I_{cc}] \cdot \ell \\ e_{32} &= [Z_c I_{e1} + Z_L I_{e2} + Z_e I_{e3} + x \cdot Z_m \cdot I_{cc}] \cdot \ell \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{12}(2) &= V_{12}(1) + (e_{12} - e_{22}) &= [2 \cdot (B' - A') + x \cdot (Z_m - Z_L)] \cdot \ell \cdot I_{cc} \\ V_{13}(2) &= V_{13}(1) + (e_{12} - e_{32}) &= [2 \cdot (C' - A')] \cdot \ell \cdot I_{cc} \\ V_{23}(2) &= V_{23}(1) + (e_{22} - e_{32}) &= [2 \cdot (C' - B') + x \cdot (Z_L - Z_m)] \cdot \ell \cdot I_{cc} \end{aligned}$$

Défaut au circuit n°3, SE1

$$e_{11} = [Z_e I_{e1} + Z_c I_{e2} + Z_c I_{e3} + x.Z_c.I_{cc}] \cdot \ell$$

$$e_{21} = [Z_c I_{e1} + Z_e I_{e2} + Z_L I_{e3} + x.Z_L.I_{cc}] \cdot \ell$$

$$e_{31} = [Z_c I_{e1} + Z_L I_{e2} + Z_e I_{e3} + Z_x.I_{cc}] \cdot \ell$$

$$V_{12}(1) = (e_{11} - e_{21}) = [(B' - A') + x.(Z_c - Z_L)] \cdot \ell \cdot I_{cc}$$

$$V_{13}(1) = (e_{11} - e_{31}) = [(C' - A') + x.Z_c - Z_x] \cdot \ell \cdot I_{cc}$$

$$V_{23}(1) = (e_{21} - e_{31}) = [(C' - B') + x.Z_L - Z_x] \cdot \ell \cdot I_{cc}$$

$$e_{12} = \{Z_e I_{e1} + Z_c I_{e2} + Z_c I_{e3} + x.Z_c.I_{cc}\} \cdot \ell$$

$$e_{22} = \{Z_c I_{e1} + Z_e I_{e2} + Z_L I_{e3} + [Z_L + (x-1).Z_m].I_{cc}\} \cdot \ell$$

$$e_{32} = \{Z_c I_{e1} + Z_L I_{e2} + Z_e I_{e3} + [Z_e + (x-1).Z_L].I_{cc}\} \cdot \ell$$

$$V_{12}(2) = V_{12}(1) + (e_{12} - e_{22}) = [2.(B' - A') + x.(2Z_c - Z_m - Z_L) + Z_m - Z_L] \cdot \ell \cdot I_{cc}$$

$$V_{13}(2) = V_{13}(1) + (e_{12} - e_{32}) = [2.(C' - A') - Z_x - Z_e + 2.x.Z_c - (x-1).Z_L] \cdot \ell \cdot I_{cc}$$

$$V_{23}(2) = V_{23}(1) + (e_{22} - e_{32}) = [2.(C' - B') - Z_x + 2Z_L - Z_e + (x-1).Z_m] \cdot \ell \cdot I_{cc}$$

Défaut au circuit n°3, SE2

$$e_{11} = [Z_e I_{e1} + Z_c I_{e2} + Z_c I_{e3} + x.Z_m.I_{cc}] \cdot \ell$$

$$e_{21} = [Z_c I_{e1} + Z_e I_{e2} + Z_L I_{e3} + x.Z_c.I_{cc}] \cdot \ell$$

$$e_{31} = [Z_c I_{e1} + Z_L I_{e2} + Z_e I_{e3} + x.Z_c.I_{cc}] \cdot \ell$$

$$V_{12}(1) = (e_{11} - e_{21}) = [(B' - A') + x.(Z_m - Z_c)] \cdot \ell \cdot I_{cc}$$

$$V_{13}(1) = (e_{11} - e_{31}) = [(C' - A') + x.(Z_m - Z_c)] \cdot \ell \cdot I_{cc}$$

$$V_{23}(1) = (e_{21} - e_{31}) = [(C' - B')] \cdot \ell \cdot I_{cc}$$

$$e_{12} = [Z_e I_{e1} + Z_c I_{e2} + Z_c I_{e3} + x.Z_c.I_{cc}] \cdot \ell$$

$$e_{22} = [Z_c I_{e1} + Z_e I_{e2} + Z_L I_{e3} + x.Z_L.I_{cc}] \cdot \ell$$

$$e_{32} = [Z_c I_{e1} + Z_L I_{e2} + Z_e I_{e3} + Z_x.I_{cc}] \cdot \ell$$

$$V_{12}(2) = V_{12}(1) + (e_{12} - e_{22}) = [2.(B' - A') + x.(Z_m - Z_L)] \cdot \ell \cdot I_{cc}$$

$$V_{13}(2) = V_{13}(1) + (e_{12} - e_{32}) = [2.(C' - A') + x.Z_m - Z_x] \cdot \ell \cdot I_{cc}$$

$$V_{23}(2) = V_{23}(1) + (e_{22} - e_{32}) = [2.(C' - B') + x.Z_L - Z_x] \cdot \ell \cdot I_{cc}$$

Défaut au circuit n°3, SE3

$$e_{11} = [Z_e I_{e1} + Z_c I_{e2} + Z_c I_{e3} + x.Z_c.I_{cc}] \cdot \ell$$

$$e_{21} = [Z_c I_{e1} + Z_e I_{e2} + Z_L I_{e3} + x.Z_m.I_{cc}] \cdot \ell$$

$$e_{31} = [Z_c I_{e1} + Z_L I_{e2} + Z_e I_{e3} + x.Z_L.I_{cc}] \cdot \ell$$

$$V_{12}(1) = (e_{11} - e_{21}) = [(B' - A') + x.(Z_c - Z_m)] \cdot \ell \cdot I_{cc}$$

$$V_{13}(1) = (e_{11} - e_{31}) = [(C' - A') + x.(Z_c - Z_L)] \cdot \ell \cdot I_{cc}$$

$$V_{23}(1) = (e_{21} - e_{31}) = [(C' - B') + x.(Z_m - Z_L)] \cdot \ell \cdot I_{cc}$$

$$e_{12} = [Z_e I_{e1} + Z_c I_{e2} + Z_c I_{e3} + x.Z_m.I_{cc}] \cdot \ell$$

$$e_{22} = [Z_c I_{e1} + Z_e I_{e2} + Z_L I_{e3} + x.Z_c.I_{cc}] \cdot \ell$$

$$e_{32} = [Z_c I_{e1} + Z_L I_{e2} + Z_e I_{e3} + x.Z_c.I_{cc}] \cdot \ell$$

$$V_{12}(2) = V_{12}(1) + (e_{12} - e_{22}) = [2.(B' - A')] \cdot \ell \cdot I_{cc}$$

$$V_{13}(2) = V_{13}(1) + (e_{12} - e_{32}) = [2.(C' - A') + x.(Z_m - Z_L)] \cdot \ell \cdot I_{cc}$$

$$V_{23}(2) = V_{23}(1) + (e_{22} - e_{32}) = [2.(C' - B') + x.(Z_m - Z_L)] \cdot \ell \cdot I_{cc}$$

Les tensions entre écrans au niveau des arrêts d'écrans sont :

$$\begin{aligned} V_{12}[1] &= [(B'-A') + u_1.] \cdot \ell \cdot I_{cc} & V_{12}[2] &= [2.(B'-A') + u_2.] \cdot \ell \cdot I_{cc} \\ V_{13}[1] &= [(C'-A') + v_1.] \cdot \ell \cdot I_{cc} & V_{13}[2] &= [2.(C'-A') + v_2.] \cdot \ell \cdot I_{cc} \end{aligned}$$

Tableau A1 - 5 : u_1, v_1, u_2, v_2

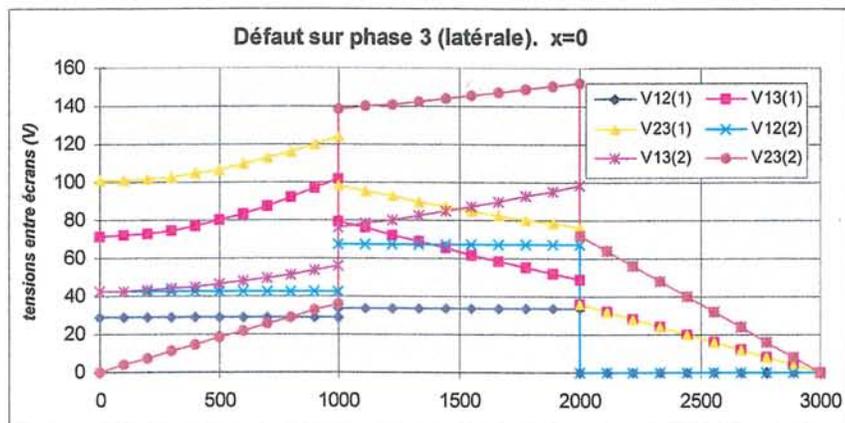
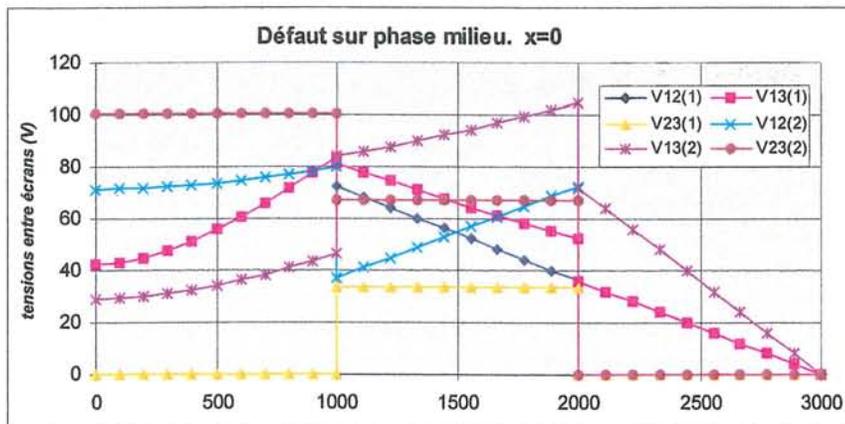
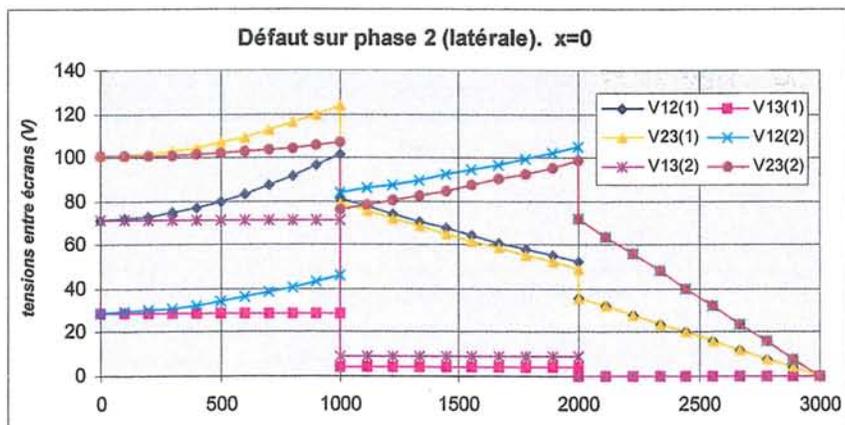
Défaut		Section élémentaire 1	Section élémentaire 2	Section élémentaire 3
circuit n°1	u_1	$Z_x - x.Z_c$	$x.(Z_c - Z_m)$	$x.(Z_c - Z_L)$
	v_1		$x.(Z_c - Z_L)$	$x.(Z_c - Z_m)$
	u_2	$Z_x + Z_e - 2Z_c - (x-1).Z_L$	$Z_x - x.Z_m$	$x.(2Z_c - Z_m - Z_L)$
	v_2	$Z_x + Z_e - 2Z_c - (x-1).Z_m$	$Z_x - x.Z_L$	
circuit n°2	u_1	$x.Z_c - Z_x$	$x.(Z_c - Z_L)$	$x.(Z_m - Z_c)$
	v_1	$x.(Z_c - Z_L)$	$x.(Z_c - Z_m)$	
	u_2	$-Z_x - Z_e + 2Z_c + (x-1).Z_m$	$x.(2Z_c - Z_L) - Z_x$	$x.(Z_m - Z_L)$
	v_2	$x.(Z_m - Z_L) + (2Z_c - Z_m - Z_L)$	$x.(2Z_c - Z_m - Z_L)$	0
circuit n°3	u_1	$x.(Z_c - Z_L)$	$x.(Z_m - Z_c)$	$x.(Z_c - Z_m)$
	v_1	$x.Z_c - Z_x$		$x.(Z_c - Z_L)$
	u_2	$x.(2Z_c - Z_m - Z_L) + (Z_m - Z_L)$	$x.(Z_m - Z_L)$	0
	v_2	$-Z_x - Z_e + 2x.Z_c - (x-1).Z_L$	$x.Z_m - Z_x$	$x.(Z_m - Z_L)$

Tableau A1 - 6 : Tension entre écrans aux points de permutation d'écran

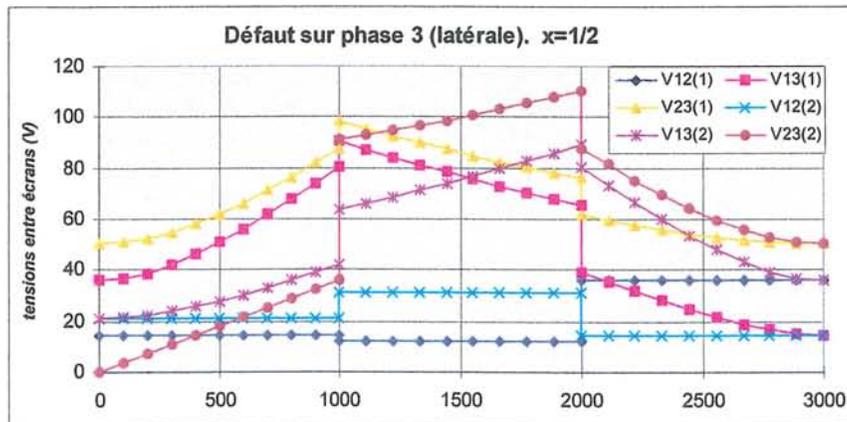
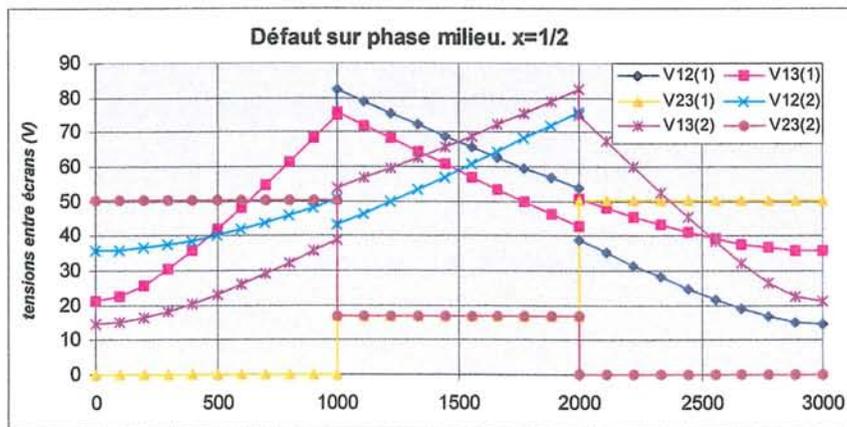
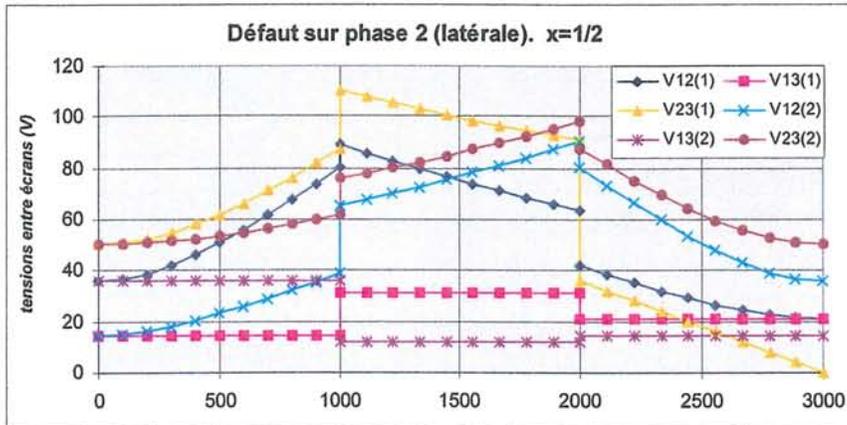
		Section élémentaire 1	Section élémentaire 2	Section élémentaire 3
Défaut circuit n°1	V ₁₂ [1]	$2 \cdot (\frac{y}{L} - \frac{1}{3}) \cdot R_e + x \cdot (Z_m - Z_c)$	$-\beta_1 \cdot R_e - \frac{x}{3} (3Z_m - 2Z_c - Z_L) - \frac{1}{3} (Z_m - 2Z_c + Z_L)$	$-\beta_1 \cdot R_e + \frac{2x}{3} (Z_c - Z_L)$
	V ₁₃ [1]		$-\beta_2 \cdot R_e + \frac{2x}{3} (Z_c - Z_L) - \frac{2}{3} (Z_m - Z_c)$	$-\beta_1 \cdot R_e - \frac{x}{3} (3Z_m - 2Z_c - Z_L)$
	V ₂₃ [1]	0	$(x - \frac{1}{3}) \cdot (Z_m - Z_L)$	$-\frac{x}{3} \cdot (Z_m - Z_L)$
	V ₁₂ [2]	$(\frac{y}{L} - \frac{1}{3}) \cdot R_e + \frac{x-1}{3} (3Z_m - 2Z_c - Z_L)$	$(\frac{y}{L} - \frac{2}{3}) \cdot R_e + \frac{2x}{3} (Z_L - Z_c) - \frac{2}{3} (Z_m - 2Z_c + Z_L)$	
	V ₁₃ [2]	$(\frac{y}{L} - \frac{1}{3}) \cdot R_e + \frac{2 \cdot (x-1)}{3} (Z_L - Z_c)$	$(\frac{y}{L} - \frac{2}{3}) \cdot R_e + \frac{x}{3} (3Z_m - 2Z_c - Z_L) - \frac{4}{3} (Z_m - Z_c)$	$-2\beta_1 \cdot R_e - \frac{x}{3} (3Z_m - 4Z_c + Z_L)$
	V ₂₃ [2]	$-\frac{x-1}{3} \cdot (Z_m - Z_L)$	$(x - \frac{2}{3}) \cdot (Z_m - Z_L)$	0
Défaut circuit n°2	V ₁₂ [1]	$-2 \cdot (\frac{y}{L} - \frac{1}{3}) \cdot R_e - \frac{x-1}{3} \cdot (3Z_m - 2Z_c - Z_L)$	$\beta_1 \cdot R_e + \frac{2x}{3} \cdot (Z_c - Z_L) + \frac{2}{3} (Z_m - Z_c)$	$\beta_1 \cdot R_e + \frac{x}{3} \cdot (3Z_m - 4Z_c + Z_L)$
	V ₁₃ [1]	$\frac{2 \cdot (x-1)}{3} (Z_c - Z_L)$	$-\frac{x}{3} \cdot (3Z_m - 2Z_c - Z_L) + \frac{1}{3} (Z_m - 2Z_c + Z_L)$	$\frac{x}{3} \cdot (3Z_m - 4Z_c + Z_L)$
	V ₂₃ [1]	$2 \cdot (\frac{y}{L} - \frac{1}{3}) \cdot R_e + (x-1) \cdot (Z_m - Z_L)$	$-\beta_2 \cdot R_e - (x + \frac{1}{3}) \cdot (Z_m - Z_L)$	$-\beta_1 \cdot R_e$
	V ₁₂ [2]	$-(\frac{y}{L} - \frac{1}{3}) \cdot R_e + \frac{2 \cdot (x-1)}{3} \cdot (Z_L - Z_c)$	$-(\frac{y}{L} - \frac{2}{3}) \cdot R_e - \frac{x}{3} \cdot (3Z_m - 4Z_c + Z_L) + \frac{4}{3} (Z_m - Z_c)$	$2\beta_1 \cdot R_e + \frac{x}{3} \cdot (3Z_m - 2Z_c - Z_L)$
	V ₁₃ [2]	$\frac{x-1}{3} \cdot (3Z_m - 2Z_c - Z_L)$	$-\frac{x}{3} \cdot (3Z_m - 4Z_c + Z_L) + \frac{2}{3} \cdot (Z_m - 2Z_c + Z_L)$	$\frac{2x}{3} \cdot (Z_L - Z_c)$
V ₂₃ [2]	$(\frac{y}{L} - \frac{1}{3}) \cdot R_e + (x-1) \cdot (Z_m - Z_L)$	$(\frac{y}{L} - \frac{2}{3}) \cdot R_e - \frac{2}{3} \cdot (Z_m - Z_L)$	$-2\beta_1 \cdot R_e - (Z_m - Z_L)$	
Défaut circuit n°3	V ₁₂ [1]	= V ₁₃ [1] circuit 2	$\frac{x}{3} \cdot (3Z_m - 4Z_c + Z_L) - \frac{1}{3} \cdot (Z_m - Z_L)$	$-\frac{x}{3} \cdot (3Z_m - 2Z_c - Z_L)$
	V ₁₃ [1]	= V ₁₂ [1] circuit 2	$\beta_1 \cdot R_e + \frac{x}{3} (3Z_m - 4Z_c + Z_L) + \frac{1}{3} (Z_m - Z_L)$	$\beta_1 \cdot R_e + \frac{2x}{3} (Z_c - Z_L)$
	V ₂₃ [1]	= - V ₂₃ [1] circuit 2	$\beta_1 \cdot R_e + \frac{2}{3} (Z_m - Z_L)$	$\beta_1 \cdot R_e + x \cdot (Z_m - Z_L)$
	V ₁₂ [2]	$-\frac{x-1}{3} \cdot (3Z_m - 4Z_c + Z_L)$	$\frac{x}{3} \cdot (3Z_m - 2Z_c - Z_L) - \frac{2}{3} \cdot (Z_m - Z_L)$	= V ₁₃ [2] circuit 2
	V ₁₃ [2]	$-(\frac{y}{L} - \frac{1}{3}) \cdot R_e - \frac{x-1}{3} \cdot (3Z_m - 4Z_c + Z_L)$	$-(\frac{y}{L} - \frac{2}{3}) \cdot R_e + \frac{2x}{3} (Z_L - Z_c) + \frac{2}{3} (Z_m - Z_L)$	= V ₁₂ [2] circuit 2
V ₂₃ [2]	$-(\frac{y}{L} - \frac{1}{3}) \cdot R_e$	$-(\frac{y}{L} - \frac{2}{3}) \cdot R_e - (x - \frac{4}{3}) \cdot (Z_m - Z_L)$	= - V ₂₃ [2] circuit 2	

Annexe 2 Tensions entre écrans aux permutations en fonction de la position du défaut

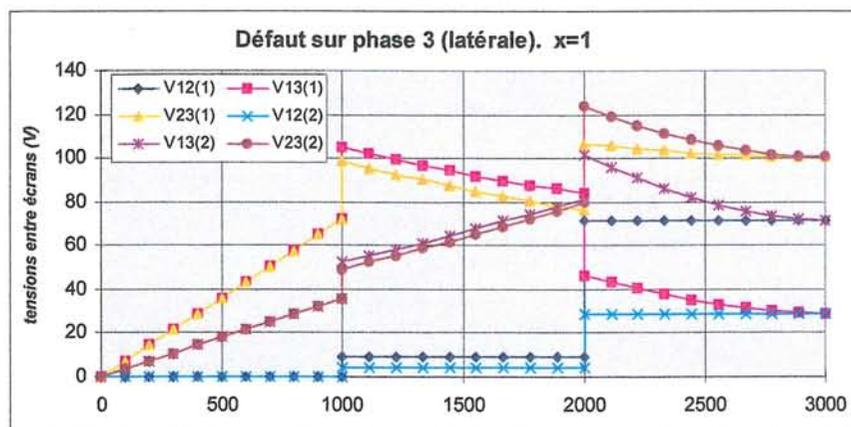
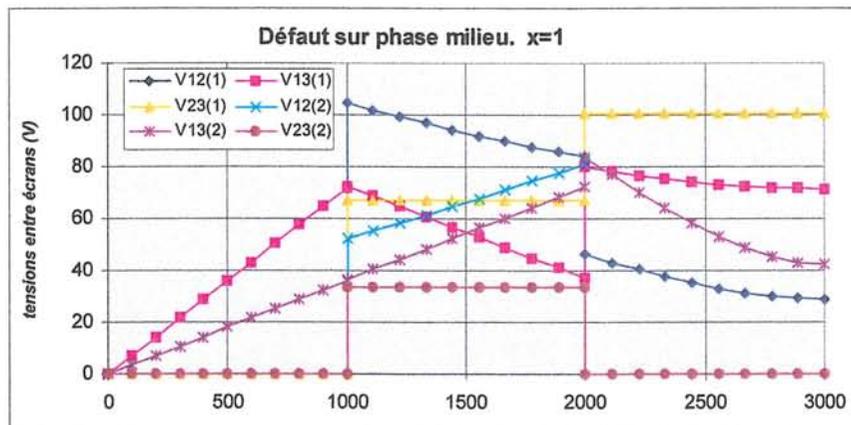
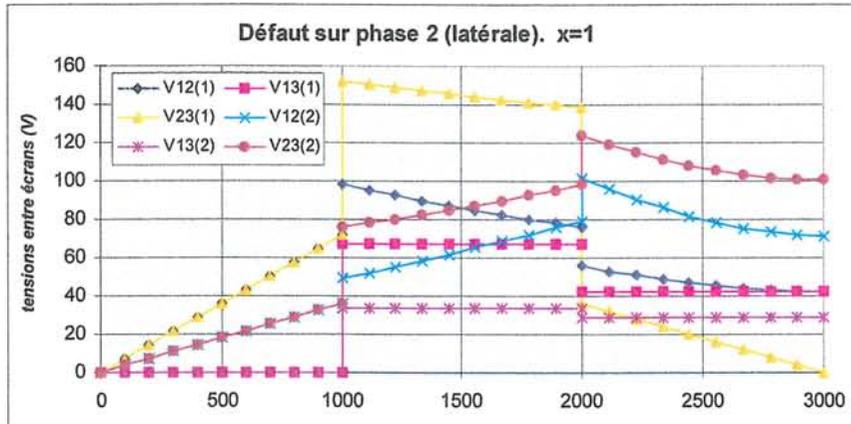
Caractéristiques des câbles en cuivre de section 1600 mm ² utilisés	
Rayon moyen (mètres)	0,06
Résistance linéique (Ohm/km)	0,1
Courant de court-circuit (Ampères)	1000
Section élémentaire (mètres)	1000



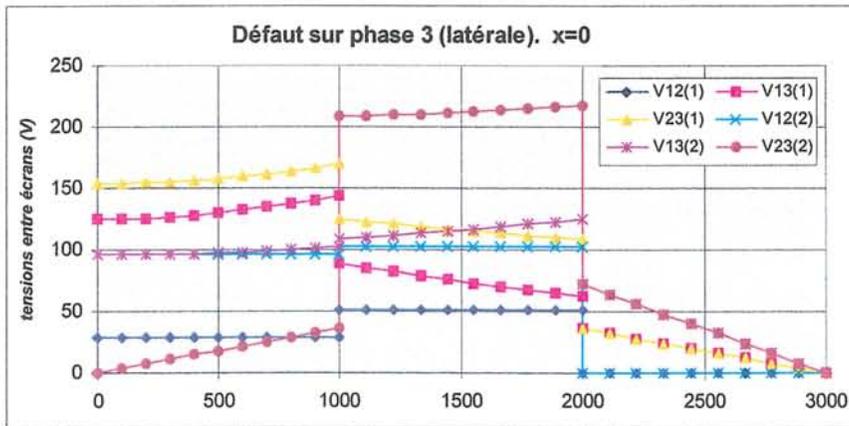
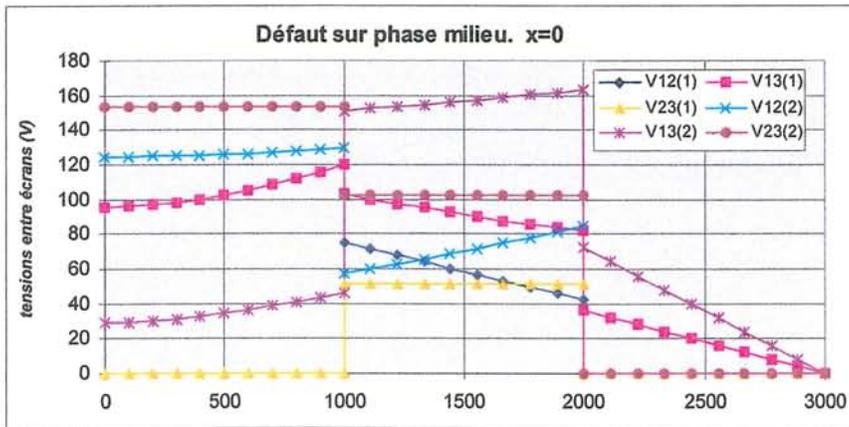
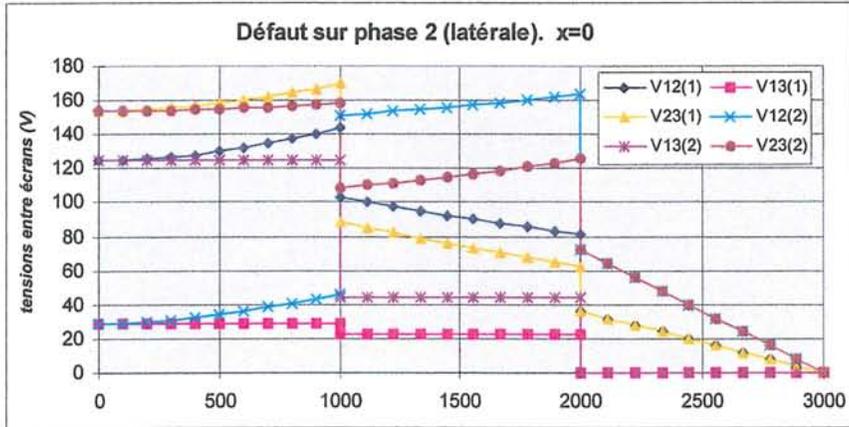
Pose en nappe jointif - Entraxe $S = 0.15\text{m}$ - Répartition du courant I_{cc} : $x = 0$



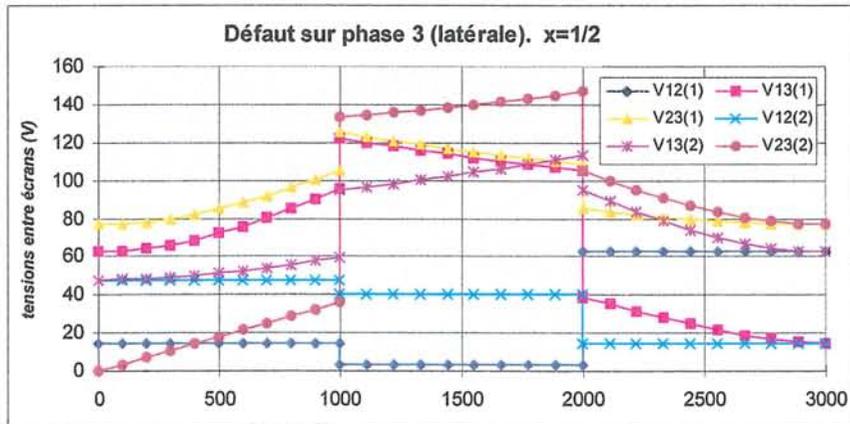
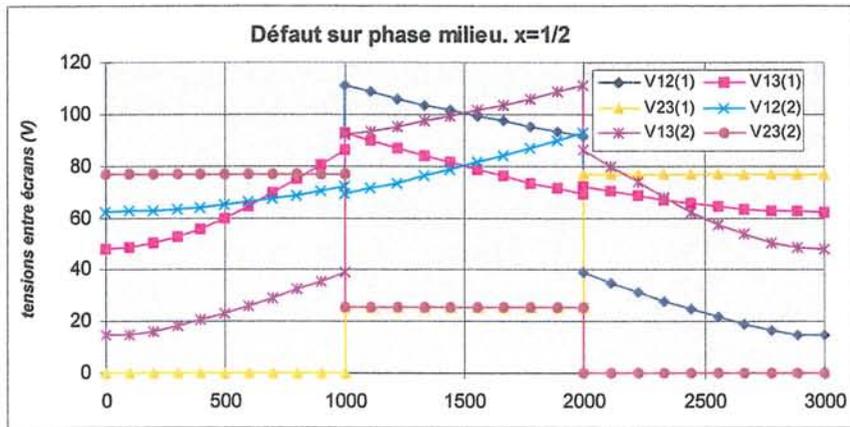
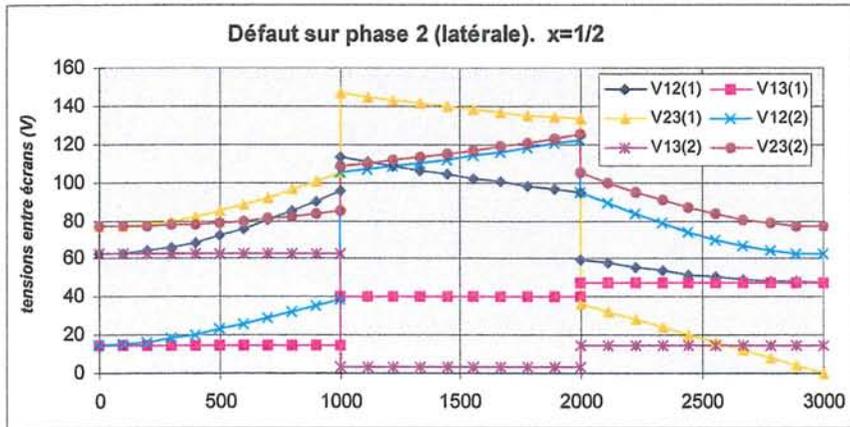
Pose en nappe jointif - Entraxe $S = 0.15\text{m}$ - Répartition du courant I_{cc} : $x = 0,5$



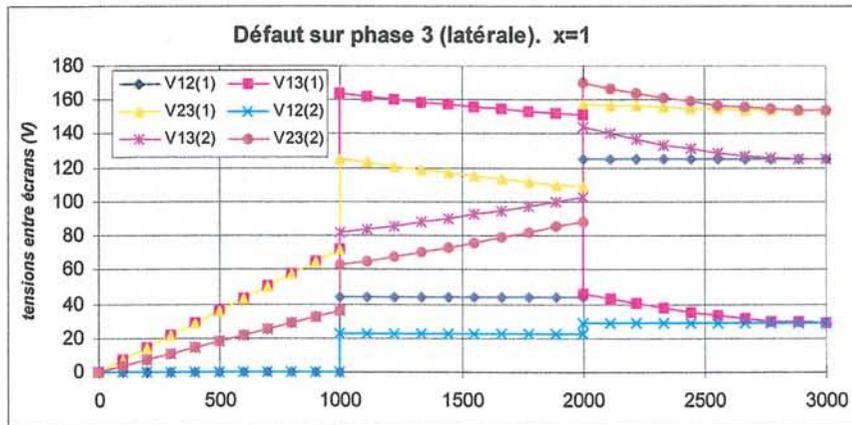
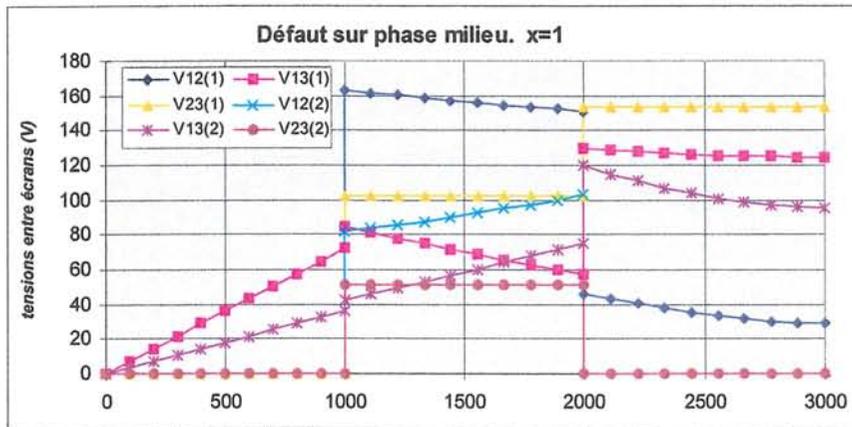
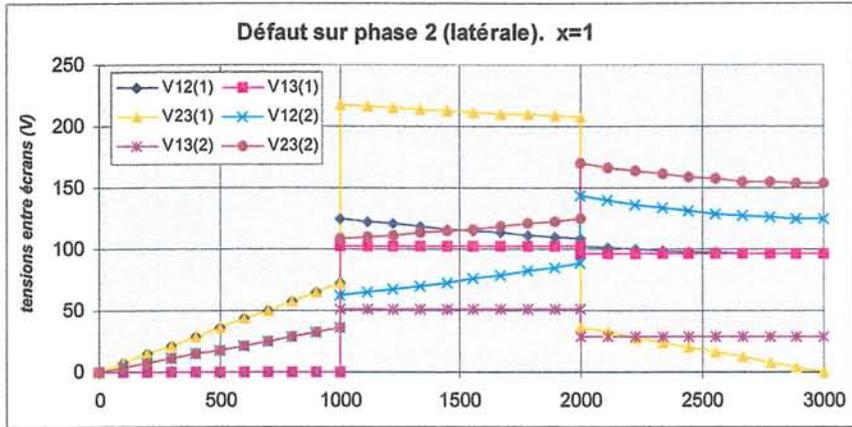
Pose en nappe jointif - Entraxe $S = 0.15m$ - Répartition du courant I_{cc} : $x = 1$



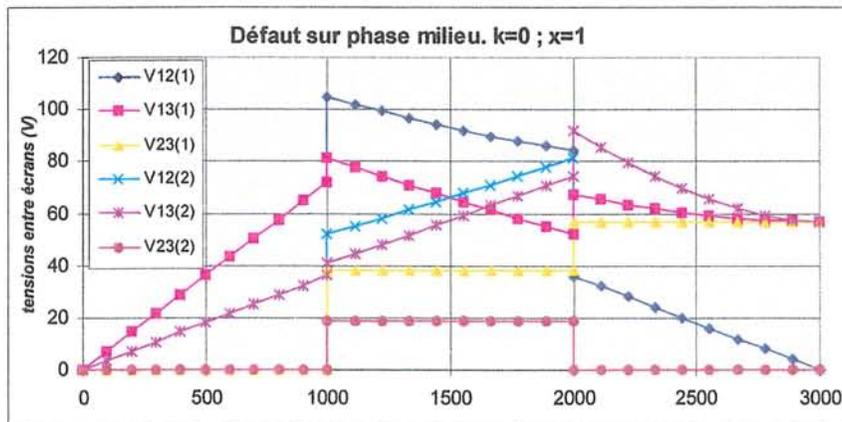
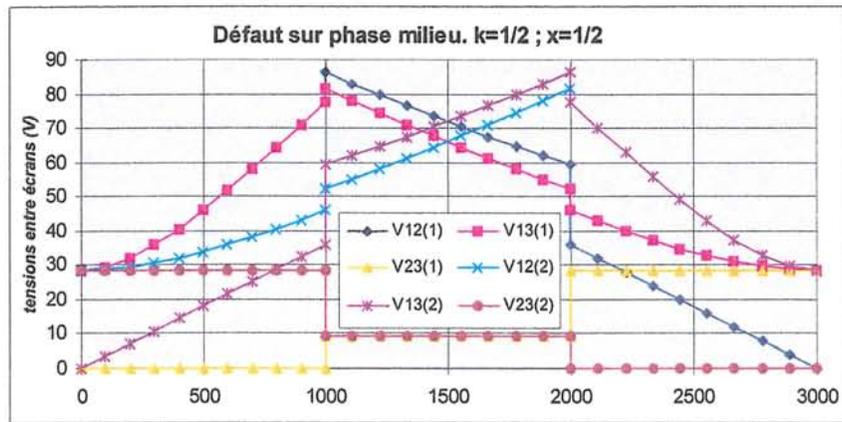
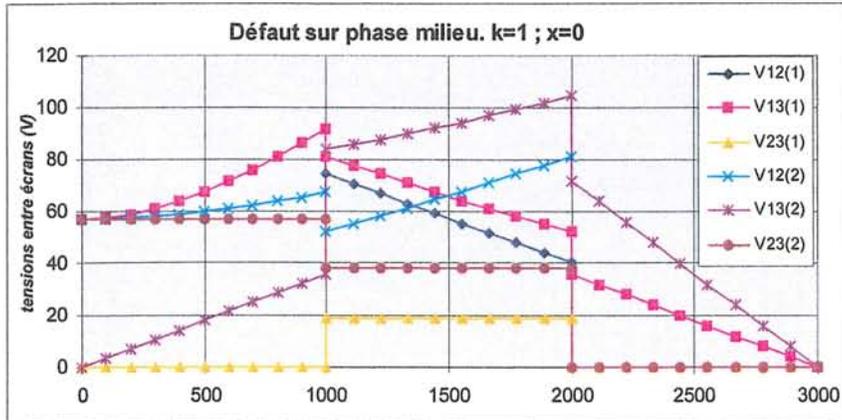
Pose en nappe - Entraxe $S = 0.35\text{m}$ - Répartition du courant I_{cc} : $x = 0$



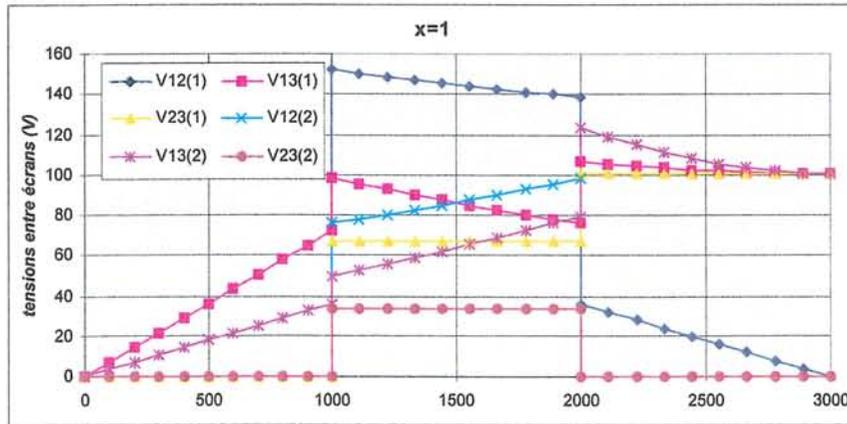
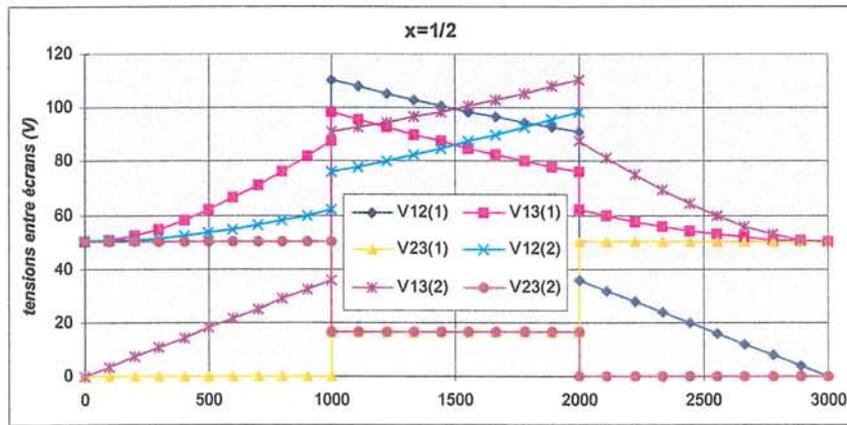
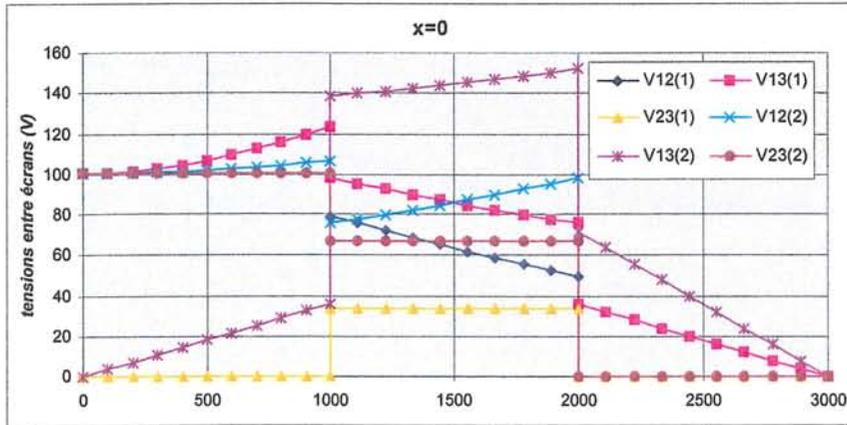
Pose en nappe - Entraxe $S = 0.35m$ - Répartition du courant I_{cc} : $x = 0,5$



Pose en nappe - Entraxe S = 0.35m - Répartition du courant I_{cc} : $x = 1$



Pose en trèfle jointif - Entraxe $S = 0.15\text{m}$ - Répartition du courant I_{cc} : $x = 0 - 0,5 - 1$



Pose en trèfle - Entraxe S = 0.3m - Répartition du courant Icc : x = 0 - 0,5 - 1

Annexe 3
Equation liant les courants
cas du défaut interne à la liaison souterraine
insérée dans un réseau aérien.

