

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

RENFORCEMENT DE LA PASSIVITÉ DES MODÈLES DE LIGNES ET CÂBLES À
L'AIDE DU REPOSITIONNEMENT DES PÔLES ET DE LA PERTURBATION DES
RÉSIDUS

ALANDRE MAGLOIRE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAITRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE ÉLECTRIQUE)

AVRIL 2014

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

RENFORCEMENT DE LA PASSIVITÉ DES MODÈLES DE LIGNES ET CÂBLES À
L'AIDE DU REPOSITIONNEMENT DES PÔLES ET DE LA PERTURBATION DES
RÉSIDUS

présenté par : MAGLOIRE Alandre

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. KARIMI Houshang, Ph.D., président

M. MAHSEREDJIAN Jean, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. KOCAR Ilhan, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. DUFOUR Christian, Ph.D., membre

DÉDICACE

À mon regretté père, Sony MAGLOIRE, modèle de responsabilité et de détermination.

À mes trois mousquetaires : Jessica MAGLOIRE, Alexandre MAGLOIRE et Jessie Jean HYPPOLITE.

À Youdelande MAGLOIRE, la force tranquille.

À ma mère, extraordinairement courageuse.

REMERCIEMENTS

Je ne remercierai jamais assez ma famille pour m'avoir soutenu dans cet ambitieux projet malgré vents et marées.

J'ai rencontré des professeurs extraordinaires à l'École Polytechnique et certains ont été plus que des enseignants, des mentors qui m'ont insufflé le goût de la recherche. Le professeur Richard LABIB est un de ceux-là. Je le remercie du fond du cœur.

Pour être admis en recherche, des professeurs doivent répondre de vos compétences. Certains de mes anciens professeurs du bac ne se sont pas fait prier pour soutenir ma démarche. Ils méritent toute ma gratitude.

Pour résoudre certains problèmes difficiles, j'ai fait appel au professeur Saydy LAHCEN qui, malgré son horaire chargé a toujours trouvé du temps pour répondre à mes interrogations. Je lui suis grandement reconnaissant.

Mon co-directeur de recherche, le professeur Ilhan KOCAR a vécu les moments de hauts et de bas avec moi. Malgré mes hésitations, mes craintes, il n'a jamais cessé de m'encourager. Ce travail ne serait pas complété sans ses conseils bienveillants. Les mots ne suffisent pas pour lui dire merci.

Mon Directeur de recherche, le professeur Jean MAHSEREDJIAN est celui par qui tout a commencé. Il m'a accueilli au sein de son équipe et s'est assuré que j'avais l'environnement nécessaire pour faire le travail. Travailleur acharné et infatigable, il trouve toujours le temps de répondre à mes interrogations parfois aux petites heures du matin. Il restera un modèle à imiter.
Merci infiniment

Enfin, à tout le staff du département de Génie Électrique, et au personnel de l'École en général, je dis merci. Merci à Octavio Ramos, Lyes Ait-Oubelli et Isabel Silva Lafaia Simoes pour les mots d'encouragement, les documents et les fichiers. Merci à Madame Suzanne LE BEL, secrétaire du département, pour ses attentions.

RÉSUMÉ

Le modèle WB des lignes de transmission et des câbles utilise des approximations des fonctions \mathbf{H} et \mathbf{Y}_c obtenues par lissage vectoriel. Ces fonctions produisent parfois des modèles qui violent l'une des caractéristiques fondamentales des lignes : la passivité. Dans ce mémoire, nous proposons une méthode qui a pour but de s'assurer que le modèle lissé respecte le critère de passivité.

Cette méthode combine un repositionnement des pôles, un ajustement des données tabulées et une perturbation des résidus pour le renforcement de la passivité.

La méthode proposée est testée avec succès à l'aide de cas tirés d'une banque. À l'exception de cas extrêmes (câbles très courtes ou configurations complexes), des solutions passives ont toujours été trouvées.

Mots clés : Passivité, modèle WB, ULM, repositionnement des pôles, perturbation matricielle, lissage vectoriel

ABSTRACT

In the WB model, to calculate currents and voltages at the terminals of a power transmission medium (transmission line or cable), two parameters must be evaluated in frequency domain: the propagation function matrix \mathbf{H} and the characteristic admittance matrix \mathbf{Y}_C . Time domain simulations require the conversion of all core equations from frequency domain into time domain. To facilitate the calculations of convolution integrals, the two parameters are approximated using rational functions using the vector fitting process.

The approximation process introduces fitting errors which can induce numerical explosions in the time domain simulation. So it is advisable to test the passivity of the fitted model and if there are violations, it is necessary to correct the model. In this thesis, we propose a new method to enforce passivity by relocation of starting poles, input data adjustments and matrix perturbation.

The new method is thoroughly tested using several cable and transmission lines configurations. MATLAB and EMTP-RV platforms are used to implement and test the proposed method.

Index Terms—Vector Fitting, Passivity enforcement, line model, WB model, ULM, pole relocation, matrix perturbation

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIÈRES	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	X
LISTE DES FIGURES.....	XII
SIGLES ET ABRÉVIATIONS.....	XIV
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 PROBLÉMATIQUE.....	2
1.2 OBJECTIFS	2
1.3 CONTRIBUTIONS.....	2
1.4 LE DOCUMENT EN BREF	3
CHAPITRE 2 L'ALGORITHME DE LISSAGE	4
2.1 LE MODÈLE WB	4
2.2 LISSAGE VECTORIEL	6
CHAPITRE 3 RENFORCEMENT DE LA PASSIVITÉ	9
3.1 DÉFINITION DE LA PASSIVITÉ.....	9
3.1 CLASSIFICATION DES LARGES VIOLATIONS DE PASSIVITÉ	11
3.1.1 <i>Violations de type 1</i>	11
3.1.2 <i>Violations de type 2</i>	11
3.1.3 <i>Violations de type 3</i>	12
3.2 CALCUL DE LA LARGEUR DE BANDE	13
3.3 TEST DE PASSIVITÉ	14
3.3.1 <i>Limites expérimentales du test de passivité</i>	16
3.4 RÉOLUTION DU PROBLÈME DE PASSIVITÉ.....	17
3.4.1 <i>Larges violations</i>	17
3.4.2 <i>faibles violations</i>	17

CHAPITRE 4	AMÉLIORATIONS DU LISSAGE	20
4.1	AUGMENTATION DE L'ORDRE DE LISSAGE	20
4.1.1	<i>Augmentation de l'ordre du lissage de Y_c</i>	20
4.1.2	<i>Augmentation de l'ordre du lissage de H</i>	23
4.1.3	<i>Augmentation simultanée de l'ordre du lissage de H et Y_c</i>	25
4.2	MODIFICATION DES PARAMÈTRES D'ENTRÉE	26
4.2.1	<i>Ajustement de f_{\min}</i>	26
4.2.2	<i>Ajustement du nombre de points de fréquence</i>	27
4.3	REPOSITIONNEMENT DES PÔLES	27
4.4	LISSAGE DE L'ERREUR	29
4.4.1	<i>Lissage de l'erreur de Y_c et de H</i>	29
4.4.2	<i>Étude de passivité de la fonction Y_n corrigée</i>	32
4.4.3	<i>Cas d'étude</i>	33
CHAPITRE 5	PERTURBATION MATRICIELLE	35
5.1	MARGE DE POSITIVITÉ	35
5.1.1	<i>Utilisation de la marge de positivité</i>	37
5.2	CHOIX DE LA MATRICE DE PERTURBATION	38
5.3	PERTURBATION DES RÉSIDUS	39
5.4	OPTIMISATION MOINDRES CARRÉS	42
5.5	EXEMPLES	42
CHAPITRE 6	TESTS ET RÉSULTATS	45
6.1	CAS 1 : MSA_CABLE	45
6.2	CAS 2: HANNI_15KM	50
6.2.1	<i>Vérification dans le domaine temporel</i>	52
6.3	CAS 3 : EDF_ACCABLE_OC	54
6.3.1	<i>Vérification dans le domaine temporel</i>	56
6.4	CAS 4 : IK3CABLE_OC	58
6.4.1	<i>Vérification dans le domaine temporel</i>	59
6.5	CAS 5 : IK6CABLE_OC	63
6.6	CAS 6 : RTEDC_CABLE	65
6.7	CAS 7 : JEEW3CABLE_SC	67

6.7.1	<i>Vérification dans le domaine temporel</i>	68
6.8	CAS 8 : LIN_9PH.....	70
6.9	CAS 9 : WB_9KM_RV.CYZ	72
6.9.1	<i>Vérification dans le domaine temporel</i>	74
6.10	SOMMAIRE DES OBSERVATIONS.....	76
CHAPITRE 7	CONCLUSION.....	78
BIBLIOGRAPHIE	80
ANNEXE 1:	LISTE DES FICHIERS	83

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3-1 : Détermination des limites absolues pour la passivité	10
Tableau 4-1 : Effets de l'augmentation de l'ordre de Y_c (cas 2)	21
Tableau 4-2 : Effets de l'augmentation de l'ordre de Y_c (cas 8)	22
Tableau 4-3 : Effets de l'augmentation de l'ordre de H (cas 1)	24
Tableau 4-4 : Effets de l'augmentation de l'ordre de H (cas 2)	24
Tableau 4-5 : Effets de l'augmentation de l'ordre de H (cas 3)	24
Tableau 4-6 : Effets de l'augmentation de l'ordre de H (cas 4)	24
Tableau 4-7 : Effets de l'augmentation de l'ordre de H (cas 5)	25
Tableau 4-8 : Effets de l'augmentation de l'ordre de H (cas 8)	25
Tableau 4-9 : Augmentation de N_{stop} (cas 2).....	26
Tableau 4-10 : Augmentation de N_{stop} (cas 7).....	26
Tableau 4-11 : Valeurs de N_{ppd} et N_{dec} avec les itérations	27
Tableau 4-12 : Résultats du repositionnement des pôles - Cas 2	28
Tableau 4-13 : Résultats du repositionnement des pôles - Cas 3	28
Tableau 4-14 : Résultats du repositionnement des pôles - Cas 4	28
Tableau 4-15 : Résultats du repositionnement des pôles - Cas 9	28
Tableau 4-16 : Résultats du repositionnement des pôles - Cas 7	29
Tableau 4-17 : Résultats de l'étude de passivité du modèle corrigé - Cas 4.....	33
Tableau 4-18 : Résultats de l'étude de passivité du modèle corrigé - Cas 9.....	33
Tableau 5-1 : Variation du nombre de violations de passivité au fil des itérations de perturbation (cas 8)	44
Tableau 6-1 : Paramètres du câble - Cas 1	46
Tableau 6-2 : Paramètres du modèle choisis par l'utilisateur et modifications - Cas 1.....	46
Tableau 6-3 : Itérations de perturbation - cas 1	48
Tableau 6-4 : Résultats des tests de passivité (cas -1).....	49
Tableau 6-5 : Liste des fichiers - cas 1	49
Tableau 6-6 : Paramètres du câble – Cas 2	50
Tableau 6-7 : choix de l'utilisateur - cas 1.....	51
Tableau 6-8 : Résultats des tests de passivité - Cas 2	51

Tableau 6-9 : Paramètres du câble – Cas 3	54
Tableau 6-10 : Paramètres de départ et modifiés - cas 3.....	55
Tableau 6-11 : Résultats des tests de passivité - cas 3	55
Tableau 6-12 : Paramètres du câble – Cas 4	58
Tableau 6-13 : Paramètres de départ et modifications successives - cas 4	59
Tableau 6-14 : Résultats des tests de passivité - cas 4	59
Tableau 6-15 : Paramètres du câble – Cas 5	64
Tableau 6-16 : Modifications successives des paramètres d'entrée - cas 5.....	64
Tableau 6-17 : Résultats des tests de passivité - cas 5	64
Tableau 6-18 : Paramètres du câble – Cas 6	65
Tableau 6-19 : Résultats des tests de passivité - cas 6	66
Tableau 6-20 : Paramètres du câble – Cas 7	67
Tableau 6-21 : Modèle original et modifications - cas 7.....	68
Tableau 6-22 : Résultats des tests de passivité – cas 7.....	68
Tableau 6-23 : Paramètres de la ligne de transmission – Cas 8	71
Tableau 6-24 : Résultats des tests de passivité - cas 8	71
Tableau 6-25 : Paramètres du câble – Cas 9	73
Tableau 6-26 : Modèle original et modifications - cas 7.....	73
Tableau 6-27 : Résultats des tests de passivité – cas 9.....	73
Tableau 6-28 : Tableau synthèse des cas	77

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1 : Courants et tensions dans une ligne de transmission	4
Figure 2-2 : Le modèle WB en blocs	6
Figure 3-1 : Illustration d'un cas de violations de type 1	11
Figure 3-2 : Illustration d'un cas de violations de type 2	12
Figure 3-3 : Illustration d'un cas de violations de type 3	13
Figure 3-4 : Test de passivité	15
Figure 3-5 : Méthode de résolution du problème de passivité	18
Figure 3-6 : Méthode simplifiée de résolution du problème de passivité	19
Figure 4-1 : Comparaison de Y_{c31} lissé à l'ordre 14 et à l'ordre 16 (Cas 2)	21
Figure 4-2 : Comparaison de Y_{c11} lissé à l'ordre 14 et à l'ordre 16 (Cas 2)	22
Figure 4-3 : Comparaison de Y_{c12} lissé à l'ordre 10 et à l'ordre 16 (Cas 8)	23
Figure 5-1 : Effet de la perturbation sur les valeurs propres (Cas 4)	43
Figure 5-2 : Effet de la perturbation sur les valeurs propres - Cas 8.....	44
Figure 6-1 : Configuration du câble - cas 1.....	45
Figure 6-2 : Données du câble - cas 1	46
Figure 6-3 : Circuit à l'étude (modélisé sous EMTP-RV).....	47
Figure 6-4 : Tension à l'extrémité du câble et impulsion d'excitation.....	47
Figure 6-5 : Simulation temporelle avec le modèle perturbé, et le modèle original – Cas 1	48
Figure 6-6 : Comparaison entre les deux modèles - Cas 1	49
Figure 6-7 : Configuration et données du câble - Cas 2.....	50
Figure 6-8 : Circuit EMTP de test du cas 2.....	52
Figure 6-9 : Tension à l'extrémité d'un des câbles avant modification des paramètres	52
Figure 6-10 : Tension à l'extrémité d'un des câbles après augmentation de N_{ppd}	53
Figure 6-11 : Tension à l'extrémité du câble avant et après perturbation	53
Figure 6-12 : Configuration et données du câble - Cas 3.....	54
Figure 6-13 : Circuit EMTP de test - cas 3	56
Figure 6-14 : Tension à l'extrémité du câble avant modification - cas 3	56
Figure 6-15 : Tension à l'extrémité du câble après la première modification - cas 3.....	57
Figure 6-16 : Tension à l'extrémité du câble après la deuxième modification - cas 3	57

Figure 6-17 : Configuration et données du câble - Cas 4.....	58
Figure 6-18 : Schéma EMTP de test - cas 4.....	60
Figure 6-19 : Tension à la sortie des noyaux des câbles - modèle original - cas 4.	60
Figure 6-20 : Tension obtenue à la sortie pour Nppd = 20 - cas 4.....	61
Figure 6-21 : Tension de sortie après la première perturbation - cas 4.....	61
Figure 6-22 : Tension de sortie pour Nppd = 30 - cas 4.....	62
Figure 6-23 : Résultats après la seconde perturbation - cas 4.....	62
Figure 6-24 : Données et configuration des câbles - cas 5.....	63
Figure 6-25 : Configuration et données des câbles : cas -6.....	65
Figure 6-26 : Schéma EMTP de test - cas 6.....	66
Figure 6-27 : Tension à la sortie du câble - cas 7.....	66
Figure 6-28 : Configuration et données des câbles : - cas 7.....	67
Figure 6-29 : Schéma EMTP de test - cas 7.....	69
Figure 6-30 : Tension à l'extrémité du câble - cas 7.....	69
Figure 6-31 : Tension à la sortie pour Nppd = 20 - cas 7.....	69
Figure 6-32 : Tension à la sortie du câble pour Nppd = 30 – cas 7.....	70
Figure 6-33 : Configuration de la ligne de transmission – cas 8.....	71
Figure 6-34 : Sortie originale Vs sortie perturbée - Cas 8.....	72
Figure 6-35 : Configuration et données du câble - Cas 9.....	72
Figure 6-36 : Schéma de principe du système HVDC de test - Cas 9.....	74
Figure 6-37 : Résultats de la simulation temporelle pour le modèle original - Cas 9.....	74
Figure 6-38 : Résultats de la simulation temporelle après modification 1 - Cas 9.....	75
Figure 6-39 : Résultats de la simulation temporelle après repositionnement des pôles - Cas 9.....	75
Figure 6-40 : Résultats de la simulation temporelle après modification 2 - Cas 9.....	76

SIGLES ET ABRÉVIATIONS

WB	(WideBand) Modèle Large bande des lignes de transmission et câbles
CP	(Constant Parameter). Autre modèle de ligne
FD	Autre modèle de ligne à paramètres dépendant de la fréquence
H	Matrice de propagation
Y_c	Admittance caractéristique
HV	Nombre de points correspondant à des larges violations de passivité
LV	Nombre de points correspondant à des faibles violations de passivité
N_y	Ordre du lissage de Y_c
N_c	Nombre de conducteurs
N_w	Nombre de points de fréquence
NH	Ordre de lissage de H pour un mode donné
NH_tot	Ordre total de lissage de H (Nombre total de pôles de H)
N_g	Nombre de modes (égal à N_c si on ne regroupe pas les modes)
N_{ppd}	Nombre de points par décade
N_{dec}	Nombre de décades
λ_k	k^{ieme} valeur propre
$E(x)$	Partie entière de x
Δf	Largeur de la bande de violation de passivité
f_{max}	Fréquence maximale correspondant à une violation de passivité
RelErr	Erreur relative de lissage
RMSErr	Erreur moyenne de lissage
AbsErr	Erreur absolue de lissage
diag(A)	Vecteur formé des éléments se trouvant sur la diagonale de A

\mathbf{A}^*	Transformée hermitienne de \mathbf{A} (conjuguée et transposée de la matrice)
\mathbf{A}^T	Transposée de \mathbf{A}
$\overline{\mathbf{A}}$	Conjugué de \mathbf{A}

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Pour réaliser une bonne simulation, on a besoin de modèles de qualité. Dans le cas de lignes de transmission et les câbles, il en existe plusieurs qui varient selon la précision des résultats obtenus, les domaines de validité et naturellement, les méthodes de programmation.

Les modèles de ligne utilisés dans les logiciels de type EMTP sont : le modèle PI, le modèle CP, le modèle FD et plus récemment le modèle WB.

Les modèles CP, FD, FDQ et WB utilisent des paramètres distribués et sont basés sur la théorie de la propagation des ondes. Ils sont donc plus précis que le modèle en PI.

Selon le modèle CP, la ligne est modélisée sans perte et les pertes sont ajoutées à la fin de la modélisation en utilisant des résistances. Le modèle n'est très précis que pour une fréquence donnée.

Les modèles FD et FDQ prennent en compte la dépendance en fréquence de la constante de propagation et de l'admittance caractéristique. En conséquence, ils sont précis pour une plus large bande de fréquences.

Tous les modèles qui tiennent compte de la dépendance en fréquence des paramètres de la ligne utilisent le lissage de \mathbf{H} et \mathbf{Y}_c dans le domaine des fréquences puis utilisent la convolution pour passer dans le domaine temporel. Par contre, certains modules d'EMTP utilisent le domaine modal. Le passage du domaine modal au domaine des phases se fait par le biais des matrices de transformations \mathbf{T}_v ou \mathbf{Q} . La grande différence entre les modèles FD et FDQ vient du fait que l'on considère la matrice \mathbf{Q} comme dépendante de la fréquence dans le modèle FDQ; ainsi la matrice de transformation est aussi lissée en même temps que les paramètres \mathbf{H} et \mathbf{Y}_c . Les références [1, 2] présentent les détails des implantations de ces modèles.

Le modèle Wideband (WB) des lignes et des câbles utilise aussi des approximations des fonctions \mathbf{H} et \mathbf{Y}_c par le biais du lissage vectoriel. Ses particularités seront présentées au chapitre suivant.

1.1 PROBLÉMATIQUE

L'utilisation du lissage vectoriel pour approximer les fonctions \mathbf{H} et \mathbf{Y}_c a pour effet de produire parfois un modèle qui ne respecte pas toutes les caractéristiques des lignes et des câbles. Une de ces caractéristiques, et non des moindres, est la passivité. En effet, une ligne de transmission est naturellement passive; donc un modèle ne saurait être autrement.

1.2 OBJECTIFS

Ce travail de recherche a pour but d'améliorer l'algorithme de lissage vectoriel en y intégrant un module de renforcement de la passivité.

Plus spécifiquement, il faut :

- a) Faire l'étude approfondi du modèle WB en insistant particulièrement sur l'algorithme de lissage afin d'identifier et de corriger les éventuelles faiblesses qu'il contiendrait.
- b) Faire l'analyse des méthodes existantes de vérification de la passivité, une des conséquences documentées du lissage vectoriel.
- c) S'assurer de l'intégration d'une méthode qui permettrait de s'assurer que le modèle obtenu par lissage soit toujours passif.
- d) Tester la méthode en utilisant des cas jusque-là non résolus de violations de passivité

1.3 CONTRIBUTIONS

Les contributions apportées par ce travail de recherche sont les suivantes :

- Une nouvelle classification des violations de passivité est proposée.
- Une méthode de relocalisation des pôles initiaux est implantée. Cette méthode permet de cibler des violations de passivité localisées sur une étroite bande de fréquence et donne des résultats intéressants dans certains cas.
- On démontre que l'ajout des pôles a un effet limité sur la résolution des problèmes de passivité et que dans certains cas, le problème empire.
- On teste le concept de lissage de l'erreur dans le contexte de la passivité.
- Une version améliorée du test de passivité est présentée.

- Une nouvelle méthode de perturbation matricielle est présentée. Cette méthode est appliquée avec succès aux modèles quasi-passifs peu importe le nombre de violations de passivité.
- Tous ces éléments forment un tout cohérent dans le nouvel algorithme de lissage avec correction automatique des violations de passivité. Ce qui représente la contribution majeure de ce travail de recherche.

1.4 LE DOCUMENT EN BREF

Le chapitre 2 revisite les notions essentielles pour une bonne compréhension du travail. Le modèle WB est présenté succinctement de même que le concept de lissage vectoriel.

Le chapitre 3 est consacré à la passivité. On y trouve une nouvelle classification des violations de passivité, le nouveau test de passivité et le cadre général de la résolution des problèmes de passivité.

Nous présentons au chapitre 4 des manières d'améliorer le lissage, et ainsi réduire les risques de violations de passivité. Nous expérimentons les effets de l'augmentation de l'ordre de lissage, de l'ajustement des paramètres d'entrée et de la relocalisation des pôles. De plus, nous introduisons le concept de lissage de l'erreur. Toutes ces méthodes sont testées dans le but de résoudre les larges violations de passivité.

Le concept de marge de positivité est introduit au chapitre 5. Il pose les bases pour la présentation, plus loin dans le même chapitre, de la méthode de perturbation matricielle.

Le chapitre 6 contient les détails des cas qui sont utilisés dans le document : les configurations de câbles et des lignes de même que les résultats obtenus en appliquant le nouvel algorithme de lissage sont présentés.

CHAPITRE 2 L'ALGORITHME DE LISSAGE

Ce chapitre est un résumé succinct du modèle WB et de l'algorithme de lissage. Il est nécessaire pour comprendre le problème que nous cherchons à résoudre et les éléments de solutions que nous proposons. Pour de plus amples informations sur le lissage vectoriel, le lecteur peut consulter la référence [3]. Dans [4], on montre comment utiliser le lissage vectoriel pour réaliser un modèle thermique des batteries de véhicules hybrides et électriques. Dans des articles parus récemment, on propose des variations à l'algorithme de lissage (un algorithme de lissage barycentrique [5]) et des réponses au problème de la convergence de l'algorithme [6].

2.1 LE MODÈLE WB

On part des équations d'une ligne de transmission selon la théorie de propagation des ondes quasi-TEM. La ligne (ou le câble) est caractérisée par son impédance Z , son admittance shunt Y et sa longueur l . La figure 2.1 nous montre les courants incidents et réfléchis aux deux extrémités de la ligne, ainsi que les sens des courants résultants et des tensions.

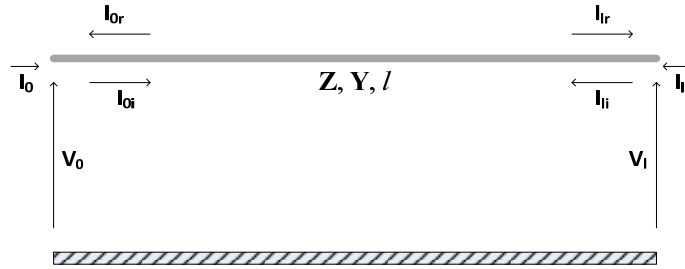


Figure 2-1 : Courants et tensions dans une ligne de transmission

Les relations entre courants et tensions sont données par [7] :

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dx} &= -ZI \\ \frac{dI}{dx} &= -YV \end{aligned} \quad (2.1)$$

Après quelques manipulations, on trouve la solution de ce système d'équations différentielles

$$\begin{aligned} I_l - Y_c V_l &= -(I_0 + Y_c V_0) e^{-\psi l} \\ I_0 - Y_c V_0 &= -(I_l + Y_c V_l) e^{-\psi l} \end{aligned} \quad (2.2)$$

On introduit le coefficient de propagation et l'admittance caractéristique Y_c par :

$$\psi = \sqrt{YZ} \quad (2.3)$$

$$Y_c = (\sqrt{YZ})^{-1} \cdot Y \quad (2.4)$$

On définit la matrice de propagation par

$$\mathbf{H} = e^{-\psi l} \quad (2.5)$$

Le système 2.2 devient alors :

$$\begin{aligned} I_l - Y_c V_l &= -\mathbf{H}(I_0 + Y_c V_0) \\ I_0 - Y_c V_0 &= -\mathbf{H}(I_l + Y_c V_l) \end{aligned} \quad (2.6)$$

On peut réarranger les termes de l'équation 2.6 pour obtenir :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{H} \\ \mathbf{H} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_l \\ I_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_c & -\mathbf{H}Y_c \\ -\mathbf{H}Y_c & Y_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_l \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Ou mieux

$$\begin{bmatrix} I_l \\ I_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{H} \\ \mathbf{H} & \mathbf{I} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Y_c & -\mathbf{H}Y_c \\ -\mathbf{H}Y_c & Y_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_l \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

\mathbf{I} désigne la matrice identité.

Ainsi, on peut faire le lien entre la matrice d'admittance nodale et les paramètres Y_c et \mathbf{H}

$$Y_n = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{H} \\ \mathbf{H} & \mathbf{I} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Y_c & -\mathbf{H}Y_c \\ -\mathbf{H}Y_c & Y_c \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

On voit clairement à partir de l'équation 2.9 que les paramètres \mathbf{H} et Y_c sont suffisants pour trouver toutes les tensions et tous les courants.

On peut ainsi partir des valeurs de Y et Z pour calculer les paramètres \mathbf{H} et Y_c pour chaque point de fréquence. Dans la pratique, on part des valeurs modales fournies par des modules d'EMTP pour trouver les matrices \mathbf{H} et Y_c qui seront utilisées lors du lissage vectoriel.

La figure 2.2 présente les grandes étapes de la réalisation du modèle WB. L'utilisateur se sert du module de calcul des données des câbles (*cable data calculations*) pour entrer la configuration de

son câble ou de sa ligne de transmission. Le module fournit les valeurs de \mathbf{Z} et \mathbf{Y} pour les points de fréquence de la bande choisie. Ce sont ces valeurs qui seront utilisées par le module de lissage vectoriel pour calculer \mathbf{H} et \mathbf{Y}_c et pour ensuite les présenter sous la forme d'une série dans le domaine de phase. Ces séries sont ramenées dans le domaine temporel par des opérations de convolution.

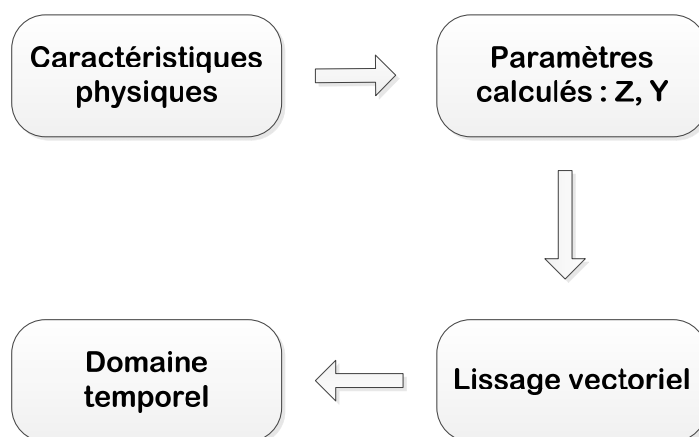


Figure 2-2 : Le modèle WB en blocs

2.2 LISSAGE VECTORIEL

Le code de base du lissage vectoriel a été réalisé par M. Gustavsen [3, 8]. Les deux premières versions sont maintenant contenues dans la librairie de MATLAB. De plus, un site web a été créé pour documenter les changements.

L'objectif du lissage consiste à écrire une fonction numérique $F(s)$, définie sur un intervalle de fréquence sous la forme d'une somme de fonctions rationnelles qui seront très faciles à transposer dans le domaine temporel.

$$F(s) \approx \sum_{m=1}^{N_{\text{order}}} \frac{c_m}{s - a_m} + d + se \quad (2.10)$$

Dans l'équation (2.10), N_{order} désigne l'ordre du lissage, c_m , a_m , d et e sont respectivement les résidus, les pôles et d'autres constantes à trouver.