1 - Détermination de v et v' (tensions entre l'âme de la phase de défaut en défaut et les écrans à l'extrémité de la liaison respectivement à gauche et à droite).

$$\begin{aligned} v &= X_0 \cdot I_e + X_1 \cdot I_{cc} + X_2 \cdot I'_{cc} && \text{(côté gauche)} \\ v' &= X'_0 \cdot I_e + X'_1 \cdot I_{cc} + X'_2 \cdot I'_{cc} && \text{(côté droite)} \end{aligned}$$

Nous allons étudier dans ce paragraphe les défauts provoquant sur le circuit d'écran n°1 dans les quatre positions spécifiques ci-dessous :

1. à la fin de la section élémentaire 1 ($y/L = 0$)
2. au début de la section élémentaire 2 ($y/L = 1/3$)
3. à la fin de la section élémentaire 2 ($y/L = 0$)
4. au début de la section élémentaire 3 ($y/L = 0$)

1. Défaut à la fin de la section élémentaire 1 ($y/L = 0$) :

$$\begin{aligned} v &= \frac{1}{3} [Z_a I_{cc} + Z_c(I_{e2} + I_{e3}) + Z_m I_{e1} - Z_e I_{e1} - Z_m I_{cc} - Z_c(I_{e2} + I_{e3})] = \frac{1}{3} [(Z_a - Z_m) \cdot I_{cc} - R_e \cdot I_o + R_e(I_{e2} + I_{e3})] \\ v' &= \frac{1}{3} [2Z_a \cdot I'_{cc} - 2Z_c(I_{e1} + I_{cc} + I'_{cc}) - (Z_m + Z_L) \cdot (I_{e2} + I_{e3}) + 2Z_c(I_{e2} + I_{e3}) + 2Z_e(I_{e1} + I_{cc} + I'_{cc}) - 2Z_c \cdot I'_{cc}] \\ &= \frac{1}{3} [2(Z_a + Z_e - 2Z_c) \cdot I'_{cc} + 2(Z_e - Z_c) \cdot I_{cc} + 2(Z_e - Z_c) \cdot I_{e1} + (2Z_c - Z_m - Z_L)(I_{e2} + I_{e3})] \\ &= \frac{1}{3} [2(Z_a + Z_e - 2Z_c) \cdot I'_{cc} + 2(Z_e - Z_c) \cdot I_{cc} + 2(Z_e - Z_c) \cdot I_e + (4Z_c - 2Z_e - Z_m - Z_L)(I_{e2} + I_{e3})] \end{aligned}$$

Donc :

$$\begin{aligned} X_0 &= \frac{1}{3} (2a_2 - 1) R_e && X'_0 = \frac{1}{3} [2(Z_e - Z_c) - 2a_2 (Z_m + 2Z_e - 4Z_c + Z_L)] \\ X_1 &= \frac{1}{3} [(Z_a - Z_m) + R_e \cdot (b'_2 + b''_2 + b'_3 + b''_3)] && X'_1 = \frac{1}{3} [2(Z_e - Z_c) - (b'_2 + b''_2 + b'_3 + b''_3) (Z_m + 2Z_e - 4Z_c + Z_L)] \\ X_2 &= \frac{1}{3} R_e \cdot (b''_2 + b''_3) && X'_2 = \frac{1}{3} [2(Z_a + Z_e - 2Z_c) - (b''_2 + b''_3) (Z_m + 2Z_e - 4Z_c + Z_L)] \end{aligned}$$

2. Défaut au début de la section élémentaire 2 (y/L = 1/3) :

$$\begin{aligned}
v &= \frac{1}{3} [Z_a I_{cc} + Z_c I_{e1} + Z_L I_{e3} + Z_m I_{e2} - Z_e I_{e1} - Z_c (I_{e2} + I_{e3}) - Z_c I_{cc}] \\
&= \frac{1}{3} [(Z_a - Z_c) I_{cc} + (Z_c - Z_e) I_e + (Z_m - 2Z_c + Z_e) I_{e2} + (Z_L - 2Z_c + Z_e) I_{e3}] \\
v' &= \frac{1}{3} [2Z_a I'_{cc} - Z_c (I_{e1} + I_{cc} + I'_{cc}) - Z_L I_{e2} - Z_m I_{e3} - Z_c (I_{e2} + I_{e3}) - Z_m (I_{e1} + I_{cc} + I'_{cc}) + 2Z_c (I_{e1} + I_{cc} + I'_{cc}) + \\
&\quad + 2Z_c (I_{e2} + I_{e3}) - (Z_m + Z_c) I'_{cc}] \\
&= \frac{1}{3} [(2Z_e - Z_m - Z_c) I_e + (2Z_e - Z_m - Z_c) I_{cc} + 2(Z_a + Z_e - Z_m - Z_c) I'_{cc} + (2Z_c + Z_m - 2Z_e - Z_L) I_{e2} + 2(Z_c - Z_e) I_{e3}]
\end{aligned}$$

Donc :

$$\begin{aligned}
X_o &= \frac{1}{3} [(Z_c - Z_e) + a_2 (Z_m + 2Z_e - 4Z_c + Z_L)] \\
X_1 &= \frac{1}{3} [(Z_a - Z_c) + (b'_2 + b''_2) (Z_m + Z_e - 2Z_c) + (b'_3 + b''_3) (Z_L + Z_e - 2Z_c)] \\
X_2 &= \frac{1}{3} [b''_2 (Z_m + Z_e - 2Z_c) + b''_3 (Z_L + Z_e - 2Z_c)] \\
X'_o &= \frac{1}{3} [(2Z_e - Z_m - Z_c) + a_2 (Z_m - 4Z_c + 4Z_e - Z_L)] \\
X'_1 &= \frac{1}{3} [(2Z_e - Z_m - Z_c) + (b'_2 + b''_2) (Z_m - 2Z_e + 2Z_c - Z_L) + 2(b'_3 + b''_3) (Z_c - Z_e)] \\
X'_2 &= \frac{1}{3} [2(Z_a + Z_e - Z_m - Z_c) + b''_2 (Z_m - 2Z_e + 2Z_c - Z_L) + 2b''_3 (Z_c - Z_e)]
\end{aligned}$$

3. Défaut à la fin de la section élémentaire 2 (y/L = 0) :

$$\begin{aligned}
v &= \frac{1}{3} [2Z_a I_{cc} + Z_c I_{e1} + Z_L I_{e3} + Z_m I_{e2} + Z_c (I_{e2} + I_{e3}) + Z_m I_{e1} - 2Z_e I_{e1} - 2Z_c (I_{e2} + I_{e3}) - (Z_m + Z_c) I_{cc}] \\
&= \frac{1}{3} [(2Z_a - Z_m - Z_c) I_{cc} + (Z_c + Z_m - 2Z_e) I_{e1} + (Z_m - Z_c) I_{e2} + (Z_L - Z_c) I_{e3}] \\
&= \frac{1}{3} [(2Z_a - Z_m - Z_c) I_{cc} + (Z_c + Z_m - 2Z_e) I_e + 2(Z_c - Z_e) I_{e2} + (2Z_e + Z_L - Z_m - 2Z_c) I_{e3}] \\
v' &= \frac{1}{3} [Z_a I'_{cc} - Z_c (I_{e1} + I_{cc} + I'_{cc}) - Z_L I_{e2} - Z_m I_{e3} + Z_e (I_{e1} + I_{cc} + I'_{cc}) + Z_c (I_{e2} + I_{e3}) - Z_c I'_{cc}] \\
&= \frac{1}{3} [(Z_e - Z_c) I_{cc} + (Z_a + Z_e - 2Z_c) I'_{cc} + (Z_e - Z_c) I_{e1} + (Z_c - Z_L) I_{e2} + (Z_c - Z_m) I_{e3}] \\
&= \frac{1}{3} [(Z_e - Z_c) I_{cc} + (Z_a + Z_e - 2Z_c) I'_{cc} + (Z_e - Z_c) I_e + (2Z_c - Z_e - Z_L) I_{e2} + (2Z_c - Z_e - Z_m) I_{e3}]
\end{aligned}$$

Donc :

$$\begin{aligned}
 X_0 &= \frac{1}{3} [(Z_c + Z_m - 2Z_e) - a_2(Z_m - 4Z_e + 4Z_c - Z_L)] \\
 X_1 &= \frac{1}{3} [(2Z_a - Z_m - Z_c) + 2.(b'_2 + b''_2)(Z_e - Z_c) - (b'_3 + b''_3).(Z_m - 2Z_e + 2Z_c - Z_L)] \\
 X_2 &= \frac{1}{3} [2b''_2(Z_e - Z_c) - b''_3(Z_m - 2Z_e + 2Z_c - Z_L)] \\
 X'_0 &= \frac{1}{3} [(Z_e - Z_c) - a_2(Z_m + 2Z_e - 4Z_c + Z_L)] \\
 X'_1 &= \frac{1}{3} [(Z_e - Z_c) - (b'_2 + b''_2).(Z_L + Z_e - 2Z_c) - (b'_3 + b''_3).(Z_m + Z_e - 2Z_c)] \\
 X'_2 &= \frac{1}{3} [(Z_a + Z_e - 2Z_c) - b''_2.(Z_L + Z_e - 2Z_c) - b''_3.(Z_m + Z_e - 2Z_c)]
 \end{aligned}$$

4. Défaut au début de la section élémentaire 3 ($y/L = 1/3$) :

$$\begin{aligned}
 v &= \frac{1}{3} [2Z_a I_{cc} + 2Z_c I_{e1} + (Z_L + Z_m).(I_{e2} + I_{e3}) - 2Z_e I_{e1} - 2Z_c(I_{e2} + I_{e3} + I_{cc})] \\
 &= \frac{1}{3} [2(Z_a - Z_c).I_{cc} + 2(Z_c - Z_e).I_{e1} + (Z_m + Z_L - 2Z_c).(I_{e2} + I_{e3})] \\
 &= \frac{1}{3} [2(Z_a - Z_c).I_{cc} + 2(Z_c - Z_e).I_e + (Z_m + Z_L - 4Z_c + 2Z_e).(I_{e2} + I_{e3})] \\
 v' &= \frac{1}{3} [Z_a.I'_{cc} - Z_m(I_{e1} + I_{cc} + I'_{cc}) - Z_c(I_{e2} + I_{e3}) + Z_e(I_{e1} + I_{cc} + I'_{cc}) + Z_c(I_{e2} + I_{e3}) - Z_m I'_{cc}] \\
 &= \frac{1}{3} [(Z_e - Z_m).I_{cc} + (Z_a + Z_e - 2Z_m).I'_{cc} + (Z_e - Z_m).I_{e1}] \\
 &= \frac{1}{3} [R_e.I_{cc} + (Z_a + Z_e - 2Z_m).I'_{cc} + R_e.I_e - R_e(I_{e2} + I_{e3})]
 \end{aligned}$$

Donc :

$$\begin{aligned}
 X_0 &= \frac{1}{3} [2(Z_c - Z_e) + 2a_2.(Z_m + 2Z_e - 4Z_c + Z_L)] \\
 X_1 &= \frac{1}{3} [2(Z_a - Z_c) + (b'_2 + b''_2 + b'_3 + b''_3).(Z_m + 2Z_e - 4Z_c + Z_L)] \\
 X_2 &= \frac{1}{3} [(b''_2 + b''_3).(Z_m + 2Z_e - 4Z_c + Z_L)] \\
 X'_0 &= \frac{1}{3} R_e(1 - 2a_2) \\
 X'_1 &= \frac{1}{3} R_e[1 - (b'_2 + b''_2 + b'_3 + b''_3)] \\
 X'_2 &= \frac{1}{3} [(Z_a + Z_e - 2Z_m) - R_e(b''_2 + b''_3)]
 \end{aligned}$$

Tableau A3 - 1 : Coefficients X_0, X_1, X_2

		$v = X_0.I_0 + X_1.I_{cc} + X_2.I'_{cc}$		$v' = X'_0.I_0 + X'_1.I_{cc} + X'_2.I'_{cc}$
cas 1	X_0	$\frac{1}{3}(2a_2-1)R_c$	X'_0	$\frac{1}{3}[2(Z_c-Z_e) - 2a_2(Z_m+2Z_e-4Z_c+Z_L)]$
	X_1	$\frac{1}{3}[(Z_a-Z_m) + R_c.(b'_2+b''_2+b'_3+b''_3)]$	X'_1	$\frac{1}{3}[2(Z_e-Z_c) - (b'_2+b''_2+b'_3+b''_3)(Z_m+2Z_e-4Z_c+Z_L)]$
	X_2	$\frac{1}{3}R_c.(b''_2+b''_3)$	X'_2	$\frac{1}{3}[2(Z_a+Z_e-2Z_c) - (b''_2+b''_3)(Z_m+2Z_e-4Z_c+Z_L)]$
cas 2	X_0	$\frac{1}{3}[(Z_c-Z_e) + a_2(Z_m+2Z_e-4Z_c+Z_L)]$	X'_0	$\frac{1}{3}[(2Z_e-Z_m-Z_c) + a_2(Z_m-4Z_e+4Z_c-Z_L)]$
	X_1	$\frac{1}{3}[(Z_a-Z_c) + (b'_2+b''_2).(Z_m+Z_e-2Z_c) + (b'_3+b''_3).(Z_L+Z_e-2Z_c)]$	X'_1	$\frac{1}{3}[(2Z_e-Z_m-Z_c) + (b'_2+b''_2).(Z_m-2Z_e+2Z_c-Z_L) + 2(b'_3+b''_3).(Z_c-Z_e)]$
	X_2	$\frac{1}{3}[b''_2(Z_m+Z_e-2Z_c) + b''_3(Z_L+Z_e-2Z_c)]$	X'_2	$\frac{1}{3}[2(Z_a+Z_e-Z_m-Z_c) + b''_2(Z_m-2Z_e+2Z_c-Z_L) + 2b''_3.(Z_c-Z_e)]$
cas 3	X_0	$\frac{1}{3}[(Z_c+Z_m-2Z_e) - a_2.(Z_m-4Z_e+4Z_c-Z_L)]$	X'_0	$\frac{1}{3}[(Z_c-Z_e) - a_2(Z_m+2Z_e-4Z_c+Z_L)]$
	X_1	$\frac{1}{3}[(2Z_a-Z_m-Z_c) + 2.(b'_2+b''_2).(Z_e-Z_c) - (b'_3+b''_3).(Z_m-2Z_e+2Z_c-Z_L)]$	X'_1	$\frac{1}{3}[(Z_e-Z_c) - (b'_2+b''_2).(Z_L+Z_e-2Z_c) - (b'_3+b''_3).(Z_m+Z_e-2Z_c)]$
	X_2	$\frac{1}{3}[2b''_2(Z_c-Z_e) - b''_3.(Z_m-2Z_e+2Z_c-Z_L)]$	X'_2	$\frac{1}{3}[(Z_a+Z_e-2Z_c) - b''_2.(Z_L+Z_e-2Z_c) - b''_3.(Z_m+Z_e-2Z_c)]$
cas 4	X_0	$\frac{1}{3}[2(Z_c-Z_e) + 2a_2.(Z_m+2Z_e-4Z_c+Z_L)]$	X'_0	$\frac{1}{3}R_c(1-2a_2)$
	X_1	$\frac{1}{3}[2(Z_a-Z_c) + (b'_2+b''_2+b'_3+b''_3).(Z_m+2Z_e-4Z_c+Z_L)]$	X'_1	$\frac{1}{3}R_c[1 - (b'_2+b''_2+b'_3+b''_3)]$
	X_2	$\frac{1}{3}[(b''_2+b''_3).(Z_m+2Z_e-4Z_c+Z_L)]$	X'_2	$\frac{1}{3}[(Z_a+Z_e-2Z_m) - R_c(b''_2+b''_3)]$

Tableau A3 - 2 : Coefficients b''_1, b''_2, b''_3

		SE1	SE2	SE3
défaut C1	b''_2		$\left[\frac{\beta_2}{\Delta} + \frac{2.(Z_L - Z_c)}{3.\Delta.(Z_e - Z_L)} \right] \cdot R_e$	
	b''_3		$\left[\frac{\beta_2}{\Delta} + \frac{2.(Z_L - Z_c)}{3.\Delta.(Z_e - Z_L)} \right] R_e + \frac{Z_m - Z_L}{3.(Z_e - Z_L)}$	
défaut C2	b''_1	$\frac{\beta_1}{\Delta} \cdot R_e + \left(\frac{1}{3} - \frac{R_e}{\Delta} \right)$	$\frac{\beta_2}{\Delta} \cdot R_e + \left(\frac{1}{3} - \frac{R_e}{\Delta} \right)$	$\frac{\beta_3}{\Delta} \cdot R_e$
défaut C3			$\frac{\beta_2}{\Delta} \cdot R_e$	
défaut C2	b''_3	$\frac{\beta_1 \cdot Z_x + \frac{2}{3} \cdot (Z_c - Z_L)}{\Delta \cdot (Z_e - Z_L)} \cdot R_e + \frac{Z_m - Z_L}{3 \cdot (Z_e - Z_L)}$	$\frac{\beta_2 \cdot Z_x + \frac{2}{3} \cdot (Z_c - Z_L)}{\Delta \cdot (Z_e - Z_L)} \cdot R_e$	$\frac{\beta_3 \cdot Z_x \cdot R_e}{\Delta \cdot (Z_e - Z_L)}$
défaut C3	b''_2		$\frac{\beta_2 \cdot Z_x \cdot R_e}{\Delta \cdot (Z_e - Z_L)} + \frac{Z_m - Z_L}{3 \cdot (Z_e - Z_L)}$	
		$\Delta = 3Z_c - 4Z_e + Z_L$	$Z_x = Z_e - 2Z_c + Z_L$	

Annexe 4
Effet de la diminution de la résistance de l'une des prises de terre
aux extrémités de la liaison souterraine

Le premier tableau A4 - 1 met en évidence que la diminution simultanée de la résistance des 2 prises de terre terminales se traduit toujours par :

- * un accroissement du courant dans les écrans (inférieur à 10 %).
- * une diminution de la chute de tension dans ces prises de terre.

L'effet de la diminution de la résistance de l'une des prises de terre terminales dépend de la position par rapport au défaut comme le montrent les figures des pages qui suivent.

Tableau A4 - 1 : Effet de la diminution simultanée de la résistance des 2 prises de terre terminales

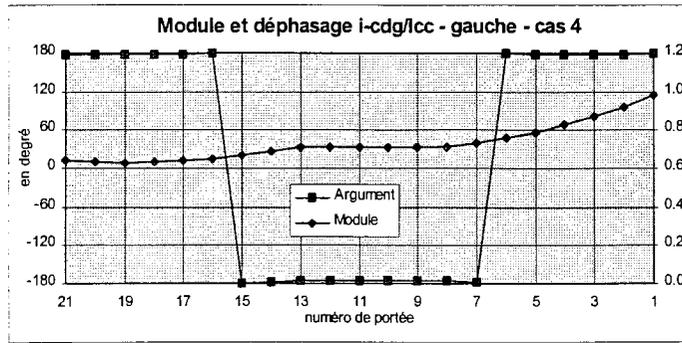
Cas de figure étudiés	Liaison souterraine								Ligne aérienne			
	R_a	R_b	I_{cc}	I'_{cc}	j^*R_a		j^*R_b		I_{LS}/I_{cc}	j^*R_x		I_{LA}/I_{cc}
	(Ω)	(Ω)	(A)	(A)	(V)	arg	(V)	arg	LS1 - LS2	(V)	arg.	LS1 - LS2
7PA-TS-7PA	10	10	27137	23086	8729	40	9284	-53	0,713	7821	-10	0,540
	2	2	27191	23032	6898	37	7374	-73	0,750	/	/	/
TS-14PA	10	10	27169	22990	1517	156	12010	-117	0,746	1787	-44	0,485
	2	2	27352	22975	1236	142	9682	-129	0,814	/	/	/
14PA-TS	10	10	27866	23130	21033	25	21468	18	0,949	20673	23	0,797
	2	2	28216	23406	13565	14	13977	5	0,95	/	/	/
2TS- 8PA	10	10	32717	22985	984	147	14004	-104	0,87 - 0,86	6713	-14	0,48 - 0,52
	2	2	32930	22906	822	132	10412	-117	0,91 - 0,9	/	/	/
8PA-2TS	10	10	33506	23183	21377	35	21244	15	0,91 - 0,97	20673	23	0,56 - 0,8
	2	2	33969	23445	14844	24	14027	1	0,92 - 0,96	/	/	/
14PA-TS	10	10	27100	23215	22603	14	21713	11	0,96	20344	19	0,8
	2	2	27331	23455	14832	4	14001	-1	0,96	/	/	/
8PA-2TS	10	10	32137	23365	33257	12	23754	0	0,88 - 0,97	20344	19	0,5 - 0,8
	2	2	32663	23549	22530	4	14900	-11	0,92 - 0,98	/	/	/

où : R_a et R_b : résistances des prises de terre aux extrémités gauche et droite d'un tronçon souterrain.
 j^*R_a , j^*R_b : montées en potentiel des prises de terre terminales des tronçons souterrains.
 j^*R_x : montée en potentiel de la prise de terre à la même position d'une liaison purement aérienne.
 I_{LS}/I_{cc} : courant dans l'écran équivalent du tronçon souterrain,
 I_{LA}/I_{cc} : courant dans le câble de garde de la portée à distance égale pour une liaison purement aérienne
PA : portée aérienne de 500 m.
TS : tronçon souterrain à permutation d'écrans de 3000 m.

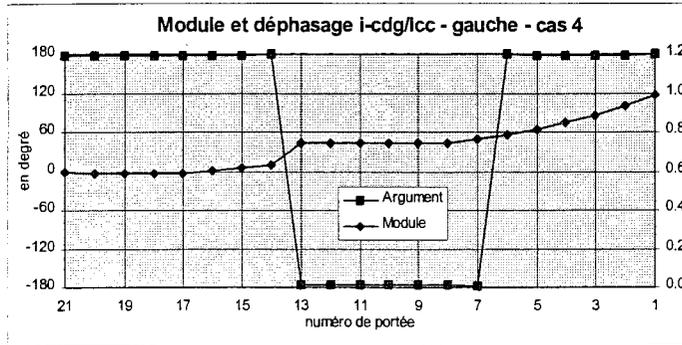
Dans les 5 premières configurations, le câble de garde est relié à la terre des 2 postes. Pour les deux derniers cas, il n'est pas relié à la terre du poste côté gauche mais l'est côté droit. La partie droite du réseau comporte toujours de 20 portées aériennes dans toutes les configurations étudiées.

7PA - LS - 7PA (CDG relié aux postes sources)

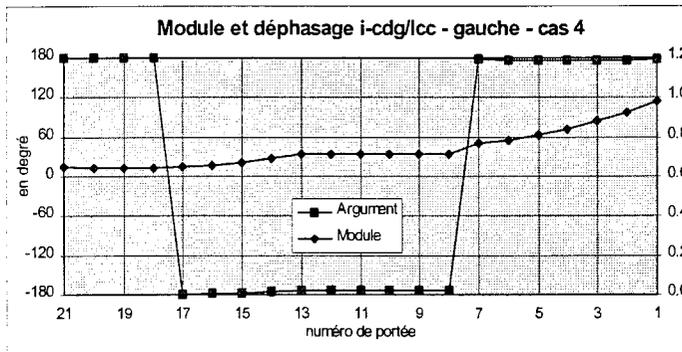
$R_a = R_b = 10 \Omega$



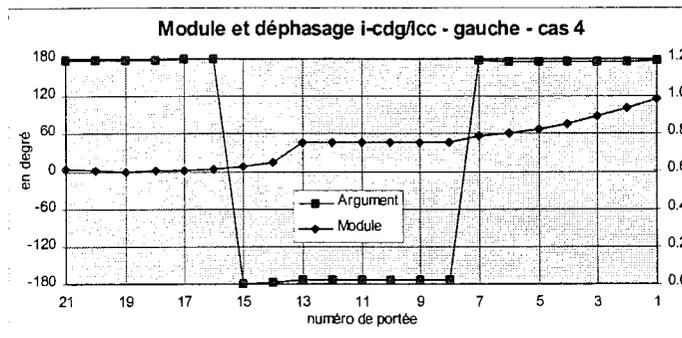
$R_a = 2 \Omega ; R_b = 10 \Omega$



$R_a = 10 \Omega ; R_b = 2 \Omega$

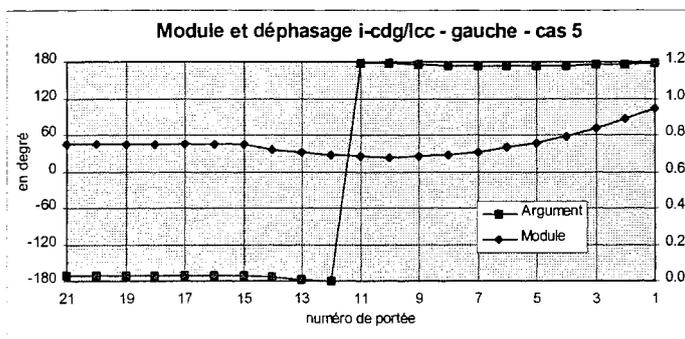


$R_a = R_b = 2 \Omega$

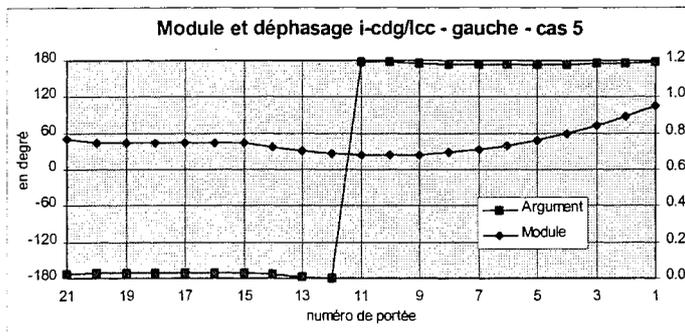


LS - 14 PA (CDG relié aux postes sources)

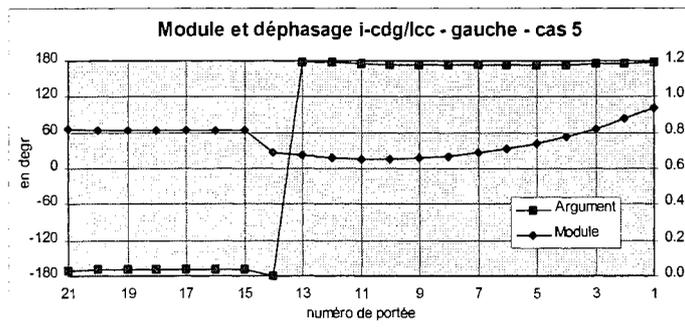
$R_a = R_b = 10 \Omega$



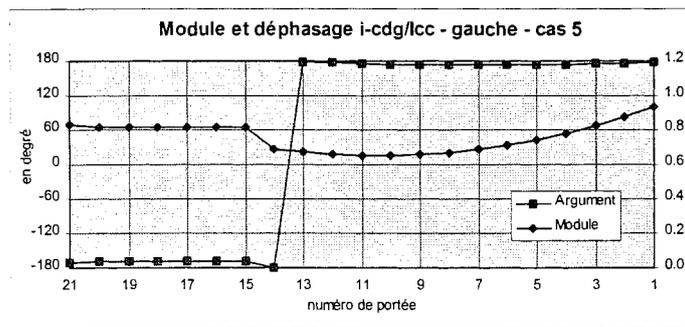
$R_a = 2 \Omega ; R_b = 10 \Omega$



$R_a = 10 \Omega ; R_b = 2 \Omega$

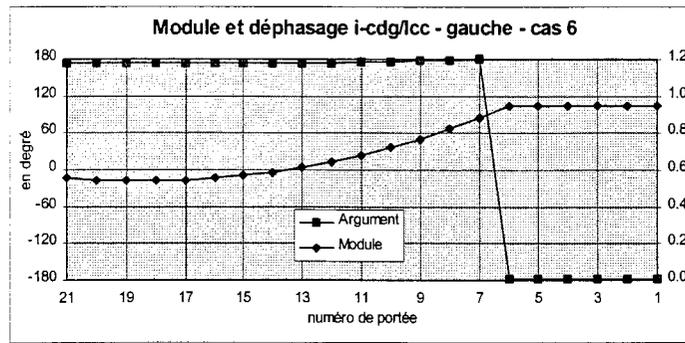


$R_a = R_b = 2 \Omega$

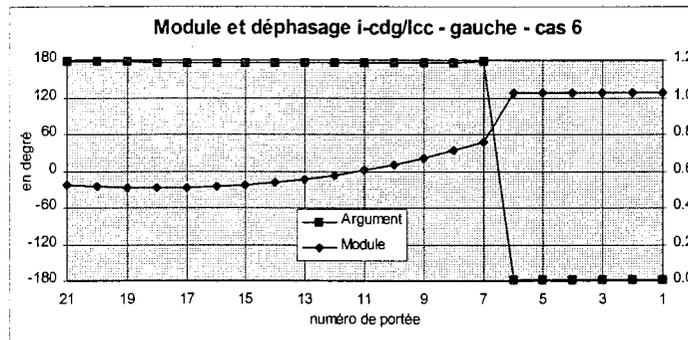


14 PA - LS (CDG relié aux postes sources)

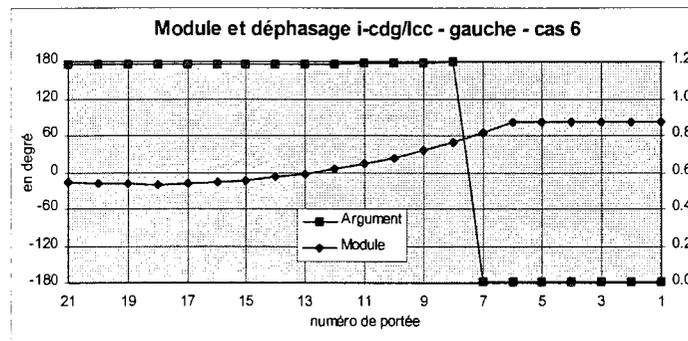
$R_a = R_b = 10 \Omega$



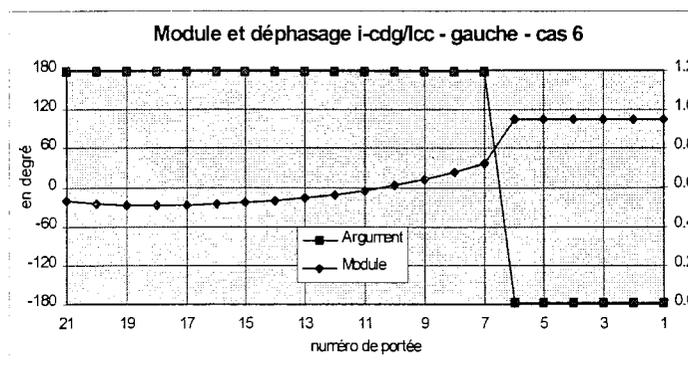
$R_a = 2 \Omega ; R_b = 10 \Omega$



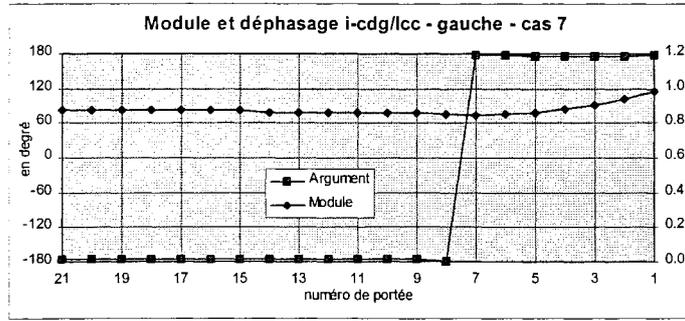
$R_a = 10 \Omega ; R_b = 2 \Omega$



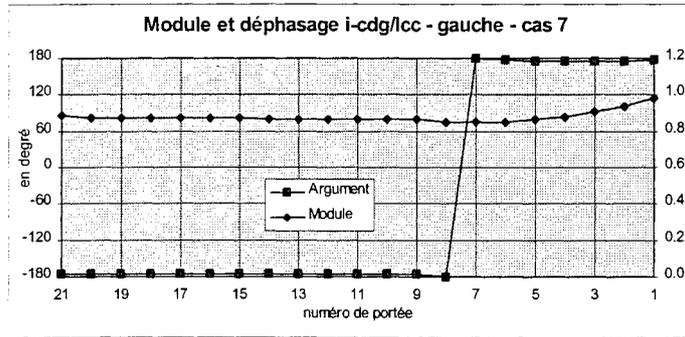
$R_a = R_b = 2 \Omega$



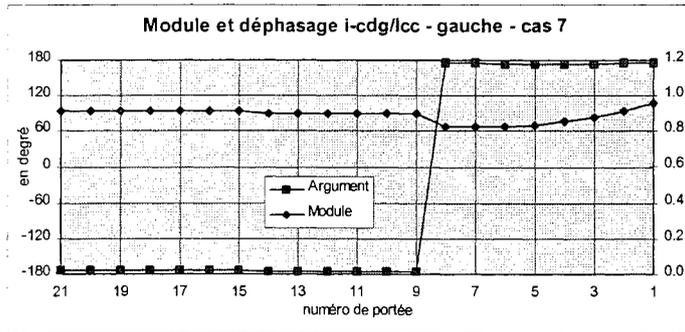
2LS - 8 PA (CDG relié aux postes sources)
Ra = Rb = 10 Ω



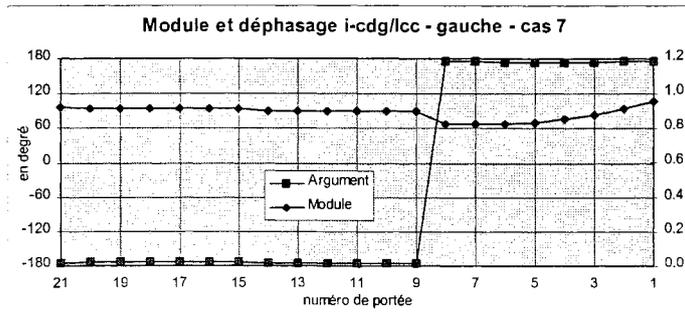
Ra = 2 Ω ; Rb = 10 Ω



Ra = 10 Ω ; Rb = 2 Ω

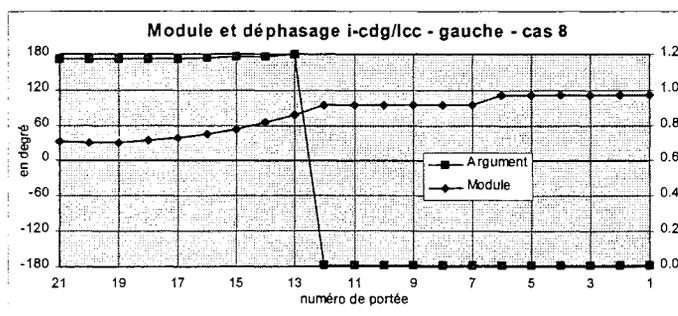


Ra = Rb = 2 Ω

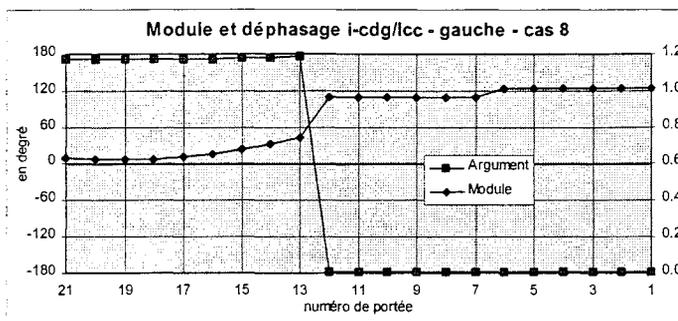


8PA - 2LS (CDG relié aux postes sources)

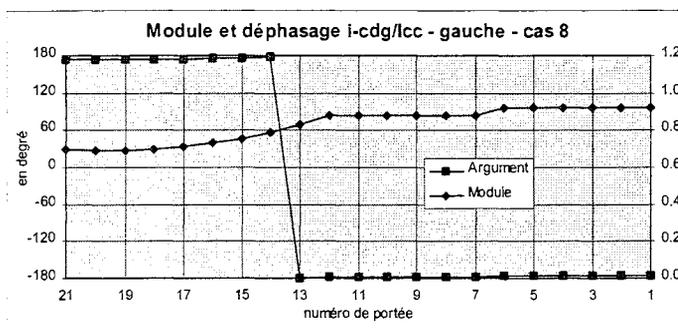
$R_a = R_b = 10 \Omega$



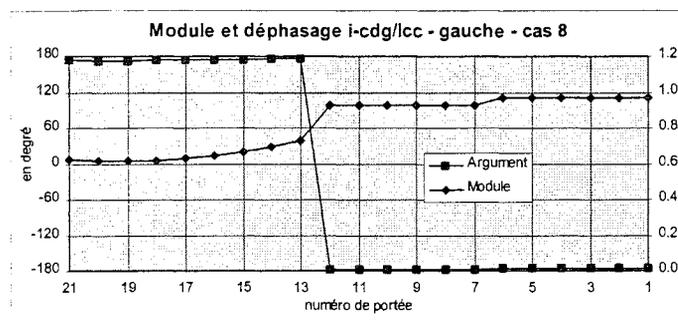
$R_a = 2 \Omega ; R_b = 10 \Omega$



$R_a = 10 \Omega ; R_b = 2 \Omega$

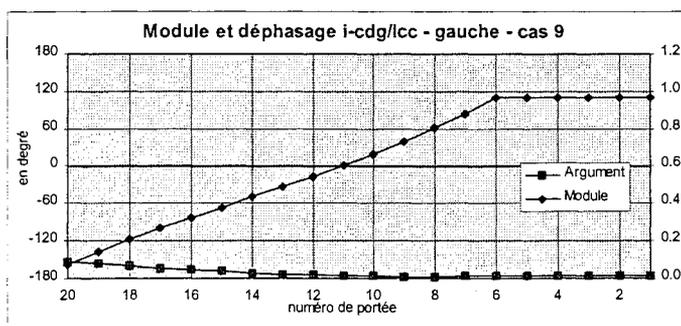


$R_a = R_b = 2 \Omega$

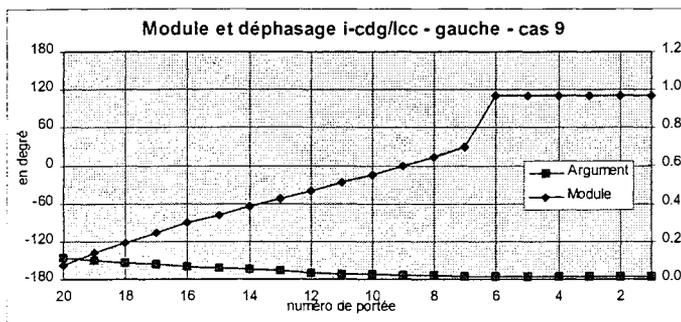


14PA - LS (CDG relié au poste source à droit, non à gauche)

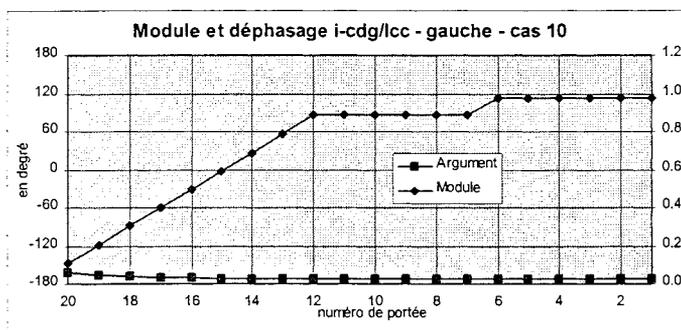
$R_a = R_b = 10 \Omega$



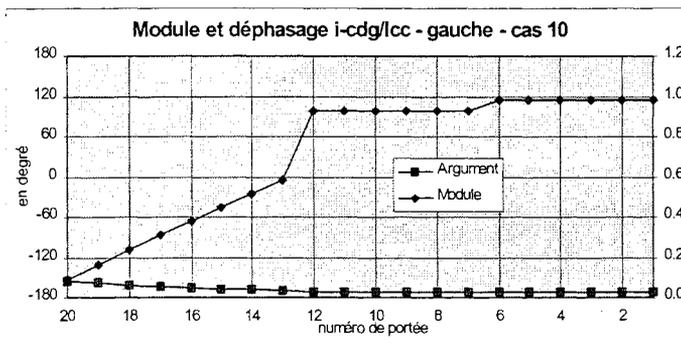
$R_a = R_b = 2 \Omega$



$R_a = R_b = 10 \Omega$



$R_a = R_b = 2 \Omega$



Annexe 5
Contraintes de tension et de courant dans une liaison mixte
en cas de défaut sur un tronçon souterrain.
Influence de la résistance des prises de terre.

Dans cette annexe, les courants sont en A, les tensions en kV et les résistance en Ω .

Le premier tableau résume les résultats de toutes les configurations étudiées. Il démontre l'influence

- du mode de couplage du câble de garde aux postes sources,
- de l'insertion d'un tronçon souterrain
- de l'emplacement du défaut

sur la répartition du courant de court-circuit et sur la montée en potentiel de la prise de terre au niveau du défaut.

Les tableaux qui suivent sont consacrés aux deux configurations appelées **interne** et **deuxLS**. Ils mettent en évidence l'influence de la résistance des prises de terre et de l'emplacement du défaut sur la montée en potentiel de la prise de terre au niveau du défaut. Ils présentent également les tensions entre écrans au niveau des arrêts d'écrans selon différents modes de couplage du câble de garde aux postes sources, pour des poses en trèfle et nappe.

Tableau A5 - 1 : Courants de court-circuit - Courants de retour - Montées en potentiel - Nappe

	io		io/lcc	arg	Icc		arg	I1/lcc	I1		arg	jo*Ro		arg	I'cc	
R=10																
20 PA (n-n) : cas 1-1	28891		1.034	-179	27954		-79	0.951	26573		180	24175		16.8	27240	
20 PA (n-o) : cas 1-2	29318		1.051	-178	27901		-79	0.966	26962		-180	24699		18.5		
20 PA (o-o) : cas 1-3	29844		1.033	-179	28897		-82	0.953	27525		179	25183		23.0	28148	
7PA + 7 PA + LS (n-n) : cas6m	32505	12.5%	1.030	-176	31551	12.9%	-78	0.950	29985	12.8%	-176	25280	4.6%	8.0	26852	
7PA + 7 PA + LS (n-o) : cas9	33011	12.6%	1.047	-176	31517	13.0%	-78	0.966	30431	12.9%	-176	25998	5.3%	11.1		
7PA + 7 PA + LS (o-o) : cas6	33611	12.6%	1.031	-177	32611	12.9%	-83	0.955	31142	13.1%	-178	25761	2.3%	18.6	28252	
Interne1 (n-n)	27790	-3.8%	1.005	180	27649	-1.1%	-78	0.925	25566	-3.8%	179	21957	-9.2%	14.0	26936	-1.1%
Interne2 (n-n)	27438	-5.0%	1.002	180	27374	-2.1%	-78	0.922	25240	-5.0%	178	22698	-6.1%	13.6	27094	-0.5%
Interne3 (n-n)	27031	-6.4%	0.998	-180	27094	-3.1%	-78	0.919	24889	-6.3%	179	22159	-8.3%	14.5	27374	0.5%
Interne4 (n-n)	26795	-7.3%	0.995	-180	26936	-3.6%	-78	0.916	24670	-7.2%	179	21957	-9.2%	14.1	27649	1.5%
Interne5 (o-o)	28730	-3.7%	1.005	180	28595	-1.0%	-81	0.927	26511	-3.7%	178	23846	-5.3%	20.4	27836	-1.1%
Interne6 (o-o)	28362	-5.0%	1.002	180	28300	-2.1%	-81	0.925	26170	-4.9%	178	23516	-6.6%	20.1	28008	-0.5%
Interne7 (o-o)	27947	-6.4%	0.998	-180	28008	-3.1%	-80	0.921	25809	-6.2%	178	23010	-8.6%	21.1	28300	0.5%
Interne8 (o-o)	27701	-7.2%	0.995	-180	27836	-3.7%	-81	0.919	25580	-7.1%	178	22779	-9.5%	20.7	28595	1.6%
DeuxLS1 (n-n)	31722	-2.4%	1.018	-177	31152	-1.3%	-77	0.934	29159	-2.8%	-177	25640	1.4%	3.7	27086	0.9%
DeuxLS2 (n-n)	31293	-3.7%	1.016	-177	30803	-2.4%	-77	0.931	28758	-4.1%	-177	25350	0.3%	3.1	27241	1.4%
DeuxLS3 (n-n)	30839	-5.1%	1.013	-177	30436	-3.5%	-77	0.930	28392	-5.3%	-177	24480	-3.2%	3.8	27512	2.5%
DeuxLS4 (n-n)	30555	-6.0%	1.011	-177	30230	-4.2%	-77	0.927	28124	-6.2%	-177	24306	-3.9%	3.2	27792	3.5%
DeuxLS5 (o-o)	32628	-2.9%	1.013	-178	32198	-1.3%	-80	0.934	30182	-3.1%	-179	25074	-2.7%	13.8	27937	-1.1%
DeuxLS6 (o-o)	32180	-4.3%	1.011	-178	31823	-2.4%	-80	0.934	29762	-4.4%	-179	24741	-4.0%	13.2	28106	-0.5%
DeuxLS7 (o-o)	31720	-5.6%	1.009	-178	31450	-3.6%	-80	0.931	29387	-5.6%	-179	23929	-7.1%	14.2	28392	0.5%
DeuxLS8 (o-o)	31422	-6.5%	1.006	-178	31224	-4.3%	-80	0.928	29106	-6.5%	-179	23709	-8.0%	13.6	28692	1.6%

Tableau A5 - 2 : Courants de retour - Montées en potentiel - Influence de l'emplacement du défaut - Mode de couplage non-non - Nappe

cas	R	INTER						DEUX LS						DEUXLS / INTERNE						
		I1	arg	jo*Ro	arg	j'o*R'o	arg	I1	arg	jo*Ro	arg	j'o*R'o	arg	I1	arg	jo*Ro	arg	j'o*R'o	arg	
cas 1	5	20899	178	12899	17	12177	18	25376	-178	13839	2	11744	10	21.4%	4.4	7.3%	-14.9	-3.6%	-7.6	
	10	21242	179	19123	14	18281	14	25060	-177	21778	4	18850	6	18.0%	4.1	13.9%	-10.3	3.1%	-8.1	
	20	20105	179	28052	7	27123	7	23610	-176	31702	-2	28335	-1	17.4%	5.1	13.0%	-9.3	4.5%	-8.2	
	40	18191	180	43029	2	42043	2	21326	-175	46754	-6	43509	-6	17.2%	5.5	8.7%	-7.7	3.5%	-7.1	
cas 2	5	20617	177	12682	17	12352	18	25031	-178	13625	1	11891	11	21.4%	4.5	7.4%	-15.4	-3.7%	-7.5	
	10	20996	178	18889	14	18452	15	24746	-177	21540	3	18988	7	17.9%	4.2	14.0%	-10.5	2.9%	-8.0	
	20	19904	179	27809	7	27269	7	23341	-176	31450	-3	28441	-1	17.3%	5.1	13.1%	-9.3	4.3%	-8.1	
	40	18045	179	42773	2	42149	2	21123	-175	46478	-6	43570	-5	17.1%	5.5	8.7%	-7.6	3.4%	-7.0	
cas 3	5	20356	178	12352	18	12682	16	24787	-177	12949	3	12231	9	21.8%	4.3	4.8%	-15.6	-3.6%	-7.2	
	10	20733	179	18452	15	18889	13	24470	-177	20801	4	19413	6	18.0%	4.1	12.7%	-10.7	2.8%	-7.7	
	20	19662	179	27269	7	27809	7	23067	-176	30679	-2	28980	-1	17.3%	5.1	12.5%	-9.5	4.2%	-7.9	
	40	17839	180	42149	2	42773	2	20873	-175	45685	-6	44201	-5	17.0%	5.5	8.4%	-7.7	3.3%	-6.9	
cas 4	5	20144	178	12177	18	12899	17	24537	-177	12785	2	12421	10	21.8%	4.4	5.0%	-16.1	-3.7%	-7.0	
	10	20559	179	18281	14	19123	14	24252	-177	20644	3	19622	6	18.0%	4.2	12.9%	-10.9	2.6%	-7.7	
	20	19530	179	27123	7	28052	7	22888	-176	30549	-3	29196	-1	17.2%	5.1	12.6%	-9.5	4.1%	-7.9	
	40	17757	179	42043	2	43029	2	20751	-175	45589	-6	44431	-5	16.9%	5.6	8.4%	-7.7	3.3%	-6.8	
		/cas 1						/ cas1												
cas	R	I1	arg	jo*Ro	arg	j'o*R'o	arg	I1	arg	jo*Ro	arg	j'o*R'o	arg							
cas 2	5	-1.3%	-0.1	-1.7%	-0.5	1.4%	0.6	-1.4%	0.0	-1.5%	-0.9	1.3%	0.7							
	10	-1.2%	-0.2	-1.2%	-0.4	0.9%	0.6	-1.2%	-0.1	-1.1%	-0.6	0.7%	0.7							
	20	-1.0%	-0.2	-0.9%	-0.4	0.5%	0.5	-1.1%	-0.1	-0.8%	-0.4	0.4%	0.6							
	40	-0.8%	-0.2	-0.6%	-0.3	0.3%	0.4	-1.0%	-0.2	-0.6%	-0.2	0.1%	0.5							
cas 3	5	-1.3%	0.8	-2.6%	1.5	2.7%	-1.9	-1.0%	0.6	-5.0%	1.3	2.9%	-1.6							
	10	-1.3%	0.6	-2.3%	0.9	2.4%	-1.3	-1.1%	0.5	-3.4%	0.7	2.2%	-1.1							
	20	-1.2%	0.4	-1.9%	0.5	2.0%	-0.8	-1.2%	0.4	-2.5%	0.3	1.9%	-0.7							
	40	-1.1%	0.2	-1.5%	0.2	1.5%	-0.5	-1.2%	0.2	-1.7%	0.1	1.4%	-0.4							
cas 4	5	-1.0%	-0.1	-1.4%	-0.5	1.7%	0.6	-1.0%	0.0	-1.3%	-1.0	1.6%	0.7							
	10	-0.8%	-0.2	-0.9%	-0.4	1.2%	0.6	-0.9%	-0.1	-0.8%	-0.6	1.1%	0.6							
	20	-0.7%	-0.2	-0.5%	-0.4	0.9%	0.5	-0.8%	-0.1	-0.4%	-0.4	0.7%	0.6							
	40	-0.5%	-0.2	-0.3%	-0.3	0.6%	0.4	-0.6%	-0.2	-0.2%	-0.2	0.5%	0.5							

Tableau A5 - 3 : Courants de retour et Montées en potentiel - Influence de l'emplacement du défaut - Mode de couplage oui-oui - Nappe

cas	R	INTER						DEUXLS						DEUXLS / INTERNE							
		II	arg	jo*Ro	arg	j'o*R'o	arg	II	arg	jo*Ro	arg	j'o*R'o	arg	II	arg	jo*Ro	arg	j'o*R'o	arg		
cas 5	5	21352	177	13552	19	12811	19	25798	-179	14328	6	12424	13	20.8%	3.9	5.7%	-12.3	-3.0%	-6.1		
	10	21872	178	19691	20	18836	21	25761	-179	21138	14	19044	16	17.8%	2.7	7.3%	-6.6	1.1%	-4.8		
	20	21109	178	26146	20	25212	20	25229	180	26608	15	24968	17	19.5%	2.4	1.8%	-5.4	-1.0%	-3.7		
	40	20238	176	33485	22	32509	22	24939	179	31954	17	30984	19	23.2%	2.4	-4.6%	-5.1	-4.7%	-2.8		
cas 6	5	21063	177	13324	18	12994	20	25442	-179	14093	6	12582	14	20.8%	4.0	5.8%	-12.7	-3.2%	-6.0		
	10	21619	178	19434	20	19028	21	25438	-179	20863	13	19214	17	17.7%	2.8	7.4%	-6.8	1.0%	-4.7		
	20	20894	177	25868	20	25401	21	24937	180	26323	14	25149	17	19.4%	2.5	1.8%	-5.6	-1.0%	-3.6		
	40	20052	176	33188	22	32693	23	24669	179	31658	17	31173	20	23.0%	2.4	-4.6%	-5.2	-4.6%	-2.7		
cas 7	5	20793	178	12994	20	13324	18	25189	-178	13427	7	12917	12	21.1%	3.8	3.3%	-12.8	-3.1%	-5.7		
	10	21350	178	19028	21	19434	20	25157	-179	20176	14	19601	15	17.8%	2.7	6.0%	-6.8	0.9%	-4.6		
	20	20654	178	25401	20	25868	19	24663	-180	25651	15	25613	16	19.4%	2.4	1.0%	-5.6	-1.0%	-3.6		
	40	19849	177	32693	22	33188	22	24412	179	31028	17	31697	19	23.0%	2.4	-5.1%	-5.2	-4.5%	-2.8		
cas 8	5	20576	178	12811	19	13552	19	24932	-178	13243	6	13121	13	21.2%	3.9	3.4%	-13.3	-3.2%	-5.6		
	10	21172	178	18836	21	19691	20	24932	-179	19979	14	19843	16	17.8%	2.7	6.1%	-7.1	0.8%	-4.5		
	20	20512	178	25212	20	26146	20	24467	-180	25466	14	25888	16	19.3%	2.5	1.0%	-5.7	-1.0%	-3.5		
	40	19732	176	32509	22	33485	22	24237	179	30852	17	32004	19	22.8%	2.4	-5.1%	-5.2	-4.4%	-2.7		
		/ cas 1						/ cas 1													
cas	R	II	arg	jo*Ro	arg	j'o*R'o	arg	II	arg	jo*Ro	arg	j'o*R'o	arg								
cas 6	R=5	-1.4%	-0.2	-1.7%	-0.5	1.4%	0.6	-1.4%	0.0	-1.6%	-0.9	1.3%	0.7								
	R=10	-1.2%	-0.2	-1.3%	-0.4	1.0%	0.5	-1.3%	-0.1	-1.3%	-0.6	0.9%	0.5								
	R=20	-1.0%	-0.1	-1.1%	-0.3	0.8%	0.5	-1.2%	-0.1	-1.1%	-0.4	0.7%	0.5								
	R=40	-0.9%	-0.1	-0.9%	-0.3	0.6%	0.4	-1.1%	-0.1	-0.9%	-0.3	0.6%	0.5								
cas 7	R=5	-1.3%	0.8	-2.5%	1.5	2.5%	-2.0	-1.0%	0.6	-4.7%	1.4	2.7%	-1.7								
	R=10	-1.2%	0.6	-2.1%	1.0	2.1%	-1.5	-1.1%	0.5	-3.3%	1.0	2.0%	-1.3								
	R=20	-1.1%	0.4	-1.8%	0.7	1.8%	-1.2	-1.1%	0.3	-2.6%	0.7	1.8%	-1.1								
	R=40	-1.0%	0.3	-1.5%	0.6	1.5%	-1.0	-1.0%	0.3	-2.0%	0.6	1.7%	-1.0								
cas 8	R=5	-1.0%	-0.1	-1.4%	-0.5	1.7%	0.6	-1.0%	0.0	-1.4%	-0.9	1.6%	0.7								
	R=10	-0.8%	-0.2	-1.0%	-0.4	1.3%	0.5	-0.9%	-0.1	-1.0%	-0.6	1.2%	0.5								
	R=20	-0.7%	-0.1	-0.7%	-0.3	1.1%	0.5	-0.8%	-0.1	-0.7%	-0.5	1.1%	0.5								
	R=40	-0.6%	-0.1	-0.6%	-0.3	0.9%	0.4	-0.7%	-0.1	-0.6%	-0.3	1.0%	0.5								

Tableau A5 - 4 : Courant de court-circuit - Tension entre écrans et montées en potentiel des écrans au niveau des arrêts d'écran - configuration INTERNE - nappe

	interne1				interne2				interne3				interne4			
	R=5	R=10	R=20	R=40												
I-gauche	23151	22956	22794	22454	22956	22766	22610	22281	22763	22574	22417	22091	22648	22463	22312	21996
I-droite	22648	22463	22312	21996	22763	22574	22417	22091	22956	22766	22610	22281	23151	22956	22794	22454
x	0.51	0.51	0.51	0.51	0.502	0.502	0.502	0.502	0.498	0.498	0.498	0.498	0.49	0.49	0.49	0.49
k	-0.51	-0.51	-0.51	-0.51	-0.504	-0.503	-0.503	-0.503	-0.496	-0.497	-0.497	-0.497	-0.49	-0.49	-0.49	-0.49
V12(1)	3436	3408	3385	3336	3778	3747	3721	3666	2461	2440	2424	2389	1777	1762	1750	1724
V13(1)	3436	3408	3385	3336	3462	3434	3410	3361	1968	1951	1938	1910	2310	2292	2276	2244
V23(1)	0	0	0	0	775	769	764	753	756	750	744	734	2276	2258	2242	2211
V12(2)	2310	2292	2276	2244	1968	1951	1938	1910	3462	3434	3410	3361	3436	3408	3385	3336
V13(2)	1777	1762	1750	1724	2461	2440	2424	2389	3778	3747	3721	3666	3436	3408	3385	3336
V23(2)	2276	2258	2242	2211	756	750	744	734	775	769	764	753	0	0	0	0
P1-C1	16064	22223	31075	45934	16106	22230	31018	45813	14444	20514	29237	44010	14120	20252	29098	43986
P1-C2	12628	18818	27730	42697	12420	18619	27568	42551	12312	18476	27391	42345	12787	18852	27584	42416
P1-C3	12628	18818	27730	42697	12644	18801	27660	42573	12529	18651	27476	42363	12112	18311	27315	42353
P2-C1	14120	20252	29098	43986	14444	20514	29237	44010	16106	22230	31018	45813	16064	22223	31075	45934
P2-C2	12112	18311	27315	42353	12529	18651	27476	42363	12644	18801	27660	42573	12628	18818	27730	42697
P2-C3	12787	18852	27584	42416	12312	18476	27391	42345	12420	18619	27568	42551	12628	18818	27730	42697
	interne5				interne6				interne7				interne8			
I-gauche	23700	23573	23458	23253	23496	23373	23261	23059	23297	23175	23065	22866	23176	23057	22949	22752
I-droite	23176	23057	22949	22752	23297	23175	23065	22866	23496	23373	23261	23059	23700	23573	23458	23253
x	0.506	0.506	0.505	0.505	0.502	0.502	0.502	0.502	0.498	0.498	0.498	0.498	0.494	0.494	0.495	0.495
k	-0.510	-0.508	-0.507	-0.506	-0.504	-0.503	-0.503	-0.503	-0.496	-0.497	-0.497	-0.497	-0.490	-0.492	-0.493	-0.494
V12(1)	3517	3499	3482	3452	3867	3847	3828	3795	2518	2505	2493	2472	1819	1809	1800	1785
V13(1)	3517	3499	3482	3452	3544	3525	3508	3478	2014	2004	1994	1977	2364	2352	2341	2321
V23(1)	0	0	0	0	794	790	786	779	774	770	766	760	2329	2317	2306	2287
V12(2)	2364	2352	2341	2321	2014	2004	1994	1977	3544	3525	3508	3478	3517	3499	3482	3452
V13(2)	1819	1809	1800	1785	2518	2505	2493	2472	3867	3847	3828	3795	3517	3499	3482	3452
V23(2)	2329	2317	2306	2287	774	770	766	760	794	790	786	779	0	0	0	0
P1-C1	16786	22862	29276	36558	16836	22905	29301	36582	15149	21209	27585	34887	14797	20848	27243	34533
P1-C2	13271	19370	25800	33122	13043	19111	25528	32820	12936	18980	25377	32661	13463	19537	25922	33261
P1-C3	13271	19370	25800	33122	13294	19384	25796	33113	13179	19243	25634	32942	12711	18730	25136	32404
P2-C1	14797	20848	27243	34533	15149	21209	27585	34887	16836	22905	29301	36582	16786	22862	29276	36558
P2-C2	12711	18730	25136	32404	13179	19243	25634	32942	13294	19384	25796	33113	13271	19370	25800	33122
P2-C3	13463	19537	25922	33261	12936	18980	25377	32661	13043	19111	25528	32820	13271	19370	25800	33122

Tableau A5 - 5 : Courant de court-circuit - Tension entre écrans et montées en potentiel des écrans au niveau des arrêts d'écran - configuration INTERNE - trèfle

	interne1				interne2				interne3				interne4			
	R=5	R=10	R=20	R=40												
I-gauche	23146	22952	22791	22453	22929	22739	22584	22256	22741	22553	22397	22074	22699	22512	22357	22037
I-droite	22699	22512	22357	22037	22741	22553	22397	22074	22929	22739	22584	22256	23146	22952	22791	22453
x	0.505	0.505	0.505	0.505	0.502	0.502	0.502	0.502	0.498	0.498	0.498	0.498	0.495	0.495	0.495	0.495
k	-0.507	-0.506	-0.506	-0.505	-0.505	-0.504	-0.504	-0.504	-0.495	-0.496	-0.496	-0.496	-0.493	-0.494	-0.494	-0.495
V12(1)	3546	3517	3493	3442	3945	3912	3885	3829	2715	2693	2675	2636	1652	1638	1627	1603
V13(1)	3546	3517	3493	3442	3720	3689	3663	3610	2390	2371	2354	2320	2096	2079	2065	2035
V23(1)	0	0	0	0	439	435	432	426	428	425	422	416	1293	1282	1273	1255
V12(2)	2096	2079	2065	2035	2390	2371	2354	2320	3720	3689	3663	3610	3546	3517	3493	3442
V13(2)	1652	1638	1627	1603	2715	2693	2675	2636	3945	3912	3885	3829	3546	3517	3493	3442
V23(2)	1293	1282	1273	1255	428	425	422	416	439	435	432	426	0	0	0	0
P1-C1	16041	22205	31066	45940	16106	22224	31004	45786	14410	20473	29190	43953	14173	20312	29163	44060
P1-C2	12511	18723	27683	42694	12344	18551	27526	42522	12196	18369	27313	42285	12606	18728	27551	42458
P1-C3	12511	18723	27683	42694	12455	18643	27570	42530	12304	18457	27354	42290	12236	18430	27405	42426
P2-C1	14173	20312	29163	44060	14410	20473	29190	43953	16106	22224	31004	45786	16041	22205	31066	45940
P2-C2	12236	18430	27405	42426	12304	18457	27354	42290	12455	18643	27570	42530	12511	18723	27683	42694
P2-C3	12606	18728	27551	42458	12196	18369	27313	42285	12344	18551	27526	42522	12511	18723	27683	42694
	interne5				interne6				interne7				interne8			
I-gauche	23695	23569	23455	23251	23467	23344	23232	23030	23273	23152	23043	22845	23229	23108	22999	22800
I-droite	23229	23108	22999	22800	23273	23152	23043	22845	23467	23344	23232	23030	23695	23569	23455	23251
x	0.505	0.505	0.505	0.505	0.502	0.502	0.502	0.502	0.498	0.498	0.498	0.498	0.495	0.495	0.495	0.495
k	-0.507	-0.506	-0.506	-0.505	-0.505	-0.504	-0.504	-0.503	-0.495	-0.496	-0.496	-0.497	-0.493	-0.494	-0.494	-0.495
V12(1)	3629	3610	3593	3562	4038	4017	3997	3963	2779	2764	2751	2728	1691	1682	1674	1659
V13(1)	3629	3610	3593	3562	3807	3787	3769	3736	2446	2434	2422	2401	2145	2134	2124	2106
V23(1)	0	0	0	0	449	447	445	441	438	436	434	430	1323	1316	1310	1298
V12(2)	2145	2134	2124	2106	2446	2434	2422	2401	3807	3787	3769	3736	3629	3610	3593	3562
V13(2)	1691	1682	1674	1659	2779	2764	2751	2728	4038	4017	3997	3963	3629	3610	3593	3562
V23(2)	1323	1316	1310	1298	438	436	434	430	449	447	445	441	0	0	0	0
P1-C1	16763	22841	29259	36547	16836	22899	29290	36564	15114	21164	27533	34827	14853	20913	27317	34615
P1-C2	13142	19233	25669	32986	12955	19004	25416	32689	12807	18829	25220	32482	13263	19344	25749	33081
P1-C3	13142	19233	25669	32986	13081	19148	25560	32849	12928	18967	25357	32636	12849	18894	25309	32598
P2-C1	14853	20913	27317	34615	15114	21164	27533	34827	16836	22899	29290	36564	16763	22841	29259	36547
P2-C2	12849	18894	25309	32598	12928	18967	25357	32636	13081	19148	25560	32849	13142	19233	25669	32986
P2-C3	13263	19344	25749	33081	12807	18829	25220	32482	12955	19004	25416	32689	13142	19233	25669	32986

Tableau A5 - 6 : Courant de court-circuit - Tension entre écrans et montées en potentiel des écrans au niveau des arrêts d'écran - configuration DEUXLS - Nappe

	DLS1				DLS2				DLS3				DLS4			
	R=5	R=10	R=20	R=40												
I-gauche	27133	26844	26423	25632	26863	26584	26177	25409	26595	26313	25906	25151	26428	26155	25762	25027
I-droite	22723	22573	22493	22253	22834	22681	22594	22344	23021	22867	22781	22529	23219	23061	22969	22705
x	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.53	0.54	0.54	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.52
k	-0.55	-0.55	-0.55	-0.54	-0.55	-0.55	-0.54	-0.54	-0.54	-0.54	-0.54	-0.53	-0.54	-0.54	-0.53	-0.53
V12(1)	3728	3700	3670	3597	4162	4117	4062	3965	2762	2730	2689	2619	1953	1938	1920	1879
V13(1)	3728	3700	3670	3597	3753	3724	3691	3617	2112	2096	2080	2042	2589	2559	2521	2457
V23(1)	0	0	0	0	1035	1022	998	955	1011	998	974	932	2656	2629	2589	2515
V12(2)	2432	2419	2409	2373	2165	2142	2115	2066	3768	3731	3689	3609	3739	3702	3658	3579
V13(2)	1908	1888	1867	1828	2585	2571	2559	2520	4050	4023	3995	3922	3739	3702	3658	3579
V23(2)	2284	2269	2260	2236	630	630	638	647	652	652	660	669	0	0	0	0
P1-C1	16785	24439	34119	49076	16732	24360	33956	48844	14656	22260	31869	46808	14458	22102	31837	46871
P1-C2	13105	20788	30578	45678	12980	20649	30485	45587	12660	20307	30154	45271	12793	20427	30077	45097
P1-C3	13105	20788	30578	45678	13033	20698	30420	45461	12713	20351	30085	45142	12604	20243	30172	45350
P2-C1	14257	21645	31226	46290	14436	21775	31226	46185	16207	23566	33080	48055	16190	23581	33146	48172
P2-C2	12301	19719	29467	44670	12458	19860	29460	44548	12487	19909	29569	44707	12498	19946	29646	44825
P2-C3	12617	19978	29488	44545	12364	19770	29426	44552	12381	19810	29527	44707	12498	19946	29646	44825
	DLS5				DLS6				DLS7				DLS8			
I-gauche	27777	27572	27419	27233	27495	27298	27148	26966	27220	27025	26881	26704	27044	26856	26715	26540
I-droite	23246	23127	23027	22854	23364	23243	23140	22964	23557	23436	23333	23156	23764	23641	23535	23353
x	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.53	0.53	0.53	0.53
k	-0.56	-0.56	-0.56	-0.56	-0.56	-0.55	-0.55	-0.55	-0.55	-0.55	-0.55	-0.55	-0.55	-0.54	-0.54	-0.54
V12(1)	3811	3786	3766	3737	4266	4239	4220	4192	2831	2813	2800	2783	1996	1983	1972	1957
V13(1)	3811	3786	3766	3737	3838	3813	3794	3765	2159	2145	2134	2118	2654	2638	2626	2610
V23(1)	0	0	0	0	1059	1050	1044	1037	1035	1026	1019	1013	2718	2699	2685	2667
V12(2)	2483	2468	2454	2434	2218	2204	2194	2179	3859	3835	3818	3792	3830	3807	3790	3765
V13(2)	1955	1944	1935	1922	2641	2625	2611	2589	4139	4113	4091	4059	3830	3807	3790	3765
V23(2)	2336	2324	2314	2297	644	643	641	635	667	665	663	657	0	0	0	0
P1-C1	17447	24196	29797	35328	17423	24206	29810	35358	15327	22137	27785	33414	15066	21817	27481	33094
P1-C2	13657	20411	26031	31594	13477	20146	25753	31282	13162	19827	25470	31050	13431	20288	25966	31641
P1-C3	13657	20411	26031	31594	13610	20394	26017	31594	13294	20066	25724	31350	13050	19629	25274	30834
P2-C1	14928	21618	27380	33150	15159	21903	27673	33480	16952	23675	29491	35320	16926	23659	29500	35341
P2-C2	12853	19447	25204	30938	13087	19801	25578	31373	13116	19844	25677	31528	13118	19854	25712	31576
P2-C3	13301	20066	25840	31669	12963	19629	25402	31174	12979	19658	25487	31314	13118	19854	25712	31576

Tableau A5 - 7 : Courant de court-circuit - Tension entre écrans et montées en potentiel des écrans au niveau des arrêts d'écran - Influence du mode de couplage (non-non / oui-oui) - Nappe

	DeuxLS1				DeuxLS2				DeuxLS3				DeuxLS4			
	R=5	R=10	R=20	R=40												
I-gauche	-2.3%	-2.6%	-3.6%	-5.9%	-2.3%	-2.6%	-3.6%	-5.8%	-2.3%	-2.6%	-3.6%	-5.8%	-2.3%	-2.6%	-3.6%	-5.7%
I-droite	-2.2%	-2.4%	-2.3%	-2.6%	-2.3%	-2.4%	-2.4%	-2.7%	-2.3%	-2.4%	-2.4%	-2.7%	-2.3%	-2.5%	-2.4%	-2.8%
x	0.0%	-0.1%	-0.6%	-1.5%	0.0%	-0.1%	-0.6%	-1.5%	0.0%	-0.1%	-0.6%	-1.5%	0.0%	-0.1%	-0.5%	-1.4%
k	-1.6%	-1.7%	-2.2%	-3.1%	-1.5%	-1.6%	-2.1%	-3.0%	-1.6%	-1.7%	-2.2%	-3.1%	-1.5%	-1.6%	-2.1%	-2.9%
V12(1)	-2.2%	-2.3%	-2.6%	-3.7%	-2.4%	-2.9%	-3.7%	-5.4%	-2.4%	-3.0%	-4.0%	-5.9%	-2.3%	-2.5%	-2.4%	-2.8%
V13(1)	-2.2%	-2.3%	-2.6%	-3.7%	-2.2%	-2.4%	-2.7%	-3.9%	-2.2%	-2.3%	-2.5%	-3.6%	-2.3%	-2.5%	-2.4%	-2.8%
V23(1)					-2.3%	-2.7%	-4.4%	-8.0%	-2.3%	-2.7%	-4.5%	-8.1%				
V12(2)	-2.1%	-2.0%	-1.8%	-2.5%	-2.4%	-2.8%	-3.6%	-5.2%	-2.4%	-2.7%	-3.4%	-4.8%	-2.3%	-2.5%	-2.4%	-2.8%
V13(2)	-2.4%	-2.9%	-3.6%	-4.9%	-2.1%	-2.0%	-2.0%	-2.7%	-2.2%	-2.2%	-2.3%	-3.4%	-2.3%	-2.5%	-2.4%	-2.8%
V23(2)	-2.2%	-2.4%	-2.3%	-2.6%	-2.2%	-2.1%	-0.4%	1.9%	-2.2%	-2.0%	-0.4%	1.8%	-2.3%	-2.5%	-2.4%	-2.8%
P1-C1	-3.8%	1.0%	14.5%	38.9%	-4.0%	0.6%	13.9%	38.1%	-4.4%	0.6%	14.7%	40.1%	-4.0%	1.3%	15.8%	41.6%
P1-C2	-4.0%	1.9%	17.5%	44.6%	-3.7%	2.5%	18.4%	45.7%	-3.8%	2.4%	18.4%	45.8%	-4.7%	0.7%	15.8%	42.5%
P1-C3	-4.0%	1.9%	17.5%	44.6%	-4.2%	1.5%	16.9%	43.9%	-4.4%	1.4%	17.0%	44.0%	-3.4%	3.1%	19.4%	47.1%
P2-C1	-4.5%	0.1%	14.0%	39.6%	-4.8%	-0.6%	12.8%	37.9%	-4.4%	-0.5%	12.2%	36.1%	-4.3%	-0.3%	12.4%	36.3%
P2-C2	-4.3%	1.4%	16.9%	44.4%	-4.8%	0.3%	15.2%	42.0%	-4.8%	0.3%	15.2%	41.8%	-4.7%	0.5%	15.3%	42.0%
P2-C3	-5.1%	-0.4%	14.1%	40.7%	-4.6%	0.7%	15.8%	42.9%	-4.6%	0.8%	15.9%	42.8%	-4.7%	0.5%	15.3%	42.0%
	interne1				interne2				interne3				interne4			
I-gauche	-2.3%	-2.6%	-2.8%	-3.4%	-2.3%	-2.6%	-2.8%	-3.4%	-2.3%	-2.6%	-2.8%	-3.4%	-2.3%	-2.6%	-2.8%	-3.3%
I-droite	-2.3%	-2.6%	-2.8%	-3.3%	-2.3%	-2.6%	-2.8%	-3.4%	-2.3%	-2.6%	-2.8%	-3.4%	-2.3%	-2.6%	-2.8%	-3.4%
x	0.0%	0.0%	0.0%	-0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%
k	-0.1%	-0.1%	-0.1%	-0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	-0.1%	-0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%
V12(1)	-2.3%	-2.6%	-2.8%	-3.3%	-2.3%	-2.6%	-2.8%	-3.4%	-2.3%	-2.6%	-2.8%	-3.4%	-2.3%	-2.6%	-2.8%	-3.4%
V13(1)	-2.3%	-2.6%	-2.8%	-3.3%	-2.3%	-2.6%	-2.8%	-3.4%	-2.3%	-2.6%	-2.8%	-3.4%	-2.3%	-2.6%	-2.8%	-3.4%
V23(1)					-2.3%	-2.6%	-2.8%	-3.4%	-2.3%	-2.6%	-2.8%	-3.4%				
V12(2)	-2.3%	-2.6%	-2.8%	-3.3%	-2.3%	-2.6%	-2.8%	-3.4%	-2.3%	-2.6%	-2.8%	-3.4%	-2.3%	-2.6%	-2.8%	-3.4%
V13(2)	-2.3%	-2.6%	-2.8%	-3.4%	-2.3%	-2.6%	-2.8%	-3.4%	-2.3%	-2.6%	-2.8%	-3.4%	-2.3%	-2.6%	-2.8%	-3.4%
V23(2)	-2.3%	-2.6%	-2.8%	-3.3%	-2.3%	-2.6%	-2.8%	-3.4%	-2.3%	-2.6%	-2.8%	-3.4%	-2.3%	-2.6%	-2.8%	-3.4%
P1-C1	-4.5%	-2.9%	6.1%	25.6%	-4.4%	-3.0%	5.8%	25.2%	-4.6%	-3.2%	6.0%	26.1%	-5.1%	-3.5%	6.9%	28.7%
P1-C2	-5.1%	-3.0%	7.4%	28.9%	-4.9%	-2.6%	8.0%	29.6%	-4.7%	-2.6%	8.0%	29.7%	-5.0%	-2.9%	8.0%	30.2%
P1-C3	-5.1%	-3.0%	7.4%	28.9%	-5.0%	-3.0%	7.2%	28.6%	-4.9%	-3.0%	7.2%	28.6%	-5.0%	-2.9%	8.0%	30.2%
P2-C1	-5.0%	-3.1%	6.7%	27.4%	-4.8%	-3.4%	6.0%	26.1%	-4.2%	-2.9%	5.9%	25.2%	-5.1%	-3.3%	7.6%	30.1%
P2-C2	-5.2%	-2.5%	8.6%	30.7%	-5.1%	-3.2%	7.1%	28.6%	-4.7%	-2.9%	7.3%	28.6%	-4.7%	-2.1%	9.6%	32.8%
P2-C3	-5.5%	-3.8%	6.3%	27.5%	-5.0%	-2.7%	7.9%	29.7%	-4.6%	-2.5%	8.0%	29.6%	-5.2%	-3.7%	6.9%	29.0%

Annexe 6
Calcul de la montée en potentiel des écrans
dans le régime de défaut monophasé
par la méthode approchée.