Certains travaux ont contribué à l'amélioration du processus de lissage [9-12]. L'algorithme est utilisé pour lisser l'admittance caractéristique et la fonction de propagation. Chaque terme de la matrice \mathbf{Y}_c est représenté sous la forme :

$$Y_{c,ij} \cong \sum_{k=1}^{N_y} \frac{c_{k,ij}}{s - p_k} + d_{ij} \quad (2.11)$$

La fonction de propagation \mathbf{H} est d'abord lissée dans le domaine modal [13]. Pour chacun des modes, on trouve :

$$H_m \cong e^{-(s\tau_m)} \sum_{i=1}^N \frac{\hat{c}_{mi}}{s - p_{mi}} \quad (2.12)$$

On réalise le lissage dans le domaine de phase en gardant les pôles identifiés à l'étape précédente et en déterminant les résidus associés à chaque terme de la matrice \mathbf{H} . On obtient :

$$H_{ij}(s) \cong \sum_{m=1}^M \left(\sum_{n=1}^{N_m} \frac{c_{ijnm}}{s - p_{mn}} \right) e^{-(s\tau_m)} \quad (2.13)$$

On vérifie la précision du modèle lissé en calculant l'erreur commise pour chaque point de fréquence.

On utilise trois métriques pour l'erreur :

- La valeur maximale de l'erreur absolue

$$\max \text{AbsErr} = \max_k |f_{fit}(k) - f(k)| \quad (2.14)$$

- L'erreur moyenne (rms) =

$$\text{RMSErr} = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^{N_\omega} |f_{fit}(k) - f(k)|^2}}{N_\omega} \quad (2.15)$$

- La valeur maximale de l'erreur relative

$$\max \text{RelErr} = \max_k \left| \frac{f_{fit}(k) - f(k)}{f(k)} \right| \quad (2.16)$$

Dans les équations (2.14) à (2.16), $f_{\hat{f}_t}(k)$ désigne la valeur lissée de la fonction f pour le $k^{\text{ième}}$ échantillon de fréquence et N_ω désigne le nombre total d'échantillons de fréquence.

CHAPITRE 3 RENFORCEMENT DE LA PASSIVITÉ

Dans ce chapitre, le concept de passivité au cœur du travail de recherche est introduit. Nous définissons le concept et nous présentons une classification des violations de passivité qui sera utilisé dans le nouveau test de passivité qui est détaillé un peu plus loin. Enfin, les grandes lignes de la résolution du problème de passivité sont déclinées.

3.1 DÉFINITION DE LA PASSIVITÉ

Une ligne de transmission ne génère pas d'énergie lorsque connectée à un réseau externe. On parle alors d'un dispositif passif. Le modèle de la ligne ou du câble obtenu par lissage doit aussi être passif. L'objectif du test de passivité est de s'assurer que le modèle respecte ce critère.

Les critères de passivité pour un système défini par son admittance $\mathbf{Y}_n(s)$ sont [14] :

- 1) $\mathbf{Y}_n(s)$ n'a aucun pôle dans la partie droite du plan complexe
- 2) $\forall s \in \mathbb{C}, \overline{\mathbf{Y}_n(s)} = \mathbf{Y}_n(\bar{s})$
- 3) $\text{eig}\left(\frac{(\mathbf{Y}_n(s) + \mathbf{Y}_n^*(s))}{2}\right) > 0$

Les deux premières conditions sont toujours vraies dans le cas des lignes de transmission, car les pôles et les résidus sont toujours des paires de nombres complexes conjugués [15]. Il ne reste donc qu'à vérifier la troisième condition. On définit alors la fonction \mathbf{Y}_H par :

$$\mathbf{Y}_H = \frac{(\mathbf{Y}_n + \mathbf{Y}_n^*)}{2} \quad (3.1)$$

Où \mathbf{Y}_n^* désigne la transformée hermitienne (transposée et conjuguée) de \mathbf{Y}_n .

Alors, pour tester la passivité, on utilise la relation suivante [13, 16] :

$$\text{eig}(\mathbf{Y}_H(s)) > 0 \quad \forall s, s = j\omega \quad (3.2)$$

Le modèle WB utilisant les approximations rationnelles de l'admittance caractéristique Y_c et de la fonction de propagation H , Il faut calculer Y_H en fonction de Y_c et H . On y parvient en partant de l'équation 2.9 et en écrivant :

$$Y_n = \begin{bmatrix} A & B \\ B & A \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Où

$$A = Y_c \cdot (I + H^2) \cdot (I - H^2)^{-1} \quad (3.4)$$

$$B = -2Y_c \cdot H \cdot (I - H^2)^{-1} \quad (3.5)$$

Ainsi, on est capable de tester la passivité du modèle lissé pour chaque point de fréquence en utilisant la relation 3.2.

En cas de violations de la passivité, on teste l'amplitude des violations. Sur une base empirique, nous avons ainsi fixé les limites absolues de violation. Le tableau 3-1 affiche ces valeurs.

Tableau 3-1 : Détermination des limites absolues pour la passivité

Type de violation	Limite absolue
faible	10^{-7}
large	10^{-3}

Ainsi, si $\text{Re}(\text{eig}(Y_H(\omega))) < -10^{-7}$, on a une faible violation de passivité et si $\text{Re}(\text{eig}(Y_H(\omega))) < -10^{-3}$, on a une large violation.

En général, les faibles violations de passivité ne nuisent pas à la simulation temporelle. Elles doivent quand même être corrigées si on veut obtenir un modèle qui soit le plus conforme à la réalité. Pour les corriger, la méthode de perturbation des résidus est utilisée avec un taux de succès exemplaire. En effet, dans 90% des cas, on obtiendra un modèle passif à partir d'un modèle non passif n'ayant que des faibles violations de passivité (Dans le reste du document, nous qualifierons ces modèles de quasi-passif) indépendamment du nombre de violations.

Les larges violations de passivité ont par contre des impacts visibles lors de la simulation temporelle. Quand les mesures n'explorent pas, elles sont parfois complètement erronées. Il faut absolument les corriger.

3.1 CLASSIFICATION DES LARGES VIOLATIONS DE PASSIVITÉ

La présence de larges violations est un indicateur de la qualité du lissage effectué.

Nous divisons ces violations en trois types :

3.1.1 VIOLATIONS DE TYPE 1

S'il existe des valeurs propres négatives pour des fréquences supérieures à 100 MHz (peu importe la largeur de la bande de violation), on se trouve dans le cas des violations de type 1. La figure 3-1, correspondant au modèle du cas 5, illustre bien les violations de type 1.

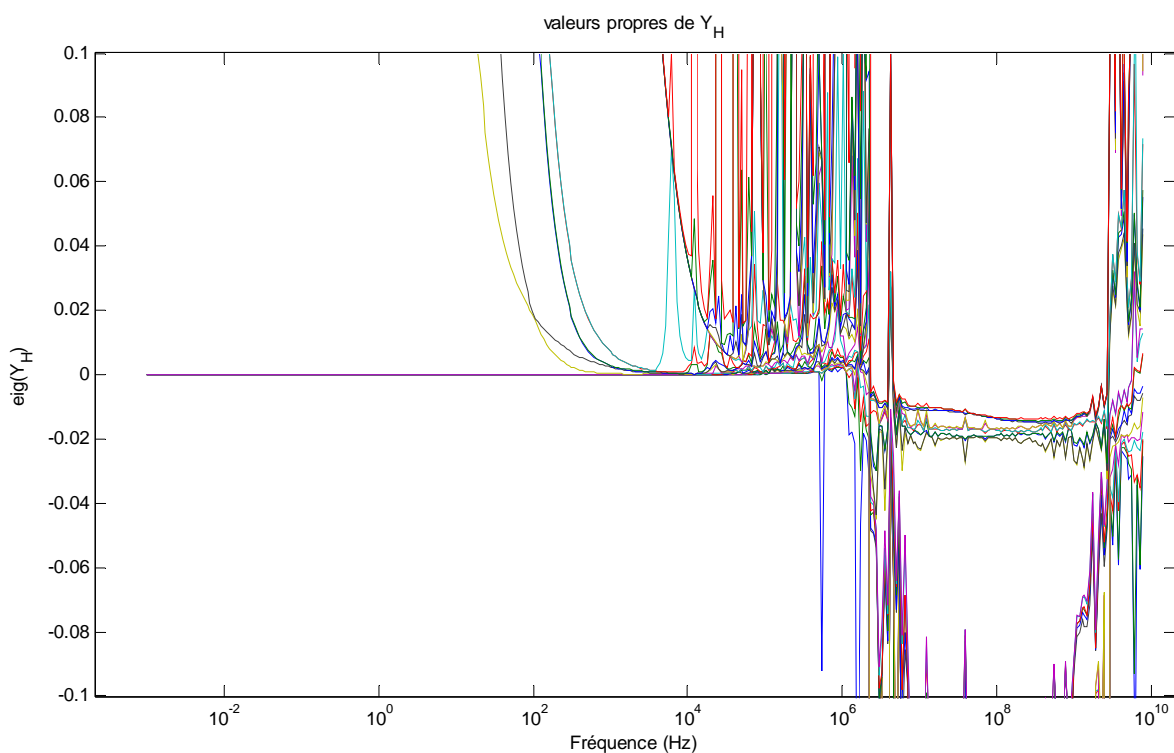


Figure 3-1 : Illustration d'un cas de violations de type 1

3.1.2 VIOLATIONS DE TYPE 2

Les violations se trouvent sur une très large bande de fréquence (ou plusieurs petites bandes). Par exemple, sur la figure 3-2, les larges violations sont localisées sur deux bandes de fréquence.

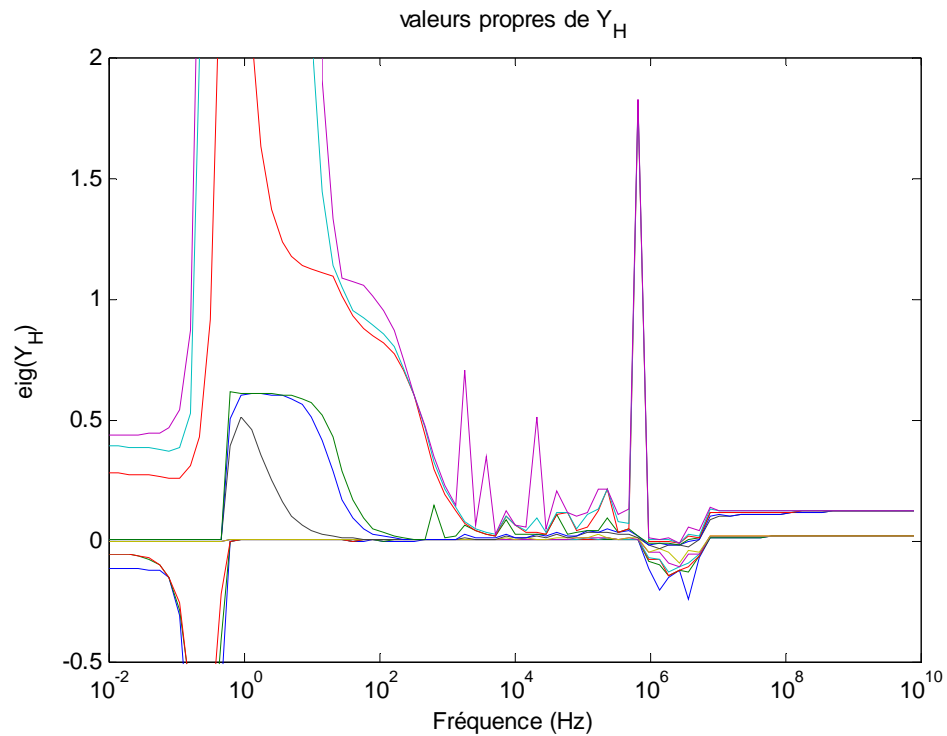


Figure 3-2 : Illustration d'un cas de violations de type 2

3.1.3 VIOLATIONS DE TYPE 3

Dans ce cas, les violations sont concentrées sur une bande de fréquence de 2 ou 3 décades et ne correspondent pas au type 1. Sur la figure 3-3 (cas 7), on voit que les larges violations de passivité se trouvent entre 100 Hz et 10 kHz. C'est un exemple de violations de type 3. Si le nombre de points de violation n'est pas très grand, on peut essayer de les corriger en utilisant la méthode de repositionnement de pôles qui sera présentée à la section 4.3.

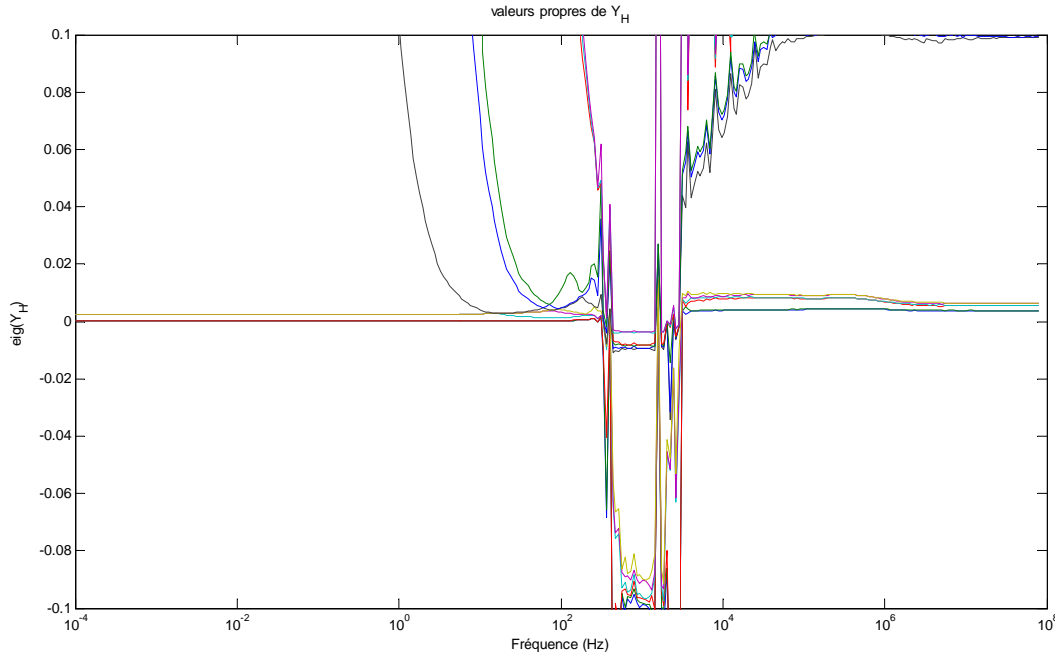


Figure 3-3 : Illustration d'un cas de violations de type 3

3.2 CALCUL DE LA LARGEUR DE BANDE

La détermination du type de violation dépend de la largeur de bande correspondant aux violations. Pour calculer cette largeur de bande, nous considérons les deux fréquences extrêmes correspondant à des violations de passivité :

$$f_{\min} = \frac{\omega(k_{\min})}{2\pi} \quad (3.6)$$

$$f_{\max} = \frac{\omega(k_{\max})}{2\pi}$$

Alors la largeur de bande est donnée par :

$$\Delta f = E(\log_{10}(f_{\max})) - E(\log_{10}(f_{\min})) \quad (3.7)$$

Dans l'équation (3.6), $E(x)$ désigne la partie entière de x . La fonction $\text{floor}(x)$ est utilisée sous MATLAB à cette fin.

La définition mathématique des types de violations se présente ainsi :

$$\text{type} = \begin{cases} 1 & \text{si } f_{\max} \geq 10^8 \\ 2 & \text{si } \Delta f > 2 \\ 3 & \text{si } \Delta f \leq 2 \text{ et } f_{\max} < 10^8 \end{cases} \quad (3.8)$$

3.3 TEST DE PASSIVITÉ

La figure 3.4 résume la procédure utilisée pour réaliser le nouveau test de passivité. A l'étape d'initialisation, les limites absolues LowViol et HiViol sont fixées, les points de fréquence correspondant aux violations limites (kmin, kmax) sont initialisés de même que le nombre de points de violation de passivité (N_Low, N_Hi). Enfin, on choisit une tabulation pour le test de passivité. Généralement on choisit une bande plus large que celle utilisée pour le lissage, ce qui permet de tester les cas de violations hors-bande de lissage.

Pour chaque point de fréquence de la tabulation choisie, l'équation 3.2 sert à tester la violation. Si une violation est constatée, on détermine sa catégorie (large ou faible). Si c'est une violation large, on fait la mise à jour de kmin, kmax et N_Hi. Si c'est une faible violation, on met à jour N_Low. On répète cette procédure jusqu'à épuisement des points.

Après avoir fait la vérification pour tous les points, on peut calculer la largeur de bande de violation. Les valeurs suivantes sont transmises aux autres modules :

- f_{\max} : la *fréquence maximale* de la bande de violation qui servira à déterminer si la violation est de type 1
- Δf : la *largeur de bande*, élément central de la nouvelle classification des larges violations
- N_low : Le *nombre de faibles violations* qui s'il est différent de zéro indique les actions correctives à entreprendre.
- N_Hi : Le *nombre de larges violations*.

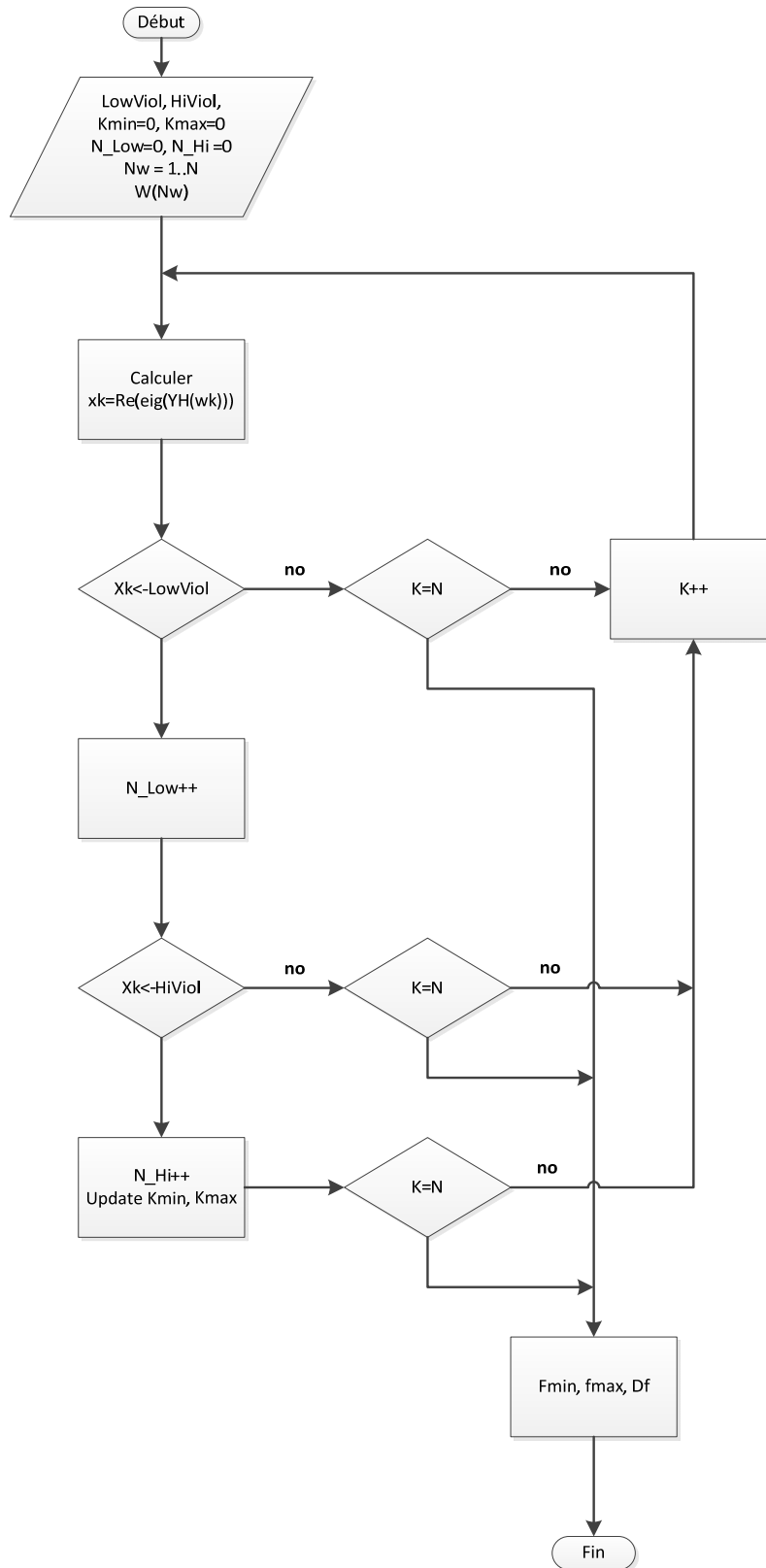


Figure 3-4 : Test de passivité

3.3.1 LIMITES EXPÉRIMENTALES DU TEST DE PASSIVITÉ

Le test actuel de passivité utilise un balayage fréquentiel. La qualité du résultat dépend de la quantité de points choisis. Il peut arriver qu'entre deux points testés, il existe des valeurs correspondant à des violations de passivité. Pour éviter cette situation, nous choisissons de considérer un nombre de points testés égal à 4 fois le nombre d'échantillons de fréquence.

$$N\omega_{\text{pass}} = 4 \times N\omega \quad (3.9)$$

Cette solution ne convient pas au module de perturbation qui requiert un nombre limité de points pour la résolution du problème d'optimisation. Il faut trouver un consensus entre la précision du test de passivité et l'utilisation du module de perturbation.

Nous proposons ainsi de tester la passivité en utilisant le même nombre d'échantillons de fréquence lorsqu'on fait la perturbation des résidus. Par contre, une fois la perturbation terminée positivement, il convient de valider le résultat en utilisant le balayage extrême. Ce dernier est obtenu en utilisant un facteur multiplicatif égal à 10. Ce qui réduit considérablement la possibilité de manquer des points de violation. Si, suite à ce balayage, on obtient des larges violations de passivité, on reviendra au point de départ, à moins d'avoir déjà atteint la limite du nombre de points de fréquence ($N_{\text{ppd}} = 30$).

On introduit ainsi un facteur appelé *PassivityFactor* dont la valeur change en fonction du test à effectuer. Les différentes valeurs sont présentées au tableau

Tableau 3-2 : Valeurs du facteur de passivité

Test de passivité	Normal	Perturbation	Extrême
PassivityFactor	4	1	10

En résumé, le nombre de points de fréquence testés dans le cadre de la passivité est lié au nombre d'échantillons de fréquence par la relation suivante :

$$N\omega_{\text{pass}} = \text{passivityFactor} \times N\omega \quad (3.10)$$

Notons enfin que les résultats varient avec le type de processeur utilisé. Nos résultats correspondent à un test de passivité effectué sur 64 bits. Nous présenterons quelques exemples qui montrent que le test de passivité donne des résultats différents sur deux processeurs distincts.

3.4 RÉSOLUTION DU PROBLÈME DE PASSIVITÉ

Dans cette section, nous présentons les grandes lignes de la solution proposée lorsqu'un modèle présente des violations de passivité. Ces solutions seront détaillées dans les chapitres subséquents.

3.4.1 LARGES VIOLATIONS

Lorsqu'un problème de large passivité est découvert, on détermine son type afin de savoir quelle approche adopter pour le résoudre. Ainsi, s'il y a des violations de type 1, c'est-à-dire des violations hors de la bande de tabulation, c'est un signe que la tabulation doit être ajustée.

Les violations de type 2 nécessitent aussi un réajustement de la tabulation, soit en variant le nombre de décades de la bande d'étude soit en augmentant le nombre de points de fréquence par décade.

Enfin les violations de type 3 peuvent être résolues en utilisant la technique de repositionnement des pôles.

Les méthodes de résolution des larges violations de passivités sont présentées en détail dans le chapitre suivant.

En tentant de résoudre un problème de large violation de la passivité, on peut obtenir un modèle non-passif si aucune des solutions précédentes ne s'applique au problème, un modèle passif s'il n'y a plus de violation ou un modèle quasi-passif s'il subsiste des faibles violations de passivité.

3.4.2 FAIBLES VIOLATIONS

Les faibles violations de passivité sont corrigées en améliorant le lissage de Y_c ou en appliquant la méthode de perturbation présentée au chapitre 5. Dans la majorité des cas, on obtient à la fin un modèle passif. Si la méthode de perturbation ne parvient pas à corriger les problèmes de faibles violations, on tente alors les solutions applicables aux larges violations jusqu'à épuisement des cas.

La figure 3.5 résume les principales étapes de la résolution du problème de passivité. Le diagramme pourrait être plus simple comme on peut le voir sur la figure 3.6 puisque les cas

résolus par la méthode de repositionnement des pôles sont en grande majorité résolus par un ajustement des données. Comme il existe au moins un cas pour lequel la méthode de repositionnement a donné de meilleurs résultats, la solution 1 demeure notre choix.

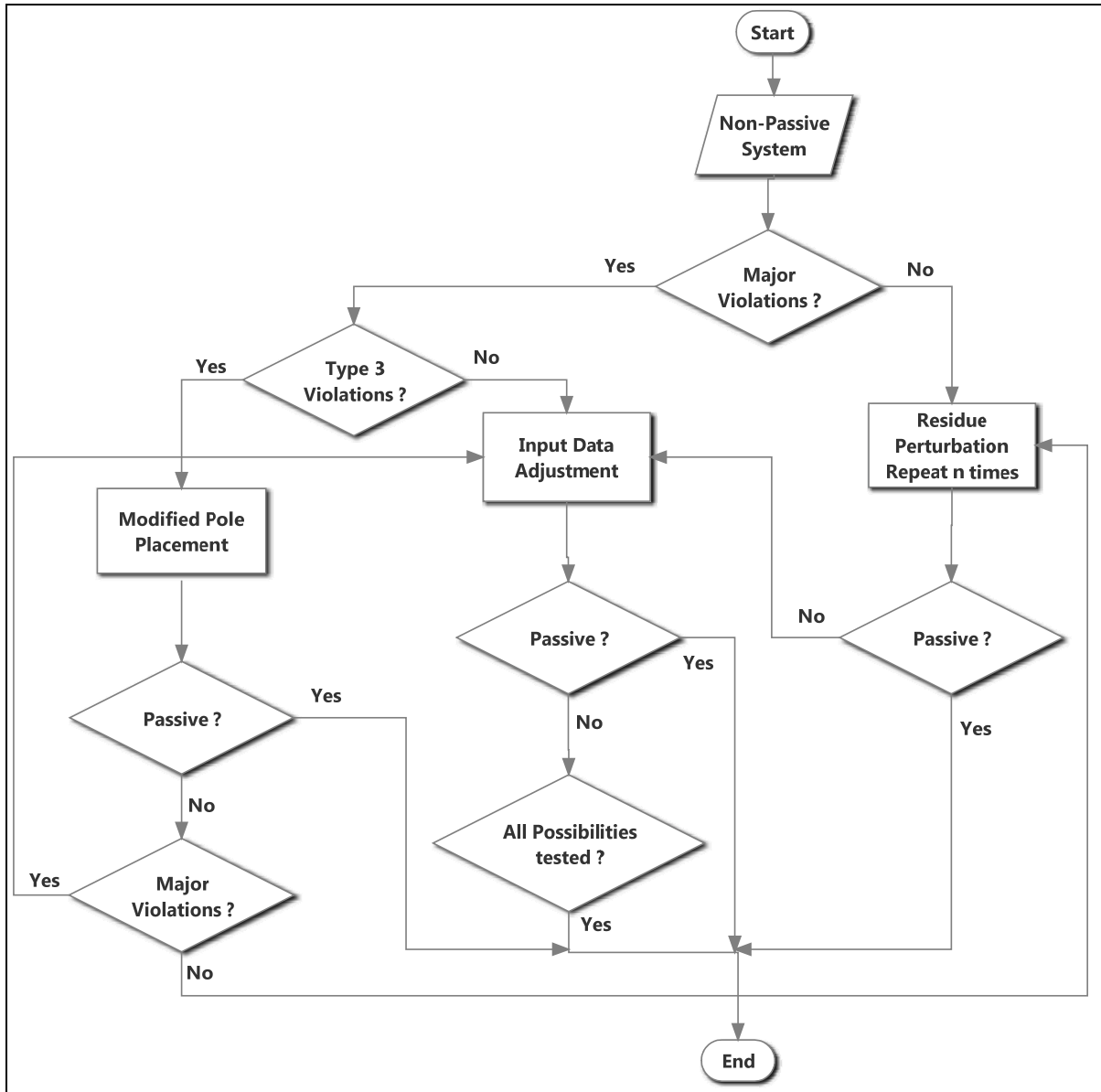


Figure 3-5 : Méthode de résolution du problème de passivité

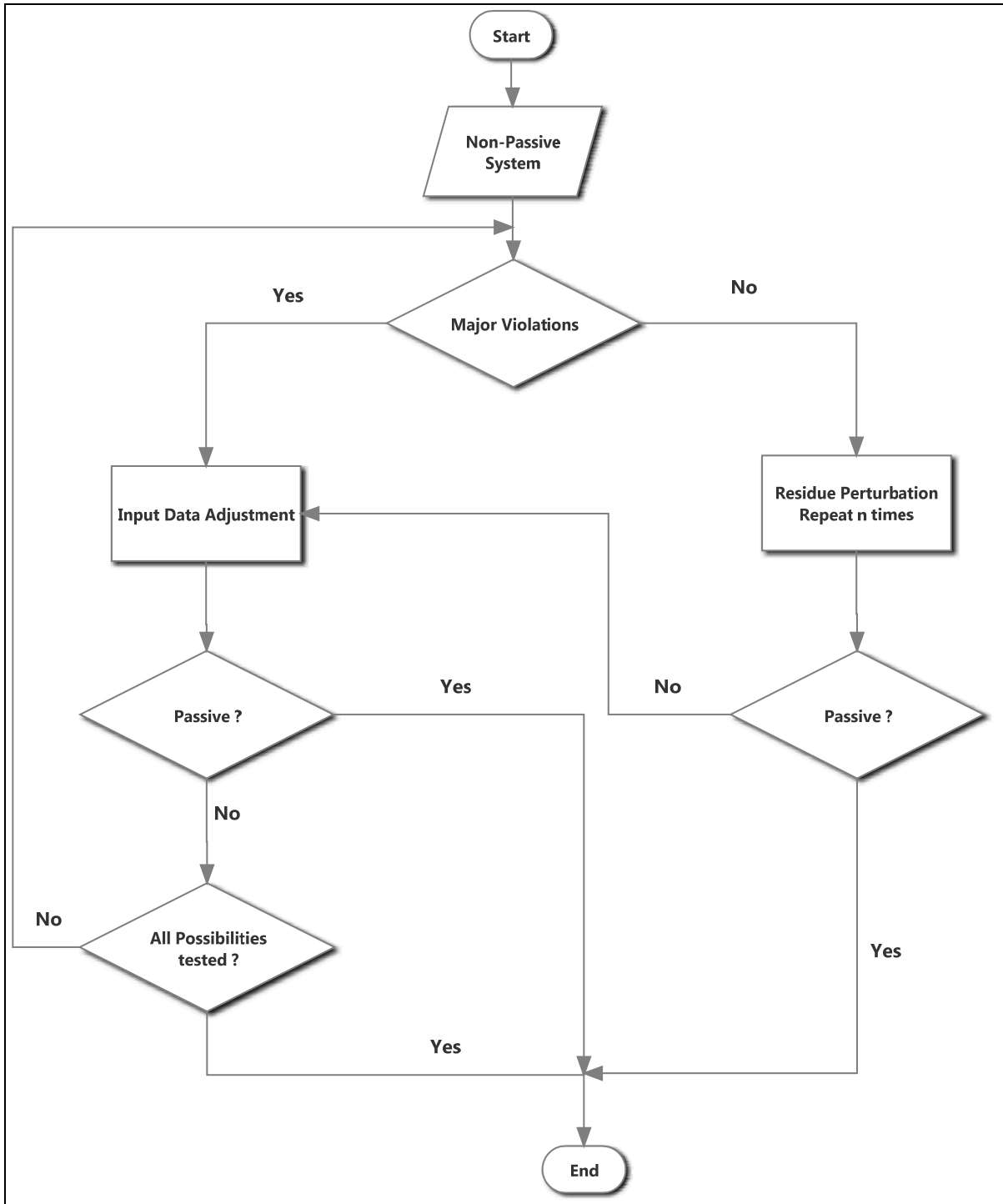


Figure 3-6 : Méthode simplifiée de résolution du problème de passivité

CHAPITRE 4 AMÉLIORATIONS DU LISSAGE

On part de l'hypothèse que la passivité est liée à un problème de lissage. Une manière de résoudre les problèmes de violations de passivité consiste donc à améliorer le modèle obtenu par lissage en jouant sur les paramètres pouvant influencer sur la qualité du lissage : l'ordre, les paramètres d'entrée, le positionnement des pôles et l'erreur. Dans ce chapitre, nous présentons ces différentes méthodes d'amélioration du lissage.