1 - INTRODUCTION.

On étudie un réseau mixte, comportant une liaison souterraine de plusieurs tronçons insérée au milieu d'un certain nombre de portées aériennes, et alimentée par deux sources identiques des deux côtés (cf figure 1).

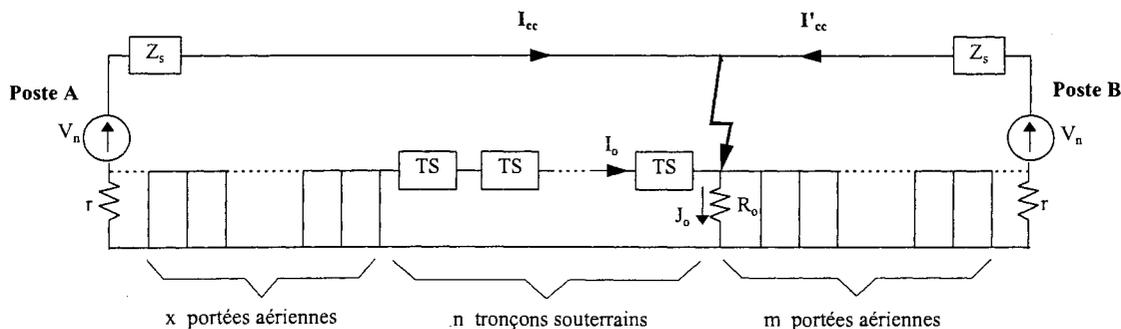


Figure 1

Les montées en potentiel des écrans en régime de défaut monophasé dépendent fortement de la montée en potentiel des prises de terre.

On a développé une méthode de calcul approchée de la montée en potentiel de la prise de terre au niveau d'un passage aérosouterrain dans le cas où le défaut survient au niveau de ce passage aérosouterrain.

Le paragraphe 2 présente les formules établies pour le calcul des courants de court-circuit I_{cc} , I'_{cc} , du courant J_0 dans la prise de terre au niveau du défaut et du courant de retour I_0 .

On a vérifié que la montée en potentiel de la prise de terre au niveau d'un passage aérosouterrain est peu modifiée si le défaut affecte les sections élémentaires voisines de l'aérosouterrain.

Les chutes de tension dans les écrans peuvent être déterminées en fonction du courant de court-circuit et du courant de retour. Les formules de calcul établies dans les chapitres 3 et 4 sont rappelées au paragraphe 3.

Le paragraphe 4 présente une comparaison des contraintes évaluées par la méthode approchée et par un calcul exact.

Le dernier paragraphe synthétise les différentes formules de calcul utilisées.

2 - METHODE APPROCHEE DE CALCUL DES COURANTS.

Intensité des courants de court-circuit.

L'intensité du courant de court-circuit dépend peu à la fois du type de couplage au poste et de la valeur des résistances des prises de terre. On peut l'approximer par la formule ci-dessous :

$$I_{cc} = \frac{V_n}{r + Z_s + x \cdot (Z_{lpa} - \frac{M^2}{Z_p}) + n \cdot (Z_{câble} - \frac{Z_m^2}{Z_e})} \quad I'_{cc} = \frac{V_n}{r + Z_s + m \cdot (Z_{lpa} - \frac{M^2}{Z_p})}$$

V_n : Tension nominale de la source.

r, Z_s : Résistance et impédance de la source.

Z_{lpa} : Impédance propre de la ligne pour une PA.

Z_p : Impédance propre du câble de garde pour une PA.

M : Mutuelle entre la ligne et le câble de garde pour une PA.

$Z_{câble}$: Impédance propre de l'âme d'un tronçon souterrain.

Z'_e : Impédance propre des écrans d'un tronçon souterrain ou du conducteur de terre

Z'_m : Mutuelle entre les écrans ou le conducteur de terre et les âmes d'un tronçon souterrain.

Intensité du courant passant dans la prise de terre du pylône en défaut.

$$j_o = j_{o_cond} + j_{o_ind}$$

Conduction :

$$j_{o_cond} = \frac{\frac{1}{R_0}}{\frac{1}{Z_{g_n}} + \frac{1}{R_0} + \frac{1}{Z_{as}}} \cdot \left[1 - \frac{M}{Z_p} \right] \cdot (I_{cc} + I'_{cc})$$

Z_{as} : Impédance apparente d'un nombre infini de portées aériennes
(lorsque le nombre de portées est supérieur à 14).

Z_{g_n} : Impédance entre le point de défaut et la source à gauche du réseau en tenant compte des n tronçons souterrains.

$$Z_{g_n} = Z'_e + R // Z_{g_n(n-1)} \quad \text{avec} \quad Z_{g_1} = Z'_e + R // Z_{as}$$

R_0 : Résistance de la prise de terre du pylône en défaut.

R : Résistance des prises de terre.

Induction :

$$j_{o_ind} = - \left[\chi_0 + \frac{R}{Z_{moy}^2 + 2 \cdot R \cdot Z_{moy}} \sum_{i=0}^{n-2} \left(\frac{R}{R + Z_{moy}} \right)^i \right] \times A \cdot I_{cc} \quad n \geq 2$$

$$\text{avec} \quad \chi_0 = \frac{1}{Z_{g_n} + R_0 // Z_{as}} \quad A = \left[Z'_m - Z'_e \frac{M}{Z_p} \right] \cdot \frac{Z_{as}}{R_0 + Z_{as}} \quad Z_{moy} = \frac{Z_{g_1} + Z_{g_2} + \dots + Z_{g_n}}{n}$$

Intensité du courant de retour du courant de court-circuit

Comme on sait calculer les courants de court-circuit, le courant dans la prise de terre au niveau du défaut, la détermination de ce courant est immédiate :

$$I_o = - \left[\frac{M}{Z_p} \cdot I_{cc} + \frac{R_0}{Z_{g_n}} \cdot j_{o_cond} + \frac{R_0 + Z_{as}}{Z_{as}} \cdot j_{o_ind} \right]$$

Le tableau 1 compare le calcul exact et le calcul approché des courants de court-circuit I_{cc} , I'_{cc} , et du courant J_0 dans la prise de terre au niveau du défaut en A.

Mode de couplage du câble de garde	non relié aux postes			relié aux postes			approché		
	I_{cc}	I'_{cc}	J_0	I_{cc}	I'_{cc}	J_0	I_{cc}	J_0	
Différents cas étudiés PA = portée aérienne = 500m TS = tronçon souterrain à Permutation de 3000m									
	27954	27240	2417	28897	28148	2518	29406	2509	
	31551	26852	2528	32611	28252	2576	33242	2545	
	35502	27051	2713	37236	28324	2512	38223	2600	
	24147	27940	2258	24942	28932	2370	25350	2366	
	① (*)	27649	26936	2300	28595	27836	2385	28148	2433
	④	26936	27649	2196	27836	28595	2278		
	①	31152	27086	2564	32198	27937	2507	31638	2489
	④	30230	27792	2431	31224	28692	2371		
	17072	26902	1932	17546	28362	2026			
	②	17261	26495	1842	17749	27446	1907	17623	2089
	③	17150	26756	1711	17633	27719	1776		

(*) selon la position du défaut dans une section ternaire (premier point de permutation, à la fin de la 1° section élémentaire ou au début de la 2° section - deuxième point de permutation, à la fin de la 2° section élémentaire ou au début de la 3° section)

3 - CHUTES DE TENSION DANS LES ECRANS.

Permutation des écrans.

Défaut externe :

$$e_{13} = \left\{ \left[-\frac{R_e}{3} + \frac{Z_c - Z_m}{3} \right] \times I_{cc} + \left[Z_e - \frac{2 \cdot (Z_e - Z_c)^2}{\Delta} \right] \times (I_o + I_{cc}) \right\} \times \ell \quad (\text{c.f } \S 3-3 \text{ du chapitre 4})$$

$$(\Delta = 3Z_e - 4Z_c + Z_L)$$

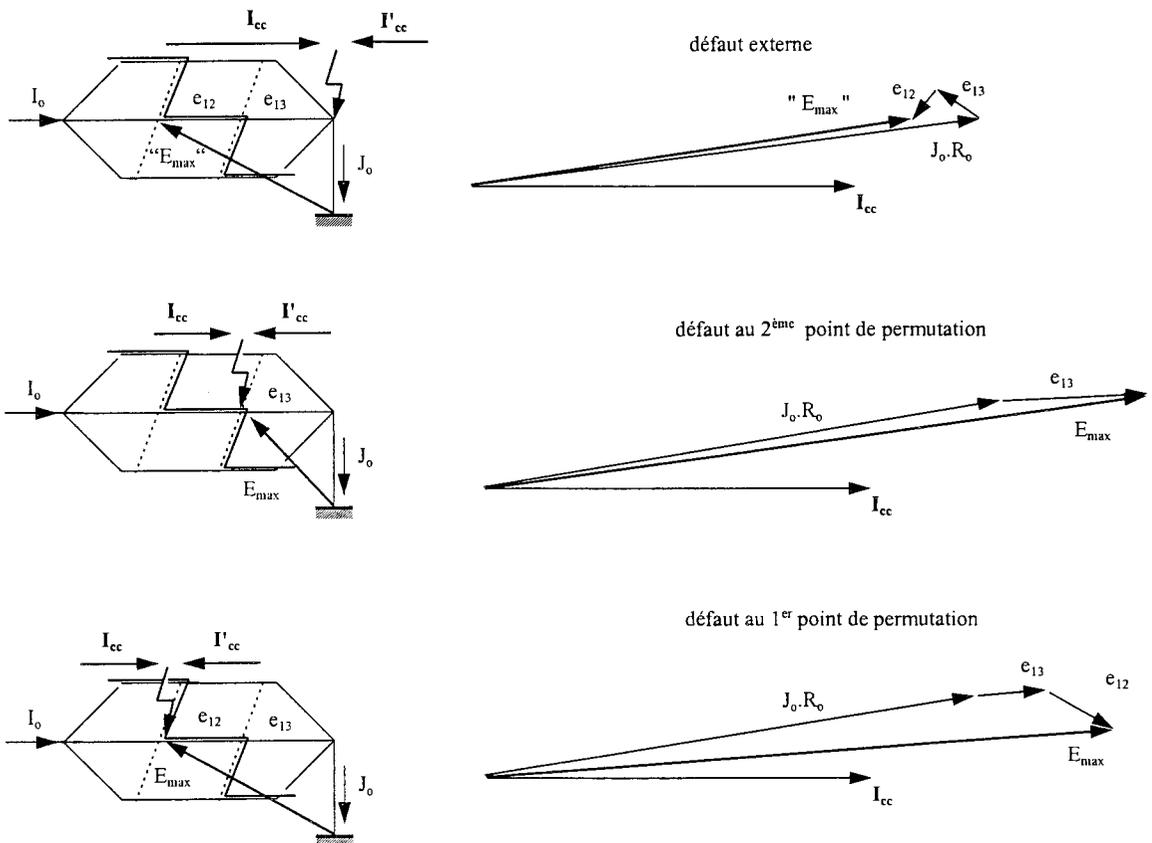
Défaut interne au 2^{ème} point de permutation :

$$e_{13} = \left\{ \left[\frac{7R_e}{9} \left(1 + \frac{Z_c - Z_L}{7 \cdot \Delta} \right) + \frac{2}{3} (Z_m - Z_c) \right] \cdot (I_{cc} + I'_{cc}) + e_{13_externe} \right\} \times \ell \quad (\text{c.f } \S 4-4 \text{ du chapitre 4})$$

- R_e : Résistance linéique de l'écran des câbles.
- Z_m : Impédance mutuelle linéique âme/écran
- Z_c : Impédance mutuelle linéique entre deux câbles
- Z_e : Impédance propre linéique de l'écran
- ℓ : Longueur de la section élémentaire.

On en déduit la montée en potentiel de l'écran au niveau des permutations des écrans

$$E = j_o R_e + e_{13}$$



La montée en potentiel de l'écran au niveau du défaut est maximale lorsque le défaut est au point de permutation le plus proche de l'aérosouterrain.

Mise à la terre en un point.

Chute de tension dans le conducteur de terre

$$V_o = [Z_i \cdot I_{cc} + Z_t \cdot I_o] \times \ell \quad (\text{c.f } \S 2 \text{ du chapitre 3})$$

Chute de tension sur l'écran

- défaut externe :
- défaut interne :

$$V_{ec} = [Z_m \cdot I_{cc} + Z_i \cdot I_o] \times \ell$$

$$V_{ei} = V_{ec} + R_e \cdot (I_{cc} + I'_{cc}) \times \ell$$

Tension entre écran et conducteur de terre :

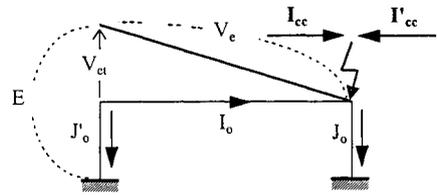
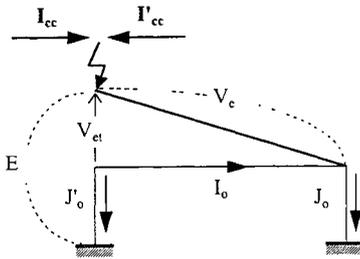
$$V_{at} = V_e - V_o$$

Montée en potentiel des écrans :

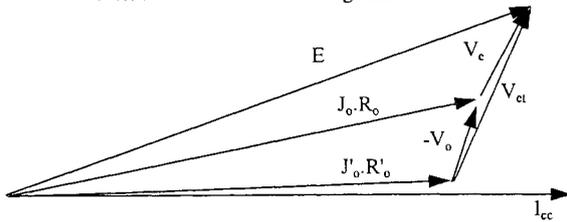
$$E = j_o R_o + V_e$$

Z_t : Impédance propre linéique du conducteur de terre

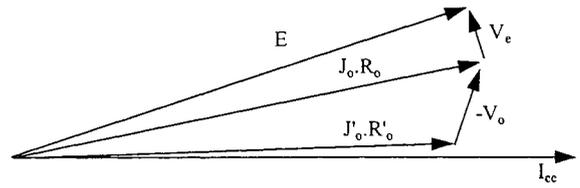
Z_i : Impédance mutuelle moyenne linéique entre les trois câbles et le conducteur de terre



Défaut interne à l'extrémité gauche



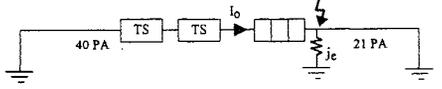
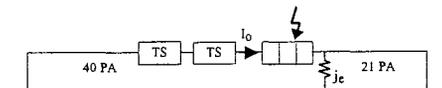
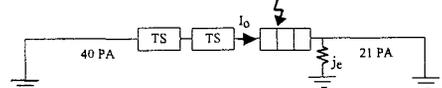
Défaut externe



4 - COMPARAISON DES CONTRAINTES EVALUEES PAR LA METHODE APPROCHEE ET PAR UN CALCUL EXACT.

Liaisons souterraines à permutation des écrans

(Les arguments des grandeurs sont donnés par rapport à I_{cc}
Les courants sont en Ampères, les tensions en Volts)

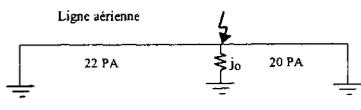
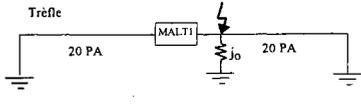
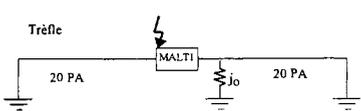
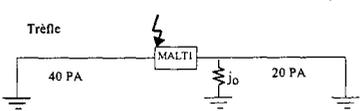
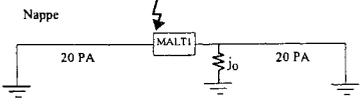
			I_{cc}	I'_{cc}	$J_e \cdot R_e$	I_o	e_{12}	e_{13}	E_{max}
	NON	Mod	17072	26902	19317	18813	936	1553	18219
		Arg	-79	-80	12	179	199	235	8
	OUI	Mod	17546	28362	20260	19628	955	1703	19087
		Arg	-80	-82	16	180	211	241	13
Approché 1 : $I_o = -I_{cc}$		Mod	17623	28642	20890	17623		718	20188
		Arg	-81	-84	17	180		208	17
Approché 2 : I_o calculé par la formule approchée		Mod	17623	28642	20890	20139		2153	19116
		Arg	-81	-84	17	177		230	13
	NON	Mod	17150	26756	18828	19100		2767	21581
		Arg	-78	-79	16	182		9	15
	OUI	Mod	17633	27719	19473	19853		2974	22368
		Arg	-80	-81	20	182		5	18
Approché 1 : $I_o = -I_{cc}$		Mod	17623	28642	20890	17623		3601	24479
		Arg	-81	-84	17	180		23	18
Approché 2 : I_o calculé par la formule approchée		Mod	17623	28642	20890	20139		2568	23379
		Arg	-81	-84	17	177		2	15
	NON	Mod	17261	26495	18417	19297	2020	1537	21174
		Arg	-78	-79	16	181	-39	9	11
	OUI	Mod	17749	27446	19065	20052	2274	1707	21939
		Arg	-80	-81	21	181	-40	3	14

La montée en potentiel de l'écran au niveau du défaut est maximale lorsque le défaut est au point de permutation le plus proche de l'aérosouterrain.

Le calcul approché dans lequel on fait l'hypothèse $I_o = -I_{cc}$ présente une erreur plus importante que l'autre, mais néanmoins assez faible.

Liaisons souterraines à mise à la terre en un point

(Les arguments des grandeurs sont donnés par rapport à I_{cc}
Les courants sont en Ampères, les tensions en Volts)

			I_{cc}	I'_{cc}	$I_o = I_t$	$I_o R_o$	V_o	V_e	V_{et}	E	
	NON	Mod	26558	27950	25857	23790					
		Arg	-79	-79	179	17					
	OUI	Mod	27443	28905	26723	24850					
		Arg	-81	-82	179	23					
	NON	Mod	26910	27890	25720	24340	5494	3373	8545	25195	
		Arg	-79	-79	177	19	246	98	78	27	
	OUI	Mod	27791	28829	26589	25450	5692	3469	8831	26660	
		Arg	-82	-82	178	25	247	98	78	32	
Approché 1 : $I_o = -I_{cc}$		Mod	28217	29406	28217	25390	6531	2798	9270	26698	
		Arg	-84	-84	180	25	256	90	80	30	
Approché 2 : I_o calculé par la formule approchée		Mod	28217	29406	26997	25390	5784	3526	8966	26605	
		Arg	-84	-84	178	25	246	99	78	32	
	NON	Mod	27003	27503	25714	24190	5435	6414	11316	30482	
		Arg	-78	-78	178	19	247	32	48	22	
	OUI	Mod	27921	28445	26606	25320	5632	6625	11700	31908	
		Arg	-80	-80	178	25	247	32	48	26	
Approché 1 : $I_o = -I_{cc}$		Mod	28217	29406	28217	25390	6531	6825	12022	32219	
		Arg	-84	-84	180	25	256	24	49	25	
Approché 2 : I_o calculé par la formule approchée		Mod	28217	29406	26997	25390	5784	6678	11889	32040	
		Arg	-84	-84	178	25	246	31	48	26	
	NON	Mod	17963	27528	19004	20540	5209	4063	8745	24603	
		Arg	-78	-78	174	21	239	20	42	21	
	OUI	Mod	18462	28552	19776	21310	5418	4391	8957	25660	
		Arg	-80	-81	175	25	244	16	43	23	
Approché 1 : $I_o = -I_{cc}$		Mod	18663	29406	18663	21480	4320	5496	8653	26958	
		Arg	-83	-84	180	25	256	19	44	24	
Approché 2 : I_o calculé par la formule approchée		Mod	18663	29406	19988	21480	5484	4471	9104	25913	
		Arg	-83	-84	175	25	244	16	43	23	
	NON	Mod	27352	27546	26283	24006	4001	5838	9101	29842	
		Arg	-78	-78	181	20	244	18	36	19	
	OUI	Mod	28315	28509	27219	28082	4150	6039	9420	31075	
		Arg	-80	-80	181	26	243	18	36	24	

Pour les défauts externes, la chute de tension sur l'écran est nettement inférieure à celle obtenue dans le cas des défauts internes. Pourtant, la chute de tension dans le conducteur de terre dans ces deux cas est sensiblement égale. Ceci explique la différence de la tension entre écran et conducteur de terre dans les deux cas de défaut.

Le calcul approché dans lequel on fait l'hypothèse $I_o = -I_{cc}$ présente une erreur plus importante que l'autre, mais néanmoins assez faible.

5 - SYNTHÈSE

D'après les résultats présentés ci-dessus, on peut formuler les conclusions suivantes :

- La montée en potentiel de la prise de terre des extrémités d'une liaison souterraine est maximale quand le défaut survient à l'extrémité la plus proche d'un poste.
- Les défauts survenant à l'intérieur de la liaison souterraine sont moins contraignants que le défaut au niveau de l'aérosouterrain.

Par conséquent, les contraintes sont les plus sévères quand le défaut survient au premier tronçon de la liaison souterraine à l'extrémité la plus proche d'un poste.

Le tableau dans la page qui suit résume toutes les formules de calcul utilisés avec les notations suivantes :

I_{cc}	: Courant de court-circuit du côté gauche du réseau.
I'_{cc}	: Courant de court-circuit du côté droit du réseau.
J_o	: Courant dans la prise de terre du pylône en défaut.
I_o	: Courant de retour du courant de court-circuit I_{cc} . C'est la somme des trois courants d'écran (permutation des écrans) ou le courant dans le conducteur de terre (mise à la terre en un point)
V_e	: Chute de tension dans l'écran.
V_n	: Tension nominale de la source.
r, Z_s	: Résistance et impédance de la source.
Z_{lpa}	: Impédance propre de la ligne pour une PA.
Z_p	: Impédance propre du câble de garde pour une PA.
M	: Mutuelle entre la ligne et le câble de garde pour une PA.
$Z_{câble}$: Impédance propre de l'âme d'un tronçon souterrain.
Z'_e	: Impédance propre des écrans d'un tronçon souterrain.
Z'_m	: Mutuelle entre les écrans et les âmes d'un tronçon souterrain.
R_o	: Résistance de la prise de terre du pylône en défaut.
R	: Résistance des prises de terre.
Z_{g_n}	: Impédance entre le point de défaut et la source à gauche du réseau en tenant compte des n tronçons
Z_{as}	: Impédance apparente d'un nombre infini de portées aériennes (lorsque le nombre de portées est supérieur à 14).
R_e	: Résistance linéique de l'écran des câbles.
Z_e	: Impédance propre linéique de l'écran
Z_t	: Impédance propre linéique du conducteur de terre
Z_m	: Impédance mutuelle linéique âme/écran
Z_c	: Impédance mutuelle linéique entre deux câbles
Z_i	: Impédance mutuelle moyenne linéique entre les trois câbles et le conducteur de terre
ℓ	: Longueur de la section élémentaire.

Calcul approché pour les liaisons souterraines en régime de défaut monophasé	
Courants court-circuit	$I_{cc} = \frac{V_n}{r + Z_s + x \cdot (Z_{lpa} - \frac{M^2}{Z_p}) + n \cdot (Z_{cable} - \frac{Z_m^2}{Z'_c})}$ $I'_{cc} = \frac{V_n}{r + Z_s + m \cdot (Z_{lpa} - \frac{M^2}{Z_p})}$
Courant dans la prise de terre au niveau du défaut et Courant dans la portée à gauche du défaut	$j_o = j_{o_cond} + j_{o_ind}$ $j_{o_cond} = \frac{\frac{1}{R_o}}{\frac{1}{Z_{g_n}} + \frac{1}{R_o} + \frac{1}{Z_{as}}} \cdot \left[1 - \frac{M}{Z_p} \right] \cdot (I_{cc} + I'_{cc})$ $j_{o_ind} = - \left[\chi_o + \frac{R}{Z_{moy}^2 + 2 \cdot R \cdot Z_{moy}} \sum_{i=0}^{n-2} \left(\frac{R}{R + Z_{moy}} \right)^i \right] \times A \cdot I_{cc}$ $I_o = - \left[\frac{M}{Z_p} \cdot I_{cc} + \frac{R_o}{Z_{g_n}} \cdot j_{o_cond} + \frac{R_o + Z_{as}}{Z_{as}} \cdot j_{o_ind} \right]$ $Z_{g_n} = Z'_c + R // Z_{g_n(n-1)} \quad Z_{g_1} = Z'_c + R // Z_{as} ;$ $Z_{moy} = \frac{Z_{g_1} + Z_{g_2} + \dots + Z_{g_n}}{n}$ $\chi_o = \frac{1}{Z_{g_n} + R_o // Z_{as}}$ $A = \left[Z'_m - Z'_c \frac{M}{Z_p} \right] \cdot \frac{Z_{as}}{R_o + Z_{as}}$
Ordre de grandeur de la chute de tension maximale de l'écran du point de permutation le plus proche de l'aérosouterrain (*)	<ul style="list-style-type: none"> défaut externe à l'aérosouterrain : $V_e = \left\{ \left[-\frac{R_e}{3} + \frac{2Z_m - Z_c - Z_L}{3} \right] \cdot I_{cc} + \left[Z_e - \frac{2(Z_e - Z_c)^2}{\Delta} \right] \cdot (I_o + I_{cc}) \right\} \times \ell \quad (\text{nappe})$ $V_e = \left\{ \left[-\frac{R_e}{3} + \frac{2}{3}(Z_m - Z_c) \right] \cdot I_{cc} + \left[\frac{R_e}{3} + \frac{Z_m + 2Z_c}{3} \right] \cdot (I_o + I_{cc}) \right\} \times \ell \quad (\text{trèfle})$ $(\Delta = 3Z_e - 4Z_c + Z_L)$ défaut interne au point de permutation le plus proche de l'aérosouterrain : $V_e = \left\{ \left[\frac{7 \cdot R_e}{9} + \frac{2 \cdot (Z_m - Z_L)}{3} \right] \cdot (I_{cc} + I'_{cc}) - \left[\frac{R_e}{3} - \frac{2Z_L - Z_c - Z_m}{3} \right] \cdot I_{cc} + \left[Z_e - \frac{2(Z_e - Z_c)^2}{\Delta} \right] \cdot (I_o + I_{cc}) \right\} \times \ell \quad (\text{nappe})$ $V_e = \left\{ \left[\frac{7 \cdot R_e}{9} + \frac{2 \cdot (Z_m - Z_c)}{3} \right] \cdot (I_{cc} + I'_{cc}) - \left[\frac{R_e}{3} + \frac{Z_m - Z_c}{3} \right] \cdot I_{cc} + \left[\frac{R_e}{3} + \frac{Z_m + 2Z_c}{3} \right] \cdot (I_o + I_{cc}) \right\} \times \ell \quad (\text{trèfle})$
Liaisons d'un seul tronçon souterrain à mise à la terre en un point	<ul style="list-style-type: none"> Chute de tension dans le conducteur de terre : $V_o = [Z_i \cdot I_{cc} + Z_i \cdot I_o] \times \ell$ Chute de tension sur l'écran : <ul style="list-style-type: none"> défaut externe : $V_{ee} = [Z_m \cdot I_{cc} + Z_i \cdot I_o] \times \ell$ défaut interne à l'extrémité "isolée" : $V_{ei} = V_{ee} + R_e \cdot (I_{cc} + I'_{cc}) \times \ell$ Tension entre écran et conducteur de terre : $V_{et} = V_e - V_o$ Montée en potentiel des écrans : $E = j_o R_o + V_e$

(*) les formules proposées donnent les chutes de tension maximales dans la mesure où : $I_o = -I_{cc}$ et, de plus : $I_{cc} \leq 2/3 (I_{cc} + I'_{cc})$ pour le défaut interne

Annexe 7

Précisions sur les méthodes de calcul et présentation de résultats concernant les liaisons souterraines doubles

Dans cette annexe, on apporte quelques précisions sur les études présentées au chapitre 6.

On s'intéresse en particulier au courant de retour du courant de court-circuit (dans les conducteurs de terre ou les écrans) et on donne des formules permettant d'évaluer l'effet de mutuelle entre les 2 liaisons en parallèle, en fonction notamment de la distance entre ces liaisons et de l'entraxe des câbles.

On présente les résultats le calcul pour des câbles 2500 mm² Cu 400 kV en complément de ceux donés au chapitre 6 pour des câbles 1600 mm² Cu.

1 - MISE A LA TERRE EN UN POINT - POSE EN TREFLE

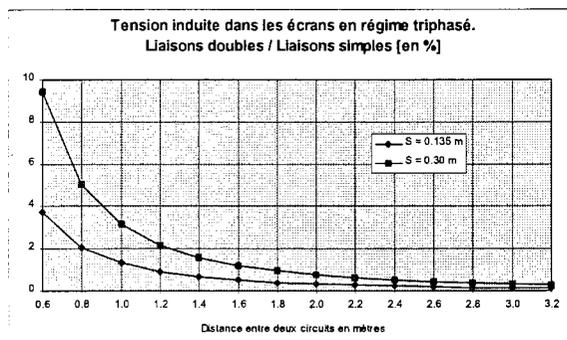
1 - 1 - REGIMES PERMANENT ET COURT-CIRCUIT TRIPHASÉ :

La tension induite par les courants de phase dans les conducteurs de terre est nulle :

$$e_r = [(Z_{1r} + Z_{2r} + Z_{3r}) + (Z_{1n} + Z_{2n} + Z_{3n})] \cdot \frac{L}{3} \cdot (I_{a1} + I_{a2} + I_{a3}) = 0$$

Il s'ensuit que les courants induits dans les conducteurs de terre sont négligeables : $I_l \approx 0$

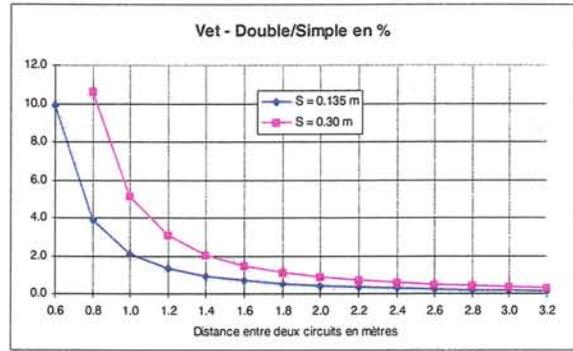
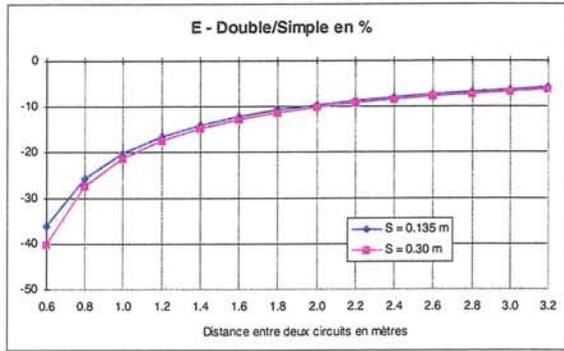
$$\frac{E_D - E_S}{E_S} = \frac{1}{3} \cdot \frac{\text{Ln} \left(\frac{\sqrt{[S^2 + d \cdot (d - S)] [S^2 + d \cdot (d + S)]}}{d^2 - S^2} \right)}{\text{Ln} \left(\frac{S}{r_c} \right)} = \frac{1}{3} \cdot \frac{\text{Ln} \left(\frac{\sqrt{S^4 + d^4 + S^2 d^2}}{d^2 - S^2} \right)}{\text{Ln} \left(\frac{S}{r_c} \right)} \cdot 100 (\%)$$



1 - 2 - MONOPHASE EXTERNE.

$$\frac{E_D - E_S}{E_S} = \frac{\text{Ln} \left[\frac{\sqrt{\left[d - d_1 - \frac{S}{2} \right]^2 + \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot S \right]^2} \times (d - d_1) \times (d - d_1 - S)}{d \cdot (d^2 - S^2)} \right]}{\text{Ln} \left(\frac{\sqrt{S^2 + d_1 \cdot (d_1 + S)} \times (d_1 + S) \times d_1}{r_c^3} \right)} \cdot 100 (\%)$$

$$\frac{V_{etD} - V_{etS}}{V_{etS}} = \frac{\text{Ln} \left[\frac{\left[\left(d - d_1 - \frac{S}{2} \right)^2 + \frac{3}{4} S^2 \right] \times (d - d_1)^2 \times (d - d_1 - S)^2}{d \times (d^2 - S^2) \times (d - S - 2 \cdot d_1)^3} \right]}{\text{Ln} \left(\frac{S^2 + d_1 \cdot (d_1 + S) \times (d_1 + S)^2 \times d_1^2}{(r_c \cdot r_r)^3} \right)} \cdot 100 (\%)$$



I - 3 - MONOPHASE INTERNE.

Résolution du système d'équations posé au chapitre 6 :

$$I_{i1} = \left[\frac{\beta \cdot Z_x}{\lambda'} - k \right] \cdot \frac{I_{cc}}{2} \quad I_{i2} = - \left[\frac{\beta \cdot Z_x}{\lambda'} + k \right] \cdot \frac{I_{cc}}{2} \quad I_{cc1} = \left[\frac{\beta \cdot Z_x}{\lambda} + x \right] \cdot \frac{I_{cc}}{2} \quad I_{cc2} = - \left[\frac{\beta \cdot Z_x}{\lambda} - x \right] \cdot \frac{I_{cc}}{2}$$

$$V_0 = \left[(Z_i + Z_{ii}) \cdot k + (Z_i + Z_{ii}) \cdot x \right] \cdot L \cdot \frac{I_{cc}}{2}$$

$$e_1 = \left\{ - (Z_i + Z_{ii}) \cdot k + (Z_m + z_{m4}) \cdot x + [\alpha + 2 \cdot R_e] \cdot \beta \right\} \cdot L \cdot \frac{I_{cc}}{2}; \quad e_2 = \left\{ - (Z_i + Z_{ii}) \cdot k + (Z_m + z_{m4}) \cdot x - \alpha \cdot \beta \right\} \cdot L \cdot \frac{I_{cc}}{2}$$

avec :

$$\alpha = \frac{Z_x \cdot (Z_i - Z_{ii})}{\lambda'} + \frac{Z_x \cdot (Z_m - z_{m4})}{\lambda}; \quad \lambda = \frac{(Z_a - z_{m4}) \cdot (Z_i - Z_{ii}) - (Z_i - Z_{ii})^2}{Z_i - Z_{ii}}; \quad \lambda' = - \frac{(Z_a - z_{m4}) \cdot (Z_i - Z_{ii}) - (Z_i - Z_{ii})^2}{Z_i - Z_{ii}}$$

e₁ : Maximum de la chute de tension sur les écrans de la liaison en défaut.

e₂ : Maximum de la chute de tension sur les écrans de la liaison saine.

V₀ : Chute de tension sur les conducteurs de terre.

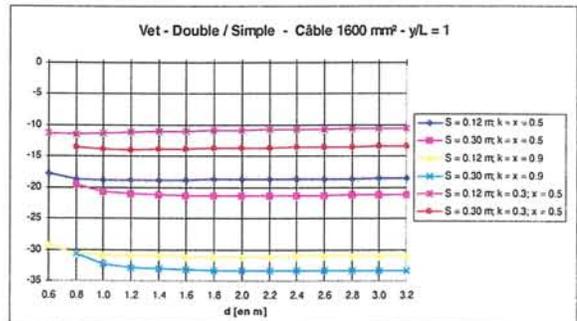
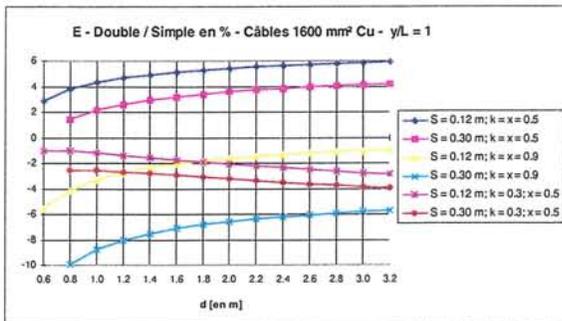
k et x : Coefficients de courant dans les conducteurs de terre et dans les âmes.

Les montées en potentiel des écrans par rapport au conducteur de terre sont calculées à partir des chutes de tension sur les écrans (e) et sur le conducteur de terre (V₀) : V_{et} = e - V₀.

$$V_{et1} = \left\{ - (Z_i + Z_{ii}) \cdot (k + x) + (Z_m + z_{m4}) \cdot x + (Z_i + Z_{ii}) \cdot k + [\alpha + 2 \cdot R_e] \cdot \beta \right\} \cdot L \cdot \frac{I_{cc}}{2}$$

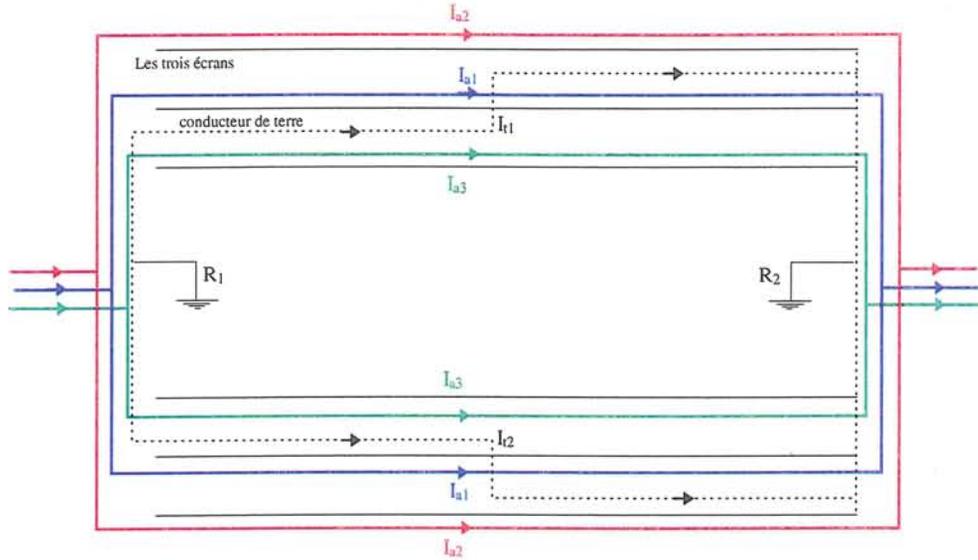
$$V_{et2} = \left\{ - (Z_i + Z_{ii}) \cdot (k + x) + (Z_m + z_{m4}) \cdot x + (Z_i + Z_{ii}) \cdot k - \alpha \cdot \beta \right\} \cdot L \cdot \frac{I_{cc}}{2}$$

La chute de tension sur les écrans et la tension écrans - conducteur de terre de la liaison souterraine en défaut sont plus grandes. Elles sont présentées dans les deux figures ci-dessous selon plusieurs facteurs de répartition du courant de court-circuit.



2 - MISE A LA TERRE EN UN POINT - POSE EN NAPPE

2 - 1 - REGIMES PERMANENT ET COURT-CIRCUIT TRIPHASE



Tension induite sur le conducteur dans chaque demi-longueur de la première liaison :

$$E_{c1} = \frac{L}{2} [(Z_{1t} \cdot I_{a1} + Z_{2t} \cdot I_{a2} + Z_{3t} \cdot I_{a3}) + (m_1 \cdot I_{a1} + m_2 \cdot I_{a2} + m_3 \cdot I_{a3}) + Z_{tt1} \cdot I_{t2}]$$

$$E_{c2} = \frac{L}{2} [(Z_{1t} \cdot I_{a1} + Z_{2t} \cdot I_{a2} + Z_{3t} \cdot I_{a3}) + (M_1 \cdot I_{a1} + M_2 \cdot I_{a2} + M_3 \cdot I_{a3}) + Z_{tt2} \cdot I_{t2}]$$

Comme $Z_{1t} = \frac{1}{2} (Z_{2t} + Z_{3t})$, $I_{a1} = - (I_{a2} + I_{a3})$; $Z_{tt} = \frac{1}{2} (Z_{tt1} + Z_{tt2})$; $I_{t1} = I_{t2} = \frac{1}{2} I_t$

on obtient la tension induite sur toute la longueur du conducteur de terre :

$$E_c = E_{c1} + E_{c2} = \frac{L}{2} [(m_1 + M_1) \cdot I_{a1} + (m_2 + M_2) \cdot I_{a2} + (m_3 + M_3) \cdot I_{a3} + Z_{tt} \cdot I_t]$$

En posant : $M = (m_1 + M_1) + (m_2 + M_2) \cdot \alpha^2 + (m_3 + M_3) \cdot \alpha$; l'équation pour le conducteur de terre s'écrit :

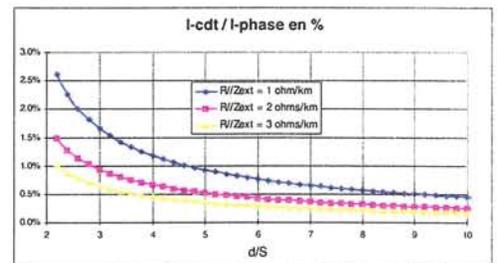
$$[M \cdot I_{a1} + Z_{tt} \cdot I_t] \cdot L + [Z_t \cdot L + (R_1 / Z_{ext}) + (R_2 / Z_{ext})] \cdot I_t = 0$$

où : $R = \frac{R_1 + R_2}{L}$; Z_{ext} : Impédance du circuit extérieur (câble de garde, pylônes ...)

On en déduit le courant dans le conducteur de terre en régime permanent :

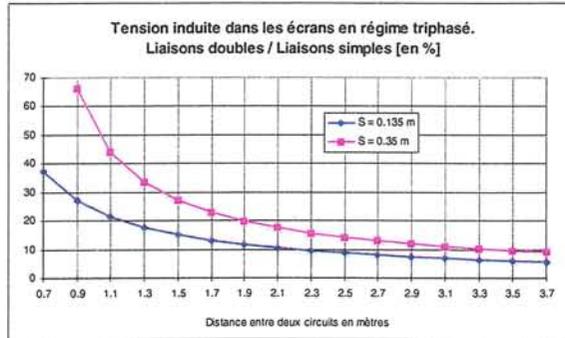
$$I_t = - \frac{M}{Z_{tt} + Z_t + \frac{2 \cdot (R / Z_{ext})}{L}} \cdot I_{a1}$$

dans le cas où : $R_1 = R_2 = R$.



En traçant quelques courbes avec différentes valeurs de (R / Z_{ext}) , on constate que la circulation du courant dans le conducteur de terre est négligeable devant celle dans les phases.

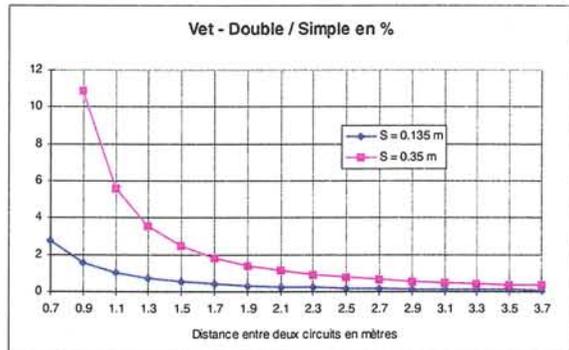
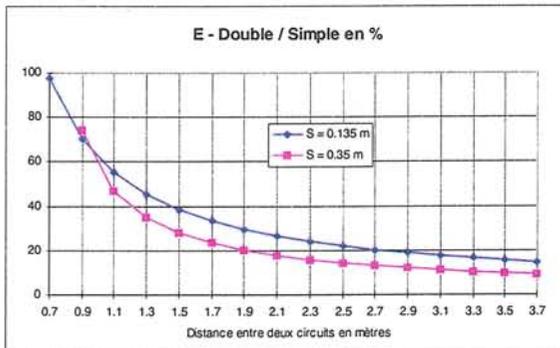
$$\frac{E_D - E_S}{E_S} = \sqrt{\frac{\frac{3}{4} \cdot Ln^2 \left[\frac{d-2S}{d} \right] + \frac{1}{4} \cdot Ln^2 \left[\frac{d \cdot (d-2S)}{(d-S)^2} \right]}{\frac{3}{4} \cdot Ln^2 \left[\frac{2S}{r_e} \right] + \frac{1}{4} \cdot Ln^2 \left[\frac{S}{2 \cdot r_e} \right]}} \cdot 100 (\%)$$



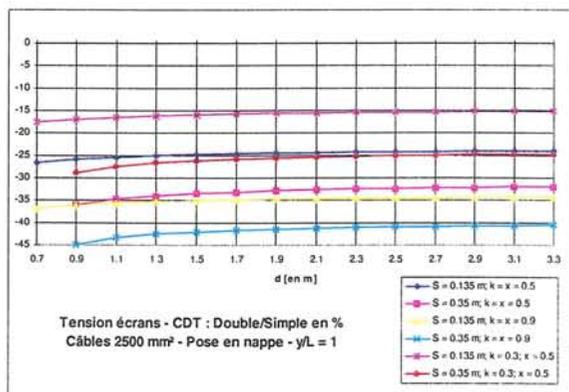
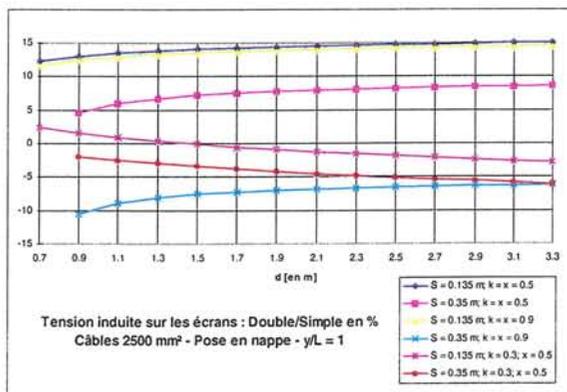
2 - 2 - DEFAUT MONOPHASE EXTERNE.

$$\frac{E_D - E_S}{E_S} = \frac{Ln \left(\frac{\sqrt{(d-1,7S) \cdot (d-0,3S)}}{d-2S} \right)}{Ln \left(\frac{0,7S}{r_e} \right)} \cdot 100 (\%)$$

$$\frac{Vet_D - Vet_S}{Vet_S} = \frac{Ln \left[\frac{(d-1,7S) \cdot (d-0,3S)}{(d-2S) \times \sqrt{d^2 - (1,4S)^2}} \right]}{Ln \left[\frac{(0,7S)^2}{r_e \cdot r_i} \right]} \cdot 100 (\%)$$



2 - 3 - DEFAUT MONOPHASE INTERNE.

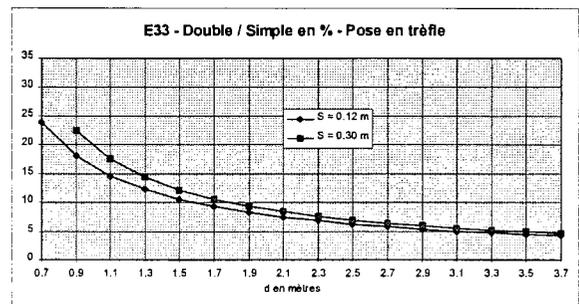
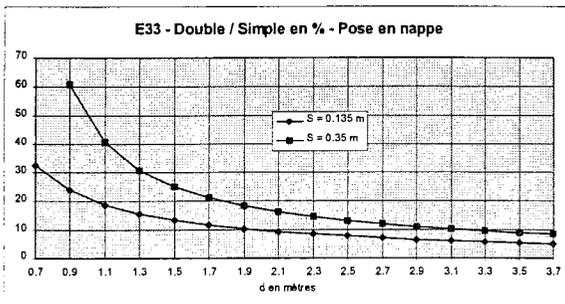


2 - PERMUTATION DES ECRANS

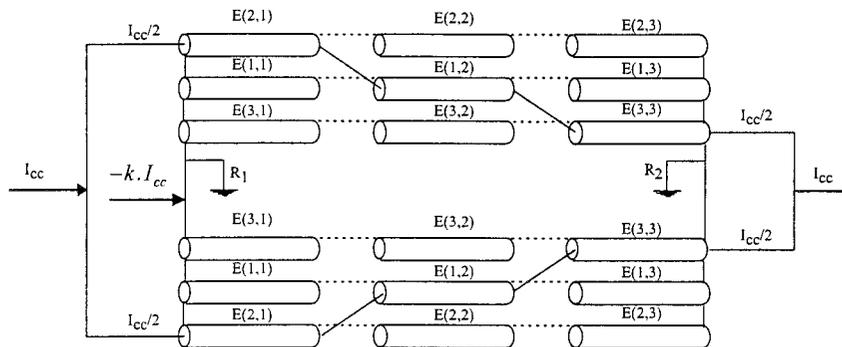
2 - 1 - REGIMES PERMANENT ET COURT-CIRCUIT TRIPHASE

$$\frac{E(33)_D - E(33)_S}{E(33)_S} = \sqrt{\frac{\frac{3}{4} \cdot Ln^2 \left[\frac{d-S}{d} \right] + \frac{1}{4} \cdot Ln^2 \left[\frac{d \cdot (d-S)}{(d-2S)^2} \right]}{\frac{3}{4} \cdot Ln^2 \left[\frac{1}{2} \right] + \frac{1}{4} \cdot Ln^2 \left[\frac{2S^2}{r_e^2} \right]}} \cdot 100 \text{ (\%)} \quad \text{(nappe)}$$

$$\frac{E(33)_D - E(33)_S}{E(33)_S} = \sqrt{\frac{\frac{3}{4} \cdot Ln^2 \left[\frac{\sqrt{S^2 + d \cdot (d-S)}}{d} \right] + \frac{1}{4} \cdot Ln^2 \left[\frac{d \cdot \sqrt{S^2 + d \cdot (d-S)}}{(d-S)^2} \right]}{Ln^2 \left(\frac{S}{r_e} \right)}} \cdot 100 \text{ (\%)} \quad \text{(trèfle)}$$



2 - 2 - REGIME DE DEFAUT MONOPHASE EXTERNE



Chute de tension dans les écrans dans chaque section élémentaire

* pour le circuit d'écran 1 :

$$E(1,1) = \left[(Z_c + z_4) \left(\frac{I_{cc}}{2} \right) + (Z_e + z_3) \cdot I_{e1} + (Z_c + z_4) \cdot I_{e2} + (Z_c + z_2) \cdot I_{e3} \right] \cdot \ell$$

$$E(1,2) = \left[(Z_m + z_3) \left(\frac{I_{cc}}{2} \right) + (Z_e + z_3) \cdot I_{e1} + (Z_c + z_4) \cdot I_{e2} + (Z_c + z_2) \cdot I_{e3} \right] \cdot \ell$$

$$E(1,3) = \left[(Z_c + z_2) \left(\frac{I_{cc}}{2} \right) + (Z_e + z_3) \cdot I_{e1} + (Z_c + z_4) \cdot I_{e2} + (Z_c + z_2) \cdot I_{e3} \right] \cdot \ell$$

* pour le circuit d'écran 2 :

$$E(2,1) = [(Z_m + z_5) \left(\frac{I_{cc}}{2}\right) + (Z_c + z_4) \cdot I_{e1} + (Z_c + z_5) \cdot I_{e2} + (Z_L + z_3) \cdot I_{e3}] \cdot \ell$$

$$E(2,2) = [(Z_c + z_4) \left(\frac{I_{cc}}{2}\right) + (Z_c + z_4) \cdot I_{e1} + (Z_c + z_5) \cdot I_{e2} + (Z_L + z_3) \cdot I_{e3}] \cdot \ell$$

$$E(2,3) = [(Z_L + z_3) \left(\frac{I_{cc}}{2}\right) + (Z_c + z_4) \cdot I_{e1} + (Z_c + z_5) \cdot I_{e2} + (Z_L + z_3) \cdot I_{e3}] \cdot \ell$$

* pour le circuit d'écran 3 :

$$E(3,1) = [(Z_L + z_3) \left(\frac{I_{cc}}{2}\right) + (Z_c + z_2) \cdot I_{e1} + (Z_L + z_3) \cdot I_{e2} + (Z_c + z_1) \cdot I_{e3}] \cdot \ell$$

$$E(3,2) = [(Z_c + z_2) \left(\frac{I_{cc}}{2}\right) + (Z_c + z_2) \cdot I_{e1} + (Z_L + z_3) \cdot I_{e2} + (Z_c + z_1) \cdot I_{e3}] \cdot \ell$$

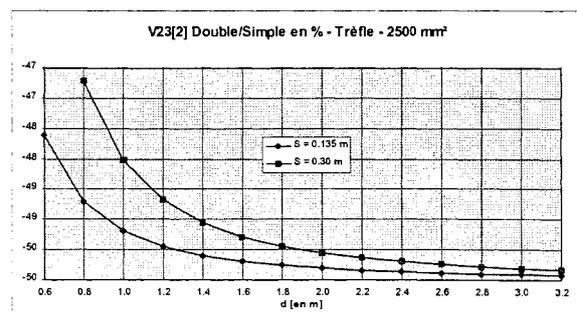
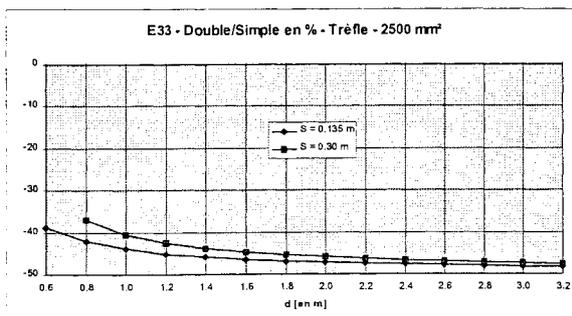
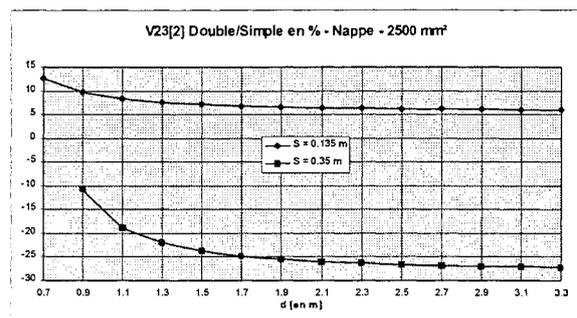
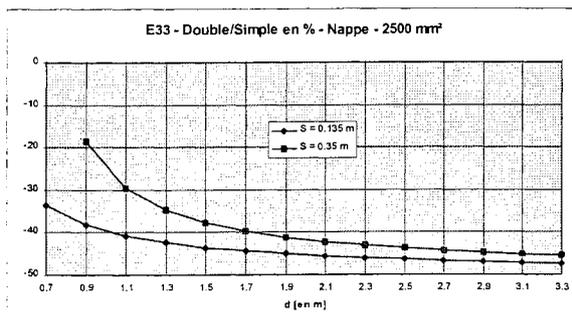
$$E(3,3) = [(Z_m + z_1) \left(\frac{I_{cc}}{2}\right) + (Z_c + z_2) \cdot I_{e1} + (Z_L + z_3) \cdot I_{e2} + (Z_c + z_1) \cdot I_{e3}] \cdot \ell$$

Détermination des courants dans les écrans.

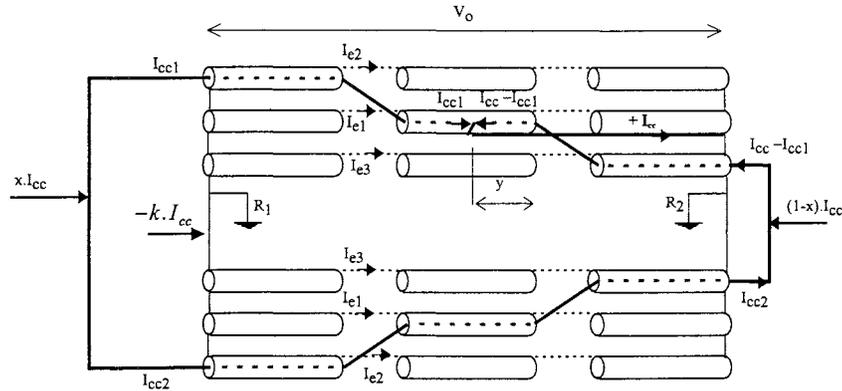
Système d'équations à résoudre :

$$\begin{pmatrix} Z_c + z_3 & Z_c + z_4 & Z_c + z_2 & 1 \\ Z_c + z_4 & Z_c + z_5 & Z_L + z_3 & 1 \\ Z_c + z_2 & Z_L + z_3 & Z_c + z_1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} I_{e1} \\ I_{e2} \\ I_{e3} \\ -V_n \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} Z_{p1} + z_{m2} \\ Z_{p2} + z_{m3} \\ Z_{p2} + z_{m1} \\ k \end{pmatrix} \cdot \frac{I_{cc}}{2}$$

$$Z_{p1} = \frac{Z_m + 2Z_c}{3}; \quad Z_{p2} = \frac{Z_m + Z_c + Z_L}{3}; \quad z_{m1} = \frac{z_1 + z_2 + z_3}{3}; \quad z_{m2} = \frac{z_2 + z_3 + z_4}{3}; \quad z_{m3} = \frac{z_3 + z_4 + z_5}{3}$$



2 - 3 - REGIME DE DEFAUT MONOPHASE INTERNE



On établit tout d'abord le système d'équation régissant la chute de tension V_o , les six courants dans les écrans I_{eij} et les répartitions du courant de court-circuit dans les deux liaisons souterraines I_{cc1} et I_{cc2} .

$$\begin{pmatrix} Z_e & Z_c & Z_c & z_3 & z_4 & z_2 & Z_{p1} & z_{m2} & -1 \\ Z_c & Z_e & Z_L & z_4 & z_5 & z_3 & Z_{p2} & z_{m3} & -1 \\ Z_c & Z_L & Z_c & z_2 & z_3 & z_1 & Z_{p2} & z_{m1} & -1 \\ z_3 & z_4 & z_2 & Z_e & Z_c & Z_c & z_{m2} & Z_{p1} & -1 \\ z_4 & z_5 & z_3 & Z_c & Z_e & Z_L & z_{m3} & Z_{p2} & -1 \\ z_2 & z_3 & z_1 & Z_c & Z_L & Z_e & z_{m1} & Z_{p2} & -1 \\ Z_{p1} - z_{m2} & Z_{p2} - z_{m3} & Z_{p2} - z_{m1} & z_{m2} - Z_{p1} & z_{m3} - Z_{p2} & z_{m1} - Z_{p2} & Z_a - z_{m4} & z_{m4} - Z_a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} I_{e11} \\ I_{e21} \\ I_{e31} \\ I_{e12} \\ I_{e22} \\ I_{e32} \\ I_{cc1} \\ I_{cc2} \\ V_o \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} C_{1-i} \\ C_{2-i} \\ C_{3-i} \\ C_{4-i} \\ C_{5-i} \\ C_{6-i} \\ C_{7-i} \\ -x \\ k \end{pmatrix} \cdot I_{cc}$$

$$Z_{p1} = \frac{Z_m + 2Z_c}{3}; \quad Z_{p2} = \frac{Z_m + Z_c + Z_L}{3}; \quad z_{m1} = \frac{z_1 + z_2 + z_3}{3}; \quad z_{m2} = \frac{z_2 + z_3 + z_4}{3}; \quad z_{m3} = \frac{z_3 + z_4 + z_5}{3}; \quad z_{m4} = \frac{z_1 + z_3 + z_5}{3}$$

Les coefficients C qui varient selon le cas considéré, sont donnés dans les deux tableaux ci-après.

	défaut circuit 1			défaut circuit 2			défaut circuit 3		
	SE1	SE2	SE3	SE1	SE2	SE3	SE1	SE2	SE3
C1	$\beta \cdot R_c + \frac{1}{3}(Z_c - Z_c)$	$\beta \cdot R_c + \frac{1}{3}(Z_e - Z_c)$	$\beta \cdot R_e$	$\frac{1}{3}(Z_c - Z_m)$	$\frac{1}{3}(Z_c - Z_m)$	0	$\frac{1}{3}(2Z_c - Z_m - Z_L)$	0	0
C2	$\frac{1}{3}(2Z_c - Z_m - Z_L)$	$\frac{1}{3}(Z_c - Z_L)$	0	$\beta \cdot R_c + \frac{1}{3}(2Z_e - Z_c - Z_L)$	$\beta \cdot R_c + \frac{1}{3}(Z_e - Z_c)$	$\beta \cdot R_e$	$\frac{1}{3}(2Z_L - Z_m - Z_c)$	$\frac{1}{3}(Z_L - Z_m)$	0
C3	$\frac{1}{3}(2Z_c - Z_m - Z_L)$	$\frac{1}{3}(Z_c - Z_m)$	0	$\frac{1}{3}(2Z_L - Z_m - Z_c)$	$\frac{1}{3}(Z_L - Z_c)$	0	$\beta \cdot R_c + \frac{1}{3}(2Z_e - Z_c - Z_L)$	$\beta \cdot R_c + \frac{1}{3}(Z_e - Z_L)$	$\beta \cdot R_e$
C4	$\frac{1}{3}(2z_3 - z_2 - z_4)$	$\frac{1}{3}(z_3 - z_2)$	0	$\frac{1}{3}(2z_4 - z_3 - z_2)$	$\frac{1}{3}(z_4 - z_3)$	0	$\frac{1}{3}(2z_2 - z_3 - z_4)$	$\frac{1}{3}(z_2 - z_4)$	0
C5	$\frac{1}{3}(2z_4 - z_3 - z_5)$	$\frac{1}{3}(z_4 - z_3)$	0	$\frac{1}{3}(2z_5 - z_4 - z_3)$	$\frac{1}{3}(z_5 - z_4)$	0	$\frac{1}{3}(2z_3 - z_4 - z_5)$	$\frac{1}{3}(z_3 - z_5)$	0
C6	$\frac{1}{3}(2z_2 - z_1 - z_3)$	$\frac{1}{3}(z_2 - z_1)$	0	$\frac{1}{3}(2z_3 - z_2 - z_1)$	$\frac{1}{3}(z_3 - z_2)$	0	$\frac{1}{3}(2z_1 - z_2 - z_3)$	$\frac{1}{3}(z_1 - z_3)$	0

C7	SE1	SE2	SE3
défaut circuit 1	$\beta(Z_m - Z_a) + \frac{1}{3}(Z_c - Z_a) - \frac{1}{3}(z_2 - z_1 + z_4 - z_5)$	$\beta(Z_m - Z_a) + \frac{1}{3}(Z_c - Z_a) - \frac{1}{3}(z_2 - z_1)$	$\beta(Z_m - Z_a)$
défaut circuit 2	$\beta(Z_m - Z_a) + \frac{1}{3}(Z_c + Z_L - 2Z_a) - \frac{1}{3}(z_4 - z_3 + z_2 - z_1)$	$\beta(Z_m - Z_a) + \frac{1}{3}(Z_c - Z_a) - \frac{1}{3}(z_4 - z_3)$	
défaut circuit 3	$\beta(Z_m - Z_a) + \frac{1}{3}(Z_c + Z_L - 2Z_a) - \frac{1}{3}(z_2 - z_5)$	$\beta(Z_m - Z_a) + \frac{1}{3}(Z_L - Z_a) - \frac{1}{3}(z_3 - z_5)$	

où $\beta = \frac{y}{L}$; i : section élémentaire en défaut.

Chute de tension sur les âmes et sur les écrans

*** pour une section ternaire**

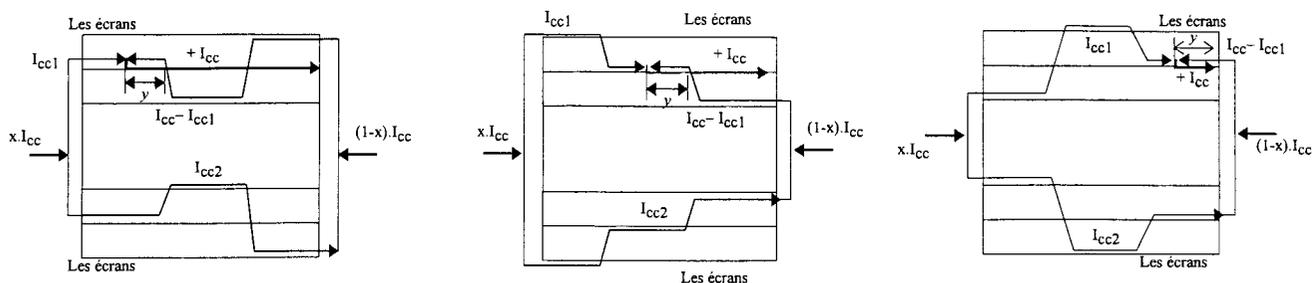
Les chutes de tension pour une section ternaire sont calculées à partir des courants dans les écrans et ceux dans les âmes. A titre d'exemple, la chute de tension dans le circuit d'écran 1 de la liaison en défaut (notée 1) est calculé d'après la manière suivante :

$$V_{e11} = \{Z_c \cdot I_{e11} + Z_c \cdot I_{e21} + Z_c \cdot I_{e31} + z_3 \cdot I_{e12} + z_4 \cdot I_{e22} + z_2 \cdot I_{e32} + Z_{p1} \cdot I_{cc1} + z_{m2} \cdot I_{cc2} + [\beta \cdot R_c + \frac{1}{3} (Z_e - Z_c)] \cdot I_{cc}\} \cdot L$$

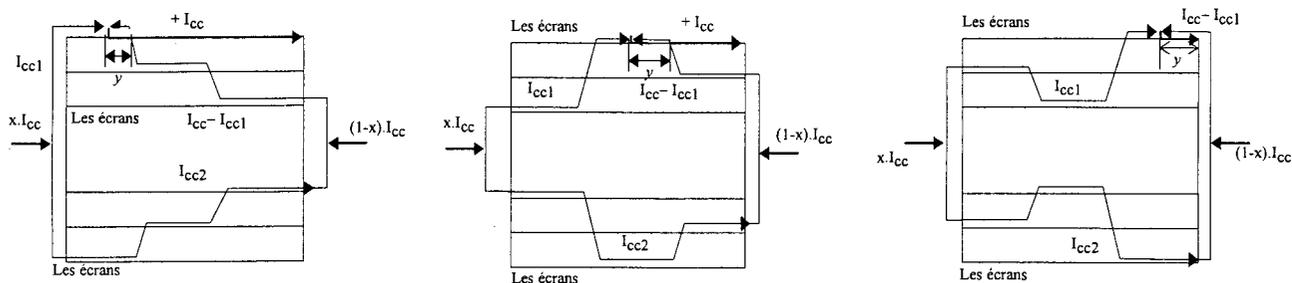
Avec $\beta = \frac{y}{L}$; $Z_{p1} = \frac{Z_m + 2Z_c}{3}$; $Z_{p2} = \frac{Z_m + Z_c + Z_L}{3}$;

$$z_{m1} = \frac{z_1 + z_2 + z_3}{3} ; \quad z_{m2} = \frac{z_2 + z_3 + z_4}{3} ; \quad z_{m3} = \frac{z_3 + z_4 + z_5}{3} ; \quad z_{m4} = \frac{z_1 + z_3 + z_5}{3}$$

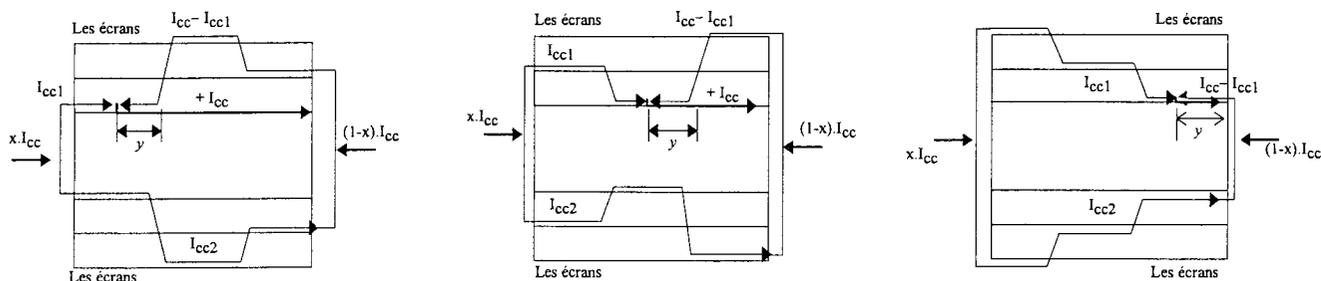
		I _{e11}	I _{e21}	I _{e31}	I _{e12}	I _{e22}	I _{e32}	I _{ec1}	I _{ec2}	I _{cc}		
										SE1	SE2	SE3
C	V _{e11}	Z _e	Z _c	Z _c	z ₃	z ₄	z ₂	Z _{p1}	z _{m2}	$\beta \cdot R_c + \frac{1}{3} (Z_e - Z_c)$	$\beta \cdot R_c + \frac{1}{3} (Z_e - Z_c)$	$\beta \cdot R_c$
I	V _{e21}	Z _c	Z _e	Z _L	z ₄	z ₅	z ₃	Z _{p2}	z _{m3}	$\frac{1}{3} (2Z_c - Z_m - Z_L)$	$\frac{1}{3} (Z_c - Z_L)$	0
R	V _{e31}	Z _c	Z _L	Z _e	z ₂	z ₃	z ₁	Z _{p2}	z _{m1}	$\frac{1}{3} (2Z_c - Z_m - Z_L)$	$\frac{1}{3} (Z_c - Z_m)$	0
C	V _{e12}	z ₃	z ₄	z ₂	Z _e	Z _c	Z _c	z _{m2}	Z _{p1}	$\frac{1}{3} (2z_3 - z_2 - z_4)$	$\frac{1}{3} (z_3 - z_2)$	0
U	V _{e22}	z ₄	z ₅	z ₃	Z _c	Z _e	Z _L	z _{m3}	Z _{p2}	$\frac{1}{3} (2z_4 - z_3 - z_5)$	$\frac{1}{3} (z_4 - z_3)$	0
I	V _{e32}	z ₂	z ₃	z ₁	Z _c	Z _L	Z _e	z _{m1}	Z _{p2}	$\frac{1}{3} (2z_2 - z_1 - z_3)$	$\frac{1}{3} (z_2 - z_1)$	0
T	V _{â1}	Z _{p1}	Z _{p2}	Z _{p2}	z _{m2}	z _{m3}	z _{m1}	Z _a	z _{m4}	$\beta(Z_m - Z_a) + \frac{1}{3} (Z_c - Z_a)$	$\beta(Z_m - Z_a) + \frac{1}{3} (Z_c - Z_a)$	$\beta(Z_m - Z_a)$
1	V _{â2}	z _{m2}	z _{m3}	z _{m1}	Z _{p1}	Z _{p2}	Z _{p2}	z _{m4}	Z _a	$\frac{1}{3} (z_2 - z_1 + z_4 - z_5)$	$\frac{1}{3} (z_2 - z_1)$	0
C	V _{e11}	I D E M								$\frac{1}{3} (Z_c - Z_m)$	$\frac{1}{3} (Z_c - Z_m)$	0
I	V _{e21}									$\beta \cdot R_c + \frac{1}{3} (2Z_c - Z_c - Z_L)$	$\beta \cdot R_c + \frac{1}{3} (Z_e - Z_c)$	$\beta \cdot R_c$
R	V _{e31}									$\frac{1}{3} (2Z_L - Z_m - Z_c)$	$\frac{1}{3} (Z_L - Z_c)$	0
C	V _{e12}									$\frac{1}{3} (2z_4 - z_3 - z_2)$	$\frac{1}{3} (z_4 - z_3)$	0
U	V _{e22}									$\frac{1}{3} (2z_5 - z_4 - z_3)$	$\frac{1}{3} (z_5 - z_4)$	0
I	V _{e32}									$\frac{1}{3} (2z_3 - z_2 - z_1)$	$\frac{1}{3} (z_3 - z_2)$	0
T	V _{â1}									$\beta(Z_m - Z_a) + \frac{1}{3} (Z_c + Z_L - 2Z_a)$	$\beta(Z_m - Z_a) + \frac{1}{3} (Z_c - Z_a)$	$\beta(Z_m - Z_a)$
2	V _{â2}									$\frac{1}{3} (z_4 - z_3 + z_2 - z_1)$	$\frac{1}{3} (z_4 - z_3)$	0
C	V _{e11}	I D E M								$\frac{1}{3} (2Z_c - Z_m - Z_L)$	0	0
I	V _{e21}									$\frac{1}{3} (2Z_L - Z_m - Z_c)$	$\frac{1}{3} (Z_L - Z_m)$	0
R	V _{e31}									$\beta \cdot R_c + \frac{1}{3} (2Z_e - Z_c - Z_L)$	$\beta \cdot R_c + \frac{1}{3} (Z_e - Z_L)$	$\beta \cdot R_c$
C	V _{e12}									$\frac{1}{3} (2z_2 - z_3 - z_4)$	$\frac{1}{3} (z_2 - z_4)$	0
U	V _{e22}									$\frac{1}{3} (2z_3 - z_4 - z_5)$	$\frac{1}{3} (z_3 - z_5)$	0
I	V _{e32}									$\frac{1}{3} (2z_1 - z_2 - z_3)$	$\frac{1}{3} (z_1 - z_3)$	0
T	V _{â1}									$\beta(Z_m - Z_a) + \frac{1}{3} (Z_c + Z_L - 2Z_a)$	$\beta(Z_m - Z_a) + \frac{1}{3} (Z_L - Z_a)$	$\beta(Z_m - Z_a)$
3	V _{â2}									$\frac{1}{3} (z_2 - z_5)$	$\frac{1}{3} (z_3 - z_5)$	0



Défaut aux trois différentes sections élémentaires au circuit n°1



Défaut aux trois différentes sections élémentaires au circuit n°2



Défaut aux trois différentes sections élémentaires au circuit n°3

*** pour une section élémentaire**

Les chutes de tension dans les sections élémentaires sont calculées à partir des courants dans les écrans et ceux dans les âmes. A titre d'exemple, la chute de tension dans la première section élémentaire du circuit d'écran 1 de la liaison en défaut (notée 1) est calculé d'après la manière suivante :

$$e_{11-1} = [Z_c \cdot I_{e11} + Z_c \cdot I_{e21} + Z_c \cdot I_{e31} + z_3 \cdot I_{e12} + z_4 \cdot I_{e22} + z_2 \cdot I_{e32} + Z_m \cdot I_{cc1} + z_3 \cdot I_{cc2} + \beta' \cdot R_e] \cdot \ell$$

$$\text{où } \beta' = \frac{y}{\ell}$$

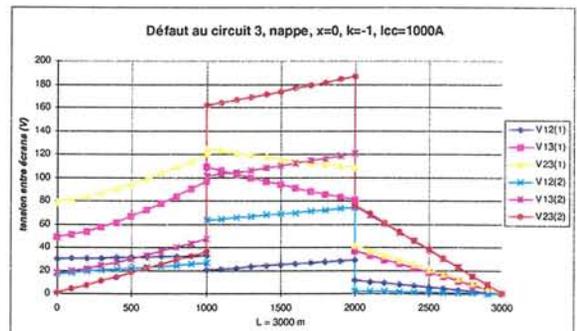
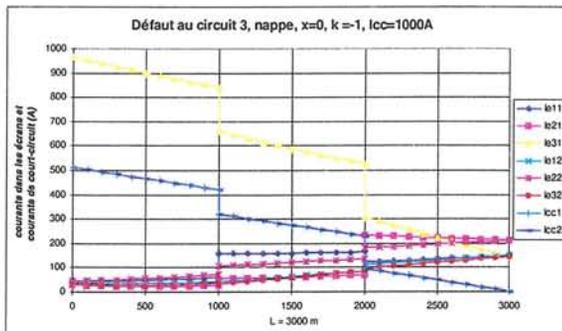
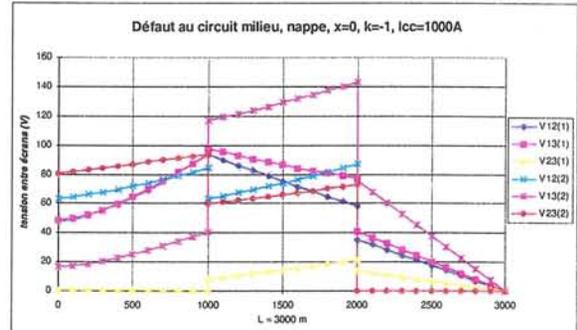
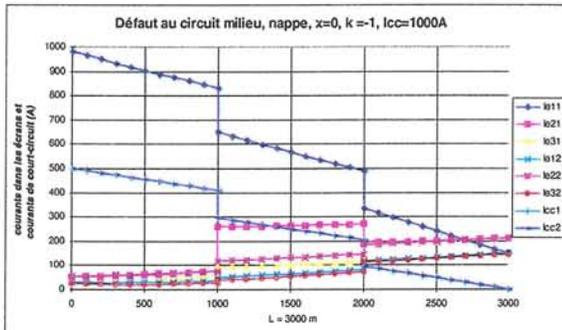
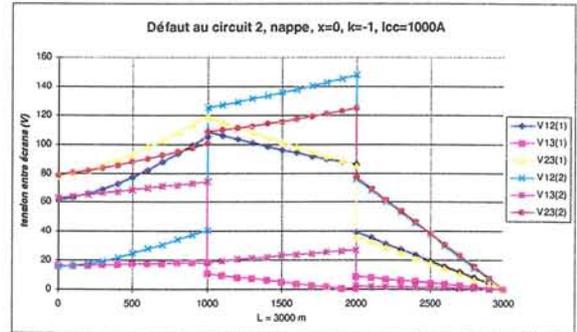
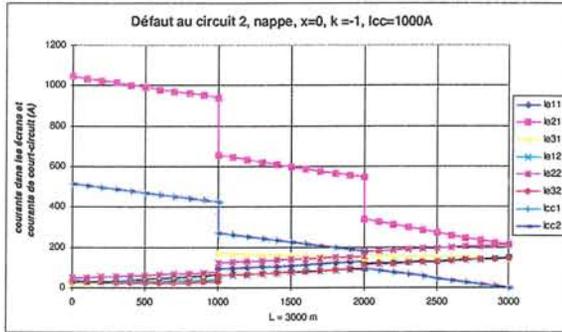
	I_{e11}	I_{e21}	I_{e31}	I_{e12}	I_{e22}	I_{e32}
$e_{11-1} = e_{12-1}$	Z_c	Z_c	Z_c	z_3	z_4	z_2
$e_{21-1} = e_{22-1}$	Z_c	Z_e	Z_L	z_4	z_5	z_3
$e_{31-1} = e_{32-1}$	Z_c	Z_L	Z_e	z_2	z_3	z_1
$e_{11-2} = e_{12-2}$	z_3	z_4	z_2	Z_e	Z_c	Z_c
$e_{21-2} = e_{22-2}$	z_4	z_5	z_3	Z_c	Z_e	Z_L
$e_{31-2} = e_{32-2}$	z_2	z_3	z_1	Z_c	Z_L	Z_c

		I_{cc1}			I_{cc2}			I_{cc}		
		SE1	SE2	SE3	SE1	SE2	SE3	SE1	SE2	SE3
C I R C U I T 1	e_{11-1}	Z_m	Z_c	Z_c	z_3	z_4	z_2	$\beta' \cdot R_e$	0	0
	e_{21-1}	Z_c	Z_m	Z_L	z_4	z_5	z_3	0	0	0
	e_{31-1}	Z_c	Z_L	Z_m	z_2	z_3	z_1	0	0	0
	e_{11-2}	z_3	z_4	z_2	Z_m	Z_c	Z_c	0	0	0
	e_{21-2}	z_4	z_5	z_3	Z_c	Z_m	Z_L	0	0	0
	e_{31-2}	z_2	z_3	z_1	Z_c	Z_L	Z_m	0	0	0
	e_{12-1}	Z_c	Z_m	Z_c	z_2	z_3	z_4	$Z_c - Z_c$	$\beta' \cdot R_e$	0
	e_{22-1}	Z_L	Z_c	Z_m	z_3	z_4	z_5	$Z_c - Z_L$	0	0
	e_{32-1}	Z_m	Z_c	Z_L	z_1	z_2	z_3	$Z_c - Z_m$	0	0
	e_{12-2}	z_2	z_3	z_4	Z_c	Z_m	Z_c	$z_3 - z_2$	0	0
	e_{22-2}	z_3	z_4	z_5	Z_L	Z_c	Z_m	$z_4 - z_3$	0	0
	e_{32-2}	z_1	z_2	z_3	Z_m	Z_c	Z_L	$z_2 - z_1$	0	0
C I R C U I T 2	e_{11-1}	Z_c	Z_c	Z_m	z_4	z_2	z_3	0	0	0
	e_{21-1}	Z_m	Z_L	Z_c	z_5	z_3	z_4	$\beta' \cdot R_e$	0	0
	e_{31-1}	Z_L	Z_m	Z_c	z_3	z_1	z_2	0	0	0
	e_{11-2}	z_4	z_2	z_3	Z_c	Z_c	Z_m	0	0	0
	e_{21-2}	z_5	z_3	z_4	Z_m	Z_L	Z_c	0	0	0
	e_{31-2}	z_3	z_1	z_2	Z_L	Z_m	Z_c	0	0	0
	e_{12-1}	Z_m	Z_c	Z_c	z_3	z_4	z_2	$Z_c - Z_m$	0	0
	e_{22-1}	Z_c	Z_m	Z_L	z_4	z_5	z_3	$Z_c - Z_c$	$\beta' \cdot R_e$	0
	e_{32-1}	Z_c	Z_L	Z_m	z_2	z_3	z_1	$Z_L - Z_c$	0	0
	e_{12-2}	z_3	z_4	z_2	Z_m	Z_c	Z_c	$z_4 - z_3$	0	0
	e_{22-2}	z_4	z_5	z_3	Z_c	Z_m	Z_L	$z_5 - z_4$	0	0
	e_{32-2}	z_2	z_3	z_1	Z_c	Z_L	Z_m	$z_3 - z_2$	0	0
C I R C U I T 3	e_{11-1}	Z_c	Z_m	Z_c	z_2	z_3	z_4	0	0	0
	e_{21-1}	Z_L	Z_c	Z_m	z_3	z_4	z_5	0	0	0
	e_{31-1}	Z_m	Z_c	Z_L	z_1	z_2	z_3	$\beta' \cdot R_e$	0	0
	e_{11-2}	z_2	z_3	z_4	Z_c	Z_m	Z_c	0	0	0
	e_{21-2}	z_3	z_4	z_5	Z_L	Z_c	Z_m	0	0	0
	e_{31-2}	z_1	z_2	z_3	Z_m	Z_c	Z_L	0	0	0
	e_{12-1}	Z_c	Z_c	Z_m	z_4	z_2	z_3	0	0	0
	e_{22-1}	Z_m	Z_L	Z_c	z_5	z_3	z_4	$Z_L - Z_m$	0	0
	e_{32-1}	Z_L	Z_m	Z_c	z_3	z_1	z_2	$Z_c - Z_L$	$\beta' \cdot R_e$	0
	e_{12-2}	z_4	z_2	z_3	Z_c	Z_c	Z_m	$z_2 - z_4$	0	0
	e_{22-2}	z_5	z_3	z_4	Z_m	Z_L	Z_c	$z_3 - z_5$	0	0
	e_{32-2}	z_3	z_1	z_2	Z_L	Z_m	Z_c	$z_1 - z_3$	0	0