4.1 AUGMENTATION DE L'ORDRE DE LISSAGE

Le premier paramètre auquel on pense est évidemment l'ordre de lissage. En effet, la fonction lissée étant une approximation d'une fonction donnée qui se présente sous la forme d'une série numérique, il est légitime de se poser la question : est-ce que le fait d'augmenter l'ordre a un impact sur la qualité du lissage et par la même occasion sur la passivité ? Nous avons tenté l'expérience sur les fonctions \mathbf{Y}_c et \mathbf{H} .

4.1.1 AUGMENTATION DE L'ORDRE DU LISSAGE DE \mathbf{Y}_c

Il s'agit de forcer l'algorithme à faire une itération de plus en augmentant l'ordre de cette manière

$$\mathbf{N}_y = \mathbf{N}_y + \text{diag}(\mathbf{I}_{N_c}) \quad (4.1)$$

Autrement dit, on ajoute une unité à chaque élément du vecteur \mathbf{N}_y et on appelle une version modifiée du lissage de \mathbf{Y}_c qui n'incrémente pas automatiquement l'ordre en fonction de l'erreur de lissage.

Cette solution a l'avantage d'être rapide car on part d'une solution qui existe déjà. De plus le modèle ainsi obtenu est plus précis comme on peut le voir à partir des exemples suivants.

Le tableau 4.1 nous montre les résultats obtenus en tentant d'améliorer l'ordre du lissage de \mathbf{Y}_c après un premier lissage. Ainsi, au départ, on avait 14 pôles et une erreur relative maximale de 0.0093. Il y avait 98 violations de passivité dont 91 larges violations sur 8200 points testés. On constate que le fait d'augmenter l'ordre de lissage n'a aucun impact sur les violations de

passivité. Par contre, on obtient un lissage plus précis, l'erreur relative maximale décroissant avec l'augmentation de l'ordre.

Tableau 4-1 : Effets de l'augmentation de l'ordre de Y_c (cas 2)

Itération	Norder	Nwpass	K_test	HV	LV	MaxRelErr
0	14	400	8200	91	7	0,0093
1	15	400	8200	91	9	0,0075
2	16	400	8200	91	6	0,0060
3	17	400	8200	91	8	0,0048
4	18	400	8200	91	8	0,0039
5	19	400	8200	91	7	0,0032
6	20	400	8200	91	7	0,0025

Les figures 4.1 et 4.2 illustrent la différence entre des lissages effectués à des ordres différents pour deux éléments de la fonction Y_c dans le cas 2.

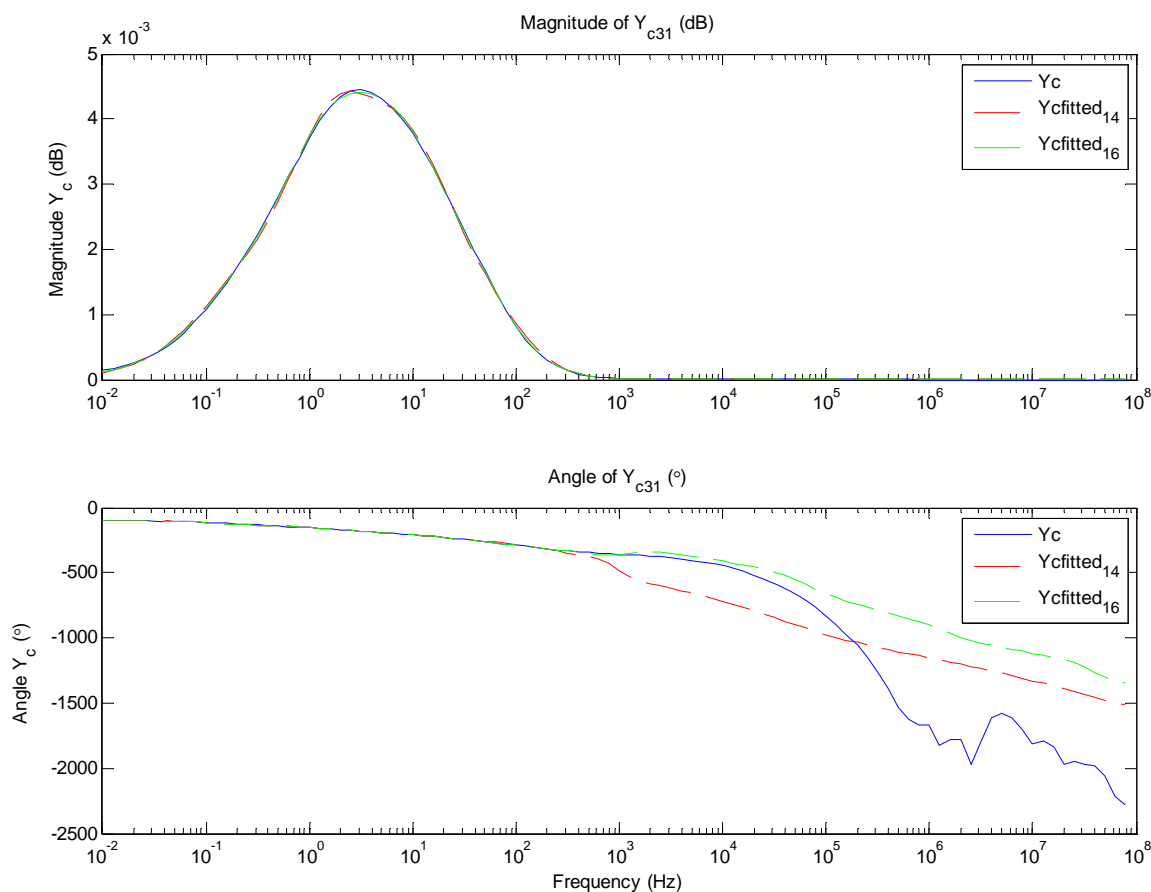


Figure 4-1 : Comparaison de Y_{c31} lissé à l'ordre 14 et à l'ordre 16 (Cas 2)

Nous refaisons l'exercice avec le cas 8. Après le premier lissage, on a 871 faibles violations de passivité pour un ordre de lissage égal à 10. Nous constatons une diminution du nombre de points de violation lorsque l'ordre passe à 11. Par contre, à partir d'un certain point, on observe que le nombre de violations oscille même s'il est toujours inférieur à la valeur d'origine. Pourtant, le lissage est de plus en plus précis dans ce cas aussi comme on peut le voir sur la figure 4.3 ou à partir des valeurs de l'erreur relative maximale (tableau 4.2).

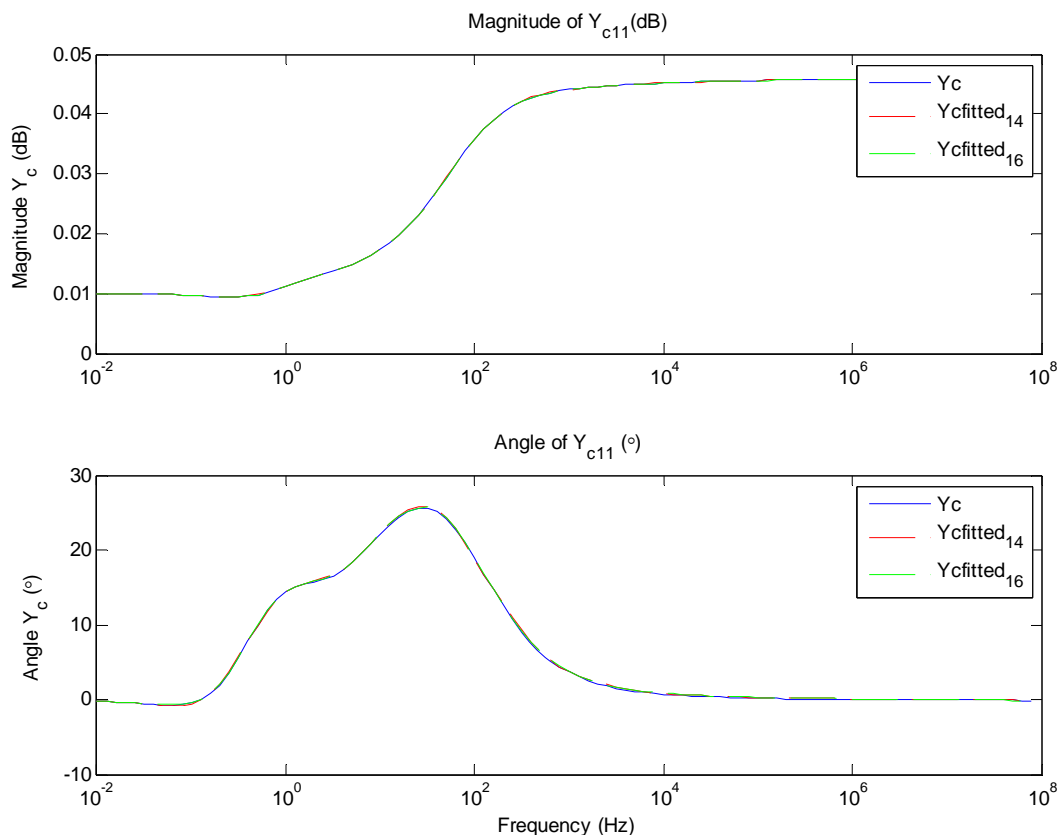


Figure 4-2 : Comparaison de Y_{c11} lissé à l'ordre 14 et à l'ordre 16 (Cas 2)

Tableau 4-2 : Effets de l'augmentation de l'ordre de Y_c (cas 8)

Itération	N_y	N_{wpass}	K_{test}	HV	LV	MaxRelErr
0	10	604	10872	0	871	0,0078
1	11	604	10872	0	817	0,0051
2	12	604	10872	0	868	0,0033
3	13	604	10872	0	831	0,0041
4	14	604	10872	0	829	0,0023
5	15	604	10872	0	836	0,0014
6	16	604	10872	0	817	0,0021

En résumé, l'augmentation de l'ordre de \mathbf{Y}_c a un impact limité sur les faibles violations de passivité mais reste sans effet sur les larges violations de passivité.

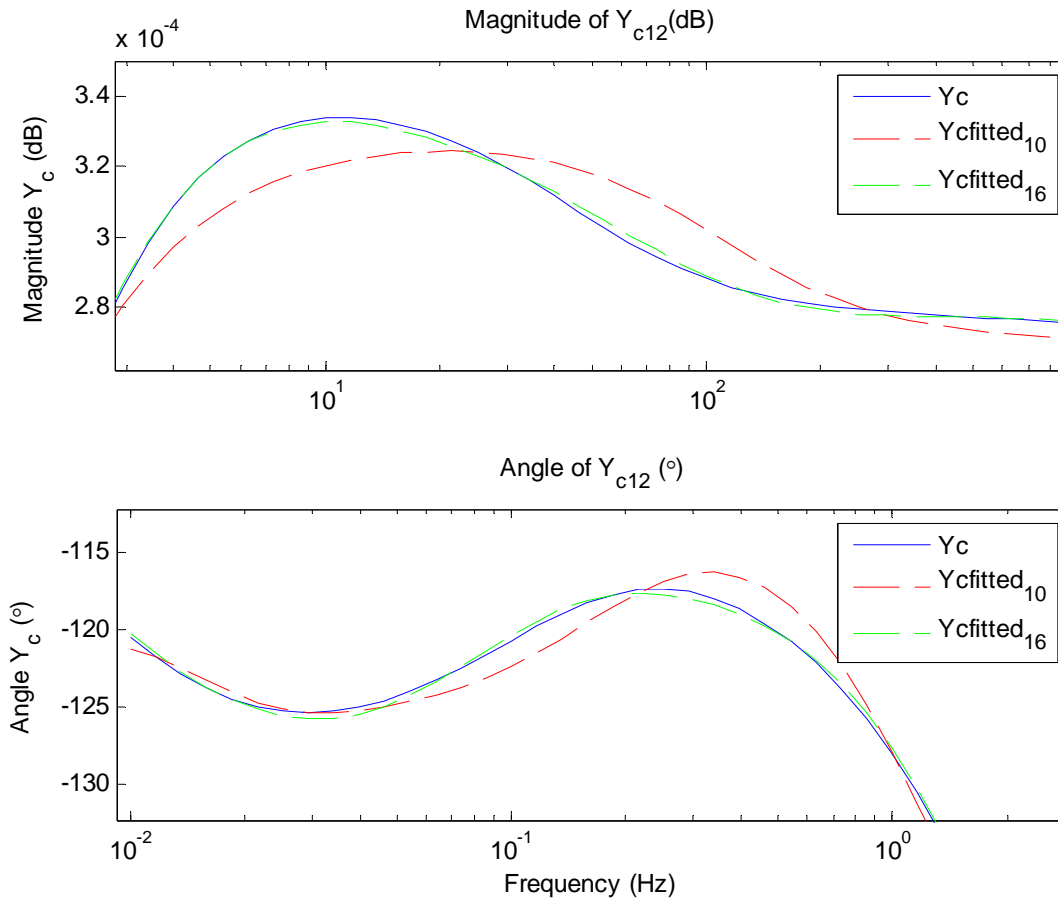


Figure 4-3 : Comparaison de \mathbf{Y}_{c12} lissé à l'ordre 10 et à l'ordre 16 (Cas 8)

4.1.2 AUGMENTATION DE L'ORDRE DU LISSAGE DE \mathbf{H}

L'augmentation de l'ordre de \mathbf{H} est une opération un peu plus délicate. L'idée de base est la même; il s'agit de forcer une nouvelle itération de l'algorithme de lissage avec un nouveau vecteur \mathbf{N}_H . Le moyen le plus simple consiste à augmenter également l'ordre de lissage de chaque mode. Le fichier MATLAB *improveHfit_poles.m* implante cette solution.

$$\mathbf{NH} = \mathbf{NH} + \text{diag}(\mathbf{I}_{N_g}) \quad (4.2)$$

C'est ce que nous avons fait dans plusieurs cas. Les résultats sont compilés dans les tableaux 4-3 à 4-8.

Au tableau 4.3, nous avons les résultats pour le cas 1. Nous constatons qu'il y a 271 faibles violations de passivité et $NH = [5;8;9;5;5;5]$. Lorsque nous ajoutons un pôle à chaque mode, nous obtenons $NH = [6;9;10;6;6;6]$ et le nombre de violations de passivité passe à 173. Après 3 itérations, on obtient 151 faibles violations. Dans ce cas, l'augmentation de l'ordre de H permet de diminuer le nombre de faibles violations.

Tableau 4-3 : Effets de l'augmentation de l'ordre de H (cas 1)

Itération	NH_tot	Nwpass	K_test	HV	LV	MaxRmsErr
0	37	320	3840	0	271	0,0020
1	43	320	3840	0	173	0,0011
2	49	320	3840	0	200	0,000709
3	55	320	3840	0	151	0,000301

Les tests effectués dans les cas 2, 3, 4 et 5 montrent que l'augmentation des pôles peut entraîner une augmentation du nombre de larges violations de passivité. Cette situation s'explique par le nombre insuffisant de points de fréquence qui devraient permettre de créer un système linéaire surdéterminé.

Tableau 4-4 : Effets de l'augmentation de l'ordre de H (cas 2)

Itération	NH_tot	Nwpass	K_test	HV	LV	MaxRmsErr
0	80	400	3200	91	7	0,0029
1	84	400	3200	147	5	0,0012
2	88	400	3200	214	0	0,00098
3	92	400	3200	324	7	0,00032

Tableau 4-5 : Effets de l'augmentation de l'ordre de H (cas 3)

Itération	NH_tot	Nwpass	K_test	HV	LV	MaxRmsErr
0	120	360	4320	865	23	0,0036
1	126	360	4320	903	33	0,0028
2	132	360	4320	1155	31	0,0025
3	138	360	4320	1248	43	0,0016

Tableau 4-6 : Effets de l'augmentation de l'ordre de H (cas 4)

Itération	NH_tot	Nwpass	K_test	HV	LV	MaxRmsErr
0	77	360	4320	24	120	0,00094
1	83	360	4320	147	118	0,00076
2	89	360	4320	274	124	0,00033
3	95	360	4320	763	129	0,00010

Tableau 4-7 : Effets de l'augmentation de l'ordre de H (cas 5)

Itération	NH_tot	Nwpass	K_test	HV	LV	MaxRmsErr
0	105	360	8640	1476	594	0,00034
1	117	360	8640	2391	344	0,000039
2	129	360	8640	2713	724	0,000059
3	141	360	8640	2621	366	0,000040

Il existe cependant un cas particulier, le cas 8. Ce cas est particulier par le fait que les violations de passivité n'augmentent pas avec les pôles. Par contre, on constate au tableau 4-8, que ce nombre ne bouge plus après un certain seuil.

Tableau 4-8 : Effets de l'augmentation de l'ordre de H (cas 8)

Itération	NH_tot	Nwpass	K_test	HV	LV	MaxRmsErr
0	29	604	10872	0	871	0,0023
1	38	604	10872	0	541	0,0020
2	47	604	10872	0	424	0,0014
3	56	604	10872	0	424	0,00093
4	65	604	10872	0	425	0,000498

Retenons de cette section que le fait l'augmenter l'ordre de lissage de Y_c et H a peu d'effets sur la résolution du problème de passivité. Si l'augmentation de l'ordre de Y_c peut s'avérer utile dans des cas de faibles violations, celle de H est plus risquée. Voilà pourquoi cette solution n'est pas retenue dans la méthode proposée.

4.1.3 AUGMENTATION SIMULTANÉE DE L'ORDRE DU LISSAGE DE H ET Y_c

On étudie maintenant l'effet de l'augmentation simultanée de l'ordre de H et de celui de Y_c . On part du principe que le nombre de pôles n'est plus limité à 20 et on choisit de relancer le lissage des fonctions pour différentes valeurs de N_{stop} .

Au tableau 4-9, on peut voir les résultats du test de passivité pour plusieurs valeurs de N_{stop} . On constate une réduction graduelle des violations de passivité. Par contre à partir de $N_{stop} = 25$, il n'y eut plus de variation et il subsista 6 larges violations de passivité. La variation de N_{stop} n'a donc pas permis d'éliminer complètement les violations de passivité.

Tableau 4-9 : Augmentation de Nstop (cas 2)

Nstop	Norder	NH_tot	Nwpass	K_test	HV	LV	MaxRmsErr
20	14	80	400	3200	91	7	0,0029
21	14	68	400	3200	135	5	0,0016
22	14	71	400	3200	86	8	0,0013
23	14	55	400	3200	16	28	0,0025
24	14	61	400	3200	6	2	0,0024
25	14	62	400	3200	6	2	0,0025

Le cas 7 confirme la tendance (tableau 4-10). L'augmentation de Nstop n'a pas d'effet sur les larges violations de passivité.

Tableau 4-10 : Augmentation de Nstop (cas 7)

Nstop	Norder	NH_tot	Nwpass	K_test	HV	LV	MaxRmsErr
20	20	74	320	3840	389	13	0,0033
21	21	75	320	3840	395	7	0,0029
22	22	75	320	3840	395	7	0,0029
23	23	75	320	3840	395	7	0,0029

4.2 MODIFICATION DES PARAMÈTRES D'ENTRÉE

L'utilisateur d'EMTP a la possibilité de choisir les paramètres de la simulation qu'il désire effectuer. Les modules de calcul des données des câbles et des lignes de transmission jouent un rôle crucial dans le processus de lissage. En effet, ils fournissent les valeurs tabulées qui seront utilisées dans les calculs subséquents. L'expérience nous prouve que certains choix des utilisateurs sont susceptibles de causer des problèmes de passivité.

4.2.1 AJUSTEMENT DE f_{\min}

L'utilisateur est libre de choisir la fréquence de départ de sa bande d'étude. Il est maintenant connu que si on n'échantillonne pas à très basses fréquences, on court le risque d'avoir des violations de passivité. Alors l'un des premiers ajustements à faire concerne la valeur de f_{\min} .

Elle est ainsi fixée :

$$f_{\min} = 0,01\text{Hz} \quad (4.3)$$

4.2.2 AJUSTEMENT DU NOMBRE DE POINTS DE FRÉQUENCE

Comme on l'a vu à la section 4.1.2, un bon lissage de la fonction de propagation nécessite un nombre suffisant de points de fréquences, ce qui permettra d'avoir un système linéaire surdéterminé facile à résoudre. Il y a deux manières d'augmenter le nombre de points de fréquence : augmenter le nombre de points par décade (Nppd) ou augmenter le nombre de décades (Ndec).

Nous avons choisi d'augmenter d'abord le nombre de points par décade par incréments de 5 dans le cas des lignes et par incréments de 10 dans le cas des câbles à cause des limitations de l'actuel module de calcul des données des câbles. Par la suite, si c'est nécessaire, nous augmenterons le nombre de décades. Il faut noter qu'en général, une bonne tabulation couvre 8 ou 9 décades.

Par exemple, si un modèle présente de larges violations de passivité avec les paramètres d'entrée suivants : $f_{\min} = 0,1$, Nppd = 10, Ndec = 7, Le tableau 4-11 présente les paramètres qui seront utilisés lors des itérations (avec $f_{\min} = 0,01$).

Tableau 4-11 : Valeurs de Nppd et Ndec avec les itérations

Itération	Nppd	Ndec
1	20	8
2	30	8
3	20	9
4	30	9

La majorité des cas présentant des larges violations de passivité ont été résolus en utilisant cette méthode d'ajustement des paramètres d'entrée. Les résultats sont compilés au chapitre 6.

4.3 REPOSITIONNEMENT DES PÔLES

Habituellement, les pôles de départ sont également distribués sur une échelle logarithmique entre les points extrêmes de fréquence correspondant au balayage effectué à l'aide du module de *calcul des données des câbles*. La méthode de repositionnement des pôles tient compte de la bande de violation de passivité lorsqu'il faut placer les pôles.

La largeur de la bande de violation est calculée à l'aide de l'équation 3.6. Dans cette équation, k_{\max} et k_{\min} sont les points de fréquence limites correspondant aux larges violations de passivité.

Ainsi, lors de la procédure de vérification de la passivité, ces points sont mémorisés car ils serviront au placement des pôles de départ lors du lissage de la fonction de propagation dans le domaine modal, lesquels pôles seront aussi utilisés dans le domaine de phase.

Le repositionnement des pôles consiste à placer la moitié des pôles dans la bande de fréquence définie et à distribuer l'autre moitié comme précédemment (sur l'échelle logarithmique). Si le nombre de pôles est impair, on en place moins dans la bande de violation pour éviter des problèmes de précision en basse fréquence. Cette méthode a l'avantage de cibler la région problématique du lissage en s'assurant qu'au moins un pôle s'y trouve.

Le repositionnement des pôles peut aider un modèle à devenir totalement passif (tableau 4-15). Dans certains cas (tableaux 4-12, 4-13, 4-14) le nombre de larges violations diminue, dans d'autres cas (tableau 4-16) la situation empire pour **H**.

Tableau 4-12 : Résultats du repositionnement des pôles - Cas 2

Iteration	NH_tot	Delta_f	Nwpass	K_test	HV	LV	MaxRmsErr
1	80	2	400	3200	91	7	0,0029
2	66	0	400	3200	4	13	0,0016

Tableau 4-13 : Résultats du repositionnement des pôles - Cas 3

Iteration	NH_tot	Delta_f	Nwpass	K_test	HV	LV	MaxRmsErr
1	120	3	360	3840	865	23	0,0036
2	120	3	360	3840	686	16	0,0037

Tableau 4-14 : Résultats du repositionnement des pôles - Cas 4

Iteration	NH_tot	Delta_f	Nwpass	K_test	HV	LV	MaxRmsErr
1	92	1	400	4800	83	65	0,00098
2	78	-	400	4800	0	79	0,0014
3		0	1000	12000	8	140	

Tableau 4-15 : Résultats du repositionnement des pôles - Cas 9

Iteration	NH_tot	Delta_f	Nwpass	K_test	HV	LV	MaxRmsErr
1	67	0	640	5120	4	0	0,0013
2	51	-	640	5120	0	0	0,0025

Tableau 4-16 : Résultats du repositionnement des pôles - Cas 7

Iteration	NH_tot	Delta_f	Nwpass	K_test	HV	LV	MaxRmsErr
1	120	0	640	5120	4	1	0,0094
2	120	1	640	5120	11	1	0,0098

On peut constater dans les tableaux précédents que le repositionnement produit un lissage un peu moins précis pour les mêmes nombres de pôles.

Le fait de tenter de repositionner les pôles initiaux pour améliorer le lissage est un sujet à l'ordre du jour. Dans [17], on a utilisé une nouvelle méthode de sélection des pôles initiaux qui a amélioré la précision et la vitesse du lissage vectoriel.

4.4 LISSAGE DE L'ERREUR

Après avoir étudié l'impact de l'augmentation de l'ordre et de la variation du positionnement des pôles, le cas de l'erreur de lissage est maintenant considéré. L'idée de cette méthode est simple : il s'agit d'une tentative de correction des erreurs de lissage en ajoutant à la fonction lissée la fonction d'erreur, elle-même lissée à un certain ordre limité à 4 ou 5. Il sera nécessaire de créer la fonction d'erreur et de déterminer la formulation de son lissage et enfin, d'étudier la passivité de la nouvelle entité fonction+erreur.

4.4.1 LISSAGE DE L'ERREUR DE Y_c ET DE H

Soit la matrice Y_c

$$Y_c = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdot & \cdot & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Y_{n1} & \cdot & \cdot & \cdot & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Dans la matrice précédente, n désigne le nombre de conducteurs. Chacune des fonctions Y_{ii} est lissée en utilisant les mêmes pôles. Pour chaque échantillon de fréquence, on peut calculer la fonction d'erreur :

$$\mathbf{Y}_{cij,err} = \mathbf{Y}_{cij} - \mathbf{Y}_{cij,fit} \quad (4.5)$$

La fonction d'erreur de l'admittance caractéristique est lissée comme la fonction originale, pour faciliter les opérations dans le domaine de phase et du temps.

$$\mathbf{Y}_{C,err} = \sum_{k=1}^{N_{err}} \frac{C_k}{s - p_k} + d \quad (4.6)$$

avec $N_{err} = 4$ ou 5 .

Les mêmes fonctions de lissage peuvent donc être utilisées pour lisser l'erreur de \mathbf{Y}_c .

De la même façon,

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \cdot & \cdot & H_{1n} \\ H_{21} & H_{22} & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ H_{n1} & \cdot & \cdot & \cdot & H_{nn} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Chacune des fonctions est lissée ainsi :

$$\mathbf{H}_{ij,fit} = \sum_{k=1}^N \mathbf{H}'_k e^{-s\tau_k} \quad (4.8)$$

Où

$$\mathbf{H}'_k \cong \sum_{i=1}^{N_k} \frac{C_{k,i}}{s - p_{k,i}} \quad (4.9)$$

N_k représente le nombre de modes.

Pour chaque échantillon de fréquence, on connaît la matrice \mathbf{H} et on peut calculer le résultat du lissage. On peut ainsi, calculer la fonction d'erreur, pour chaque échantillon de fréquence:

$$\mathbf{H}_{ij,err} = \mathbf{H}_{ij} - \mathbf{H}_{ij,fit} \quad (4.10)$$

C'est cette fonction d'erreur que l'on se propose de lisser. La question est de savoir comment s'y prendre pour obtenir une fonction qui s'ajoutera harmonieusement à la fonction $\mathbf{H}_{ij,fit}$. En effet, la particularité de la fonction \mathbf{H} est qu'elle est lissée successivement dans le domaine modal puis dans le domaine de phase. Comme il n'est pas question de lisser l'erreur dans le domaine modal, il faut choisir des délais et des pôles comme on l'aurait fait dans le domaine modal. Il devient évident qu'on ne doit pas choisir de nouveaux délais : les délais de \mathbf{H} seront donc utilisés. Il reste à choisir les pôles. Deux scénarios seront envisagés : sélectionner certains pôles de \mathbf{H} ou utiliser des pôles arbitraires.

Avec les pôles et les délais choisis, l'expression de l'erreur dans le domaine de phase devient (dans cet exemple, on montre deux délais):

$$\mathbf{H}_{err,ph} = \sum_{N_{err}} \frac{c_1}{s-a_1} e^{-s\tau_1} + \sum_{N_{err}} \frac{c_2}{s-a_1} e^{-s\tau_2} + \dots \quad (4.11)$$

On cherche à représenter l'équation précédente sous la forme

$$\mathbf{H}_{err,ph} = \frac{N_1(s)}{D(s)} e^{-s\tau_1} + \frac{N_2(s)}{D(s)} e^{-s\tau_2} + \dots \quad (4.12)$$

Partant de pôles connus, on a

$$\mathbf{H}_{err,ph} = \frac{N_1(s)/D_0(s)}{D(s)/D_0(s)} e^{-s\tau_1} + \frac{N_2(s)/D_0(s)}{D(s)/D_0(s)} e^{-s\tau_2} + \dots \quad (4.13)$$

et

$$f = \mathbf{H}_{err,ph} = \frac{\sum_{i=1}^4 \frac{c_{1,i}}{s-a_i^{(0)}}}{\sum_{i=1}^4 \frac{c_{d,i}}{s-a_i^{(0)}} + 1} e^{-s\tau_1} + \frac{\sum_{i=1}^4 \frac{c_{2,i}}{s-a_i^{(0)}}}{\sum_{i=1}^4 \frac{c_{d,i}}{s-a_i^{(0)}} + 1} e^{-s\tau_2} + \dots \quad (4.14)$$

Dans la formulation précédente, les pôles $a_i^{(0)}$ désignent les pôles de départ.

Alors, on a :

$$f \sum_{i=1}^4 \frac{c_{d,i}}{s-a_i^{(0)}} + f = \sum_{i=1}^4 \frac{c_{1,i}}{s-a_i^{(0)}} e^{-s\tau_1} + \sum_{i=1}^4 \frac{c_{2,i}}{s-a_i^{(0)}} e^{-s\tau_2} + \dots \quad (4.15)$$

L'équation 4.16 s'applique pour tous les échantillons de fréquence. On peut l'écrire sous la forme d'une optimisation de moindres carrés :

$$\min \left| f \sum_{i=1}^4 \frac{c_{d,i}}{s - a_i^{(0)}} + f - \sum_{i=1}^4 \frac{c_{1,i}}{s - a_i^{(0)}} e^{-s\tau_1} - \sum_{i=1}^4 \frac{c_{2,i}}{s - a_i^{(0)}} e^{-s\tau_2} \right| \quad (4.16)$$

De manière plus simple, il s'agit de résoudre une équation

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (4.17)$$

$$\mathbf{A}_k = \left[\begin{array}{cccccc} \frac{f_k}{s_k - a_1^{(0)}} & \dots & \frac{f_k}{s_k - a_4^{(0)}} & \frac{-e^{-s\tau_1}}{s_k - a_1^{(0)}} & \dots & \frac{-e^{-s\tau_1}}{s_k - a_4^{(0)}} & \frac{-e^{-s\tau_2}}{s_k - a_1^{(0)}} & \dots & \frac{-e^{-s\tau_2}}{s_k - a_4^{(0)}} \end{array} \right] \quad (4.18)$$

$$\mathbf{x} = \left[c_{d,1} \dots c_{d,4} \quad c_{1,1} \dots c_{1,4} \quad c_{2,1} \dots c_{2,4} \right]^T \quad (4.19)$$

$$b_k = f_k = \mathbf{H}_{\text{err,ph}}(k) \quad (4.20)$$

4.4.2 ÉTUDE DE PASSIVITÉ DE LA FONCTION \mathbf{Y}_N CORRIGÉE

Pour étudier la passivité, il suffit de remplacer l'ancienne fonction \mathbf{Y}_c par la fonction corrigée (par l'ajout de l'erreur) dans l'expression de l'équation 3.3.

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}_{C,\text{corr}} &= \mathbf{Y}_{C,\text{fit}} + \mathbf{Y}_{C,\text{err}} \\ &= \sum_{j=1}^{N_y} \frac{c_j}{s - p_j} + d + \sum_{k=1}^{N_{\text{err}}} \frac{c_k}{s - p_k} + d_1 \end{aligned} \quad (4.21)$$

On procède de la même façon pour obtenir \mathbf{H}_{corr} .

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_{\text{corr}} &= \mathbf{H}_{\text{fit}} + \mathbf{H}_{\text{err}} \\ &= \sum_{k=1}^{NH} \left(\sum_{i=1}^{N_k} \frac{c_{k,i}}{s - p_{k,i}} \right) e^{s\tau_i} + \sum_{k=1}^{N_{\text{err}}} \left(\sum_{i=1}^{N_k} \frac{c_{k,i}}{s - p_{k,i}} \right) e^{s\tau_i} \end{aligned} \quad (4.22)$$

On peut ainsi, pour chaque point de test de passivité (qui peut être différent des échantillons de fréquence), calculer

$$\mathbf{Y}_{n,\text{corr}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{B}_1 & \mathbf{A}_1 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

$$\text{Où} \quad \mathbf{A}_1 = \mathbf{Y}_{c,corr} \cdot (\mathbf{I} + \mathbf{H}_{corr}^2) \cdot (\mathbf{I} - \mathbf{H}_{corr}^2)^{-1} \quad (4.24)$$

$$\mathbf{B}_1 = -2\mathbf{Y}_{c,corr} \cdot \mathbf{H}_{corr} \cdot (\mathbf{I} - \mathbf{H}_{corr}^2)^{-1} \quad (4.25)$$

Le fichier MATLAB *passivitytestPlusError.m* présente cette solution.

4.4.3 CAS D'ÉTUDE

Les tableaux 4-17 et 4-18 présentent deux cas de test du lissage de l'erreur. On verra que cette méthode n'affecte aucunement les résultats du test de passivité.

Au tableau 4-17, on constate que le fait de lisser l'erreur n'a aucun impact sur les larges violations de passivité quelle que soit la manière de choisir les pôles. Avec Errorfit 1, les pôles initiaux sont placés sur toute la bande de fréquence. Errorfit 2 utilise le schéma modifié de positionnement des pôles initiaux. Enfin, dans la fonction Errorfit 3, tous les pôles initiaux sont placés dans la bande de larges violations de passivité. On constate un impact très faible sur les faibles violations. La réduction des violations est d'autant plus importante qu'on augmente l'ordre de lissage de l'erreur.

Tableau 4-17 : Résultats de l'étude de passivité du modèle corrigé - Cas 4

Iteration	NH_tot	NHerr	Nwpass	K_test	HV	LV
Original	92	-	400	4800	89	43
Errorfit 1	78	4	400	4800	89	40
Errorfit 2	78	4	400	4800	89	40
Errorfit 3	78	4	400	4800	89	40
Errorfit 1	78	10	400	4800	89	32

De même, au tableau 4-18, on peut faire le même constat. L'ajout de l'erreur ne modifie pas les résultats des tests de passivité.

Tableau 4-18 : Résultats de l'étude de passivité du modèle corrigé - Cas 9

Iteration	NH_tot	NHerr	Nwpass	K_test	HV	LV
1	67	-	640	5120	2	0
Errorfit 1	67	4	640	5120	2	0
Errorfit 2	67	4	640	5120	2	0

Ces deux cas tendent à confirmer l'observation faite auparavant : les violations de passivité ne sont pas liées à la précision du lissage. On peut très bien améliorer la précision du lissage sans que cela affecte les résultats des tests de passivité. De plus, on a vu que l'utilisation du repositionnement des pôles initiaux peut fournir un modèle moins précis, mais passif.

CHAPITRE 5 PERTURBATION MATRICIELLE

La théorie de perturbation matricielle est bien documentée dans la littérature. Le livre de Stewart [18] est une bonne référence pour aborder le sujet. Dans l'article [19], on se sert de la méthode de perturbation pour l'analyse de la stabilité des micro réseaux. D'autres auteurs [20] utilisent la perturbation matricielle pour concevoir un système de contrôle robuste des systèmes étendus centralisés et décentralisés. Dans [21], on présente une manière d'utiliser la perturbation matricielle pour renforcer la passivité des systèmes de descripteurs.

Dans ce chapitre, nous présentons une nouvelle manière de poser le problème de la perturbation matricielle. En effet, nous introduisons le concept de marge de positivité qui nous servira à déterminer le degré de liberté dont nous disposons au cas où nous souhaiterions perturber une matrice positive tout en restant dans la zone positive.

Dans un premier temps, nous allons déterminer la marge de positivité de la matrice, par la suite, nous démontrerons qu'il est possible de perturber \mathbf{Y}_H en ne perturbant que l'admittance caractéristique \mathbf{Y}_c . Enfin, les détails de la méthode de perturbation seront présentés.

5.1 MARGE DE POSITIVITÉ

Soit une matrice symétrique et semi-définie positive \mathbf{M} , considérons une perturbation Δ . Nous recherchons la marge de positivité μ_p^* de la matrice \mathbf{M} telle que :

$$\|\Delta\|_2 < \mu_p^* \Rightarrow \mathbf{M} + \Delta > 0 \quad (5.1)$$

Définition : la marge de positivité est la limite supérieure des normes des matrices de perturbation qui, ajoutées à une matrice positive \mathbf{M} , ne modifie pas la positivité de l'ensemble perturbé. Dans cette définition, on utilise la norme-2. On a alors :

$$\mu_p^* = \sup \{ \mu : \mathbf{M} + \Delta > 0 \ \forall \Delta : \|\Delta\|_2 < \mu \} \quad (5.2)$$

Comment trouver μ_p^* ?

Partons d'une perturbation critique. C'est une matrice diagonale dont les termes sont l'opposé de la plus petite valeur propre de \mathbf{M} . Alors :

$$\Delta_c = -\lambda_{\min}(\mathbf{M})\mathbf{I} \quad (5.3)$$

Et ainsi

$$\mathbf{M} + \Delta_c = \mathbf{M} - \lambda_{\min}(\mathbf{M})\mathbf{I} \quad (5.4)$$

Rappelons que $\lambda_i(\mathbf{A} + \mathbf{B}) \neq \lambda_i(\mathbf{A}) + \lambda_i(\mathbf{B})$ sauf si $\mathbf{B} = \beta\mathbf{I}$. Dans ce cas, on peut écrire :

$$\lambda_i(\mathbf{A} + \beta\mathbf{I}) = \lambda_i(\mathbf{A}) + \beta \quad (5.5)$$

En appliquant la propriété (5.5) à l'équation (5.4), on obtient :

$$\lambda_i(\mathbf{M} + \Delta_c) = \lambda_i(\mathbf{M}) - \lambda_{\min}(\mathbf{M}), \quad \forall i \quad (5.6)$$

Dans ce cas, au moins une des valeurs propres de $\mathbf{M} + \Delta_c$ est nulle et toutes les autres sont positives.

Alors si $\Delta_c = -\lambda_{\min}(\mathbf{M})\mathbf{I}$ on a :

$$\|\Delta_c\|_2 = |\lambda_{\min}(\mathbf{M})| = \lambda_{\min}(\mathbf{M}) \quad (5.7)$$

En effet, par définition, $\|\Delta\|_2 = \sqrt{\lambda_{\max}(\Delta^T \Delta)}$ et que $\|\Delta\|_2 = \lambda_{\max}(\Delta)$ si $\Delta^T = \Delta$, ce qui est le cas pour Δ_c qui est une matrice diagonale.

Il faut maintenant prouver que $\mu_p^* = \lambda_{\min}(\mathbf{M})$.

Preuve

Si la perturbation Δ est telle que $\lambda_i(\mathbf{M} + \Delta) \geq 0 \forall i$ avec au moins une valeur propre nulle, nous savons que nous avons atteint la perturbation critique Δ_c (ou mieux, une des perturbations critiques). Pour cette perturbation critique, $\exists i : \lambda_i(\mathbf{M} + \Delta_c) = 0 \Rightarrow \lambda_i(\mathbf{M}(\mathbf{I} + \mathbf{M}^{-1}\Delta_c)) = 0$

$$\text{Alors : } \exists i : \lambda_i(\mathbf{I} + \mathbf{M}^{-1}\Delta_c) = 1 + \lambda_i(\mathbf{M}^{-1}\Delta_c) = 0$$

Donc

$$0 = |1 + \lambda_i(\mathbf{M}^{-1}\Delta_c)| \geq 1 - |\lambda_i(\mathbf{M}^{-1}\Delta_c)| \quad (5.8)$$

Car $|a + b| \geq |a| + |b|$.

Mais on sait que $\underline{\sigma}(\mathbf{A}) \leq |\lambda_i(\mathbf{A})| \leq \overline{\sigma}(\mathbf{A})$ (où $\overline{\sigma}(\mathbf{A}) = \|\mathbf{A}\|_2$)

De (5.8) nous pouvons écrire :

$$0 \geq 1 - |\lambda_i(\mathbf{M}^{-1}\Delta_c)| \geq 1 - \overline{\sigma}(\mathbf{M}^{-1}\Delta_c) = 1 - \|\mathbf{M}^{-1}\Delta_c\|_2 \quad (5.9)$$

Comme $\|\mathbf{M}^{-1}\Delta_c\|_2 \leq \|\mathbf{M}^{-1}\|_2 \|\Delta_c\|_2$, toutes les perturbations critiques vérifient la relation

$$\|\Delta_c\|_2 \geq \frac{1}{\|\mathbf{M}^{-1}\|_2} = \lambda_{\min}(\mathbf{M}) \quad (5.10)$$

Notons que

$$\sigma(\mathbf{M}) = \{\lambda_{\min}(\mathbf{M}) \leq \dots \leq \lambda_{\max}(\mathbf{M})\} \quad (5.11)$$

Et alors

$$\sigma(\mathbf{M}^{-1}) = \left\{ \frac{1}{\lambda_{\max}(\mathbf{M})} \leq \dots \leq \frac{1}{\lambda_{\min}(\mathbf{M})} \right\} \quad (5.12)$$

$$\text{Alors } \frac{1}{\|\mathbf{M}^{-1}\|_2} = \frac{1}{\lambda_{\max}(\mathbf{M}^{-1})} = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_{\min}(\mathbf{M})}} = \lambda_{\min}(\mathbf{M}).$$

L'inégalité (5.10) est large. On ne peut écrire $\|\Delta_c\|_2 > \lambda_{\min}(\mathbf{M})$ car si $\Delta_c = -\lambda_{\min}(\mathbf{M})\mathbf{I}$, sa norme-2 est $\lambda_{\min}(\mathbf{M})$.

Le problème se poserait autrement et serait plus complexe si la matrice était non-symétrique.

5.1.1 UTILISATION DE LA MARGE DE POSITIVITÉ

Le test de passivité appliqué sur les données tabulées fournies par le module *line/cable data calculation* montre que ces données correspondent à un modèle passif (dans la majorité des cas). Donc, on peut partir des matrices positives \mathbf{Y}_H calculées en utilisant les données d'origine pour déterminer la perturbation maximale admise, pour chacune des sous-matrices et pour chaque échantillon de fréquence, tout en restant dans la zone positive. Cette information permettra d'avoir une idée de la précision du lissage nécessaire pour obtenir un modèle toujours passif.

Autre possibilité, on peut partir de cette perturbation maximale de \mathbf{Y}_H pour déterminer les perturbations correspondantes de \mathbf{Y}_c et de \mathbf{H} . Mais ce problème est difficile à résoudre.

5.2 CHOIX DE LA MATRICE DE PERTURBATION

On retrouve dans la littérature plusieurs papiers démontrant le lien entre \mathbf{Y}_n et les fonctions \mathbf{Y}_c et \mathbf{H} [22-24]. L'équation 5.13 montre l'une des formulations de cette relation.

$$\mathbf{Y}_n = \begin{bmatrix} (\mathbf{I} - \mathbf{H}^2)^{-1}(\mathbf{I} + \mathbf{H}^2)\mathbf{Y}_c & -2(\mathbf{I} - \mathbf{H}^2)^{-1}\mathbf{H}\mathbf{Y}_c \\ -2(\mathbf{I} - \mathbf{H}^2)^{-1}\mathbf{H}\mathbf{Y}_c & (\mathbf{I} - \mathbf{H}^2)^{-1}(\mathbf{I} + \mathbf{H}^2)\mathbf{Y}_c \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

On veut perturber \mathbf{Y}_n ou \mathbf{Y}_H .

On peut réécrire \mathbf{Y}_n sous la forme :

$$\mathbf{Y}_n = \begin{bmatrix} \mathbf{u} & \mathbf{v} \\ \mathbf{v} & \mathbf{u} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_c & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{Y}_c \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

Avec

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= (\mathbf{I} - \mathbf{H}^2)^{-1}(\mathbf{I} + \mathbf{H}^2) \\ \mathbf{v} &= -2(\mathbf{I} - \mathbf{H}^2)^{-1}\mathbf{H} \end{aligned} \quad (5.15)$$

On se retrouve donc avec des matrices découplées et on part de l'hypothèse qu'il est possible de trouver une perturbation $\Delta\mathbf{Y}_c$ qui correspond à une perturbation connue $\Delta\mathbf{Y}_n$ ou ($\Delta\mathbf{Y}_H$).

Rappelons que la condition qu'on doit vérifier est la suivante :

$$\text{eig}(\mathbf{Y}_H(s)) = \text{eig}\left(\frac{\mathbf{Y}_n + \mathbf{Y}_n^*}{2}\right) > 0 \quad (5.16)$$

Pour trouver les valeurs propres de \mathbf{Y}_H , on utilise les matrices de transformations linéaires qui sont dépendantes de la fréquence

$$\mathbf{T}_L \left(\frac{\mathbf{Y}_n + \mathbf{Y}_n^*}{2} \right) \mathbf{T}_R = \lambda \quad (5.17)$$

En remplaçant \mathbf{Y}_n et \mathbf{Y}_n^* par leurs valeurs (5.14) dans l'équation précédente, on trouve

$$\mathbf{T}_L \begin{bmatrix} \mathbf{u} & \mathbf{v} \\ \mathbf{v} & \mathbf{u} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_c & \\ & \mathbf{Y}_c \end{bmatrix} \mathbf{T}_R + \mathbf{T}_L \left(\begin{bmatrix} \mathbf{u} & \mathbf{v} \\ \mathbf{v} & \mathbf{u} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_c & \\ & \mathbf{Y}_c \end{bmatrix} \right)^* \mathbf{T}_R = 2\lambda \quad (5.18)$$

Si on perturbe les éléments situés sur la diagonale de \mathbf{Y}_c , il y aura un impact direct sur les valeurs propres de \mathbf{Y}_H . On peut donc écrire :

$$\mathbf{T}_L \begin{bmatrix} \mathbf{u} & \mathbf{v} \\ \mathbf{v} & \mathbf{u} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{Y}_c & \\ & \Delta\mathbf{Y}_c \end{bmatrix} \mathbf{T}_R + \mathbf{T}_L \left(\begin{bmatrix} \Delta\mathbf{Y}_c & \\ & \Delta\mathbf{Y}_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u} & \mathbf{v} \\ \mathbf{v} & \mathbf{u} \end{bmatrix} \right)^* \mathbf{T}_R = \Delta\lambda \quad (5.19)$$

Si on pose

$$\mathbf{Y}_{Nb} = \begin{bmatrix} \mathbf{u} & \mathbf{v} \\ \mathbf{v} & \mathbf{u} \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

(5.19) devient

$$\mathbf{T}_L \mathbf{Y}_{Nb} \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{Y}_c & \\ & \Delta\mathbf{Y}_c \end{bmatrix} \mathbf{T}_R + \mathbf{T}_L \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{Y}_c & \\ & \Delta\mathbf{Y}_c \end{bmatrix}^* \mathbf{Y}_{Nb}^* \mathbf{T}_R = \Delta\lambda \quad (5.21)$$

5.3 PERTURBATION DES RÉSIDUS

Rappelons que l'admittance caractéristique \mathbf{Y}_c est lissée de la façon suivante :

$$\mathbf{Y}_c \cong \mathbf{G}_0 + \sum_{i=1}^{N_y} \frac{1}{s - q_i} \mathbf{G}_i \quad (5.22)$$

Dans l'équation (5.22) \mathbf{G}_0 est une matrice constante correspondant à la limite de \mathbf{Y}_c lorsque $s = j\omega \rightarrow \infty$; N_y désigne l'ordre du lissage, q_i est le $i^{\text{ème}}$ pôle et \mathbf{G}_i est la matrice des résidus.

L'expression de $\Delta\mathbf{Y}_c$ devient :

$$\Delta\mathbf{Y}_c = \sum_{i=1}^{N_y} \frac{1}{s - q_i} \Delta\mathbf{G}_i \quad (5.23)$$

En fait, on se contente de perturber la matrice des résidus. Mieux encore, on ne perturbe que les éléments diagonaux. Par exemple :

$$\mathbf{G}_i = \begin{bmatrix} r_{11,i} & r_{12,i} \\ r_{21,i} & r_{22,i} \end{bmatrix} \Rightarrow \Delta \mathbf{G}_i = \begin{bmatrix} \delta r_{11,i} & 0 \\ 0 & \delta r_{22,i} \end{bmatrix}$$

Le choix de ne perturber que les termes diagonaux est dicté par la nécessité de simplifier le problème d'optimisation et parce que leur poids est relativement plus important que celui des termes non-diagonaux.

Illustrons la situation avec un cas simple d'une fonction \mathbf{Y}_c correspondant à un câble de deux conducteurs (ou à deux lignes de transmissions). La fonction est lissée à l'ordre 3. On a :

$$\mathbf{Y}_c = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11,0} + \frac{r_{11,1}}{s-q_1} + \frac{r_{11,2}}{s-q_2} + \frac{r_{11,3}}{s-q_3} & r_{12,0} + \frac{r_{12,1}}{s-q_1} + \frac{r_{12,2}}{s-q_2} + \frac{r_{12,3}}{s-q_3} \\ r_{21,0} + \frac{r_{21,1}}{s-q_1} + \frac{r_{21,2}}{s-q_2} + \frac{r_{21,3}}{s-q_3} & r_{22,0} + \frac{r_{22,1}}{s-q_1} + \frac{r_{22,2}}{s-q_2} + \frac{r_{22,3}}{s-q_3} \end{bmatrix} \quad (5.24)$$

Alors dans ce cas :

$$\Delta \mathbf{Y}_c = \begin{bmatrix} \frac{\delta r_{11,1}}{s-q_1} + \frac{\delta r_{11,2}}{s-q_2} + \frac{\delta r_{11,3}}{s-q_3} & 0 \\ 0 & \frac{\delta r_{22,1}}{s-q_1} + \frac{\delta r_{22,2}}{s-q_2} + \frac{\delta r_{22,3}}{s-q_3} \end{bmatrix} \quad (5.25)$$

Si on pose

$$\mathbf{D}_{Yp} = \begin{bmatrix} \frac{1}{s-q_1} & \frac{1}{s-q_2} & \frac{1}{s-q_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{s-q_1} & \frac{1}{s-q_2} & \frac{1}{s-q_3} \end{bmatrix} \quad (5.26)$$

Créons ensuite la matrice diagonale $\mathbf{diag}(\Delta \mathbf{G})$ représentant la perturbation et correspondant aux résidus situés sur la diagonale de \mathbf{Y}_c . C'est une matrice carrée de dimension 6 x 6.

$$\mathbf{diag}(\Delta\mathbf{G}) = \begin{bmatrix} \delta r_{11,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \delta r_{11,2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \delta r_{11,3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \delta r_{22,1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \delta r_{22,2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \delta r_{22,3} \end{bmatrix} \quad (5.27)$$

Enfin, une matrice \mathbf{C}_d servira à relier les termes correctement. Les termes de \mathbf{C}_d correspondant aux termes non nuls de la transposée de \mathbf{D}_{Yp} sont égaux à 1. Les autres termes sont nuls.

$$\mathbf{C}_d = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.28)$$

Alors en utilisant les notations (5.26), (5.27) et (5.28), (5.25) devient :

$$\Delta\mathbf{Y}_c = \mathbf{D}_{Yp} \mathbf{diag}(\Delta\mathbf{G}) \mathbf{C}_d \quad (5.29)$$

L'équation (5.21) devient :

$$\mathbf{T}_L \mathbf{Y}_{Nb} \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{Yp} \mathbf{diag}(\Delta\mathbf{G}) \mathbf{C}_d & 0 \\ 0 & \mathbf{D}_{Yp} \mathbf{diag}(\Delta\mathbf{G}) \mathbf{C}_d \end{bmatrix} \mathbf{T}_R + \mathbf{T}_L \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{Yp} \mathbf{diag}(\Delta\mathbf{G}) \mathbf{C}_d & 0 \\ 0 & \mathbf{D}_{Yp} \mathbf{diag}(\Delta\mathbf{G}) \mathbf{C}_d \end{bmatrix}^* \mathbf{Y}_{Nb}^* \mathbf{T}_R = \Delta\lambda \quad (5.30)$$

Sachant que la matrice $\Delta\mathbf{Y}_c$ est diagonale, elle est égale à sa transposée, alors, on peut écrire

$$\begin{bmatrix} \Delta\mathbf{Y}_c & 0 \\ 0 & \Delta\mathbf{Y}_c \end{bmatrix}^* = \begin{bmatrix} \overline{\Delta\mathbf{Y}_c} & 0 \\ 0 & \overline{\Delta\mathbf{Y}_c} \end{bmatrix} \quad (5.31)$$

Or

$$\overline{\mathbf{D}_{Yp} \mathbf{diag}(\Delta\mathbf{G}) \mathbf{C}_d} = \overline{\mathbf{D}_{Yp}} \cdot \overline{\mathbf{diag}(\Delta\mathbf{G})} \cdot \mathbf{C}_d \quad (5.32)$$

Dans le cas général \mathbf{D}_{Yp} est une matrice ($N_c, N_c \times N_y$), \mathbf{C}_d est une matrice ($N_c \times N_y, N_c$), $\mathbf{diag}(\Delta\mathbf{G})$ est une matrice ($N_c \times N_y, N_c \times N_y$).

5.4 OPTIMISATION MOINDRES CARRÉS

L'équation (5.30) est alors convertie en un système linéaire grâce aux propriétés des matrices. Lorsqu'on utilise plusieurs points de fréquence, le système deviendra un système contraint surdéterminé.

On obtient alors :

$$\mathbf{A} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{x} \end{bmatrix} = \mathbf{b} \quad (5.33)$$

Si on définit la matrice \mathbf{A} par des vecteurs colonnes; autrement dit

$$\mathbf{a}_j := \text{col}_j \mathbf{A} \quad (j=1,2,\dots,2 \times N) \quad (5.34)$$

En faisant de même pour les matrices de transformation :

$$\begin{aligned} \mathbf{t}_{\mathbf{L}j} &:= \text{col}_j \mathbf{T}_{\mathbf{L}} \quad (j=1,2,\dots,2 \times N) \\ \mathbf{t}_{\mathbf{R}j} &:= \text{col}_j \mathbf{T}_{\mathbf{R}} \quad (j=1,2,\dots,2 \times N) \end{aligned} \quad (5.35)$$

Dans ce cas, une ligne i de la matrice \mathbf{A} sera ainsi calculée :

$$\mathbf{a}_i = \left(\mathbf{t}_{\mathbf{L}i}^T \mathbf{Y}_{\mathbf{Nb}} \mathbf{D}_{\mathbf{Yp}} \right) \circ \left(\mathbf{C}_d \mathbf{t}_{\mathbf{R}i} \right)^T + \left(\mathbf{t}_{\mathbf{L}i}^T \overline{\mathbf{D}_{\mathbf{Yp}}} \right) \circ \left(\mathbf{C}_d \mathbf{Y}_{\mathbf{Nb}}^* \mathbf{t}_{\mathbf{R}i} \right)^T \quad (5.36)$$

Le module d'optimisation de MATLAB est utilisé pour résoudre le problème

$$\min \left| \mathbf{Y}_{\mathbf{c},fitted} + \Delta \mathbf{Y}_{\mathbf{c}} - \mathbf{Y}_{\mathbf{c},analytical} \right|_{\text{diag}(\Delta \mathbf{G})} : \mathbf{A} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{x} \end{bmatrix} = \Delta \lambda_{\mathbf{v}} < \mathbf{b} \quad (5.37)$$

5.5 EXEMPLES

Les exemples qui suivent montrent comment évolue la méthode de perturbation matricielle au cours des itérations. La figure 5-1 illustre le cas d'une correction d'un modèle qui présentait 19 faibles violations de passivité après le lissage. Après une itération du module de perturbation des résidus, il reste 10 faibles violations; et après la deuxième itération, on a pu obtenir un modèle passif. On peut remarquer sur la figure que les valeurs propres positives ne sont pas modifiées par le module de perturbation.