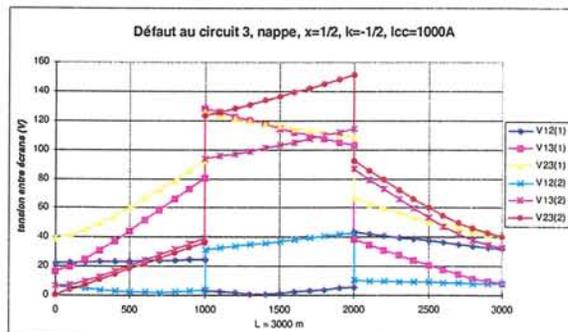
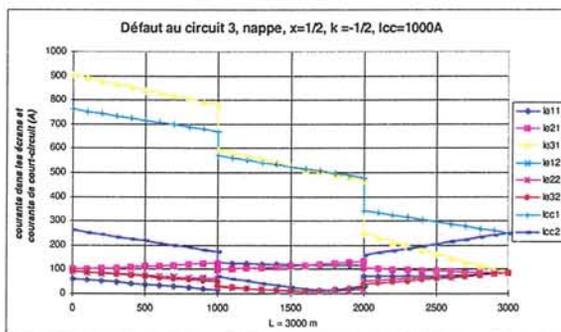
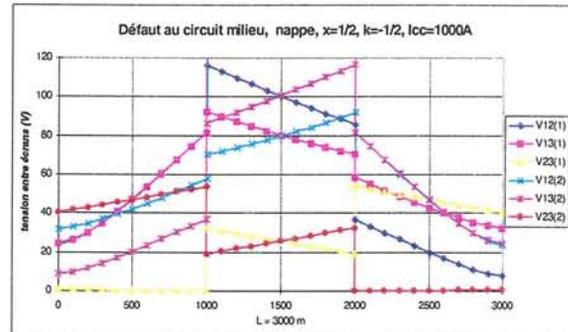
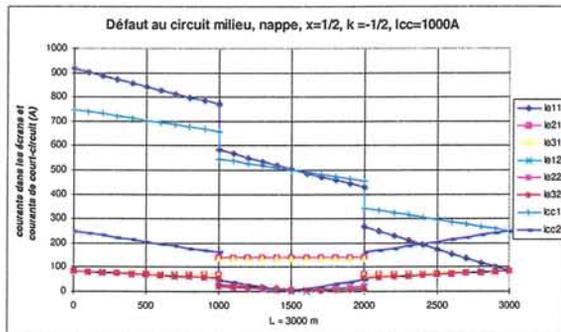
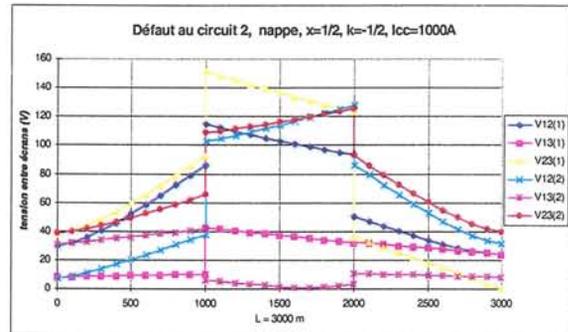
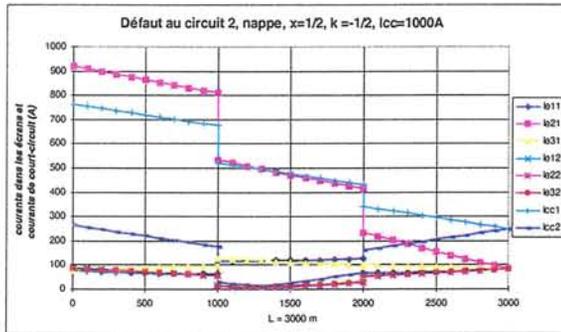
Annexe 8
Répartition des courants dans les âmes et écrans - Tensions entre écrans
en cas de défaut monophasé interne selon la position du défaut

POSE EN NAPPE

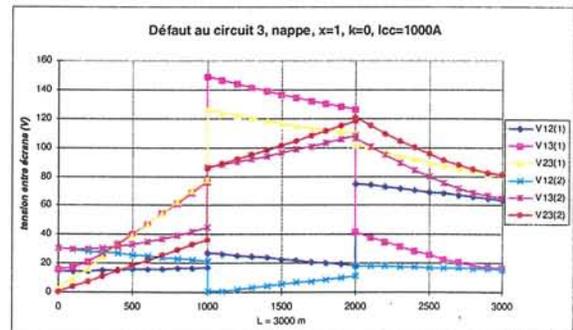
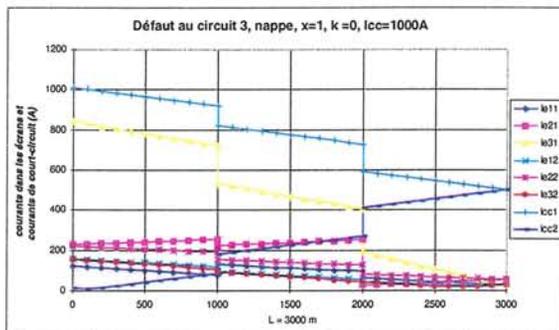
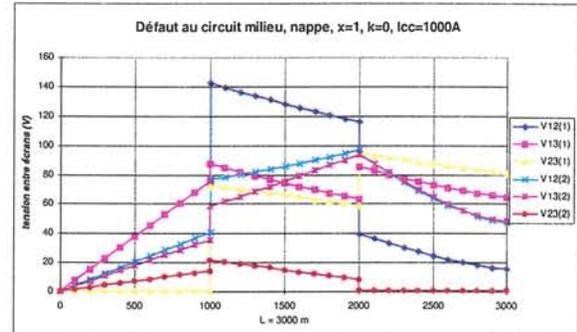
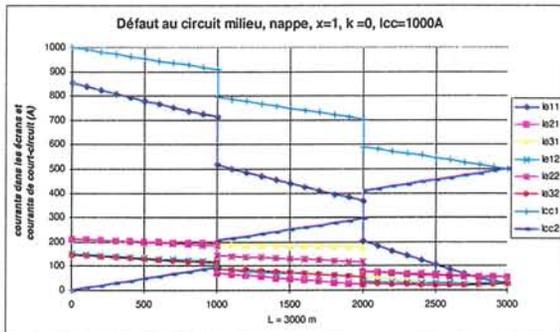
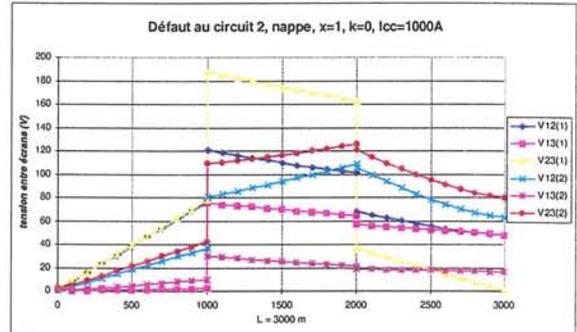
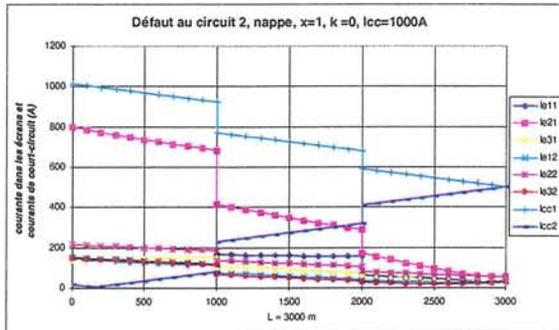
$x = 0 ; k = -1$



$$x = 1/2 ; k = -1/2$$

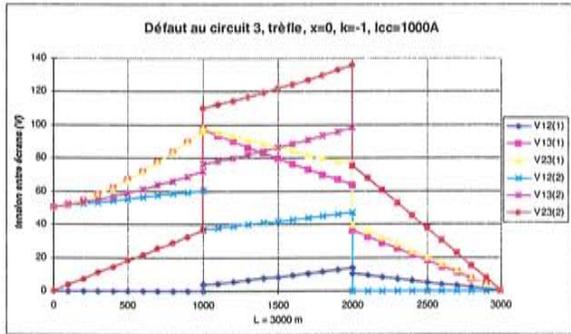
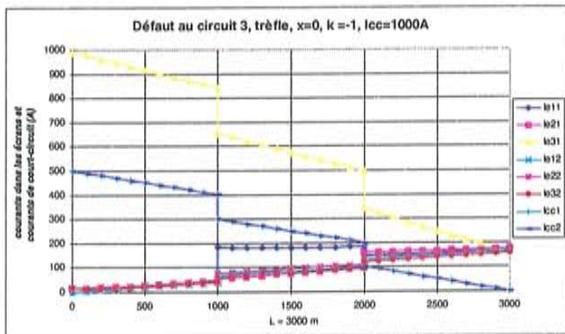
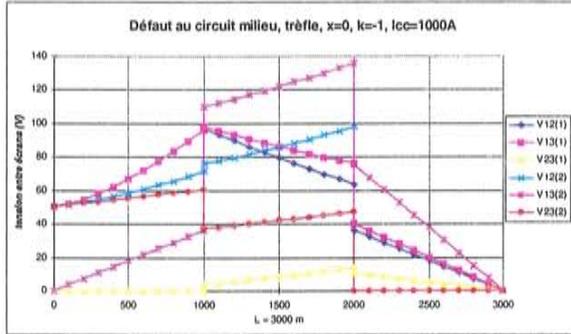
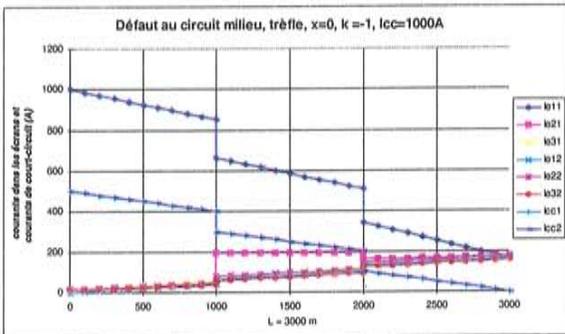
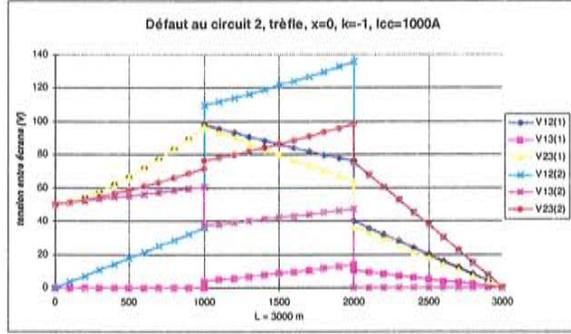
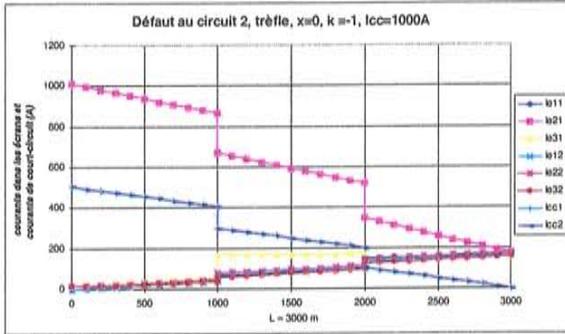


$x = 1 ; k = 0$

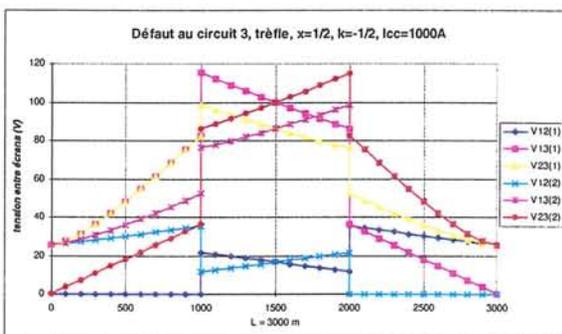
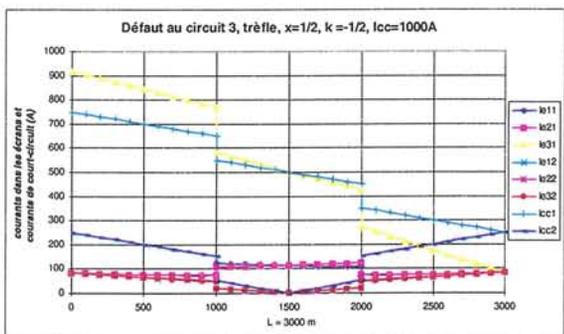
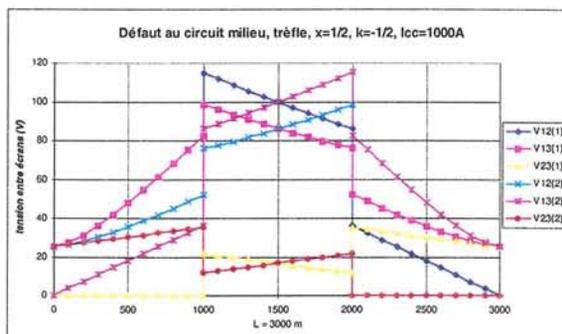
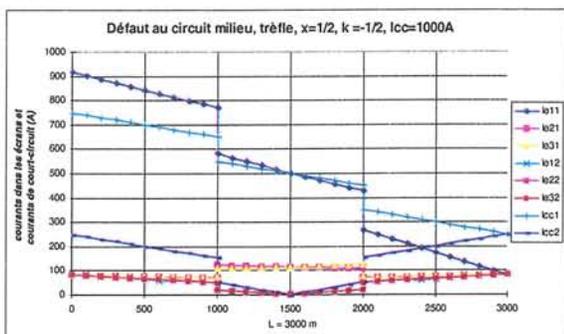
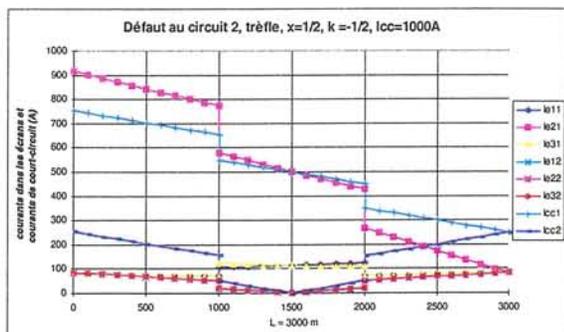


POSE EN TREFLE

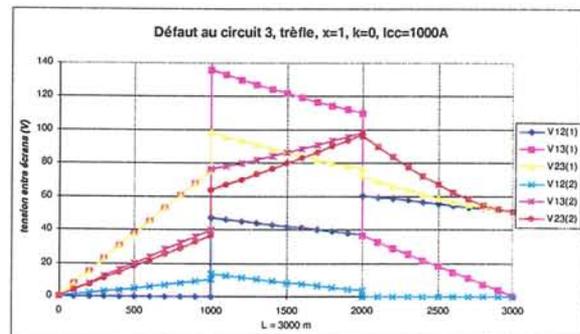
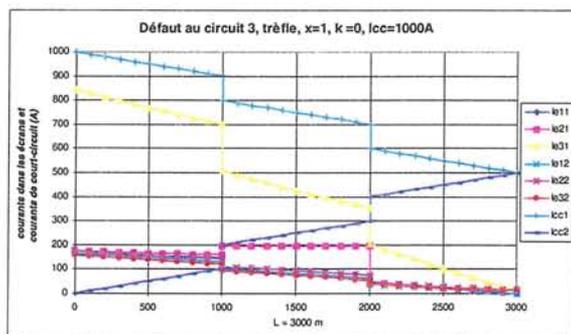
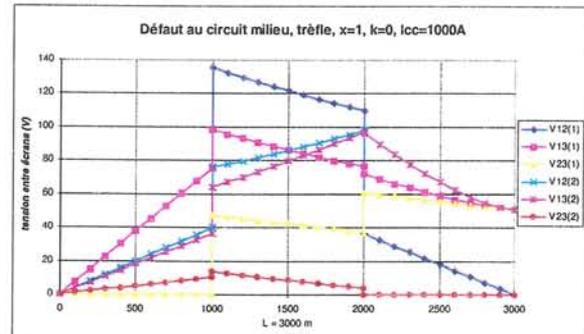
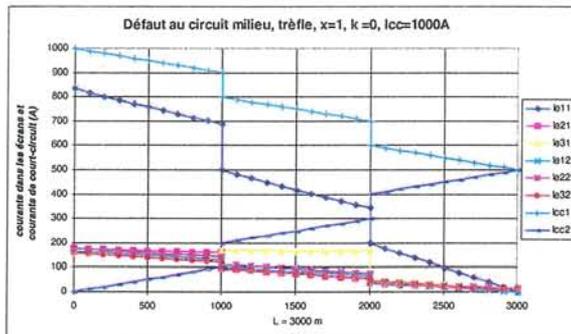
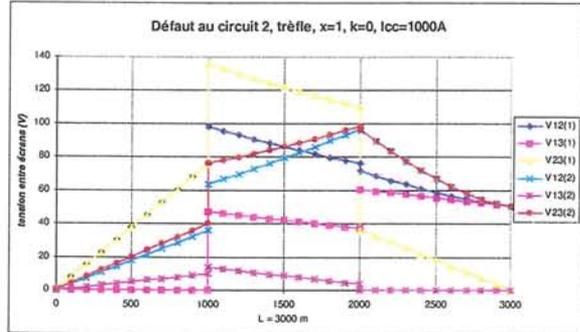
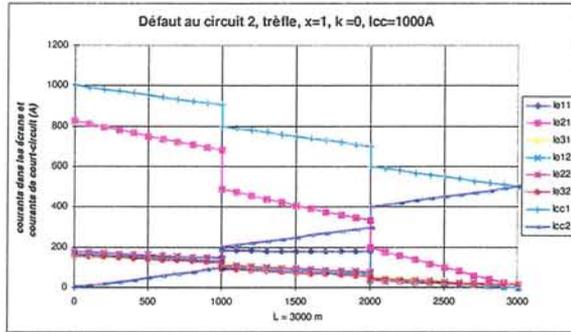
$x = 0 ; k = -1$



$$x = 1/2 ; k = -1/2$$



$x = 1 ; k = 0$



Annexe 9
Répartition du courant de foudre

Dans cette annexe, on s'intéresse à la répartition du courant de foudre dans le cas du foudroiement du câble de garde pour les liaisons seules 225 kV et les liaisons doubles 400 kV.

On propose également une interprétation de cette répartition dans le cas des liaisons 225 kV.

On rappelle le schéma simplifié utilisé dans le chapitre 7 lors de l'étude d'un siphon à mise à la terre en un point.

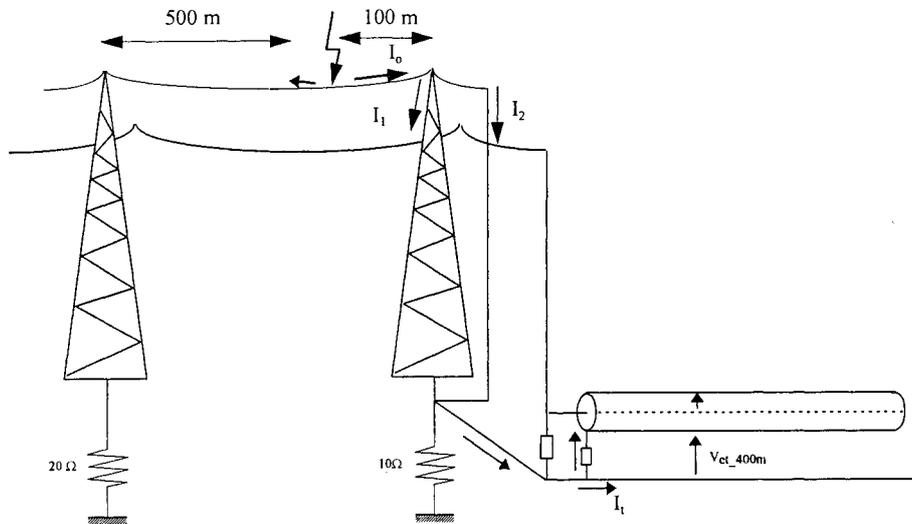


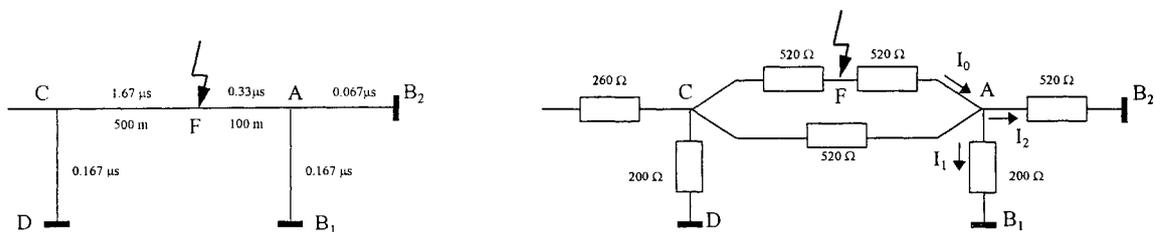
Figure 1 : Jonction aéro - souterraine. Foudroiement du câble de garde.

Les pylônes sont représentés par les éléments de propagation dont :

- l'impédance caractéristique est de 200 ohms,
- la longueur est de 25 m,
- la vitesse de propagation est de 150 m/μs.

Le réseau aérien est équipé deux câbles de garde dont l'impédance caractéristiques est de 520 ohms. Au dernier pylône, ils sont reliés à la prise de terre du pylône par un seul câble qui a la même caractéristique et de 20m de long.

On en déduit ci-après les deux schémas équivalents permettant d'établir une chronique des ondes et de déterminer les coefficients de réflexion et de transmission



- | | | |
|------------------------------------|----------------------------|------------|
| ❶ : FA | | = 0.33 μs |
| ❷ : FA + 1 AR de AB₂ | = 0.33 + 2*0.067 | = 0.464 μs |
| ❸ : FA + 2 AR de AB₂ | = 0.33 + 4*0.067 | = 0.598 μs |
| ❹ : FA + 1 AR de AB₁ | = 0.33 + 2*0.167 | = 0.664 μs |
| ❺ : FA + 1 AR de AB₁ + 1 AR de AB₂ | = 0.33 + 2*0.067 + 2*0.167 | = 0.798 μs |

• • •

La détermination des coefficients de réflexion et de transmission nécessite les impédances équivalentes.

$$\text{L'impédance en A vue de F : } Z_{AF} = \frac{1}{\frac{1}{520} + \frac{1}{520} + \frac{1}{200}} = \frac{104000}{920} = 113\Omega$$

Lorsque l'onde venant de F arrive en A, elle se décompose en deux éléments :

$$\begin{aligned} \rightarrow \text{Réfléchi} & : I_r = \frac{520-113}{520+113} \cdot I_{F-A} = 0,64 \cdot I_{F-A} \\ \rightarrow \text{Transmis} & : I_t = \frac{2 \cdot 520}{520+113} \cdot I_{F-A} = 1,64 \cdot I_{F-A} \quad \text{dont} \rightarrow \begin{cases} 22\% & A \rightarrow B_2 = 0,22 \cdot 1,64 \cdot I_{F-A} \\ 22\% & A \rightarrow C = 0,22 \cdot 1,64 \cdot I_{F-A} \\ 56\% & A \rightarrow B_1 = 0,56 \cdot 1,64 \cdot I_{F-A} \end{cases} \end{aligned}$$

$$\text{L'impédance en A vue de B}_1 \text{ est : } Z_{AB1} = \frac{1}{\frac{1}{520} + \frac{1}{520} + \frac{1}{520}} = 173\Omega$$

De la même manière, quand l'onde provenant de B₁ arrive en A, elle se décompose en deux éléments :

$$\begin{aligned} \rightarrow \text{Réfléchi} & : I_r = \frac{200-173}{200+173} \cdot I_{B1-A} = 0,072 \cdot I_{B1-A} \\ \rightarrow \text{Transmis} & : I_t = \frac{2 \cdot 200}{200+173} \cdot I_{B1-A} = 1,072 \cdot I_{B1-A} \quad \text{dont} \rightarrow \begin{cases} 33\% & A \rightarrow B_2 = 0,33 \cdot 1,072 \cdot I_{B1-A} \\ 33\% & A \rightarrow F = 0,33 \cdot 1,072 \cdot I_{B1-A} \\ 33\% & A \rightarrow C = 0,33 \cdot 1,072 \cdot I_{B1-A} \end{cases} \end{aligned}$$

$$\text{L'impédance en A vue de B}_2 \text{ est : } Z_{AB2} = \frac{1}{\frac{1}{520} + \frac{1}{520} + \frac{1}{200}} = \frac{104000}{920} = 113\Omega = Z_{AF}$$

Quand l'onde provenant de B₂ arrive en A, elle se décompose en deux éléments :

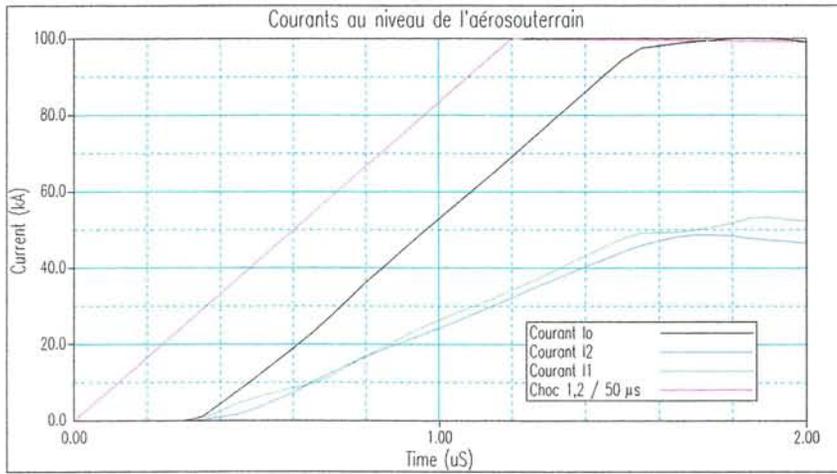
$$\begin{aligned} \rightarrow \text{Réfléchi} & : I_r = \frac{520-113}{520+113} \cdot I_{B2-A} = 0,64 \cdot I_{B2-A} \\ \rightarrow \text{Transmis} & : I_t = \frac{2 \cdot 520}{520+113} \cdot I_{B2-A} = 1,64 \cdot I_{B2-A} \quad \text{dont} \rightarrow \begin{cases} 22\% & A \rightarrow F = 0,22 \cdot 1,64 \cdot I_{B2-A} \\ 22\% & A \rightarrow C = 0,22 \cdot 1,64 \cdot I_{B2-A} \\ 56\% & A \rightarrow B_1 = 0,56 \cdot 1,64 \cdot I_{B2-A} \end{cases} \end{aligned}$$

La résistance de la prise de terre est négligeable devant les impédances caractéristiques du pylône et du câble de garde, on a donc un quasi - doublement du courant en B₁ et B₂.

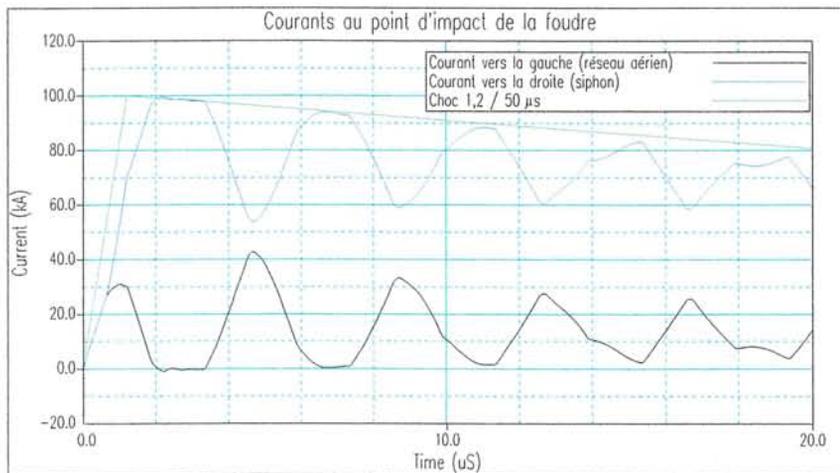
Dans la pratique, la foudre peut tomber n'importe où. Cependant on va démontrer très facilement dans la suite que quand le point d'impact s'approche du pylône de la jonction aérosouterraine, la somme (I₀) des courants dans le pylône (I₁) et dans le câble de garde (I₂) tend vers le courant de la foudre (voire plus selon la résistance de la prise de terre du pylône).

Autrement dit, au niveau du point d'impact, le courant vers la gauche (réseau aérien) tend vers zéro et inversement celui vers la droite (siphon) atteint la valeur maximale de la foudre dès l'arrivée des premières réflexions aux points B₁ et B₂ comme le montre le tableau ci-après.

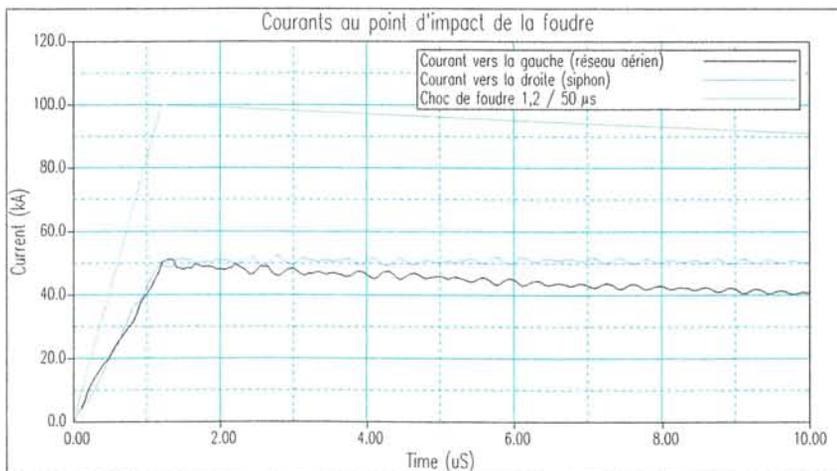
t [μs]	< 0,333	≥ 0,333	≥ 0,464	≥ 0,598	≥ 0,664
Effet des réflexions	0	+ 0,64 I ₀	+ 1,64 I ₀ * 0,22 * 0,22	+ 1,64 I ₀ * 0,22 * 0,64 * 0,22	+ 1,64 I ₀ * 0,56 * 0,33
I ₀ résultant	I ₀	1,64 I ₀	1,72 I ₀	1,77 I ₀	2,07 I ₀



Répartition du courant au niveau de l'aérosouterrain. Liaisons seules 225 kV.



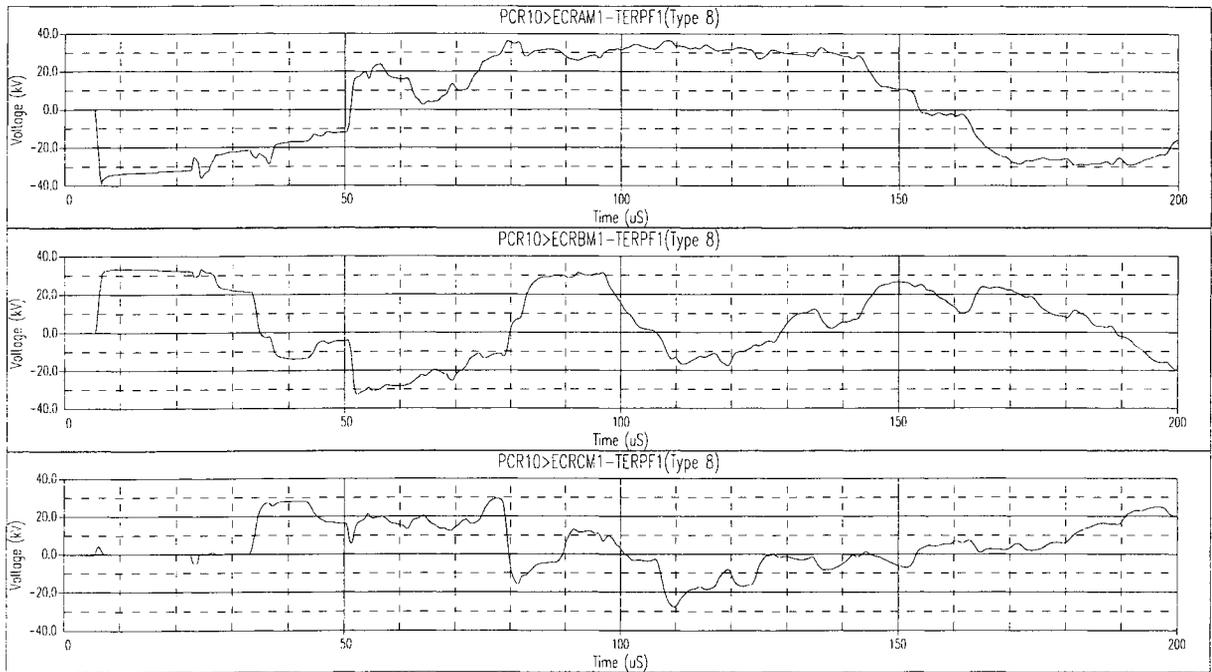
Répartition du courant de foudre de part et d'autre du point d'impact. Liaisons seule 225 kV.



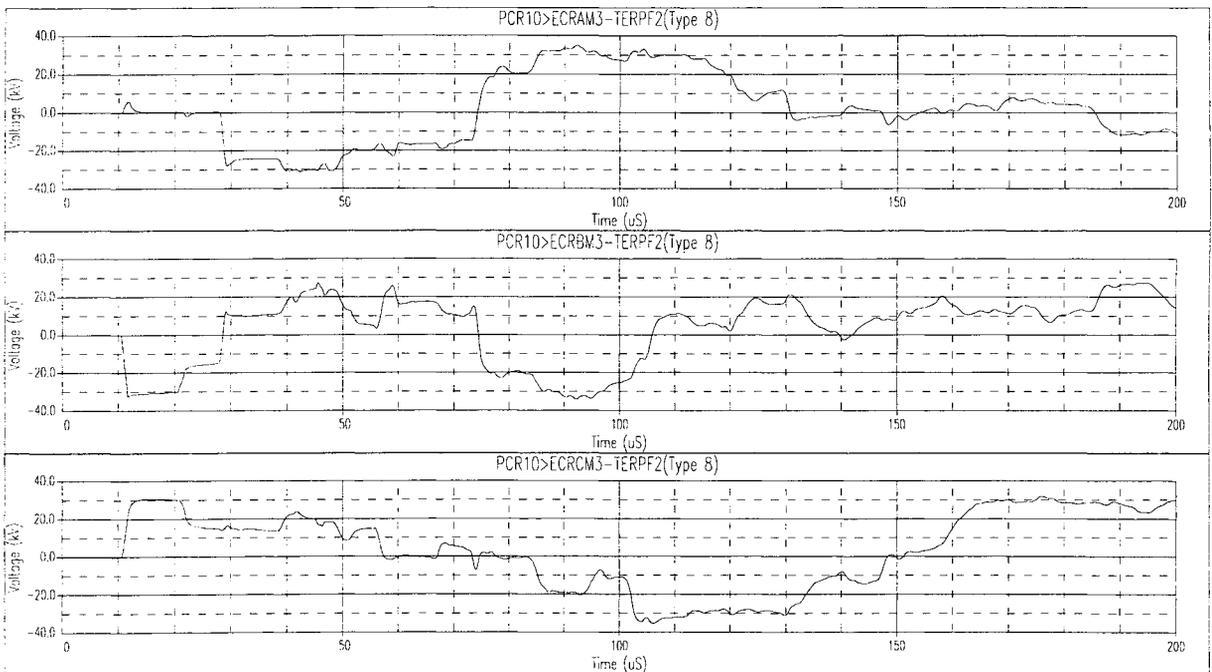
Répartition du courant de foudre de part et d'autre du point d'impact. Liaisons doubles 400 kV.

I - FOUDROIEMENT DU CABLE DE PHASE.

I - 1 - Parafoudres de gaines montés en étoile - neutre à la terre. Cas standard

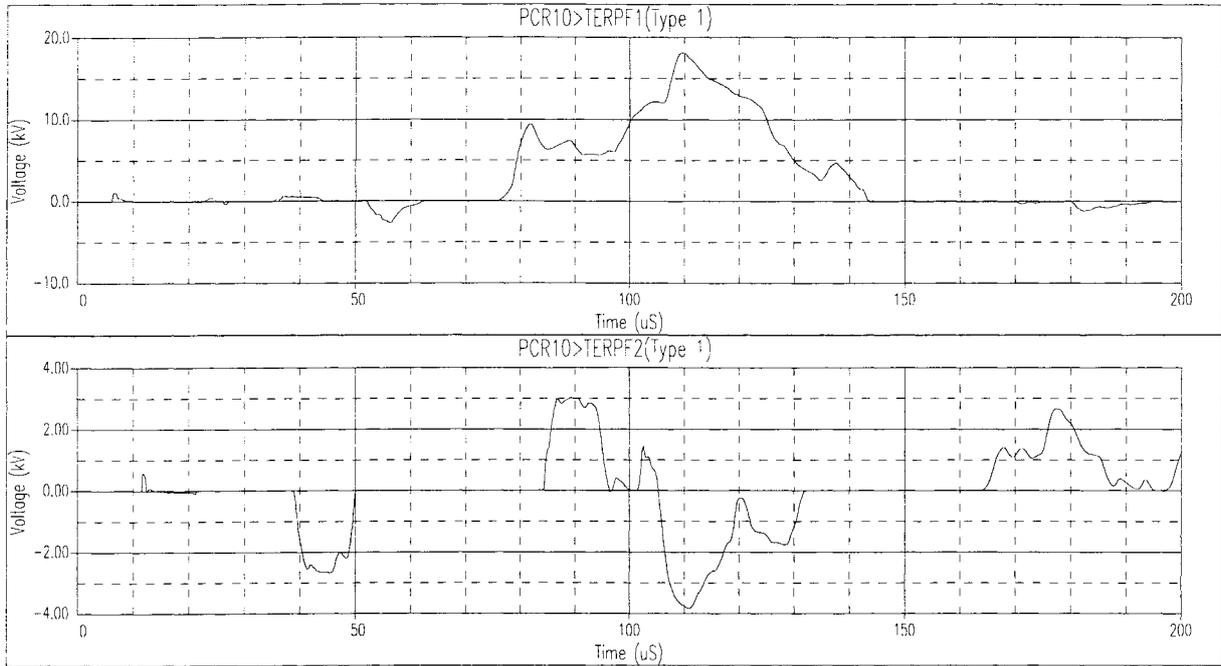


a) à la 1^{ère} jonction AE

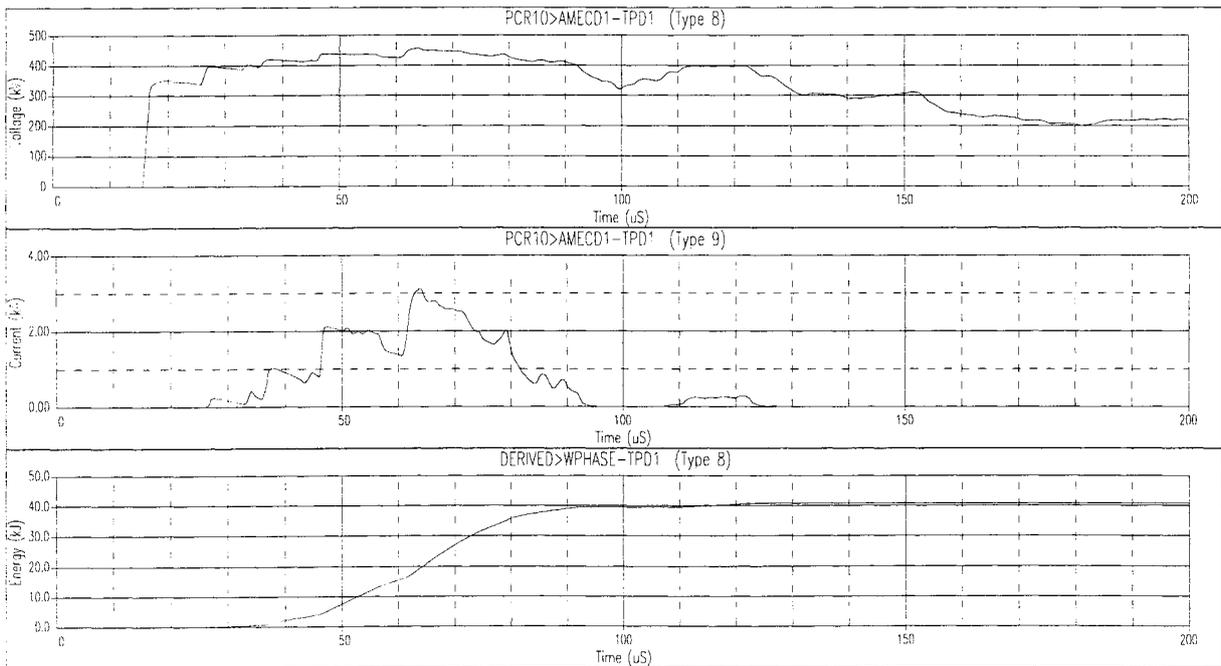


b) à la 2^{ème} jonction AE

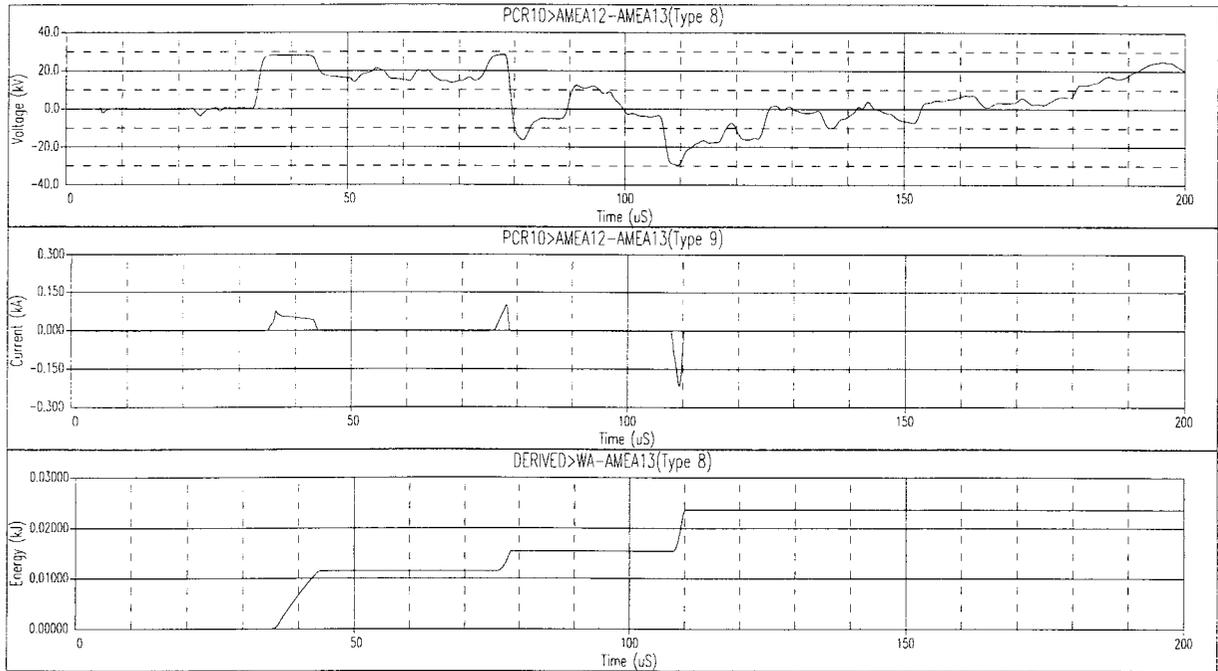
Montée en potentiel des écrans / terre locale (prise de terre des parafoudres de gaine)
Parafoudres de gaine montés en étoile à neutre à la terre. Foudroiement d'un conducteur de phase.



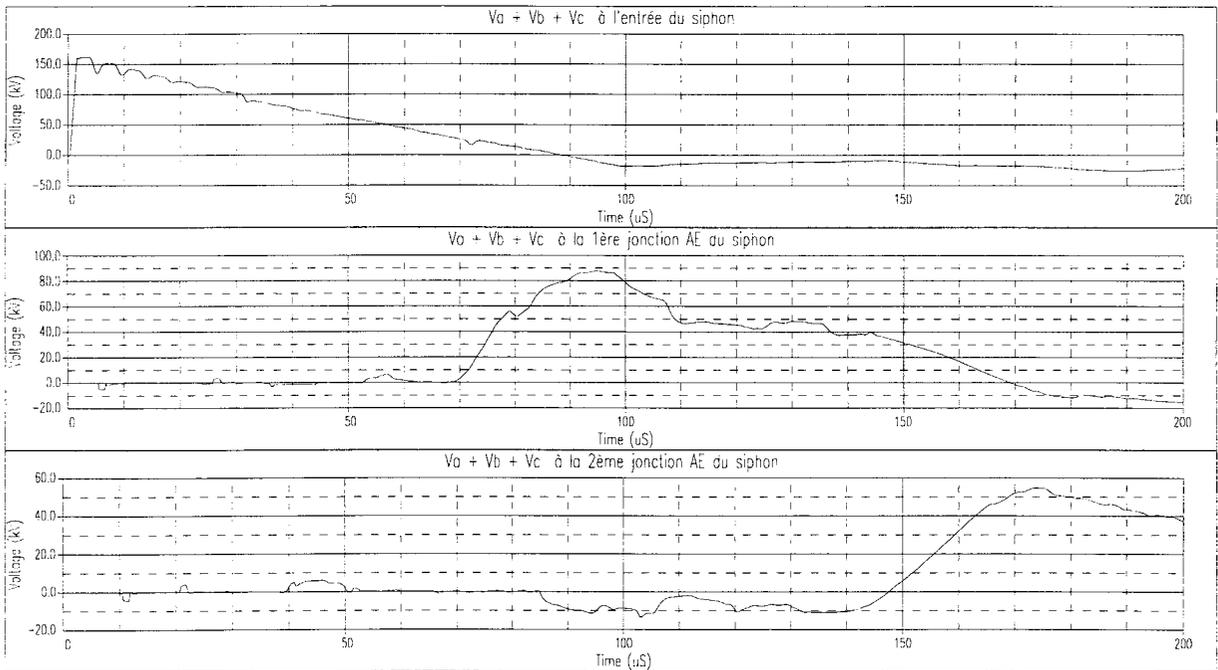
Prises de terre des parafoudres de gaine
(Parafoudres de gaine montés en étoile - neutre à la terre. Foudroiement d'un conducteur de phase)



Parafoudre de phase de la phase sollicitée à l'extrémité droite (position C).
(Parafoudres de gaine montés en étoile - neutre à la terre. Foudroiement d'un conducteur de phase)

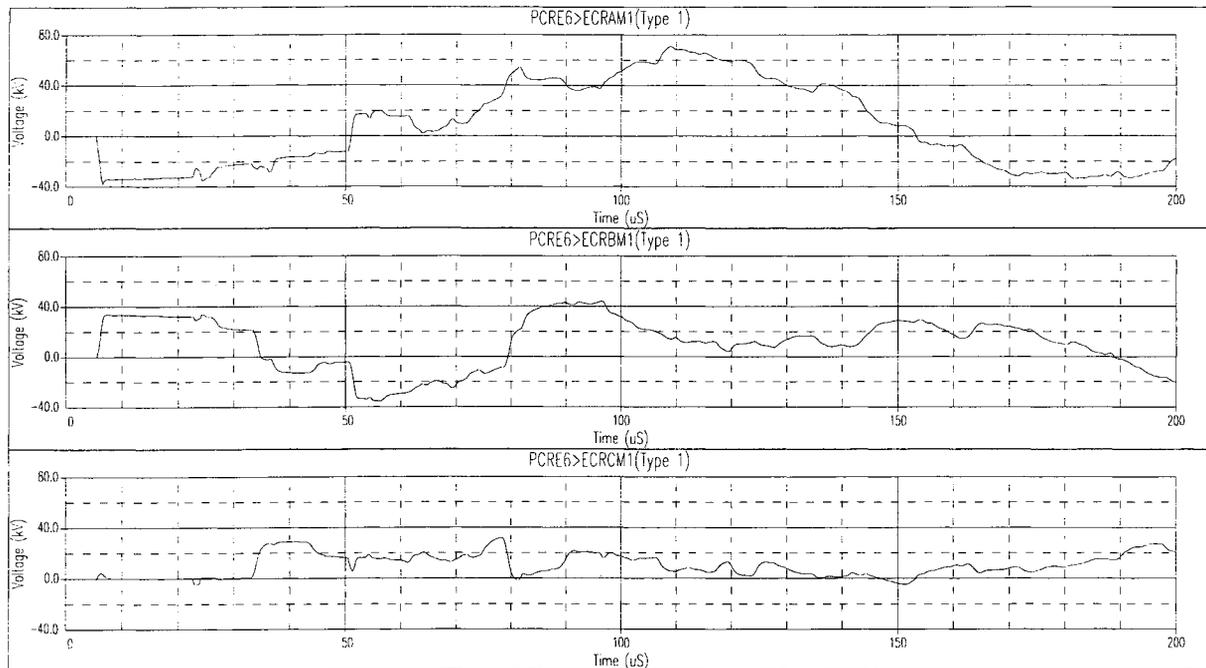


Parafoudre de gaine à la 1^{ère} jonction AE (position A).
(Parafoudres de gaine montés en étoile - neutre à la terre. Foudroiement d'un conducteur de phase)

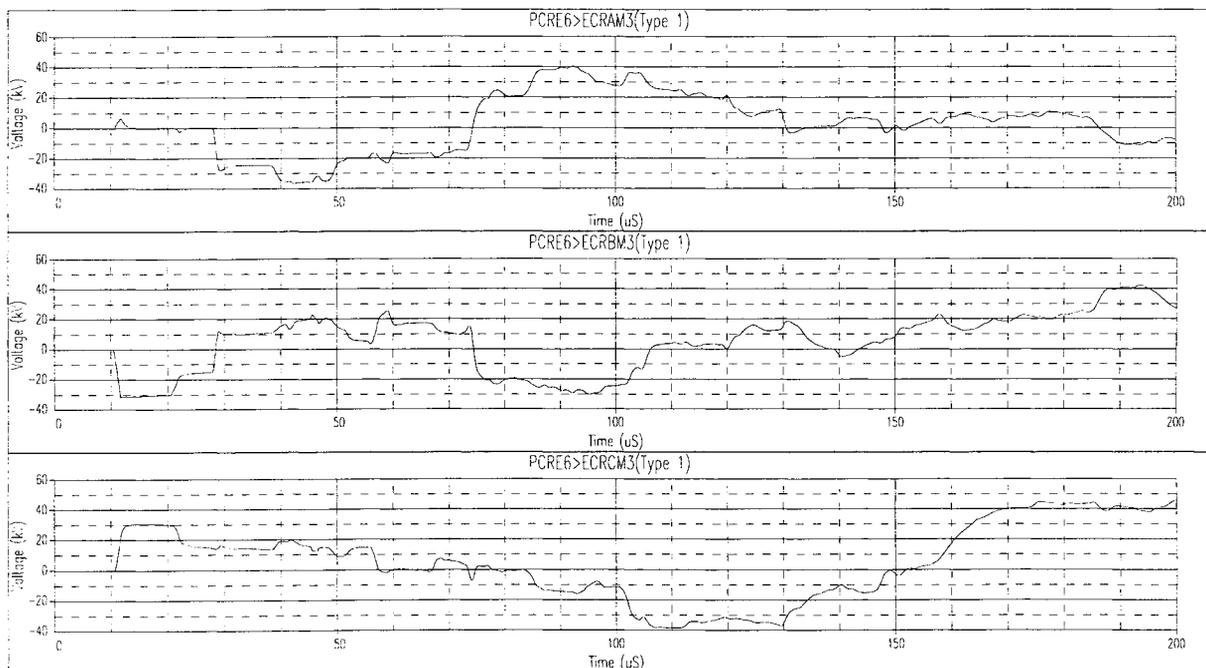


Somme des surtensions de gaine de trois câbles. Démonstration de la propagation du mode homopolaire.
(Parafoudres de gaine montés en étoile - neutre à la terre. Foudroiement d'un conducteur de phase)

I - 2 - Parafoudres de gaines montés en étoile - neutre isolé. Cas standard

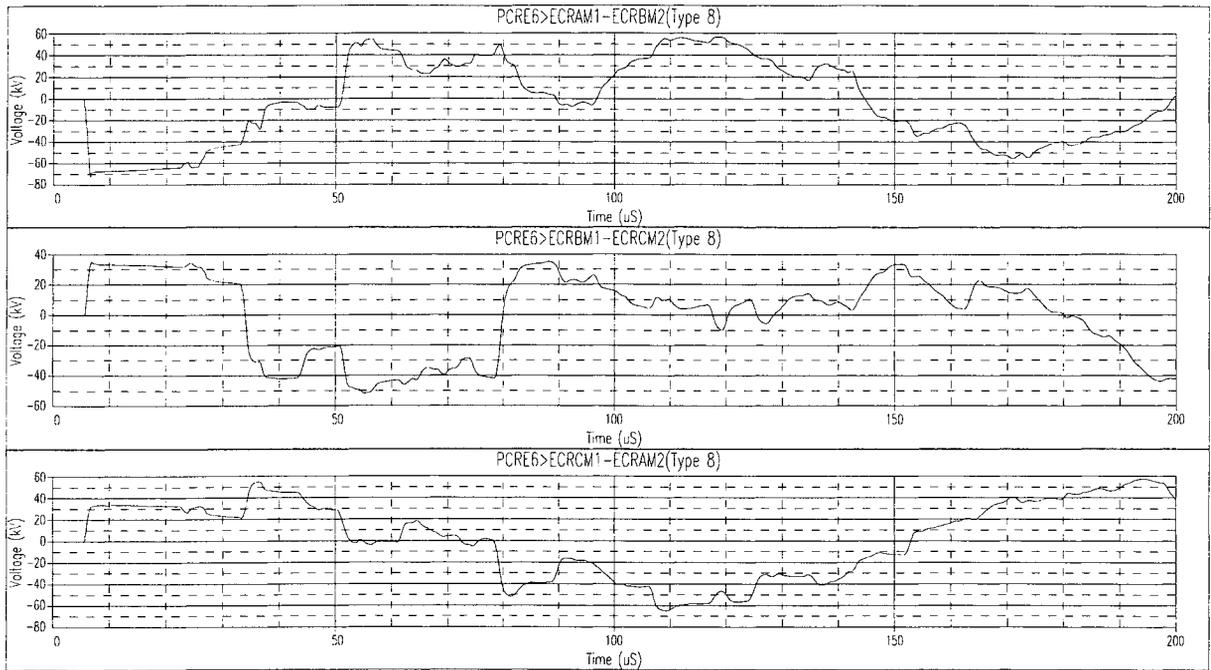


a) à la 1^{ère} jonction AE

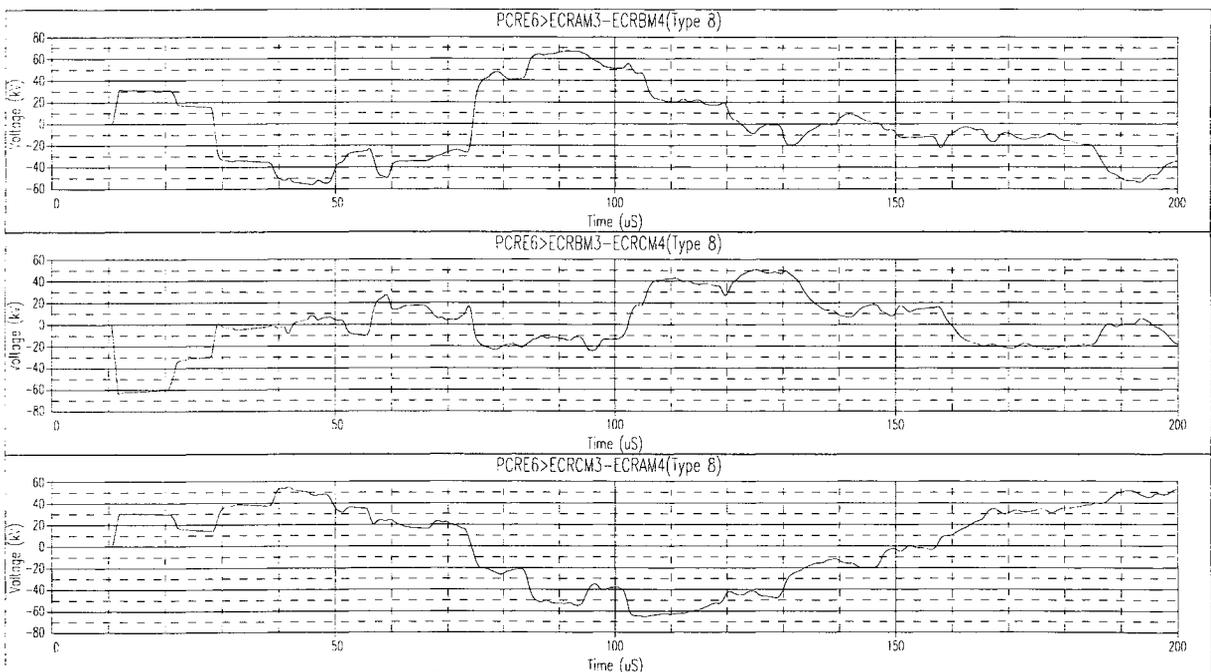


b) à la 2^{ème} jonction AE

Montée en potentiel des écrans / sol infini
 (Parafoudres de gaine montés en étoile - neutre isolé. Foudroiement d'un conducteur de phase)



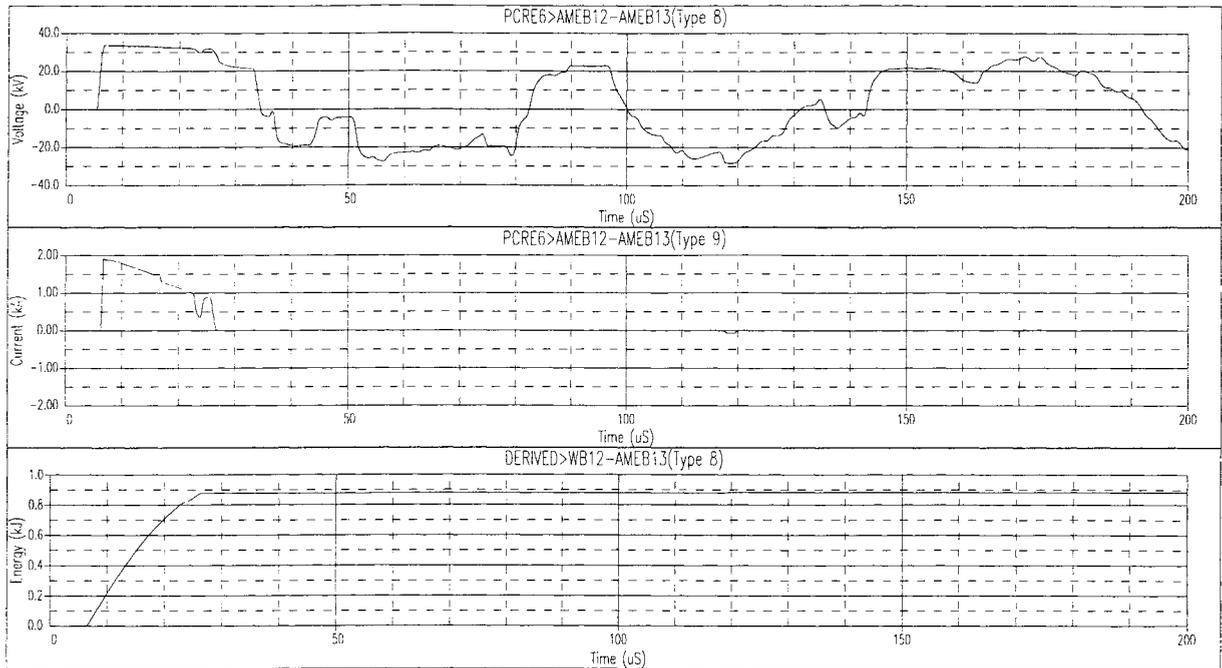
a) à la 1^{ère} jonction AE



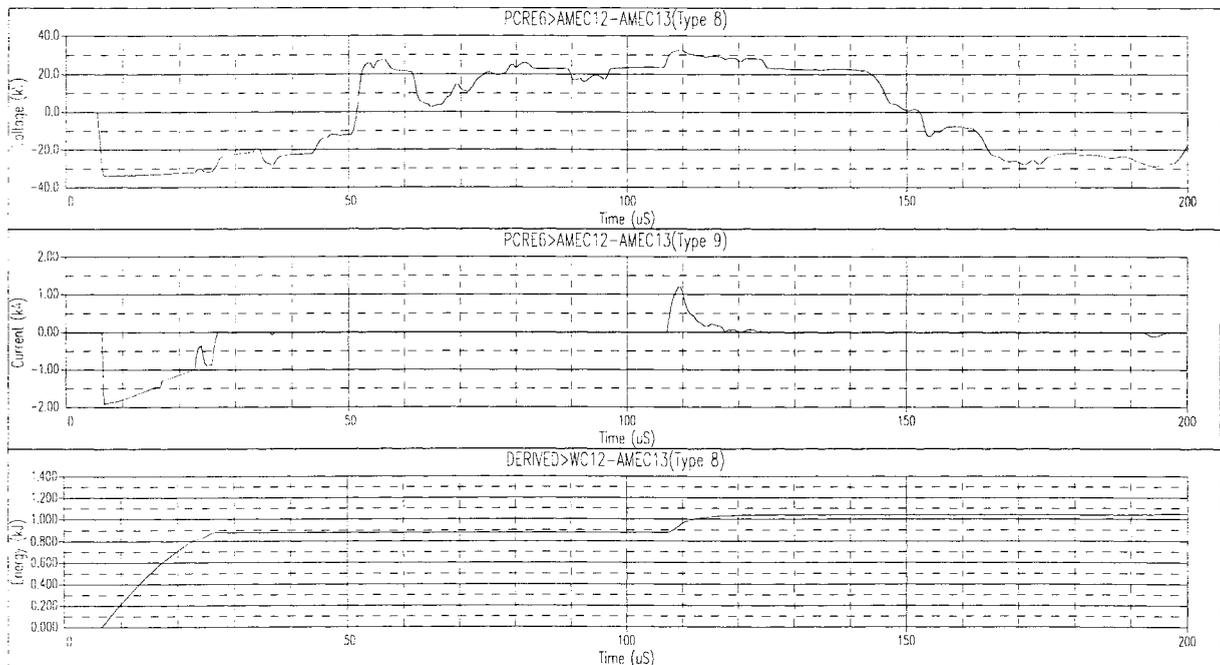
b) à la 2^{ème} jonction AE

Tension Arrêt - Ecran

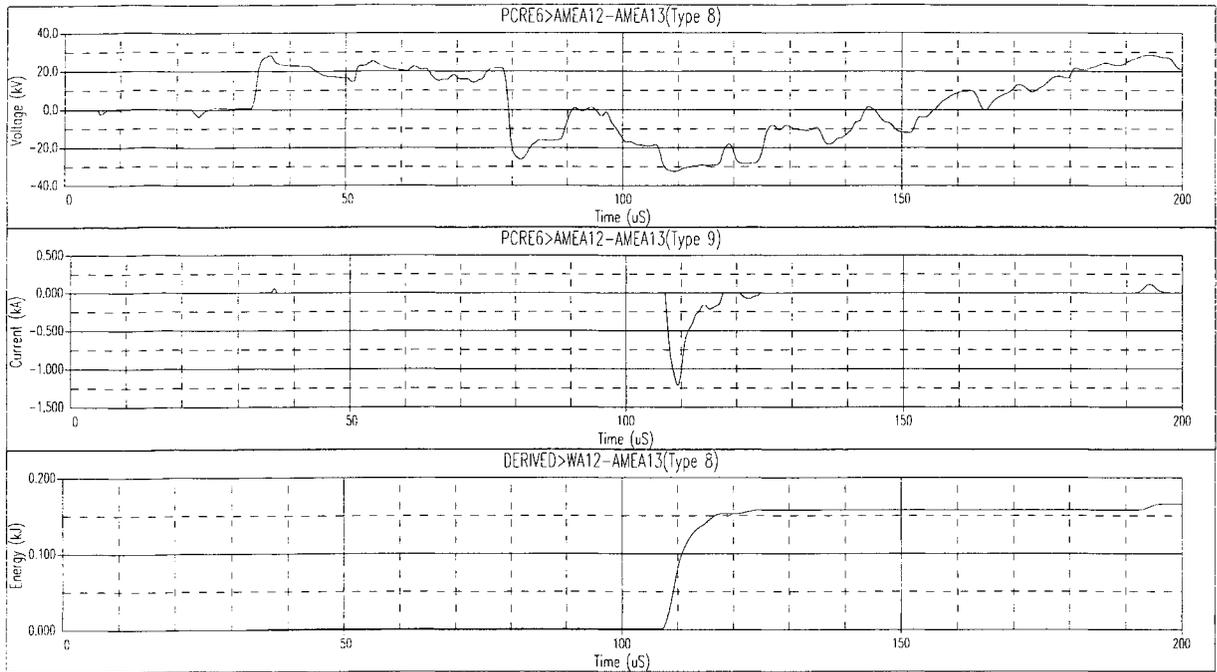
(Parafoudres de gaine montés en étoile - neutre isolé. Foudroiement d'un conducteur de phase)



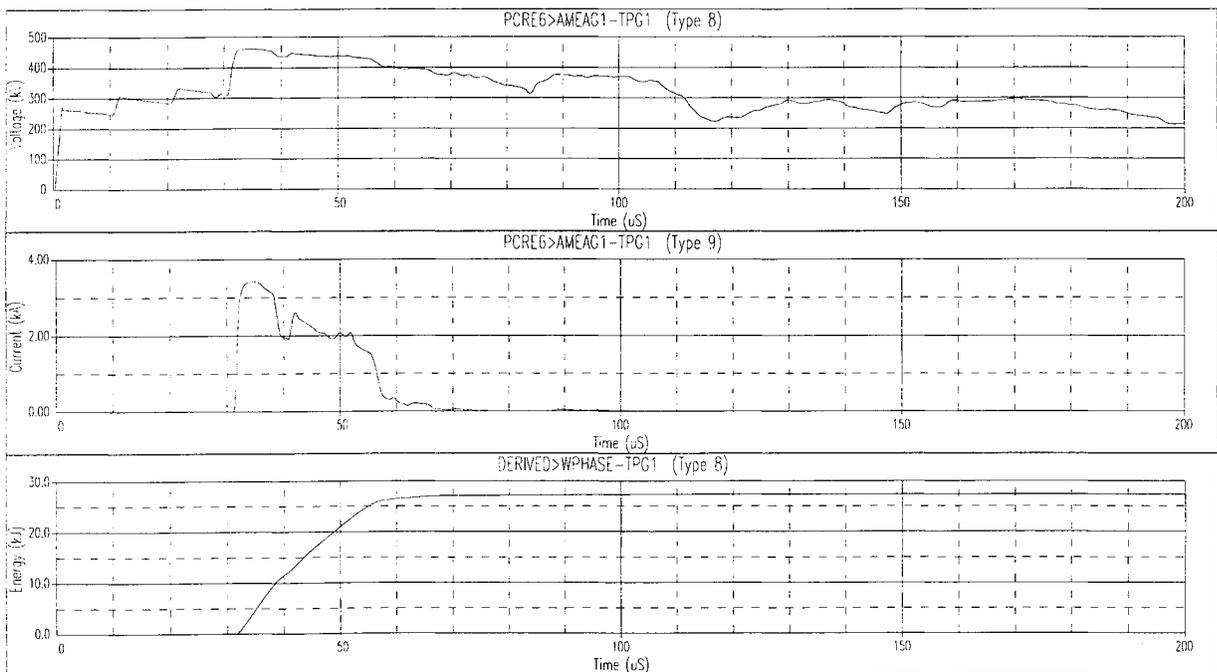
Parafoudres de gaine à la 1^{ère} jonction AE (position B)
 (Parafoudres de gaine montés en étoile - neutre isolé. Foudroiement d'un conducteur de phase)



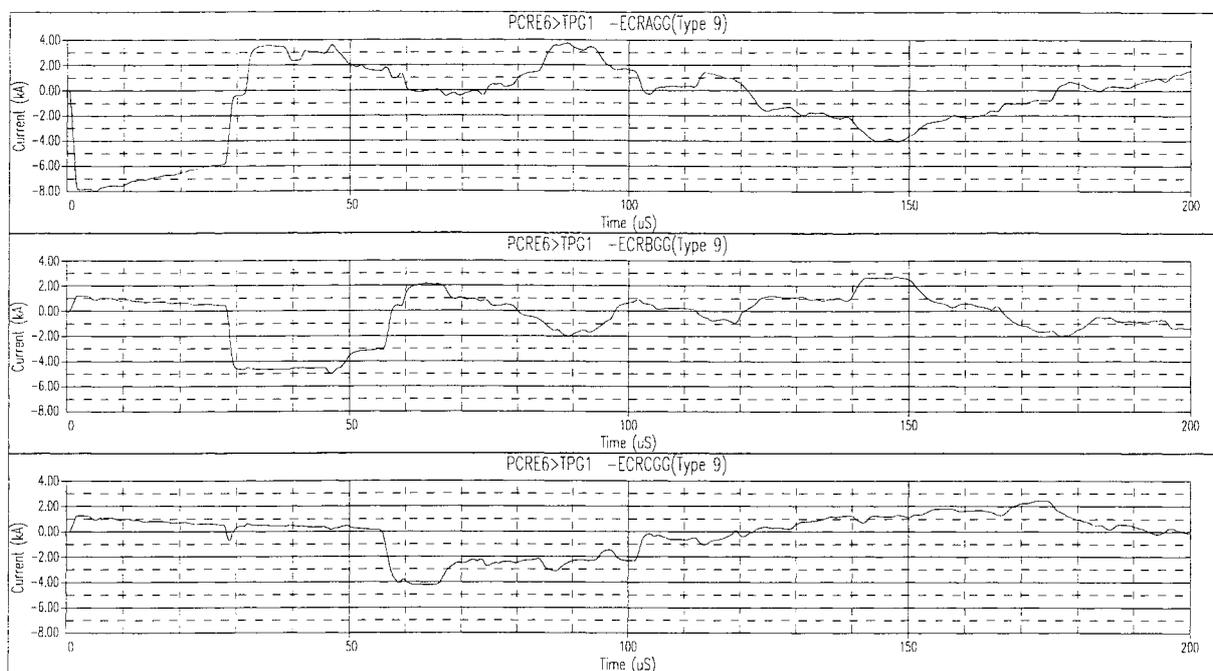
Parafoudres de gaine à la 1^{ère} jonction AE (position C)
 (Parafoudres de gaine montés en étoile - neutre isolé. Foudroiement d'un conducteur de phase)



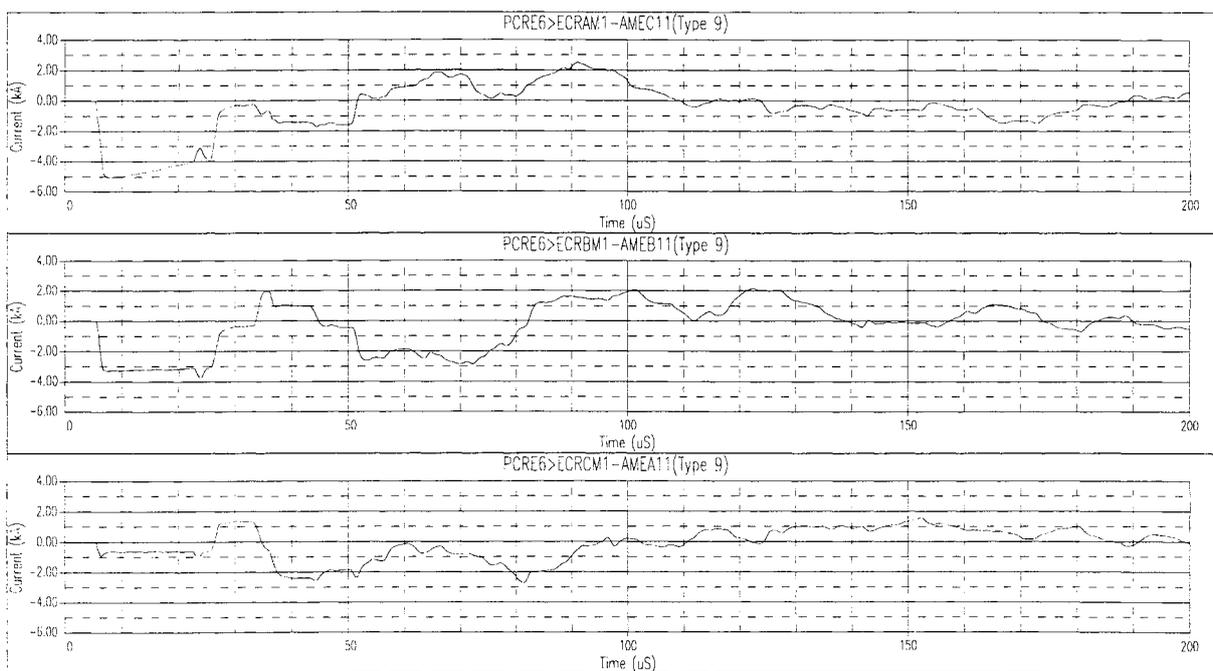
Parafoudres de gaine à la 1^{ère} jonction AE (position A)
 (Parafoudres de gaine montés en étoile - neutre isolé. Foudroiement d'un conducteur de phase)



Parafoudre de phase, de la phase sollicitée (position A)
 (Parafoudres de gaine montés en étoile - neutre isolé. Foudroiement d'un conducteur de phase)

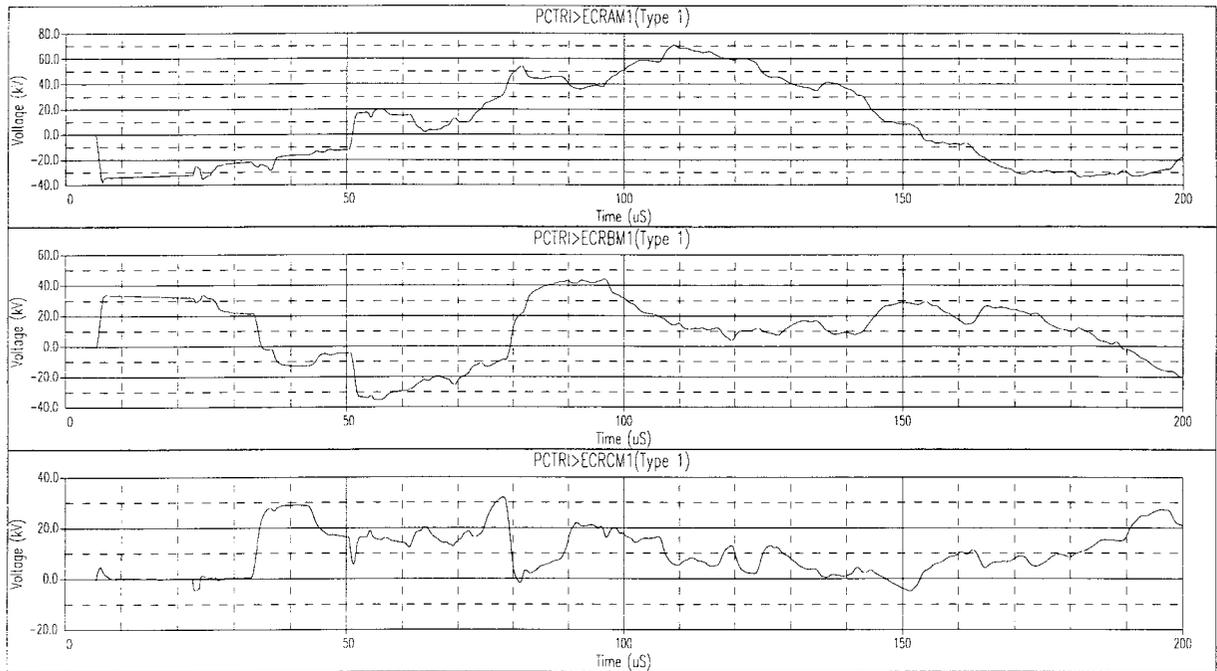


Courants dans les écrans à l'entrée du siphon
(Parafoudres de gaine montés en étoile - neutre isolé. Foudroiement d'un conducteur de phase)

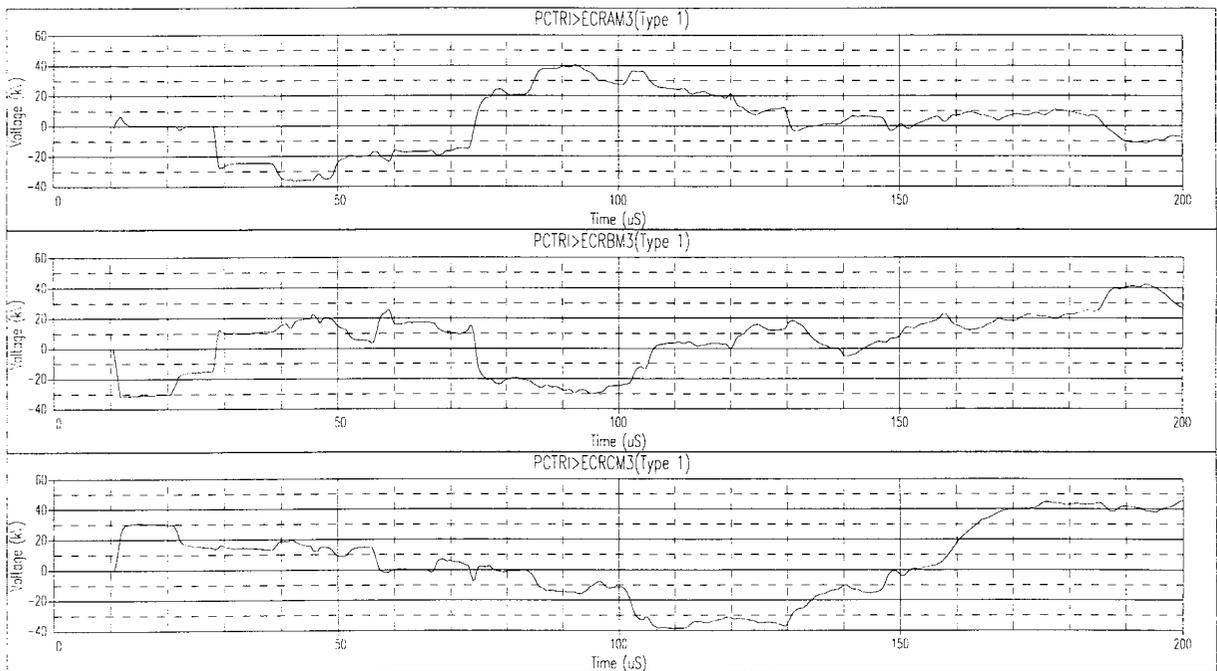


Courants dans les écrans à la 1^{ère} jonction AE
(Parafoudres de gaine montés en étoile - neutre isolé. Foudroiement d'un conducteur de phase)