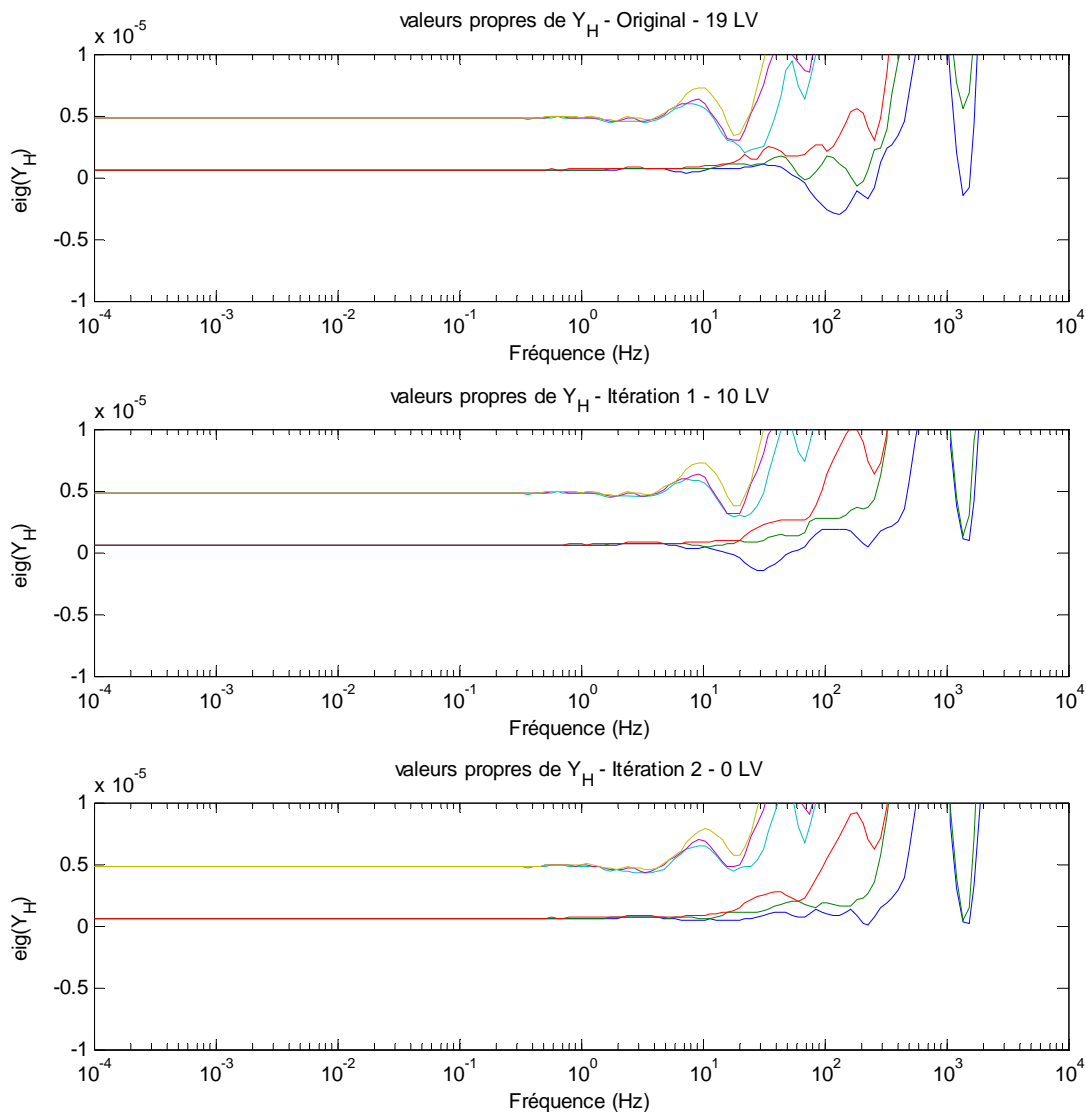


Figure 5-1 : Effet de la perturbation sur les valeurs propres (Cas 4)

La figure 5-3 présente une autre illustration de l'évolution de la correction de passivité. Mais cette fois, au milieu du processus de correction, on a retrouvé des cas de larges violations de passivité. En effet, après le lissage, il y avait 154 faibles violations de passivité. Suite à la première itération de perturbation, on a dénombré 147 violations dont 18 larges. La deuxième itération a permis de réduire le nombre de violations à 58 dont 5 larges. Après la troisième itération, il ne restait que 44 faibles violations. Deux autres itérations furent nécessaires pour éliminer complètement les violations de passivité. Le tableau 5-1 et la figure 5-2 résument la situation.

Tableau 5-1 : Variation du nombre de violations de passivité au fil des itérations de perturbation (cas 8)

Itérations	0	1	2	3	4	5
HV	0	18	5	0	0	0
LV	154	129	53	44	1	0

Ces deux exemples nous montrent que la méthode de perturbation peut converger même pour un nombre élevé de violations de passivité. Par contre, l'inverse est aussi vrai : il existe des cas où l'algorithme n'a pu converger malgré un nombre limité de faibles violations.

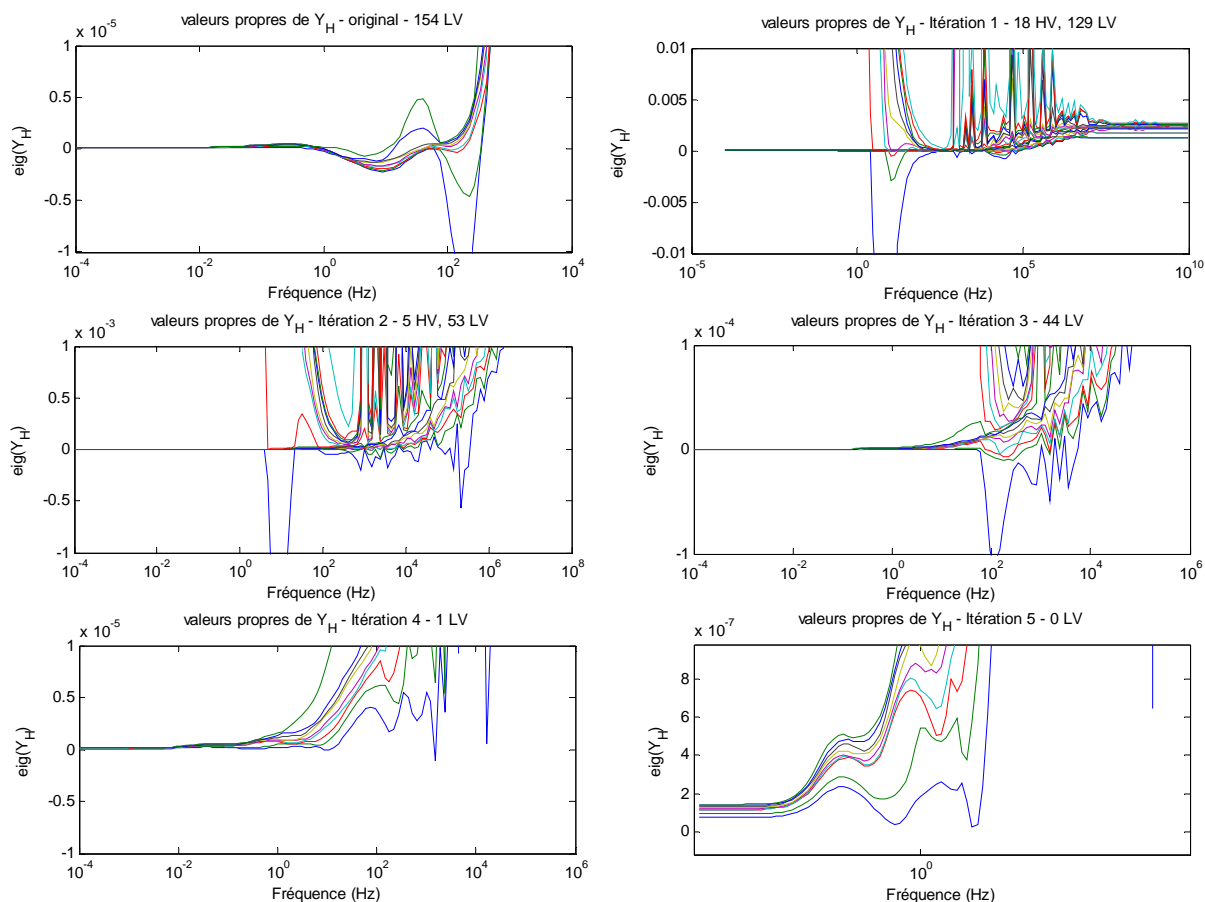


Figure 5-2 : Effet de la perturbation sur les valeurs propres - Cas 8

Dans le chapitre suivant, on verra que le module de perturbation ne converge pas toujours. C'est une réalité propre aux problèmes d'optimisation dont l'objectif n'est pas toujours réalisable. Il existe d'autres méthodes de résolution du problème de passivité via la perturbation [14, 25]; certaines d'entre elles ne s'appliquent pas au modèle WB.

CHAPITRE 6 TESTS ET RÉSULTATS

Pour tester le nouvel algorithme de lissage, nous avons recueilli les cas de violation de passivité documentés par les membres de l'équipe. Nous avons retenu les cas qui présentaient un certain intérêt avec au moins des faibles violations de passivité.

Nous avons volontairement omis certains cas problématiques :

- 1) Câbles de courtes longueurs : l'algorithme de lissage actuel est incapable de traiter ces cas.
- 2) Câbles ayant des configurations complexes : des cas de plus de 12 câbles ne sont pas traités.

Dans tous les autres cas, nous présentons les caractéristiques du câble ou de la ligne, leur disposition et les paramètres utilisés pour la simulation. Il faut noter que nous n'avons pas modifié les informations entrées par les utilisateurs même quand dans certains cas elles semblaient incorrectes.

Enfin nous présentons les résultats des simulations pour chacun des cas dans un tableau résumé.

6.1 CAS 1 : MSA_CABLE

Ce cas est une adaptation d'un exemple tiré du livre de Das [26]. Les données des fabricants sont utilisés pour modéliser le câble de 400 kV de type XPLE. La figure 6-1 montre la configuration du câble, la figure 6-2 présente les détails de la construction du câble. Les autres paramètres utilisés dans la simulation sous EMTP sont contenus dans le tableau 6-1.

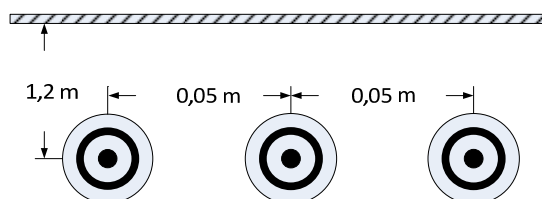


Figure 6-1 : Configuration du câble - cas 1

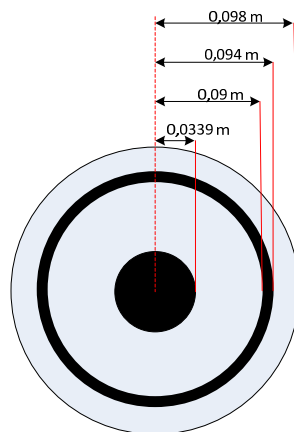


Figure 6-2 : Données du câble - cas 1

Tableau 6-1 : Paramètres du câble - Cas 1

Paramètre	Valeur
Résistivité conducteur 1 (Ωm)	16,7e-7
Résistivité conducteur 2 (Ωm)	16,7e-7
Résistivité de la terre (Ωm)	100
Permittivité relative μ_e	1
Permittivité relative Isolant 1	2,5
Permittivité relative Isolant 2	2,5
Perméabilité relative de la terre	1
Facteur de pertes de l'isolant 1	0,001
Facteur de pertes de l'isolant 2	0,001
Longueur du câble (m)	2000

L'utilisateur choisit les paramètres suivants pour créer le modèle WB du câble : 8 décades, 10 points par décade et une fréquence minimale de 0,01 Hz. Le tableau 6-2 montre ces valeurs et celles qui sont utilisées au fil des itérations.

Tableau 6-2 : Paramètres du modèle choisis par l'utilisateur et modifications - Cas 1

	Nppd	fmin	Ndec
Original	10	0,01	8
Modification 1	20	0,01	8
Modification 2	10	0,01	9

On veut étudier le comportement du câble sous l'effet d'une impulsion électrique de 400 kV traversant le noyau d'un des câbles. La figure 6-3 montre le circuit modélisé sous EMTP-RV. On

peut voir sur la figure 6-4 l'impulsion de 400 kV et la tension mesurée à l'extrémité du câble (2 km plus loin). Le résultat correspond à ce à quoi on s'attendait pour cette simulation.

Après le premier test de passivité sur le modèle, on obtient 47 faibles violations de passivité. Déjà, on peut conclure qu'une simulation temporelle peut parfois être réalisée avec succès même si le modèle est quasi-passif.

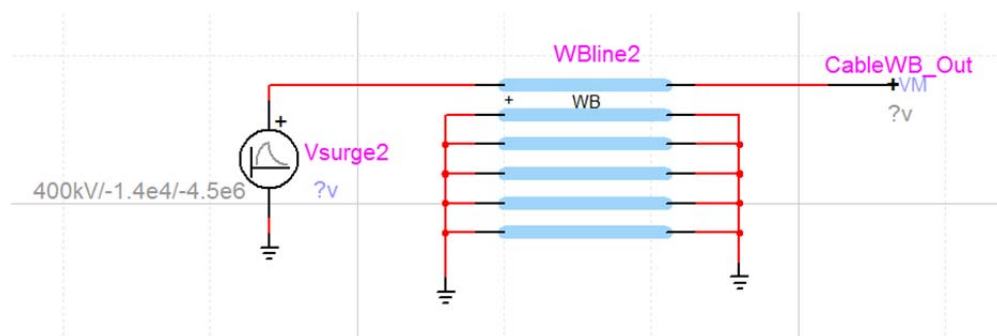


Figure 6-3 : Circuit à l'étude (modélisé sous EMTP-RV)

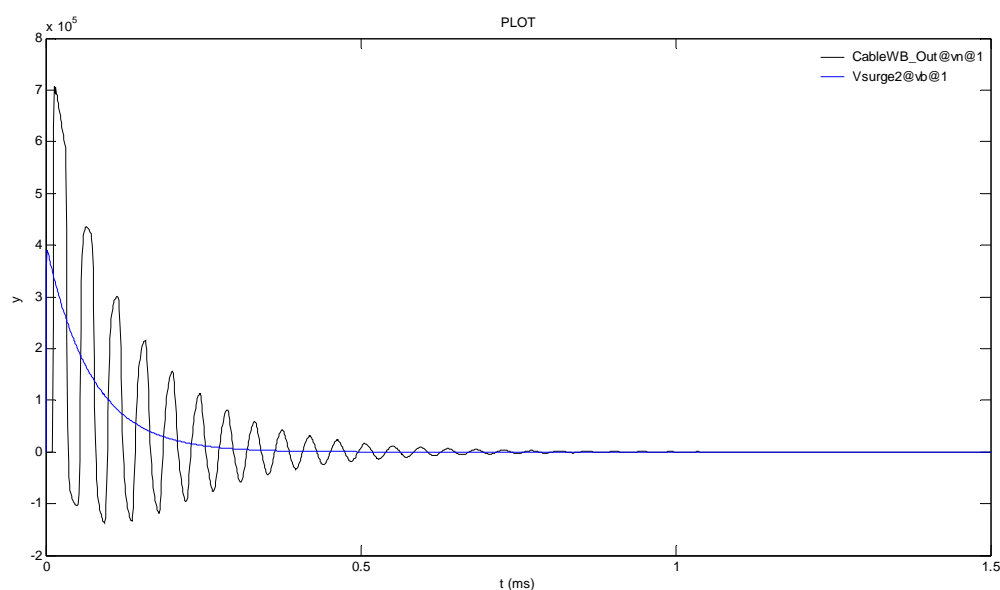


Figure 6-4 : Tension à l'extrémité du câble et impulsion d'excitation

La première simulation avec 3840 points de test ne révèle aucune large violation de passivité. Par contre, on en obtient 179 faibles. Comme il n'y a que des faibles violations, le module de renforcement de la passivité par perturbation matricielle se lance automatiquement. Après 5 itérations de perturbation dont les détails sont présentés au tableau 6-3, on obtient un modèle passif. Cependant, le test extrême montrera qu'il subsiste encore 5 faibles violations de passivité.

Tableau 6-3 : Itérations de perturbation - cas 1

Itérations	0	1	2	3	4	5
HV	0	0	0	0	0	0
LV	47	16	8	3	1	0

Le tableau 6-4 résume les interventions nécessaires pour obtenir un modèle passif. Il faut souligner que si on tente d'obtenir un modèle passif en modifiant les paramètres, le résultat ne s'améliorera pas. En effet, en incrémentant le nombre de points par décade, on obtient 171 larges violations de passivité hors de la bande. De même, si on n'augmente le nombre de décades, on obtient encore des larges violations de passivité. La solution quasi-passive (par test extrême) obtenue par la méthode de perturbation semble être la meilleure qu'on pouvait obtenir dans les circonstances.

Enfin, nous nous questionnons sur la validité du modèle obtenu après perturbation. Pour trouver des réponses, nous refaisons la simulation temporelle avec les données perturbées correspondant au modèle passif. Les figures 6-5 et 6-6 présentent les courbes obtenues à l'aide du modèle original et le modèle perturbé. On peut voir que la différence entre les deux courbes est à peine perceptible.

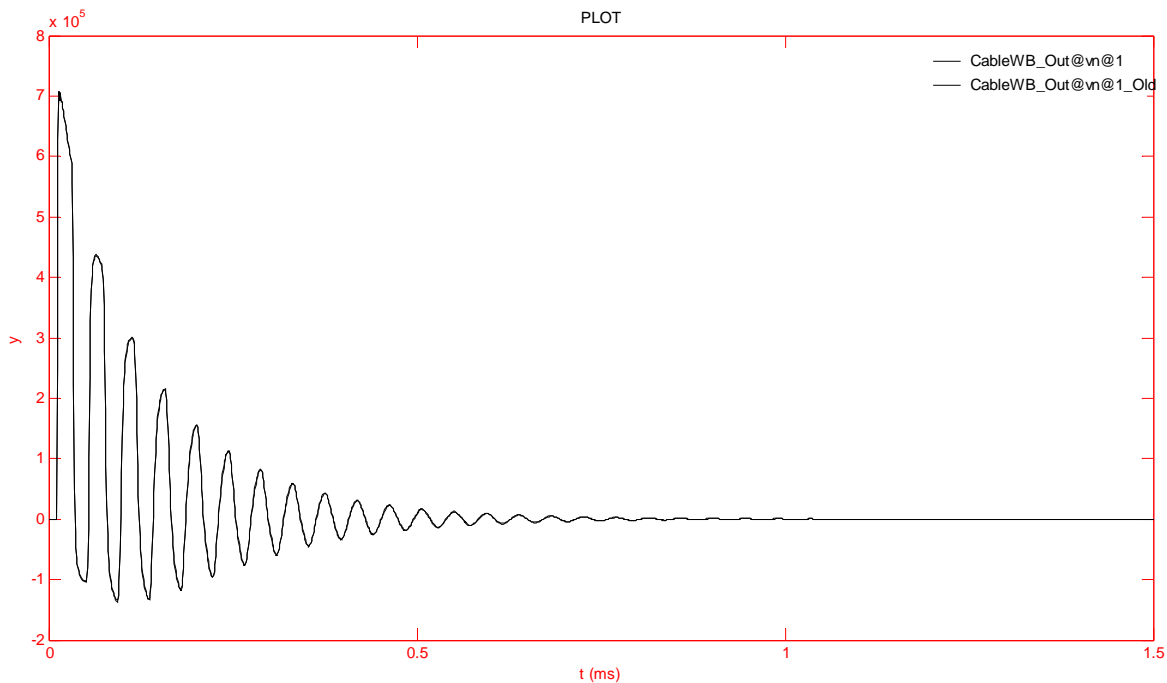


Figure 6-5 : Simulation temporelle avec le modèle perturbé, et le modèle original - Cas 1

Tableau 6-4 : Résultats des tests de passivité (cas -1)

Simulation	NH_tot	Ny	Nwpass	K_test	HV	LV
Original	37	6*11	320	3840	0	179
Perturbation	37	6*11	80	960	0	0
Extrême	37	6*11	800	9600	0	5
Mod. 1	32	6*11	640	7680	171	419
Mod. 2	55	6*12	360	4320	297	84

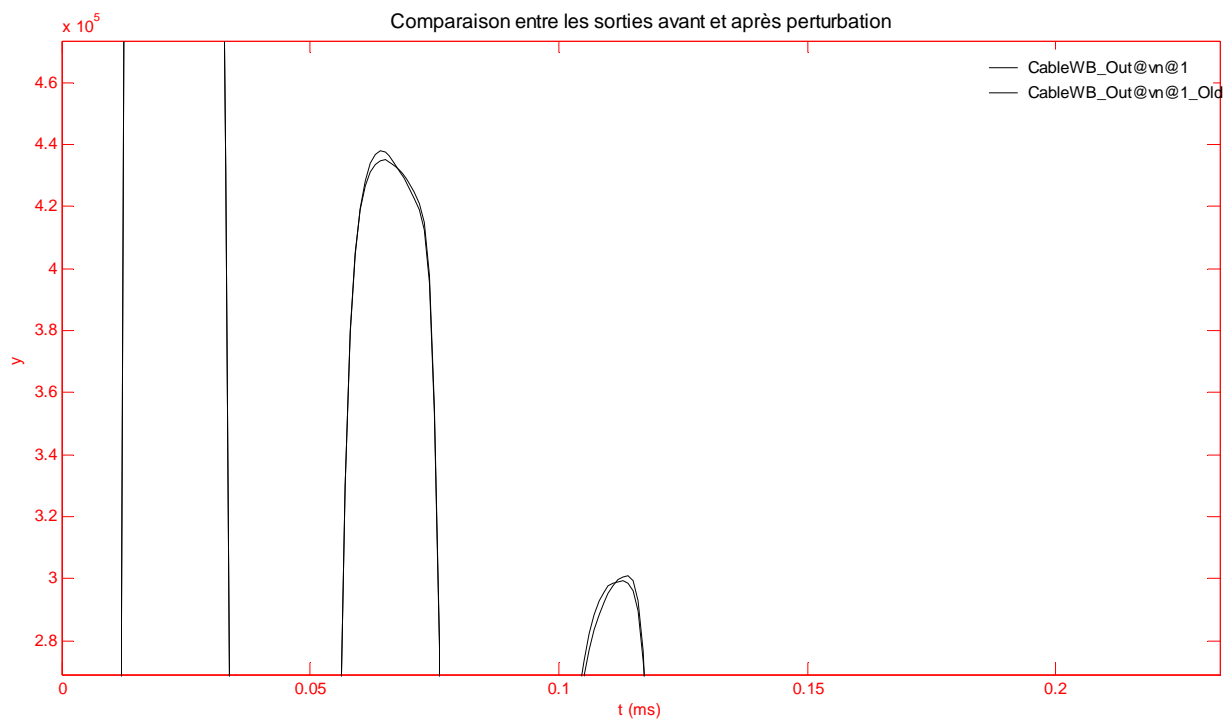


Figure 6-6 : Comparaison entre les deux modèles - Cas 1

Tableau 6-5 : Liste des fichiers - cas 1

Chemin	C:\EMTP\
Fichier EMTP	MSA2.ecf
Modèle original	cablemsa_WB_rv.cyz / wffit_casel_mod0_rv.dat
Perturbation 1	wffit_casel_mod1_rv.dat
Modèle modifié 1	cablemsa_WB20ppd_rv.cyz /
Modèle modifié 2	cableMSA_WB9dec10ppd_rv.cyz

6.2 CAS 2: HANNI_15KM

On se retrouve avec une configuration à deux câbles dont la description est présentée à la figure 6-7. Le tableau 6-6 contient les valeurs des autres paramètres électriques utilisés sous EMTP.

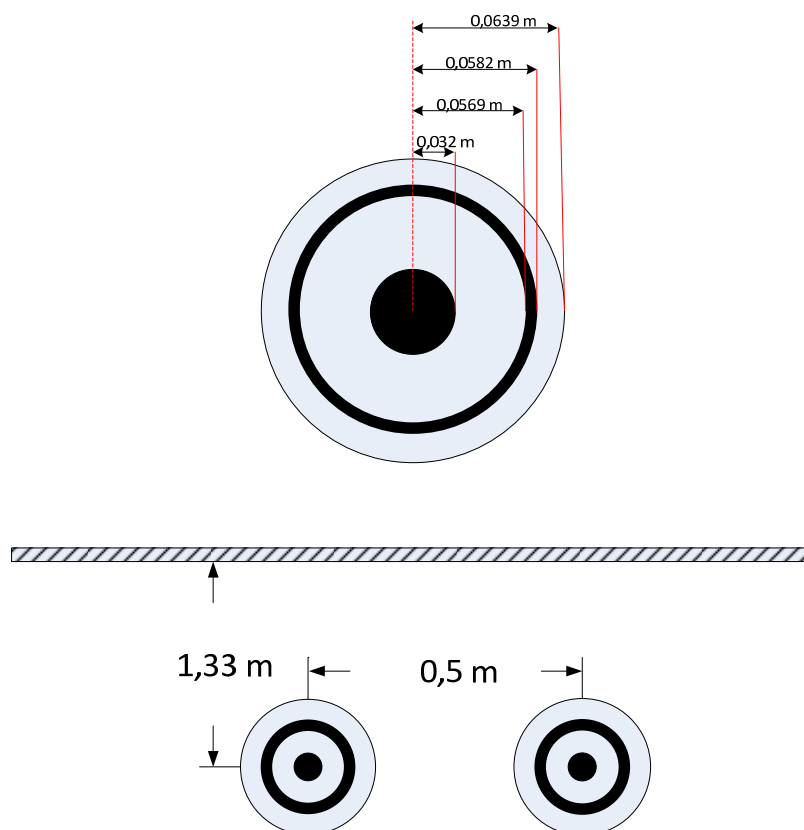


Figure 6-7 : Configuration et données du câble - Cas 2

Tableau 6-6 : Paramètres du câble - Cas 2

Paramètre	Valeur
Résistivité conducteur 1 (Ωm)	1,72e-8
Résistivité conducteur 2 (Ωm)	2,83e-8
Résistivité de la terre (Ωm)	100
Perméabilité relative μ_e	1
Permittivité relative Isolant 1	2,5
Permittivité relative Isolant 2	2,5
Perméabilité relative de la terre	1
Perméabilité relative des isolants	1
Facteur de pertes de l'isolant 1	0,004
Facteur de pertes de l'isolant 2	0,3
Longueur du câble (m)	15000

L'utilisateur choisit au départ au modèle avec 10 décades et 10 points par décade pour une fréquence minimum de 0,01 Hz (tableau 6-7).

Tableau 6-7 : choix de l'utilisateur - cas 1

	Nppd	fmin	Ndec
original	10	0,01	10

On constate après lissage et test de passivité qu'il y a 77 larges violations de passivité et 5 faibles violations. De plus,

$$\omega_{\min} = 6,62 \times 10^5 ; \omega_{\max} = 3,87 \times 10^6$$

Ce qui correspond à une largeur de bande égale à 0. Une tentative d'application de la méthode de repositionnement est infructueuse (2 larges violations et 2 faibles violations) nous allons donc modifier les paramètres d'entrée. Nous augmentons le nombre de points par décade.

	Nppd	fmin	Ndec
Modification 1	20	0,01	10

La nouvelle simulation nous donne 30 faibles violations et aucune large violation. Le modèle est donc quasi-passif. Le test extrême confirme qu'il n'y a plus de large violation. Le nombre de violations étant faible, nous pouvons appliquer la méthode de perturbation des résidus. Ce qui fut fait avec succès. On obtient ainsi un modèle passif confirmé par le test extrême (tableau 6-8).

Tableau 6-8 : Résultats des tests de passivité - Cas 2

Simulation	NH_tot	Ny	Nwpass	K_test	HV	LV
original	80	4*14	400	3200	77	5
Mod 1	80	4*15	800	6400	0	22
Extrême	80	4*15	2000	16000	0	54
Perturbation	80	4*15	200	800	0	0
Extrême	80	4*15	2000	16000	0	0

Liste des fichiers | :

Chemin	C:\EMTP\
Fichier EMTP	Passivity.ecf
Modèle original	Hanni15km_10ppd_rv.cyz / wbfite_case2_mod0_rv.dat
Modèle modifié	Hanni15km_20ppd_rv.cyz / wbfite_case2_passive_rv.dat

6.2.1 VÉRIFICATION DANS LE DOMAINE TEMPOREL

On applique une source de 169 kV à l'une des extrémités d'un câble, et on mesure la tension à l'autre extrémité. (*Notons que ce test ne correspond pas à un circuit réel!*). La figure 6.9 présente le résultat de cette simulation. On constate qu'elle est incorrecte. On reprend la même simulation, cette fois avec le modèle obtenu après modification des paramètres (quasi-passif).

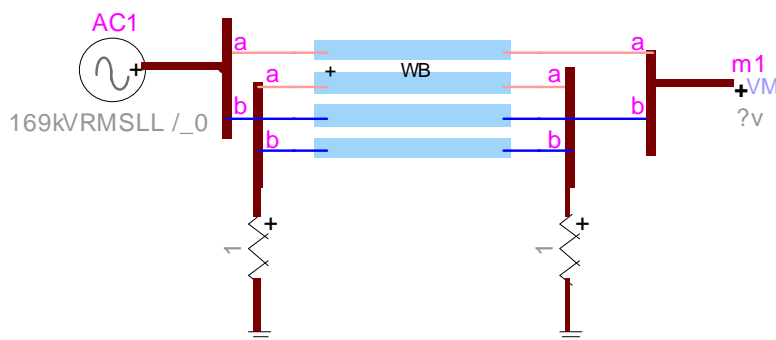


Figure 6-8 : Circuit EMTP de test du cas 2

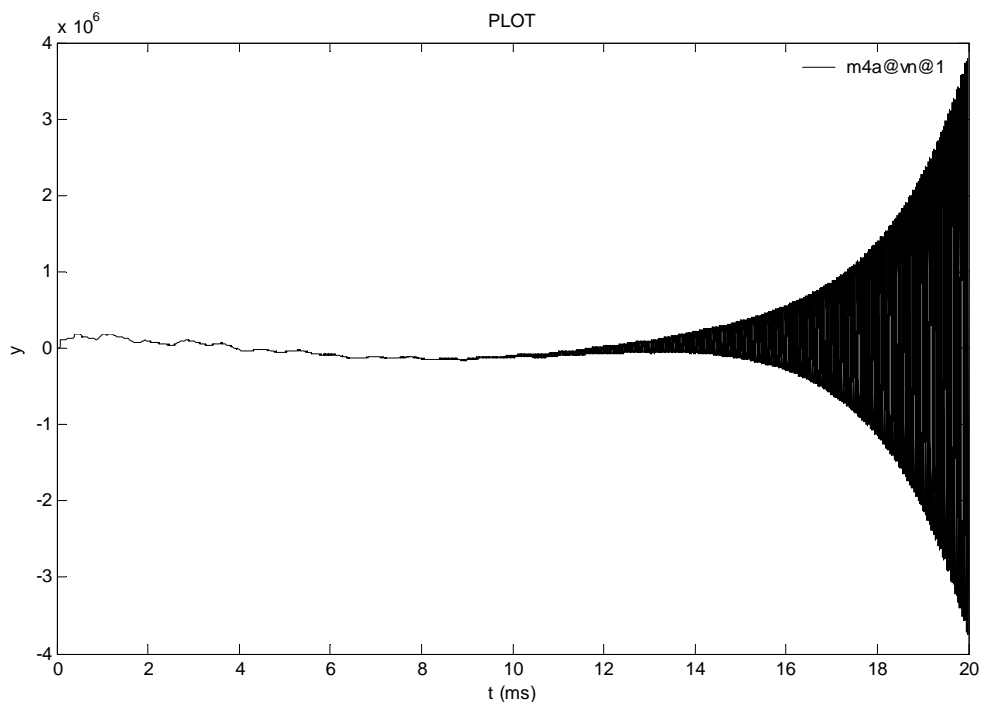


Figure 6-9 : Tension à l'extrémité d'un des câbles avant modification des paramètres

La figure 6-10 nous montre les résultats de cette simulation. On constate alors qu'elle est correcte. L'application de la procédure de perturbation fournit un modèle passif. La nouvelle

simulation effectuée avec le modèle perturbée donne des résultats identiques au modèle non perturbé comme on peut le voir sur la figure 6-11.

Ce cas confirme ce qu'on avait remarqué précédemment : les faibles violations de passivité n'ont pas nécessairement un impact sur la simulation temporelle. L'application de la méthode de perturbation ne modifie pas les résultats de cette simulation.

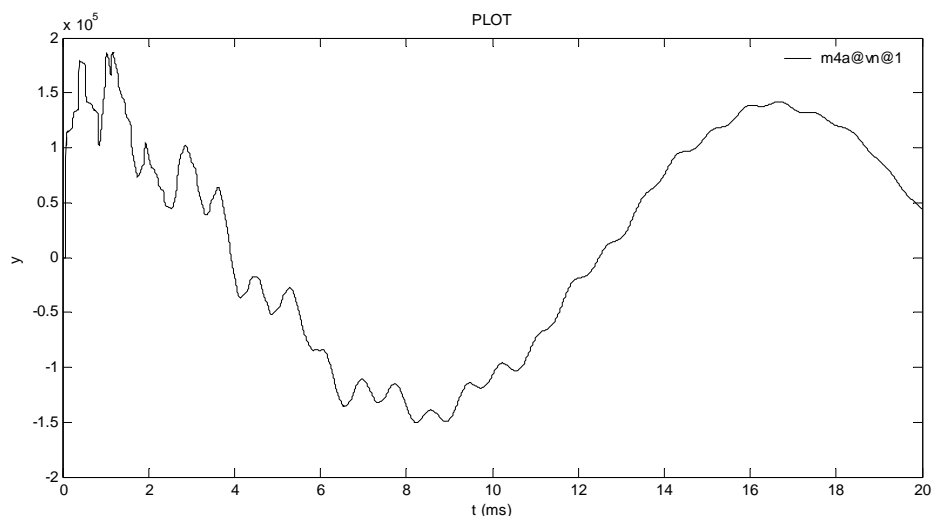


Figure 6-10 : Tension à l'extrémité d'un des câbles après augmentation de Nppd

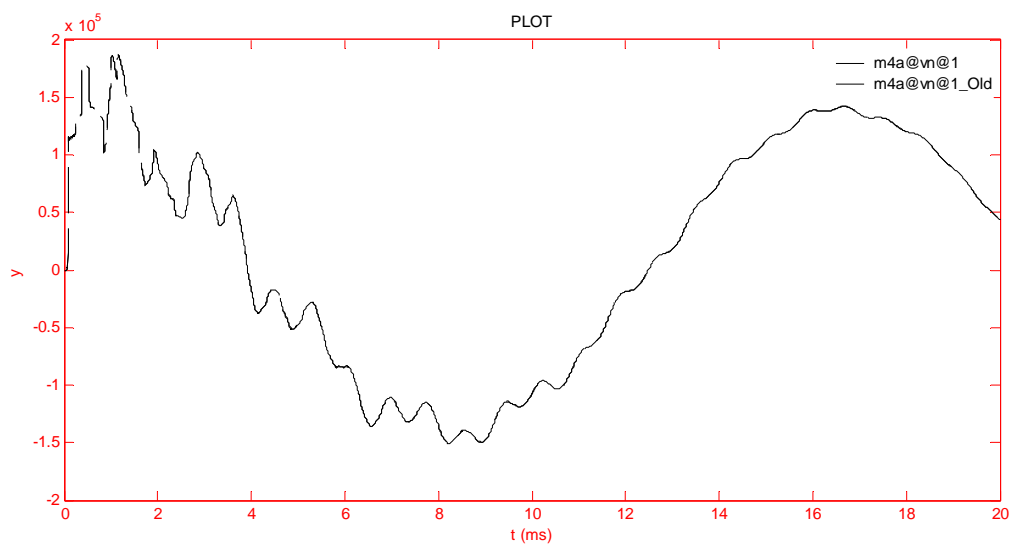


Figure 6-11 : Tension à l'extrémité du câble avant et après perturbation

6.3 CAS 3 : EDF_ACCABLE_OC

C'est un système de 3 câbles modélisé à l'aide des paramètres qu'on retrouve dans le tableau 6-11.

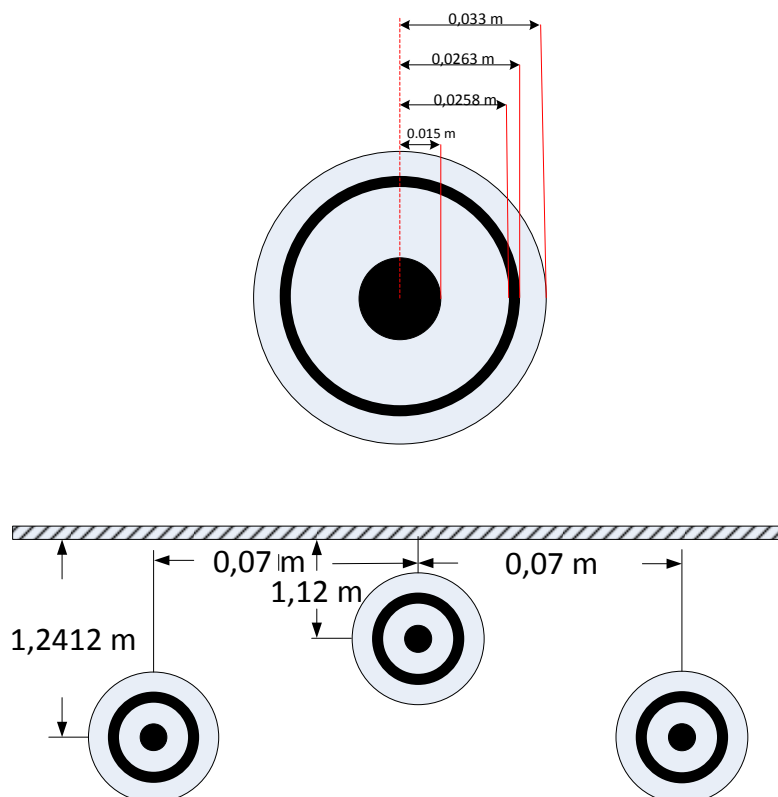


Figure 6-12 : Configuration et données du câble - Cas 3

Tableau 6-9 : Paramètres du câble - Cas 3

Paramètre	Valeur
Résistivité conducteur 1 (Ωm)	4,25e-8
Résistivité conducteur 2 (Ωm)	2,84e-8
Résistivité de la terre (Ωm)	250
Permittivité relative	1
Permittivité relative Isolant 1	2,5
Permittivité relative Isolant 2	2,5
Perméabilité relative de la terre	1
Facteur de pertes de l'isolant 1	0,0008
Facteur de pertes de l'isolant 2	0,3
Longueur du câble (m)	6667

Tableau 6-10 : Paramètres de départ et modifiés - cas 3

	Nppd	fmin	Ndec
Original	10	0,01	9
Modification 1	20	0,01	9
Modification 2	30	0,01	9

Après la simulation d'origine, on constate qu'on se trouve dans un cas de type 1. En effet : $\omega_{\min} = 1.7232 \times 10^4$; $\omega_{\max} = 4.99 \times 10^9$. On trouve une largeur de bande égale à 5. Il faut absolument modifier les paramètres de départ.

Tableau 6-11 : Résultats des tests de passivité - cas 3

Simulation	NH_tot	Ny	Npass	K_test	HV	LV
Original	120	6*20	360	4320	992	17
Mod. 1	120	6*20	720	8640	0	1
Perturb	120	6*20	90	1080	0	0
Extrême	120	6*20	1800	21600	0	3
Mod. 2	120	6*20	1080	12960	206	12

On incrémente alors le nombre de points par décade. Il ne reste alors qu'une seule faible violation de passivité que le module de perturbation a enlevé. Par contre, le test extrême présente 3 cas de faibles violations.

Et si on essayait d'obtenir un modèle complètement passif? On augmente à nouveau Nppd. On obtient alors un résultat tout à fait inattendu : 206 larges violations de passivité et 12 faibles violations toutes situées hors de la bande de tabulation. Une conclusion s'impose : le fait d'augmenter Nppd peut avoir aussi l'effet contraire à celui espéré. Ce qui confirme le résultat obtenu auparavant dans le cas 1.

Liste des fichiers :

Chemin	C:\EMTP\passivity\EDF_ACcable\
Fichier EMTP	EDF_ACcable_OC.ecf
Modèle original	WB_2cableAC10ppd_rv.cyz / wffit_case3_mod0_rv.dat
Modèle modifié 1	WB_2cableAC20ppd_rv.cyz / wffit_case3_mod1_rv.dat
Modèle modifié 2	WB_2cableAC30ppd_rv.cyz / wffit_case3_mod2_rv.dat

6.3.1 VÉRIFICATION DANS LE DOMAINE TEMPOREL

Dans ce cas aussi, on effectue un test en circuit ouvert en appliquant une source de tension de 735 KV à l'une des extrémités du câble et en mesurant la tension à la sortie (voir figure 6-13). (Notons que ce test ne correspond pas à un circuit réel!).

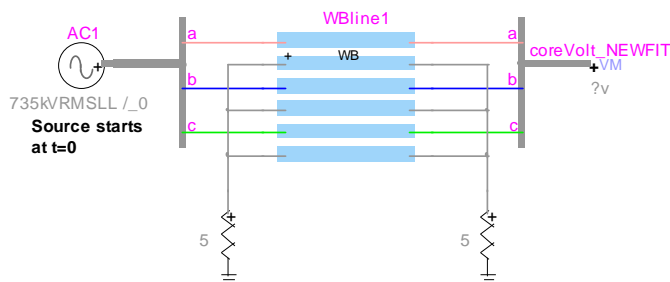


Figure 6-13 : Circuit EMTP de test - cas 3

La figure 6-14 montre le résultat de la simulation avec les données originales. Il est clair que ce n'est pas le résultat attendu. Après l'augmentation du nombre de points par décade, on obtient le résultat présenté à la figure 6-15, qui est conforme à la réalité. On voit bien que lorsque le nombre de faibles violations de passivité n'est pas élevé, la simulation temporelle n'est pas affectée.

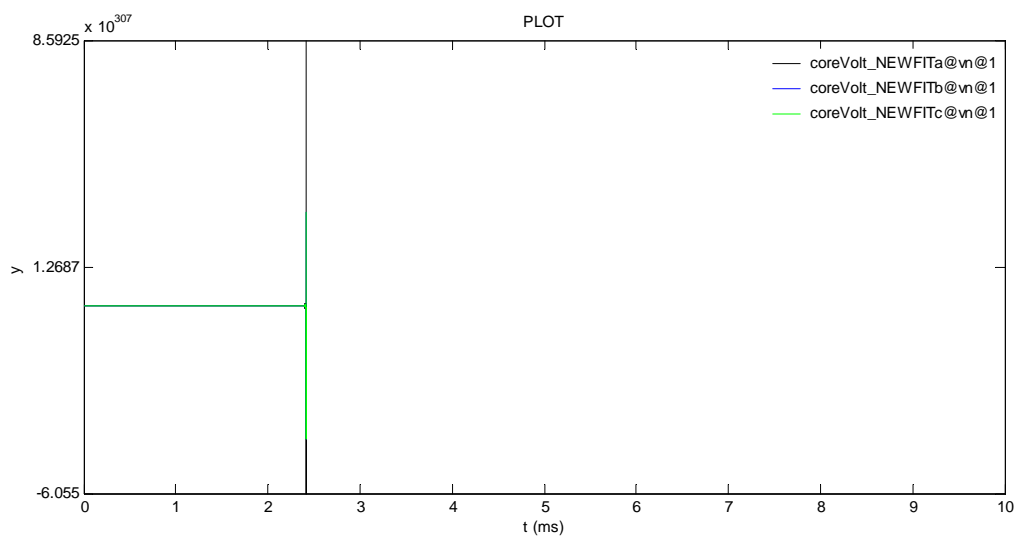


Figure 6-14 : Tension à l'extrémité du câble avant modification - cas 3

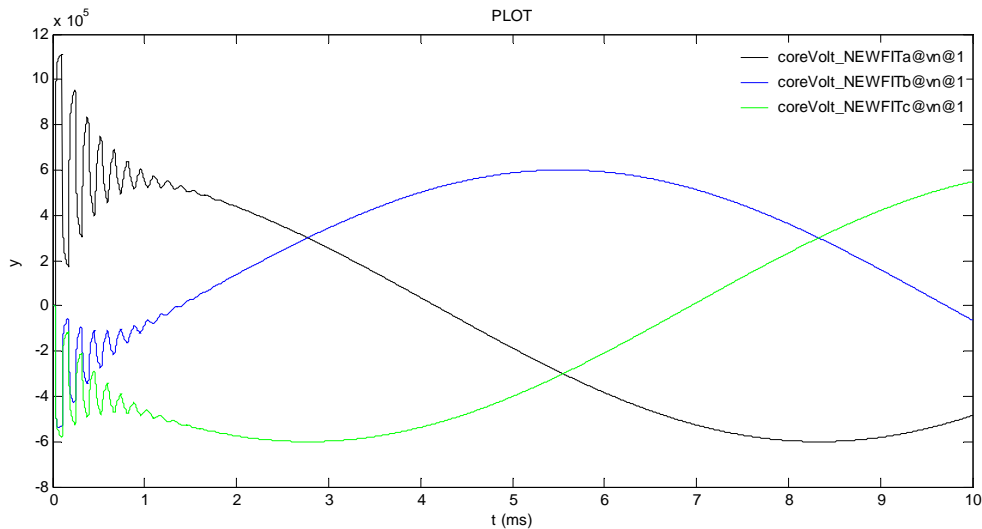


Figure 6-15 : Tension à l'extrémité du câble après la première modification - cas 3

Enfin, On peut voir sur la figure 6-16 le résultat obtenu avec $N_{ppd} = 30$. L'augmentation du nombre de points par décade a introduit des larges violations de passivité, ce qui a donné la simulation instable observée sur la figure 6-16.

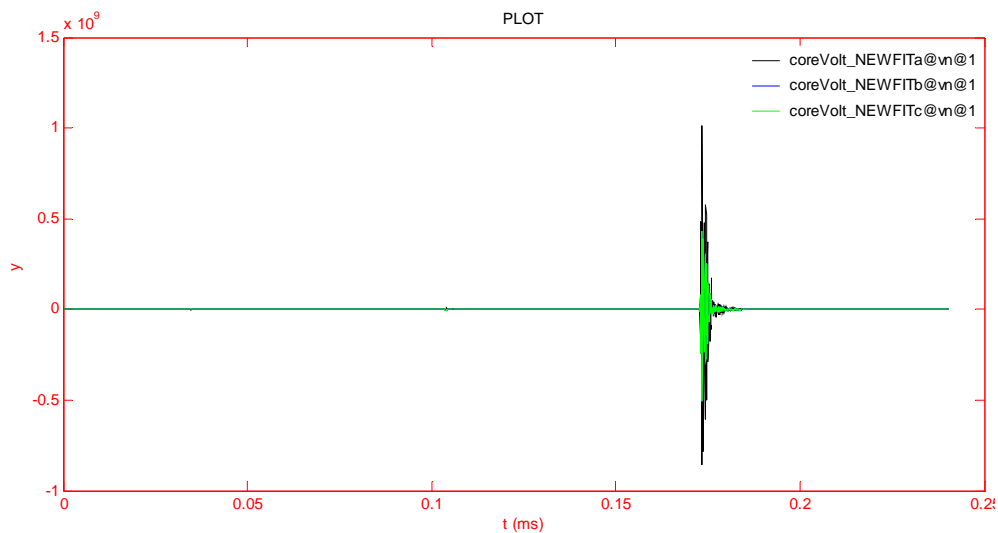


Figure 6-16 : Tension à l'extrémité du câble après la deuxième modification - cas 3

6.4 CAS 4 : IK3CABLE_OC

Un autre cas de 3 câbles dont la configuration et les données sont présentées à la figure 6-17. On peut voir les autres paramètres au tableau 6-14.

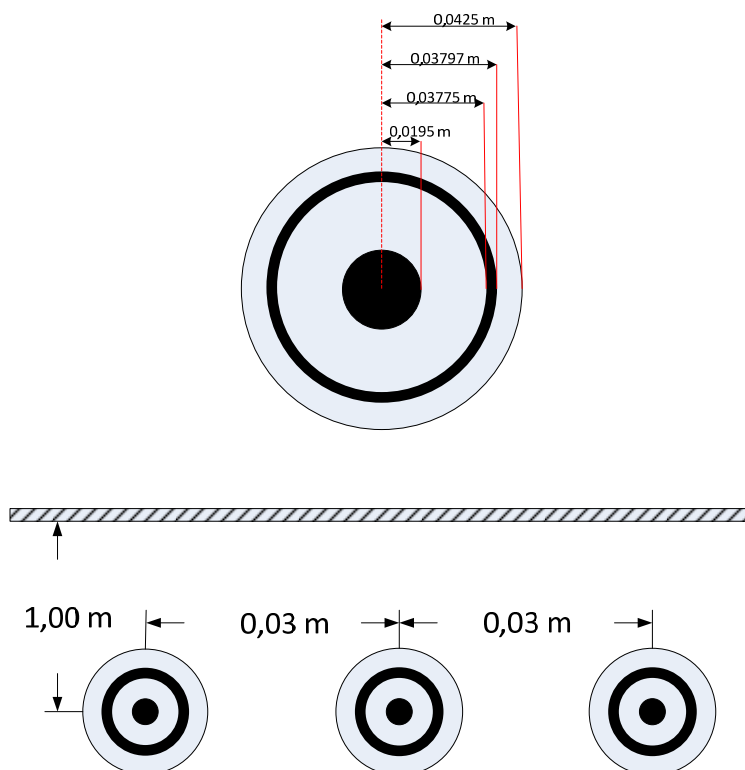


Figure 6-17 : Configuration et données du câble - Cas 4

Tableau 6-12 : Paramètres du câble - Cas 4

Paramètre	Valeur
Résistivité conducteur 1 (Ωm)	3,365e-8
Résistivité conducteur 2 (Ωm)	1,718e-8
Résistivité de la terre (Ωm)	100
Permittivité relative	1
Permittivité relative Isolant 1	2,85
Permittivité relative Isolant 2	2,61
Perméabilité relative de la terre	1
Facteur de pertes de l'isolant 1	0,001
Facteur de pertes de l'isolant 2	0,001
Longueur du câble (m)	10000

Le tableau suivant contient les valeurs choisies par l'utilisateur pour créer le modèle et les modifications qui y sont apportées au fil des itérations.

Tableau 6-13 : Paramètres de départ et modifications successives - cas 4

	Nppd	fmin	Ndec
Original	10	0,01	9
Modification 1	20	0,01	9
Modification 2	30	0,01	9

Après une première simulation, on obtient 93 larges violations et 100 faibles violations de type 1 dont certaines hors de la bande de tabulation. En effet

$$\omega_{\min} = 2,68 \times 10^6; \omega_{\max} = 2,337 \times 10^8$$

En augmentant le nombre de points par décade, il ne reste plus que 129 faibles violations qui sont corrigées facilement par la méthode de perturbation. Par contre, le test extrême révèle la présence d'une large violation de passivité (tableau 6-14). Il est intéressant de vérifier l'effet de cette violation de passivité dans le domaine temporel. Dans la prochaine section, ces cas seront étudiés.

Tableau 6-14 : Résultats des tests de passivité - cas 4

Simulation	NH_tot	Ny	Npass	K_test	HV	LV
Original	77	6*10	360	4320	93	100
Mod. 1	102	6*11	720	8640	0	129
Perturb 1	102	6*11	180	2160	0	0
Extrême	102	6*11	1800	21600	1	1
Mod. 2	118	6*11	1080	12960	0	74
Perturb 2	118	6*11	270	3240	0	0
Extrême	118	6*11	2700	32400	0	0

6.4.1 VÉRIFICATION DANS LE DOMAINE TEMPOREL

On applique une source triphasée de 230 kV aux noyaux des câbles et on mesure la tension à la sortie. Le schéma EMTP est montré sur la figure 6-18. Pour simuler la mise sous tension réelle du câble, les trois phases du disjoncteur se ferment après un petit délai. La phase A se ferme 16 ms après le début de la simulation, la phase B se ferme 4 ms plus tard et la phase C se ferme 25 à 25 ms.

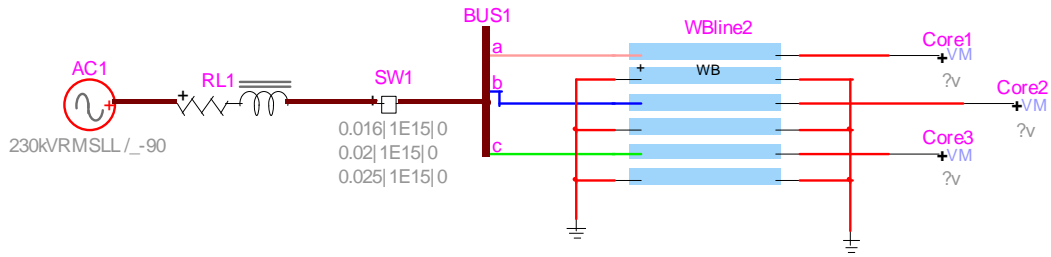


Figure 6-18 : Schéma EMTP de test - cas 4

Les résultats obtenus pour le modèle original ne sont pas corrects comme on peut le voir sur la figure 6-19.

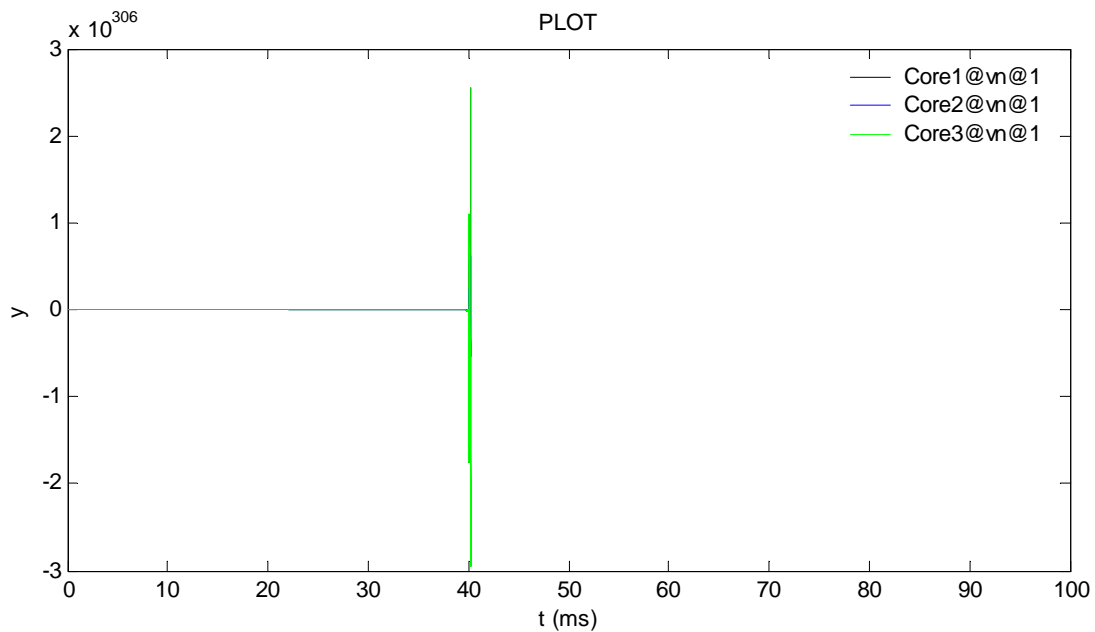


Figure 6-19 : Tension à la sortie des noyaux des câbles - modèle original - cas 4.

Après augmentation de Nppd, la simulation est toujours instable (fig. 6-20) même s'il ne subsiste que des faibles violations de passivité.

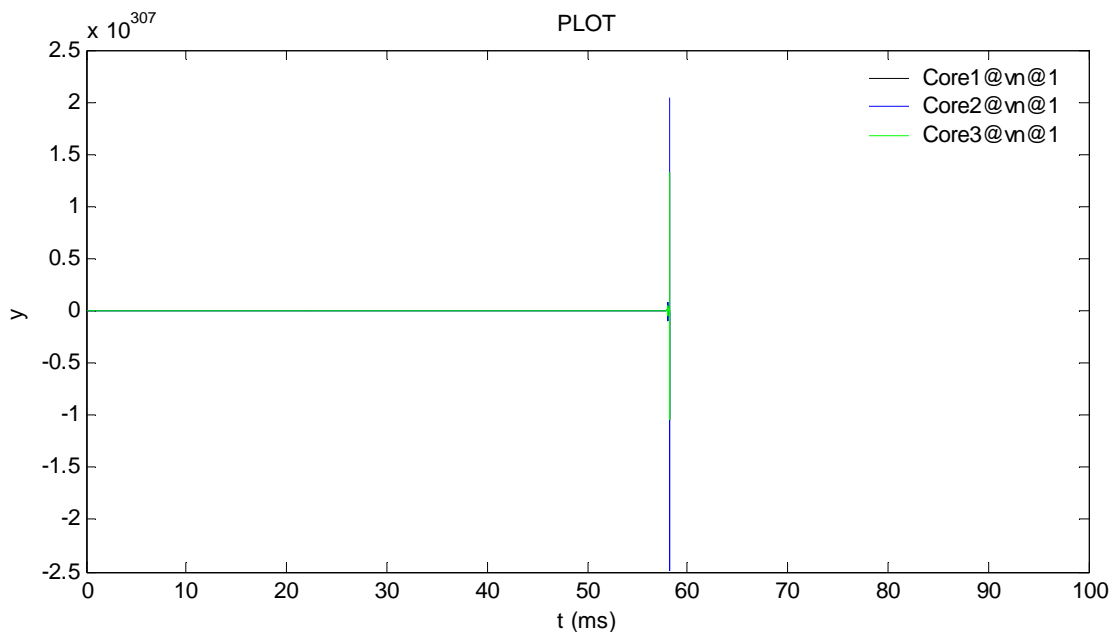


Figure 6-20 : Tension obtenue à la sortie pour Nppd = 20 - cas 4

La méthode de perturbation ne permet pas de redresser la situation. La simulation est toujours instable même si le test extrême ne détecte que la présence d'une seule violation de passivité – mais une large. (Voir figure 6-21).

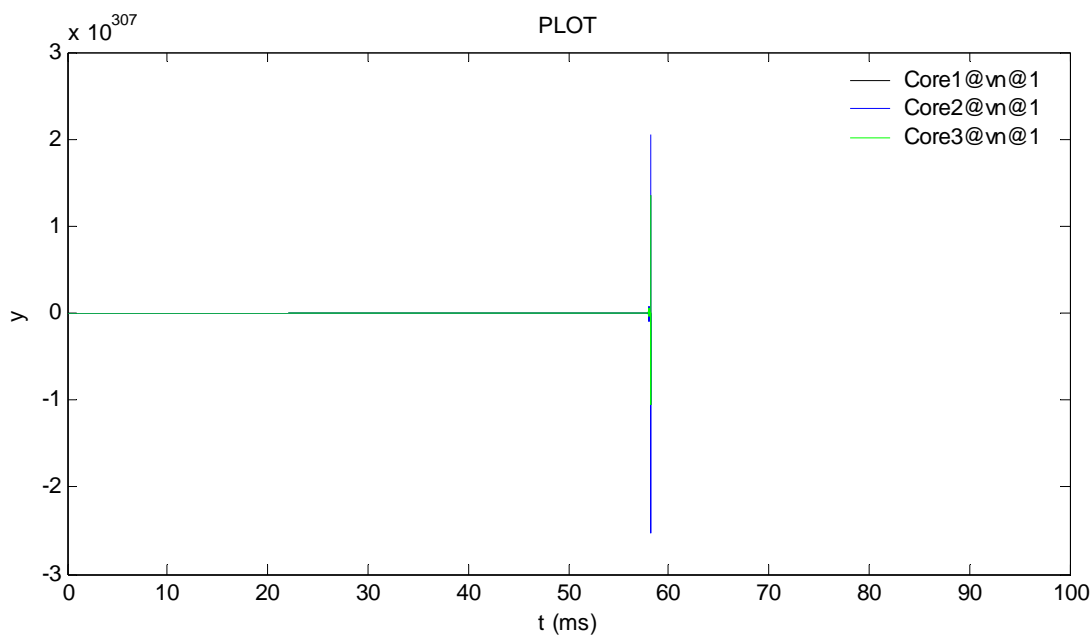


Figure 6-21 : Tension de sortie après la première perturbation - cas 4.

On obtient enfin une simulation stable (figure 6-22) après la deuxième modification, c'est-à-dire lorsque $N_{ppd} = 30$. Après application de la perturbation, la simulation reste toujours stable (figure 6-23).