I - 3 - Parafoudres de gaines montés en triangle. Cas standard

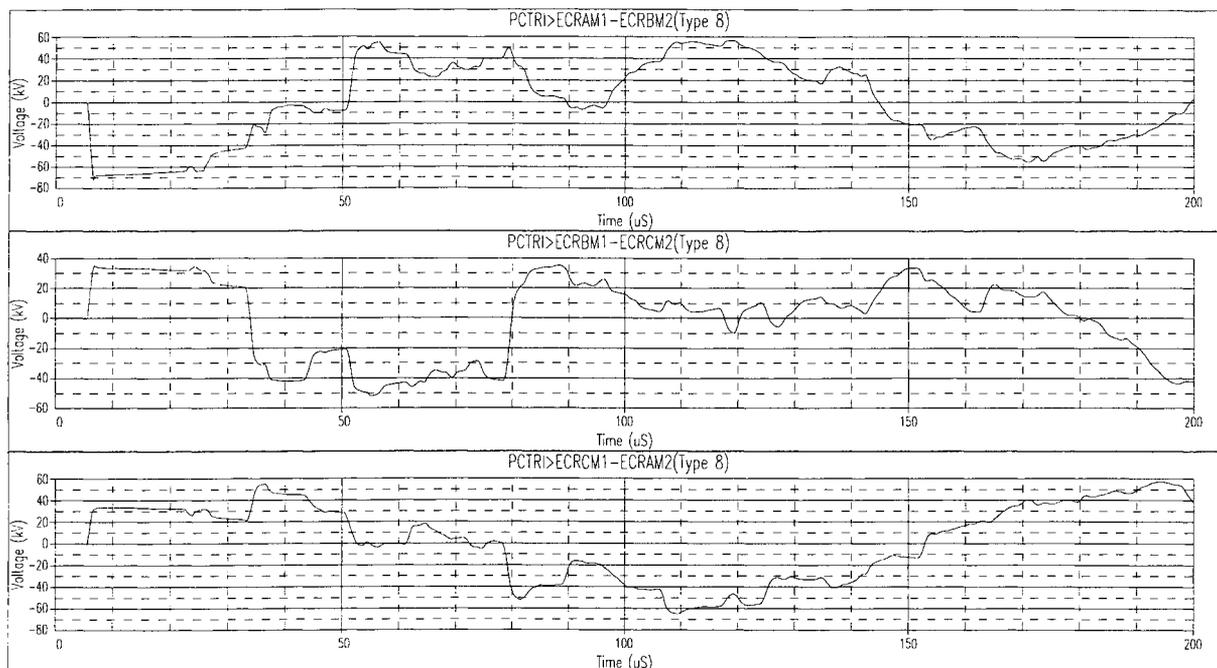


a) à la 1^{ère} jonction AE

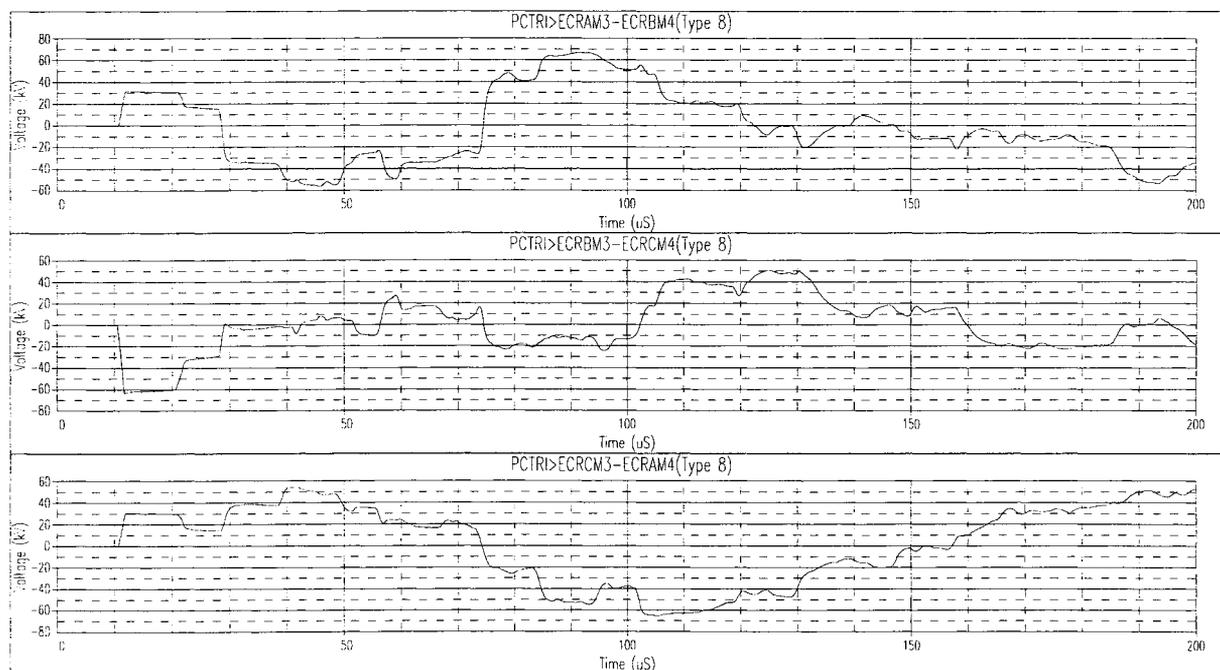


b) à la 2^{ème} jonction AE

Montée en potentiel des écrans
 (Parafoudres de gaine montés en triangle. Foudroiement d'un conducteur de phase)

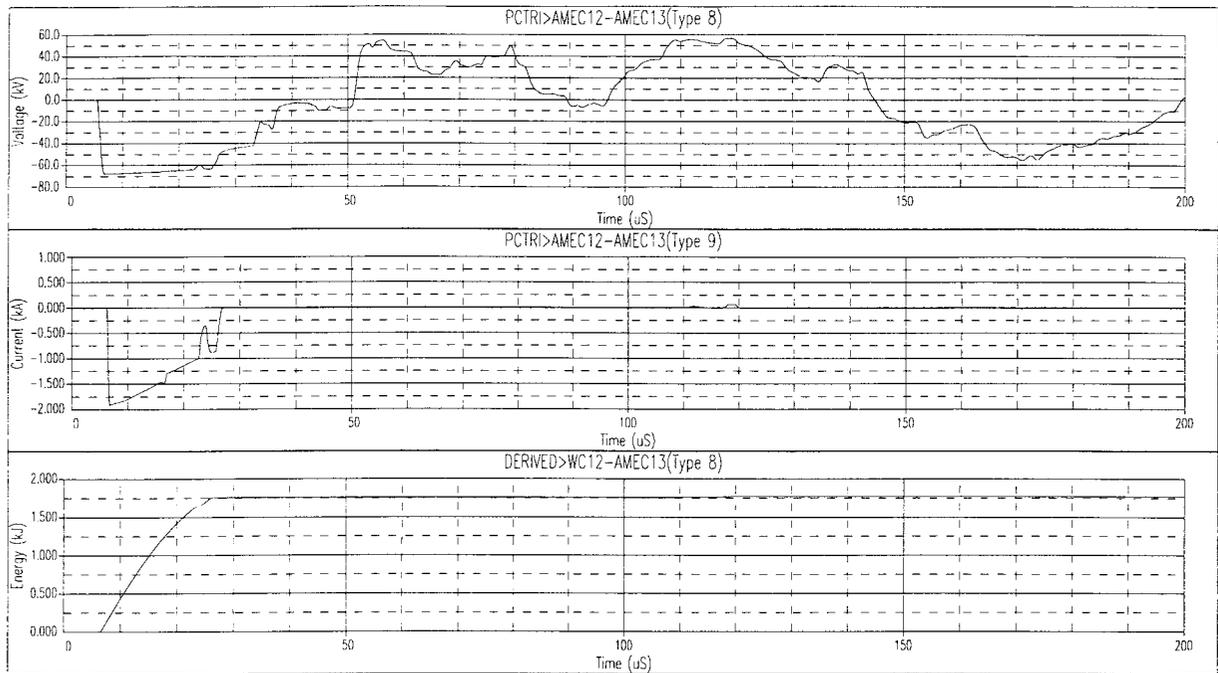


a) à la 1^{ère} jonction AE

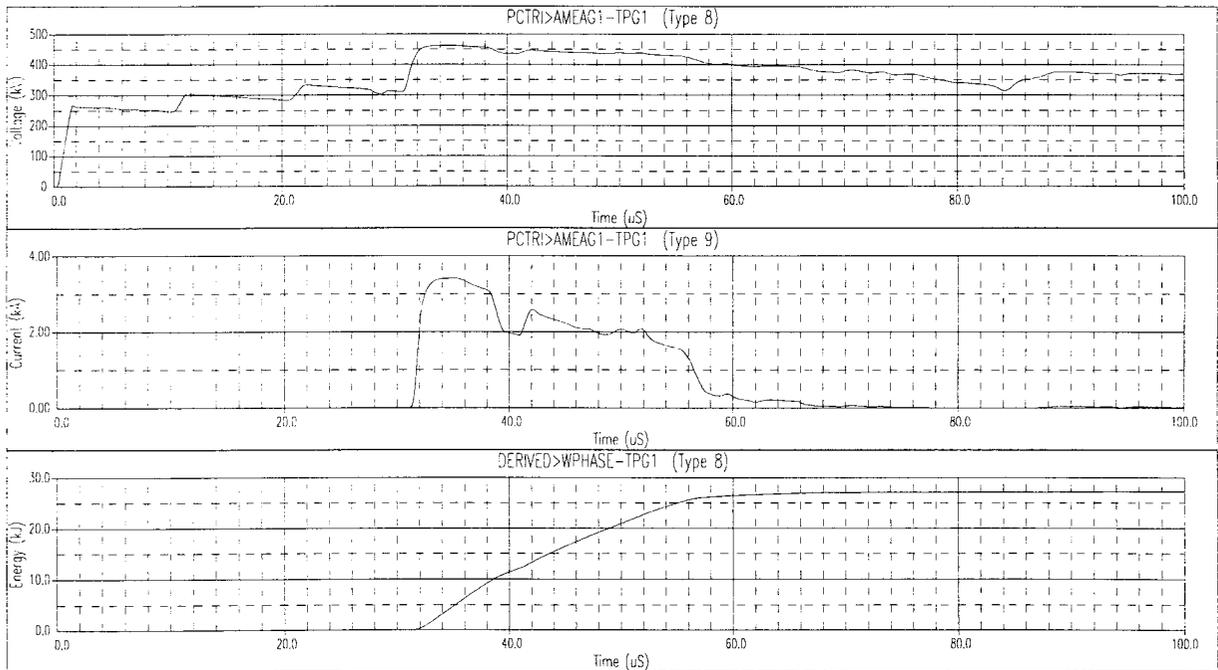


b) à la 2^{ème} jonction AE

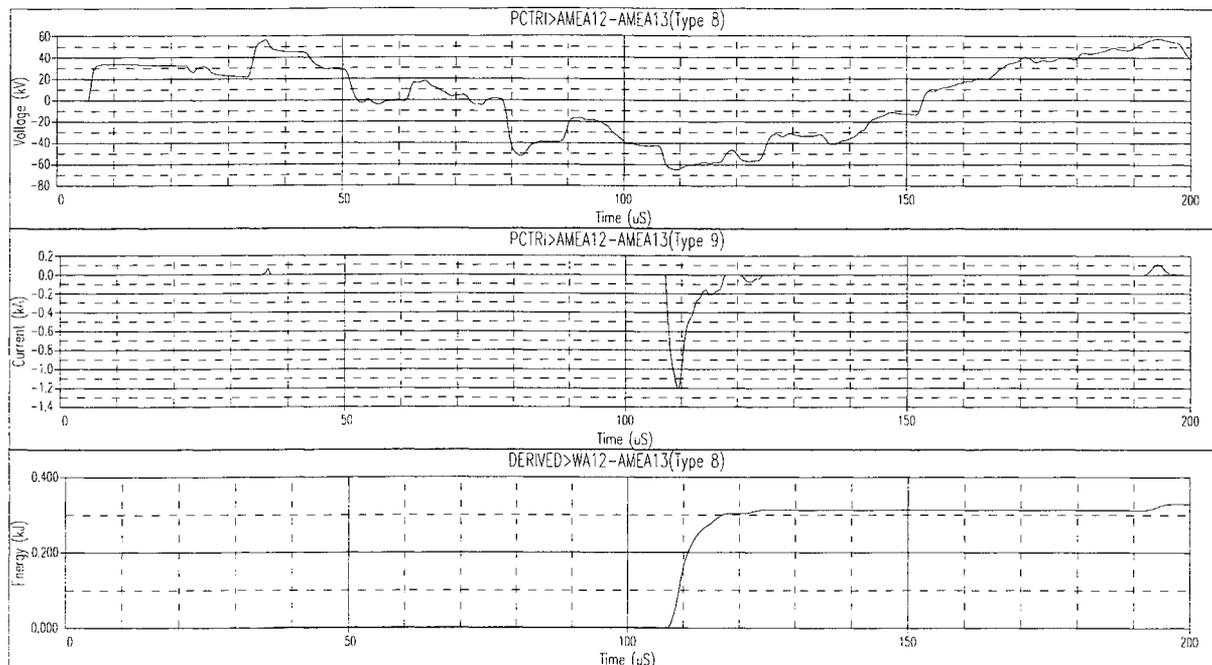
Tension Arrêt - Ecran
 (Parafoudres de gaine montés en triangle. Foudroiement d'un conducteur de phase)



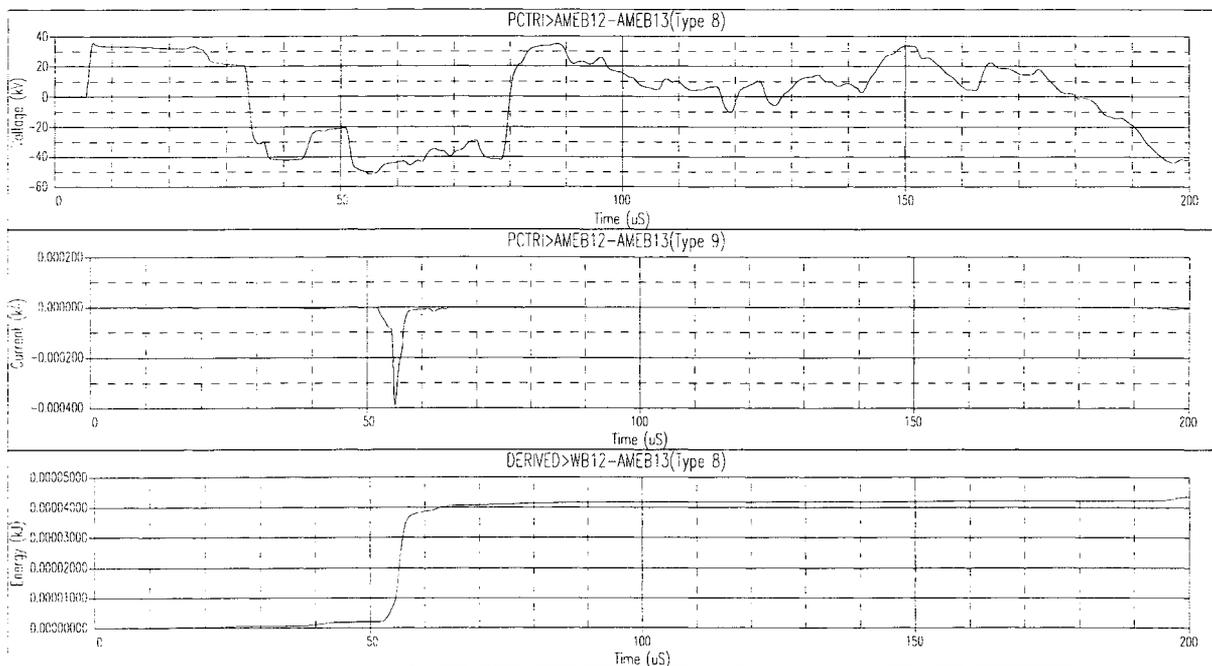
Parafoudres de gaine de la position C à la 1^{ère} jonction AE
(Parafoudres de gaine montés en triangle. Foudroiement d'un conducteur de phase)



Parafoudre de phase, de la phase sollicitée (position A)
(Parafoudres de gaine montés en triangle. Foudroiement d'un conducteur de phase)



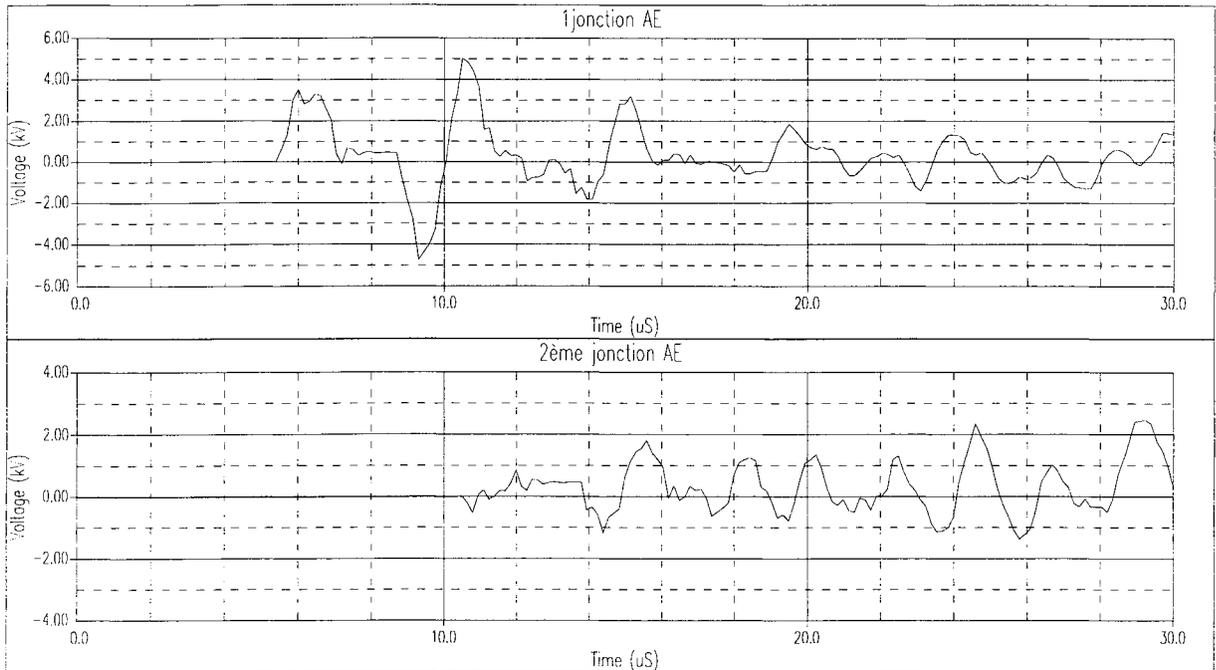
Parafoudres de gaine de la position A à la 1^{ère} jonction AE
(Parafoudres de gaine montés en triangle. Foudroiement d'un conducteur de phase)



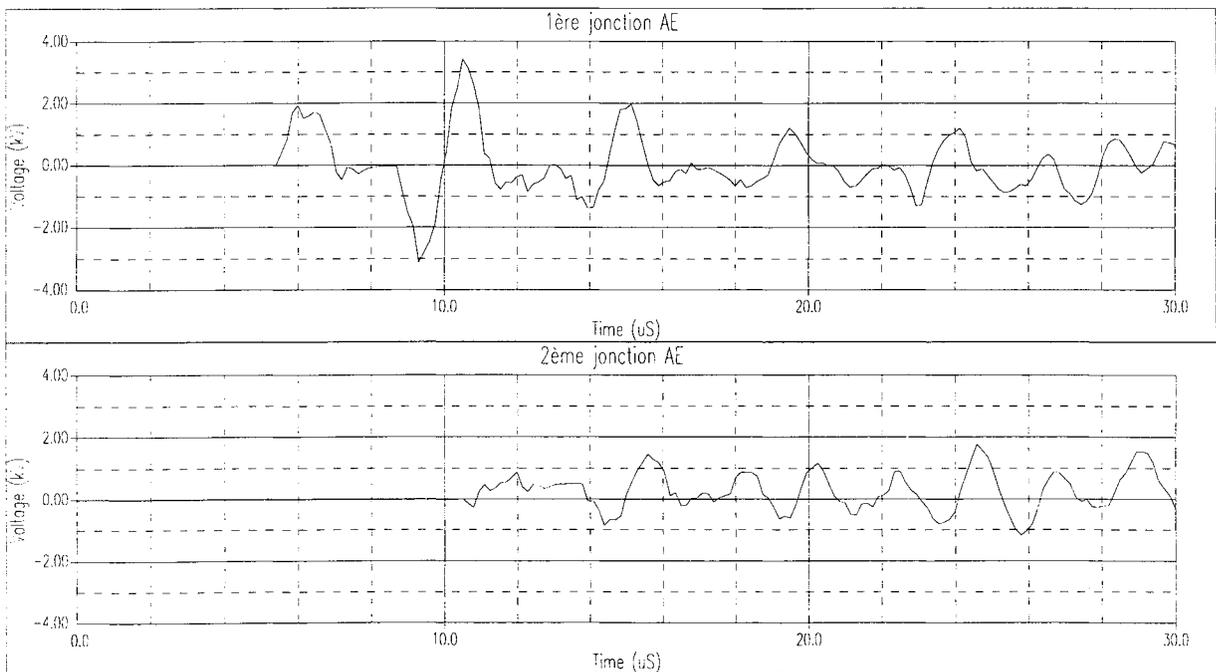
Parafoudres de gaine de la position B à la 1^{ère} jonction AE
(Parafoudres de gaine montés en triangle. Foudroiement d'un conducteur de phase)

II - FOUOROIEMENT DU CABLE DE GARDE.

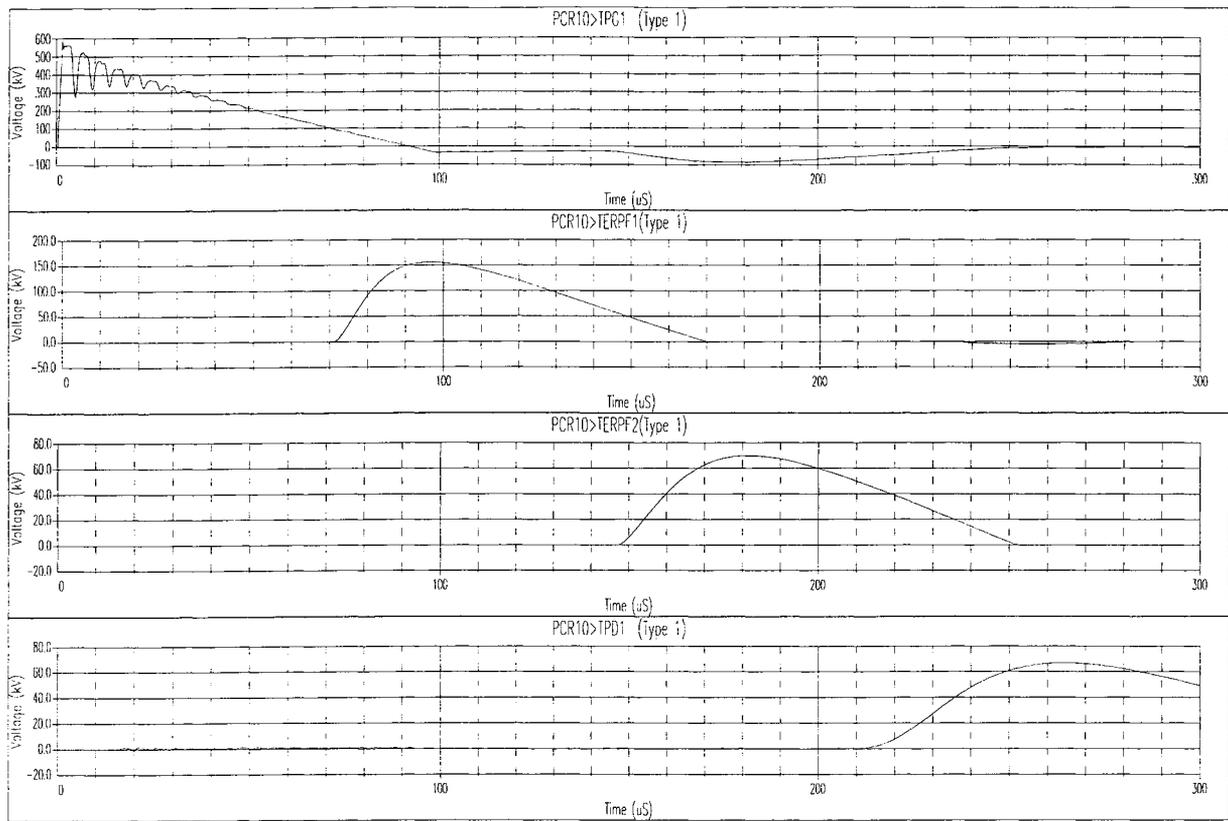
II - 1 - Parafoudres de gaine montés en étoile neutre mis à la terre. Cas standard



Tension Arrêt - Ecran (petite échelle)
(Parafoudres de gaine montés en étoile à neutre à la terre. Foudroiemment du câble de garde)

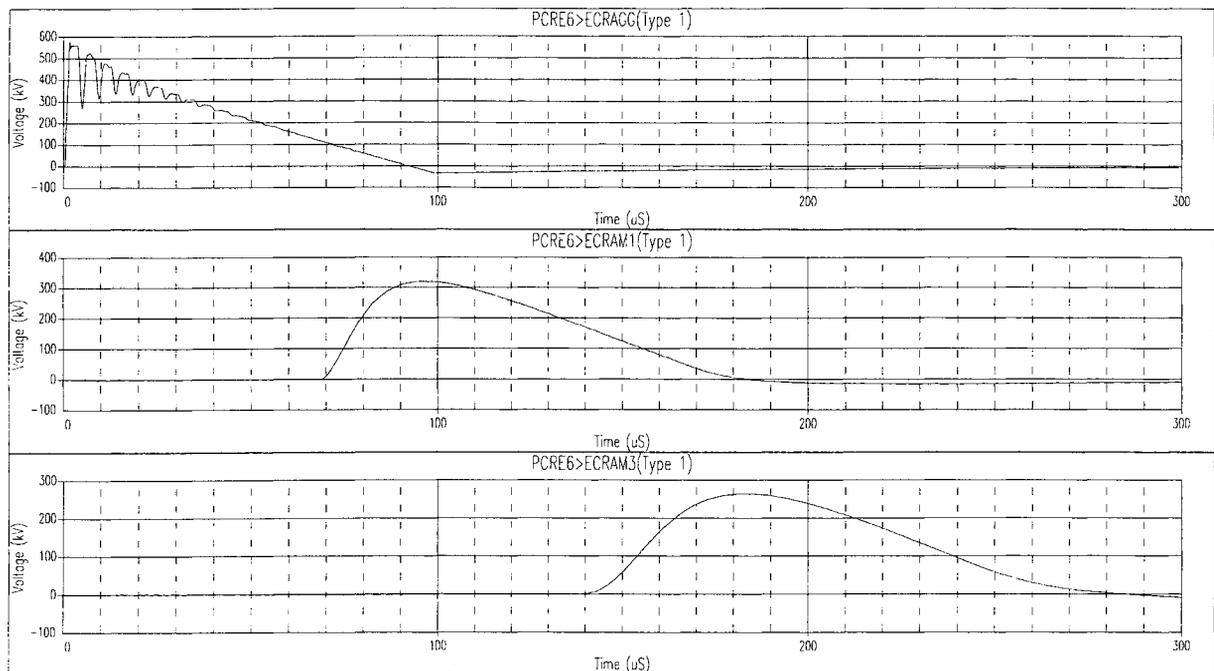


Montée en potentiel des écran / terre locale (prise de terre des parafoudres). Petite échelle
(Parafoudres de gaine montés en étoile à neutre à la terre. Foudroiemment du câble de garde)

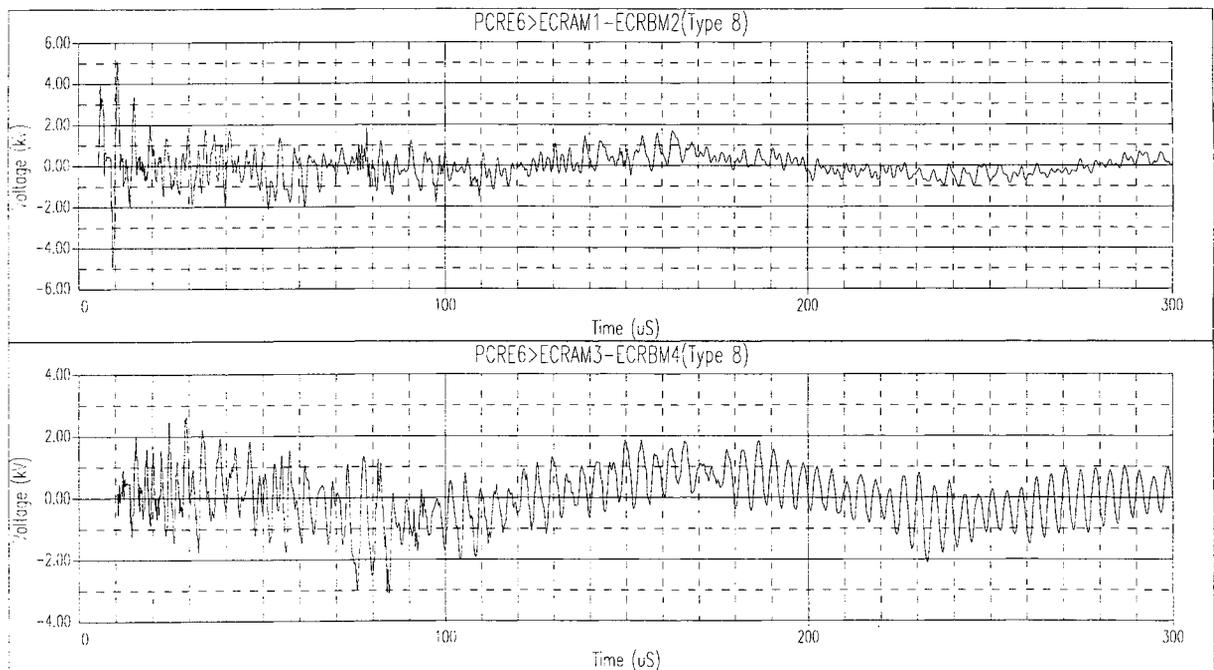


Montée en potentiel des prises de terre
(Parafoudres de gaine montés en étoile à neutre à la terre. Foudroiement du câble de garde)

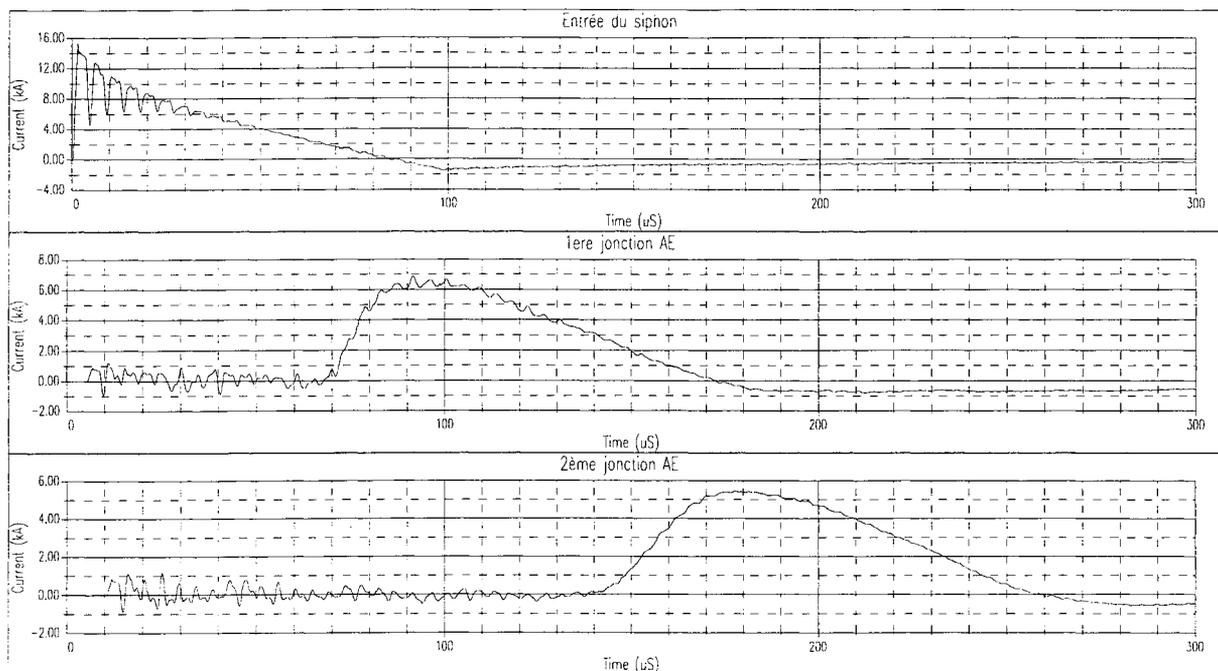
II - 2 - Parafoudres de gaine montés en étoile neutre isolé. Cas standard



Montée en potentiel de l'écran.
 Parafoudres montés en étoile - neutre isolé. Câble E-P=10m. Foudroiement du câble de garde

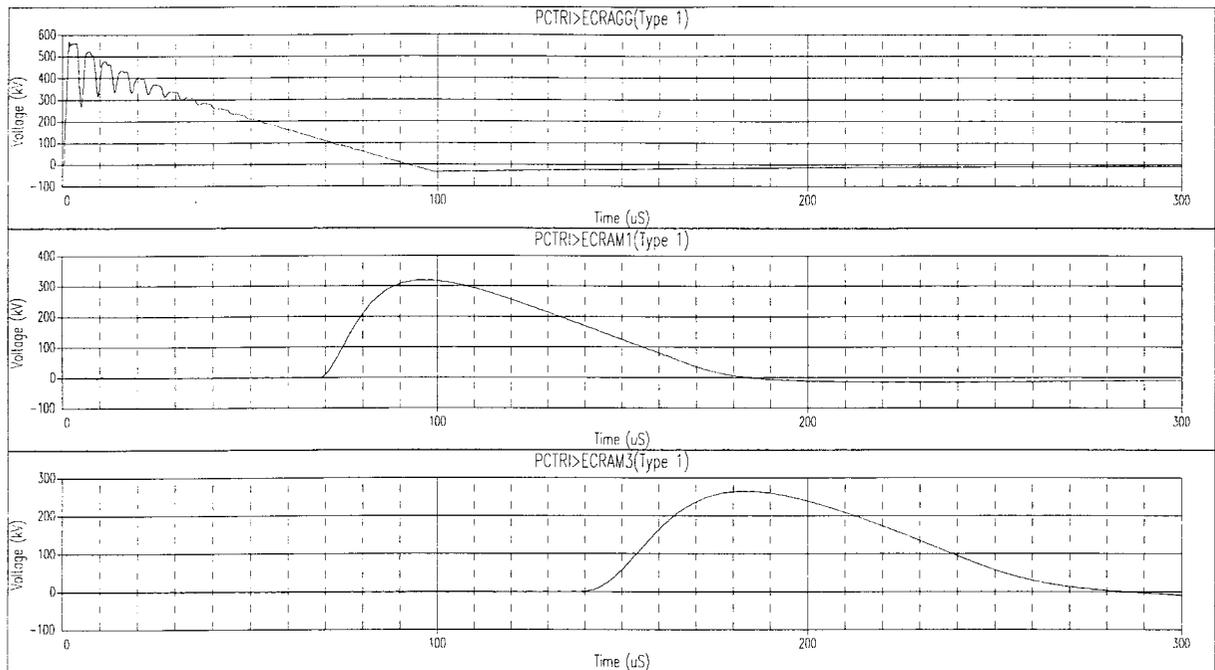


Tension Arrêt - Ecran
 (Parafoudres montés en étoile - neutre isolé. Foudroiement du câble de garde)

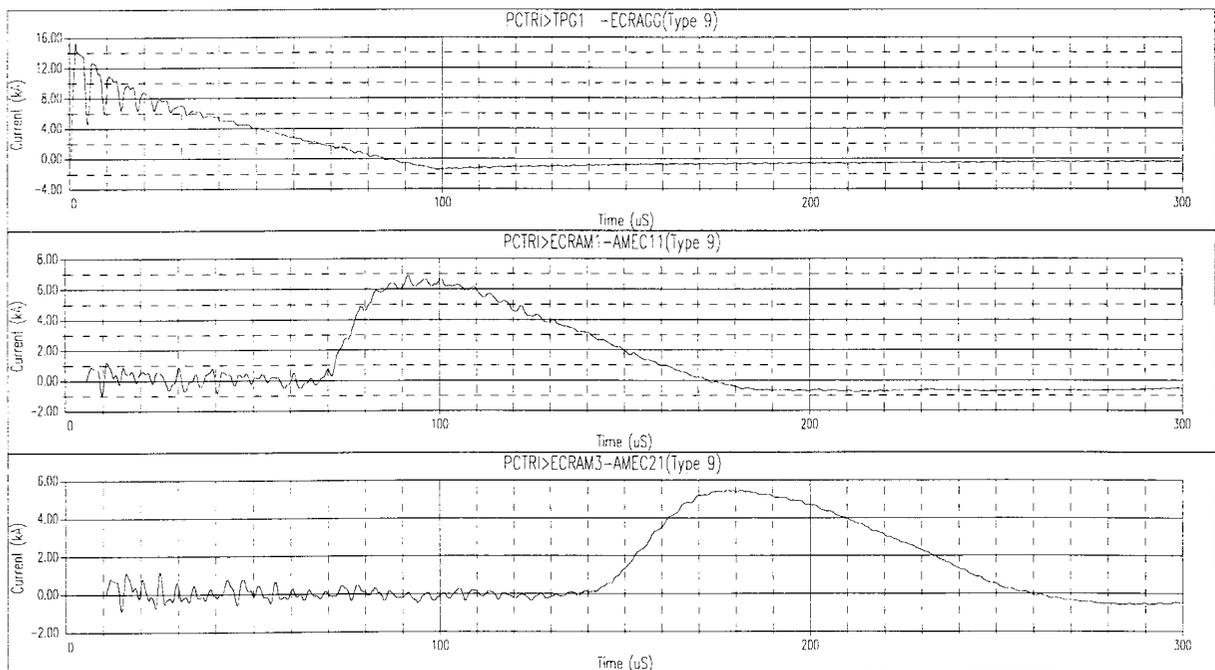


Courants dans les écrans
(Parafoudres montés en étoile - neutre isolé. Foudroiement du câble de garde)

II - 3 - Parafoudres de gaine montés en triangle. Cas standard



Montée en potentiel des écrans
(Parafoudres montés en triangle. Foudroiement du câble de garde)



Courants dans les écrans
(Parafoudres montés en triangle. Foudroiement du câble de garde)

RESUME

Des liaisons souterraines par câbles isolés seront à court terme insérées dans le réseau aérien THT de transport d'électricité. Diverses évolutions technologiques des câbles, de leurs matériels de raccordement et de leurs conditions de pose ont été initiées afin de réduire le coût de ces liaisons. L'optimisation des techniques de mise à la terre des écrans des câbles s'inscrit également dans cette démarche.

La thèse donne les bases théoriques pour la définition de spécifications de réalisation des techniques de mise à la terre des écrans des câbles dites de connexions spéciales d'écran (mise à la terre en un point et permutation d'écrans) et propose des règles pratiques de dimensionnement.

Les études ayant permis d'obtenir ce résultat portent sur la détermination des surtensions sollicitant les matériels. Dans la première partie, on a établi une méthode de calcul des contraintes d'une part en régime permanent et d'autre part dans les régimes de défaut, consécutifs soit à une avarie externe à la liaison souterraine soit à un claquage de câble. Dans la deuxième partie, on a analysé les contraintes dans les régimes transitoires, calculées à l'aide du logiciel Electromagnetic Transient Program (EMTP).

La synthèse de ces deux types d'étude permet d'optimiser le choix du type de limiteur de surtension à mettre en oeuvre pour protéger les matériels vis-à-vis des contraintes transitoires subies par les gaines des câbles ; elle permet également de déterminer les longueurs maximales réalisables pour les liaisons à mise à la terre en un point ou les distances maximales entre permutations en fonction des contraintes à la fréquence industrielle.

Mots clés : Liaisons souterraines - Câbles isolés - Connexions spéciales d'écrans - Mise à la terre en un point - Permutation d'écrans - Surtensions - Parafoudre - Fréquence industrielle - Régime transitoire

ABSTRACT

Underground links with insulated cables will be introduced in close future in the overhead grid for VHV electricity transmission. Various technological developments of the cables, their connecting equipments and their installation conditions were initiated in order to reduce the cost of these links. The optimization of the sheath grounding techniques also fits in this step.

The thesis gives the theoretical bases for the definition of specifications to realize specially bonded underground links techniques (single point bonding and cross bonding) and proposes practical rules for the design of cables sheath grounding.

The studies having made it possible to obtain this result relate to the determination of overvoltages affecting the equipments. In the first part, a general method of calculation of stresses is established, on the one hand, in steady state and on the other hand during faults, consecutive either with an external fault or with a cable breakdown. In the second part, the stresses during transients, calculated using the Electromagnetic Transient Program (EMTP) are analyzed.

The synthesis of these two kinds of studies leads to optimize the choice of the type of surge arresters to be implemented to protect the equipments with respect to the transients undergone by the cable sheaths ; it also makes it possible to determine the maximum possible lengths for single point bonding underground links or the maximum lengths between cross-bondings, according to the stresses at power frequency.

Keywords : Underground links - Insulated cables - Sheath special bonding - Single point bonding - Cross bonding - Overvoltages - Surge arrester - Power frequency - Transients