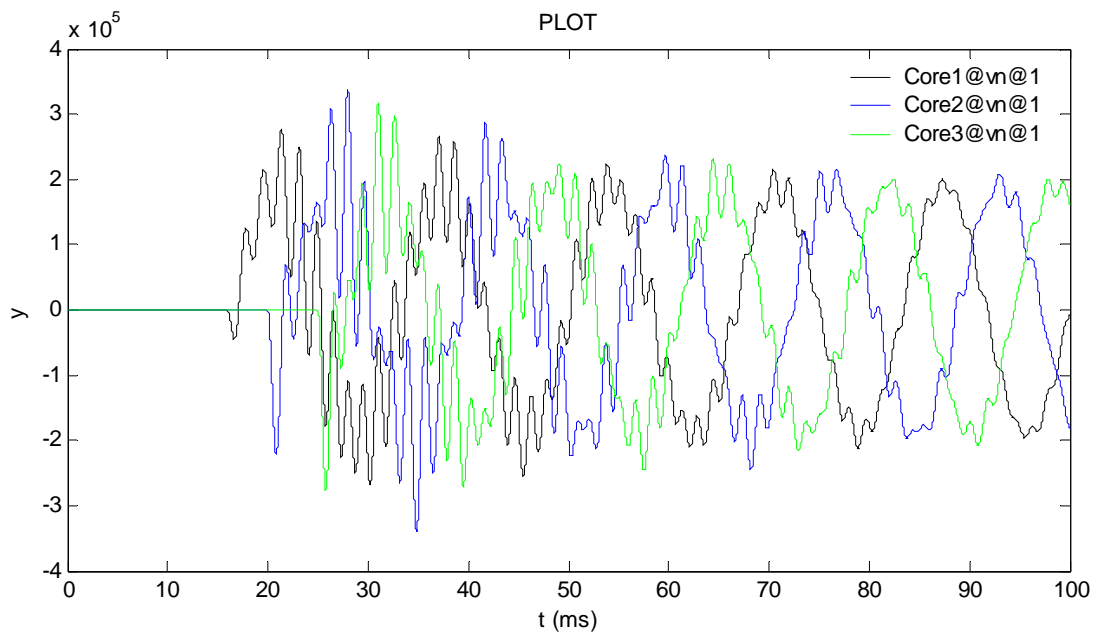


Figure 6-22 : Tension de sortie pour $N_{ppd} = 30$ - cas 4.

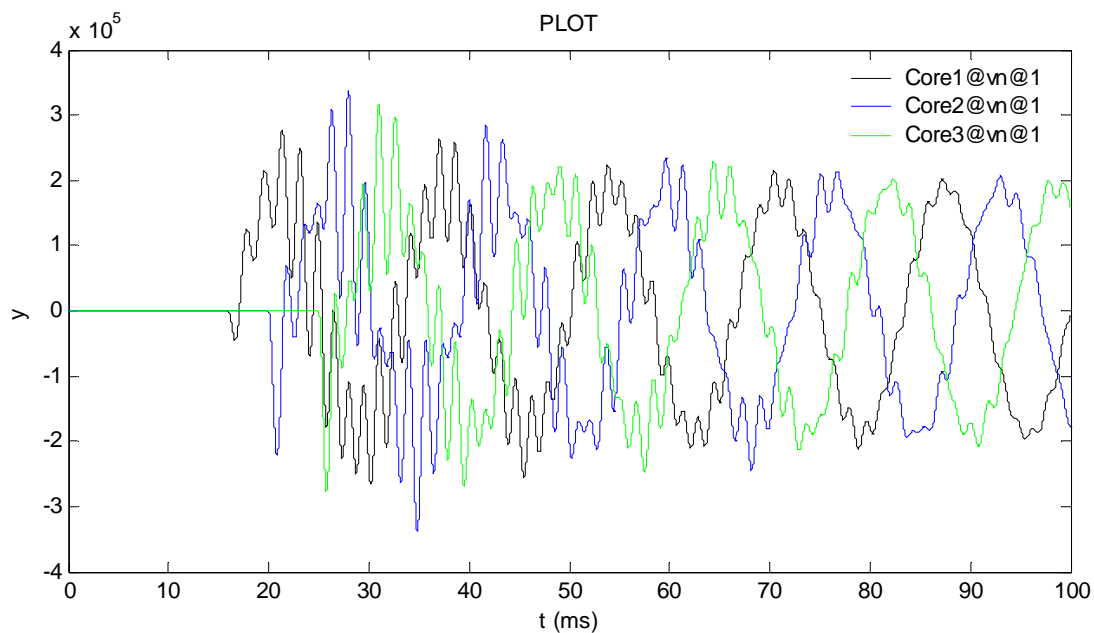


Figure 6-23 : Résultats après la seconde perturbation - cas 4

Liste des fichiers | :

Chemin	C:\EMTP\passivity\Kocar_3cable\
Fichier EMTP	WB_IK3cable_OC.ecf
Modèle original	WB_IK3cable10ppd9dec_rv.cyz / wffit_case4_mod0_rv.dat
Modèle modifié 1	WB_IK3cable20ppd9dec_rv.cyz / wffit_case4_mod1_rv.dat
Perturbation 1	wffit_case3_mod2_rv.dat
Modèle modifié 2	WB_2cableAC30ppd_rv.cyz / wffit_case3_mod3_rv.dat
Perturbation 2	wffit_case3_mod4_rv.dat

6.5 CAS 5 : IK6CABLE_OC

Ce cas présente l'une des configurations complexes que nous traitons dans ce travail de recherche. On a 6 câbles à deux conducteurs dont on peut voir la configuration et les données à la figure 6-25.

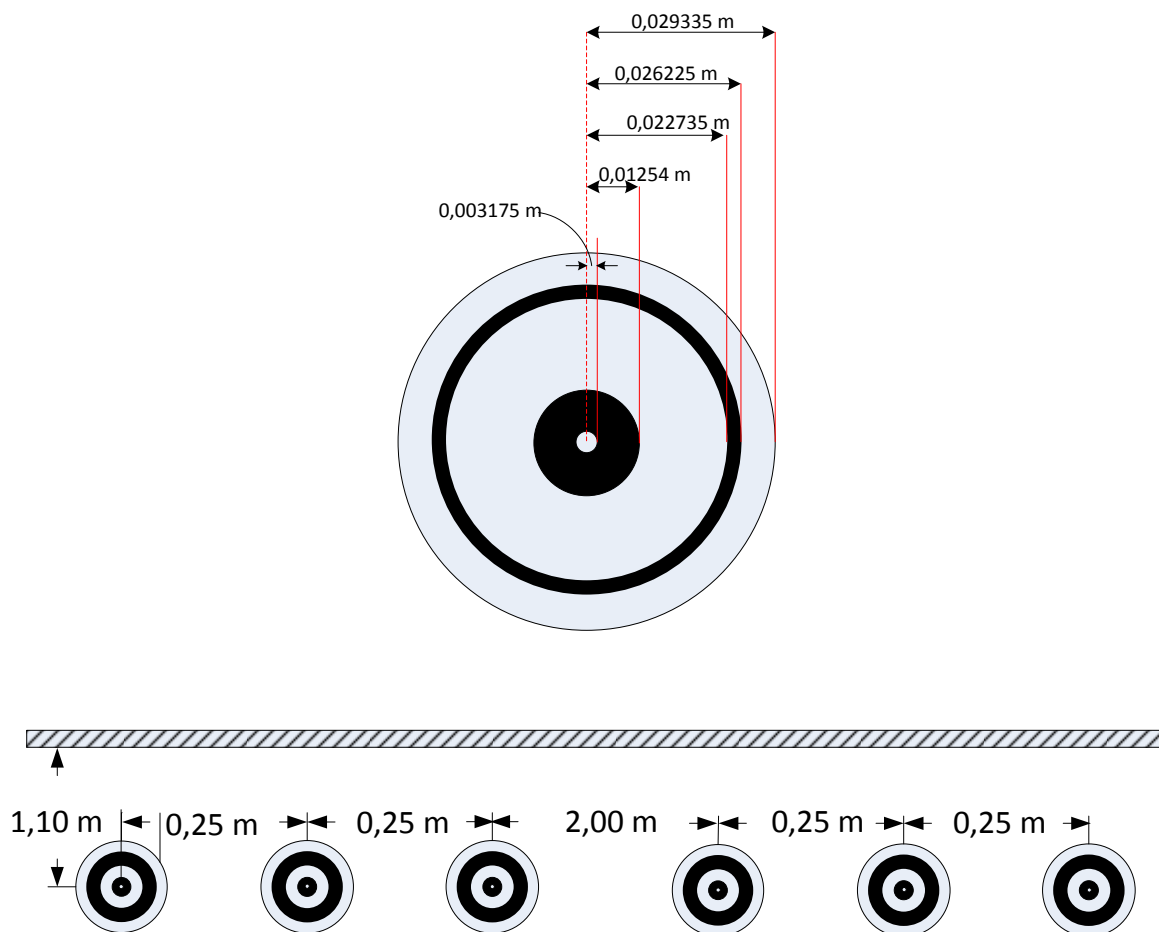


Figure 6-24 : Données et configuration des câbles - cas 5

Les autres paramètres électriques nécessaires à la simulation sont contenus dans le tableau 6-15.

On peut voir au tableau 6-16 le choix initial de l'utilisateur pour les valeurs de tabulation. Notons la fréquence minimale choisie : 0,1 Hz. Avec ces données une première tentative de lissage est faite. On obtient 2226 larges violations et 402 faibles violations. Il est évident qu'il faut corriger les valeurs tabulées. La fréquence minimale est fixée automatiquement à 0,01 Hz, et on garde 10 ppd et 9 décades. On obtient alors 529 faibles violations. Le nombre de violations étant trop élevé, on ne tente même pas d'appliquer la méthode de perturbation. On augmente encore le nombre de points par décade. Les larges violations sont revenues en grand nombre. A 30 ppd, la situation empire. Au tableau 6-17, on peut voir les résultats de tous les tests de passivité.

Tableau 6-15 : Paramètres du câble - Cas 5

Paramètre	Valeur
Résistivité conducteur 1 (Ωm)	2,1e-8
Résistivité conducteur 2 (Ωm)	1,7e-8
Résistivité de la terre (Ωm)	250
Permittivité relative	1
Permittivité relative Isolant 1	3,5
Permittivité relative Isolant 2	2
Perméabilité relative de la terre	1
Facteur de pertes de l'isolant 1	0,001
Facteur de pertes de l'isolant 2	0,001
Longueur du câble (m)	1000

Tableau 6-16 : Modifications successives des paramètres d'entrée - cas 5

	Nppd	fmin	Ndec
Original	10	0,1	9
Modification 1	10	0,01	9
Modification 2	20	0,01	9
Modification 3	30	0,01	9

Tableau 6-17 : Résultats des tests de passivité - cas 5

Simulation	NH_tot	Ny	Npass	K_test	HV	LV
Original	105	10*12	360	8640	2226	402
Mod. 1	59	9*12	360	8640	0	529
Mod. 2	48	7*12	640	15360	1969	566
Mod. 3	94	10*12	1080	12960	3598	627

Liste des fichiers :

Chemin	C:\EMTP\passivity\Kocar_6cable\
Fichier EMTP	WB_IK6cable_OC.ecf
Modèle original	WB_IK6cable_10ppd9dec2_rv.cyz
Modèle modifié 1	WB_IK6cable_10ppd9dec_rv.cyz
Modèle modifié 2	WB_IK6cable_20ppd9dec_rv.cyz
Modèle modifié 3	WB_IK6cable_30ppd9dec_rv.cyz

Ce cas n'est pas résolu. Il faut noter qu'on peut trouver un modèle passif pour cette même configuration si la longueur du câble est 10 km.

6.6 CAS 6 : RTEDC_CABLE

Ce cas simple de 2 câbles est corrigé automatiquement en utilisant la méthode de perturbation.

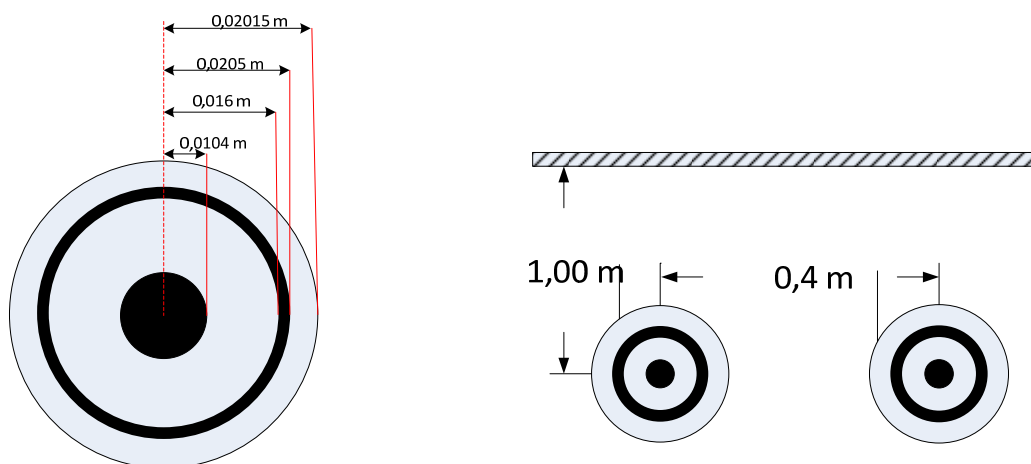


Figure 6-25 : Configuration et données des câbles : cas -6

Tableau 6-18 : Paramètres du câble - Cas 6

Paramètre	Valeur
Résistivité conducteur 1 (Ωm)	17e-7
Résistivité conducteur 2 (Ωm)	21e-6
Résistivité de la terre (Ωm)	100
Permittivité relative	1
Permittivité relative Isolant 1	3,5
Permittivité relative Isolant 2	2
Perméabilité relative de la terre	1
Facteur de pertes de l'isolant 1	0
Facteur de pertes de l'isolant 2	0
Longueur du câble (m)	25000

Les paramètres choisis par l'utilisateur sont indiqués au tableau suivant :

	Nppd	fmin	Ndec
original	10	0,01	9

Le modèle original ne présente que 18 faibles violations de passivité. La méthode de perturbation fournit un modèle totalement passif, confirmé par le test extrême (voir tableau 6-19).

Tableau 6-19 : Résultats des tests de passivité - cas 6

Simulation	NH_tot	Ny	Nwpass	K_test	HV	LV
Original	21	4*15	360	2880	0	18
Perturbation	21	4*15	90	720	0	0
Passivité Ext	21	4*15	900	7200	0	0

Les simulations temporelles pour le modèle original et le modèle simulé sont correctes (fig 6-28). (Notons que ce circuit est utilisé pour faire un test numérique du modèle. Il ne correspond pas à un circuit réel!).

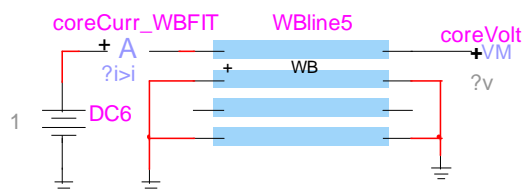


Figure 6-26 : Schéma EMTP de test - cas 6

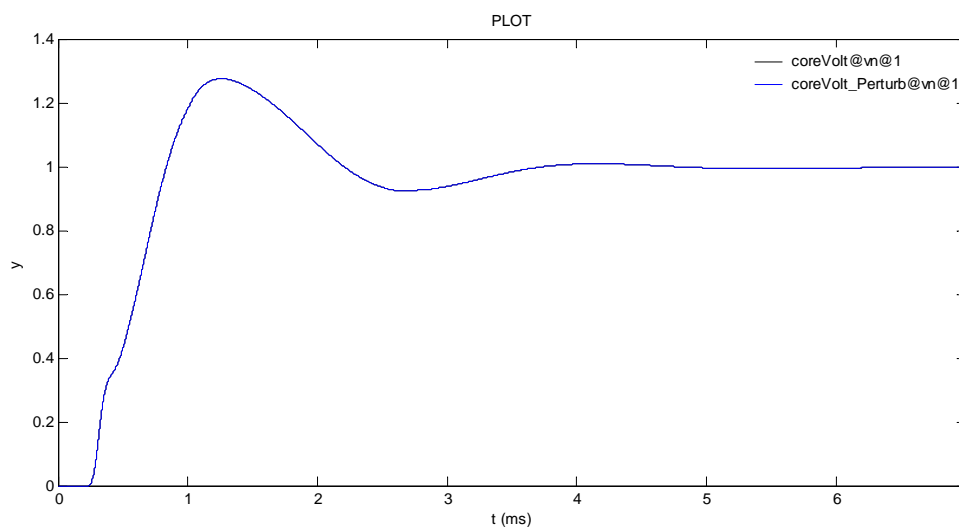


Figure 6-27 : Tension à la sortie du câble - cas 7

Liste des fichiers :

Chemin	C:\EMTP\passivity\RTE_DCcable\
Fichier EMTP	RTE_DCCABLE_OC.ecf
Modèle original	WB_2cableDC10ppd9dec_rv.cyz / wffit_case6_mod0_rv.dat
Perturbation 1	wffit_case6_mod1_rv.dat

6.7 CAS 7 : JEEW3CABLE_SC

On peut voir la configuration et les données de ce cas sur la figure 6-29. Les paramètres électriques sont présentés au tableau 6-20. Notons en passant le facteur de pertes de l'isolant 2 qui est de 0,3 (ce qui est assez curieux !!).

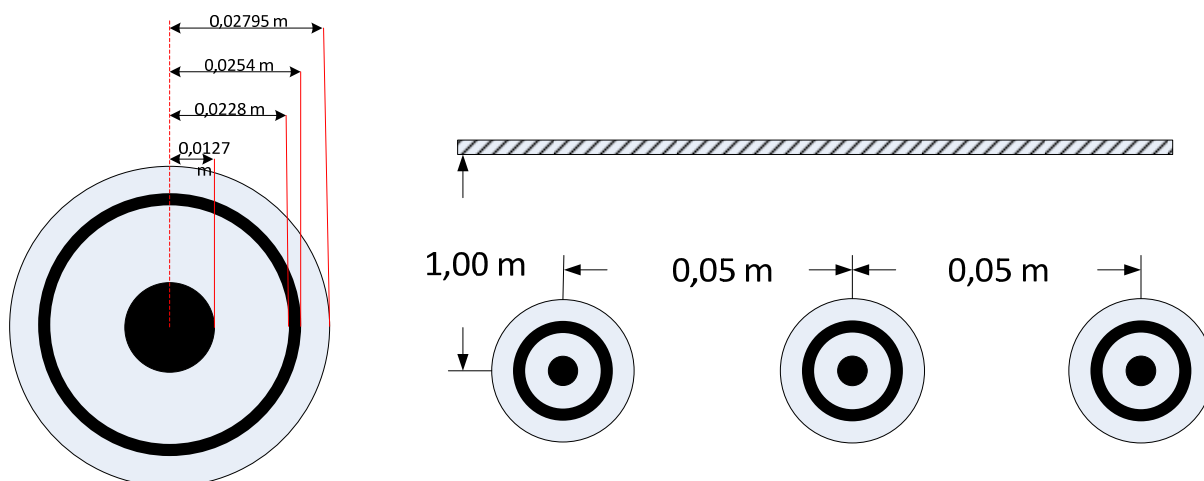


Figure 6-28 : Configuration et données des câbles : - cas 7

Tableau 6-20 : Paramètres du câble - Cas 7

Paramètre	Valeur
Résistivité conducteur 1 (Ωm)	2,1e-8
Résistivité conducteur 2 (Ωm)	1,7e-8
Résistivité de la terre (Ωm)	250
Permittivité relative	1
Permittivité relative Isolant 1	2,85
Permittivité relative Isolant 2	0,436
Perméabilité relative de la terre	1
Facteur de pertes de l'isolant 1	0,0008
Facteur de pertes de l'isolant 2	0,3
Longueur du câble (m)	100000

L'utilisateur choisit de modéliser le câble sur 8 décades à 10 ppd et avec une fréquence minimum de 0,01 Hz (tableau 6-21). Le premier test de passivité révèle 262 larges violations et 10 faibles violations. Comme le nombre de violations est grand, même si on se trouve dans un cas de type 3, le module de repositionnement des pôles ne démarre pas. Il faut alors modifier les paramètres d'entrée. Nppd est incrémenté à 20. Il reste alors 4 larges violations de passivité de type 3. Le module de repositionnement des pôles démarre. On obtient 58 larges violations de passivité et 8 faibles violations. Il faut tabuler à 30 ppd pour obtenir un modèle passif. Les résultats des différentes étapes sont placés au tableau 6-22.

Tableau 6-21 : Modèle original et modifications - cas 7

	Nppd	fmin	Ndec
Original	10	0,01	8
Modification 1	20	0,01	8
Modification 2	30	0,01	8

Tableau 6-22 : Résultats des tests de passivité - cas 7

Simulation	NH_tot	Ny	Nwpass	K_test	HV	LV
Original	74	6*20	320	3840	262	10
Mod 1	120	6*20	640	7680	4	0
Rep. poles	120	6*20	640	7680	58	8
Mod. 2	120	6*120	960	11520	0	0
Extrême	120	6*120	2400	28800	0	0

Liste des fichiers :

Chemin	C:\EMTP\passivity\Jeewantha_3cable\
Fichier EMTP	JEEW3cable_OC.ecf
Modèle original	JEEW3cable10ppd_rv.cyz / wbfite_case7_mod0_rv.dat
Modèle modifié 1	JEEW3cable20ppd_rv.cyz/ wbfite_case7_mod1_rv.dat
Modèle modifié 2	JEEW3cable30ppd_rv.cyz/ wbfite_case7_mod2_rv.dat

6.7.1 VÉRIFICATION DANS LE DOMAINE TEMPOREL

On va tester le modèle en utilisant une source d'alimentation directe appliquée à l'un des câbles (figure 6-30). (Notons que ce circuit est utilisé pour faire un test numérique du modèle. Il ne correspond pas à un circuit réel!). Le résultat qu'on obtient à partir du modèle original n'est pas correct (figure 6-31) pas plus que celui obtenu pour Nppd=20 (figure 6-32).

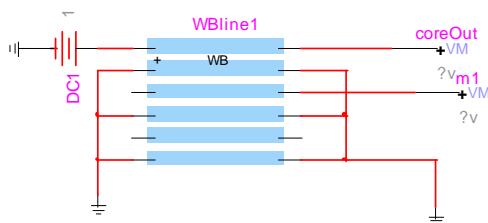


Figure 6-29 : Schéma EMTP de test - cas 7

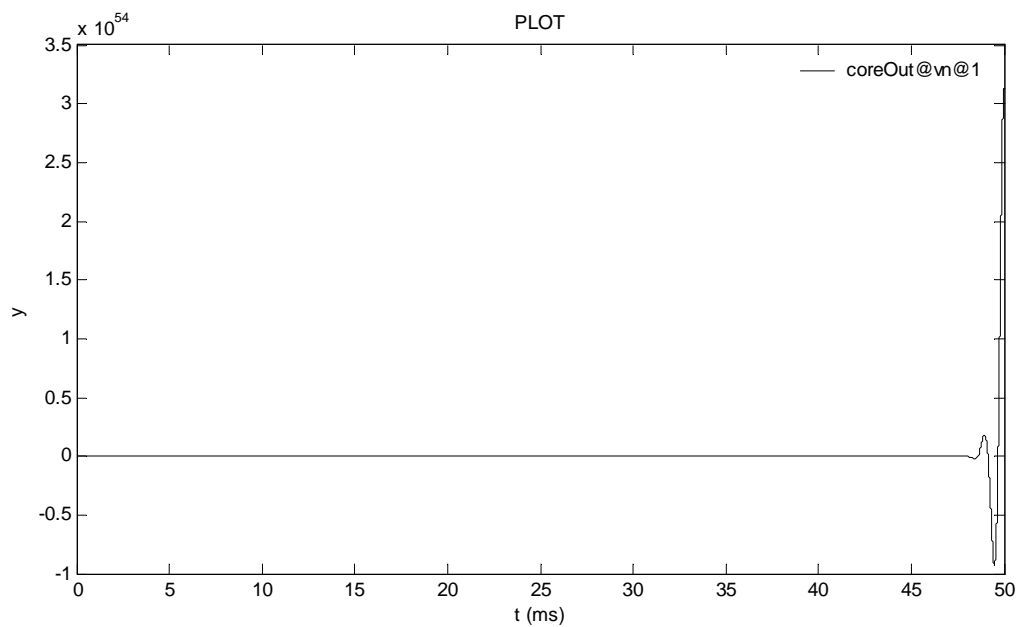


Figure 6-30 : Tension à l'extrémité du câble - cas 7

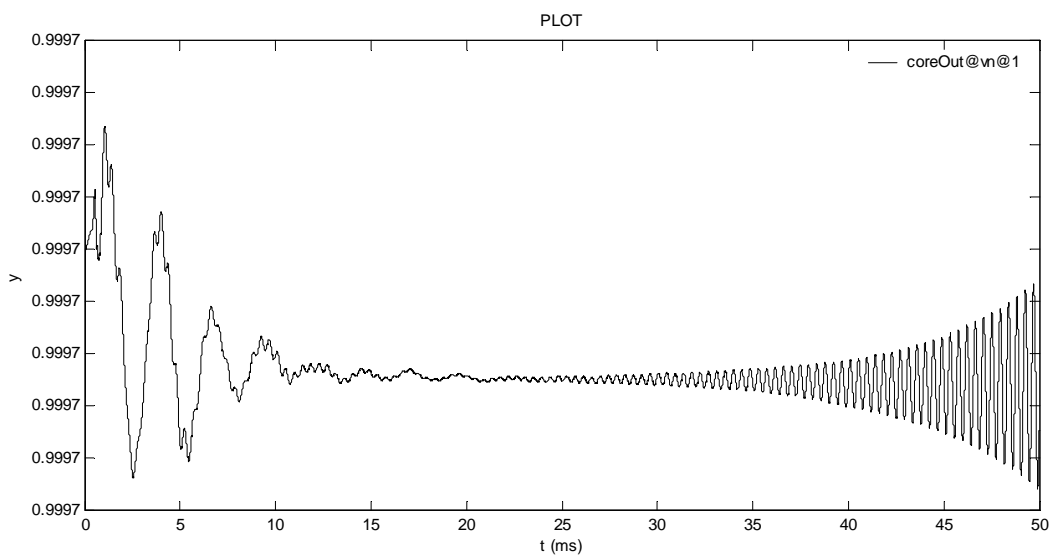


Figure 6-31 : Tension à la sortie pour Nppd = 20 - cas 7

Par contre, on voit sur la figure 6-33 que la simulation est stable et correcte pour $N_{ppd} = 30$.

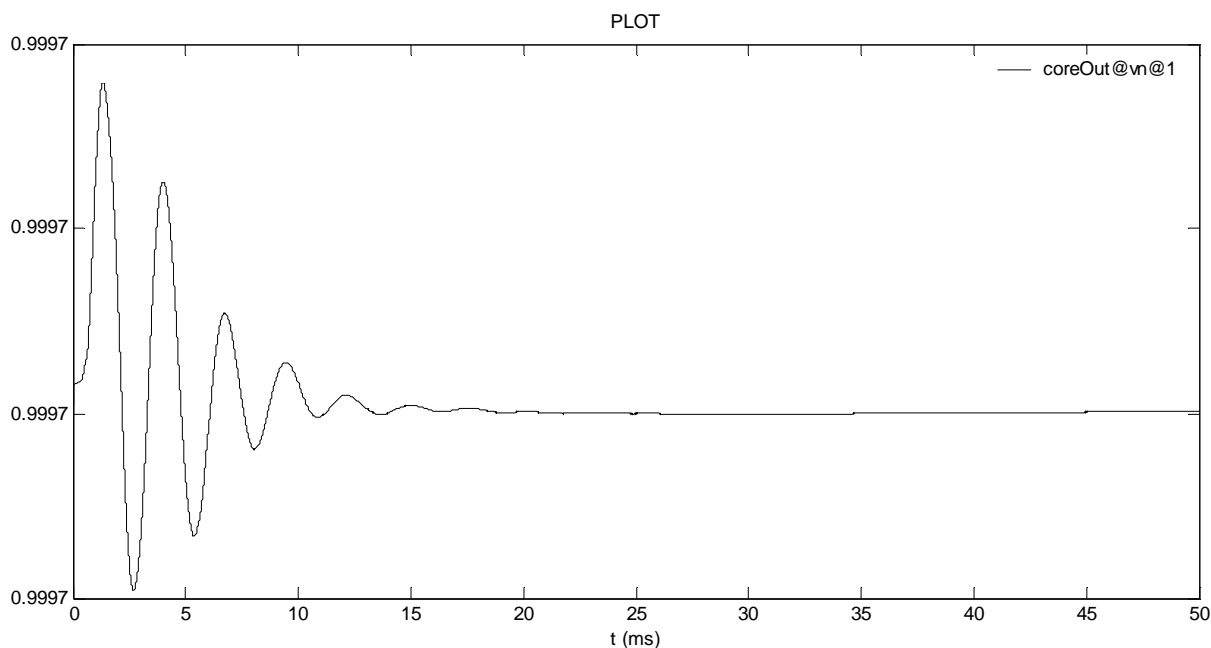


Figure 6-32 : Tension à la sortie du câble pour $N_{ppd} = 30$ - cas 7

6.8 CAS 8 : LIN_9PH

C'est le seul cas concernant les lignes de transmission que nous présentons car, en général, elles ne présentent pas de problèmes de passivité. La configuration (un peu spéciale!) des lignes est montrée sur la figure 6-34 et on retrouve les paramètres électriques des lignes au tableau 6-23. L'utilisateur choisit une tabulation à 15 ppd sur 10 décades avec une fréquence minimale de 0,01 Hz.

La première simulation indique 623 faibles violations qui sont corrigées en utilisant la méthode de perturbation. Le test extrême indique qu'il reste 17 faibles violations (tableau 6-24).

	Nppd	fmin	Ndec
original	15	0,01	10

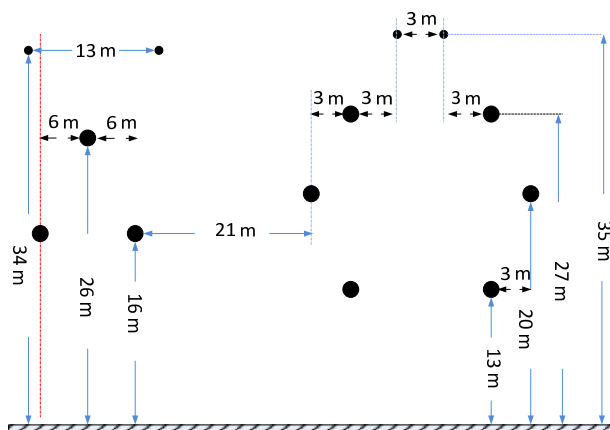


Figure 6-33 : Configuration de la ligne de transmission - cas 8

Tableau 6-23 : Paramètres de la ligne de transmission - Cas 8

Paramètre	Valeur
Résistance DC phases (Ω / km)	0,0216
Résistance DC neutres (Ω / km)	0,7426
Résistivité de la terre (Ωm)	100
Diamètre conducteurs de phase (cm)	2
Diamètre conducteurs de neutre (cm)	1,39
Résistivité de la terre (Ωm)	100
Longueur de la ligne (km)	150

Tableau 6-24 : Résultats des tests de passivité - cas 8

Simulation	NH_tot	Ny	Nwpass	K_test	HV	LV
original	29	9*10	604	10872	0	623
Perturbation	29	9*10	302	5436	0	0
extrême	29	9*10	1510	27150	0	17

Le test dans le domaine temporel montre que même avec un nombre si élevé de faibles violations, la simulation temporelle donne des résultats satisfaisants. La figure 6-35 compare ces résultats avec celles obtenues par la méthode de perturbation.

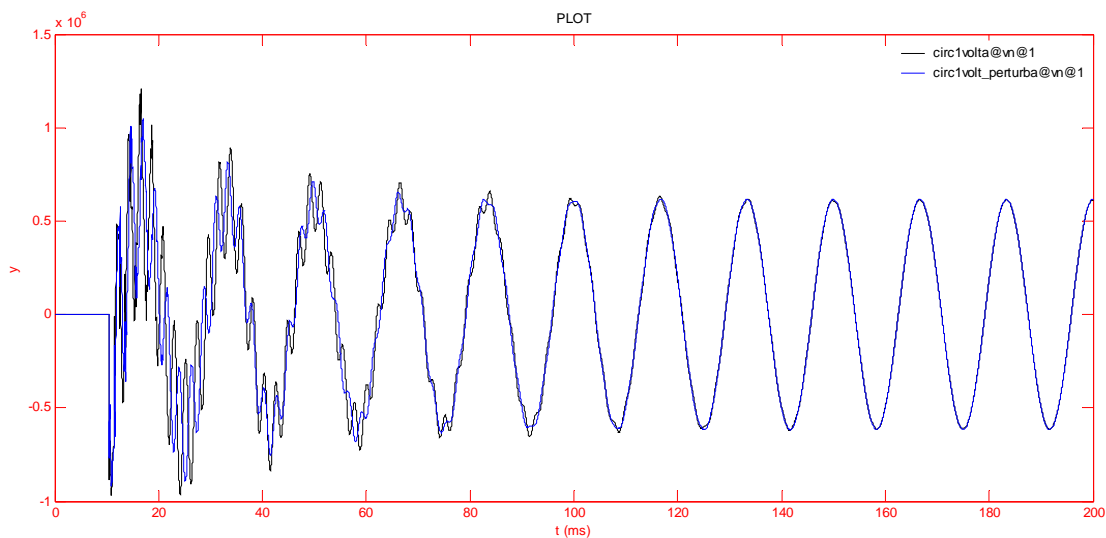


Figure 6-34 : Sortie originale Vs sortie perturbée - Cas 8

Liste des fichiers :

Chemin	C:\EMTP\passivity\Line_9ph\
Fichier EMTP	Lin_9ph_OC.ecf
Modèle original	WB_9phLine_rv.lyz / wffit_case8_mod0_rv.dat
Perturbation	wffit_case8_mod1_rv.dat

6.9 CAS 9 : WB_9KM_RV.CYZ

La configuration et les données de ce câble sont presque identiques au cas 2. Le facteur de pertes de l'isolant 2 est 0,004 (contre 0,3 avant, valeur improbable!).

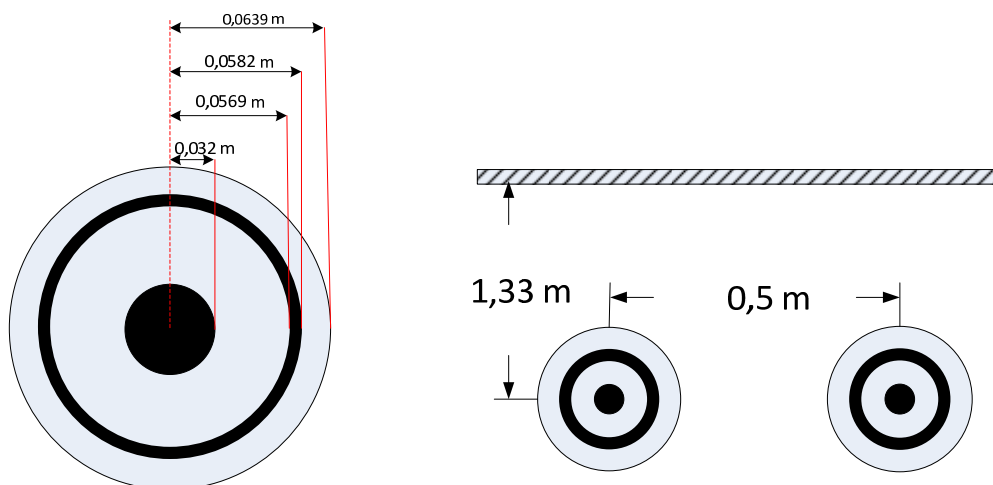


Figure 6-35 : Configuration et données du câble - Cas 9

Tableau 6-25 : Paramètres du câble – Cas 9

Paramètre	Valeur
Résistivité conducteur 1 (Ωm)	1,72e-8
Résistivité conducteur 2 (Ωm)	2,83e-8
Résistivité de la terre (Ωm)	100
Perméabilité relative (μ_e)	1
Permittivité relative Isolant 1	2,5
Permittivité relative Isolant 2	2,5
Perméabilité relative de la terre	1
Perméabilité relative des isolants	1
Facteur de pertes de l'isolant 1	0,004
Facteur de pertes de l'isolant 2	0,004
Longueur du câble (m)	9000

La simulation effectuée avec les données originales fournit un modèle non-passif comportant 722 larges violations de passivité et 3 faibles violations dont certaines hors de la bande de tabulation. Il faut donc ajuster Nppd.

Tableau 6-26 : Modèle original et modifications - cas 7

	Nppd	fmin	Ndec
original	10	0,01	8
Modification 1	20	0,01	8
Modification 2	30	0,01	8

Avec Nppd = 20, on obtient 2 larges violations de passivité de type 3. La méthode de repositionnement des pôles de départ fournit un modèle totalement passif validé par le test extrême (tableau 6-27).

Tableau 6-27 : Résultats des tests de passivité – cas 9

Simulation	NH_tot	Ny	Nwpass	K_test	HV	LV
Original	70	4*11	320	2560	722	3
Mod. 1	67	4*11	640	5120	2	0
Rep. poles	53	4*11	640	5120	0	0
Extrême	53	4*11	1600	12800	0	0
Mod. 2	58	4*11	960	7680	0	7
Perturbation	58	4*11	320	2560	0	0
Extrême	58	4*11	1600	12800	0	0

Il faut remarquer que si, au lieu d'utiliser le repositionnement des pôles, nous avons augmenté N_{ppd} à 30, nous aurions obtenu un modèle quasi-passif et il aurait fallu utiliser la méthode de perturbation pour obtenir un modèle totalement passif.

6.9.1 VÉRIFICATION DANS LE DOMAINE TEMPOREL

Pour tester le modèle, nous utilisons un circuit de puissance en courant direct (HVDC) de 320 kV. Nous simulons un court-circuit au milieu du câble 1, résultant d'un bris de l'isolant. La figure 6-37 montre un schéma simplifié du circuit.

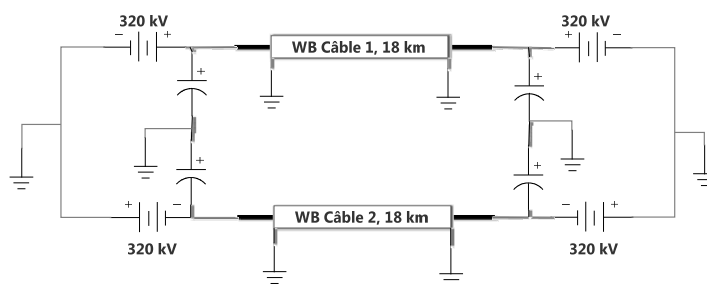


Figure 6-36 : Schéma de principe du système HVDC de test - Cas 9

Comme on pouvait s'y attendre, la simulation n'est pas stable pour le modèle original (figure 6-38) ni pour le modèle obtenu après le premier ajustement des données (figure 6-39).

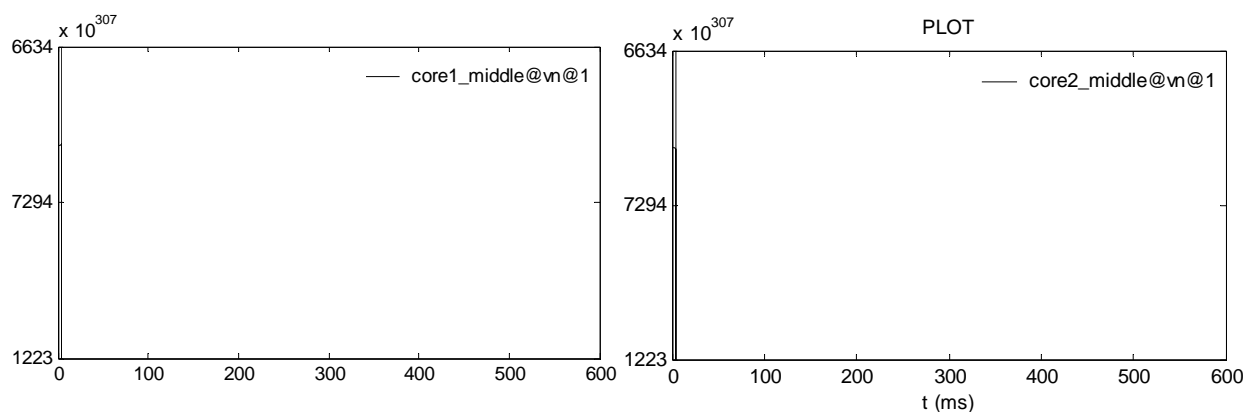


Figure 6-37 : Résultats de la simulation temporelle pour le modèle original - Cas 9

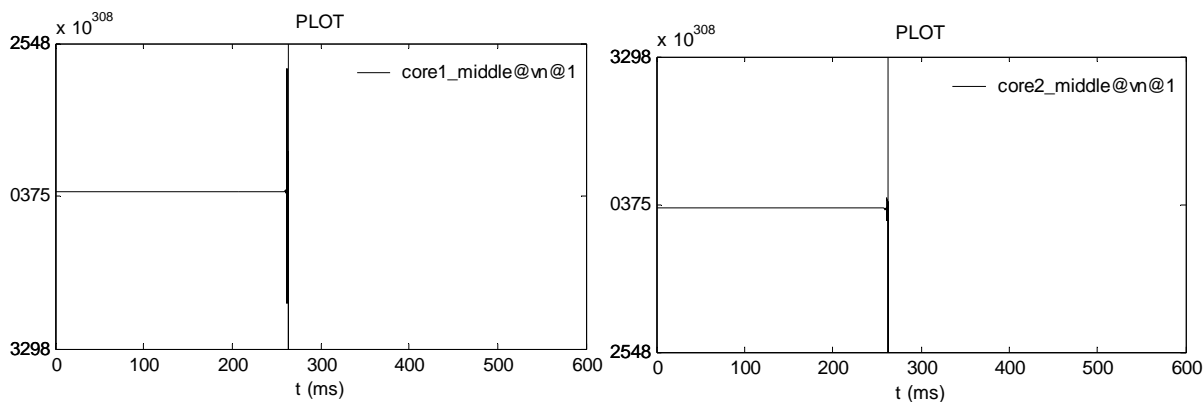


Figure 6-38 : Résultats de la simulation temporelle après modification 1 - Cas 9

Par contre, on obtient une simulation stable après l'utilisation du module de repositionnement des pôles initiaux. La figure 6-40 (à gauche) montre la tension au noyau du câble 1. On peut voir que 150 ms après la mise sous tension, les surtensions transitoires ont pratiquement disparu pour laisser la place au régime permanent. Par contre, après 300 ms, la tension chute abruptement à cause du court-circuit.

La simulation reste stable au câble 2 (à droite), et on peut voir une petite perturbation de la tension causée par le court-circuit au sein du noyau du câble 1.

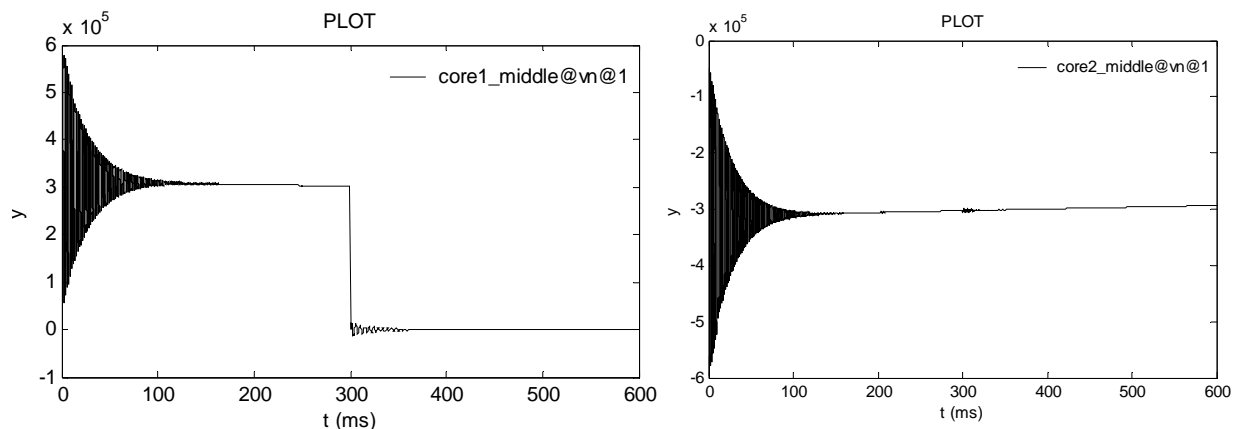


Figure 6-39 : Résultats de la simulation temporelle après repositionnement des pôles - Cas 9

La figure 6-41 montre les résultats de la simulation après la modification 2. On constate que, même si le modèle est quasi-passif, la simulation est quand même stable et on obtient des résultats identiques à ceux obtenus lors de la précédente simulation.

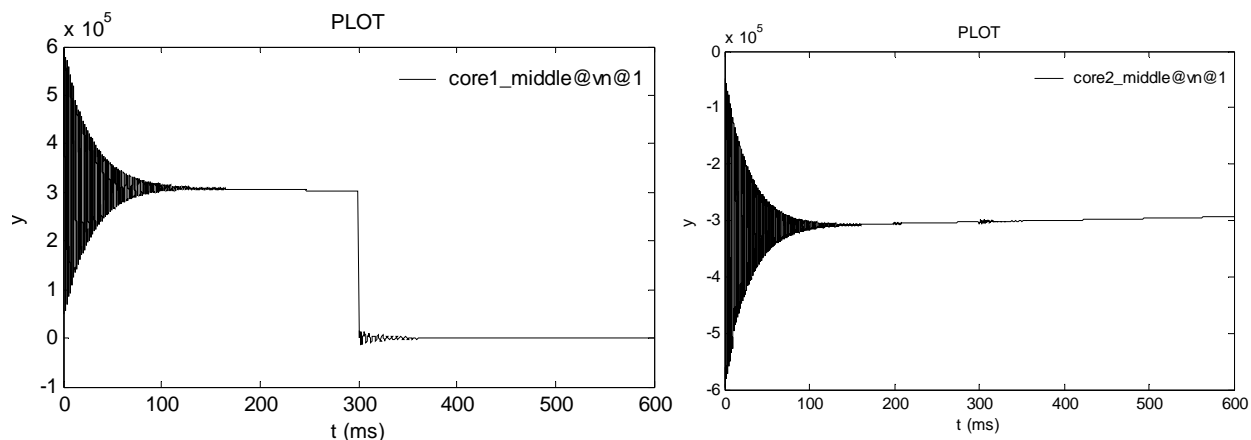


Figure 6-40 : Résultats de la simulation temporelle après modification 2 - Cas 9

Liste des fichiers :

Chemin	C:\EMTP\passivity\Isabel\
Fichier EMTP	Case9.ecf
Modèle original	wb_9km10ppd_rv.cyz/ wbfite_case9_mod0_rv.dat
Modification 1	wb_9km20ppd_rv.cyz/ wbfite_case9_mod1_rv.dat
Poles Placement	wbfite_case9_mod2_rv.dat
Modification 2	wb_9km30ppd_rv.cyz/ wbfite_case9_mod3_rv.dat
Perturbation	wbfite_case9_mod4_rv.dat

6.10 SOMMAIRE DES OBSERVATIONS

On a tenté de résoudre le problème de passivité pour 8 configurations de câbles et une configuration de ligne de transmission. Sur les 9 cas, un seul n'a pu être résolu. Le tableau 6-28 présente une synthèse des cas étudiés en présentant le modèle initial, la solution utilisée et le modèle final. Quand le modèle est quasi-passif (QP), on indique le pourcentage des points testés qui présentent des faibles violations de passivité. Par exemple, dans le cas 1, sur 3834 points testés, 179 présentaient des violations, soit un pourcentage de 4,66%. Si le résultat est validé par le test extrême de passivité, nous l'indiquons aussi (O lorsque c'est le cas, N dans le cas contraire).

Les cas de faibles violations sont pris en charge avec succès par le module de perturbation matricielle (PERT dans le tableau) alors que les larges violations de passivité requièrent en

général un ajustement des données tabulées (PPD). Les violations de type 3 sont bien résolus par la méthode de repositionnement des pôles (REP) lorsque le nombre de violations n'est pas très grand.

Le cas 7 nous révèle que les résultats peuvent être différents selon le processeur utilisé pour faire les calculs, mais que globalement, lorsqu'il existe une solution, on finit par la trouver.

Deux leçons peuvent être tirées du cas 4. D'abord, il est vraiment essentiel de confirmer le résultat du test de passivité en utilisant le test extrême. Ensuite, il suffit d'une seule large violation pour causer des dommages au domaine temporel.

Les faibles violations de passivité ont, la plupart du temps, peu d'effet sur la simulation temporelle. Le cas 6 nous rappelle par contre qu'elles peuvent nuire à la simulation temporelle. Ce qui renforce notre conviction de corriger toutes les violations de passivité, larges ou faibles.

Tableau 6-28 : Tableau synthèse des cas

Cas	Ligne/Câble	Modèle Initial (%)	Solution	Modèle final (%)	Passivité Extrême
1	câble	QP (4,66)	PERT	QP (0,05)	O
2	câble	NP	PPD, PERT	P	O
3	câble	NP	PPD, PERT	QP (0,014)	O
4	câble	NP	PPD, PERT PPD, PERT	P	O
5	câble	NP	PPD, PERT PPD, PPD	NP	N
6	câble	QP (0,625)	PERT	P	O
7	câble	NP	PPD, REP PPD	P	O
8	Ligne	QP (5,73)	PERT	QP (0,06)	
9	câble	NP	PPD, REP	P	O

CHAPITRE 7 CONCLUSION

L'objectif de ce travail de recherche était de proposer un algorithme qui permettrait de résoudre le problème de passivité des modèles de lignes et de câbles obtenus par lissage vectoriel. Après un bref rappel sur le modèle WB et le lissage vectoriel au chapitre 1, on a étudié le concept de passivité. Le test de passivité se faisant sur un ensemble de points de fréquence, il a fallu faire des choix pour être certain de ne pas manquer des points de violation de passivité. Nous avons proposé d'utiliser une constante, appelée *PassivityFactor*, pour tenir compte des diverses situations où le test de passivité sera utilisé : en situation normale, elle prend la valeur 4, dans le module de perturbation des résidus, elle prend la valeur 1, et enfin, pour vérifier le résultat final, on fait le test extrême en fixant la valeur de la constante à 10. Partant d'une tabulation donnée, en multipliant le nombre de points de fréquence par le facteur de passivité, on diminue considérablement le risque de négliger des points de fréquence correspondant à des violations de passivité.

Il a fallu classer les cas de violations de passivité pour pouvoir appliquer la solution appropriée. Les modèles sont d'abord classés selon la taille des violations (quasi-passif ou non-passif). Et, pour catégoriser les modèles non-passifs, nous avons proposé trois types de violation. Le type 1 correspond à des violations en très haute fréquence, le type 2 correspond à des violations étalées sur une large bande de fréquence et le type 3 correspond à des violations localisées sur une faible bande de 2 décades au maximum. Le nouveau test de passivité proposé identifie à quelle classe appartiennent les modèles testés.

En partant de l'hypothèse que la passivité est causée par le lissage, on a cherché des solutions au problème de passivité en explorant des méthodes d'amélioration du lissage. On a vu que l'augmentation de l'ordre du lissage est sans effet sur les larges violations de passivité. On a montré que le lissage de l'erreur n'a pas d'impact sur la passivité. On a proposé une nouvelle manière de choisir les pôles initiaux. Cette méthode a permis de diminuer les larges violations des modèles de type 3. Un des cas présentés au chapitre 6 est résolu par cette méthode. On a constaté que les larges violations de type 1 et 2 requièrent une nouvelle tabulation des données.

La méthode de perturbation des résidus, présentée au chapitre 5, permet de résoudre avec un fort taux de succès les cas de faibles violations de passivité.

La nouvelle solution de renforcement de la passivité proposée intègre ainsi plusieurs éléments qui, utilisés seuls, donnaient des résultats mitigés, mais réunis en un tout cohérent, permettent de résoudre la majorité des problèmes de passivité rencontrés. Les faibles violations de passivité sont prises en charge par la perturbation matricielle alors que la correction des larges violations est confiée aux soins du module de repositionnement des pôles et à l'ajustement de la tabulation.

Ce travail de recherche ouvre la voie à d'autres sujets intéressants : la prédiction des violations de passivité en est une. En effet, si on est capable de prévoir, à partir des données tabulées, les régions sensibles aux problèmes de passivité, on peut adapter le lissage en ciblant ces zones à risques. Le concept de marge de positivité peut être mis à profit pour éviter de tomber dans la région négative, correspondant aux violations de passivité.

Les méthodes explorées pour la résolution des larges violations comme le lissage de l'erreur et l'augmentation de l'ordre peuvent être utilisées pour résoudre d'autres problèmes ayant pour enjeu la précision des résultats. On a démontré que ces méthodes ne résolvaient pas le problème de passivité mais qu'elles fournissaient des modèles plus précis.

Inclure un module de renforcement de la passivité au modèle WB est un processus coûteux en ressources (temps et mémoires). L'idéal serait d'avoir un modèle plus précis qui n'aurait pas besoin d'être corrigé. Malheureusement, certaines configurations de câbles (nombre élevé de conducteurs, faible longueur) entraînent de graves problèmes numériques à cause de matrices mal conditionnées. Des recherches additionnelles sont nécessaires pour résoudre ces cas problématiques.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] H. W. Dommel, *EMTP Theory Book*: Microtran Power System Analysis Corporation, 1996.
- [2] J. R. Marti, "Accurate Modelling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, vol. PAS-101, pp. 147-157, 1982.
- [3] B. Gustavsen and A. Semlyen, "Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 14, pp. 1052-1061, 1999.
- [4] H. Xiao, L. Chaudhari, L. Shaohua, S. Stanton, S. Asgari, and L. Wenyu, "A state space thermal model for HEV/EV battery using vector fitting," in *Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2012 IEEE*, 2012, pp. 1-8.
- [5] D. Deschrijver, L. Knockaert, and T. Dhaene, "A Barycentric Vector Fitting Algorithm for Efficient Macromodeling of Linear Multiport Systems," *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE*, vol. 23, pp. 60-62, 2013.
- [6] S. Lefteriu and A. C. Antoulas, "On the Convergence of the Vector-Fitting Algorithm," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, vol. 61, pp. 1435-1443, 2013.
- [7] C. R. Paul and Books24x7 Inc. (2008). *Analysis of multiconductor transmission lines, second edition (2nd ed.)* [Text].
- [8] B. Gustavsen and A. Semlyen, "Combined phase and modal domain calculation of transmission line transients based on vector fitting," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 13, pp. 596-604, 1998.
- [9] L. Kocar, J. Mahseredjian, and G. Olivier, "Weighting Method for Transient Analysis of Underground Cables," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 23, pp. 1629-1635, 2008.
- [10] D. Deschrijver, B. Gustavsen, and T. Dhaene, "Advancements in iterative methods for rational approximation in the frequency domain," *Ieee Transactions on Power Delivery*, vol. 22, pp. 1633-1642, Jul 2007.
- [11] B. Gustavsen and J. Nordstrom, "Pole Identification for The Universal Line Model Based on Trace Fitting," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 23, pp. 472-479, 2008.

- [12] A. Ubolli and B. Gustavsen, "Comparison of Methods for Rational Approximation of Simulated Time-Domain Responses: ARMA, ZD-VF, and TD-VF," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 26, pp. 279-288, 2011.
- [13] I. Kocar, J. Mahseredjian, and G. Olivier, "Improvement of Numerical Stability for the Computation of Transients in Lines and Cables," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 25, pp. 1104-1111, 2010.
- [14] A. Charest, M. Nakhla, R. Achar, and C. Changzhong, "Passivity verification and enforcement of delayed rational function macromodels from networks characterized by tabulated data," in *Signal Propagation on Interconnects, 2009. SPI '09. IEEE Workshop on*, 2009, pp. 1-4.
- [15] H. M. J. De Silva, A. M. Gole, J. E. Nordstrom, and L. M. Wedepohl, "Robust Passivity Enforcement Scheme for Time-Domain Simulation of Multi-Conductor Transmission Lines and Cables," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 25, pp. 930-938, 2010.
- [16] B. Gustavsen, "Validation of frequency-dependent transmission line models," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 20, pp. 925-933, 2005.
- [17] I. Rahimi Pordanjani and W. Xu, "Improvement of vector fitting by using a new method for selection of starting poles," *Electric Power Systems Research*, vol. 107, pp. 206-212, 2014.
- [18] G. W. Stewart and J.-g. Sun, *Matrix perturbation theory*. Boston: Academic Press, 1990.
- [19] C. Wang, Y. Li, K. Peng, Z. Wu, C. Sun, and K. Yuan, "Matrix perturbation based approach for sensitivity analysis of eigen-solutions in a microgrid," *Science China Technological Sciences*, vol. 56, pp. 237-244, 2013.
- [20] A. Esna Ashari and B. Labibi, "Application of matrix perturbation theory in robust control of large-scale systems," *Automatica*, vol. 48, pp. 1868-1873, 08// 2012.
- [21] Y. Wang, Z. Zhang, C.-K. Koh, G. Shi, G. K. H. Pang, and N. Wong, "Passivity Enforcement for Descriptor Systems Via Matrix Pencil Perturbation," *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits & Systems*, vol. 31, pp. 532-545, 04// 2012.
- [22] B. Gustavsen, "Robust passivity enforcement of frequency dependent transmission line models," in *Signal Propagation on Interconnects, 2007. SPI 2007. IEEE Workshop on*, 2007, pp. 169-172.

- [23] B. Gustavsen, "Fast Passivity Enforcement for Pole-Residue Models by Perturbation of Residue Matrix Eigenvalues," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 23, pp. 2278-2285, 2008.
- [24] B. Gustavsen, "Passivity Enforcement of Rational Models via Modal Perturbation," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 23, pp. 768-775, 2008.
- [25] D. Saraswat, R. Achar, and M. S. Nakhla, "Global passivity enforcement algorithm for macromodels of interconnect subnetworks characterized by tabulated data," *Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, IEEE Transactions on*, vol. 13, pp. 819-832, 2005.
- [26] J. C. Das, *Transients in Electrical Systems : Analysis, Recognition, and Mitigation*. New York, NY, USA: McGraw-Hill Professional Publishing, 2010.

ANNEXE 1: LISTE DES FICHIERS

fichier	Description
Mainfitter	Programme principal
HgroupFit	Lissage de H dans le domaine modal
Hfit3	Lissage de H dans le domaine de phase – calcul de l’erreur
Ycfit	Lissage de Yc + calcul de l’erreur
passivitytest	Test de passivité
makepassive	Perturbation matricielle – sous-programme principal
Perturbate_Ycdum	Perturbation des résidus
ImproveHfit	Lissage de H avec de nouveaux pôles initiaux – sous-prog. principal
HgroupFit_mod	Nouveau lissage de H dans de domaine modal
Hfit2	Nouveau lissage de H dans le domaine de phase
ErrorFit	Lissage de l’erreur – sous-prog. principal
Errhfit	Lissage de l’erreur de h
Erryfit2	Lissage de l’erreur de Yc
PassivitytestPlusError	Test de passivité qui tient compte de l’erreur
Logkspacemod1	Nouvelle répartition des pôles initiaux
extrêmePassivity	Test extrême de passivité
ImproveHfit_poles	Augmentation des pôles de H
ImproveYcfit	Augmentation des pôles de Yc
HgroupfitNew	Nouveau lissage de H dans le domaine modal après augmentation de NH
HfitNew	Nouveau lissage de Yc dans le domaine de phase après augmentation de NH
ImproveYcfit	Nouveau lissage de Yc dans le domaine de phase après augmentation de Norder